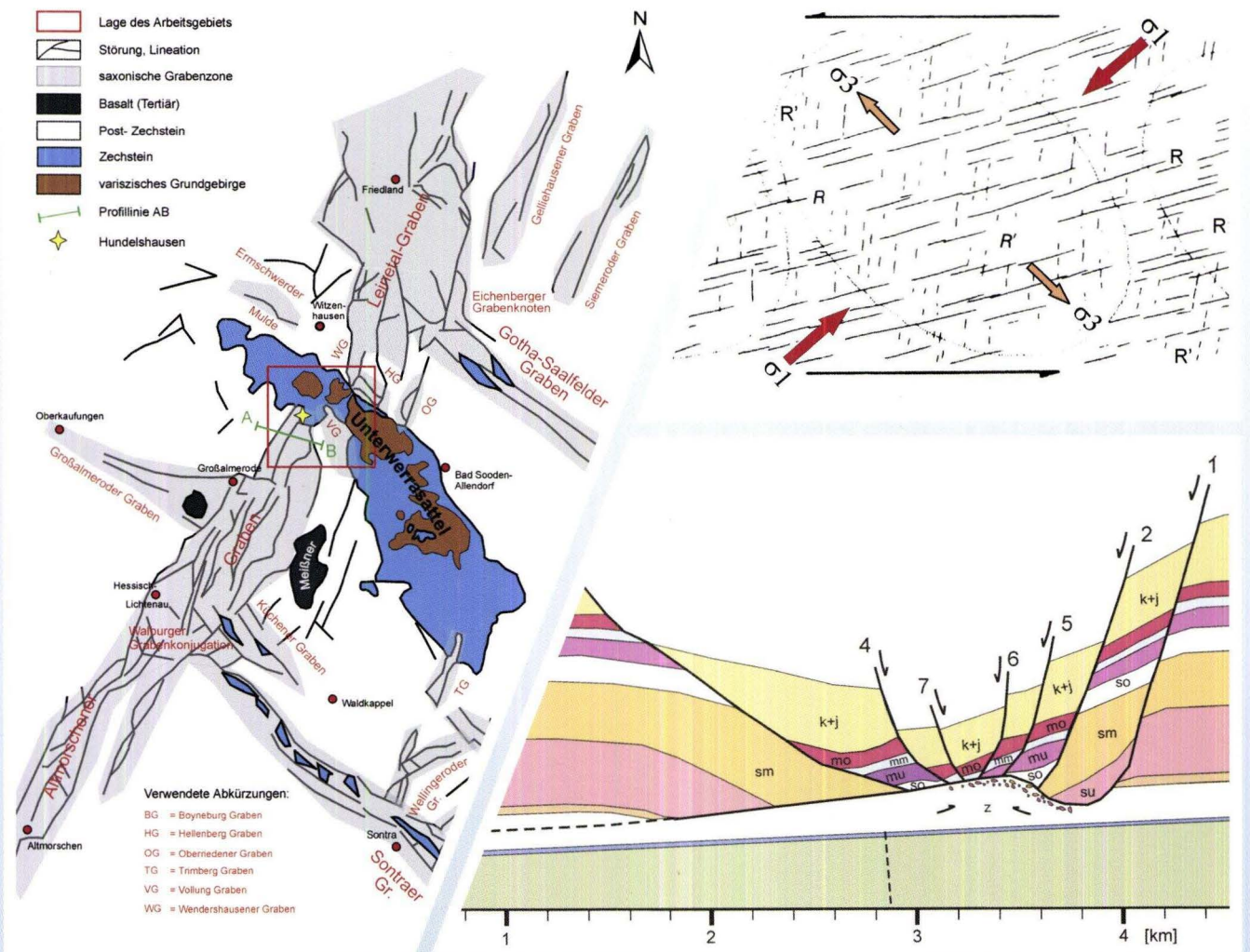




Band 135/2007

Geologisches Jahrbuch Hessen



Band 135/2007

100 Seiten, 46 Abbildungen, 8 Tabellen, 2 Tafeln, 1 Beilage; Wiesbaden 2008

ISSN 0341-4027

Geologisches Jahrbuch Hessen



Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie

Schriftleitung
Dr. Roland E. Becker
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Rheingastr. 186, 65203 Wiesbaden

Titelbilder:
Abbildungen aus dem Beitrag MÖBUS

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

© Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2008
ISSN 0341-4027

Printed in Germany

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autorinnen und Autoren allein verantwortlich.

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: Prof. Dr. Adalbert Schraft,
Susanne Küttner-Bahr, Monika Retzlaff

Vertrieb: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden
Telefon: 06 11/70 10 34; e-mail: vertrieb@hlug.de
Telefax: 06 11/97 40 813

Inhalt	Seite
H.-M. MÖBUS Die Hessischen Gräben als mehrfach duktil entkoppelte „pull apart“-Strukturen	5
N. HUG & G. VERO Ein vollständiges Zechsteinprofil im südlichen Odenwald: die hydrogeologische Erkundungsbohrung Langenthal BK2/05	25
G. RADTKE & E. MARTINI Neudefinition von stratigraphischen Einheiten im Tertiär des Mainzer und Hanauer Beckens (Deutschland, Miozän): Frankfurt-Formation (= Obere Hydrobien-Schichten)	47
D. KRAUSE & H. HAUBOLD Die Fährtenfläche bei Eiterfeld (Osthessen, Landkreis Fulda) in den <i>Chirotherium</i> -Schichten der Solling-Folge des Buntsandsteins	61

HEINZ-MARTIN MÖBUS¹

Die Hessischen Gräben als mehrfach duktil entkoppelte „pull apart“-Strukturen

Kurzfassung

Im Kreuzungsbereich des Unterwerrasattels mit dem Altmorscher Graben und dem Leinetal-Graben treten unter scheinbar widersinnigen Lagerungsverhältnissen sowohl allochthone Triasschollen als auch allochthone Zechsteinschollen auf. Die Analyse dieser Schollen lässt für den Altmorscher Graben einen dreigeteilten tektonischen Stockwerksbau erkennen: ein durch Extension geprägtes Postzechsteinsalinar-Stockwerk, ein durch gleichzeitige Kompressions- und Extensionsstrukturen gekennzeichnetes, duktil deformiertes Zechsteinsalinar-Stockwerk sowie ein sprödes und nahezu ungestörtes Präsalinar-Stockwerk oder „Basement“. Für die vorgefundenen „Rollover“- , Kipp-, Gleit- und allochthonen Schollen des Postzechsteinsalinar-Stockwerks, die extensiven „Detachments“ und den kompressiven Schuppenbau des Zechsteinsalinar-Stockwerks sowie die Scherverschiebungen des Präsalinar-Stockwerks wurde das tektonische Modell einer mehrfach duktil entkoppelten „pull apart“-Struktur entwickelt, die eine palinspastische Rekonstruktion des Altmor-

scher Grabens erlaubt.

Übertragen auf die benachbarten saxonischen Gräben der Hessischen Senke ist folgender tektonomechanischer Werdegang anzunehmen: Während der Jura/Kreide-Wende wurde Mitteleuropa einer „simple shear“-Beanspruchung ausgesetzt, die innerhalb des Basements zur Anlage von Scharen konjugierter Riedelscherbrüche (R und R') führte. Über den gestaffelt („en échelon“) angeordneten Teilsegmenten der Riedelscherbrüche entwickelten sich, unter den Bedingungen der Transtension, mehrfach duktil entkoppelte, lang durchhaltende „pull apart“-Strukturen, die sich räumlich weit über die Grenzen der verursachenden Tiefenbrüche entfalteteten und synchron zu einem System rheinischer und herzynischer Grabenbrüche ausdehnten.

Die duktile Entkopplung fand vor allem in den Sulfaten des Zechsteinsalinars (A1) sowie in den intramesozoischen Evaporitlagern des Postzechsteinsalinar-Stockwerks (vor allem Röt und Mittlerer Muschelkalk) statt.

Abstract

In the crossing area of the hercynian (NW–SE) striking Unterwerra anticline (Central Germany, northern Hesse) with the Saxonian grabens of Altmorschen and Leine-valley occur various allochthonous Triassic and Zechstein blocks showing an apparently paradoxical tectonic style. In order to analyse the tectonic structure of these exotic blocks the northwestern region of the Unterwerra anticline was newly geologically mapped and interpreted. Disharmonic tectonics were recognised, divided into three levels: a Postzechsteinsalinar level at the top, characterised by extension; a ductile deformed Zechsteinsalinar level in the middle, showing both extensional and compressional structures and a brittle, nearly undeformed presalinar level as basement. A palinspastic reconstruction was carried out to explain the rollover-, tilt-, slide- and allochthonous blocks of the Postzechsteinsalinar level, the extensive detachments and the compressive imbrication of the Zechsteinsalinar level and also the strike-slip faults within the basement. From this constructive retrodeformation a tectono-mechanical model for the development of the Saxonian grabens inside the Hessian depression was deduced: during Late Jurassic to Early Cretaceous times the basement of Central Europe was ruled by simple shear, forming conjugated, en échelon Riedel shears (R and R') or pure strike-slip faults respectively. Above divergent stepovers (transtension) multiple detached ductile pull-apart structures developed, expanding far beyond the underlying deep fractures. The evolving single pull-apart structures grew together to linear rhenish (NNE–SSW) and hercynian striking graben-systems. The ductile detachment took place in the sulphates of the Werra Anhydrite (A1) and in the intramesozoic evaporites of the Postzechsteinsalinar level.

¹ Dr. H.-M. Möbus (e-mail: heinz-martin.moebus@rpf.bwl.de), Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Kaiserstuhlstr. 28, 79106 Freiburg

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Die Hessischen Gräben	6
2.1 Charakteristika der Hessischen Gräben	6
2.2 Bisherige Modellvorstellungen über die Tektonomechanik der Hessischen Gräben	8
3. Lagerungsverhältnisse am nördlichen Ende des Altmorschener Grabens	9
3.1 Allocthone Triasschollen	9
3.2 Allocthone Zechsteinschollen und kompressiver Schuppenbau	10
3.3 Schichtwiederholungen im Zechsteinsalinar	10
3.4 Geologischer Profilschnitt	10
4. Tektonische Stockwerksgliederung	11
4.1 Präsalinar-Stockwerk (do–Ca1)	12
4.2 Zechsteinsalinar-Stockwerk (A1–z6)	12
4.3 Postzechsteinsalinar-Stockwerk (z7–j)	13
5. Tektonomechanisches Modell für den Altmorschener Graben	16
5.1 Modell einer mehrfach duktil entkoppelten „pull apart“-Struktur	16
5.2 Bewegungen der tektonischen Stockwerke	17
5.2.1 Blattverschiebungen im Präsalinar-Stockwerk (do–Ca1)	17
5.2.2 Bewegungen im Zechsteinsalinar-Stockwerk (A1–z6)	17
5.2.3 Bewegungen im Postzechsteinsalinar-Stockwerk (z7–j)	18
6. Geodynamische Interpretation saxonischer Gräben der Hessischen Senke	19
6.1 Großtektonisches Spannungsfeld	19
6.2 Motor der isochronen und gleichberechtigten Genese rheinischer und herzynischer Grabenbrüche	20
7. Schlussfolgerungen	21
8. Schriftenverzeichnis	22

1. Einleitung

Die Hessischen Gräben sind seit etwa 150 Jahren Bestandteil regional-geologischer Forschungen. Aus den recht intensiven Untersuchungen der Vergangenheit entwickelten sich bis heute verschiedenste Modelle über die Genese dieser auch unter dem Begriff „saxonische Gräben“ bekannten Bruchstrukturen. So herrschen z.B. unterschiedliche Auffassungen über den Tiefgang der Gräben, über die Entwicklung gleichberechtigter Vereinigungen der rheinisch (NNE–SSW) und herzynisch (WNW–ESE) streichenden Grabensysteme sowie über den eigentlichen tektonischen Motor der saxonischen Grabenbildung.

Zur Beantwortung der offenen bzw. noch in Diskussion befindlichen Fragen wurde der Kreuzungsbereich des Unterrassattels mit dem Altmorschener Graben und dem Leinetal-Graben von MÖBUS (2004) neu geologisch bearbeitet. Anhand der neuen Erkenntnisse konnte ein tektonomechanisches Modell entwickelt werden, das sowohl die komplexen Lagerungsverhältnisse des Altmorschener Grabens erklären kann als auch auf die saxonischen Gräben der Hessischen Senke übertragbar ist.

Zur Beantwortung der offenen bzw. noch in Diskussion befindlichen Fragen wurde der Kreuzungsbereich des Unterrassattels mit dem Altmorschener Graben und dem Leinetal-Graben von MÖBUS (2004) neu geologisch bearbeitet. Anhand der neuen Erkenntnisse konnte ein tektonomechanisches Modell entwickelt werden, das sowohl die komplexen Lagerungsverhältnisse des Altmorschener Grabens erklären kann als auch auf die saxonischen Gräben der Hessischen Senke übertragbar ist.

2. Die Hessischen Gräben

2.1 Charakteristika der Hessischen Gräben

Unter dem Begriff der Hessischen Gräben werden all jene Grabenstrukturen der Hessischen Senke und des westlichen Thüringer Beckens zusammengefasst, die als Ergebnis der sog. saxonischen oder germanotypen Tektonik angesehen

werden (STILLE 1923, 1925, 1930; RICHTER-BERNBURG 1968, 1977; MÖBUS 2004). Einen Ausschnitt der Hessischen Senke mit charakteristischen saxonischen Grabenzonen zeigt Abb. 1.

Die Anlage der Gräben ist jungkimmerisch, d. h. die Hauptbewegungen erfolgten an der Jura/Kreide-Wende (DIETZ 1925,

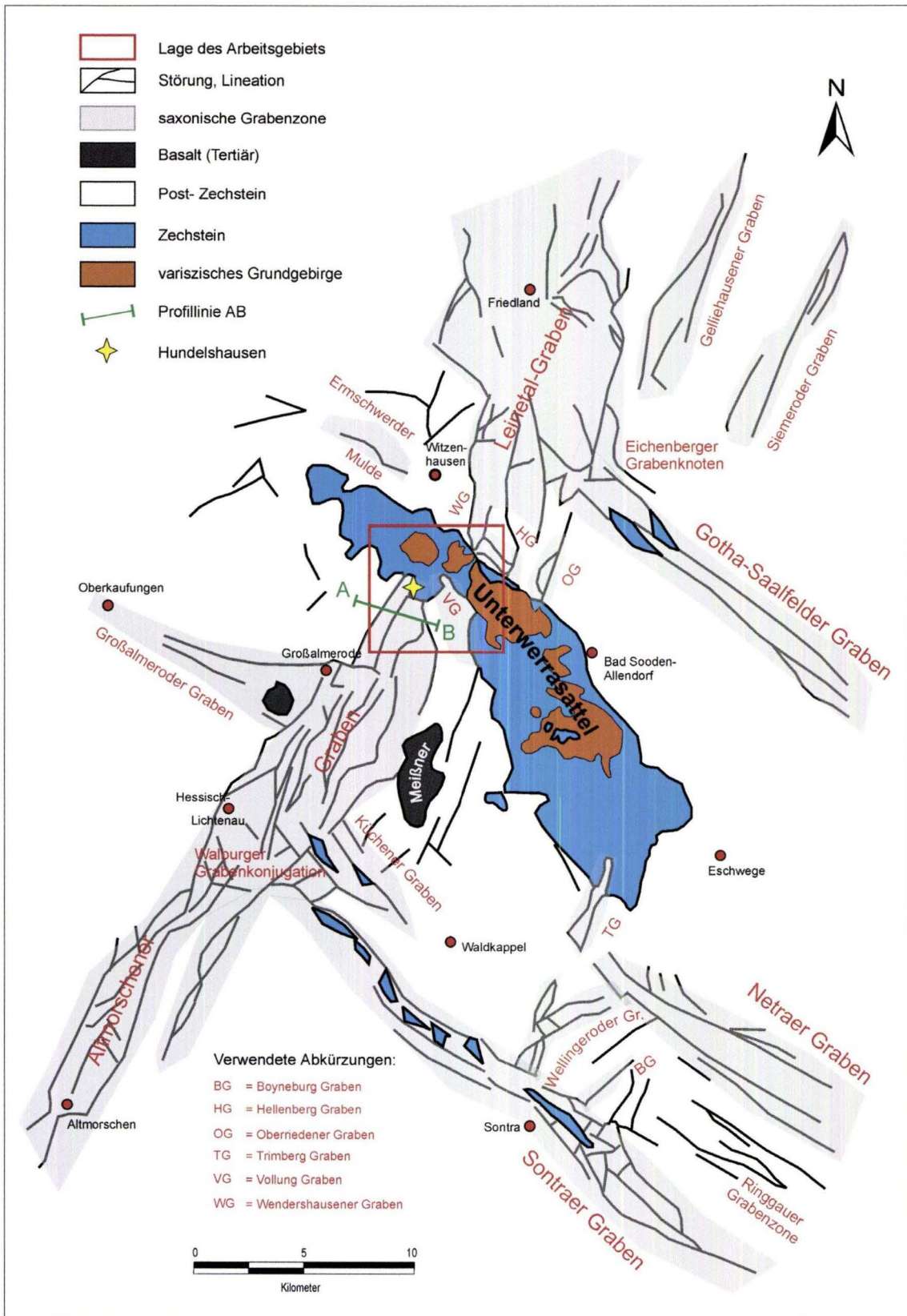


Abb. 1. Teil der Hessischen Senke mit Unterwerrassattel sowie rheinisch und herzynisch streichenden saxonischen Grabenzonen (Hessische Gräben).

SCHRÖDER 1976, MEIBURG 1982). Schwächere Sekundär- bzw. Nachbewegungen können bis ins jüngste Tertiär (GRUMBT & LÜTZNER 1983, LAEMMLEN 1994) reichen. Die Terminologie der Hessischen Gräben wird vornehmlich von innerhalb oder randlich der Grabenstruktur gelegenen, größeren Ortschaften abgeleitet. So gliedert sich z.B. die im weiteren als Altmorschener Graben bezeichnete Altmorschen-Hessisch Lichtenauer Grabenzone in mehrere Teilstücke: im Süden als Beisheimer Graben mit dem Grabenknie von Wichte (MIXIUS 1940), in der Mitte als Altmorschener bzw. Spangenberg und in nördlicher Erstreckung als Hessisch Lichtenauer Graben.

Die saxonischen Gräben sind innerhalb der Hessischen Senke und im westlichen Thüringer Becken vor allem an die Verbreitung von Zechstein-Evaporiten geknüpft und hauptsächlich im mesozoischen Deckgebirge erkennbar. Es handelt sich um etwa auf das Niveau des Mittleren und Unteren Buntsandsteins eingesunkene Röt-, Muschelkalk- und Keuperschollen, z.T. mit Resten von Lias und Kreide. Die vertikalen Sprunghöhen vom Grabenrand zum Grabenzentrum liegen deutlich über 150 m.

Die Hessischen Gräben streichen vorzugsweise in rheinische und herzynische Richtung, untergeordnet kommen eggisches und erzgebirgisches Streichen vor. Ihre Längserstreckung entspricht einem Vielfachen der Breite, im Idealfall sind sie langgestreckt-rhombenförmig. Die Gräben halten meistens einige Zehnerkilometer in einer Richtung durch und erscheinen in Luft- und Satellitenbildern als Lineamente. Die Grabenbrüche setzen manchmal aus, sind segmentiert, bajonettartig verspringend oder sind, wie z.B. das Grabenknie bei Wichte, sigmoidal verbogen (BECKER & LAEMMLEN 1988).

Die Gräben enden durch sukzessive Abnahme der Sprunghöhen, d.h. sie schwänzen bzw. spitzen aus. In Luft- und Satellitenbildern sind die Hauptverwerfungen am Ende der kartiertechnisch erfassbaren Grabenstrukturen noch bis zu mehrere Kilometer in Streichrichtung erkennbar. Die durchschnittliche Breite reicht von mehreren hundert Metern bis zu einigen Kilometern.

Zwischen parallel verlaufenden Grabenbrüchen existieren relativ ungestörte, bis zu mehrere Zehnerkilometer breite Regionen. Winkelig zueinander streichende Gräben (z.B. rheinisch und herzynisch) laufen ineinander und können sich vereinigen (sog. Grabenknoten bzw. Grabenkonjugationen). Dabei sind keine Vorzugsrichtungen oder bevorzugte Altersstellungen der einen oder anderen Richtung erkennbar (KLOHN 1930, MEIBURG 1982).

Als weitere Besonderheit treten am Rand sowie im Zentrum der Hessischen Gräben sog. „Mittelhorste“ und „Zechsteinhorste“ auf (LEMMER & RAMBOW 1994). Die „Mittelhorste“ bestehen zumeist aus Buntsandstein und Muschelkalk. Die „Zechsteinhorste“ existieren vor allem innerhalb herzynischer Gräben (z.B. Sontraer Graben, Kasseler Graben, Gotha-

Saalfelder Graben) und sind zumeist stark gestört, langgestreckt-zwickelförmig und liegen als teilweise aufgepresste Fremdschollen in Gesteinen der Trias.

2.2 Bisherige Modellvorstellungen über die Tektonomechanik der Hessischen Gräben

Bereits die frühen Autoren beobachteten innerhalb der Hessischen Gräben das Nebeneinander von Ausweitungs- und Einengungsformen und postulieren für die saxonischen Bruch- und Faltungsvorgänge einen mehrfachen Wechsel von Zerrung und Pressung (BOSSE 1931, MARTINI 1937, LOTZE 1938), den sie auf horizontal wirkende tangentielle Kräfte zurückführen. KLOHN (1930), STILLE (1923,1925) und WAGENBRETH (1963) verwenden den Begriff der „gepressten Zerrgräben“. MIXIUS (1940) und RICHTER-BERNBURG (1977) schreiben der Genese der rheinisch streichenden Gräben hauptsächlich extensive und der Entstehung herzynischer Gräben vor allem kompressive Kräfte zu.

Andere Veröffentlichungen (WUNDERLICH 1973, ILLIES 1975, SCHRÖDER 1976, GRUMBT & LÜTZNER 1983) gehen von einem sowohl in der Richtung als auch zeitlich wechselnden regionalen Spannungsfeld aus, das zu unterschiedlichen Altersansprachen der Hauptbruchrichtungen geführt hat. Demnach sollen herzynische Bruchlinien in der oberen Kreide entstanden sein, während die jüngeren rheinisch streichenden Strukturen mit der Taphrogenese des Oberrheintals an der Wende Eozän/Oligozän im Zusammenhang stehen sollen.

MEIBURG (1982) kommt für die Hessischen Gräben zu anderen Schlüssen. Er macht für die Genese der Solling-Scholle und ihrer benachbarten Grabenstrukturen (z.B. Altmorschener, Fritzlärer, Kasseler Graben, etc.) ein gravitatives Abgleiten entkoppelter, über dem Zechsteinsalz liegender Deckgebirgs-Einheiten entlang des Egge-Lineaments verantwortlich. Der rechtsdrehenden, horizontalen Schollengleitung der Deckschichten soll eine Kippung des Untergrunds um 1,4° nach Norden an der Jura-Kreide-Grenze unmittelbar vorausgegangen sein. Die in unterschiedliche Richtungen streichenden saxonischen Gräben sind demnach isochroner Entstehung.

Aus der Sicht von PRINZ (1988) sowie NAUMANN & PRINZ (1989) entstanden die Hessischen Gräben im Zuge der alpidischen Orogenese und der Öffnung des Nordatlantiks. Hierbei kam es durch horizontal wirkende tiefkrustale Schubspannung aus SE zu einer Wiederbelebung altangelegter Strukturen. Diese bruchmechanischen Vorgänge pausierten sich, wie von MANDL (1988) beschrieben, durch den ehemals 1000–2000 m mächtigen mesozoischen Sedimentstapel und führten zur Ausbildung eines Bruchschollenlandes mit Extensions- und Kompressionsformen.

MICHAEL (1997) versteht die durch eingemuldete bzw. ein-

gekippte Hangendschichten gekennzeichneten saxonischen Gräben im Buntsandsteingebirge Nord- und Ost Hessens als Scherbrüche, die sich als Antwort auf transpressive Deformation im nördlichen Vorland der alpinen Kollisionsfront zwischen konjugierten Scherverschiebungen („strike slip faults“) gebildet haben. Zerrung und Pressung sollen sich hierbei zeitlich ablösen und haben gemeinsamen Anteil an der Ausbil-

dung der Graben- und Horst-Strukturen.

SCHREIBER & ROTSCH (1998) erkennen zwar die primäre Anlage der Hessischen Gräben als mesozoische Bruchsysteme an, sagen aber, dass die hauptsächliche Reaktivierung und Ausgestaltung erst seit dem Oligozän geschehen ist und machen dafür Rotationsbewegungen des Rheinischen Schildes durch konjugierte Scherbruchsysteme verantwortlich.

3. Lagerungsverhältnisse am nördlichen Ende des Altmorschener Grabens

Das Nordende des Altmorschener Grabens sowie die Verlängerung der Grabenstruktur im Bereich des Unterwerrassattels sind durch tektonisch stark beanspruchte und zerlegte Gebirgsschollen aus Trias und Zechstein geprägt. Durch die Aufwölbung des Unterwerrassattels ergibt sich ein einzigartiger Einblick in die Wurzelzonen saxonischer Grabenbrüche der Hessischen Senke. Das in Abb. 1 rot markierte Arbeitsgebiet mit der Ortschaft Hundelshausen wurde von MÖBUS im

Zeitraum 2001 bis 2002 geologisch neu kartiert. Zusätzlich zu den bereits von MOESTA (1884) und zuletzt von HOLZAPFEL (1998) beschriebenen allochthonen Triasschollen wurden bisher unbekannte tektonische Späne einer in Werra-Sulfaten (A1) eingeschuppten Scholle der Fulda-Folge (z7) entdeckt. Im Folgenden werden die Lagerungsverhältnisse des Arbeitsgebiets anhand charakteristischer Beispiele beschrieben.

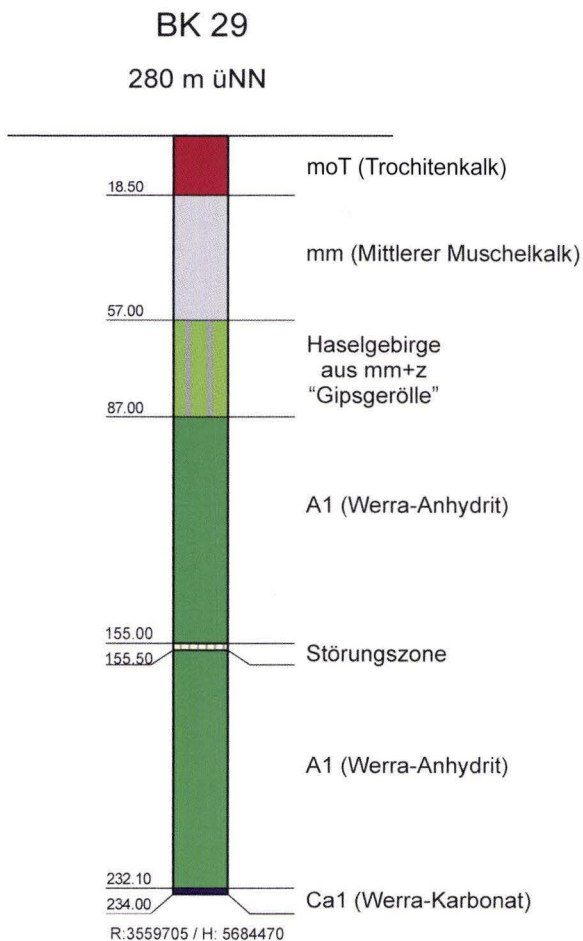


Abb. 2. Erkundungsbohrung „Hundelshausen 29“ (nach HOLZAPFEL 1998).

3.1 Allochthone Triasschollen

In der Verlängerung des Altmorschener Grabens auf den Unterwerrassattel treten scheinbar wahllos verteilte Schollen triassischer Gesteine auf, die vor allem dem Werra-Sulfat (A1) und dem Staßfurt-Karbonat (Ca2) diskordant auflagern. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel dafür ist der Gottesberg, der unmittelbar östlich von Hundelshausen von dem ehemaligen Steinbruch der Kurhessischen Gipswerke Peter Orth angeschnitten ist. Es handelt sich dabei um eine längsovale, etwa 150 m lange und maximal etwa 60 m mächtige Scholle aus Mittlerem und Oberem Muschelkalk, die völlig losgelöst von ihrem stratigraphisch Liegenden flach auf steil gestellten Sulfaten der Werra-Folge (A1) auflagert. Die Gesteinsabfolge des Gottesbergs wurde von der 234 m tiefen Erkundungsbohrung „Hundelshausen 29“ vollständig durchteuft und von HOLZAPFEL (1998) beschrieben (Abb. 2).

Unter 18,5 m schillführendem Oberem Muschelkalk liegen zunächst 38,5 m Mergelsteine des Mittleren Muschelkalks. Danach folgen rund 30 m ineinander verschuppte, laminiert-brekzierte, gelbliche Sulfatgesteine, die sowohl aus Mittlerem Muschelkalk als auch aus dem Anhydrit der Werra-Folge gebildet werden. Die Basis dieser verschuppten Sulfate bildet eine in 87 m Teufe erbohrte 2 m mächtige, haselgebirgsartige Brekzie aus Tonstein und schwach kantengerundeten Gipsgesteinsbruchstücken (sog. „Gips-Geröllen“). Darunter folgt etwa 150 m mächtiger, z.T. stark verfalteter Anhydrit der Werra-Folge (A1). Erwähnenswert sind rund 0,5 m mächtige, von roten Tonen durchzogene Störungsbrekzien in 155 m Teufe, die etwa 80 m liegenden A1 von ca. 70 m hangenden A1 trennen (HELDMAIER 1992). Die Basis bildet das Werra-Karbonat (Ca1).

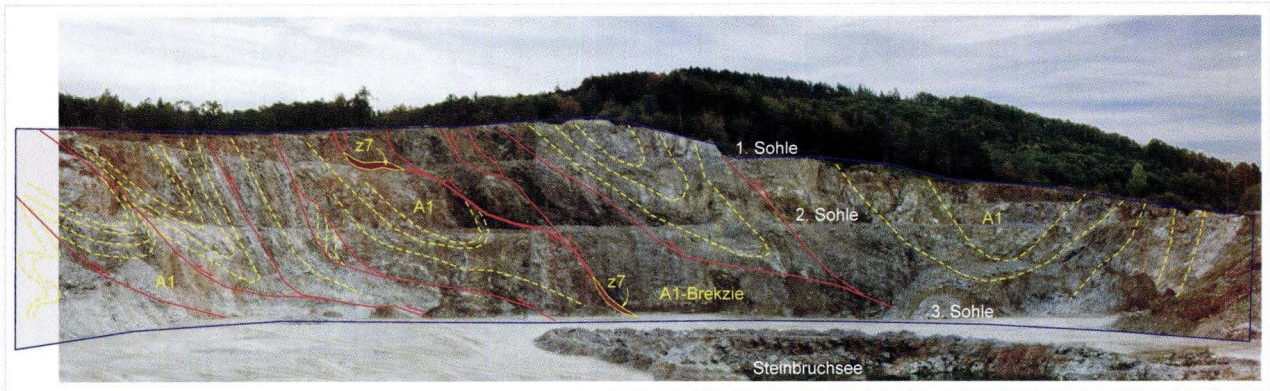


Abb. 3. Fotomontage der Abbauwände des Steinbruchs Orth mit kompressivem Schuppenbau des Werra-Anhydrits (A1) und allochthonen Spänen der Fulda-Folge (z7).

3.2 Allochthone Zechsteinschollen und kompressiver Schuppenbau

Ähnlich ungewöhnlich wie die allochthonen Triasschollen sind in Werra-Sulfaten (A1) eingeschuppte Ton/Schluff- und Sandsteinschollen der Fulda-Folge (z7), ehemals Bröckelschiefer-Folge genannt, die im aktiven Steinbruch Orth beeindruckend aufgeschlossen sind. In dem etwa 350 m breiten Steinbruch, der in der Verlängerung des Altmorschener Grabens liegt, werden Sulfate der Werra-Folge (A1) abgebaut. Die bis zu 60 m tiefen östlichen Abbauwände sind als Fotomontage (Abb. 3) dargestellt.

Im Steinbruch lassen sich große, nordvergente Faltenstrukturen mit Amplituden im Dekameter-Bereich auskartieren, die als gestrichelte gelbe Linien (sedimentäre Schichtung) eingezeichnet sind und einem kompressiven Schuppenbau

mit hinter- bzw. übereinanderliegenden, abzweigenden und auffächernden listrischen Überschiebungsbahnen (rote Linien) angehören. Die in dickerer Linienstärke dargestellte zentrale, in Rampen und Flachbahnen gegliederte Überschiebung enthält ausgewalzte Reste schokoladebrauner Ton/Schluffsteine sowie hellroter Sandsteine der Fulda-Folge (z7), die in brauner Farbe nachgezeichnet sind.

3.3 Schichtwiederholungen im Zechstein-salinar

In der rund 117 m tiefen Erkundungsbohrung „Hundelshausen 66“, die ca. 460 m südlich der Kirche von Hundelshausen niedergebracht wurde, fanden sich nach HOLZAPFEL (1998) unter 24 m Staßfurt-Karbonat (Ca2) etwa 16 m Sulfate der Werra-Folge (A1). Es schließt sich eine 2,5 m mächtige Störungsbrekzie an, unter der etwa 20 m Sulfate und Tonsteine der Staßfurt-Folge (A2) anstehen, die ihrerseits dem 38 m mächtigen Staßfurt-Karbonat (Ca2) auflagern. Die Bohrung endet im Werra-Anhydrit (A1).

In der näheren Umgebung der BK 66 sind keine Hinweise auf eine alle Stockwerke durchbrechende Verwerfung erkennbar. Die Überschiebung bleibt auf die evaporitischen Zechsteinserien beschränkt (MÖBUS 2004).

3.4 Geologischer Profilschnitt

Als ein Ergebnis der geologischen Neuaufnahme wurde ein charakteristischer, nur unwesentlich schematisierter Profilschnitt A–B etwa senkrecht durch das Nordende des Altmorschener Grabens erstellt (Abb. 5). Die ungefähre Lage der Profillinie A–B ist in Abb. 1 eingetragen. Den Zustand des Grabens vor der Erosion zeigt Abb. 6.

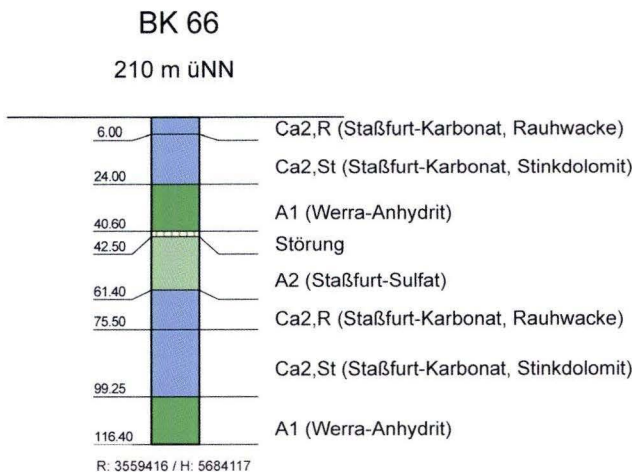


Abb. 4. Erkundungsbohrung „Hundelshausen 66“ (nach HOLZAPFEL 1998).

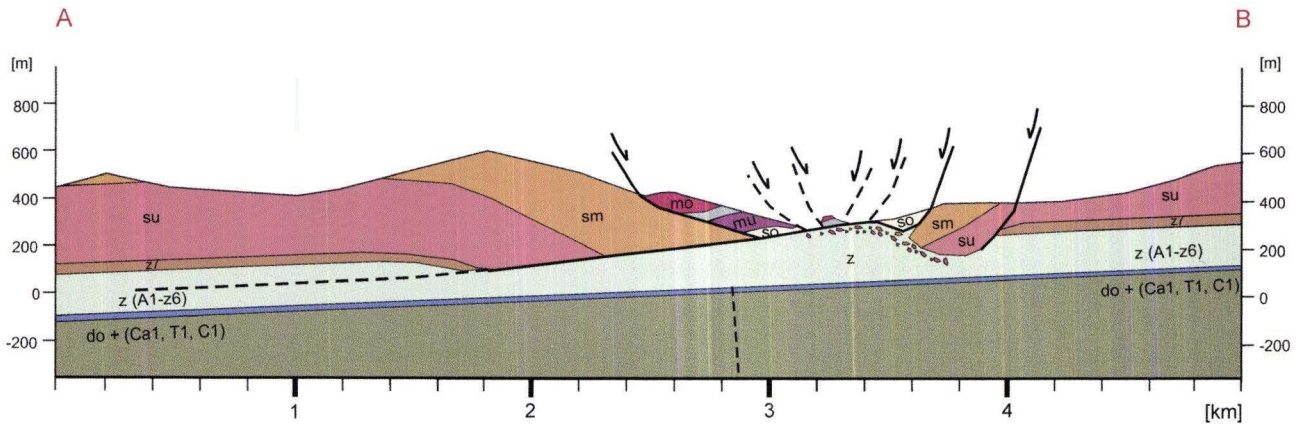


Abb. 5. Geologischer Profilschnitt A–B, leicht schematisiert; etwa senkrecht durch das Nordende des Altmorscher Grabens (Lage vgl. Abb. 1).

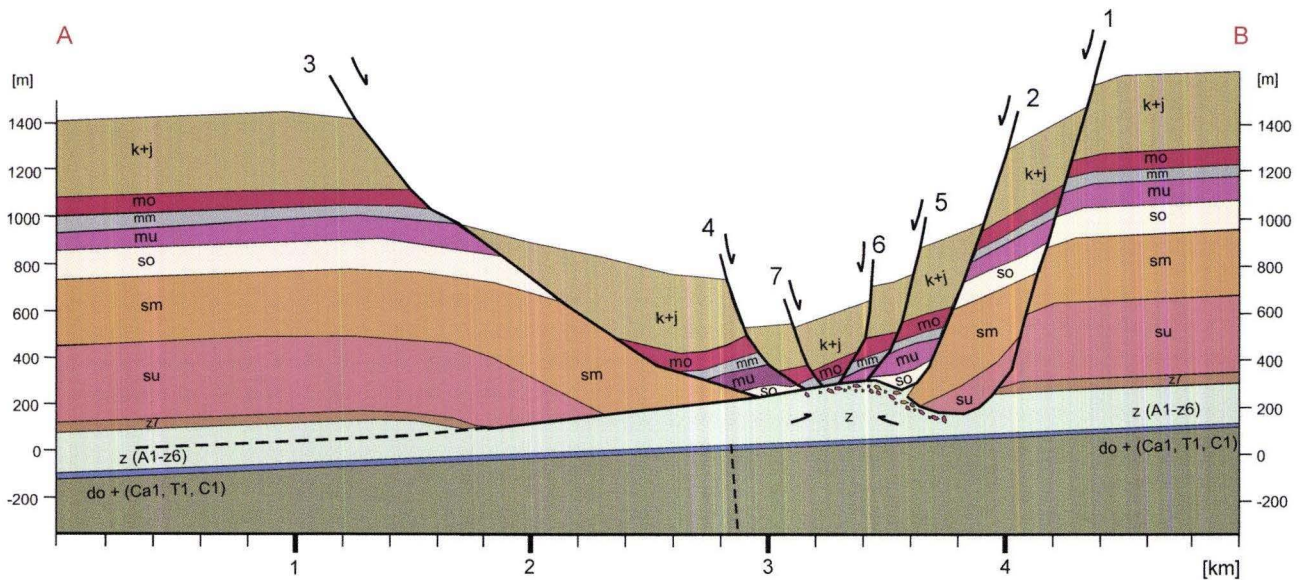


Abb. 6. Rekonstruktion des Altmorscher Grabens vor der Erosion; die Zahlen geben die zeitliche Reihenfolge der Bruchentwicklung an.

4. Tektonische Stockwerksgliederung

Die oben beispielhaft beschriebenen, außergewöhnlichen und scheinbar unübersichtlichen Lagerungsverhältnisse der verschiedenen Gebirgseinheiten lassen für den Altmorscher Graben wiederkehrende, eindeutige Gesetzmäßigkeiten erkennen. Anhand der ähnlichen Gesteinsausbildung sowie des analogen tektonomechanischen Verhaltens können die kartierten stratigraphischen Einheiten drei tektonischen Stockwerken zugeordnet werden: dem liegenden Präsalinar-Stockwerk, dem Zechsteinsalinar-Stockwerk und dem hangenden Postzechsteinsalinar-Stockwerk (Abb. 7).

Der Begriff „Salinar-Stockwerk“ wird in dieser Arbeit auf alle diejenigen Gesteinsschichten bezogen, die hauptsächlich aus Evaporiten aufgebaut sind und die bei tektonischer Beanspruchung mit einer duktilen, der Salzttektonik ähnlichen Deformation reagieren können. Wie die Beobachtungen im Gelände zeigen, sind dem tektonischen Salinar deshalb nicht nur die Chloride (Halit, Sylvin, usw.), sondern ebenfalls die Sulfate (Gips, Anhydrit) zugehörig, da letztere unter bestimmten Bedingungen ebenfalls Fließverhalten zeigen (MÖBUS 2004).

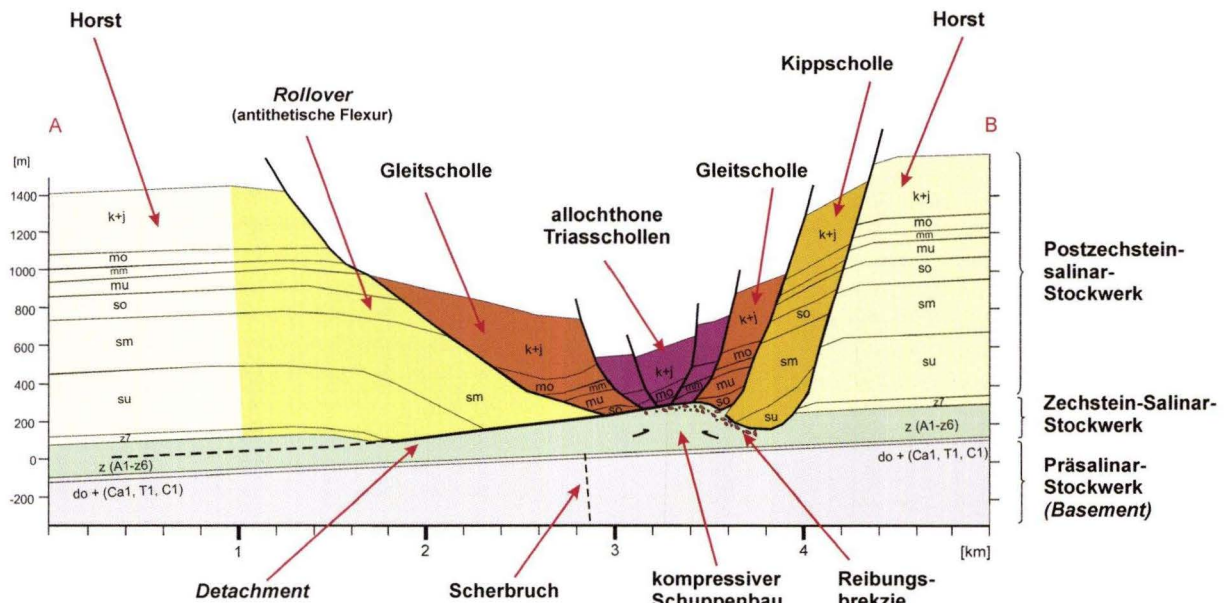


Abb. 7. Tektonische Stockwerks- und Schollengliederung des Altmorschener Grabens.

4.1 Präsalinar-Stockwerk (do–Ca1)

Das Präsalinar-Stockwerk oder „Basement“ umfasst den variszischen Untergrund (do), die Siliziklastika des Rotliegend (r) sowie die prä-sulfatischen Ablagerungen der Werra-Folge (C1, T1, Ca1). Das „Basement“ stellt einen auf Beanspruchung einheitlich spröde reagierenden Gebirgsverband dar (Abb. 7) und bildet den flach aufgewölbten, herzynisch streichenden, leicht NE-vergenten Unterwerrassattel (vgl. Tiefenlinienplan des Kupferschiefers von KULICK et al. 1984).

Definierbare Schollen im Sinne separierter, rotierter und von Störungen völlig durchtrennter Gebirgsabschnitte wurden nicht vorgefunden. Die Sprunghöhen der kartierbaren Scherbrüche liegen im Zehnermeter-Bereich und erreichen an wenigen Stellen maximal 100 m vertikalen Versatz. Ein Einfluss der saxonischen Gräben ist im Präsalinar-Stockwerk nicht erkennbar. Weder die Schollengliederung des Postzechsteinsalinar-Stockwerks noch die Strukturen im Zechsteinsalinar-Stockwerk finden eine Fortsetzung in der weitgespannten Aufwölbung des Unterwerrassattels. Vielmehr wurden bei der deutlich jüngeren Ausgestaltung des Unterwerrassattels in Kreide und Tertiär die hangenden Stockwerke passiv mitbewegt und ebenfalls herausgehoben.

Eindeutig ist zu erkennen, dass der Altmorschener Graben am SW-Rand des Unterwerrassattels sukzessive aushebt, um am NE-Rand als Leinetal-Graben wieder einzusetzen. Die saxonischen Gräben bleiben auf das Niveau des Postzechsteinsalinar-Stockwerks beschränkt und enden in duktilen Schichtgliedern des Zechsteinsalinar-Stockwerks.

4.2 Zechsteinsalinar-Stockwerk (A1–z6)

Das Zechsteinsalinar-Stockwerk (Abb. 7) ist am westlichen Unterwerrassattel durchschnittlich 250 m mächtig, beginnt mit dem Werra-Anhydrit (A1) und endet mit den Oberen Letten (A3–z6). Das in sich heterogen aufgebaute Zechsteinsalinar-Stockwerk reagiert auf mechanische Beanspruchung unterschiedlich. Während die Zehnermeter mächtigen, kompetenten Karbonate der Staßfurt (Ca2)- und Leine-Folge (Ca3) spröde reagieren, zeigen die etwa 80 bis 100 m mächtigen Sulfate des Werra-Anhydrits (A1) sowie die deutlich geringer mächtigen Staßfurt (A2)- und Leine (A3)- Sulfate vor allem duktilen Verhalten. Die Pelite der „Oberen“ und „Unteren Letten“ nehmen in mechanischer Sicht eine Mittlerstellung ein und zeigen Zähbruch.

Charakteristisch für die Tektonik des Zechsteinsalinar-Stockwerks ist die gleichzeitige Existenz von extremen Kompressions- und Extensionsstrukturen. Neben einer Zone mit kompressivem Schuppenbau und Schichtwiederholungen lassen sich Quadratkilometer große, subhorizontale Abscherbahnen („Detachments“) in Form von Reibungssteppichen aushalten.

Subhorizontale Abscherbahnen oder „Detachments“

Die flachen, subhorizontalen Abscherbahnen oder „Detachments“ sind als unterschiedlich mächtige, sehr heterogen zusammengesetzte, tektonische Brekzien und Kataklastite erkennbar und können als duktile Entkopplungshorizonte bzw. „kalte Deckengrenzen“ angesehen werden (Abb. 7). Während

sie z.B. unter der allochthonen Triasscholle des Gottesbergs als haselgebirgsartig zerscherte bzw. ineinander geschuppte Sulfate aus Muschelkalk und Zechstein entwickelt sind (Abb. 2), bilden sie in der Umrandung des Steinbruchs Orth großflächige Reibungsteppiche mit unterschiedlich großen Fragmenten aus Unterem Buntsandstein, Röt, Muschelkalk sowie Gesteinen der Fulda-Folge, die mit liegenden Zechsteinsedimenten vermischt sind.

Die „Detachments“ liegen innerhalb der unteren Zechsteineinheiten und sind in Rampen und Flachbahnen gegliedert (vgl. Taf. 1+2). Dabei bilden die kompetenten und spröde reagierenden Zechsteinkarbonate die Rampen und die inkompetenten Evaporite inklusive Pelite die Flachbahnen. Besonders lange Flachbahnen werden von den gering mächtigen, tonig-evaporitischen Staßfurt-Einheiten gebildet, die vom Staßfurt-Karbonat (Ca2) unterlagert werden. Die finale, horizontale Abscherbahn liegt innerhalb der duktilen Werra-Sulfate (A1) und läuft senkrecht zur Streichrichtung des Grabens unter den angrenzenden Hoch- bzw. Horstschollen aus. Im zentralen Bereich des Grabens können „Detachments“ durch Fließvorgänge und Ausgleichsbewegungen in Form von Auf- und Überschiebungen duktiler Zechsteinschichten überprägt sein (Abb. 3).

Kompressiver Schuppenbau

Die Zone des kompressiven Schuppenbaus und der Schichtwiederholungen ist lediglich einige hundert Meter breit, nur in der zentralen Achse des Altmorschener Grabens nachzuweisen und streng auf das duktile Zechsteinsalinar-Stockwerk begrenzt. Beispiele hierfür finden sich im Steinbruch Orth (Abb. 3) sowie in den Ergebnissen der Erkundungsbohrungen „Hundelshausen 29, 36, 65 und 66“ (HOLZAPFEL 1998, MÖBUS 2004).

4.3 Postzechsteinsalinar-Stockwerk (z7-j)

Dem überwiegend spröde reagierenden Postzechsteinsalinar-Stockwerk werden die Gesteine der Fulda-Folge (z7), die Abfolgen der Trias (s, m, k) und – soweit ehemals vorhanden – des Juras (j) und der Kreide (kr) zugeordnet (Abb. 6). Insgesamt handelt es sich beim Postzechsteinsalinar-Stockwerk im Bereich des Unterwerrasattels um eine Abfolge von überschlägig etwa 1200 m Sand-, Ton- und Kalksteinen, die fast ausschließlich extensionale Strukturelemente in Form von Horst-, „Rollover“- , Kipp- und Gleitschollen sowie allochthonen Triasschollen aufweisen (Abb. 6+7).

Während die mächtigen Sand- und Karbonatsteinpakete vor allem spröde-bruchhaft verformt sind, weisen die feinerkörnigen Zwischenmittel aus Ton- und Schluffstein Zählbruch auf. Von entscheidender Bedeutung sind die duktilen, intramesozoischen Salinarstockwerke, die das Postzechsteinsalinar-Stockwerk in bewegliche Teilstockwerke gliedern und

den vorgefundenen Schollenbau ermöglichen. Als duktile Abscher- bzw. Entkopplungshorizonte dienen die evaporitischen Schichten des Röt, des Mittleren Muschelkalks und ggf. des Mittleren Keupers.

Horst-Schollen (autochthon bis parautochthon)

Unter dem Begriff „Horst“ bzw. „Horstscholle“ werden die Gebirgseinheiten zusammengefasst, die, bezogen auf die geneigte Abschiebungsfläche, das relativ gehobene Liegende darstellen. Es handelt sich um mehr oder weniger von der Taphrogenese unbeeinflusste, passiv an den saxonischen Grabenrändern stehengebliebene, autochthone bis parautochthone, sählig bis schwach geneigte Hochschollen, die nicht unbedingt von weiteren Abschiebungen begrenzt sein müssen und deshalb auch als Halbhorste bezeichnet werden können.

Die eigentlichen Ränder der saxonischen Gräben beginnen nicht, wie häufig in bisherigen Strukturkarten eingezeichnet, mit dem Einsetzen von Röt oder Muschelkalk, sondern am kontinuierlichen Übergang der quasi horizontalen Horstschollen zu den deutlich gekippten „Rollover“-Schollen (Abb. 7).

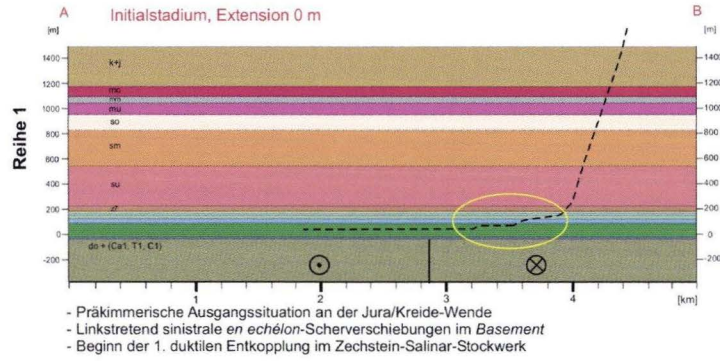
„Rollover“-Schollen (parautochthon bis autochthon)

„Rollover“ oder antithetische Flexuren sind Extensionsstrukturen und entstehen durch antithetische Rotation an listrischen Abschiebungen (MEIER 1993). Die antithetischen Flexuren sind genetisch unmittelbar mit dem „Detachment“ verknüpft bzw. gehen in dieses über. Die Basis der „Rollover“-Scholle wird meistens aus einem unterschiedlich mächtigen Reibungsteppich gebildet.

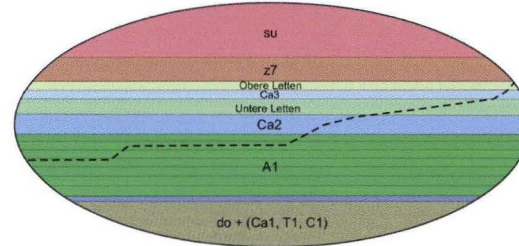
Zum „Rollover“ gehören alle im Verband gebliebenen, antithetisch rotierten Gebirgsschollen, die nicht zusätzlich an duktilen triassischen Evaporithorizonten entkoppelt wurden (Abb. 7). Das sind vor allem Einheiten aus Mittlerem und Unterem Buntsandstein, deren Einfallen in Richtung auf das Grabenzentrum kontinuierlich zunimmt. Während im Hinterland des „Rollovers“ schwach gekippte obere Zechsteineinheiten sowie Buntsandstein und Muschelkalk, den mittleren und unteren Zechsteinserien aufliegen, sind es zum Grabenzentrum hin stark verkippte Folgen aus Mittlerem Buntsandstein, die z.B. dem A1 und Ca2 diskordant aufsitzen.

Kipp-Schollen (allochthon)

Kippschollen befinden sich am östlichen Rand des Altmorschener Grabens (Abb. 7). Während sie im Liegenden durch eine listrische, d.h. nach oben hin konkave Abschiebung vom angrenzenden Horst getrennt sind und zur Tiefe hin dem Zechstein aufliegen, werden sie im Hangenden von den Gleitschollen bzw. -decken aus Muschelkalk und Röt überlagert. Die im vorliegenden Fall synthetischen Kippschollen werden aus mittel bis steil zum Grabenzentrum einfallendem Buntsandstein aufgebaut.

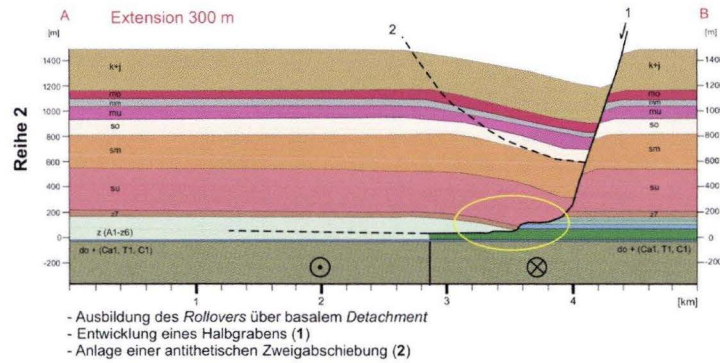
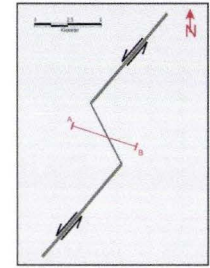


Vergrößerung des Zechstein-Salinar-Stockwerks

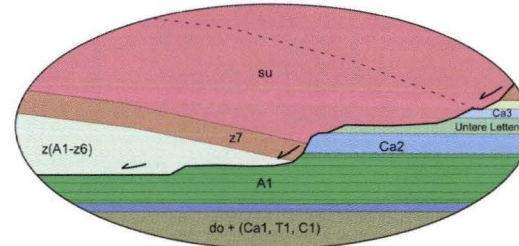


- Anlage einer listrischen Abschiebung mit in Rampen und Flachbahnen gegliedertem *Detachment*

Transtensionspiktogramm

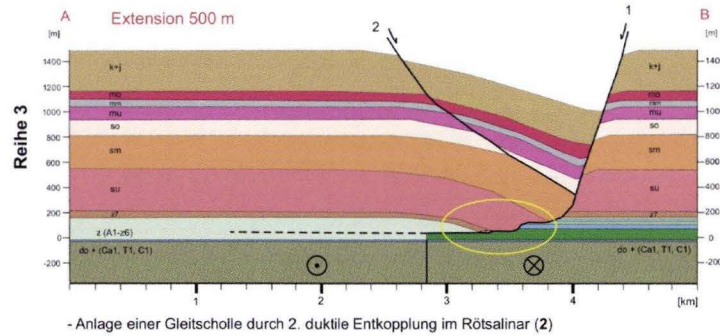
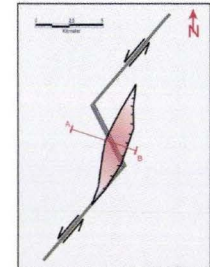


Vergrößerung des Zechstein-Salinar-Stockwerks

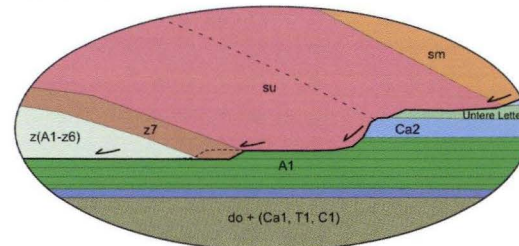


- Rampen aus kompetenten Karbonaten (Ca2, Ca3)
- Flachbahnen aus Evaporiten und Tonsteinen (A1, A2, Untere/Obere Letten)

Transtensionspiktogramm

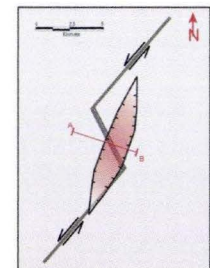


Vergrößerung des Zechstein-Salinar-Stockwerks

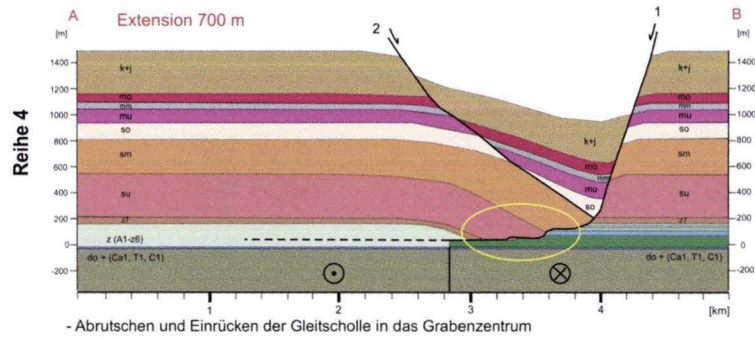


- Anlage der extensionalen Schuppe der Fulda-Folge (z7) über intraformationaler A1-Rampe

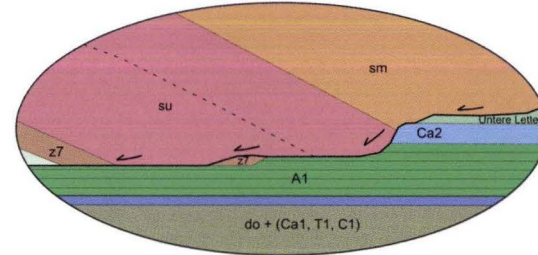
Transtensionspiktogramm



Tafel 1

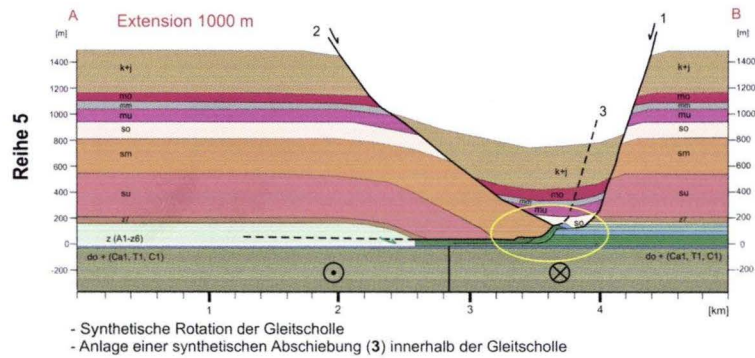
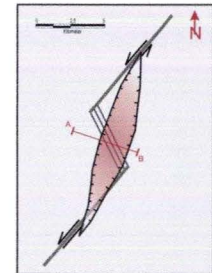


Vergrößerung des Zechstein-Salinar-Stockwerks

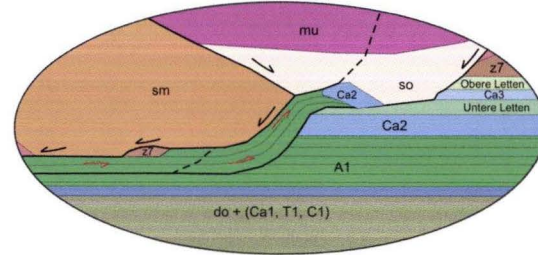


- Abtrennung der extensionalen z7-Schuppe vom Rollover und Verbleib in der basalen Abscherbahn (Detachment)

Transtensionspiktogramm

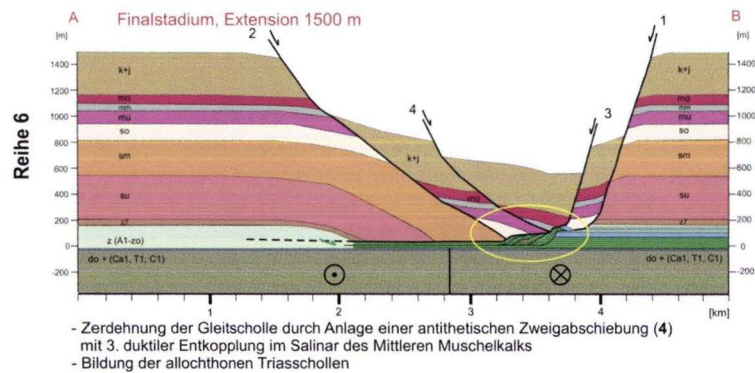
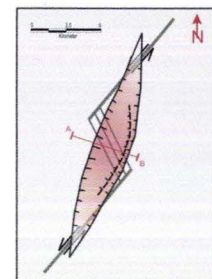


Vergrößerung des Zechstein-Salinar-Stockwerks

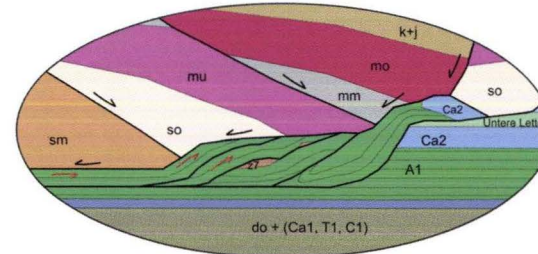


- Rückstrom duktiler Werra-Sulfate (A1) in das Grabenzentrum
- Überschiebung mit Durchscheren der aktiven Flachbahn
- Schichtwiederholung von Staßfurt-Karbonat (Ca2)
- Anlage einer zweiten, rückschreitenden Überschiebungsbahn

Transtensionspiktogramm

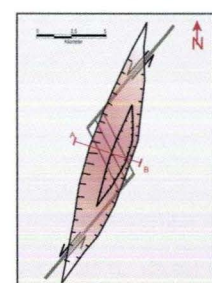


Vergrößerung des Zechstein-Salinar-Stockwerks



- Kompressiver Schuppenbau mit vergentem Falten und durchgescherten Kurzschenkeln
- Isolation der extensionalen z7-Scholle und Einbau in die Überschiebungsstruktur
- Entwicklung zum hinterland-dipping-Duplex

Transtensionspiktogramm



Gleitschollen (allochthon)

Gleitschollen sind allochthone, flach lagernde oder nur mäßig verstellte, bis zu mehrere hundert Meter mächtige Schichtpakete aus Röt, Muschelkalk und Keuper, die zum Grabenzentrum hin stark verkipptem Mittlerem Buntsandstein (vornehmlich der Solling-Folge) des „Rollovers“ diskordant auflagern (Abb. 7). Charakteristisch für die Gleitschollen sind ihre individuelle, interne Bruch- und Falten tektonik. So setzen sich innerhalb der Gleitschollen erkannte Brüche und Flexuren im unterlagernden „Rollover“ aus Buntsandstein nur selten fort.

Die Gleitschollen können im Grabenzentrum auch unterem Zechstein diskordant auflagern und stellen damit den Übergang zu den allochthonen Triasschollen dar.

Allochthone Triasschollen

Die allochthonen Triasschollen treten nur regional begrenzt im eigentlichen Grabenzentrum auf und bestehen aus

schließlich aus höheren triassischen Einheiten, d.h. Röt und jünger (Abb. 6+7). Die wenige Zehner- bis Hundertmeter mächtigen Schollen liegen vor allem den Sulfaten des Werra-Anhydrits (A1) bzw. den zugehörigen Residualgesteinen sowie den Rauhacken des Staßfurt-Karbonats (Ca2) auf und sind an horizontale bzw. subhorizontale Abscherzonen („Detachments“) gebunden.

Die Basis der allochthonen Triasschollen bildet jeweils ein Reibungssteppich, der überwiegend aus tonig- evaporitischen Serien des Röts bzw. des Mittleren Muschelkalks gebildet wird. Das stratigraphische Oben und Unten der Schollen ist weitestgehend erhalten, d.h. die Schollen liegen mehr oder weniger söhlig oder sind nur mäßig verkippt.

Die allochthonen Triasschollen sind durch die erosive Freilegung der Grabenstruktur heute isolierte tektonische Klippen und können als morphologische Härtlinge in Erscheinung treten (z.B. Gottesberg, Abb. 2).

5. Tektonomechanisches Modell für den Altmorschener Graben

5.1 Modell einer mehrfach duktil entkoppelten „pull apart“-Struktur

Im Folgenden wird der Altmorschener Graben als das Ergebnis einer mehrfach duktil entkoppelten „pull apart“-Struktur betrachtet, die sich an der Jura/Kreide-Wende (jung-kimmerische Phase der saxonischen Tektogenese) durch Transtensionstektonik über Scherverschiebungen gebildet hat. Dabei beantworteten die drei tektonischen Stockwerke eine einheitliche mechanische Beanspruchung sehr unterschiedlich.

Ausgehend von divergent-gestaffelt („en échelon“) angeordneten Blattverschiebungen, die das Präsalinar-Stockwerk („Basement“) durchsetzen, pausen sich die Scherbewegungen nicht direkt bis an die Erdoberfläche durch, sondern werden unter dem Einfluss der Transtension aufgrund entkoppelnd wirkender duktiler Einheiten im Zechsteinsalinar-Stockwerk sowie im Postzechsteinsalinar-Stockwerk zu einem Grabenbruch transformiert.

Das erarbeitete tektonomechanische Modell ist eine Kombination aus den Befunden der geologischen Neuaufnahme, aus den Ergebnissen analoger Scherboxversuche (SIMS et al. 1999) sowie aus der Beobachtung, dass Sulfate im flachstkrustalem, extensivem Spannungsregime duktiles Verhalten zeigen (MÖBUS 2004).

Der besseren Übersichtlichkeit halber wurde für die Bewegungsmechanismen sowohl der rein extensionalen Vorgänge und Schollenbildungen im Postzechsteinsalinar-Stockwerk als auch der gleichzeitig extensionalen und kompressiven Bewegungen im Zechsteinsalinar-Stockwerk sowie der Scherver-

schiebungen des Präsalinar-Stockwerks eine Palinspastik bzw. eine tektonomechanische Rekonstruktion erstellt (Taf. 1+2). Die genaue Vorgehensweise zur Anfertigung der Palinspastiken gibt MÖBUS (2004).

Vom hypothetischen söhligem Ausgangsstadium bis zum Finalstadium nach etwa 1500 m horizontaler Scherbewegungen des „Basements“ wurden sechs Abbildungsreihen entwickelt, die das gleichzeitige Vorkommen von stockwerksabhängigen, extensiven und kompressiven Bewegungen verdeutlichen: Während sich als Ausdruck höchster Extension im Postzechsteinsalinar-Stockwerk die allochthonen Triasschollen ausbilden können, entwickelt sich im Zechsteinsalinar-Stockwerk ein kompressiver „hinterland-dipping“-Duplex mit tektonisch verdicktem, intrusivem Werra-Anhydrit.

Jedem Extensionsschritt ist ein Transtensionspiktogramm sowie eine Vergrößerungsellipse beigefügt. Das Piktogramm stellt die Bewegungen des Basements dar. Die skizzenartige Aufsicht zeigt den sich öffnenden, linkstretenden Übertritt zweier „en échelon“-artig versetzter, sinistraler Scherbrüche im Basement sowie die ungefähre Lage, Form und räumliche Ausdehnung der sich entwickelnden Grabenbruchstruktur (rot) im Deckgebirge. In das Piktogramm ist außerdem die Lage des Profilschnitts A–B eingetragen. Während der Profilschnitt A–B die Bewegungen des Postzechsteinsalinar-Stockwerks veranschaulicht, dient die Vergrößerungsellipse der Darstellung der Abläufe im Zechsteinsalinar-Stockwerk.

5.2 Bewegungen der tektonischen Stockwerke

5.2.1 Blattverschiebungen im Präsalinar-Stockwerk (do–Ca1)

Für die Genese des Altmorschener Grabens werden für das „Basement“ rheinisch streichende, divergent-gestaffelt („en échelon“) angeordnete Blattverschiebungen angenommen. Allerdings konnten lineamentäre Blattverschiebungen bzw. über weite Strecken in einer Richtung durchhaltende, blattverschiebende Tiefenbrüche bisher im Präsalinar-Stockwerk des Arbeitsgebietes nicht eindeutig nachgewiesen werden. Allgemein sind Lateralversätze ohne oder nur mit geringer vertikaler Komponente, vor allem bei relativ monotonem Untergrundaufbau, kartiertechnisch schwer zu erfassen. Solche Lineamente werden aber von anderen Autoren an vergleichbaren Strukturen intensiv diskutiert (WILCOX et al. 1973, NAYLOR et al. 1986, SWANSON 1988). So beschreibt WREDE (1988) Verstellungen der Faltenachsen des variszischen Gebirges am Harzrand, die sich am ehesten als Schleppungen an dextralen Horizontalverschiebungen deuten lassen. DROZDZEWSKI (1988) erkennt fiederartig versetzte, horizontale Seitenverschiebungen im niedersächsischen Tektogen. SCHREIBER & ROTSCH (1998) postulieren rheinische, eggische und herzynische Blattverschiebungen, die das Rheinische Schiefergebirge und dessen Ostrand sinistral durchsetzen. HOLLÄNDER (2000) sieht im Untergrund der Solling- und Sackscholle fiedrig verspringende Blattverschiebungen als strukturgestaltendes Element. PRINZ (2001) erkennt an der ICE-Neubaustrecke Köln–Rhein/Main bajonettartig versetzte Scherbrüche, die zu „pull apart“-Strukturen geführt haben.

RHEINECKER & SCHNEIDER (2002) stellen eine genetische Beziehung zwischen dem oberflächennahen NW–SE streichenden Hohenzollerngraben und der tief sitzenden, etwa Nord–Süd streichenden Albstadt-Blattverschiebung her.

5.2.2 Bewegungen im Zechsteinsalinar-Stockwerk (A1–z6)

Der wichtigste Schritt der Genese duktiler „pull apart“-Strukturen ist die Transformation der (horizontalen) Blattverschiebungen des „Basements“ in (vertikale) Abschiebungen im Postzechsteinsalinar-Stockwerk. Diese Bewegungsumwandlung geschieht durch eine mechanische Entkopplung von Präsalinar- und Postzechsteinsalinar-Stockwerk innerhalb der duktilen Einheiten des Zechsteinsalinar-Stockwerks und wird als erste duktile Entkopplung bezeichnet (vgl. Taf. 1, Reihe 1).

Entsprechend den gestaffelt angeordneten Blattverschiebungen des „Basements“ herrscht im divergierenden Übertrittsbereich der Zustand der Transtension. Die direkt im Hangenden anschließenden Sulfate des Werra-Anhydrits (A1) werden sukzessive passiv auseinander gezogen. Dabei erniedrigt sich die horizontale Einspannung (σ_3) synchron mit den Scherverschiebungen im „Basement“. Da die vertikale Auflast (σ_1) unverändert bleibt, erhöht sich die Differenzialspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$) soweit, dass die Fließfestigkeit der Sulfate überschritten wird und der A1 in den Duktilbereich bzw. den Spröduktile-Übergangsbereich überführt wird (vgl. EISBACHER 1996).

Einsetzende Kriech- bzw. Fließprozesse greifen weit über die Grenzen der basalen Blattverschiebungen hinaus und

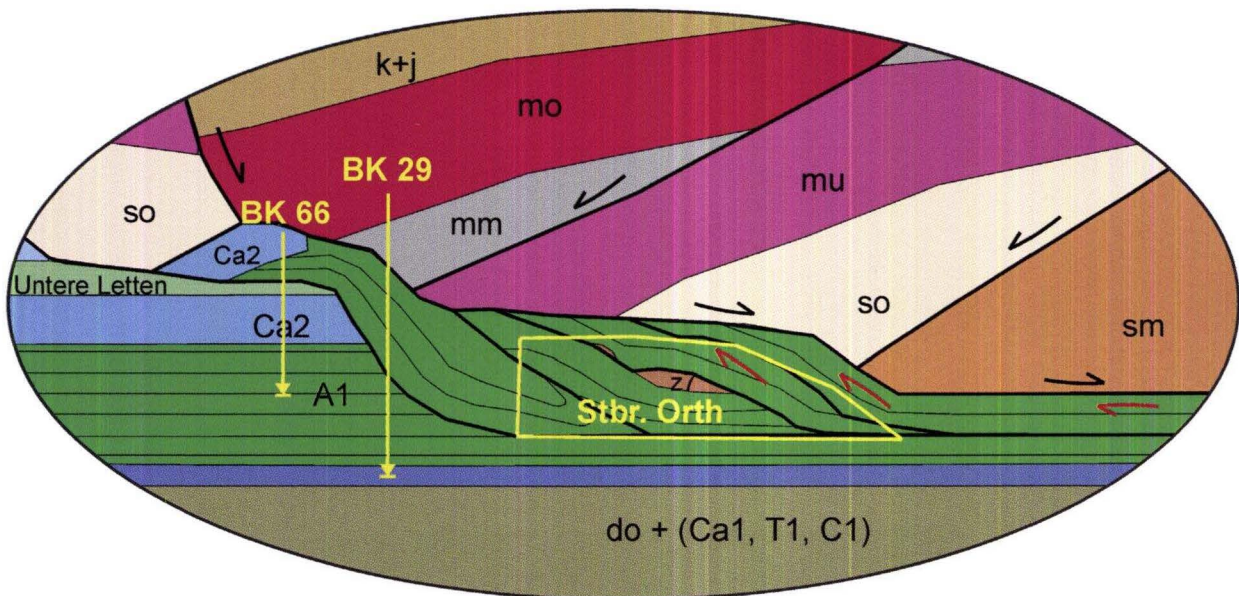


Abb. 8. Endstadium der Palinspastik mit schematischer Lage des Steinbruchs Orth sowie der Bohrungen BK 29 und BK 66.

dünnen die inkompetenten Sulfate des Werra-Anhydrits aus. Die tektonische Mächtigkeitsreduktion des A1 geschieht durch einen quasi schichtparallelen bzw. nur wenige Grad einfallenden Abscherhorizont („Detachment“). Diese Abschiebung erfasst im Zuge weiterer Transtension die hangenden Serien des Zechsteinsalinar-Stockwerks und durchtrennt das Staßfurt-Karbonat (Ca2) und das Leine-Karbonat (Ca3) über Rampen sowie den Staßfurt-Anhydrit (A2) und die „Oberen Letten“ entlang von Flachbahnen (Taf. 1, Reihe 2). Die materialbedingte Versteilung im Hangenden verleiht der Verwerfung eine listrische, d.h. schaufelförmige Geometrie und leitet in die Extensionsbewegungen des Postzechsteinsalinar-Stockwerks über.

Zu Beginn der Taphrogenese bewegen sich die abgeschobenen Sulfate des Werra-Anhydrits unter die Grabenränder und stauen sich dort an (nicht in den Abbildungen dargestellt). Ab einem bestimmten Stadium kehrt sich diese Bewegung um (Taf. 2, Reihe 5). Dann strömen in einem zweiten Schritt Teile der fließfähigen A1-Sulfate isochron zur Grabenöffnung zum Volumenausgleich in das Grabenzentrum zurück. Das Ergebnis dieser Ausgleichsbewegungen sind komplex strukturierte, in Rampen und Flachbahnen gegliederte, kompressive Falten- und Schuppenstapel, hier als „hinterland-dipping“-Duplex bezeichnet, die zu einer regional überdurchschnittlich großen Mächtigkeit des Werra-Sulfats führen (Taf. 2, Reihe 6). Solche tektonisch verdickten Zechsteinfolgen sind auch in den Zentren anderer saxonischer Gräben nachweisbar und bilden die sog. „Zechsteinhorste“ (MÖBUS 2004).

Ebenfalls lässt sich die ungewöhnliche Lage der Schollen

mit Gesteinen der Fulda-Folge (z7) inmitten der Sulfate des Werra-Anhydrits (A1) zwanglos folgendermaßen erklären (vgl. Taf. 1+2, Reihen 3–6): Bei den vorgefundenen Ton- und Sandsteinfragmenten der Fulda-Folge handelt es sich um eine ehemalige extensionale Schuppe, die sich primär im basalen, quasi horizontalen Abscherbereich („Detachment“) im Liegenden eines „Rollovers“ isolieren konnte (Taf. 2, Reihe 4). Im Anschluss an diese extensionale Phase wurde der Span aus Ton- und Sandstein mit dem Einwandern fließfähiger Werra-Sulfate in eine kompressive Schuppenstruktur innerhalb des Grabenzentrums eingebaut (Taf. 2, Reihen 5+6).

Das Endstadium der Palinspastik spiegelt die Lagerungsverhältnisse im Steinbruch Orth und insgesamt im Arbeitsgebiet wider (Abb. 8). Nach veränderter Blickrichtung wurden auf die Vergrößerungsellipse der Reihe 6 (Taf. 2) die Lage der östlichen Tagebauwand des Steinbruchs Orth (Abb. 3) sowie die schematische Lage der Bohrungen BK 29 (Abb. 2) und BK 66 (Abb. 4) projiziert.

5.2.3 Bewegungen im Postzechsteinsalinar-Stockwerk (z7–j)

Die subhorizontale, duktile Abscherung innerhalb des Zechsteinsalinar-Stockwerks (**erste duktile Entkopplung**) ermöglicht eine großräumige, von der Schwerkraft angetriebene Gleitung und Rotation des Postzechsteinsalinar-Stockwerks in Form einer antithetischen Flexur („Rollover“) bzw. eines Halbgrabens (Taf. 1, Reihen 1+2). Aus dem „Rollover“ entwickelt sich im Zuge kontinuierlicher Zerdehnung

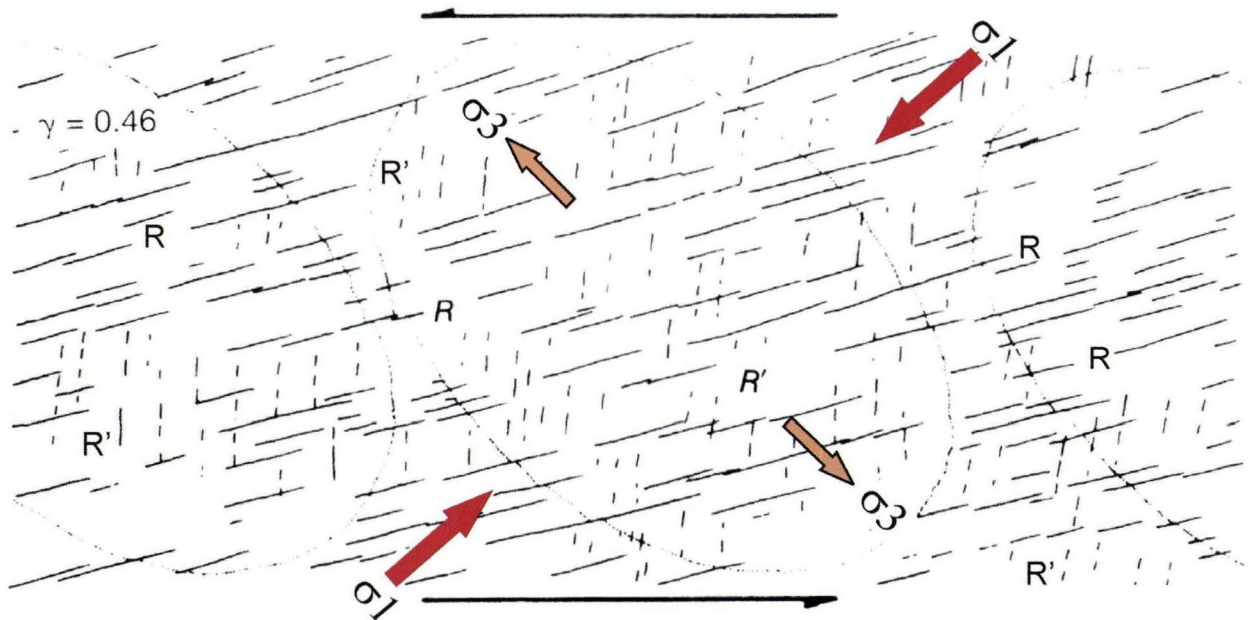


Abb. 9. „Simple shear“-Experiment einer Tonprobe mit konjugierten synthetischen (R) und antithetischen (R') Riedelbrüchen (verändert nach TWISS & MOORES 1992).

ein vollständiger saxonischer Grabenbruch mit randlichem, mehrere hundert Meter betragendem Vertikalversatz.

Die fortschreitende Extension erfasst auch die „Rollover“-Scholle und erhöht die Differenzialspannung innerhalb der mesozoischen Sulfatlager, sodass dort kriechende bzw. fließende Deformationen einsetzen und die **zweite duktile Entkopplung** einleiten (Taf. 1, Reihen 2+3). Die inkompetenten, mobilen Evaporitlager des Röts, des Mittleren Muschelkalks sowie ggf. des Gipskeupers sind für eine duktile Entkopplung ausreichend mächtig und passen sich hinreichend schnell sowie bruchlos an die sich stetig ändernde Bruchschollengeometrie an. Ab einer Neigung der „Rollover“-Scholle von etwa 15° bis 25° löst sich im Bereich der Röt-Evaporite eine eigenständige Gleitscholle ab und rückt in das sich öffnende Grabenzentrum vor (Taf. 1, Reihe 3).

Bei progressiver Grabenextension können sich als logische Fortsetzung aus dieser Gleitscholle infolge der **dritten duktilen Entkopplung** die allochthonen Triasschollen entwickeln (Taf. 2, Reihe 6). Diese vollständig separierten Schollen wan-

dern entlang listrischer Abschiebungen in das Grabenzentrum ein und lagern nicht mehr den „Rollover“-Schollen aus Mittlerem Buntsandstein auf, sondern sitzen letztlich diskordant dem basalen „Detachment“ aus unteren Einheiten des Zechsteinsalinar-Stockwerks auf. Die jeweils kompetenten Gebirgsabschnitte aus Muschelkalk und Buntsandstein werden dabei vollständig voneinander getrennt. Zwischen den Störungen bzw. Teilstockwerken im Ober- und Unterbau des Postzechsteinsalinar-Stockwerks bestehen häufig keine unmittelbaren Beziehungen mehr. Die Schollen führen ein tektonisches Eigenleben und entwickeln einen individuellen Beanspruchungsplan.

Die am Altmorschener Graben ausgehaltenen, synthetisch rotierten Kippschollen wurden bereits in einem frühen Stadium der Grabengenese durch eine zweite rückschreitende, synthetische (Zweig-)Abschiebung angelegt und anschließend an ihrer Basis tektonisch erodiert und synthetisch rotiert. Eine detaillierte Rekonstruktion der Kippschollen gibt MÖBUS (2004).

6. Geodynamische Interpretation saxonischer Gräben der Hessischen Senke

6.1 Großtektonisches Spannungsfeld

Bereits HOLZAPFEL (1998) bemerkt, dass eine absolute Alterseinstufung der Tektonik des Arbeitsgebiets und dessen engerem Umfeld nicht möglich erscheint, da jungmesozoische Schichten fehlen und das Tertiär nur lückenhaft verbreitet ist. So wird auf den zeitlich fassbaren tektonischen Wegdegang benachbarter Großstrukturen, wie z.B. dem Niedersächsischen Becken zurückgegriffen.

Obwohl BALDSCHUHN et al. (1989) Horizontalbewegung im nordhessischen und südniedersächsischen Untergrund weitgehend ausschließen, führen BETZ et al. (1987) und ZIEGLER (1982) die Dilatation Mitteleuropas im Oberjura auf reaktivierte, permokarbonische Bruchsysteme zurück, die in Folge des „Riftings“ im Nordatlantik-, Nordsee- und Alpenraum beim Auseinanderbrechen von Pangäa ein „divergent wrenching“ vollzogen haben. In diese Phase fällt die Anlage und Ausbildung der saxonischen Grabenbrüche innerhalb der Hessischen Senke.

Die Umorientierung des Stressfeldes (Inversion) mit anschließender Hebung in der Oberkreide bis ins Alttertiär verlief synchron mit der Alpenogenese und wird von BETZ et al. (1987) als Folge von „intraplate compressional stress“ mit „sinistral convergent wrenching“ gedeutet. Diese außeralpine Inversionstektonik führte in Mitteleuropa zu einer polyphasen Aufpressung herzynischer Leistenschollen (DROZDZEWSKI 1988). Hierunter fallen z.B. der Harz, der Thüringer Wald sowie der Unterwerrassattel. Die zu dieser Zeit bereits exist-

enten Hessischen Gräben wurden dadurch nur unwesentlich verändert. Insgesamt scheint für die tektonische Ausgestaltung der Hessischen Senke eine Vergitterung vorwiegend li-

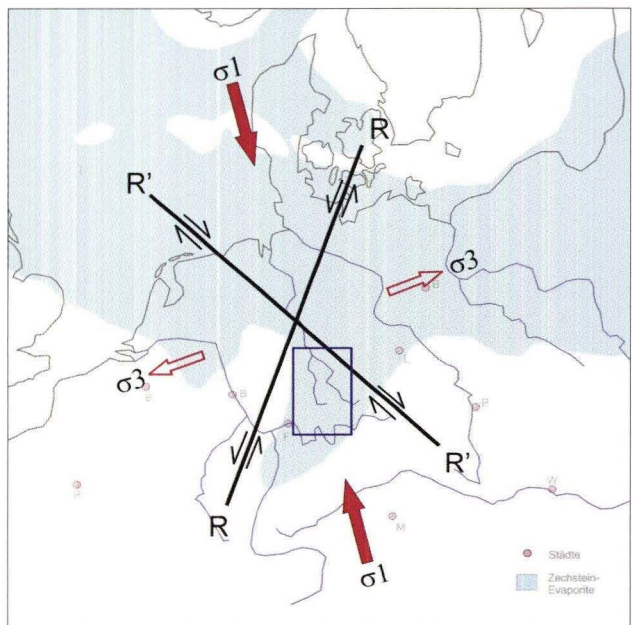


Abb. 10. Paläospannungsfeld an der Jura/Kreide-Wende (jungkimmerische Phase); modifiziert nach BETZ et al. (1987); Verbreitung von Zechsteinevaporiten nach ZIEGLER (1982); mit dunkelblau eingrahmtem Ausschnitt der Hessischen Senke.

neamentärer, herzynisch und rheinisch streichender Blatt- bzw. Seitenverschiebungen mit wechselnd beanspruchten, vorwiegend horizontalen Scherbewegungen ursächlich gewesen zu sein.

6.2 Motor der isochronen und gleichberechtigten Genese rheinischer und herzynischer Grabenbrüche

Das tektonomechanische Modell einer mehrfach duktil entkoppelten „pull apart“-Struktur, das beispielhaft für den Altmorschener Graben skizziert wurde, kann innerhalb der Hessischen Senke sowohl auf rheinisch als auch auf herzynisch streichende saxonische Grabenbrüche übertragen werden.

In der Hessischen Senke sind Vereinigungen von herzynischen und rheinischen Gräben bekannt, die auf eine isochrone und gleichberechtigte Bildung beider Bruchsysteme schließen lassen (KLOHN 1930, MEIBURG 1982). Sowohl die Isochronie der Vereinigungen als auch die Richtungskonstanz der saxonischen Gräben innerhalb der Hessischen Senke können durch Vergleiche mit der Bruchentwicklung in einem analogen „simple shear“-Versuch an Tonproben (TWISS & MOORES 1992) eine befriedigende Erklärung finden (Abb. 9).

Bei „simple shear“-Experimenten entstehen konjugierte Scherbrüche mit definierten Winkelbeziehungen. Sowohl die synthetischen Riedelbrüche (R) als auch die antithetischen Riedelbrüche (R') bilden mit der Hauptnormalspannung σ_1 einen Winkel von jeweils 30° . Die synchron angelegten, konjugierten Riedelscherbrüche bauen sich aus parallelen, gestaffelt („en échelon“) angeordneten Teilsegmenten bzw. subparallelen Scharen mit sowohl rechtstretendem als auch linkstretendem Übertritt auf und durchsetzen sich nicht direkt (vgl. Abb. 9). Je nach Bewegungssinn herrscht im Bereich der

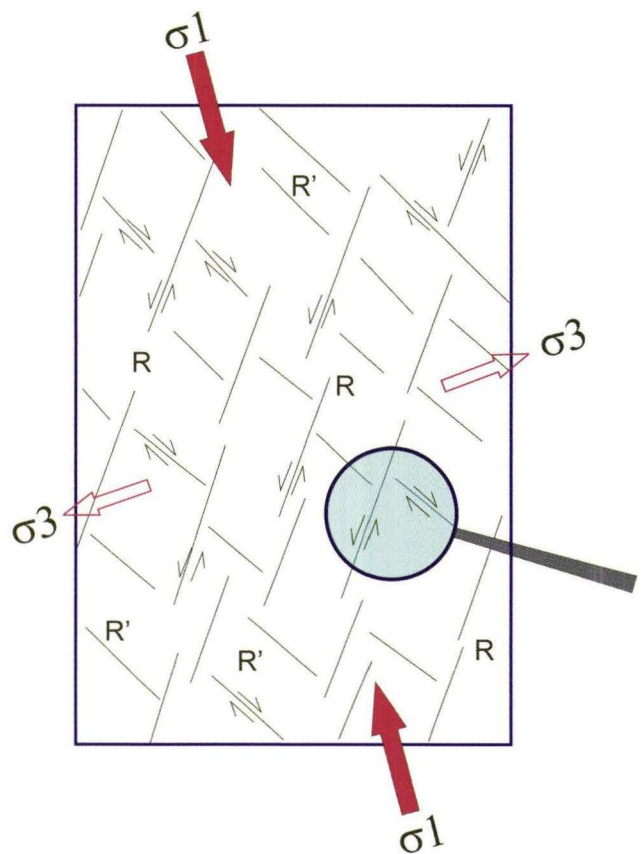


Abb. 11. Vergrößerter Ausschnitt der Abb. 10 als Teil der Hessischen Senke mit synthetischen und antithetischen Riedelbrüchen des „Basements“ im Sinne einer „simple shear“-Beanspruchung.

Übertritte entweder Transpression oder Transtension (WOODCOCK & FISCHER 1986, EISBACHER 1996). Werden diese im Schermodell erhaltenen konjugierten Riedelbrüche (R und R') auf die Verhältnisse der Hessischen Senke übertragen, so

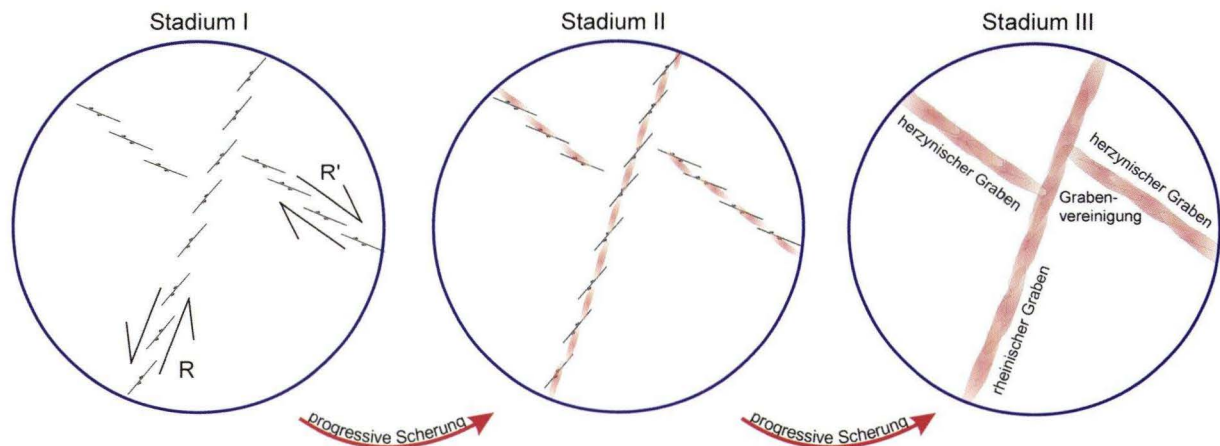


Abb. 12. Vergrößerter Ausschnitt der Abb. 11 (Lupe) mit Entwicklung der Hessischen Gräben über transtensiven Übertritten bei progressiver Scherung (Stadien I, II und III).

können in Anlehnung an das von BETZ et al. (1987) sowie PRINZ (1988) postulierte Paläospannungsfeld folgende Bruchwinkelbeziehungen abgeleitet werden (Abb. 10).

Während der jungkimmerischen Phase der saxonischen Tektogenese ist von tiefkrustalen, horizontal wirkenden Schubspannungen auszugehen, die wahrscheinlich aus dem Nordsee-„Spreading“ resultieren. Der mitteleuropäische Raum wurde dadurch in etwa Nord-Süd-Richtung (345° – 165°) eingespannt und relativ dazu in Ost-West-Richtung (255° – 75°) gedehnt. Mit einsetzender einfacher Scherung („simple shear“) entstanden auch im Raum der Hessischen Senke Blattverschiebungen im Sinne konjugierter Riedelbrüche. Es bildeten sich, falls nicht bereits vorhanden, Scharen synthetischer Riedelbrüche (R) in Form rheinischer Lineamente (Streichen: etwa 20°) sowie antithetischer Riedelbrüche (R') in Form herzynischer (Streichen: etwa 315°) Lineamente aus. Diese lineamentären Blattverschiebungen bestehen aus unterschiedlich langen, parallelen bzw. subparallelen Teilsegmenten mit rechtstretendem und linkstretendem Übertritt. Einen Ausschnitt der Hessischen Senke zeigt Abb. 11.

Die saxonische Grabenbildung ist als wiederum vergrößerter Ausschnitt (Lupe) der Abb. 11 in drei Stadien dargestellt (Abb. 12). Stadium I zeigt den Beginn der einfachen Scherung. Dargestellt sind nur die für die Grabenbildung relevanten

transtensiven Übertritte, nämlich entlang des rheinischen Systems (R) die linkstretend-sinistralen Übertritte und entlang des herzynischen Systems (R') die rechtstretend-dextralen Übertritte. Im Stadium II entstehen getrennte „pull apart“-Strukturen bzw. isolierter Teilgräben (rot), die sich zu Beginn der duktilen Entkopplung im Zechsteinsalinar über den transtensiven Übertrittszonen im Deckgebirge entwickeln. Die Grabenbildung läuft dabei synchron entlang der rheinischen und der herzynischen Scherbruch-Scharen des „Basements“. Im Stadium III dehnen sich die „pull apart“-Strukturen weit über die Grenzen der verursachenden Tiefenbrüche räumlich aus und wachsen zu einem lineamentären Grabenbruch zusammen. Im Bereich von direkt benachbarten, sich nicht durchsetzenden, synthetischen und antithetischen Riedelbrüchen im Präsalinar-Stockwerk bilden sich gleichberechtigte Vereinigungen rheinischer und herzynischer Gräben (sog. „Grabenknoten“ bzw. „Grabenkonjugationen“).

Die Streichrichtungen der saxonischen Gräben innerhalb der Hessischen Senke entsprechen nicht immer diesem starren Muster, sondern zeigen Schwankungen. Dabei sind spätere Schollenrotationen um vertikale Achsen im Sinne SCHREIBER & ROTSCH (1998) denkbar, welche die Gräben aus ihrer primären Richtung auslenken.

7. Schlussfolgerungen

Das tektonomechanische Modell von mehrfach duktil entkoppelten „pull apart“-Strukturen, die sich an der Jura/Kreide-Wende in der Hessischen Senke über transtensiven Segmenten konjugierter synthetischer (R) und antithetischer (R') Riedelbrüche gebildet haben, stellt eine befriedigende Lösung für die bislang kontrovers diskutierten Fragen dar. So ist nachdrücklich zu betonen, dass die Hessischen Gräben auf das Postzechsteinsalinar-Stockwerk beschränkt sind und nicht bis in das spröde „Basement“ reichen, sondern als „Detachment“ im Zechsteinsalinar-Stockwerk enden. Die sog. „Zechsteinhorste“ sind zu verstehen als komplex strukturierte Falten- und Schuppenstrukturen, die sich durch Rückstrom der zu Beginn der Grabenbildung randlich angestauten fließfähigen Zechsteinevaporite bildeten.

Die gleichberechtigten Grabenvereinigungen entstanden durch das Zusammenwachsen der Enden der synchron gebildeten, rheinischen und herzynischen Teilgräben im Bereich von direkt benachbarten, sich nicht durchsetzenden syntheti-

schen und antithetischen Riedelbrüchen im Präsalinar-Stockwerk. Entscheidend für die Genese der Hessischen Gräben ist die Anwesenheit duktiler Schichten sowohl im Zechsteinsalinar-Stockwerk als auch im Postzechsteinsalinar-Stockwerk.

Es sei erwähnt, dass sich gleichzeitig zu den transtensiven Übertritten von Blattverschiebungen auch transpressive Übertritte entwickeln können. Über transpressiven Übertritten findet aber keine duktile Entkopplung im Zechsteinsalinar-Stockwerk statt, da unter Transpression die Differenzialspannung durch Erhöhung der horizontalen Einspannung unter Beibehaltung der vertikalen Eigenlast erniedrigt wird. D.h. die Fließfestigkeit von Anhydrit wird nicht erreicht bzw. überschritten. Ggf. können sich über transpressiven Blattverschiebungen positive Blumenstrukturen im Deckgebirge entwickeln, die aber im Gelände wegen der relativ geringen Aufschiebungsbeträge schwer nachzuweisen sind.

8. Schriftenverzeichnis

- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1989): Der Salzkeil, ein strukturelles Requisite der saxonischen Tektonik. – Z. dt. geol. Ges., **149**: 59–70, 4 Abb.; Hannover.
- BECKER, R. E. & LAEMMLEN, M. (1988): Geologische Verhältnisse im Altmorschen-Beisheimer-Grabenknie bei Wichte in Nordhessen. – Geol. Jb. Hessen, **116**: 45–104, 4 Abb., 3 Tab., 3 Taf.; Wiesbaden.
- BETZ, D., FÜHRER, F., GREINER, G. & PLEIN, E. (1987): Evolution of the Lower Saxony Basin. – Tectonophysics, **137**: 127–170, 18 Abb.; Amsterdam.
- BOSSE, H. (1931): Tektonische Untersuchungen an niederhessischen Grabenzonen südlich des Unterwerrassattels. – Abh. preuß. geol. L.-Anst., N.F. **128**: 1–37, 1 Taf., 10 Abb., Berlin.
- DIETZ, C. (1925): Tektonik und Salz des unteren Eichsfeldes. – In: STILLE, H. (Hrsg.; 1923/1925): Göttinger Beiträge zur saxonischen Tektonik. – Abh. preuß. geol. L.-Anst., N.F. **95**: 83–109; Berlin.
- DROZDZEWSKI, G. (1988): Die Wurzel der Osning-Überschiebung und der Mechanismus herzynischer Inversionsstörungen in Mitteleuropa. – Geol. Rdsch., **77/1**: 127–141, 9 Abb.; Stuttgart.
- EISBACHER, G. H. (1996): Einführung in die Tektonik. – 374 S., 2. Aufl., Enke; Stuttgart.
- GRUMBT, E. & LÜTZNER, H. (1983): Saxonische Tektonik und Basaltvulkanismus zwischen Thüringer Wald und Vorderhön. – Z. geol. Wiss., **11**: 943–954, 2 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- HELDMAIER, W. (1992): Zur Geologie am Nordende des Werra-Grauwacken Sattels, S' Witzhausen, Nordhessen – Mikrofazies des Zechsteinkalkes (Ca1) auf der Nordhessischen Zechsteinplattform (Buchenaue Schwelle). – Dipl.-Arbeit. Univ. Marburg: 91 S., zahlr. Abb., Tab., Taf. und Beil.; Marburg (unveröff.).
- HOLLÄNDER, R. (2000): Vom Salzkeil zur Decke – Struktur und Entwicklungsgang der Vogler-Homburgwald-Decke (Südnie-dersachsen) – Ber. Naturhist. Ges. Hannover, **142**: 78–148; Hannover.
- HOLZAPFEL, M. (1998): Die allochthonen Triasschollen bei Hundelshausen/ Nordhessen. – Diss. Universität Würzburg: 79 S., 15 Abb., 8 Tab., 4 Anl.; Würzburg.
- ILLIES, H. (1975): Recent and palaeo-intraplate tectonics in stabile Europe and the Rhinegraben rift system. – Tectonophysics, **29** (1–4): 251–265, Amsterdam.
- KLOHN, H. (1930): Der Eichenberg-Gothaer Graben unter vergleichender Betrachtung der Viernauer-Dislokationszone südlich Schmalkalden. – Abh. preuß. geol. L.-Anst., N.F. **116**: 113–162, 18 Abb., 2 Taf.; Berlin.
- KULICK, J., LEIFELD, D., 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., **D68**: 3–223, 37 Abb., 15 Tab., 34 Taf.; Hannover.
- LAEMMLEN, M. (1994): Schutzwürdige geologische Objekte in der Rhön. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **76**: 199–217, 8 Abb.; Stuttgart.
- LEMMER, F. & RAMBOW, D. (1994): Die Höhenlage der Rötbasis im Raum Kassel und über Zechsteinaufsprengungen an nordhessischen Gräben. – Geol. Jb. Hessen, **122**: 13–21, 1 Abb., 2 Taf.; Wiesbaden.
- LOTZE, F. (1938): Das Problem der saxonischen Faltung. – Geotekt. Forsch., **3**: 73–83; Berlin.
- MANDL, G. (1988): Mechanics of Tectonic Faulting- Models and Basic Concepts. – Developments in Structural Geology, Vol. 1: 407 S.; Amsterdam (Elsevier).
- MARTINI, H.J. (1937): Die Grabenzonen westlich von Kassel als Trennfugen großer Schollen. – Z. dt. geol. Ges., **88**: 580–614, Berlin.
- MEIBURG, P. (1982): Saxonische Tektonik und Schollenkinematik am Ostrand des Rheinischen Massivs. – Geotekt. Forsch., **62**: 1–267, 84 Abb., 8 Beilag., 1 Taf.; Stuttgart.
- MEIER, D. (1993): Abschiebungen: Geometrie und Entwicklung von Störungen im Extensionsregime. – 142 S., 112 Abb.; Stuttgart (Enke-Verlag).
- MICHAEL, J. (1997): Tektonomechanik im nordosthessischen Buntsandsteingebirge. – Diss. Philipps-Univ. Marburg: 215 S., zahlr. Abb. und Tab.; Marburg.
- MIXIUS, K. F. (1940): Das hessische Grabengebiet im Süden der Sollingscholle. – Geotekt. Forsch., Heft **5**: 60–125; Berlin.
- MÖBUS, H.-M. (2004): Allochthone Triasschollen am Unterwerrassattel als Schlüssel zum Verständnis saxonischer Grabentektonik. – Diss. Universität Marburg: 197 S., 42 Abb., 5 Tab., 9 Taf., 7 Anl.; Marburg (Online-Publikation).
- MOESTA, F. (1884): Das Liasvorkommen bei Eichenberg (Hessen), in Beziehung auf allgemeine Verhältnisse des Gebirgsbaues im Nordwesten des Thüringer Waldes. – Jb. Kgl. preuß. Geol. L.-Amt und Bergakademie 1883: 57–80, 3 Taf., 1 Karte; Berlin.
- NAUMANN, G. & PRINZ, H. (1989): Die Bedeutung richtungsabhängiger tektonischer Gebirgsauflockerung für den Tunnelbau im Buntsandsteingebirge. – Felsbau **7**: 190–197, 10 Abb.; Essen (Glückauf).
- NAYLOR, M. A., MANDL, G. & SIJPESTEIJN, C.H.K. (1986): Fault geometries in Basement-induced wrench faulting under different initial stress states. – Jour. Struct. Geol., Vol. **8**, No. 7: 737–752; Amsterdam (Elsevier).
- PRINZ, H. (1988): Ein Beitrag zur Kinematik der saxonischen Tektonik anhand der Tunnelaufschlüsse an der DB-Neubaustrecke in Ost- und Nordhessen. – Geol. Jb. Hessen, **116**: 169–187; Wiesbaden.
- PRINZ, H. (2001): Tektonisches Modell als Ursache für ungewöhnliches Gebirgsverhalten. – Mitt. Ingenieurgeologie und Geomechanik, Bd. **4**, Festkolloquium „140 Jahre Geologie an der TU-Wien“: 43–56; Wien.
- RHEINECKER, J. & SCHNEIDER, G. (2002): Zur Neotektonik der Zollernalb: Der Hohenzollerngraben und die Albstadt-Erdbeben. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **84**: 391–417, 8 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- RICHTER-BERNBURG, G. (1968): Saxonische Tektonik als Indikator erdtiefer Bewegungen. – Geol. Jb., **85**: 997–1030, 20 Abb.; Hannover.
- RICHTER-BERNBURG, G. (1977): Saxonische Tektonik, Hans Stilles Begriff aus heutiger Sicht. – Z. dt. geol. Ges., **128**: 11–23; Hannover.
- SCHREIBER, U. & ROTSCH, S. (1998): Cenozoik block rotation according to a conjugate shear system in central Europe – indications from paleomagnetic measurements. – Tectonophysics, **299**: 111–142; Amsterdam (Elsevier).
- SCHRÖDER, B. (1976): Saxonische Tektonik im Ostteil der Süddeutschen Scholle. – Geol. Rdsch., **65**: 34–54, 8 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- SIMS, D., FERRIL, D. A., STAMATAKOS, J. A. (1999): Role of a ductile décollement in the development of pull-apart basins: Experimental results and natural examples.

- J. Struct. Geol., **21**: 533–554; Amsterdam (Pergamon, Elsevier).
- STILLE, H. (1923/1925): Die saxonischen Brüche. – In: STILLE, H. (Hrsg.): Göttinger Beiträge zur saxonischen Tektonik. – Abh. preuß. geol. L.-Anst., N.F. **95**: 194–207, 1 Abb., 1 Taf.; Berlin.
- STILLE, H. (1930): Das Einsetzen der „saxonischen“ Richtung im westdeutschen Jungpaläozoikum. – Abh. preuß. geol. L.-Anst., N. F. **116**: 38–74, 3 Taf.; Berlin.
- SWANSON, M. T. (1988): Pseudotachylite-bearing strike-slip duplex structures in the Fort Foster Brittle Zone of southernmost Maine. – J. Struct. Geol., **10**: 813–828, Oklahoma.
- TWISS, R. J. & MOORES, E. M. (1992): Structural Geology. – 532 p.; New York (W. H. Freeman & Company).
- WAGENBRETH, O. (1963): Zerrung und Pressung und ihr Verhältnis zueinander in der germanotypen Tektonik. – Geologie, **12**, 3: 249–263, 16 Abb.; Berlin.
- WILCOX, R. E., HARDING, T. P. & SEELY, D. R. (1973): Basic wrench tectonics. – Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., **57**: 74–96; Oklahoma.
- WOODCOCK, N.H. & FISCHER, M. (1986): Strike-slip duplexes. – J. Struct. Geol., Vol. **8**, No. 7: 727–735; Oklahoma.
- WREDE, V. (1988): Der nördliche Harzrand – flache Abscherbahn oder wrench-fault-system? – Geol. Rdsch., **77/1**: 101–114, 11 Abb.; Stuttgart.
- WUNDERLICH, H. G. (1973): Plattentektonik in kritischer Sicht. – Z. dt. geol. Ges., **124**: 309–328; Hannover.
- ZIEGLER, P. A. (1982): Geological Atlas of Western and Central Europe. – 130 S., 29 Abb., Tafelbd.; Den Haag (Shell Internationale Petroleum Maatschappij BV).

Manuskript eingegangen am 18.08.2006, angenommen am 16.05.2007

NICOLA HUG¹ & GUIDO VERO²

Ein vollständiges Zechsteinprofil im südlichen Odenwald: die hydrogeologische Erkundungsbohrung Langenthal BK2/05

Kurzfassung

Die Kernbohrung Langenthal BK2/05 im südlichen hessischen Odenwald durchteuft Sedimente des Quartärs, des Unteren Buntsandsteins, des Zechsteins und des Rotliegendes und endet bei 77 m Endteufe im unterkarbonischen Heidelberg Granit.

Hydrogeologisch wird das Quartär als Lockergesteinsgrundwasserleiter erschlossen. Der Untere Buntsandstein ist als Kluftgrundwasserleiter mit Stockwerksbau ausgebildet. Die „Zechsteindolomite“ konnten als Kluft- und Karstgrundwasserleiter charakterisiert werden. Die Sandsteinabfolgen des Rotliegendes weisen ebenfalls Grundwasserführung auf. Der Granit ist weder vergrüst noch geklüftet und deshalb als Grundwassernichtleiter einzustufen.

Die insgesamt 21,8 m mächtigen Zechsteinablagerungen werden in den randmarinen „Zechsteindolomit“ (6,1 m), den randmarin-brackischen „Zechsteinton“ (2,3 m) und die terres-

trischen, unter Süßwasserbedingungen abgelagerten „Schieferletten“ (13,4 m) gegliedert. Aufgrund der Sedimentstrukturen sowie der Bioturbations- und Paläobodenmerkmale lassen sich in den „Schieferletten“ der Bohrung Langenthal drei Bereiche differenzieren und hinsichtlich ihres Ablagerungsmilieus interpretieren. Im Basisbereich der „Schieferletten“ wurden zwei-klaupig erhaltene Schalenabdrücke gefunden.

Das vollständig gekernte Zechsteinprofil eignet sich als Referenzprofil für den Odenwälder Zechstein, insbesondere für die pelitische terrestrische „Schieferletten“-Fazies. Eine Neubenennung dieser Kartiereinheit (Formation) des Odenwaldes nach heute üblichen stratigraphischen Nomenklaturvorschriften steht bislang noch aus. In der vorliegenden Arbeit wird der Name „Langenthal-Formation“ vorgeschlagen und es werden Möglichkeiten der Anbindung an die baden-württembergische Zechsteingliederung aufgezeigt.

Abstract

The cored well Langenthal BK2/05 in the southern Odenwald of Hesse penetrated sediments of the Quaternary, the Lower Buntsandstein (lowermost Triassic), the Zechstein and Rotliegend (Permian) and ended in the Lower Carboniferous „Heidelberg Granite“.

Hydrogeologically, the Quaternary units are developed as porous aquifer. The Lower Buntsandstein is a fractured aquifer, subdivided into a multiaquifer system. The „Zechstein dolomite“ is characterized as a combination of fractured and karst aquifer. Also the Rotliegend sandstones are developed as fractured aquifer and show minor evidence of groundwater inflow. The underlying granite is neither weathered nor jointed and thus characterized as an aquifuge.

The 21,8 m thick sediments of the Zechstein are divided into the marginal marine „Zechstein Dolomite“ (6,1 m), the marginal marine to brackish „Zechstein Clay“ (2,3 m) and the

terrigenous freshwater pelitic sediments of the „Schieferletten“ (13,4 m). On the basis of sedimentary structures, bioturbation and paleosol features, the latter are divided into three parts and interpreted with respect to the sedimentary environment. Well preserved imprints of shells were found in the lowermost part of the „Schieferletten“.

The continuously cored Zechstein profile of the Langenthal well is recommended as reference profile for the Odenwald region, especially for the pelitic terrigenous „Schieferletten“ facies. A new name for this mapping unit (formation) of the Hessian Odenwald is still to be found, following the rules of stratigraphic nomenclature. The following paper proposes the name „Langenthal Formation“ and points out how this formation can be correlated with the Zechstein formations of Baden Württemberg.

¹ Dr. N. Hug (e-mail: n.hug@hlug.de), Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Rheingastr. 186, 65203 Wiesbaden

² Dipl.-Geol. G. Vero (e-mail: gvero@vero-online.de), GeoEnergy Consulting GmbH, Bahnhofstr. 46, 76137 Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	26
2. Geologisches Kurzprofil der Bohrung Langenthal BK2/05	26
3. Hydrogeologische Ergebnisse	27
4. Sedimentologische und stratigraphische Interpretation des Zechsteinprofils	29
4.1 Randmariner Zechstein: „Zechsteindolomit“ und „Zechsteinton“	31
4.2 Terrestrischer Zechstein: „Schieferletten“ – ein Referenzprofil für die „Langenthal-Formation“?	32
5. Schlussfolgerungen	34
6. Ausblick	35
7. Schriftenverzeichnis	35
8. Anhang: Schichtenverzeichnis der Bohrung Langenthal BK2/05	37

1. Einleitung

Die hydrogeologische Erkundungsbohrung Langenthal BK2/05 wurde 2005 im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme des Odenwaldes und seiner Randgebiete durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) abgeteuft. Ziel der Bohrung war in erster Linie der Nachweis der Verkarstung des so genannten „Zechsteindolomits“ und dessen Rolle als Grundwasserleiter. Dies setzte ein Durchteufen des im südlichen Odenwald nicht lückenlos erhaltenen Dolomithorizonts voraus. Im Rahmen der geologischen Landesaufnahme des HLUG sollten in diesem Zusammenhang die lithologische Ausbildung des Zechsteins in der Odenwälder Randfazies und der Anteil mariner Ablagerungen im tiefsten Zechstein näher untersucht werden.

Die Bohrung Langenthal BK2/05 wurde vom 11. bis 23. Juli 2005 von der Firma Bohr- und Umwelttechnik GmbH (Caaschwitz) bis zur Endteufe von 77 Metern als Kernbohrung niedergebracht. Der Bohransatzpunkt liegt in der Gemarkung Hirschhorn-Langenthal auf der nordöstlichen Talseite

des Ulfenbaches, der bei Hirschhorn in den Neckar mündet (Abb. 1; Messtischblatt 6519 Eberbach, Rechtswert 3489202, Hochwert 5481807, 188 m ü. NN). Damit ist die Bohrung die südlichste hessische Bohrung, die den Zechstein vollständig durchteuft, und stellt ein wichtiges Bindeglied zu baden-württembergischen Erkundungsbohrungen im südlich angrenzenden Kraichgau dar (s. Abschnitt 4). Die Bohrung Langenthal wurde durch das GGA-Institut Hannover und das HLUG geophysikalisch vermessen (GR, SAL/TEMP, FLOW, CAL, FEL). Die Bohrkern wurden von den Kollegen der Geologischen Landesaufnahme Dr. C. Hoselmann (Quartär), Dr. M. Dersch-Hansmann (Buntsandstein, Quartär), Dr. N. Hug und Dr. H. Heggemann (Zechstein, Rotliegend) sowie Dr. H.-D. Nesbor (Kristallin) lithologisch aufgenommen und stratigraphisch eingestuft. Die Kerne sind im Bohrkernlager des HLUG unbefristet eingelagert und stehen somit für weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung.

2. Geologisches Kurzprofil der Bohrung Langenthal BK2/05

Im Folgenden wird die erbohrte Gesteinsabfolge zusammenfassend beschrieben. Die stratigraphische Einstufung ist zum Teil noch vorläufig und wird in Abschnitt 4 näher erläutert. Das vollständige petrographische Schichtenverzeichnis findet sich im Anhang.

Die Kernbohrung Langenthal BK2/05 (Abb. 2) durchteufte bis 21,4 m lehmig-grusige Schwemmfächerablagerungen des Quartärs, darunter 9 m Feinsandsteine des Unteren Buntsandsteins (Heigenbrückener Sandstein). Ab 30,9 m Teufe wurden insgesamt 13,4 m mächtige dunkelrotbraune karbonatfreie Pelite mit einzelnen Feinsandsteinlagen erbohrt, die auf den alten Geologischen Karten des hessischen Odenwaldes als „Schieferletten“ bezeichnet wurden und heute dem

Zechstein zugerechnet werden. Die „Schieferletten“ können in dieser Bohrung aufgrund der Sedimentgefüge in drei Bereiche gegliedert werden: Im oberen Bereich (3 m) zeigen die Pelite überwiegend polygonal-bröckelige bis splittrige Gefüge, die auf pedogene Überprägung zurückgehen (Paläobodenbildung, siehe Abschnitt 4.2). Der mittlere Bereich (6,7 m) ist gekennzeichnet durch starke Bioturbation der Pelite und Feinsandsteine, neben ebenfalls intensiver Pedoturbation der Pelite. Der untere, knapp 4 m mächtige Bereich weist überwiegend Feinschichtung auf, die nur in einzelnen Lagen pedogen oder bioturbat überprägt ist. Etwa ein Meter über der Basis der „Schieferletten“ wurden zweiklappig erhaltene Schalenabdrücke gefunden, die „ähnlich, wenn nicht identisch mit

„Schizodus“ sind (vorläufige Bestimmung durch Prof. Dr. J. W. Schneider, frdl. schriftl. Mitt.). Die „Schieferletten“ werden unterlagert von 2,2 m mächtigen, ebenfalls karbonatfreien, aber durchweg feingeschichteten und violettbraun oder violettgrau gefärbten Peliten, die auch aufgrund eingeschalteter Dolomitstein-Lagen dem tieferen Zechstein zugeordnet werden („Zechsteintone“). Die Zechsteinbasis bilden 6 m mächtige

verkarstete Dolomitsteine mit zahlreichen oolithischen Lagen („Zechsteindolomit“). Darunter schließen sich 9 m mächtige grobklastische Ablagerungen des Rotliegends an, vorwiegend Brekzien bzw. „Fanglomerate“, nach unten übergehend in zunehmend feinkörnige Sandsteine. Ab 62 m bis zur Endteufe von 77 m traf die Bohrung einen porphyrischen Granit an, den unterkarbonischen „Heidelberger Granit“.

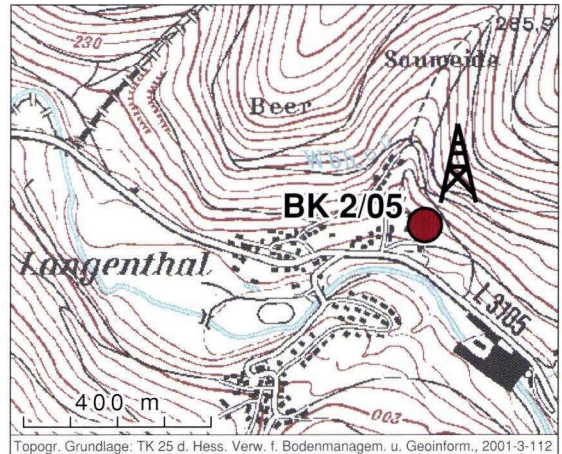
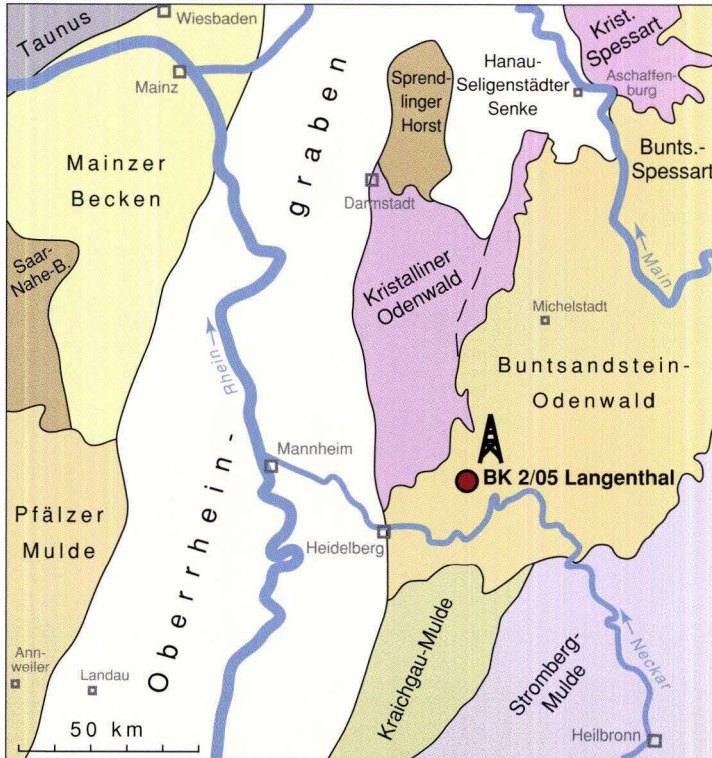


Abb. 1. Lage der Kernbohrung Langenthal BK2/05 (Gemarkung Hirschhorn-Langenthal, Messtischblatt 6519 Eberbach, Rechtswert 34 89 202, Hochwert 54 81 807, 188 m ü. NN).

3. Hydrogeologische Ergebnisse

Die zuvor vermutete Verkarstung des Zechsteins im Untergrund konnte durch die Bohrung Langenthal abschnittsweise in einer Teufe zwischen 46 und 52 m nachgewiesen werden. Die durchgeführten Flowmetermessungen im ruhenden und angeregten Zustand (3,6 l/s) zeigten Zuflussindikationen in den verkarsteten und geklüfteten Bereichen des „Zechsteindolomits“. Bestärkt wurde dies durch einen leichten Anstieg der Salinität und geringe Schwankungen der Temperaturen.

Ferner sind zahlreiche diffuse Zuflüsse aus den Sandsteinen des Unteren Buntsandsteins, Zechsteins und Rotliegends iden-

tifiziert worden. Untergeordnet konnte im Bereich von 37,5 m in den „Schieferletten“ ein Zufluss festgestellt werden.

Das granitische Grundgebirge zeigt im Bereich der Bohrung keine Anzeichen für Vergrusung oder Klüftung. Eine Grundwasserführung konnte nicht nachgewiesen werden.

Die relativ mächtigen pleistozänen bis holozänen Schwemmfächerablagerungen weisen eine deutliche Wasserführung auf, die vermutlich verstärkt wird durch die Lage der Bohrung am Hangfuß (Abb. 1). Das anströmende Hangwasser tritt über die Bohrung aus.

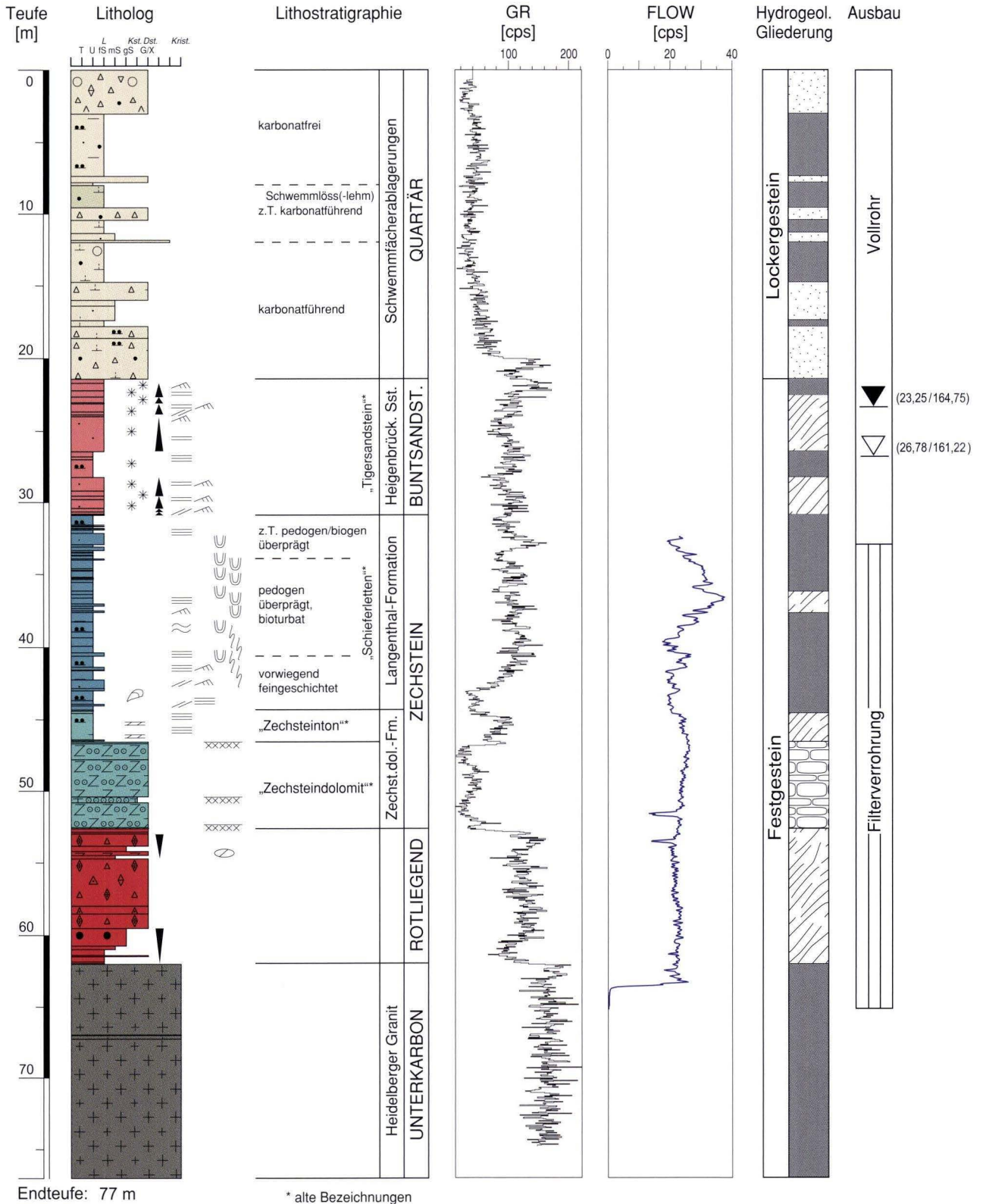


Abb. 2. Profil der Bohrung Langenthal BK2/05 mit lithostratigraphischer Gliederung (siehe Abschnitt 4 und Schichtenverzeichnis im Anhang), Gamma-Strahlungs-Log (GR, HLUG), Flowmeter (FLOW, GGA-Institut), hydrogeologischer Gliederung und Ausbau.

4. Sedimentologische und stratigraphische Interpretation des Zechsteinprofils

Das Zechsteinprofil der Bohrung Langenthal ist von stratigraphischer Bedeutung, da es die Verbindung von Zechstein-Bohrungen des nördlichen und mittleren Odenwaldes mit weiter südlich gelegenen Bohrungen des baden-württembergischen Odenwaldes und des Kraichgau und möglicherweise auch mit Bohrungen und Aufschlüssen der Südpfalz herstellen kann (vgl. Abb. 3).

Die Zechstein-Sedimente liegen im Odenwald, d. h. am südwestlichen Rand des Zechsteinbeckens, in vorwiegend pelitischer Randfazies vor. Nur zu Beginn des Zechsteins erreichte die Meerestransgression von Norden auch SW-Deutschland und es kam zur Ablagerung randmariner Sedimente, in der Bohrung Langenthal wie auch in anderen Odenwälder Profilen in Form von Dolomit- und Oolithsteinen („Zechsteindolomit“), die von violettrotten und grauen Tonsteinen („Zechsteinton“) überlagert werden. Diesen beiden Schichtgliedern folgen vorwiegend pe-

litische, terrestrische Rotsedimente, die sog. „Schieferletten“, die wegen ihres charakteristisch polygonal-bröckeligen Zerfalls und ihrer dunkelrotbraunen Farbe z. T. auch als „Bröckelschiefer“ oder „Leberschiefer“ bezeichnet wurden (z. B. SALOMON 1903). Die pelitische Fazies der „Schieferletten“ geht nach Süden in eine zunehmend sandige Fazies über (BACKHAUS 1975), die in der amtlichen baden-württembergischen Gliederung zur „Tigersandstein-Formation“ zusammengefasst wird (LGRB 2005; vgl. Tab. 1). Über den „Schieferletten“ kann im hessischen Odenwald der Heigenbrückener Sandstein auskartiert werden (BACKHAUS 1975), der gemäß Beschluss der Subkommission Perm-Trias die Basis des Buntsandsteins darstellt (SKPT 1993). Der Heigenbrückener Sandstein wurde wegen seines gefleckten Aussehens auf den alten Geologischen Karten des hessischen Odenwaldes ebenfalls als „Tigersandstein“ bezeichnet, ist jedoch nicht mit der o. g. Tigersandstein-For-

Tab. 1. Lithostratigraphische Gliederung des Zechsteins im hessischen Odenwald (CHELIUS 1894, 1897, KLEMM 1900, 1928, ds. Arbeit), in Baden-Württemberg (LGRB 2005) und in der Südpfalz (LGB Rheinland-Pfalz 2005). Korrelationen zwischen diesen Regionen, insbesondere zwischen rechts- und linksrheinischen, stehen weitgehend noch aus.

hessischer Odenwald		Baden-Württemberg	Südpfalz
alte Geol. Karten*	Vorschlag ds. Arbeit	LGRB 2005	LGB Rhld.-Pf. 2005
Schieferletten (su1)	Langenthal-Formation (zL)	Tigersandstein-Formation (zT) (Tigersandstein-, Bröckelschiefer-, Basiskonglomerat-Subformation)	Speyerbach-Schichten (zSp) Annweiler-Schichten (zA)
lokal: Zechsteinton			
Zechsteindolomit (z)	Zechsteindolomit-Formation (zD)	Zechsteindolomit-Formation (zD)	Rothenberg-Schichten (zR)
			Queich-Schichten (zQ)

* CHELIUS (1894, 1897), KLEMM (1900, 1928)



Legende zu Abb. 2

Korngrößen:

T	Ton
U	Schluff
fS	Feinsand
mS	Mittelsand
gS	Grobsand
G/X	Kies/Grus
L	Lehm
Kst.	Kalkstein
Dst.	Dolomitstein
Krist.	Kristallines Gestein

Strukturen:

—	Horizontalschichtung
↗	Schrägschichtung
⋈	Rippelschichtung
≡	Feinschichtung
≈	wellige Schichtung
*	Glimmerführung
oo	Ooidführung
∩	Fossilführung
≡≡	Dolomitlage

U	Bioturbation
⚡	Rutschharnische
xxxxx	Karsthorizont
o	Dolomitknolle/-knollenlage
▲	fining-upward-Sequenz
▼	coarsening-upward-Sequenz

Hydrogeologie:

■	Grundwassernichtleiter
□	Lockergesteinsgrundwasserleiter
▨	Festgesteinsgrundwasserleiter
□	Karstgrundwasserleiter
▼ (23,25/164,75)	Ruhewasserspiegel [m u. GOK / m ü. NN]
▽ (26,78/161,22)	Betriebswasserspiegel [m u. GOK / m ü. NN] bei Entnahme von 3,6 l/s

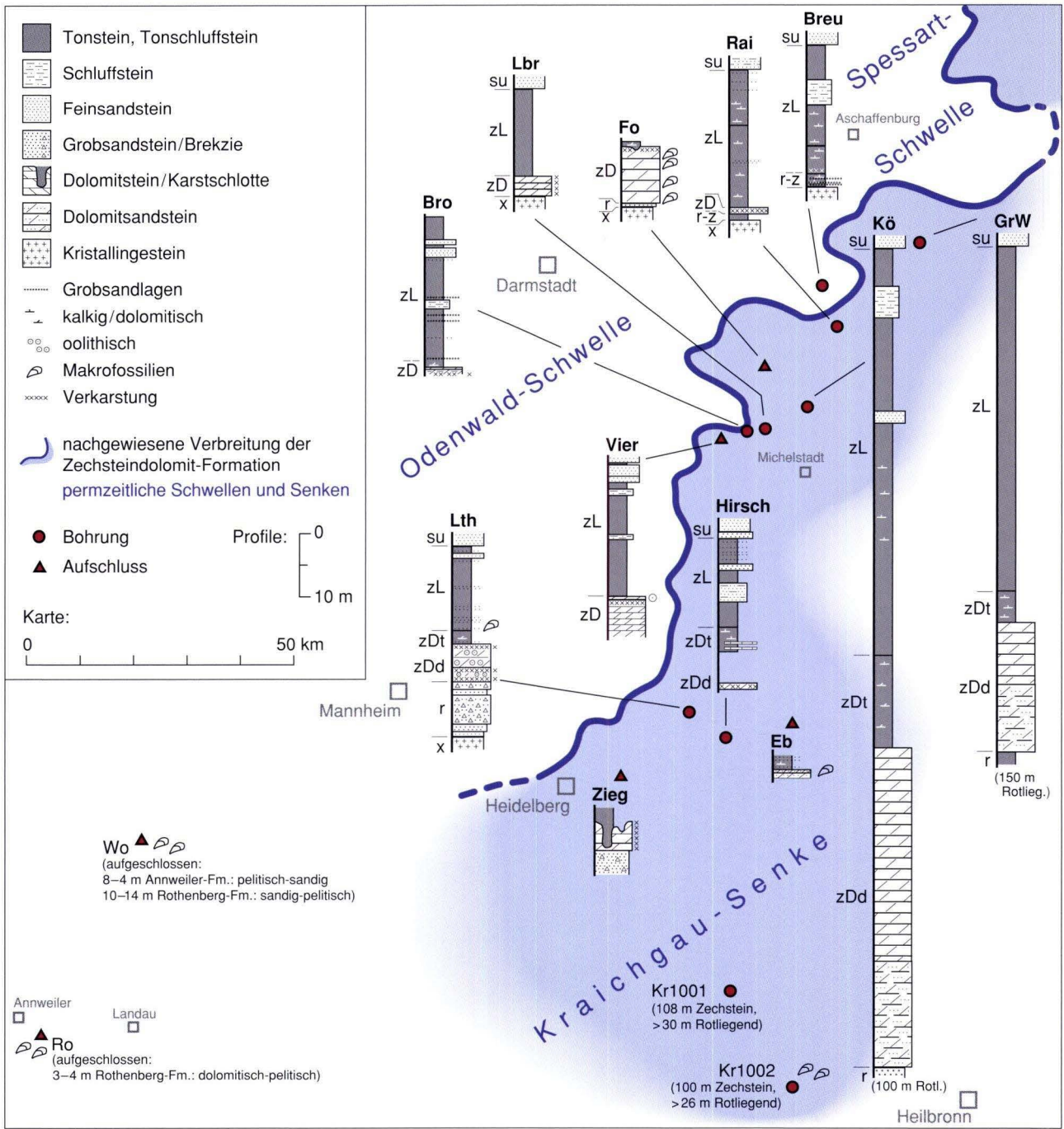


Abb. 3. Zechsteinprofile am Ostrand der Odenwald-Schwelle und in angrenzenden Senken mit nachgewiesener Verbreitung der Zechsteindolomit-Formation (nach Bohrungen und Geologischen Karten 1 : 25 000); generalisierte Profilzeichnungen und Mächtigkeitsangaben zusammengestellt nach: **Breu:** Kernbrg. Breuberg, HUG (2007a); **Bro:** Kernbrgn. Brombachtal, DERSCH-HANSMANN & HUG (2001), HUG (2004), siehe auch Abb. 4; **Eb:** Aufschluss Eberbach, SALOMON (1903); **Fo:** Aufschluss Forstel-Hummetroth, BACKHAUS (1961); **GrW:** Bohrung Großwallstadt, NÖRING (1957); **Hirsch:** Meißenbrg. Hirschhorn/Neckar, BÖKE & DIEDERICH (1969), modifiziert; **Kö:** Meißen- und Kernbrg. Bad König, DIEDERICH & BÖKE (1972), HEGGEMANN & HUG (1999); **Kr1001:** Kernbrg. Kraichgau 1001, LEIBER (1987); **Kr1002:** Kernbrg. Kraichgau 1002, JUNGHANS et al. (1998, 2002); **Lbr:** Meißenbrg. Langenbrombach, DERSCH-HANSMANN (2004); **Lth:** Kernbrg. Langenthal, ds. Arbeit; **Rai:** Meißenbrg. Breuberg-Rai-Breitenbach, HUG (2007 b); **Ro:** Aufschluss Rothenberg, HENTSCHEL (1963), SCHWEISS (1984); **Vier:** Tongrube Vierstöck, BACKHAUS (1980), SCHWEISS (1984); **Wo:** Aufschluss Wolfsbergtunnel, HORNING (1999, 2001); **Zieg:** Aufschluss Ziegelhausen, BECKSMANN (1958). Stratigraphische Kürzel: su: Unterer Buntsandstein, zL: Langenthal-Formation, zD: Zechsteindolomit-Formation (zDt: tonige, zDd: dolomitische Fazies), r: Rotliegend, x: Kristallines Grundgebirge.

mation der baden-württembergischen Gliederung gleichzusetzen (s. a. DIEDERICH 1966, BACKHAUS 1975, BACKHAUS & SCHWARZ 2003).

Die genaue stratigraphische Einstufung der Odenwälder Zechsteinsedimente ist noch nicht abschließend geklärt. Korrelationsversuche mit der Beckengliederung (z1–z7) unternahm in jüngerer Zeit unter anderen BACKHAUS (1961, 1975, 1980), DIEDERICH (1966, 1970), SCHWEISS (1984) und PAUL (1985). Derzeit üblich ist die Einstufung des „Zechsteindolomits“ als Werra-Karbonat (z1CA) nach PAUL (1985), der die Ansicht von BACKHAUS (1980), dass die obersten Karbonatlagen mit dem Leine-Karbonat (z3CA) zu korrelieren seien, widerlegt. SCHWEISS (1984) gliederte die pelitischen Zechstein-Ablagerungen aufgrund von sedimentpetrographischen Untersuchungen in Anlehnung an die stratigraphischen Arbeiten von BACKHAUS und KÄDING (1978), wobei er die „Zechsteintone“ vorläufig als Leine- bis Aller-Folge (z3–4) und die „Schieferletten“ folglich als höheren Zechstein ab der Ohre-Folge (z5) einstuft. Die damalige Zechstein-Buntsandstein-Grenze – heute die Basis der Fulda-Folge (z7) – legte SCHWEISS an die Basis einer zweiten Sandschüttung im unteren Bereich der „Schieferletten“.

4.1 Randmariner Zechstein: „Zechsteindolomit“ und „Zechsteinton“

Die Dolomit- und Oolithsteine des „Zechsteindolomits“ sind Ablagerungen des Flachwasserbereichs, in dem die Wellenbasis bis auf die Sedimentoberfläche reicht und es durch Hin- und Herbewegen von Sedimentkörnern im kalkübersättigten Wasser zur Bildung von Ooiden kommt. Dieser Küstenbereich auf bzw. am Rand der Odenwald-Schwelle fiel noch während des Zechstein 1 trocken, was zur Verkarstung der Karbonate und teilweise zur Mangan-Vererzung führte (CHELIUS 1897, BECKSMANN 1958, PAUL 1985 u. a.). In den Karbonat-

ablagerungen der Bohrung Langenthal sind drei Paläokarst-Horizonte dokumentiert, die mit früheren Untersuchungen zur Verkarstung des Werra-Karbonats während Regressionen des Zechsteinmeeres in Einklang stehen: PAUL (1985) weist für den Odenwald zwei Verkarstungsphasen nach, von denen die erste innerhalb des Werra-Karbonats und die zweite am Ende der Karbonatsedimentation liegt. Die auf diese Weise belegten zwei Subzyklen des Werra-Karbonats (s. a. BECKER 2002: 80f.) lassen sich nach PAUL nicht nur mit Spessart-Profilen, sondern mit Profilen des gesamten Zechsteinbeckens bis nach England korrelieren. Eine weitere Verkarstungsphase zwischen den beiden oben genannten geht nach PAUL auf eine kleinere Regression des Zechsteinmeeres zurück und lässt sich daher ausschließlich in Schwellenrand-Profilen nachweisen, z. B. am südlichen Harzrand, in Polen (PERYT 1986, zit. n. PAUL 1985) – und offensichtlich auch in der Bohrung Langenthal am Ostrand der Odenwald-Schwelle. Die letzte Verkarstungsphase nach Ablagerung des Werra-Karbonats könnte möglicherweise auch in die Zeit der Ablagerung des Oberen Werra-Sulfats (z1ANb) fallen, die nach STROHMENGER et al. (1996) einem Meeresspiegel-Tiefstand im gesamten Zechsteinbecken entspricht (vgl. PAUL 2006).

Die Mächtigkeit der „Zechsteindolomite“ schwankt am Ostrand der zechsteinzeitlichen Odenwald-Schwelle sehr stark (Abb. 3). Die in Langenthal erbohrten 6 m liegen im Bereich der für schwellennahe Positionen typischen Mächtigkeit, vergleichbar mit denen in der Gemeinde Brombachtal (BACKHAUS 1980, DERSCH-HANSMANN & HUG 2001, DERSCH-HANSMANN 2004, HUG 2004) und weiter nördlich bei Forstel-Hummetroth (BACKHAUS 1961). Bohrungsaufnahmen in den beiden genannten Gebieten sowie Schachtprofile aus derselben Region von CHELIUS (1897: Taf. 1) haben jedoch gezeigt, dass in dieser schwellennahen Position die Karbonate innerhalb weniger 100 Meter vollständig ausfallen können (Abb. 4). Dies wird vor allem auf einen morphologisch relativ stark geglieder-

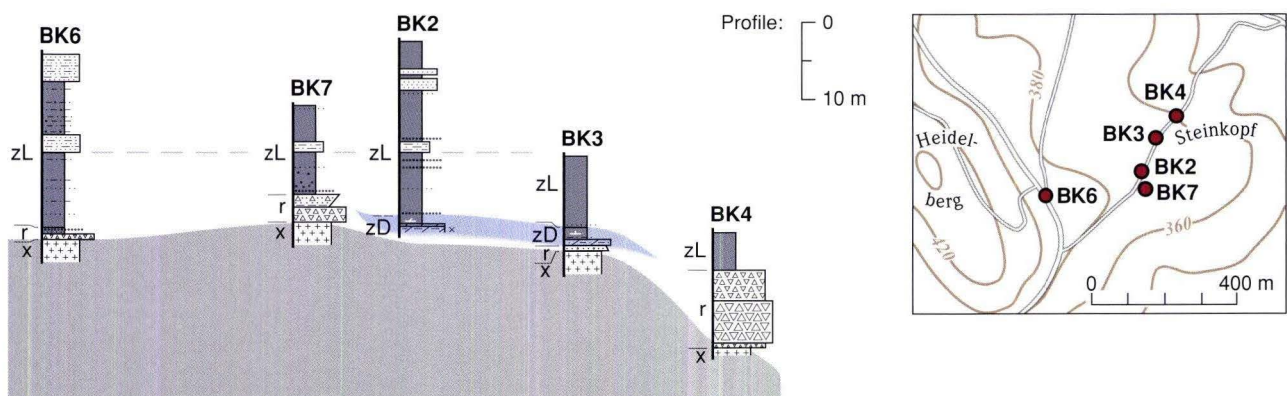


Abb. 4. Kleinräumiges Paläorelief am Ostrand der Odenwald-Schwelle, verdeutlicht durch die Verbreitung der Zechsteindolomit-Formation und Mächtigkeitsschwankungen grobklastischer Rotliegendesedimente in Bohrungen aus der Gemeinde Brombachtal (DERSCH-HANSMANN & HUG 2001, HUG 2004). Als Bezugshorizont wurde eine (hier) markante Schluffsteinschicht in der Langenthal-Formation gewählt. Großräumige geographische Position sowie Legende und stratigraphische Kürzel siehe Abb. 3.

ten Küstenbereich zurückgeführt, in dem Karbonate in lagunartigen Flachwasserbereichen abgelagert wurden, die durch Inseln und Vorsprünge des kristallinen Grundgebirges voneinander getrennt waren (BACKHAUS 1961, HUG 2004). Zusätzlich könnte die zechsteinzeitliche Verkarstung dazu beigetragen haben, primär geringmächtige Karbonate bereichsweise vollständig wieder wegzulösen (CHELIUS 1897, BECKSMANN 1958).

Profile aus permzeitlichen Absenkungsbereichen, wie z. B. der Kraichgau-Senke oder dem östlichen Odenwald (Bohrung Bad König), unterscheiden sich von der in der Bohrung Langenthal erbohrten Schwellenrandfazies schon aufgrund der wesentlich größeren Mächtigkeiten des gesamten Zechsteins und auch des Rotliegendes (Abb. 3).

Die auflagernden **„Zechsteintone“** sind in der Bohrung Langenthal als feingeschichtete, violettrote und -graue Tonsteine ausgebildet und wurden in randmarinem bis brackischem Milieu abgelagert (vgl. SCHWEISS 1984). Die Feinschichtung und fehlende Bioturbation sprechen für das weitgehende Fehlen benthischer Organismen, was mit eher lebensfeindlichen Bedingungen – zum Beispiel hoher Salinität – zusammenhängen kann. Wie lange die Zeit der randmarin-brackischen Tonsedimentation im südlichen Odenwald andauerte, bevor die überwiegend terrestrische „Schieferletten“-Sedimentation einsetzte, muss noch genauer untersucht werden.

Auf den – durchweg sehr alten – geologischen Karten des hessischen Odenwaldes wurden die „Zechsteintone“ nicht einzeln ausgehalten, sondern zu den „Schieferletten“ und damit zum damaligen Unteren Buntsandstein gerechnet (CHELIUS 1894, 1897, KLEMM 1900, 1928). CHELIUS (1894) stellt für Blatt 6119 Groß-Umstadt zwar Überlegungen an, die untersten Tonsteine der „Schieferletten“, die dort zahlreiche dolomitische Lagen enthalten, in den „Zechstein“ (d. h. zum „Zechsteindolomit“) zu stellen, kann jedoch aufgrund der Aufschlussverhältnisse und der geringmächtigen Ausbildung eine Grenze innerhalb der Schieferletten nicht festlegen. Nach weiteren Kartierarbeiten kommt CHELIUS (1897: 35) zu dem Schluss, dass die dem „Zechsteindolomit“ auflagernden 0,5–2 m mächtigen „rothen Letten ... als Schieferletten des

unteren Buntsandsteins anzusehen sind und nicht als Zechsteinletten, da sie, über den Dolomit übergreifend, auch dem Granit unmittelbar auflagern und in gleicher Ausbildung im Buntsandsteingebiet über dem Dolomit vorhanden sind.“ BACKHAUS (1960, 1961, 1980) ordnet die „Zechsteintone“ dem Zechstein 3/4 zu.

Aus heutiger Sicht stehen die „Zechsteintone“, wie oben dargelegt, dem randmarinen „Zechsteindolomit“ genetisch wesentlich näher als den terrestrischen „Schieferletten“. Daher sollten „Zechsteindolomit“ und „Zechsteintone“ künftig zu einer Formation (Kartiereinheit) zusammengefasst werden. Dies würde auch in Einklang stehen mit der bereits modernisierten baden-württembergischen Zechsteingliederung, die in der „Zechsteindolomit-Formation“ Karbonate, Mergel und Tone zusammenfasst (LGRB 2005 und Dr. E. Nitsch, frdl. mdl. Mitt. 2007; vgl. Tab. 1).

4.2 Terrestrischer Zechstein: „Schieferletten“ – ein Referenzprofil für die „Langenthal-Formation“?

Die „Schieferletten“ beginnen über den „Zechsteintonen“ mit einer ersten Schluff- oder Feinsandsteinlage und bestehen insgesamt aus rotbraunen (nicht mehr violettstichigen) Peliten mit häufig eingeschalteten Schluff- und Feinsandsteinen. Auch die Sedimentgefüge der „Schieferletten“ heben sich von denen der „Zechsteintone“ ab. Auf der Grundlage der Sedimentgefüge lassen sich die „Schieferletten“ in der Bohrung Langenthal in drei Bereiche untergliedern (s. Abschnitt 2, Abb. 2), die im Folgenden näher beschrieben und interpretiert werden:

Die besonders im **unteren Bereich** der „Schieferletten“ in der Bohrung Langenthal (ca. 40,6–44,3 m) häufig noch erhaltene Feinschichtung der Pelite belegt deren aquatische Ablagerung unter Stillwasserbedingungen. Die eingeschalteten Schluff- und Feinsandsteine dieses Bereichs zeigen meist kleinmaßstäbige Schräg- und Rippelschichtung, d. h. sie wurden in flachem Wasser bei geringen Transportgeschwindigkeiten abgelagert. Bei 43,45 m, etwa ein Meter über der Basis der „Schieferletten“, wurden bis zu 12 mm lange, zweiklappig



Abb. 5. Schalenabdruck in zweiklappiger Erhaltung in einem Pelit aus 43,45 m Teufe (Basisbereich der „Schieferletten“): links: gesamter Abdruck, Mitte: Schlossbereich, rechts: Anwachsstreifen (Skalen: mm).

erhaltene Schalenabdrücke mit deutlich erkennbaren Anwachsstreifen gefunden (Abb. 5). Dabei handelt es sich nach vorläufiger Bestimmung von Prof. Dr. J. W. Schneider (frdl. schriftl. Mitt.) mit hoher Wahrscheinlichkeit um Abdrücke von *Schizodus* – eine nähere Bestimmung ist noch in Arbeit. *Schizodus* ist eine marine bis brackische Muschel, die auch erhöhte Salinität verträgt. Schneider fand auf der Rückseite desselben Handstücks auch oxidierte Pflanzenreste, die wahr-



Abb. 6. Bioturbater Sandstein im mittleren Bereich der „Schieferletten“ in der Bohrung Langenthal (37,1 m Tiefe, gewölbte Kernoberfläche).

scheinlich vom nahen Festland eingeschwemmt oder eingeweht worden sind.

Für den unteren Bereich der „Schieferletten“ ergibt sich somit – auch im Vergleich mit ähnlichen Ablagerungen der Hessischen Senke (HUG 2004) – das Bild einer weiten Überflutungs- oder Schlammebene einer Küstensabkha („mudplain“), in die von Zeit zu Zeit nach Niederschlagsereignissen Schluff oder Feinsand eingeschwemmt wurde. Diese Ebene hatte anfangs wohl noch direkte Verbindung zum Randmeer, wie die wahrscheinlich von *Schizodus* stammenden Schalenabdrücke und auch die überwiegend feingeschichteten, z.T. noch schwach mergeligen Pelite nahelegen. Bereits in diesem unteren Bereich der „Schieferletten“ treten aber – nach oben hin immer häufiger – Pelite mit massigem bis bröckelig-splittigem Gefüge und pedogenen Rutschharnischen („slicken sides“) auf. Dieses Gefüge wird als pedogenes Aggregatgefüge interpretiert, das für tonreiche Böden (Pelo- und Vertisole) typisch ist und auf vielfach wiederholtes Quellen und Schrumpfen des Bodens nach Durchfeuchtung und Austrocknung zurückgeht (HUG 2004). Dazu passen auch die beobachteten Bleichungsflecken mit z.T. dunklem Zentrum, die häufig kleine Wurzelröhren nachzeichnen. Hier dokumentieren sich demnach zunehmend terrestrische Ablagerungsbedingungen, wahrscheinlich in sehr flachen, periodisch trockenfallenden Seen oder Tümpeln auf der Überflutungsebene. Die pedogene Überprägung der Sedimente spricht für sehr geringe Sedimentationsraten bzw. längere Sedimentationspausen, die offensichtlich bereits im Verlauf des unteren Bereichs der „Schieferletten“ die Phasen der Sedimentakkumulation unterbrechen. Dies kann auf Veränderungen des Sedimentangebots aus den Liefergebieten, des Wasserhaushalts bzw. der Niederschlagsrate oder auch des Akkomodationsraums – oder einer Kombination dieser Faktoren – zurückgehen.

Im **mittleren Bereich** der „Schieferletten“ (ca. 33,9–ca. 40,6 m) sind nahezu alle Pelite pedogen überprägt. Hinzu kommt eine nach oben hin immer häufigere und stärkere Bioturbation, die besonders in den feingeschichteten Feinsand- und Schluffsteinlagen in Form von Grabgängen gut erkennbar ist (Abb. 6). In diesem mittleren Bereich liegt offensichtlich das Minimum an Sedimentakkumulation und folglich das Maximum an Bioturbation (vermutlich vorwiegend subaquatisch) und Pedoturbation (während Zeiten wiederholter subaerischer Exposition). Starke bioturbate Überprägung ist auch kennzeichnend für die sandigen Annweiler Schichten, die in der linksrheinisch angrenzenden Südpfalz den höheren Zechstein aufbauen (HORNUNG 1999, 2001, LGB 2005; vgl. Tab. 1) – die Korrelation des Odenwälder Zechsteins mit dem südpfälzischen steht jedoch weitgehend noch aus (vgl. DACHROTH 1976, SCHWEISS 1984, PAUL 1985, DACHROTH 1988, DITTRICH 1996).

Im **oberen Bereich** der „Schieferletten“ (30,9–ca. 33,9 m) tritt kaum noch Bioturbation auf, und auch die pedogenen Gefüge der Pelite gehen zurück. Vereinzelt kommen fein-

geschichtete oder sogar feinblättrige Pelitlagen vor. Feinsand- und Schluffsteine zeigen in diesem Bereich meistens runde graue Flecken, die noch auf pedogene oder bioturbate Überprägung zurückgehen könnten (z. B. Wurzelröhren). Insgesamt scheint in diesem oberen Bereich die Sedimentationsrate wieder etwas höher zu sein, die Sedimentationspausen gegenüber dem liegenden Bereich entsprechend seltener oder kürzer. Auch SCHWEISS (1984) konnte insbesondere durch tonmineralogische Untersuchungen nachweisen, dass sich im oberen Bereich der „Schieferletten“ stärker terrestrische, süßwasserdominierte Sedimentationsbedingungen etablierten und andere Liefergebiete angeschlossen wurden. Dies steht in Einklang mit den Sedimenten des höchsten Zechsteins der Hessischen Senke, die ebenfalls bereits deutlich vor Beginn des Buntsandsteins höheren Sedimenteintrag ins Becken – vor allem als Folge von erhöhtem Süßwasserzufluss von den Beckenrändern – dokumentieren (HUG 2004).

Die in der Bohrung Langenthal erbohrte vollständige Abfolge der sog. „Schieferletten“, die im Odenwald den höheren Zechstein repräsentieren, eignet sich als **Referenzprofil** für diese pelitische Randfazies. Bei geologischen Kartierungen sind die „Schieferletten“ als faziell relativ einheitliches und genetisch zusammenhängendes Sedimentpaket als Kartiereinheit (Formation) auszuhalten und von den im Liegenden lokal entwickelten „Zechsteintonen“, die den Top der Zechsteindolomit-Formation bilden, abzutrennen (s. Abschnitt 4.1 und Tab. 1). Eine Neubenennung der Kartiereinheit „Schieferletten“ wäre sinnvoll, da die Sedimente – wie oben beschrieben – in der Regel nicht „schiefrig“ sind und da „Letten“ ein veralteter und nicht eindeutig definierter Begriff ist. Bei Neubenennungen sollten Kartiereinheiten gemäß STEININGER &

PILLER (1999) nach einer Typuslokalität (Aufschluss oder Bohrung) benannt werden. Falls sich das hier beschriebene vollständige Profil als geeignetes Referenzprofil für den Odenwald als Verbreitungsgebiet dieser Kartiereinheit herausstellt, bietet sich der Name „Langenthal-Formation“ an. Langenthal liegt zwar eher am südlichen Rand des Hauptverbreitungsgebietes der „Schieferletten“; das weiter nördlich gelegene, mehrfach publizierte Profil in der ehemaligen Tongrube Vierstöck (BACKHAUS 1979, 1980, SCHWEISS 1984, HUG 2004; vgl. Abb. 3) ist inzwischen jedoch weitgehend verfallen bzw. verfüllt und als Referenzprofil daher nicht mehr geeignet.

Eine genauere Datierung bzw. Korrelation der „Schieferletten“ könnte gelingen, wenn die Bohrkernsysteme systematisch auf ihre Fossilführung geprüft würden und sich biostratigraphisch auswertbare Formen – z. B. Conchostraken – fänden. Dies wurde bislang noch nicht durchgeführt, um die Bohrkernkerne zunächst noch möglichst unversehrt zu lassen. Die im Basisbereich bei 43,45 m Teufe gefundenen Schalenabdrücke sprechen, wenn es sich tatsächlich um *Schizodus* handelt, bisher nur für ein Zechstein-Alter (Prof. Dr. J. W. Schneider, frdl. schriftl. Mitt.). Conchostraken sind dagegen zur biostratigraphischen Datierung von terrestrischen bis randmarinen Sedimentabfolgen gut geeignet, z. B. in der Untertrias, im Rotliegend und im Oberkarbon (u. a. KOZUR & SEIDEL 1983, KOZUR 1998, 1999, KOZUR & WEEMS 2006, SCHNEIDER et al. 2005). Gezielte Untersuchungen zur Fossilführung der „Schieferletten“ der Bohrung Langenthal erscheinen daher vielversprechend, zumal Conchostraken bereits von Brigitte HAMMERICH (Freiburg i. Br., frdl. schriftl. Mitt.) im tieferen Zechstein der 35 km südlich gelegenen Bohrung Kraichgau 1002 nachgewiesen wurden.

5. Schlussfolgerungen

In der Bohrung Langenthal wurde der Zechstein in Odenwälder Schwellenrandfazies vollständig durchteuft und lässt sich in „Zechsteindolomit“, „Zechsteintone“ und „Schieferletten“ gliedern. Die 6,1 m mächtigen, häufig oolithischen und in drei Horizonten verkarsteten Dolomite des tiefsten Zechsteins wurden in einem lagunenartigen, durch Inseln und Kristallin-Vorsprünge stark gegliederten Küstenbereich abgelagert. Die darüber folgenden 2,3 m mächtigen „Zechsteintone“ sind ebenfalls noch dem randmarin-brackischen Milieu zuzuordnen. Die 13,4 m mächtigen „Schieferletten“ dokumentieren dagegen zunehmend terrestrisches Süßwassermilieu einer Überflutungs- oder Schlammebene („mudplain“). Die „Schieferletten“ lassen sich in der Bohrung Langenthal dreigliedern, wobei besonders der mittlere Bereich von intensiver Bioturbation (Grabgänge u. a.) und Pedoturbation (Paläobodenbildung) geprägt ist und somit auf geringe Sedimentationsraten hinweist.

Die oben genannten alten lithostratigraphischen Einheiten des Zechsteins stammen noch aus geologischen Karten und

Erläuterungen des 19. und beginnenden 20. Jahrhunderts und sollten zukünftig durch moderne und an die bereits überarbeitete baden-württembergische Gliederung angepasste Kartiereinheiten ersetzt werden. Dabei sind „Zechsteindolomit“ und „Zechsteinton“ als Zechsteindolomit-Formation zusammenzufassen und die „Schieferletten“ als Formation neu zu benennen, z. B. „Langenthal-Formation“, da sich die Bohrung Langenthal als Referenzprofil eignet.

Die hydrogeologischen Untersuchungen haben die Wasserführung der verkarsteten „Zechsteindolomite“ nachgewiesen. Zudem zeigte sich, dass neben dem Buntsandstein die Sandsteinabfolgen bzw. -lagen des Zechsteins und des Rotliegendes im südlichen Odenwald als Grundwasserleiter fungieren. Das granitische Grundgebirge stellt keinen Grundwasserleiter dar. Die sonst im kristallinen Odenwald als Grundwasserleiter verbreitete tiefgreifende Vergroßung liegt nicht vor, da das Gestein offenbar keiner intensiven Verwitterung unterlag.

6. Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat erste Ergebnisse zum Zechsteinprofil der Bohrung Langenthal vorgestellt, aber auch auf sedimentologische, paläontologische und stratigraphische Fragen hingewiesen, die noch nicht abschließend geklärt sind. Sehr wünschenswert wäre eine systematische paläontologische Untersuchung der Bohrung, vor allem auf Fossilien hin, durch die eine nähere biostratigraphische Korrelation der Odenwälder Zechsteinsedimente mit anderen Beckenbereichen gelingen könnte. Auch die Korrelation der rechts- und linksrheinischen Zechsteinablagerungen ist noch nicht abgeschlossen; dabei könnten die Bioturbationsspuren der „Schieferletten“ in der Bohrung Langenthal stratigraphisch verwertbar sein.

Neben diesen den Zechstein betreffenden Fragestellungen bietet die Bohrung Langenthal weitere interessante Forschungsmöglichkeiten. Bereits begonnen wurde eine petrologisch-gefügekundliche Auswertung des Heidelberger Granits, durch die nähere Informationen zur Platznahme des Plutons und zur tektonischen Überprägung gewonnen werden sollen. Eine Bearbeitung der Rotliegend-Sedimente, die in der Bohrung Langenthal im Gegensatz zu vielen anderen Odenwälder Profilen nicht ausschließlich aus groben Brekzien, sondern aus einer coarsening-upward-Sequenz von Feinsandsteinen bis Brekzien bestehen, erscheint ebenfalls lohnend. Auch die mit über 21 m auffallend mächtigen periglazialen Schwemmfächersedimente ließen sich sedimentpetrographisch näher untersuchen.

Schließlich wären weitere hydrogeologische Detailuntersuchungen zur räumlichen Ausdehnung des Zechsteins, des Rotliegendes und der Verkarstung zu erwägen, insbesondere hinsichtlich der Eignung der permischen Schichten als Grundwasserreservoir im südlichen Odenwald.

Danksagung: Die Grundlagen für diese Arbeit stellen neben eigenen Bohrungsaufnahmen auch Aufnahmen der HLUG-Kollegen Dr. Michaela Dersch-Hansmann, Dr. Heiner Heggemann, Dr. Christian Hoselmann und Dr. Heinz-Dieter Nesbör dar, denen wir für die zur Verfügung gestellten, bislang unpublizierten Unterlagen danken. Für die sehr kurzfristige vorläufige Bestimmung der Schalenabdrücke sowie Hinweise zur palökologischen und biostratigraphischen Deutung sei Dr. Heinz W. Kozur (Budapest) und Prof. Dr. Jörg W. Schneider (TU Bergakademie Freiberg) herzlich gedankt, ebenso Brigitte Hammerich (Freiburg i. Br.) für die Informationen über neue Conchostrakenfunde und die Erlaubnis, diese noch unveröffentlichten Funde hier bereits zu erwähnen. Durch hilfreiche Diskussionen und Hinweise zum südwestdeutschen Zechstein haben Dr. Edgar Nitsch (LGRB Baden-Württemberg), Dr. Doris Dittrich (LGB Rheinland-Pfalz) und Prof. Dr. Josef Paul (Universität Göttingen) sehr zur Verbesserung der vorliegenden Arbeit beigetragen. Schließlich danken wir Dr. Michaela Dersch-Hansmann, Dr. Heiner Heggemann und Dr. Werner Pöschl für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

7. Schriftenverzeichnis

- BACKHAUS, E. (1960): Zur Neugliederung des Odenwälder Buntsandsteins und ein Vergleich mit Nordhessen und Thüringen. – N. Jb. Geol. Paläont., Mh., **1960**: 292–313, 2 Abb., 2 Taf.; Stuttgart.
- BACKHAUS, E. (1961): Das fossilführende Zechsteinvorkommen von Forstel - Hummetroth (Nordodenwald) und Bemerkungen zur südwestdeutschen Zechsteingliederung. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **89**: 187–202, 4 Abb.; Wiesbaden.
- BACKHAUS, E. (1975): Der Buntsandstein im Odenwald. – Aufschluß, Sonderbd. (Odenwald), **27**: 299–320, 5 Abb.; Heidelberg.
- BACKHAUS, E. (1979): Zur Sedimentologie und Sedimentpetrographie des Buntsandsteins und Unteren Muschelkalks im Odenwald. – Fortschr. Min., **57** (2): 3–22, 9 Abb., 1 Taf.; Stuttgart.
- BACKHAUS, E. (1980): Relikte des Zechstein-3-Karbonats (Ca3, Plattendolomit) im Odenwald. – Geol. Jb. Hessen, **108**: 95–102; Wiesbaden.
- BACKHAUS, E. & SCHWARZ, S. (2003): Ein Sammelprofil des Buntsandsteins und Zechsteins im mittleren Odenwald anhand von Bohrungen und Gamma-Logs. – Geol. Jb. Hessen, **130**, 91–107, 3 Abb., 2 Taf.; Wiesbaden.
- BECKER, F. (2002): Zechsteinkalk und Unterer Werra-Anhydrit (Zechstein 1) in Hessen: Fazies, Sequenzstratigraphie und Diagenese. – Geol. Abh. Hessen, **109**: 231 S., 42 Abb., 5 Tab., 10 Taf.; Wiesbaden.
- BECKSMANN, E. (1958): Verkarsteter Zechsteindolomit unter der Ziegelhäuser Neckarbrücke und die Ziegelhäuser Störungzone. – Jh. geol. L.-Amt Baden-Württ., **3**: 123–138, 3 Abb.; Freiburg i. Br.
- BÖKE, E. & DIEDERICH, G. (1969): Schichtenverzeichnis Brg. Hirschhorn/Neckar. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6519/67; Wiesbaden (unveröff.).
- CHELIUS, C. (1894): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt 6119 Groß-Umstadt. – 52 S., faks. Nachdruck der 1. Aufl., erschienen 1994 in Wiesbaden; Darmstadt (A. Bergsträsser).
- CHELIUS, C. (1897): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt 6219 Brensbach. – 54 S., 2 Taf.; faks. Nachdruck der 1. Aufl., erschienen 1997 in Wiesbaden; Darmstadt (A. Bergsträsser).
- DACHROTH, W. (1976): Gesteinsmagnetische Daten im Perm Mitteleuropas. – Geol. Jb. E, **10**: 3–63, 19 Abb., 3 Taf.; Hannover.
- DACHROTH, W. (1988): Genese des linksrheinischen Buntsandsteins und Beziehungen zwischen Ablagerungsbedingungen und Stratigraphie. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.E., **70**: 267–333, 17 Abb., 10 Taf.; Stuttgart.
- DERSCHE-HANSMANN, M. & HUG, N. (2001): Schichtenverzeichnisse der Bohrungen Brombachtal BK 1–7. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6219/Neueingang; Wiesbaden (unveröff.).
- DERSCHE-HANSMANN, M. (2004): Schichtenverzeichnis VB Langenbrombach. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6219/Neueingang; Wiesbaden (unveröff.).

- DIEDERICH, G. (1966): Fazies, Paläogeographie und Genese des Unteren Buntsandstein norddeutscher Auffassung im südlichen Beckenbereich. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **94**: 132–157, 8 Abb., Taf. 12; Wiesbaden.
- DIEDERICH, G. (1970): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in der südlichen Randfazies. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **98**: 81–92, 2 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- DIEDERICH, G. & BÖKE, E. (1972): Schichtenverzeichnis der Bohrung Bad König: 0–363 m. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6220/54; Wiesbaden (unveröff.).
- DITTRICH, D. (1996): Unterer Buntsandstein und die Randfazies des Zechsteins in der nördlichen Pfälzer Mulde (Exkursion C1 am 11. und C2 am 12. April 1996). – Oberrhein. Geol. Ver. Mitt. Jb., N. F., **78**: 71–94, 4 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- HENTSCHHEL, H. E. (1963): Die permischen Ablagerungen im östlichen Pfälzer Wald (Haardt) zwischen Neustadt-Lambrecht und Klingenstein-Silz. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **91**: 143–176, 11 Abb., 1 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.
- HEGGEMANN, H. & HUG, N. (1999): Schichtenverzeichnis der Bohrung Bad König: 367–489,3 m. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6220/54; Wiesbaden (unveröff.).
- HORNUNG, J. J. (1999): Eine Ichnofauna aus dem klastischen Zechstein (oberes Perm) vom Wolfsberg bei Neustadt a. d. Weinstraße und Anmerkungen zur Paläogeographie/Paläoökologie des kontinentalen Zechstein in der Pfälzer Synform (Pfalz). – Mitt. Pollichia, **86**: 7–33; Bad Dürkheim.
- HORNUNG, J. J. (2001): *Thalassinoides paradoxicus* (WOODWARD 1830), ein häufiges Spurenfossil aus dem kontinentalen Zechstein (oberes Perm) der Pfälzer Synform (SW-Deutschland). – Mitt. Pollichia, **88**: 123–144, 12 Abb., 1 Tab.; Bad Dürkheim.
- HUG, N. (2004): Sedimentgenese und Paläogeographie des höheren Zechstein bis zur Basis des Buntsandstein in der Hessischen Senke. – Geol. Abh. Hessen, **113**: 238 S., 37 Abb., 8 Tab., 14 Taf., 3 Beil.; Wiesbaden.
- HUG, N. (2007 a): Schichtenverzeichnis VB Breuberg. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6120/192; Wiesbaden (unveröff.).
- HUG, N. (2007 b): Schichtenverzeichnis Brg. Breuberg-Rai-Breitenbach. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6120/Neueingang; Wiesbaden (unveröff.).
- JUNGHANS, W.-D., LEIBER, J. & AIGNER, T. (1998): Stratigraphy and Facies of the Lower Triassic Buntsandstein in a 566 m Continuously Cored Well in Southwest Germany. – Hallesches Jb. Geowiss., (B) Beih., **5**: 80, Epicontinental Triassic International Symposium Halle 1998, Abstracts; Halle/Saale.
- JUNGHANS, W.-D., RÖSLER, W., AIGNER, T. & APPEL, E. (2002): Magnetostratigraphie an der Perm/Trias-Grenze der Bohrung Kraichgau 1002 (SW-Deutschland). – N. Jb. Geol. Paläont., Mh., **2002** (2): 92–102, 7 Abb.; Stuttgart.
- KÄDING, K.-C. (1978): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Hessen, Nordbayern und Baden-Württemberg. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., **60**: 233–252, 8 Abb.; Stuttgart.
- KLEMM, G. (1900): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt 6419 Beerfelden. – 23 S., faks. Nachdruck der 1. Aufl., erschienen 1994 in Wiesbaden; Darmstadt (Hess. Staatsverlag).
- KLEMM, G. (1928): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blätter 6319 Erbach und 6320 Michelstadt. – 45 S., faks. Nachdruck der 2. Aufl., erschienen 1994 in Wiesbaden; Darmstadt (Hess. Staatsverlag).
- KOZUR, H. W. (1998): Some aspects of the Permian-Triassic boundary (PTB) and of the possible causes for the biotic crisis around this boundary. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **143** (4): 227–272; Amsterdam.
- KOZUR, H. W. (1999): The correlation of the Germanic Buntsandstein and Muschelkalk with the Tethyan scale. – Zbl. Geol. Paläont. Teil I, **1998** (7–8): 701–725, 5 fig.; Stuttgart.
- KOZUR, H. W. & SEIDEL, G. (1983): Die Biostratigraphie des unteren und mittleren Buntsandsteins des Germanischen Beckens unter besonderer Berücksichtigung der Conchostraken. – Z. geol. Wiss., **11**: 429–464; Berlin.
- KOZUR, H. W. & WEEMS, R. E. (2006): The importance of conchostracans for biostratigraphic subdivision and correlation of Triassic continental deposits. – NGF Abstracts and Proceedings, no. **3**: 84–89, 4 fig.; Internet-Publ.: http://www.nhm.uio.no/triassic-2006/abstracts_for_web.pdf, Zugang 7.5.2007.
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, LGRB (2005): Symbolschlüssel Geologie Baden-Württemberg. Verzeichnis Geologischer Einheiten – Aktual. Ausg. Mai 2005. – Internet-Publ.: <http://www.lgrb.uni-freiburg.de>; Freiburg i. Br. (Reg.-Präs. Freiburg – L.-Amt Geol. Rohst. Bergh.).
- Landesamt für Geologie und Bergbau (LGB) Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2005): Geologie von Rheinland-Pfalz. – 400 S., 162 Abb., 36 Tab., 3 Anl.; Stuttgart (Nägele u. Obermiller).
- LEIBER, J. (1987): 8.2 Kraichgau 1001. – In: Tätigkeitsbericht 1985/86 über geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben: 50f., Abb. 8.1; Hannover (NLFB/GGA).
- NÖRING, F. (1957): Schriftliche Mitteilung des Profils der Bohrung Großwallstadt nach Häusner. – Archiv Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie, Archiv-Nr. 6120/15; Wiesbaden (unveröff.).
- PAUL, J. (1985): Stratigraphie und Fazies des südwestdeutschen Zechsteins. – Geol. Jb. Hessen, **113**: 59–73, 1 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- PAUL, J. (2006): Zechstein around the Harz Mts. A geotraverse across an evaporite platform. – In: EYNATTEN, H. v., DUNKL, I., FISCHER, C., KARIUS, V. & RUPPERT, H. (Hrsg.): Sediment 2006: 21st Meeting of Sedimentologists, 4th Meeting of SEPM Central European Section, June 6–11, 2006, Göttingen. Schriftenreihe Dt. Ges. Geowiss., **45**: 193–212; Hannover (Dt. Ges. Geowiss.).
- PERYT, T. M. (1986): Chronostratigraphical and lithostratigraphical correlations of the Zechstein Limestone in Central Europe. – In: HARWOOD, G. M. & SMITH, D. B. (eds.): The English Zechstein and Related Topics. Geol. Soc. London, Spec. Publ., **22**: 203–209; London.
- RICHTER-BERNBURG, G. (1955): Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins. – Z. dt. geol. Ges., **105**: 843–854; Hannover.
- SALOMON, W. (1903): Der Zechstein von Eberbach und die Entstehung der permischen Odenwälder Manganmulme. – Z. dt. geol. Ges., **55**: 419–431; Berlin.
- SCHNEIDER, J. W., GORETZKI, J. & RÖSSLER, R. (2005): 2.6 Biostratigraphisch relevante nicht-marine Tiergruppen im Karbon der variscischen Vorsenke und der Innensenken. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland V – Das Oberkarbon (Pennsylvanium) in Deutschland. – Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, **254**: 103–118, 1 Abb.; Frankfurt.
- SCHWEISS, D. (1984): Sedimentpetrographische Untersuchungen an Rotsedimenten des Grenzbereiches Perm/Trias am südwestlichen Beckenrand. – Geol. Jb. Hessen, **112**: 83–126, 25 Abb., 4 Tab.; Wiesbaden.
- STEININGER, F. F. & PILLER, W. E. (Hrsg.)

- (1999): Empfehlungen (Richtlinien) zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg, **209**: 19 S.; Frankfurt a. M. (Senckenberg).
 Stratigraphische Kommission der DUGW, Subkommission Perm-Trias, SKPT (1993): Beschlüsse zur Festlegung der Lithostratigraphischen Grenzen Zechstein/Buntsandstein/Muschelkalk und zu Neubennungen im Unteren Buntsandstein in der Bundesrepublik Deutschland. – Nachr. dt. geol. Ges., **49**: 76–81; Hannover.
 STROHMENGER, C., ANTONNINI, 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**: 1–35; Pau/France.

8. Anhang

Schichtenverzeichnis der Kernbohrung Langenthal BK2/05 (GK 25 Bl. 6519 Eberbach, R 3489202, H 5481807, 188 m ü. NN). Die Originalaufnahme wurde hier zum besseren Verständnis untergliedert in petrographisch ähnliche bzw. genetisch zusammengehörige Abschnitte.

Quartär [21,4 m] (Aufnahme: Dr. M. Dersch-Hansmann, Dr. C. Hoselmann)	
Schwemmfächerablagerungen [21,4 m]	
–0,10 m	karbonatfreier Grus aus vorwiegend Granitklasten (vmtl. Wegschotter): –0,10 m Grus, karbonatfrei, bunt, aus vorwiegend Granitklasten mit wenigen Mittelsandstein-Bruchstücken des Buntsandsteins, letztere feldspatführend, kieselig gebunden und rotbraun
–8,00 m	karbonatfreie Gruse und Lehme mit Buntsandsteinklasten: –3,02 m Schuttgrus, insgesamt schwach lehmig, karbonatfrei, rot, aus grobsandigen Mittelsandstein-Bruchstücken des Buntsandsteins, diese rotbraun/hellrotbraun, kieselig gebunden, partienweise mürb und zu Mittelsand entfestigt, unterhalb von 2 m überwiegen die mürben Partien; Grobsandfraktion in den Sandsteinen relativ gut gerundete Quarzkörner; Quarzkörner häufig tonig belegt –7,35 m Normallehm, karbonatfrei, rötlich gelb, mit einzelnen dünnen sandigen Schlieren und Sandstein-Bruchstücken; unregelmäßig verteilte Eisen-/Manganausfällungen –7,80 m Sandgrus, karbonatfrei, gelblich rot, hellrotbraun und rotbraun, aus Sandsteinschutt (Fein- bis Mittelsandstein) –8,00 m Lehmschluff (Schluff, feinsandig, schwach tonig), karbonatfrei, sehr blass braun, vorherrschend dicht
–12,00 m	karbonatfreie und karbonatführende Gruse, Sande und Lehme mit Buntsandsteinklasten: –9,55 m karbonatführender Normallehm, kalkhaltig, sehr blass braun, mit einzelnen dünnen sandigen Schlieren und Sandsteinbruchstücken (Schwemmlöss-/lösslehm) –10,45 m Sandgrus, karbonatfrei, rot, hellrotbraun, rotbraun, aus Sandsteinschutt (Fein- bis Mittelsandstein, kieselig gebunden, feldspatführend, mit bis 1 cm großen gut gerundeten Tonsteingeröllen und einzelnen großen Hellglimmern; Typ Miltenberg-Sandstein) –11,35 m karbonatführender Normallehm, kalkhaltig, sehr blass braun, mit Eisen-/Manganausfällungen und einzelnen dünnen sandigen Schlieren und Sandsteinbruchstücken; vorherrschend halbfest (Schwemmlöss-/lösslehm) –11,85 m grusführender Sand, karbonatfrei, rot, mit mürben Sandstein-Bruchstückchen (Fein- bis Mittelsandstein, rotbraun) –12,00 m karbonatführender Grusschutt, kalkarm, dunkel rötlich braun; aus Sandsteinschutt (Fein- bis Mittelsandstein, rotbraun bis fleischfarben, kieselig gebunden, schwach feldspatführend, mit Tonsteingeröllen)

-21,40 m	karbonatführende Gruse, Sande und Lehme mit feinkörnigen Buntsandsteinklasten:
-14,75 m	karbonatführender, kiesführender Lehm (zerbohrt), kalkhaltig, kräftig braun; mit Sandstein-Bruchstückchen (Feinsandstein, rotbraun, selten hell mit dunklen Flecken („Tigersandstein“), schwach feldspatführend, z. T. kieselig gebunden, mit Tonsteingeröllen)
-16,00 m	karbonatführender Grus aus Feinsandsteinschutt in lehmiger Matrix, kalkarm, rot; Feinsandsteinklasten z. T. mittelsandig, rotbraun, vereinzelt rundliche dunkelbraune Eisen-/Manganoxid-Flecken bis max. 1 cm Durchmesser („Tigerflecken“), z. T. kieselig gebunden, viele Sandsteinklasten auch tonig gebunden und entfestigt
-16,40 m	karbonatführender, grusführender Sand (zerbohrt), kalkhaltig, rötlich gelb, mit Sandstein-Bruchstückchen (Feinsandstein, rotbraun, selten hell mit dunklen Flecken („Tigersandstein“), schwach feldspatführend, z. T. kieselig gebunden, mit Tonsteingeröllen)
-17,40 m	karbonatführender, grusführender Sand, kalkhaltig, rot, mit Sandsteinschutt (Typ 1: Feinsandstein, dunkelrotbraun, rotbraun, tonig gebunden, entfestigt; Typ 2: Feinsandstein, rotbraun, vereinzelt mit dunkelbraunen Eisen-/Manganoxid-Flecken bis max. 1 cm Durchmesser („Tigersandstein“), kieselig gebunden)
-17,80 m	grusführender Lehmmergel, kalkreich, rötlich gelb, mit Feinsandstein-Bruchstückchen (Feinsandstein, rotbraun, vereinzelt helle „Tigersandsteine“ (s. o.), schwach feldspatführend, z. T. kieselig gebunden)
-18,60 m	karbonatführender Sandgrus aus Feinsandsteinschutt in lehmiger Matrix (zerbohrt), kalkhaltig, hellgrau; Feinsandstein-Bruchstücke der Typen 1 und 2 (siehe Schicht 16,40–17,40 m)
-21,40 m	karbonatführender Sandgrus (vollständig zerbohrt), lagenweise karbonatführender Schuttgrus, kalkhaltig, rötlich gelb, mit Sandsteinschutt (rotbraun mit kleinen grauen Bleichungsflecken, z. T. vollständig hellgrau-weiß gebleicht mit braunen runden Flecken („Tigersandstein“), z. T. sehr hart, z. T. Horizontalschichtung)

Unterer Buntsandstein [9,4 m]

(Aufnahme: Dr. M. Dersch-Hansmann)

Heigenbrückener Sandstein (alte Bezeichnung: „Tigersandstein“) [9,4 m]

-21,70 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, graufleckig, glimmerführend, hart, schwach geklüftet (ca. 70°)
-22,65 m	Feinsandstein, fining-upward-Sequenz:
-22,20 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, graufleckig, tonig gebunden, hart, glimmerführend, Rippelschichtung
-22,65 m	Feinsandstein, karbonatfrei, an der Basis (10 cm) kalkarm zementiert und schwach mittelsandig; rotbraun, graufleckig, Horizontalschichtung, Glimmer auf Schichtflächen
-23,10 m	Feinsandstein, fining-upward-Sequenz:
-23,04 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, Horizontalschichtung, z. T. Rippelschichtung, Glimmer auf Schichtflächen
-23,10 m	Feinsandstein, kalkarm zementiert, rotbraun, graufleckig, schräggeschichtet, glimmerführend
-23,88 m	Feinsandstein, fining-upward-Sequenz:
-23,13 m	Feinsandstein, karbonatfrei, dunkelrotbraun, glimmerführend
-23,70 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, Horizontalschichtung, z. T. Rippelschichtung, glimmerführend
-23,88 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, schräggeschichtet, glimmerführend

-24,00 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, keine Schichtung erkennbar; an der Basis größere Tonsteingerölle, die offensichtlich bei Aufarbeitung und Ablagerung im Sandstein noch unverfestigt waren
-26,45 m	Feinsandstein, fining-upward-Sequenz: -24,55 m Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, Rippelschichtung, glimmerführend -26,00 m Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, Horizontalschichtung, glimmerführend -26,45 m Feinsandstein, karbonatfrei, hellrotbraun, glimmerführend, keine Schichtung erkennbar; obere 25 cm löchrig mit dunklen Eisen-/Manganoxid-Flecken
-28,25 m	Pelitische Zwischenlagen: -26,80 m Ton-Schluffstein, lagenweise stark feinsandig, kalkhaltig (sekundäres Karbonat auf Schichtfugen), dunkelrotbraun, glimmerführend -27,00 m Ton-Schluffstein, lagenweise stark feinsandig, karbonatfrei (sekundäres Karbonat auf Schichtfugen), dunkelrotbraun, Horizontalschichtung, splittiger Bruch, glimmerführend -28,25 m Ton-Schluffstein, lagenweise stark feinsandig, karbonatfrei (sekundäres Karbonat auf Schichtfugen), dunkelrotbraun, glimmerführend
-29,55 m	Feinsandstein, fining-upward-Sequenz: -29,22 m Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, Horizontalschichtung, Rippelschichtung, glimmerführend -29,55 m Feinsandstein, an der Basis mittelsandig, karbonatfrei, rotbraun, bei 29,32–29,38 m hellrotbraun-grau gefleckt; Horizontalschichtung, Rippelschichtung, glimmerführend
-30,38 m	Feinsandstein, fining-upward-Sequenz: -29,80 m Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, Horizontalschichtung, Rippelschichtung, glimmerführend -30,38 m Feinsandstein, mittelsandig, karbonatfrei, schmutzigbraun, schwach rötlich, Horizontalschichtung, Rippelschichtung, glimmerführend, stark porös (verm. durch herausgelösten Karbonatzement)
-30,65 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, glimmerführend, fining-upward: am Top Rippelschichtung, darunter Horizontalschichtung, an der Basis keine Schichtung erkennbar
-30,78 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, glimmerführend, fining-upward: am Top Rippelschichtung, darunter Horizontalschichtung, an der Basis Tonsteingerölle, keine Schichtung erkennbar
-30,83 m	Feinsandstein, coarsening-upward, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, Horizontalschichtung, glimmerführend
-30,87 m	Feinsandstein, fining-upward-Sequenz: -30,85 m Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, Rippelschichtung, glimmerführend -30,87 m Feinsandstein, mittelsandig, karbonatfrei, rotbraun, hellrotbraun, schräggeschichtet, glimmerführend

Zechstein [21,8 m]

(Aufnahme: Dr. H. Heggemann, Dr. N. Hug)

„Schieferletten“ (alte Bezeichnung ¹) [13,4 m]

-33,90 m	rotbraune, überwiegend massige, polygonal-bröckelig oder splittrig brechende karbonatfreie Pelite mit Feinsandsteinlagen:
-31,55 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, massig, glimmerführend, splittriger Bruch
-31,57 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, schwach glimmerführend
-31,65 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, massig, schwach glimmerführend, splittriger Bruch
-31,67 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, schwach glimmerführend
-31,79 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, massig, schwach glimmerführend, splittriger Bruch
-31,83 m	Feinsandstein, karbonatfrei, rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, schwach glimmerführend
-31,92 m	Feinsandstein bis Pelit, karbonatfrei, fining-upward-Sequenz: <ul style="list-style-type: none"> • am Top Pelit, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, massig, glimmerführend, splittriger Bruch • darunter Feinsandstein, stark tonig-schluffig, Rippelschichtung • an der Basis Feinsandstein, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, schwach glimmerführend
-32,15 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, feinblättrig, schwach glimmerführend, splittriger Bruch
-32,95 m	Feinsand- bis Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, dunkelrotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, schwach glimmerführend, Gefüge „wolkig-diffus“; <ul style="list-style-type: none"> • bei 32,35 m deutlich bioturbate Pelit-Zwischenlage [2 cm]
-33,12 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, schwach glimmerführend, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-33,37 m	Feinsand- bis Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, dunkelrotbraun, mit rundlichen grauen Flecken, schwach glimmerführend, Bioturbationsgefüge
-33,48 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, schwach glimmerführend, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-33,52 m	Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, dunkelrotbraun, mit rundlichen grauen Flecken
-33,69 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, schwach glimmerführend, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-33,71 m	Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, dunkelrotbraun, mit rundlichen grauen Flecken
-33,90 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, schwach glimmerführend, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-40,60 m	rotbraune, überwiegend bioturbate karbonatfreie Pelite und Feinsandsteine:
-34,00 m	rundliche Feinsand-/Schluffstein-Ballen (vmtl. Belastungsstrukturen) in toniger Matrix: Feinsand-/Schluffstein schwach glimmerführend, „wolkig-diffuses“ Gefüge mit Bioturbationsspuren (rotbraune tonig gefüllte Gänge); tonige Matrix karbonatfrei, rotbraun bis dunkelrotbraun, mit rundlichen grauen Flecken

¹ Vorschlag für neue Benennung: Langenthal-Formation (Abschnitt 4)

-34,62 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, schwach glimmerführend, blättrig, Bioturbationsgefüge (Längs- und Querschnitte von Grabgängen auf Schichtflächen), mit Schluffstein-Laminae oder -Bruchstücken, leicht splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-34,70 m	Schluffstein mit Pelitgeröllen, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, helle Bleichungspunkte, vermutlich bioturbat, da Feinschichtung nur noch undeutlich erkennbar ist
-34,75 m	Pelit mit Pelitgeröllen, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, blättrig, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch; am Top einzelne helle kalkhaltige Schluffsteinballen (Belastungsstrukturen oder Gerölle)
-35,20 m	Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, gleichmäßig verteilte helle Bleichungspunkte (< 1 mm), massig/ungeschichtet (vermutlich bioturbat) <ul style="list-style-type: none"> • bei 35,15 m Feinsandstein-Zwischenlage [1 cm], karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rosa, z.T. dunkelgrau, Lage in rundliche Teile segmentiert – evtl. Entwässerungs- oder Belastungsstrukturen
-35,25 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, blättrig, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch; Bohrkern leicht aufgequollen
-35,30 m	Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, helle Bleichungspunkte (< 1 mm), massig/ungeschichtet, bioturbat
-35,35 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, blättrig, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch; Bohrkern leicht aufgequollen
-35,55 m	Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, helle Bleichungspunkte (< 1 mm), massig/ungeschichtet, bioturbat
-36,15 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, blättrig, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch; Bohrkern leicht aufgequollen
-36,40 m	Schluffstein, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, helle Bleichungspunkte (< 1 mm), massig/ungeschichtet, bioturbat
-36,65 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, blättrig, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-37,05 m	Schluffstein, lagenweise stark tonig oder feinsandig, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, in feinsandigen Lagen viele helle Bleichungspunkte (< 1 mm), Feinschichtung, Bioturbationsgefüge
-37,20 m	Feinsandstein, an Top und Basis mit tonigen Laminae, karbonatfrei, an Top und Basis auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), hell gebleicht bis hellrosa, Schichtung undeutlich, stark bioturbat: rotbraune tonig gefüllte Gänge von 3–5 mm Durchmesser
-37,35 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), dunkelrotbraun, blättrig, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch; z. T. schluffige Lagen mit viel Feinglimmer
-37,55 m	Schluffstein, lagenweise stark tonig oder feinsandig, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), rotbraun, Bleichungspunkte, tabulare Schrägschichtung, Rippelschichtung, Glimmer auf Schichtflächen
-37,65 m	Feinsandstein, karbonatfrei, nur am Top auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär), hellgrau gebleicht, Rippelschichtung, bioturbat: rotbraune tonig gefüllte Gänge von 3–5 mm Durchmesser
-38,30 m	Pelit, karbonatfrei, auf Schichtfugen kalkhaltig (bis 1 mm starke Calcit-Gängchen, sekundär), dunkelrotbraun, blättrig, splittriger bis polygonal-bröckeliger Bruch; z. T. stärker schluffige Bereiche/Lagen; <ul style="list-style-type: none"> • bei 37,70 m Feinsandstein-Zwischenlage [2 cm], schluffig, karbonatfrei, Rippelschichtung, stark bioturbat: Gänge von ca. 3 mm Durchmesser
-38,95 m	Schluffstein, tonig, mit Pelitgeröllen, karbonatfrei, rotbraun, Pelitgerölle z. T. gebleicht, leicht wellig geschichtet, bioturbat <ul style="list-style-type: none"> • bei 38,30–38,55 m sehr mürb, fast lose zerfallen, zerbohrt, hoher Kernverlust • bei 38,30–38,75 m auf Schichtfugen kalkhaltig (sekundär)
-39,35 m	Pelit, karbonatfrei, rotbraun, einzelne Bleichungspunkte (z. T. konzentrisch um dunklen Kern),

	blättrig, keine durchgehenden Schichtflächen, viele kleine Rutschharnische („slicken sides“: pedoturbat), splittiger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-39,90 m	Schluffstein, karbonatfrei, rotbraun, vorwiegend massig/ungeschichtet, vermutlich bioturbat, z. T. tabulare Schrägschichtung oder Rippelschichtung, viel Glimmer auf Schichtflächen <ul style="list-style-type: none"> • bei 39,70 m Feinsandstein-Linsen/-„Fetzen“ (bis max. 8 mm), karbonatfrei, grau, z. T. feinsplattig, lagig angeordnet, vermutlich segmentierte Zwischenlage (vgl. 35,15 m) • an der Basis [1 cm] Schluffstein, schwach feinsandig, karbonatfrei, hell gebleicht, rotbraune Flecken
-40,35 m	Pelit, karbonatfrei, rotbraun, einzelne Bleichungspunkte (z. T. konzentrisch um dunklen Kern), blättrig, keine durchgehenden Schichtflächen, viele kleine Rutschharnische („slicken sides“: pedoturbat), wenig Feinglimmer, z. T. 2–3 mm kleine ovale Tonsteingerölle/-aggregate; splittiger bis polygonal-bröckeliger Bruch
-40,60 m	Feinsandstein, tonig-schluffig, karbonatfrei, blassrotbraun bis hellbraun, viele helle Bleichungspunkte, tabulare Schrägschichtung, nach oben zunehmend bioturbat: viele Längs- und Querschnitte, 3–5 mm Durchmesser, Schichtflächen uneben-„knubbelig“; <ul style="list-style-type: none"> • bei 40,35–40,55 m massig/ungeschichtet, stark bioturbat, Schichtung kaum noch erkennbar
-44,30 m	rotbraune, überwiegend feingeschichtete karbonatfreie Pelite und Feinsandsteine:
-41,35 m	Pelit, karbonatfrei, stellenweise sehr kalkarm, rotbraun, einzelne Bleichungspunkte (z. T. mit dunklem Kern), wenig Feinglimmer, blättrig-splittiges Gefüge, keine durchgehenden Schichtflächen, viele kleine Rutschharnische („slicken sides“), pedogen (Vertisol, Aggregatgefüge) <ul style="list-style-type: none"> • Top (40,60–40,70 m) etwas schluffiger, weniger feinsplittig
-41,55 m	Sandstein-Pelit Wechselfolge, kalkarm, rotbraun, dünnplattig <ul style="list-style-type: none"> • Pelite: rotbraun, kleine Bleichungspunkte, feinglimmerführend, feingeschichtet, • Sandsteine: Feinsandstein (bis Schluffstein), vorwiegend blassrosa, glimmerführend, Rippelschichtung; Lagen bis 1,5 cm mächtig
-41,60 m	Feinsandstein, schluffig, karbonatfrei, braun, glimmerführend, mürb, absandend, tabulare Schrägschichtung und Rippelschichtung
-42,25 m	Pelit, karbonatfrei, stellenweise sehr kalkarm, rotbraun, einzelne Bleichungspunkte (z. T. mit dunklem Kern), wenig Feinglimmer, splittig-bröckeliges Gefüge, keine durchgehenden Schichtflächen, viele kleine Rutschharnische („slicken sides“), pedogen (Vertisol, Aggregatgefüge) <ul style="list-style-type: none"> • Top (41,60–41,65 m): sandiger Pelit, rotbraun, z. T. gebleicht, feingeschichtet, Bioturbationsgefüge (runde Querschnitte von 5 mm Durchmesser auf den Schichtflächen)
-42,85 m	Sandstein-Pelit Wechselfolge, kalkarm, rotbraun, dünnplattig; Lithotypen wie bis 41,55 m
-43,00 m	Feinsandstein, schluffig, karbonatfrei, braun, glimmerführend, mürb, absandend, Rippelschichtung
-43,70 m	Pelit, karbonatfrei, rotbraun, z. T. Bleichungsflecken bis ca. 3 mm mit dunklem Kern, wenig Feinglimmer, massig bis feingeschichtet <ul style="list-style-type: none"> • Top (43,00–43,20 m) stark schluffig, glimmerreich • bei 43,45 m fossilführend: mehrere Schalenabdrücke in z. T. zweiklappiger Erhaltung, vorläufige Bestimmung: ähnlich bis identisch <i>Schizodus</i> (frdl. schrftl. Mitt. Prof. Dr. J. W. Schneider)
-43,90 m	Pelit, karbonatfrei, stellenweise sehr kalkarm, grün, z. T. schwarze Manganflecken/-mineralisationen auf den Schichtflächen, feingeschichtet, dünnblättrig, mürb (zerbohrt) <ul style="list-style-type: none"> • mit rotbraunen Lagen, relativ arm an Feinglimmer, massig bis feingeschichtet, relativ fest
-44,05 m	Feinsandstein, karbonatfrei, braun, mit dunkelbraunen Feinporen, Glimmer auf Schichtflächen, tabulare Schrägschichtung; mürb (vorwiegend zerbohrt) <ul style="list-style-type: none"> • Top (43,90–43,92 m) hellgelb gebleicht, Rippelmarken und schwarze Manganflecken/-mineralisationen auf der Schichtoberfläche
-44,30 m	Schluffstein, tonig, karbonatfrei, dunkelrotbraun, undeutliche/unregelmäßige Fein- bis Rippelschichtung, glimmerreich (zerbohrt)

„Zechsteinton“ (alte Bezeichnung ²) [2,3 m]	
-46,55 m	violettstichige, feingeschichtete, karbonatfreie bis kalkarme Pelite mit einzelnen Feinsand- und Dolomitsteinlagen:
-44,33 m	Pelit, sehr kalkarm bis karbonatfrei, hellviolettgrau bis hellviolettrot, feingeschichtet mit unebenen Schichtflächen (vorwiegend zerbohrt) <ul style="list-style-type: none"> • vermutlich Basis (Orientierung des Kernstücks unsicher) weiß, sehr mürb und kalkhaltig
-44,38 m	Pelit, karbonatfrei, gelbocker, kleine Eisen-Mangan-Konkretionen bis 2 mm Durchmesser auf Schichtflächen, dünnplattig, relativ ebene Schichtflächen, relativ hart (vorwiegend zerbohrt)
-44,55 m	Pelit, karbonatfrei, rotbraun und violettrotbraun, am Top dunkelbrauner Mangan-Mulm, feingeschichtet, dünnplattig, ebene Schichtflächen, nahezu glimmerfrei (vorwiegend zerbohrt)
-46,40 m	Pelit, karbonatfrei, hellgraubraun, feingeschichtet, hart, mit eingeschalteten Lagen anderer Lithotypen, insgesamt Wechselfolge-Charakter (zerbohrt): <ul style="list-style-type: none"> • zahlreich eingeschaltet: Pelit, karbonatfrei, dunkelrotbraun, feingeschichtet, dünnplattig, z. T. Glimmer auf Schichtflächen • zahlreich eingeschaltet: Pelit, kalkarm, stellenweise karbonatfrei, gelbocker, z. T. schwarze Mangan-Flecken auf Schichtflächen, z. T. ca. 3 mm große Eisen-Mangan-Konkretionen; feingeschichtet, ebene Schichtflächen • untergeordnet eingeschaltet: Schluffstein, karbonatfrei, hellgrau, dünnplattig, undeutlich horizontal- oder feingeschichtet, keine ebenen Schichtflächen • am Top (44,55–45,00 m) lagenweise eingeschaltet: Feinsandstein, karbonatfrei, braun, mit dunkelbraunen Feinporen, glimmerführend, tabulare Schrägschichtung, relativ mürb • bei 45,20–45,23 m: Dolomitstein, feinsandig-schluffig, verascht, hellbeige bis blassrosa, mit Feinporen (Ooide?), schwach glimmerführend, mit Stylolithen • an der Basis (46,00–46,40 m) lagenweise eingeschaltet: Dolomitstein, feinsandig-schluffig, verascht, hellbeige bis blassrosa, mit Feinporen (Ooide?), schwach glimmerführend
-46,50 m	Feinsandstein, karbonatfrei, braun, mit dunkelbraunen Feinporen, kleinmaßstäbige tabulare Schrägschichtung, sehr ebene, glimmerbelegte Schichtflächen, relativ mürb
-46,55 m	Pelit, kalkarm, dunkelrotbraun, horizontalgeschichtet, feinlaminiert, glimmerführend
„Zechsteindolomit“ (alte Bezeichnung ²) [6,1 m]	
-46,68 m	Dolomitstein, nach oben zunehmend stark verkarstet; z. T. verascht, gelbgrau
-50,38 m	Dolomitstein mit Oolithlagen, massig, mit Stylolithen:
-47,80 m	hellgrau, gelbgrau, manganfleckig, Eisen-/Manganoxide auf Kluffflächen
-50,38 m	hellgelb, rosa (48,6–48,8 m zerbohrt)
-50,80 m	Oolithstein, verkarstet, hellgrau, Eisen-/Manganoxide auf Kluffflächen (Kleinklüfte); mit Stylolithen
-52,55 m	Dolomitstein mit Oolithlagen, hellgrau, mit Stylolithen
-52,66 m	Dolomitstein, hellgrau, hellgelb, verascht, entfestigt <ul style="list-style-type: none"> • an der Basis (1 cm) rotbraun

² Vorschlag für neue Benennung von „Zechsteinton“ und „Zechsteindolomit“: Zechsteindolomit-Formation (Abschnitt 4)

Rotliegend [9,3 m]

(Aufnahme: Dr. H. Heggemann)

-59,52 m	rotbraune, graue und hellbraune Brekzien („Fanglomerate“) mit eingelagerten Sandsteinbänken:
-52,88 m	Grus-Brekzie mit z. T. gut gerundeten bis kantengerundeten Geröllen vorwiegend in der Feinkiesfraktion, matrixgestützt („Fanglomerat“), karbonatfrei, hellbraun, gelbbraun
-53,00 m	Brekzie mit z. T. gut gerundeten bis kantengerundeten Geröllen vorwiegend in der Feinkiesfraktion, matrixgestützt („Fanglomerat“), nach unten zunehmend klast-/geröllreicher; kalkarm, violettgrau
-53,83 m	Brekzie mit z. T. gut gerundeten bis kantengerundeten Geröllen vorwiegend in der Feinkiesfraktion, matrixgestützt („Fanglomerat“), kalkarm, dunkelviolettblau
-54,20 m	Grobsandstein, lithoklastführend (vorwiegend Feldspäte aus liegendem Granit, aufbereitete Dolomit-Konkretionen, untergeordnet Metamorphite), kalkarm, graugrün, violettstichig
-54,50 m	Dolomit-Konkretion (Dolcrete-Horizont), grau, hellgrau, wolkiges Gefüge, brekziiert
-54,70 m	Mittelsandstein, schwach kiesig (Umlagerungsprodukte des liegenden Granits), kalkarm, grüngrau <ul style="list-style-type: none"> • am Top (1 cm) grün bis dunkelgrau, schwarzfleckig, brekziös
-58,00 m	Brekzie, matrixgestützt, kalkarm, rotbraun <ul style="list-style-type: none"> • mit wenigen nesterartig eingeschalteten Sandsteinbereichen, kalkarm, grüngrau, oliv, wolkig-schlieriges Gefüge • bei 55,30–54,0 m höherer Klastenanteil (Umlagerungsprodukte des liegenden Granits), nach oben abnehmend
-58,51 m	Brekzie, matrixgestützt („Fanglomerat“), relativ geringer und nach oben abnehmender Klastenanteil (Umlagerungsprodukte des liegenden Granits, z. T. idiomorphe Feldspäte), lagenweise Übergang in Grobsandstein; kalkarm, rotbraun
-59,52 m	Brekzie, matrixgestützt („Fanglomerat“), kalkarm, rotbraun, schräggeschichtet, nach oben abnehmender Klastenanteil (Umlagerungsprodukte des liegenden Granits, z. T. idiomorphe Feldspäte) <ul style="list-style-type: none"> • bei 58,51–58,59 m und 58,77–58,82 m grüngrau, wolkiges Gefüge
-61,97 m	rotbraune und grüngraue Grob- bis Feinsandsteine, coarsening-upward-Sequenz:
-60,71 m	Grobsandstein, kiesig (nach oben abnehmend, Umlagerungsprodukte des liegenden Granits), kalkarm, rotbraun <ul style="list-style-type: none"> • bei 60,08–60,30 m, 60,40–60,50 m und 60,66–60,71 m grüngrau, wolkig-schlieriges Gefüge
-60,94 m	Mittelsandstein, kiesig (nach oben abnehmend, Umlagerungsprodukte des liegenden Granits, bis 4 cm Durchmesser), kalkarm, rotbraun <ul style="list-style-type: none"> • an der Basis (4 cm) grüngrau
-61,34 m	Feinsandstein, schwach kiesig, kalkarm, rotbraun
-61,45 m	Brekzie, nach oben abnehmender Klastenanteil (Umlagerungsprodukte des liegenden Granits, bis 4 cm Durchmesser), bereichsweise Übergang in Mittelsandstein; kalkarm, rotbraun
-61,81 m	Feinsandstein, schwach kiesig (nach oben abnehmend, Umlagerungsprodukte des liegenden Granits), kalkarm, rotbraun
-61,91 m	Feinsandstein, schwache Lithoklastführung (unregelmäßig verteilt, Umlagerungsprodukte des liegenden Granits, z. T. idiomorphe Feldspäte); karbonatfrei, grüngrau, rotbraun, schlieriges Gefüge
-61,97 m	Feinsandstein, kiesig (angewitterte Granitgerölle), karbonatfrei, grüngrau

Unterkarbon („Heidelberger Granit“, Serpukhovium)

(Aufnahme: Dr. H.-D. Nesbor)

-67,00 m	Granit, grobkörnig, rötlich-grau, zahlreiche Kalifeldspat-Einsprenglinge, körniges (granulares), porphyrisches Gefüge, frisch, am Top verwittert: <ul style="list-style-type: none">• 61,97–62,00 m mittelmäßig verwittert, braunrot, Feldspäte porzellanartig• 62,00–62,80 m schwach verwittert, rötlich-grau
-67,05 m	Kataklasit, feinkörnig, grau
-67,30 m	Mikrogranit, feinkörnig, grau-rosa, körniges (granulares) Gefüge
-77,00 m	Granit, grobkörnig, rötlich-grau, zahlreiche Kalifeldspat-Einsprenglinge, körniges (granulares), porphyrisches Gefüge <ul style="list-style-type: none">• bei 68,60–69,30 m und 70,40–70,70 m hellrosa Schlieren mit Kumulatgefüge
(Endteufe)	

Manuskript eingegangen am 29.5.2007, angenommen am 21.6.2007

GU DRUN RADTKE¹ & ERL END MARTINI²

Neudefinition von stratigraphischen Einheiten im Tertiär des Mainzer und Hanauer Beckens (Deutschland, Miozän): Frankfurt-Formation (= Obere Hydrobien-Schichten)

Kurzfassung

Die miozäne Frankfurt-Formation (= Obere Hydrobien-Schichten) wird als lithostratigraphische Einheit im Hanauer und Mainzer Becken sowie in der Wetterau neu definiert. Entsprechende Referenzprofile werden vorgestellt. Die Ver-

breitung der Frankfurt-Formation, die Fossilführung, die Leithorizonte und die Paläoökologie sowie die stratigraphische Position werden diskutiert.

Abstract

The Frankfurt Formation (former Upper *Hydrobia* Beds) is newly defined as a lithostratigraphic unit in the Hanau Basin, Mainz Basin and in the Wetterau. Reference sections are pre-

sented. Distribution of the Frankfurt Formation, fossil occurrences and index horizons as well as paleoecology and stratigraphic position are discussed.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	47
2. Synonyme	49
3. Definition und Abgrenzung	49
4. Profile	50
5. Sedimente	52
6. Fossilführung	53
7. Leithorizonte und Korrelationen	55
8. Verbreitung	55
9. Paläoökologie	56
10. Stratigraphische Position	56
11. Schriftenverzeichnis	57
12. Anhang	59

1. Einleitung

Im tertiären Ablagerungsraum des Mainzer und Hanauer Beckens sind viele lithostratigraphische Einheiten auf der Basis der „Empfehlungen (Richtlinien) zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur“ (STEININGER & PILLER 1999) neu definiert worden (STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION 2002). Mit den hier zusammengestellten Daten und der Neudefinition der Oberen Hydrobien-Schichten als Frankfurt-Formation wird die Lücke zwischen der liegenden Einheit Wiesbaden-Forma-

tion (Untere Hydrobien-Schichten; REICHENBACHER & KELLER 2002) und der hangenden Einheit Niederrad-Formation (Landschneckenmergel; RADTKE & KÜMMERLE 2004) geschlossen.

Die Frankfurt-Formation ist in ihrem Verbreitungsraum nur in temporären Aufschlüssen wie Baugruben und Bohrungen usw. zugänglich. So wurden einige charakteristische Kernbohrungen in Frankfurt a.M. als auch die U-Bahnstrecke Nord (U1, U2, U3) zwischen Hauptwache und Dornbusch entlang der

¹ Dr. G. Radtke (e-mail: g.radtke@hlug.de), Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Rheingaustr. 186, 65203 Wiesbaden

² Prof. Dr. E. Martini, Parkstr. 40, 61476 Kronberg im Taunus

Eschersheimer Landstraße, von denen sedimentologische und paläontologische Bearbeitungen vorliegen, als Referenzprofile ausgewählt. Das Typusprofil ist eine der neu abgeteufte und detailliert aufgenommenen Bohrungen am alten Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Frankfurt a.M. an der Senckenberganlage 32–38. Von diesen Bohrungen liegt auch ausgeschlammtes Probenmaterial vor (HLUG: Labornum-

mer LB 17059–17067). Ein Teil dieser Bohrungen ist im Kernlager Aumenu des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) hinterlegt. Weitere Vorkommen wurden in die Untersuchungen einbezogen und in einer Übersichtskarte dargestellt (Abb. 1). Die Sedimentabfolge ist in einem Standardprofil wiedergegeben.

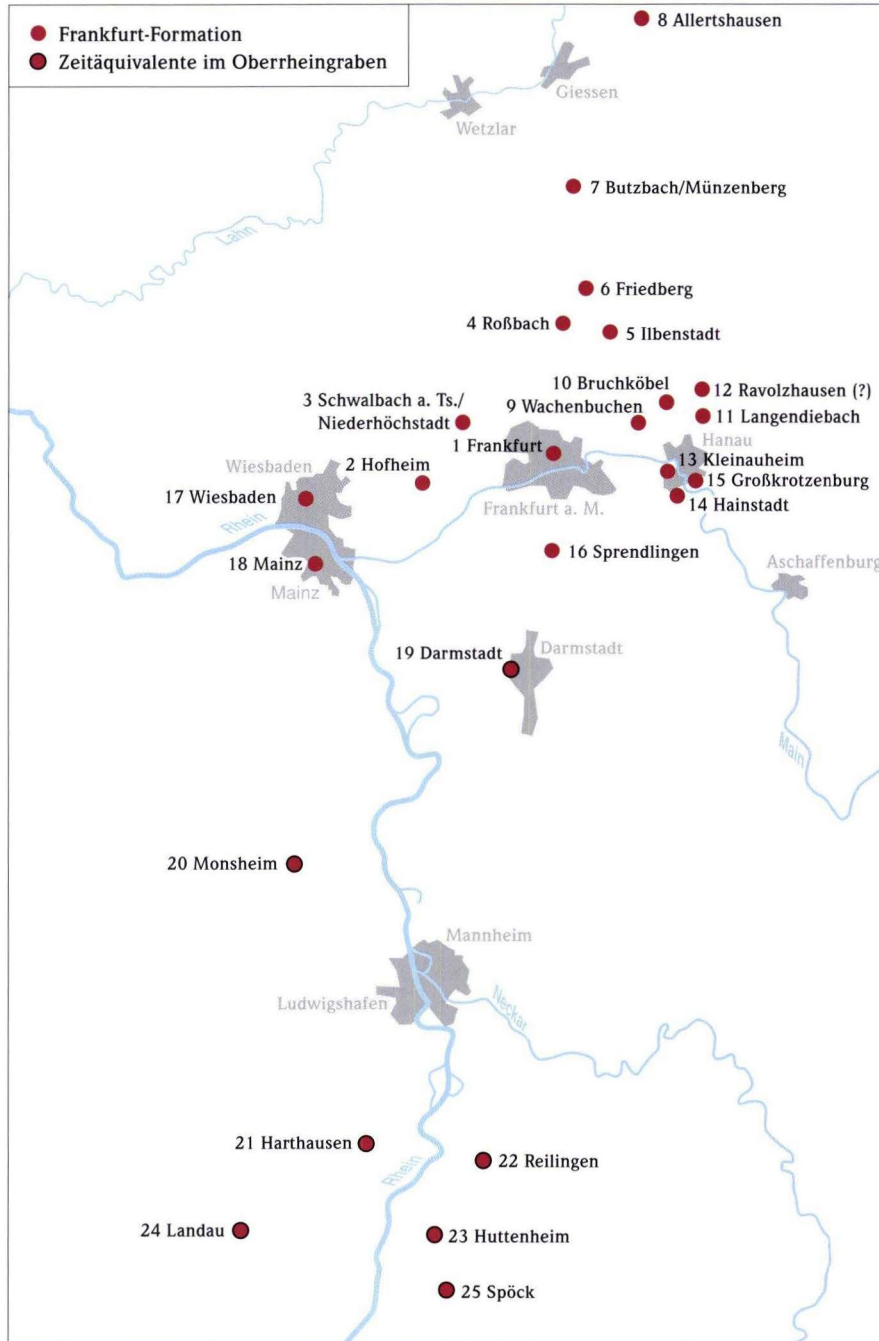


Abb. 1. Übersicht über die erwähnten Lokalitäten mit nachgewiesenen Ablagerungen der Frankfurt-Formation (Obere Hydrobien-Schichten) und ihrer Zeitäquivalente im Oberrheingraben.

2. Synonyme

Obere Hydrobien-Schichten (WEILER 1963, BEST & WIESNER 1966, WIESNER 1967, 1971, BEST & SCHNEIDER 1974, BEST 1975, KÜMMERLE 1971, 1974, 1976, MALZ 1978, MARTINI 1981, 1984, 1988, STREIM 1989, KÜMMERLE & SEIDENSCHWANN 1993, im Druck, REICHENBACHER 2000, REICHENBACHER & KELLER 2002, LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ 2005)

partim Hydrobien-Schichten (KINKELIN 1889, 1909, WENZ 1921 u.v.a., die keine Unterteilung der Hydrobien-Schichten vornahmen)

partim „Obere Hydrobien-Schichten“ im Oberrheingraben (DOEBL 1967, ROTHAUSEN et al. 1988, REICHENBACHER 2000, GRIMM 2005)

partim *Corbicula*-Schichten (SCHOTTLE & HAUPT 1923, HÄUSER 1961, WEILER 1963 = Fehleinstufungen)

partim Obere Hydrobien-Schichten (KUSTER-WENDENBURG 1969)

non Obere Hydrobien-Schichten (SCHWARZ 1985, TOBIEN 1988 = höherer Teil der Wiesbaden-Formation)

non Frankfurter Schichten (STRUVE 1973, *inflata*-Schichten = Rüssingen-Formation)

Die bei den Bauingenieuren und Ingenieur-Geologen im Raum Frankfurt gebräuchliche Bezeichnung „Frankfurter Ton“ (MURAWSKI 1975) ist keine stratigraphische Bezeichnung und bezieht sich vorzugsweise auf die Oberen (Frankfurt-Formation) und Unteren Hydrobien-Schichten (Wiesbaden-Formation).

3. Definition und Abgrenzung

Die Frankfurt-Formation besteht aus monotonen, z.T. fossilreichen, dunklen Tonmergeln mit Einschaltungen von schwarzen Kalksanden, hellen Kalksteinen und Algenriffkalke. Im Liegenden der Frankfurt-Formation folgt die Wiesbaden-Formation (REICHENBACHER & KELLER 2002), im Hangenden wird sie von der Niederrad-Formation (RADTKE & KÜMMERLE 2004) überlagert. Sie enthält bezeichnende Mikrofossil-Gemeinschaften, die zu einer Untergliederung in die Mikrofossil-Horizonte 8a bis 10d führten (WIESNER 1967, BEST 1975).

Die Liegendgrenze bildet ein blaugrüner, teils Quarzsand-führender, kalkfreier teils schwach kalkhaltiger Ton (Horizont 7f nach BEST 1975; Tonleitschicht nach FRIEDRICH & KÜMMERLE 1969, KÜMMERLE & SEIDENSCHWANN 1993, im Mainzer Becken Wäschbachtal-Subformation nach GRIMM 2005). Die Hangendgrenze ist durch hellere grüngraue Kalkmergel und Algenriffkalke der Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) (BEST 1975, RADTKE & KÜMMERLE 2004) dokumentiert, die sich deutlich von den dunkelgrauen, bituminösen, feinschichtigen Tonmergeln abheben (Abb. 2).

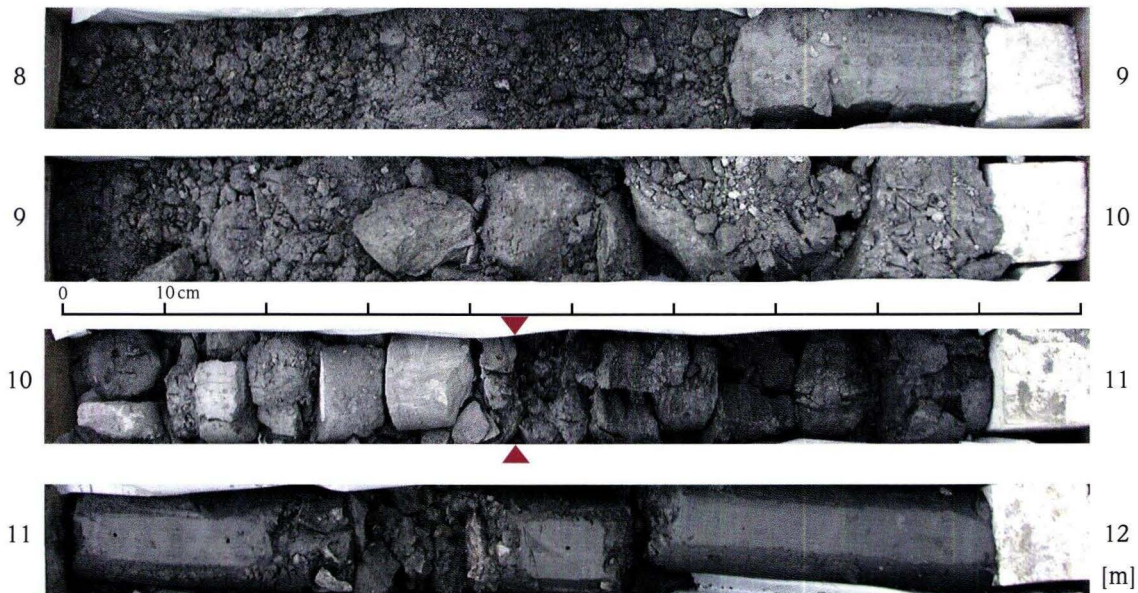


Abb. 2. Bohrung BK 1/2005, Frankfurt a.M., Senckenberganlage 32–38, Erweiterungsbau der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), ehemaliges Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Frankfurt. Kernbereich von 8 bis 12 m, Grenze Niederrad-/Frankfurt-Formation bei 10,45 m (▶◀) zwischen hellgrauen Kalksteinen und dunkelgraubraunen, bituminösen Fossilsanden und Tonen.

4. Profile

Typusgebiet: TK 25, Bl. 5817 Frankfurt a.M. West

Typusprofil

Bohrung BK 3T/2005, Frankfurt am Main, Senckenberganlage 32–38, TK 25, Bl. 5817 Frankfurt a.M. West, R 3475360, H 5553690, 100,73 m ü. NN

Ausführung: Fa. Stölben GmbH, Zell/Mosel, Geräteführer: K.-J. Braun

Aufnahme: G. Radtke, F. Stölben 2005

[m]

Quartär

–4,70 Auffüllung; Sand, kiesig, orange-braun mit Geröllen (Buntsandstein, Quarz) gerundet, Ø bis 6 cm, Basis-Geröll Ø > 20 cm, Pleistozän (Mainterrasse)

Miozän, Niederrad-Formation

–5,10 Kalkstein, hellgrau-hellgelb, hart, bankig, klüftig, grobstückig zerbrochen

–5,60 Feinsand, stark schluffig, schwach tonig in Wechsellagerung mit Schlufflagen, schwarz-dunkelgrau, auf Schichtoberflächen mit Ostracoden-Schill (Horizont 11a)

Miozän, Frankfurt-Formation

–6,10 Ton, stark schluffig, olivbraun, schlecht geschichtet (Horizont 10d)

–6,75 Kalkstein (Mikrit), mittelbraun, hart, bankig, splittig, klüftig, stückig zerbohrt, bei 6,50 m Ton, olivbraun

–8,00 Ton, dunkelolivbraun-grünlich, mäßig geschichtet bis wolkig, an Basis Ostracoden-Schill, schwarzgrau

–8,50 Schluff, tonig, leicht verfestigt, olivgraubraun, mürbe

–10,05 Ton, dunkelolivbraun, schwach horizontal geschichtet, vereinzelt fossilreiche Sandlagen, schwarzgrau

–10,45 Wechsellagerung Ton, Schluff, Feinsand, mittel- bis dunkelgrau, mit Ostracoden-Schill

–14,20 Ton, oliv, teils deutlich horizontal geschichtet, bei 10,80–11,90 m grau, bei 12,60–13,00 m leicht kippt, bei 13,80–13,85 m Schlufflage, beige gelb, kleiner Versatz bei 14,05–14,15 m

–14,40 Feinsand, schluffig, tonig, dunkelgrau, Ostracoden-Schill

Labornummer: LB 17060 (14,20–14,50 m): Ostracoden: *Eucypris agglutinans*, vereinzelt Fischwirbel

–15,00 Wechsellagerung im dm/mm-Bereich, Ton, schluffig, grünolivgrau und Feinsand, schluffig, dunkelgrau, Fossilbruch u.a. Ostracoden-Schill, beige-grau-dunkelgrauschwarz

–15,15 Kalkstein (Mikrit), grauoliv, hart, splittig, unverwittert

–20,80 Ton, schluffig, olivgrau-grünoliv, deutlich geschichtet im mm-Bereich, Feinsandlagen zwischen 17,05

und 17,20 m, zahlreiche steilstehende Klüfte, teilweise verfüllt mit feinem Quarz, bei 17,30 m flache Abschiebung (10°)

–21,90 Kalkstein (Mikrit), grau, hart, splittig, bankig, stark klüftig, stückig zerbrochen

–23,00 Algenriff-Kalkstein, dunkelgrau-beige in mikritischer Matrix, kleine Riffstotzen, löchrig, krustig, massig, eingeschwemmtes Backreef-Material, bei 22,06–22,08 m Ton-Feinsandlage (vermutlich Horizont 9a)

–23,70 Ton, schluffig, dunkelgrüngrau, beigeolivbraun

–27,80 Ton, schluffig, olivbraun, heller braun bei 25,00–25,70 m, horizontale Schichtung, Klüfte bei 25,90 m (45°), 27,30 m (70°), 27,50 m (80°), an Basis Harnisch

–27,95 Kalkstein (Mikrit), dunkelbraun-oliv, porös, hart, bankig, stark klüftig

–30,20 Ton, olivbraun, undeutlich geschichtet, bei 28,00–28,05 m tektonisch beansprucht, bituminös, bei 28,40 m Quarzsand-Lage, stahlgrau, Hydrobien-Lage bei 28,60 m, bei 28,85 m Feinsandlage, grau, bei 29,90–30,15 m Kluft, verfüllt mit Schluff und Hydrobien

LB 17061 (28,50–28,60 m): Fisch-Otolithen: *Gobius francofurtanus*, *Hemitrichas bartensteini*, Fischwirbel; Hydrobien

LB 17062 (28,75–28,85 m): Fisch-Otolithen: *Hemitrichas bartensteini*, *Gobius francofurtanus*, Fischwirbel; Ostracoden; Hydrobien

LB 17063 (29,30–29,40 m): Fisch-Otolithen: häufig *Gobius* sp., Cypriniden-Schlundzähne, Fischwirbel; Ostracoden: *Hemicyprideis* sp.; Hydrobien

LB 17064 (30,10–30,20 m): Fisch-Otolithen: häufig Gobiiden juv., Cypriniden-Schlundzähne, Fischwirbel; Ostracoden: *Hemicyprideis* sp.; *Dreissena* sp.

ET

Referenzprofil 1

Bohrung BT 90, AfE-Bohrung (Anstalt für Erziehungswissenschaften), Frankfurt am Main, Senckenberganlage/Ecke Robert-Mayer Str., TK 25, Bl. 5817 Frankfurt a. M. West, R 3475120, H 5553400, 98,34 m ü. NN (BEST & MÜLLER 1972, BEST 1975)

Ausführung: Fa. Johann Keller GmbH

Aufnahme: G. Best 1971 (leicht verändert)

[m]

Quartär

–7,00 Auffüllung; Schluff, ocker, organisch, Holozän (Auelehm); Kies, schwach steinig, stark sandig, grauweiß, Pleistozän (Niederterrasse des Mains)

Miozän, Frankfurt-Formation

–7,90 Ton, stark schluffig, graubraun mit weißen Kalkschluff-Lagen (Horizont 8c)

- | | |
|--|--|
| <p>–8,50 Kalkarenit, plattig bituminös, graue Ooide in gelblicher, dolomitischer Matrix (Horizont 8c)</p> <p>–10,60 Wechsellagerung von dünnen Ton-, Kalkschluff- und Kalkfeinsand-Lagen, feingeschichtet (laminiert), hellgrau bis dunkelolivgrün, bituminös, auf den Schichtflächen Ostracoden, Trockenrisse (Horizont 8b)</p> <p>–11,30 Dolomit mit Schrumpfungsrissen (Septarien), dunkelolivgrün bis bräunlich, sehr hart</p> <p>–14,40 Wechsellagerung von dünnen Ton-, Kalkschluff- und Kalkfeinsand-Lagen, feingeschichtet (laminiert), hellgrau bis dunkelolivgrün, z.T. breckziiert, bituminös, auf den Schichtflächen Ostracoden und Bruchstücke von Mytiliden, Trockenrisse</p> <p>–14,60 Dolomit (Septarien), olivgrün</p> <p>–16,60 Wechsellagerung von hellgrauen Kalkschluff-Lagen mit dunkleren Tonlagen, z.T. Quarzfeinsand und Glimmer in papierdünnen Lagen, Trockenrisse mit Hydrobiensand gefüllt, bituminös, in oberster Kalkschluff-Lage bei ca. 14,60 m Nannoplankton-Lage + 20 (MARTINI 1988)</p> <p>–16,90 Mergelstein, z.T. dolomitisiert, am Rande in unverfestigten Mergel übergehend, Schrumpfungsrisse (vermutlich Grenze Horizont 8b/8a)</p> <p>–17,40 Ton, dunkel, bituminös, feingeschichtet mit sehr vielen hellen, papierdünnen Kalkschluff-Lagen und einer 1 cm mächtigen Kalkschluff-Lage bei 17,30 m = Nannoplankton-Lage + 19 (MARTINI 1988)</p> <p>–18,60 Wechsellagerung von dünnen Ton-, Kalkschluff- und Kalkfeinsand-Lagen, feingeschichtet (laminiert), hellgrau bis dunkelolivgrün, auf den Schichtflächen Ostracoden, vereinzelt Hydrobien, Braunkohleschmitzen bei 17,60 m, bei 18,30 m 3 cm mächtige, weiße Kalkschluff-Lage = Nannoplankton-Lage + 18 (MARTINI 1988), Trockenrisse mit dunklem Ostracoden-Sand gefüllt, keilförmig nach unten enger werdend, Breite 2–6 mm (Horizont 8a)</p> <p>–18,80 Kalksand in Fein- bis Mittelsandgröße (Ooide, Hydrobien, Dreisseniden)</p> <p>–18,90 Wechsellagerung von dünnen Ton-, Kalkschluff- und Kalkfeinsand-Lagen, feingeschichtet (laminiert), hellgrau bis dunkelolivgrün, auf den Schichtflächen Ostracoden, vereinzelt Hydrobien</p> <p>–19,40 Quarzfein- bis Mittelsand, im oberen Teil schwach kalksandig, hellgrau, oben schwarz, schwach karbonatisch verkittet (Horizont 8a)</p> | <p>glimmerführend, Landschneckenreste, Lignit-Einlagerungen (bei 24,80 m Grenze Horizont 7f/7e)</p> <p>...</p> <p>ET: 100,20 m</p> |
|--|--|
-
- Referenzprofil 2**
Tiefbahnlinie „D“ Dornbusch–Taunustor (3,5 km zusammenhängendes Profil entlang der U-Bahnlinien U1, U2, U3) Frankfurt am Main, Eschersheimer Landstraße, TK 25, Bl. 5818 Frankfurt a.M. Ost (BEST & WIESNER 1966, BEST 1975)
Aufnahme: G. Best 1964 (leicht verändert)
-
- [m]**
- Miozän, Niederrad-Formation**
- | | |
|----------------------------|--|
| <p>16,20–</p> <p>21,00</p> | <p>Schluffmergel, gelbgrau, Algenkalk-Sandlagen und Algenkalk-Knollen, verzahnt mit Algenkalk-Riffen, Beginn des Riff-Wachstums auf der untersten Lage, Basis dieses Horizontes unter den Ansatzstellen der Algenkalk-Riffe wellenförmig durchgebogen (Horizont 11a)</p> |
|----------------------------|--|
- Miozän, Frankfurt-Formation**
- | | |
|---|--|
| <p>–23,50</p> <p>–25,00</p> <p>–26,00</p> <p>–32,30</p> <p>–33,80</p> <p>–35,40</p> <p>–39,05</p> <p>–41,28</p> <p>–43,98</p> <p>–44,98</p> <p>–47,78</p> <p>–50,08</p> <p>–57,18</p> | <p>Mergelton, dunkelolivgrau, unten graublau bis grünlich, geschichtet, bituminös, im oberen Teil Kalksand-Lage (Ostracodensand) (Horizont 10d)</p> <p>Tonmergel, dunkelgrau, Kalksand (Algenkalk-Detritus), Dolomit-Septarien (Horizont 10c)</p> <p>Mergelton, dunkelgrau, bituminös (Horizont 10b)</p> <p>Kalksand und Lagen von Algenkalk, schaumig, porös, dazwischen geschaltet Tonmergel, grau und Dolomitbänke (Horizont 10a)</p> <p>Mergelton, dunkelgrau, bituminös (Horizont 9c)</p> <p>Mergelton, dunkelgrau, bituminös mit Dolomitkonkretionen (Horizont 9b)</p> <p>Mergelton, dunkelgrau, bituminös mit Dolomitbänken und Kalksand-Lagen (Horizont 9a)</p> <p>Mergelton, dunkelgrau-olivgrau, bituminös mit dünnen Kalksand-Zwischenlagen, selten Dolomitkonkretionen (Horizont 8g)</p> <p>Lagen von Mergelton, geschichtet bis feingeschichtet, stark bituminös, mit vielen Fisch-Resten (bonebed), dünne Kalkschluff-Lamellen, gelblich-weiß, im oberen Teil Hydrobien-Sandlagen (Horizont 8f)</p> <p>Onkoid-Sand, lokal mit plattigen Dolomit-Onkolithen, lateral in Mergelton, bituminös mit Kalksand-Zwischenlagen übergehend (Horizont 8e)</p> <p>Mergelton, dunkelolivgrau, bituminös, feinschichtig gebändert (Horizont 8d)</p> <p>Onkoid-Sande und Algenkalk-Lagen mit bituminösen, dunklen Mergelton-Zwischenlagen, stellenweise Dolomitbänke (Horizont 8c)</p> <p>Überwiegend Mergelton, dunkelgrau-dunkelolivgrau, bituminös mit Feinschichtung und Trockenrisse,</p> |
|---|--|
-
- Miozän, Wiesbaden-Formation**
- | | |
|---|--|
| <p>–20,20</p> <p>–23,80</p> <p>–26,00</p> | <p>Ton, graugrün, mit Quarzfeinsand-Streifen unterhalb 19,40 m, kalkfrei (Horizont 7f)</p> <p>Ton, graubläulich bis graugrün mit Pflanzenresten, z.T. feinsandig (Quarzsand), kalkfrei, teils schwach kalkhaltig</p> <p>Schluff, tonig, kalkhaltig, dunkelgraubraun bis dunkelolivgrün, meist feingeschichtet, Kalksand, schwach</p> |
|---|--|

untergeordnet Sandlagen (Onkoide), Onkolithe, Dolomitkonkretionen (Horizont 8b)

-59,38 Mergelton, dunkelolivgrau, bituminös mit Kalkschluff-Lagen, gelblich-weiß, wechsellagernd mit geröllführenden Sandlagen und Dolomitbänken (Horizont 8a)

Miozän, Wiesbaden-Formation

-65,28 Ton, oben mehr graublau, unten mehr graugrün, wenig geschichtet, karbonatfrei bis -arm, fossilarm mit feldspatreichen Quarzsand-Zwischenlagen (z.T. Dolomit-Sandstein), im Schlämmrückstand viel Pyrit (Horizont 7f)

Referenzprofil 3

Brg. 100 (U-Bahnlinie U5), Frankfurt am Main, TK 25, Friedberger Landstraße, Bl. 5818 Frankfurt a.M. Ost, R 3478262, H 5555165, 133,98 m ü. NN, HLUg Bohrchiv-Nr. 5818/2256 (KÜMMERLE & SEIDENSCHWANN 1993)

Ausführung: Fa. Johann Keller GmbH

Aufnahme: E. Kümmerle 1970

[m]

Miozän, Niederrad-Formation

13,30– Schluff, braun- und grüngrau, mürbe bis steif, 13,70 Ostracoden- und Hydrobienschille, Algenkalkstein, knollig-plattig, mit Ostracoden und Hydrobien, unten oolithische Lage

-14,00 Kalkschluff, hellgelbbraun, mit knollig-karvernösem Algenkalkstein (Horizont 11a)

Miozän, Frankfurt-Formation

-21,00 Schluff, tonig, dunkelgrüngrau, teilweise Ton, schluffig, feine Kalkschlufflagen, bei 16,4 m feine Quarzsandlage, bei 19,9 m und 20,5 m Hydrobien-Sandlagen (Horizont 10d)

-22,00 Schluff, tonig, bis Ton, schluffig, teilweise dunkelgrau und bläulichgrau, bei 21,7 m Kalksandlage mit Hydrobien und Muschelschill (Dreisseniden)

-23,05 Dolomit-/Mergelstein, grau, dicht, splittrig, Kalkspatgängchen, unten Mergelkalk

-25,00 Ton, stark schluffig, bläulichgrau, dunkelgrüngrau, nesterartig Hydrobien eingelagert

ET

5. Sedimente

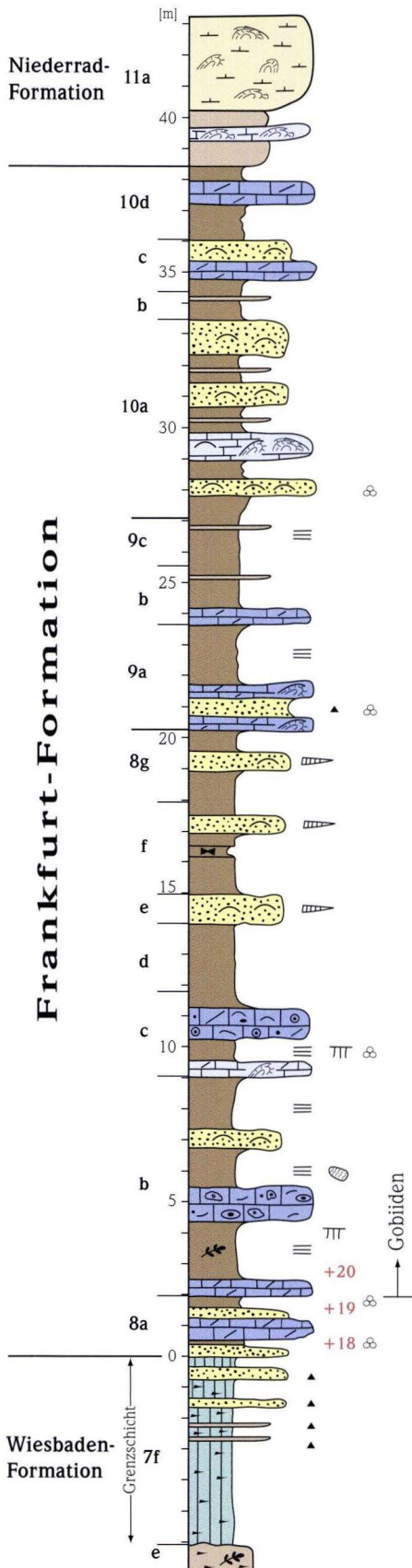
Zum allergrößten Teil besteht die Frankfurt-Formation aus dunkelolivgrauen, bituminösen Tonmergeln mit hellbeigen Kalkschlufflagen. Eingeschaltet sind sowohl tiefschwarze Kalksande als auch Kalkstein- und stellenweise Dolomitbänke, bzw. Dolomitkonkretionen, die schon von KINKELIN (1909) als Septarien beschrieben wurden (KÜMMERLE & SEIDENSCHWANN 1993). Die hellgrauen, harten und splittrigen Kalksteine, meist frühdiagenetisch dolomitisiert, sind oft klüftig bis kavernös. Mitunter können offene Kluftsysteme mit Kalzittapeten beobachtet werden. Die Kalksande beinhalten Onkoide, weniger Ooide bzw. Pseudooide und stromatolithische Algenkrusten. In den höheren Abschnitten kommen schwarzgraue

Kalksandlagen aus monospezifischem Bruchschill von Ostracoden, Hydrobien und feinem, karbonatischem Detritus in unterschiedlichen Anteilen vor (KÜMMERLE 1971). Vereinzelt sind schaumig-poröse teils knollige Algenkalke und Algenkalkdetritus zu finden, die größtenteils die Schichtung aufheben. Eine mm bis cm mächtige hell/dunkel Schichtung ist im Allgemeinen typisch für die Tonmergel. Polygonale Trockenrisse sind in verschiedenen Lagen vorhanden. Aus dem terrestrischen Hinterland sind dunkelgraue bis stahlgraue, gut sortierte Quarzsande bis -feinkiese eingeschüttet, deren Mächtigkeit zum Liefergebiet zunimmt. Die Sedimentabfolge ist in einem schematisierten Standardprofil dargestellt (Abb. 3).

Legende



Abb. 3. Schematisches Standardprofil der Frankfurt-Formation: größtenteils dunkelolivgraue Tonmergel mit eingeschalteten schwarzen Kalksanden und hellen Kalksteinbänken sowie knolligen Algenkalcken.



6. Fossilführung

Wie auch die Wiesbaden-Formation kann die Abfolge der Frankfurt-Formation in eine Reihe von Mikrofossil-Horizonte (8a bis 10d) untergliedert werden (WIESNER 1967, BEST 1975; Tab. 1, Abb. 3). Im tiefsten Horizont 8a der Frankfurt-Formation sind zunächst Ostracoden, insbesondere der Arten *Eucypris ? agglutinans* (LIENENKLAUS), *Ilyocypris tribullata* LIENENKLAUS und *I. tuberculata* LIENENKLAUS sowie Foraminiferen u.a. *Quinqueloculina laevigata* (D'ORB.), *Bolivina moguntiaci* BARTENSTEIN & HEINEMANN verhältnismäßig häufig. Auch in den folgenden Horizonten 8b bis 9a stellen Ostracoden und Foraminiferen einen Großteil der Mikrofauna, wohingegen der Horizont 9b weitgehend fossilieer ist. Ausschließlich im Horizont 8d kommt der Ostracode *Moencypris bockenheimensis* TRIEBEL vor. Bezeichnend für den Horizont 9c ist seine spärliche Fossilführung, wobei die Ostracoden *Candona cf. candidula* LIENENKLAUS, *Ilyocypris tribullata* LIENENKLAUS und *Hemicyprideis* sp. vorherrschen. Im höheren Teil werden Foraminiferen mit *Quinqueloculina simplex* TERQUEM, *Bolivina moguntiaci* BARTENSTEIN & HEINEMANN und *Rosalina globularis bradyi* (CUSHMAN) noch einmal ab Horizont 10a häufiger, während Ostracoden, insbesondere *Eucypris ? agglutinans* (LIENENKLAUS) und *Cypridopsis ? kinkelini* LIENENKLAUS bis in Horizont 10d dominieren. Im Horizont 10d setzt außerdem *Stenocypris* sp. ein (siehe auch BEST 1975).

Stromatolithen sind aus dem Horizont 8a in der Nähe der Nannoplankton-Lage +18 (MARTINI et al. 2004) und Kalkalgen (*Chlorellopsis*) in unterschiedlicher Häufigkeit in den Horizonten 8a bis 10c beschrieben worden (BEST 1975). Gelegentlich wurden auch Reste von Schwimmpflanzen (*Salvinia*) und Rohrkolben-Gewächsen (*Typha*) gefunden (WIESNER 1967, BEST 1975).

Kalkiges Nannoplankton wurde in drei markanten, monospezifischen Massenvorkommen in den Horizonten 8a und 8b festgestellt (Lagen +18 bis +20, MARTINI 1988, MARTINI et al. 2004). Darin enthalten sind in Lage +18: *Coccolithus pelagicus* (WALLICH) und *Reticulofenestra francofurtana* BEST & MÜLLER, in Lage +19: *Reticulofenestra francofurtana* BEST & MÜLLER und in Lage +20: *Coccolithus pelagicus* (WALLICH) (Tab. 1, Abb. 3).

Eine reichhaltigere Nannoplankton-Gemeinschaft, die Beziehungen zum Nordseeraum zeigte, wurde in unhorizontiertem Aushubmaterial aus dem Main bei Großkrotzenburg festgestellt (MARTINI 1987), für das zunächst eine Einordnung in die Mikrofossil-Horizonte 8b oder 8c vermutet wurde. REICHENBACHER (2000) meint jedoch auf Grund der begleitenden Fischfauna, dass die Nannoplankton-Gemeinschaft aus dem Horizont 10b stammt.

Charophyten-Oogonien sind in der Frankfurt-Formation äußerst selten, von BEST (1975) werden sie aus den Horizonten 8a und 10c gemeldet. Die spärliche Gemeinschaft dürfte der *Stephanochara berdotesis*-Zone angehören, die auch in der unterlagernden Wiesbaden-Formation und in der überlagernden

den Niederrad-Formation nachgewiesen wurde (SCHWARZ 1985, 1993). Die von SCHWARZ (1985) in den „Oberen Hydrobien-Schichten“ aus dem Mainzer Raum beschriebene Gemeinschaft mit 12 Arten stammt nachweislich aus dem höheren Teil der Wiesbaden-Formation und nicht aus der Frankfurt-Formation.

Durchgehend häufig sind Hydrobiiden mit den Arten *Hydrobia paludinaris* (BRONN) [*H. elongata* (FAUJAS)] und *Nematurella obtusa* (SANDBERGER) [*Hydrobia obtusa*] wie auch *Dreissena brardi* (BRONGNIART) [*Congeria brardi*] im tieferen Teil der Abfolge. Wichtig sind Lagen mit den Gastropoden *Granulolabium pustulatum* (SANDBERGER) [*Potamides plicatus pustulatus*] und *Mesohalina francofurtana* (ZILCH) [*Tympanotonos francofurtanus*] in den Horizonten 8e bis 8g (Tab. 1, Abb. 3), die früher als „Cerithien“ zu Fehleinstufungen von Oberen Hydrobien-Schichten führten (BEST & WIESNER 1966, BEST 1975). Weiterhin kommt *Perna faujasii* (BRONGNIART) [*Mytilus faujasii*] in einzelnen Lagen angereichert vor. Vereinzelt wurden auch Landschnecken der Gattung *Cepaea* und in Horizont 8d die Sumpfschnecke *Viviparus pachystoma* (SANDBERGER) gefunden (BEST 1975).

Auf den Reichtum der Hydrobien-Schichten, insbesondere der Oberen Hydrobien-Schichten, an Fischresten wiesen bereits WEILER (1963) und MALZ (1978) hin, wobei zu bemerken ist, dass fehlerhafte ältere stratigraphische Einstufungen bzw. die früher falsch interpretierte Abfolge im Oberrheingraben bei WEILER (1963) zu ungenauen Reichweiten einzelner Fischarten führte. So gehören z.B. alle *Gobius*-Arten, die WEILER (1963) aus der Rüssingen-Formation (*Corbicula*-Schichten) beschrieb, in die Frankfurt-Formation. Nähere Angaben hierzu sind in REICHENBACHER (2000: 32) zu finden.

Bezeichnend für die Frankfurt-Formation ist das plötzliche Einsetzen von *Gobius*-Arten zu Beginn des Horizontes 8b, nachdem im Horizont 8a nur *Morone aequalis* (KOKEN) vorhanden ist (Tab. 1, Abb. 3). Nach einem Rückgang in den Horizonten 8c bis 8g bestimmen die Gobiiden bis zum Ende der Frankfurt-Formation die Fisch-Gemeinschaft. Gleichzeitig sind Otolithen von *Hemitrichas bartensteini* (MALZ) in vielen Horizonten der Frankfurt-Formation verbreitet (REICHENBACHER 2000). Im höheren Abschnitt der Frankfurt-Formation (ab Horizont 9a) kommt als weitere wichtige Art „*Aphanius germaniae* WEILER“ (syn. von *Aphanolebias meyeri* (AGASSIZ); REICHENBACHER

WIESNER 1967		BEST 1975				BEST 1975	BEST 1975	MARTINI 1981	REICHENBACHER 2000
Mikrofossil-Zonen		Mikrofossil-Horizonte				Salinität	Gastropoden-H. Nannoplankton-L.	Fisch-Gemeinschaften	Fisch-Otolithen-Zonen
						L LB BM VM			
10	<i>Prolebias meyeri</i> - <i>Cypridopsis ? kinkelini</i> - <i>Gobius weilert</i> - Zone	d	<i>Stenocypris</i> /Gobiiden-Horizont					Gobius-Aphanius-Gemeinschaft	FM 14 b mit <i>Aphanius germaniae</i> *
		c	<i>Eucypris ? agglutinans</i> / <i>Cypridopsis ? kinkelini</i> -Horizont						
		b	<i>Aphanius germaniae</i> /Cypriniden/Gobiiden-Horizont						
		a	<i>Aphanius germaniae</i> /Foraminiferen-Horizont						
9	<i>Cyprideis ? miocaenica</i> - <i>Ilyocypris tribullata</i> - Zone	c	<i>Candona/Ilyocypris/Hemicyprideis</i> -Horizont				Potamides-Tympanotonos-Horizonte	Cypriniden-Perca-Gemeinschaft	FM 14 <i>Hemitrichas bartensteini</i> -Gobius Reichweiten-Zone
		b	Cypriniden-Horizont						
		a	Cypriniden/Gobiiden-Horizont						
8	<i>Candona candidula</i> - <i>Ilyocypris tribullata</i> - Zone	g	<i>Potamides</i> -Horizont					Gobius-Gemeinschaft	FM 14 a mit <i>Perca ? sp.</i>
		f	<i>Tympanotonos</i> -Horizont						
		e	Bryozoen/ <i>Potamides</i> -Horizont						
		d	<i>Moenocypris</i> -Horizont						
		c	Gobiiden/Foraminiferen-Horizont						
		b	Horizont des beginnenden Gobiiden-Auftretens						
		a	Basishorizont mit <i>Bolivina moguntiac</i>						
							+20		
							+19		
							+18	(<i>Morone aequalis</i>)	

Tab. 1. Übersicht über die Mikrofossil-Zonen (WIESNER 1967), Mikrofossil-Horizonte mit Salinitätsangaben (BEST 1975), Gastropoden-Horizonte (BEST & WIESNER 1966, BEST 1975), Nannoplankton-Lagen (MARTINI 1987, 1988), Fisch-Gemeinschaften (MARTINI 1981) und Fisch-Otolithen-Zonen (REICHENBACHER 2000) in der Frankfurt-Formation (Obere Hydrobien-Schichten), * syn. *Aphanolebias meyeri* (AGASSIZ) REICHENBACHER & GAUDANT 2003. Farbgebung: dunkelblau = marin bis vollmarin (VM), hellblau = brackisch-marin (BM), grün = limnisch-brackisch (LB), gelb = limnisch (L).

& GAUDANT 2003, REICHENBACHER et al. 2004) hinzu. Ab Horizont 8b sind in unterschiedlicher Häufigkeit auch Cypriniden, u.a. Vertreter der Gattungen *Alburnus*, *Leuciscus* und *Scardinius* sowie *Perca fluviatilis* WEILER vorhanden. Neben Otolithen und Schlundzähnen sind vollständige Fisch-Skelette, z.T. mit Otolithen in situ, besonders von *Gobius*-Arten, als Massenvorkommen in Leichenfeldern bezeichnend für die Frankfurt-Formation (EIKAMP & KÖNIG 1981, MARTINI 1984, OTT 2003).

7. Leithorizonte und Korrelationen

Die Frankfurt-Formation besitzt nur wenige lithostratigraphische Merkmale. Wenn eine Grenzschicht, wie der grüngraue kalkfreie Ton (KÜMMERLE 1974, MARTINI et al. 2004), nicht aufgeschlossen vorliegt, ist sie oft nicht von der Wiesbaden-Formation zu unterscheiden. Wichtige lithostratigraphische Marker sind die Horizonte 8e bis 8g mit den Makrofossilien *Granulolabium-Mesohalina* [*Potamides-Tympanotonos*] (BEST & WIESNER 1966, BEST 1975) (Tab. 1, Abb. 3). Diese sind auch für Parallelisierungen bis in den Oberrheingraben geeignet. Die Vorkommen von *Perna*- [*Mytilus*-] Lagen in der Frankfurt-Formation besitzen keinen Leitwert. Allein anhand der Mikrofossilien kann eine biostratigraphische Gliederung der

8. Verbreitung

Die Hauptverbreitung der Frankfurt-Formation (Abb. 1) ist der Raum Frankfurt-Hanau (Hanauer Becken; GOLWER 1968). Die Mächtigkeit der Frankfurt-Formation in Frankfurt am Main beträgt nach dem Tiefbahnprofil D 39 m (BEST 1975: 104) (Referenzprofil 2), nimmt nach Westen bis ca. 45 m zum Nidda-Graben zu (KÜMMERLE & SEIDENSCHWANN im Druck). Nach Norden reichen Sedimente der Frankfurt-Formation bis an den Taunusrand (z.B. Hofheim, Bl. 5916 Hochheim am Main; KÜMMERLE & THEWS 1975; zwischen Niederhöchstadt und Schwalbach a.Ts., Bl. 5817 Frankfurt a.M. West, REICHENBACHER 2000, KÜMMERLE & SEIDENSCHWANN im Druck; u.a. Brg. 55, HLUJ Bohrarchiv-Nr. 5817/3669 mit einem *Granulolabium-Mesohalina*-Horizont). In Richtung Hessische Straße ist die Frankfurt-Formation über Bohrungen bei Rosbach und Friedberg (Bl. 5618 Friedberg, KÜMMERLE 1976) und Ilbenstadt (Bl. 5718 Ilbenstadt; REICHENBACHER 2000) bis Allertshausen im Lumdatal (Bl. 5319 Londorf) nachgewiesen, wo sie in einer Wassererschließungsbohrung unter geringmächtigen vulkanischen Ablagerungen erbohrt wurde (SCHENK 1964). Im Raum Butzbach/Münzenberg sind größtenteils kalkfreie Sande und Kiese aber auch kalkige Sedimentfahnen der Hydrobien-Schichten (ungegliedert) als Ausläufer vom Mainzer-/Hanauer Becken vorhanden, in denen vermutlich Teile der Frankfurt-Formation enthalten sind (Bl. 5518 Butzbach, KÜMMERLE 1981), die aber meist nicht weiter ausgehalten werden können.

Reste von Landwirbeltieren wurden in der Frankfurt-Formation bisher nicht gefunden.

Von BEST (1975) wurden ferner Bryozoen in den Horizonten 8a und 8e, Balaniden in Horizont 8g, Asseln (Oniscoidea) in den Horizonten 8a, 8c und 10a sowie Gehäuse von Köcherfliegenlarven in Horizont 10a erwähnt, Lumbriciden-Reste („*Arion kinkelini*“) kommen vereinzelt in Horizont 8a vor.

Frankfurt-Formation erfolgen, für die WIESNER (1967) und BEST (1975) eine genaue Unterteilung in Zonen und Horizonte erstellt haben (Tab. 1, Abb. 3). Weiterhin können im tiefsten Teil der Abfolge (Horizonte 8a und 8b) Nannoplankton-Massenlagen für eine regionale Korrelation herangezogen werden (MARTINI 1988). Die Häufigkeit von Fisch-Resten (Skelette, Otolithen, Schlundzähne) in der Frankfurt-Formation führte zu einer Untergliederung in drei Fisch-Gemeinschaften (MARTINI 1981) und in eine Otolithen-Zonierung (REICHENBACHER 2000), wobei insbesondere die Gobiiden (Meergrundeln) mit ihrem plötzlichen Einsetzen im Horizont 8b wichtig sind (Tab. 1).

Nach Osten ist die Frankfurt-Formation nördlich Wachenbuchen, nordöstlich Langendiebach (RENFTEL 1998) und in einer Bohrung bei Bruchköbel (REICHENBACHER 2000) auf Bl. 5817 Hanau sowie bei Ravolzhausen auf Bl. 5820 Langenselbold (WIESNER 1967, SCHELLMANN 1973; Einstufung fraglich) nachgewiesen. Ferner nach Südosten in einer Bohrung bei Kleinaheim (Bl. 5817 Hanau) und bei Hainstadt/Main (Bl. 5919 Seligenstadt) (REICHENBACHER 2000). Bekannt ist diese Formation weiterhin aus mehreren Bohrungen in der ehemaligen Mülldeponie Eisert bei Großkrotzenburg (z.B. HLUJ Bohrarchiv-Nr. 5919/128, LB 17067) und aus dem Main-Aushub bei Großkrotzenburg (Bl. 5919 Seligenstadt) u.a. durch reichhaltige *Gobius*- und Nannoplankton-Funde (EIKAMP & KÖNIG 1981, MARTINI 1987). Im Süden wurden in Sprendlingen tonige Ablagerungen der Frankfurt-Formation von KÜMMERLE in KOWALCZYK et al. (1999) erkannt (Bl. 5918 Neu-Isenburg).

Im Mainzer Raum ist die Frankfurt-Formation nur noch in geringer Mächtigkeit abgelagert worden oder als Restvorkommen erhalten (GRIMM & GRIMM 2003). Es konnte zumindest der Horizont 8a über die Nannoplankton-Lagen +18 und +19 im Universitätsgelände (Bohrung Universität Mainz) nachgewiesen werden (MARTINI 1988). Die Frankfurt-Formation ist weiterhin mit einem Massenvorkommen von *Gobius*-Otolithen (mindestens Horizont 8b) beim Ausbau des „Neuen DB-Tunnel Mainz-Süd“ (KB 12, R 3448100 H 5540010) in Mainz ange-

troffen worden. Nur der höhere Teil der „Oberen Hydrobienschichten“ von KUSTER-WENDENBURG (1969) in der Lokalität Mainz, Goldgrube (Aufschluss 31) entspricht ebenfalls der Frankfurt-Formation, da die dort erwähnten, in großer Menge vorhandenen Fisch-Otolithen nach REICHENBACHER & KELLER (2002: 108) zu der Gattung *Gobius* gehören (Abb. 1). Ein weiteres Vorkommen wurde an der Feuerwache in Wiesbaden (R 344409 H 554951, 145 m NN, Bohrarchiv-Nr. 5915/1179) erbohrt. Die 20 m mächtige Wechselfolge von Tonen und Mergeln enthält bei 10–11 m Gobiiden-Otolithen (freundl. mündl. Mitt. Dr. E. Kümmerle).

9. Paläoökologie

Nach einer Aussüßungsphase im oberen Teil der Wiesbaden-Formation (REICHENBACHER & KELLER 2002, MARTINI et al. 2004, KELLER & RADTKE 2007) steigt mit Beginn der Frankfurt-Formation der Salzgehalt der „Hydrobien-See“ wieder an (Tab. 1), was sich in mehreren Nannoplankton-Massenlagen (BEST & MÜLLER 1972, MARTINI 1988) und entsprechenden Isotopenwerten (MARTINI et al. 1988) bemerkbar macht. Gleichzeitig nehmen Foraminiferen wie Vertreter der Gattungen *Quinqueloculina*, *Bolivina* und *Rosalina* zu und bei den Ostracoden bestimmen *Cypridopsis*-, *Cypria*?, *Eucypris*- und *Hemicyprideis*-Arten die Gemeinschaft (BEST 1975). Deutlich wird der gestiegene Salzgehalt weiterhin durch die plötzliche Einwanderung von Gobiiden (Meergrundeln) (Horizont 8b), die die Fisch-Fauna zunächst dominieren (MARTINI 1981, REICHENBACHER 2000). Ab Horizont 8d deuten limnische Elemente wie *Candona*-Arten bei den Ostracoden, stark gesunkene Foraminiferen-Anteile und die Häufigkeit von Cypriniden (Karpfenfische) auf eine vorübergehende Aussüßung hin. In den folgenden Horizonten geben Bryozoen, Gastropoden wie *Granulolabium* [*Potamides*] und *Mesohalina* [*Tympanotonos*] sowie auch gehäufte Vorkommen von Hydrobien, aber auch Balaniden (Seepocken), Lagen mit Muschelpflastern von *Perna* [*Mytilus*] *faujasii* (BRONGNIART) und Cypriniden rasch wechselnde Salinitätsverhältnisse an. Mit Horizont 9a werden die Gobiiden wieder häufig, sind aber immer noch mit Vertretern der Cypriniden

Im Oberrheingraben sind zeitgleiche Ablagerungen der Frankfurt-Formation (höherer Teil der dortigen „Hydrobienschichten“, GRIMM 2005, GRIMM & HOTTENROTT 2005) von Darmstadt im Norden (Bl. 6117 Darmstadt-West) über Monsheim (Bl. 6315 Pfeddersheim), Harthausen (Bl. 6616 Speyer), Reilingen (Bl. 6617 Schwetzingen), Huttenheim (Bl. 6716 Germersheim), Landau (Bl. 6814 Landau i.d. Pfalz) bis Spöck (Bl. 6817 Bruchsal) im Süden in diversen Bohrungen über die Mikrofaunen und den *Granulolabium*- [*Potamides*] Horizont sowie über Fisch-Otolithen (*Gobius* spp.) belegt (WEILER 1963, REICHENBACHER 2000) (Abb. 1).

vergesellschaftet. Foraminiferen sind wieder etwas häufiger, so dass eine erneute Erhöhung des Salzgehaltes wahrscheinlich ist. Im Horizont 10a sind nach einem Ausbleiben nochmals Foraminiferen häufig. Bei den Fischen wechseln sich Gobiiden- und *Aphanius*-Häufigkeiten ab, gleichwohl sind beträchtliche Anteile von Cypriniden vorhanden (BEST 1975, REICHENBACHER 2000). Massenvorkommen einzelner Taxa (BEST 1975, MALZ 1978), Fisch-Leichenfelder (EIKAMP & KÖNIG 1981, MARTINI 1984) und Trockenrisse zeugen von extremen Lebensbedingungen (Tab. 1, Abb. 3).

Durch Senkungstendenzen im Hanauer Becken zu Beginn der Frankfurt-Formation erreichte wahrscheinlich über die Hessische Straße eine kurzfristige Ingression den Ablagerungsraum (MARTINI 1990) und führte zu annähernd marinen Verhältnissen (Horizont 8a). Für die Gobiiden diskutiert REICHENBACHER (2000) auch eine mögliche Herkunft aus dem Süden. Im Folgenden bestimmen Süßwasserzuflüsse, Verdunstung mit Erhöhung des Salzgehaltes, Sauerstoffmangel wegen Überhitzung und Trockenfallen in Teilen des flachen „Hydrobien-Gewässers“ die wechselnden Lebensbedingungen. Eine weitere vorübergehende Verbindung nach Norden mit dem Nordsee-Becken scheint die Nannoplankton-Gemeinschaft des Ausbaus aus dem Main bei Großkrotzenburg anzuzeigen, deren genaue Position in der Frankfurt-Formation allerdings unklar ist (MARTINI 1987, REICHENBACHER 2000).

10. Stratigraphische Position

Die Frankfurt-Formation weist in Flora und Fauna weitgehend Durchläufer- oder endemische Arten auf, so dass eine genaue überregionale stratigraphische Zuordnung der Frankfurt-Formation weitgehend offen bleiben muss. Sie wird von der Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) überlagert (RADTKE & KÜMMERLE 2004). Die absolute Altersdatierung der Untermain-Basalt-Formation im Raum Frankfurt erbrachte nach der K-Ar-Datierung durch FUHRMANN & LIPPOLT (1987) ein Alter von 14,8–16,3 Mio. Jahren. Das entspricht nach

HAQ et al. (1988), HARDENBOHL et al. (1998) und der DEUTSCHEN STRATIGRAPHISCHEN KOMMISSION (2002) einer Position im tiefen Mittel-Miozän (Langhium).

Zur weiteren stratigraphischen Einengung kann man Säugerfunde in der unterlagernden höheren Wiesbaden-Formation (Fundort Mainz-Lenneberg, TOBIEN 1988) und in der überlagernden Niederrad-Formation (Fundort Frankfurt-Nordbassin, STEPHAN-HARTL 1972, TOBIEN 1987) heranziehen. Neuere Interpretationen ergeben die Zone MN 3a für die Fauna

Mainz-Lenneberg (höhere Wiesbaden-Formation) und MN 3b der Säugetier-Zonierung für die Fauna Frankfurt-Nordbassin in der Niederrad-Formation (REICHENBACHER 2000, RADTKE & KÜMMERLE 2004), also jüngeres Burdigalium. Detailliertere Angaben zur Position der Frankfurt-Formation können aufgrund fehlender Säugerfunde nicht gemacht werden. Die Fisch-Fauna der Frankfurt-Formation unterstützt allgemein eine Einstufung in das Burdigalium (REICHENBACHER 2000) bzw. Spät-Burdigalium (REICHENBACHER et al. 2007).

In der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland (DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION 2002) ist die Frankfurt-Formation mit dem sehr hohen Alter von ca. 18,0 bis 19,3

Mio. Jahren angegeben, was schon dem tieferen Burdigalium entspricht. Die radiometrische absolute Datierung der überlagernden Untermain-Basalt-Formation (14,8–16,3 Mio. Jahre) könnte auch für eine jüngere Einstufung der Frankfurt-Formation in das Burdigalium sprechen.

Die Nannoplankton-Gemeinschaft von Großkrotzenburg bei Hanau (Abb. 1) scheint ähnlich den Basalten eine Parallelsierung mit dem Grenzbereich Hemmoor/Reinbeck-Stufe des Nordseeraumes anzuzeigen (MARTINI 1987). Dies entspricht dem Grenzbereich Burdigalium/Langhium bzw. Unter-/Mittel-Miozän, ist jedoch älter als die Basalt-Förderung (FUHRMANN & LIPPOLT 1987).

11. Schriftenverzeichnis

- BEST, G. (1975): Feinstratigraphie der Hydrobien-Schichten (Untermiozän, Mainzer Becken). – Mainzer geowiss. Mitt., **4**: 75–138, 18 Abb., 4 Tab., 5 Taf.; Mainz.
- BEST, G. & MÜLLER, C. (1972): Nannoplankton-Lagen im Unter-Miozän von Frankfurt am Main. – Senckenbergiana lethaea, **53** (1/2): 103–107, 3 Taf.; Frankfurt a.M.
- BEST, G. & SCHNEIDER, W. (1974): Petrographische Untersuchungen an untermiozänen Karbonatgesteinen des östlichen Mainzer Beckens (Frankfurt a.M.). – N. Jb. Geol. Paläont., Abh., **144**: 271–295, 18 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- BEST, G. & WIESNER, E. (1966): „Cerithien“ aus den Hydrobienschichten von Frankfurt am Main und Umgebung. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **98**: 55–63, 6 Abb.; Wiesbaden.
- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002. – 1 Tab., Beih.: 16 S.; Potsdam.
- DOEBL, F. (1967): The Tertiary and Pleistocene sediments of the northern and central part of the Upper Rhinegraben. – Abh. Geol. L.-Amt Baden-Württemberg, **6**: 48–54, 11 figs.; Freiburg i. Br.
- EIKAMP, H. & KÖNIG, W. (1981): Neue Skelettfunde von *Gobius francofurtanus* KOKEN (Fam. Gobiidae, Grundeln) aus den oberen Hydrobienschichten von Großkrotzenburg am Main (Hess.). 2. überarbeitete Aufl. – 24 S., 10 Abb., 1 Tab., 2 Taf., 1 Kte.; Großkrotzenburg.
- FRIEDRICH, K. & KÜMMERLE, E. (1969): Ein geologisches Profil vom Frankfurter Hauptbahnhof zum Opernplatz. – Natur und Museum, **99**: 369–375, 2 Abb.; Frankfurt a.M.
- FUHRMANN, U. & LIPPOLT, H.J. (1987): K-Ar-Datierungen an Maintrapp-Basalten aus Bohrungen in Frankfurt a.M. nach der $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Stufenentgasungstechnik. – Geol. Jb. Hessen, **115**: 245–257, 6 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- GOLWER, A. (1968): Paläogeographie des Hanauer Beckens im Oligozän und Miozän. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **96**: 157–184, 8 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- GRIMM, K.I. & GRIMM, M.C. (2003): Geologischer Führer durch das Mainzer Tertiärbecken. – In: GRIMM, K.I., GRIMM, M.C., NEUFFER, F.O. & LUTZ, H. (Hrsg.): Die fossilen Wirbellosen des Mainzer Tertiärbeckens. Teil 1-1. – Mainzer naturwiss. Archiv, Beiheft **26**: 158 S., 15 Abb., 3 Taf.; Mainz.
- GRIMM, M.C. (2005): Beiträge zur Lithostratigraphie des Paläogens und Neogens im Oberrheingebiet (Oberrheingraben, Mainzer Becken, Hanauer Becken). – Geol. Jb. Hessen, **132**: 79–112, 4 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- GRIMM, M.C. & HOTTENROTT, M. (2005): Das Tertiär des Oberrheingrabens in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – Newsl. Stratigr., **41**: 351–358, 1 Abb.; Stuttgart.
- HAQ, B.U., HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. (1988): Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. – SEPM Spec. Publ., **42**: 71–108, 17 figs., 2 append.; Tulsa.
- HARDENBOL, J., THIERRY, J., FARLEY, M. B., JACQUIN, T., DE GRACIANSKY, P.-C. & VAIL, P.R. (1998): Cenozoic sequence chronostratigraphy. – In: DE GRACIANSKY, P.-C., HARDENBOL, J., JACQUIN, T. & VAIL, P.R. (eds.): Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European basins. – SEPM Spec. Publ., **60**: Tab. 2; Tulsa.
- HÄUSER, F. (1961): Corbiculaschichten östlich von Hainstadt am Main. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **89**: 331; Wiesbaden.
- KELLER, T. & RADTKE, G. (2007): Quartäre (Mosbach-Sande) und kalktertiäre Ablagerungen im NE Mainzer Becken (Exkursion L am 14. April 2007). – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **89**: 307–333, 9 Abb., 3 Taf.; Stuttgart.
- KINKELIN, F. (1889): Erläuterungen zu den geologischen Übersichtskarten der Gegend zwischen Taunus und Spessart. – Ber. Senckenb. naturforsch. Ges., **1888/1889**: 323–351, 2 Taf.; Frankfurt a.M.
- KINKELIN, F. (1909): Vorgeschichte vom Untergrund und von der Lebewelt des Frankfurter Stadtgebietes. – 96 S., 7 Taf., 1 Kt.; Frankfurt a.M. (Rosenheim).
- KOWALCZYK, G., KÜMMERLE, E. & SEMMEL, A. (1999): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5918 Neu-Isenburg, 3. Aufl. – 208 S., 21 Abb., 9 Tab., 2 Beil.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1971): Zur Geologie der nordwestlichen Stadtgebiete von Frankfurt a.M. – Notizbl. hess. L.-Amt. Bodenforsch., **99**: 214–231, 5 Abb., Taf. 16; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1974): Geologische Ergebnisse neuerer Bohrungen in Frankfurt am Main. – Notizbl. hess. L.-Amt. Bodenforsch., **102**: 143–158, 1 Abb., Taf. 10; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1976): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5618 Friedberg. – 247 S., 30 Abb., 13 Tab., 2 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1981): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5518 Butzbach. – 214 S., 30 Abb., 13 Tab., 3 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (1993): Erläuterungen zur Geologischen Karte von

- Hessen 1:25 000, Bl. 5818 Frankfurt a.M. Ost, 3. Aufl. – 308 S., 31 Abb., 36 Tab., 3 Beil., Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (im Druck): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, 1:25 000, Bl. 5817 Frankfurt a.M. West, 3. Aufl. – Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & THEWS, J.-D. (1975): Zur Geologie des Stadtgebietes von Hofheim am Taunus. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **103**: 265–277, 1 Abb.; Wiesbaden.
- KUSTER-WENDENBURG, E. (1969): Mikrofau-nistische Untersuchungen zur Stratigraphie und Ökologie der Hydrobienschichten (Aquitane, Unter-Miozän) im Gebiet der Stadt Mainz am Rhein. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **97**: 229–242, 2 Abb., 2 Taf., Taf. 8–10; Wiesbaden.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ (Hrsg.): Geologie von Rheinland-Pfalz. – 400 S., 162 Abb., 36 Tab., 3 Anl.; Stuttgart (Schweizerbart).
- MALZ, H. (1978): Vergleichend-morphologische Untersuchungen an aquitanen Fisch-Otolithen aus dem Untergrund von Frankfurt am Main. – Senckenbergiana lethaea, **59** (4/6): 441–481, 4 Abb., 1 Tab., 6 Taf.; Frankfurt a.M.
- MARTINI, E. (1981): Sciaeniden (Pisces) aus dem Basisbereich der Hydrobien-Schichten des Oberrheingrabens, des Mainzer und des Hanauer Beckens (Miozän). – Senckenbergiana lethaea, **62** (2/6): 93–123, 5 Abb., 1 Tab., 4 Taf.; Frankfurt a.M.
- MARTINI, E. (1984): Fischsterben vor 18 Millionen Jahren. – Forschung Frankfurt, **1984** (3): 25–27, 5 Abb.; Frankfurt a.M.
- MARTINI, E. (1987): Nannoplankton aus den Oberen Hydrobien-Schichten des Hanauer Beckens (Miozän). – Geol. Jb. Hessen, **115**: 217–226, 2 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.
- MARTINI, E. (1988): Nannoplankton-Massenvorkommen in den *Corbicula*- (= Schichten mit *Hydrobia inflata*) und Hydrobienschichten des Oberrheingrabens, des Mainzer und des Hanauer Beckens (Miozän). – Geol. Jb., **A 110**: 205–227, 4 Abb., 2 Taf.; Hannover.
- MARTINI, E. (1990): The Rhinegraben system, a connection between northern and southern seas in the European Tertiary. – Veröff. Übersee-Mus., **A 10**: 83–98, 208–211, 7 figs.; Bremen.
- MARTINI, E., OTT, W. & KELLER, M. (2004): Der Grenzbereich Untere/Obere Hydrobien-Schichten – ein neuer Aufschluss in Frankfurt am Main: Nannoplankton und Fisch-Skelette (*Morone aequalis*). – Ber. Offenb. Ver. Naturkde., **104**: 3–17, 8 Abb.; Offenbach a.M.
- MARTINI, E., ROTHE, P. & HOEFS, J. (1988): Isotopenuntersuchungen an Nannoplankton-Massenvorkommen in den *Corbicula*- und Hydrobienschichten im Raum Frankfurt am Main und Mainz (Miozän). – Geol. Jb., **A 110**: 229–236, 2 Abb.; Hannover.
- MURAWSKI, H. (1975): Der Aufbau des Untergrundes von Frankfurt und seiner Umgebung als baugrundgeologisches Problem. – Vorträge der Baugrundtagung 1974 in Frankfurt/M.-Höchst: 5–22, 7 Abb.; Essen.
- OTT, W. (2003): Baustellen: Fenster in die Erdgeschichte. 3. Mitteilung: Neubau der U-Bahnstation Senckenberganlage, Frankfurt am Main-Bockenheim. Eine ergiebige Fundstelle fossiler Fischskelette in den Oberen Hydrobien-Schichten. – Ber. Offenb. Ver. Naturkde., **103**: 28–45, 10 Abb., 1 Tab., 2 Taf.; Offenbach a.M.
- RADTKE, G. & KÜMMERLE, E. (2004): Neudefinition von fünf stratigraphischen Einheiten im Tertiär (Miozän) des Hanauer Beckens und des Oberrheingrabens (Deutschland): Niederrad- bis Bockenheim-Formation. – Geol. Jb. Hessen, **131**: 27–44, 4 Abb.; Wiesbaden.
- REICHENBACHER, B. (2000): Das brackisch-lakustrine Oligozän und Unter-Miozän im Mainzer Becken und Hanauer Becken: Fischfaunen, Paläoökologie, Biostratigraphie, Paläogeographie. – Courier Forsch.-Inst. Senckenberg, **222**: 143 S., 43 Abb., 5 Tab., 15 Taf.; Frankfurt a.M.
- REICHENBACHER, B. & GAUDANT, J. (2003): On *Prolebias meyeri* (AGASSIZ) (Teleostei, Cyprinodontiformes) from the Oligo-Miocene of the Upper Rhinegraben area, with the establishment of a new genus and a new species. – Eclogae geol. Helv., **96**: 509–520, 10 figs., 2 tabs.; Basel.
- REICHENBACHER, B., GAUDANT, J. & GRIESEMER, T.W. (2007): A late Burdigalian gobiid fish, *Gobius brevis* (AGASSIZ, 1839), in the Upper *Hydrobia* Beds in the middle Upper Rhine Graben (W-Germany). – Paläont. Z., **81**(4): 365–375, 4 figs., 2 tabs.; Stuttgart.
- REICHENBACHER, B., GAUDANT, J. & SIENKNECHT, U. (2004): The new fossil killifish genus *Aphanolebias* REICHENBACHER & GAUDANT, 2003 (Teleostei, Cyprinodontiformes) and its fossil record. – Mitt. hamb. zool. Mus. Inst., **101**: 47–54, 2 figs.; Hamburg.
- REICHENBACHER, B. & KELLER, T. (2002): Neudefinition von stratigraphischen Einheiten im Tertiär des Mainzer und Hanauer Beckens (Deutschland, Oligozän – Miozän), Teil 2: Wiesbaden-Formation (= Untere Hydrobien-Schichten) – Mainzer geowiss. Mitt., **31**: 99–122, 3 Abb., 3 Tab.; Mainz.
- RENFTEL, L.-O. (1998): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5819 Hanau, 2. Aufl. – 278 S., 42 Abb., 18 Tab., 2 Beil.; Wiesbaden.
- ROTHAUSEN, K. (Koord.), MARTINI, E., ROTHE, P., SONNE, V., TOBIEN, H. & WEILER, H. (1988): Das Kalktertiär des Mainzer Beckens (Oberoligozän–Untermiozän) – Paläontologische, geologische, petrologische und geochemische Untersuchungen im „Kalktertiär-Projekt“. – Geol. Jb., **A 110**: 17–52, 2 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- SHELLMANN, T. (1973): Erforschungsgeschichte und Probleme des Tertiärvorkommens südöstlich Ravalzhausen (Gemeinde Neuberg, Kreis Hanau) – zugleich ein Beitrag zur Frage der Abgrenzung von *Corbicula*- und Hydrobienschichten überhaupt. – Jber. wetterau. Ges. Naturkde., **123/124**: 121–158, 2 Abb.; Hanau.
- SCHENK, E. (1964): Basalt-Vulkanismus und Aquitan bei Allertshausen im Lumdatal nordöstlich Gießen. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **92**: 223–249, 4 Abb., 1 Taf.; Wiesbaden.
- SCHOTTLE, W. & HAUPT, O. (1923): Der Untergrund der Mainebene zwischen Aschaffenburg und Offenbach. – Notizbl. Ver. Erdkde. hess. geol. L.-Anst. Darmstadt, **V** (5): 52–148, 1 Abb., 1 Tab.; Darmstadt.
- SCHWARZ, J. (1985): Revision der Charophyten-Flora der Süßwasserschichten und des Kalktertiärs im Mainzer Becken (Ober-Oligozän–Unter-Miozän). – Mainzer geowiss. Mitt., **14**: 7–98, 18 Abb., 10 Tab., 14 Taf.; Mainz.
- SCHWARZ, J. (1993): Charophyten aus dem Oligozän/Miozän des nördlichen Oberrheingrabens und des Hanauer Beckens (Frankfurt am Main und Umgebung). – Geol. Jb. Hessen, **121**: 41–59, 6 Abb., 1 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.
- STEININGER, F.F. & PILLER, W.E. (1999): Empfehlungen (Richtlinien) zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur. – Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, **209**: 19 S., 11 Abb., 3 Tab. i. Anh.; Frankfurt a.M.
- STEPHAN-HARTL, R. (1972): Die altmiozäne Säugetierfauna des Nordbassin und der Niederräder Schleusenkammer (Frankfurt/M., Hessen) und ihre stratigraphische Stellung. – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **64**: 97 S., 16 Abb., 11 Tab., 24 Taf.; Wiesbaden.

- STREIM, T. (1989): Stratigraphische und tektonische Beiträge zum Quartär, Tertiär und Rotliegenden von Bad Vilbel und des Nordostens von Frankfurt am Main. – Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Darmstadt: 447 S., 38 Abb., 36 Tab., 5 Taf., 2 Kt.; Darmstadt.
- STRUVE, W. (1973): Geologie des Mainzer Beckens. – Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, **5**: 50 S., 4 Abb., 1 Tab.; Frankfurt a.M.
- TOBIEN, H. mit Beitr. von FAHLBUSCH, V. & MAYR, H. (1987): Bemerkungen zur Altersstellung der altmiozänen Säugerfauna von Frankfurt/Nordbassin und der präbasaltischen Sedimentfolgen im Untergrund von Frankfurt am Main. – Geol. Jb. Hessen, **115**: 205–216, 1 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- TOBIEN, H. (1988): Einige Daten zur Systematik und Biostratigraphie der Rodentier und Lagomorphen (Mammalia) aus dem Kalktertiär des Mainzer Beckens (Oberliozän–Untermiozän). – Geol. Jb., **A 110**: 345–358, 2 Abb.; Hannover.
- WEILER, W. (1963): Die Fischfauna des Tertiärs im oberrheinischen Graben, des Mainzer Beckens, des unteren Maintales und der Wetterau, unter besonderer Berücksichtigung des Untermiozäns. – Abh. Senckenb. naturforsch. Ges., **504**: 75 S., 258 Abb., 2 Taf., 1 Kte.; Frankfurt a.M.
- WENZ, W. (1921): Das Mainzer Becken und seine Randgebiete. – 351 S., 38 Abb., 41 Taf.; Heidelberg (Ehrig).
- WIESNER, E. (1967): Das Miozän im östlichen Mainzer Becken unter besonderer Berücksichtigung der Mikrofauna. – Unveröff. Diss. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Frankfurt a.M.: 111 S., 25 Abb., 14 Taf., 5 Anl., Frankfurt a.M.
- WIESNER, E. (1971): Das Frankfurter Gebiet zur Unter-Miozän-Zeit. – Natur u. Museum, **101** (11): 447–457, 5 Abb.; Frankfurt a.M.

12. Anhang

Fossilname neu

Hydrobia paludinaria (BRONN)
Nematurella obtusa (SANDBERGER)
Dreissena brardi (BRONGNIART)
Granulolabium plicatum pustulatum (SANDBERGER)
Mesohalina francofurtana (ZILCH)
Perna faujasii (BRONGNIART)
Aphanolebias meyeri (AGASSIZ)

Fossilname alt

Hydrobia elongata (FAUJAS)
Hydrobia obtusa SANDBERGER
Congeria brardi BRONGNIART
Potamides plicatus pustulatus SANDBERGER
Tympanotonos francofurtanus ZILCH
Mytilus faujasii BRONGNIART
Aphanius germaniae WEILER

Manuskript eingegangen am 22.1.2007, angenommen am 5.7.2007

DANIEL KRAUSE¹ & HARTMUT HAUBOLD²

Die Fährtenfläche bei Eiterfeld (Osthessen, Landkreis Fulda) in den *Chirotherium*-Schichten der Solling-Folge des Buntsandsteins

Kurzfassung

Im Jahr 1963 wurde in den Schichten des Buntsandsteins eine 350 m² große Fläche mit Tetrapodenfährten bei geologischen Kartierungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung (HLfB) in der Vorderrhön entdeckt. Lithostratigraphisch liegt der Fundhorizont im Thüringischen Chirotheriensandstein der Solling-Folge. Der Steinbruch, in dem sich das Vorkommen befindet, wurde nach der Entdeckung geschlossen und die Fläche mit den Fährten abgedeckt. Anhand der überlieferten Dokumentation erfolgt hiermit eine umfassende Analyse, welche nicht zuletzt als Entscheidungshilfe für den weiteren Umgang mit dem Vorkommen geeignet sein kann. Im Ergebnis befinden sich auf der Fläche rund 2700 Eindrücke von Tetrapoden. Diese gehören zu 70 Fährten, die man addiert über eine Länge von mehr als 400 m verfolgen kann. Die Formen sind bestimmt als *Chirotherium barthii*, *C. sickleri*,

Isochirotherium cf. herculis, cf. *Brachychirotherium* sp. (Archosaurier) und *Dicynodontipus geinitzi* (Therapsiden). Diese Ichnofauna ist charakteristisch für den höheren Buntsandstein bzw. die oberste Unter- und basale Mittel-Trias. Identische Tetrapodenfährten sind in den kontinentalen Schichten dieses Alters weltweit nachgewiesen. Aber in keinem Falle ist eine Fläche dieser Ausdehnung und mit so zahlreichen Fährten unzerstört im natürlichen Aufschluss vorhanden. Die Fährtenfläche bei Eiterfeld repräsentiert einen Superlativ. Sie bietet den unikalen Einblick in die Situation der terrestrisch-fluviatilen Schwellenfazies des höheren Buntsandsteins. Der Flächenaufschluss steht exemplarisch für die Situation der ausgedehnten Schwellenregion vom Odenwald bis zum Eichsfeld und die Randfazies entlang der Hochgebiete um das Germanische Trias-Becken.

Abstract

In the year 1963 have been discovered in the Buntsandstein during geological mapping of the Hessian Geological Survey in the Vorderrhön a surface of 350 m² with tetrapod footprints. The layer is a part of lithostratigraphic member Thuringian Chirotheriensandstone within the Solling-Folge. Short after the discovery the quarry was closed and the footprint layer covered. Due to a preserved documentation this study presents a comprehensive analysis. This might be a potential guideline for decisions concerning the future use and purpose of the site. As the result of the analysis the surface displays about 2700 tetrapod tracks. The morphs are determined as *Chirotherium barthii*, *C. sickleri*, *Isochirotherium cf.*

herculis, cf. *Brachychirotherium* sp. (archosaurs) and *Dicynodontipus geinitzi* (therapsids). This ichnofauna is characteristic of the Upper Buntsandstein respectively of the Lower and early Middle Triassic. Identical tetrapod footprints are recorded globally from continental deposits of this age. However, in no case a surface of this extent with such high number of trackways exists undisturbed within the natural outcrop. Insofar the footprint surface of Eiterfeld represents a superlative. It presents a unique window into the situation of the terrestrial fluvial facies extended on the swell like elevations from the Odenwald to the Eichsfeld and along the massifs around the Germanic Basin.

¹ Dipl.-Geol. D. Krause (e-mail: daniel_krause79@web.de), Kreuzweg 3, 06179 Teutschenthal

² Prof. Dr. H. Haubold, korrespondierender Autor (e-mail: hartmut.haubold@uni-halle.de), Martin-Luther-Universität, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 3, 06120 Halle

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	62
2. Geographie und Geologie	63
2.1 Das Eiterfelder Vorkommen	63
2.2 Geologischer Rahmen	63
2.3 Buntsandstein und Solling-Folge	64
2.4 Die Solling-Folge im Raum Eiterfeld	65
2.5 Geologie des Fährtenvorkommens	66
3. Fundgeschichte und Material	67
3.1 Fundgeschichte	67
3.2 Das Belegmaterial und der Fährtenplan	68
4. Methodik – Studium fossiler Tetrapodenfährten	72
4.1 Grundlagen zur Analyse der Eiterfelder Fährten	72
4.2 Fährtenparameter und Berechnungen	72
5. Systematische Paläontologie	75
5.1 Bestimmung und Ichnotaxonomie	75
5.2 Die Ichnotaxa	75
5.2.1 <i>Dicynodontipus</i>	76
5.2.2 <i>Chirotherium</i>	77
5.2.3 <i>Brachychirotherium</i>	78
5.2.4 <i>Isochirotherium</i>	78
5.2.5 Zur Deutung der Chirotherien	78
6. Beschreibung und Interpretation	80
6.1 Auswertung der Eiterfelder Fährten	80
6.1.1 Sediment und Erhaltung der Fährten	81
6.1.2 Anzahl der Eindrücke und Größe der Fläche	81
6.1.3 Entstehung der Fährtenfläche	81
6.2 Die Eiterfelder Ichnofauna – Interpretation	82
6.2.1 Das ichnotaxonomische Spektrum	82
6.2.2 Analyse der Laufrichtungen	83
6.2.3 Rekonstruktion des Environments	84
7. Schriftenverzeichnis	86
8. Anlagen	88
Anhang 1 Schichtenverzeichnis des Profils im Steinbruch „Hartmann“	88
Anhang 2 Nachweis der Abgüsse und Originale	89
Anhang 3 Fährten der Fläche – Kurzbeschreibung	91
Anhang 4 Tab. 5: Arithmetische Mittel der Eindruck- und Fährtenparameter	98
Tab. 6: Arithmetische Mittel der kalkulierten Laufleistungen	100
Anhang 5 Vektorisierter Plan der Fährtenflächen von Eiterfeld (Beilage 1)	

1. Einleitung

Eines der ebenso faszinierenden wie rätselhaften Phänomene der Schichten des Buntsandsteins ist mit dem Begriff *Chirotherium* verknüpft, mit den Fährten des sog. Handtieres. J. J. KAUP (1835) hatte nach Funden bei Hildburghausen in Thüringen *C. barthii* und *C. sickleri* als fossile Tetrapodenfährten erstmals wissenschaftlich beschrieben. Heute kennt man derartige Fährten von vielen Vorkommen im Buntsandstein

Europas und äquivalenten kontinentalen bzw. epikontinentalen Formationen der Trias nahezu weltweit. Namentlich *C. barthii* ist heute in Arizona, Argentinien und in Guizhou, China, nachgewiesen (HAUBOLD 2006). Primäre Bedeutung haben aber seither die Vorkommen im oberen Bereich der Solling-Folge, dem sog. Thüringischen Chirotheriensandstein in Thüringen, Hessen und Nordbayern. Auf Schichtflächen dieses

Horizontes haben im Jahr 1963 Geologen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung (HLfB) – R. Motzka und J. Kulick – das in seiner flächenhaften Ausdehnung bislang größte Vorkommen mit Tetrapodenfährten der Germanischen Trias entdecken können. Im Unterschied zu allen anderen befinden sich Sandsteinlagen mit den positiven Eindrücken unverändert an der einstigen Basisfläche eines Steinbruches. Wenige Jahre nach der Freilegung wurden die Flächen allerdings wieder verschüttet. Die hier vorgelegte Studie ist die erste umfassende Darstellung eines fast vergessenen aber höchst bemerkens-

werten Vorkommens von überregionaler Bedeutung. Da das Material vollständig im Anstehenden belassen wurde, liegen nur wenige originale Proben und Abgüsse vor. Anhand der detaillierten Aufzeichnungen der Entdecker, insbesondere der Dokumentation der einmalig zahlreichen und über große Distanzen erhaltenen Fährten mit vielfältigen Bewegungsbildern war eine Analyse möglich. Die betreffenden Untersuchungen und vorgelegten Ergebnisse waren Teil einer Diplomarbeit (KRAUSE 2006) am Institut für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

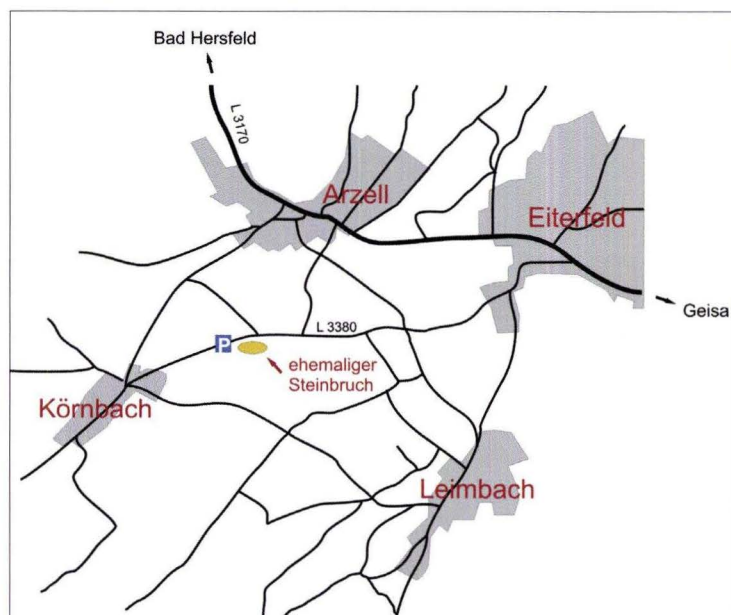
2. Geographie und Geologie

2.1 Das Eiterfelder Vorkommen

Die Kleinstadt Eiterfeld im Landkreis Fulda in Osthessen liegt am nordwestlichen Rand des Biosphärenreservats Rhön. In diesem Gebiet kommen verbreitet Schichten des Buntsandsteins vor, welche zum Bereich der Hessischen Senke gehören.

Das Fährtenvorkommen befindet sich im ehemaligen Steinbruch der Firma Hartmann, an der Landesstraße (L3380) zwischen Eiterfeld und Körnbach, wenige Meter östlich eines Parkplatzes (Abb. 1 und 2). Das Grundstück liegt in der Gemarkung Eiterfeld, Flur 1, Flurstück 15/0 im sog. Zapfgraben. Die Koordinaten lauten 50° 45' 24" N; 9° 46' 36" E; R 35 54 83, H 56 24 86.

Der Steinbruch ist derzeit nicht mehr erkennbar, da er im Laufe der Jahre verfüllt und das Areal dem Wiesengelände angepasst worden ist. So liegen etwa zwei Meter unter der heutigen Geländeoberkante auf der Sohle des ehemaligen Bruches zwei ausgedehnte Schichtflächen mit den nachfolgend dokumentierten Fährten.



Da das Vorkommen von Eiterfeld stratigraphisch in den Thüringischen Chirotheriensandstein eingeordnet wird, soll an dieser Stelle ein thematisch auf Fährten orientierter Überblick zur Solling-Folge des Buntsandsteins den paläontologischen Beschreibungen vorangestellt werden.

2.2 Geologischer Rahmen

Nach der Lage des Germanischen Beckens bzw. der Buntsandsteinsenke am Rand der Tethys und nördlich der inner-tropischen Konvergenzzone kann man für den Raum ein arides Klima annehmen, dessen jahreszeitlicher Wechsel durch extrem trockene und extrem niederschlagsreiche Abschnitte gekennzeichnet war (PARRISH 1993, 1999). Das Becken war weithin von Erosionsgebieten umgeben, die den Sedimenteintrag lieferten. Der Sedimenteintrag in das Becken erfolgte von Massiven, wie der Böhmisches, Vindelizischen und Rheinischen Masse sowie vom London-Brabanter-Massiv (LEPPER & RÖHLING 1998).

Durch die faziellen Gegebenheiten sind triassische Redbeds sehr fossilarm, weshalb die Gliederung des Buntsandsteins nach lithologischen, zyklischen und petrographisch orientierten Aspekten erfolgte. Das heutige Gliederungskonzept stammt von BOIGK (1952, 1956, 1959). Die lithostratigraphische Unterteilung des Buntsandsteins basiert auf der fining-upward Zyklizität der einzelnen Folgen, das heißt, sie bestehen an der Basis meist aus relativ groben, fluviatilen, zum Teil auch äolischen Sandsteinen, gehen in Tonstein-Sandstein-Wechselfolgen des Playa-Systems über und bestehen im höheren Teil aus Ton- oder Schluffsteinen. Im zyklischen Ablauf treten mehrfach Wiederholungen ähnlicher Faziestypen auf (PUFF 2000).

Abb. 1. Position des Fährtenvorkommens an der L3380 zwischen Eiterfeld und Körnbach (Landkreis Fulda, Osthessen), nicht maßstäbliche Lageskizze mit Wegenetz.



Abb. 2. Die Landschaft bei Eiterfeld im Juli 2005, Blick vom Parkplatz am Fährtenvorkommen (rechts) in Richtung Eiterfeld, der ehemalige Steinbruch ist nur durch eine geringfügige Senke auf der Wiese angedeutet. Im Hintergrund Basalkuppen, das „Hessische Kegelspiel“ (Foto: D. Krause).

2.3 Buntsandstein und Solling-Folge

Die von BOIGK (1956, 1959) initiierte sohlbankzyklische Gliederung des Buntsandsteins regte zu einer neuen Betrachtungsweise für die Abgrenzung Mittlerer/Oberer Buntsandstein und die Zuordnung des Thüringischen Chirotheriensandsteins an. Den anschließenden Überlegungen von BACKHAUS (1960) und KRÄMER (1961) folgend ordnete auch der Unterausschuss Buntsandsteinstratigraphie der Geologischen Landesämter (LAEMMLEN 1963, 1966) die Solling-Folge dem Oberen Buntsandstein zu. Aus kartiertechnischen Gründen nahm der Arbeitsausschuss der Geologischen Bundes- und der Landesdienststellen (RICHTER-BERNBURG 1974) dies wieder zurück, obwohl TRUSHEIM (1961) und WOLBURG (1962) durch den Nachweis der Schichtlücke unterhalb der Solling-Folge, die H-Diskordanz (TRUSHEIM 1961), ein genetisch wichtiges Argument für die Zusammenfassung von Solling- und Röt-Folge als Oberer Buntsandstein formuliert hatten (BACKHAUS 1994).

In Ansätzen wurde dann von AIGNER & BACHMANN (1992) die Sequenzstratigraphie auf die Gliederung des Buntsandsteins angewandt. Sie interpretieren die Basis der Solling-Folge als Sequenzgrenze. Die Hardegsen-Folge repräsentiert den Hochstandsystemzug der liegenden Sequenz. Der untere Abschnitt der Solling-Folge, Basissandstein und Tonige Zwischenschichten werden als nächste Sequenz angesehen. Eine weitere Sequenz beginnt mit dem Thüringischen Chirotheriensandstein (i.e.S.) und umfasst den Hauptteil des Röts (LANG 2001).

Die lithostratigraphische Gliederung der Solling-Folge in Hessen in Wilhelmshausen-, Trendelburg-, Karlshafen- und Stammenschichten wird zu den Randgebieten des Sedimentationsbeckens hin undeutlicher, so dass die Karlshafen- und Trendelburg-Schichten zusammengefasst werden. Die Korrelation der

Solling-Folge des hessisch-südniedersächsischen Raumes mit der in Thüringen (Tab. 1) kann nach LANG (2001) nicht im Detail als gesichert angesehen werden. Nach HOPPE (1976) entsprechen die Stammenschichten dem Thüringischen Chirotheriensandstein und den Tonigen Grenzschichten in Thüringen. Auch die basale Abgrenzung der Solling-Folge ist oft nicht eindeutig. Dasselbe gilt für die lithofazielle Dreiteilung in Solling-Basissandstein, Tonige Zwischenschichten und Thüringischen Chirotheriensandstein (LANG 2001).

Die Grenze Olenekium/Anisium (= Grenze Unter-/Mittel-Trias) wird an die Basis der Stammenschichten bzw. des Thüringischen Chirotheriensandsteins gelegt. Nach Studien an Conchostraken liegt der Beginn des Anisium in den Stammenschichten. Denn in diesem Horizont erscheint bereits die Conchostrakenfauna des unteren und mittleren Röt (BACHMANN & KOZUR 2004).

Den grobklastischen Beginn der Solling-Folge, bildet der **Solling-Basissandstein**. Er ist meist grobsandig und führt oft feinkiesige Lagen. Es handelt sich um graue, häufig bräunlich- oder violettstichige, dickbankige schräg geschichtete Sandsteine. Die Mächtigkeit dieser Sandsteine variiert, da diese lokalen Rinnenfüllungen ein Paläorelief ausgleichen. So bildet diese Entwicklung eine Art Übergang zwischen Hardegsen- und Solling-Folge. In Rand- und Schwellenlagen ist vielfach ein Auskeilen zu verzeichnen (HAUBOLD & PUFF 1976) (Tab. 1).

Im Hangenden folgen die **Tonigen Zwischenschichten** mit rotbraun, hellgrau und violett getönten Sandsteinen in Wechsellagerung mit roten oder graugrünen Ton- bis Schluffsteinen, die *Corophioides* oder Conchostraken sowie Pflanzenreste führen können. Mitunter liegen Expositionsphasen in den violett gefärbten Zonen vor. Diese Leithorizonte gehen

auf Bodenbildungsprozesse zurück. Die Tonigen Zwischenschichten bilden nach ihrer Ausbildung den Abschluss des unteren sedimentären Zyklus innerhalb der Solling-Folge. Darüber folgt der **Thüringische Chirotheriensandstein**, in den auch das Eiterfelder Fährtenvorkommen einzuordnen ist.

In diesem oberen Teil der Solling-Folge kommen fluviatile Sedimente und die Fazies salinärer Sand-Ton-Ebenen nebeneinander vor. Es handelt sich um Ablagerungen unter niedrig-energetischem, wellenbeeinflusstem, vielleicht karbonatreichem Flachwassermilieu im Übergang zwischen den fluviatil geprägten Sandebenen zum Playa-See. Als eine den Playa-See umrandende Einheit griff der Thüringische Chirotheriensandstein bis auf die Eichsfeld-Altmark-Schwelle über; seine wellen- und flussdominierte Sandebene migrierte mit fortschreitender Transgression (BINDIG 1991). Die relativ hohe und konstante Mächtigkeit und weite laterale Ausdehnung ist bezeichnend für das Abklingen epirogenetischer Bewegungen bzw. für ein stark eingeebnetes Relief. Das war die Voraussetzung für das weite Übergreifen einer sedimentären Situation für Tetrapodenfährten wie *Chirotherium*. Es lag offenbar eine günstige Konstellation für die Bildung der Sedimente sowie ein Anreiz für Tetrapoden, in diese Bereiche vorzudringen und sie zu durchqueren, vor. Die **Fazies der Fährten sandsteine**, wie sie bereits KRÄMER & KUNZ (1968, 1969, vgl. auch HAUBOLD 1971a, HAUBOLD & PUFF 1976) treffend analysiert und genetisch interpretiert haben, breitete sich in der letzten Phase der Solling-Folge über Schwellen und weite Teile der Umrandungen von Hochgebieten aus und blieb dort auch in der Folgezeit im Liegenden der Röt-Transgression erhalten.

Die eigentlichen Fährten führenden Teile des Thüringischen Chirotheriensandsteins in feinkörniger Ausbildung und überwiegend grauer Färbung bezeichnet man auch als **Chiro-**

therienplatten. Diese bilden zusammen mit ihren lateralen Äquivalenten im Beckeninneren, den playa-artigen **Tonigen Grenzschieben** (BACKHAUS 1994), den Top der Solling-Folge. In diesem Kontext darf man sich die Chirotherienplatten als transgressiv wandernde Faziesgürtel vorstellen. So ist dann auch in diesem Schichtglied der Übergang von terrestrisch-fluviatilen zu salinar-aquatischen Bedingungen des Röts nachzuvollziehen. Nach LANG (2001) erfolgt in der Bildung der fein-klastischen Grenzschiebe dann der Übergang zur Evaporitbildung in einem wieder etwas tieferen hypersalinaren Wasserkörper.

2.4 Die Solling-Folge im Raum Eiterfeld

Im Raum Eiterfeld sind die Schichten der Solling-Folge überwiegend psammitisch entwickelt und erreichen je nach Autor bis zu 50 m Mächtigkeit. Paläogeographisch liegt der Bereich am NW-Rand der Rhön-Schwelle (Abb. 3). Auf Blatt Eiterfeld (MOTZKA & LAEMMLEN 1967) sowie auf den Blättern Queck (LAEMMLEN 1963) und Schlitz (KUPFAHL 1961, 1965) gliedert man die Solling-Folge in drei Teile, an deren Basis jeweils eine Geröllführung vorhanden ist.

Die Mächtigkeit des **basalen Geröllhorizontes** schwankt, da die Sedimentschüttung als eine Dellenausfüllung angesehen werden kann, die nach der Erosion auf der Landoberfläche am Ende der Hardegsen-Formation, der sog. H-Diskordanz, sedimentiert wurde. Darüber folgen hellrote und rotviolette, fein- und grobkörnige Sandsteine. Typisch für sie ist eine ungleichmäßige Kornsortierung, reicher Feldspatanteil, schwarzer Kluftbelag und gelbe Flecken. Ein **zweiter Geröllhorizont** folgt etwa 18 m über der Basis in zunächst grobklastischer Schüttung mit bis zu 7 cm großen Geröllen. Dies bewirkt eine leichte Geländestufe. Die folgenden Sandsteinbänke sind stark schräg geschichtet bei Korngrößen um 0,5–1 mm. Auf Schichtflächen finden sich größere Gerölle sowie rote und grüne Tongallen. Zum Hangenden werden die Farben gelblichrot und rotviolett. Es überwiegen mittelkörnige Sandsteine in z.T. über 1 m dicker Bankung. Der **dritte Geröllhorizont**, etwa 12–15 m über dem zweiten, bildet die nächste Geländestufe. Die Gerölle sind kleiner und bestehen überwiegend aus Quarz. Im Hangenden folgen grau-violette und grau-gelbe Sandsteine mit bis 1 m mächtigen Bänken. Eine rotgrüne, tonige Schluffsteinschicht von 1,5 m Mächtigkeit endet 8–10 m über dem dritten Geröllhorizont an der Basis des Thüringischen Chirotheriensandsteins. Der **Thüringische Chirotheriensandstein** ist 7–8 m mächtig und beginnt mit gelbgrauen, mittel- bis grobkörnigen, dünnplattigen Sandsteinen über einer Glimmer-

Tab. 1. Parallelisierung der Solling-Folge in Thüringen und Hessen (aus HAUBOLD & PUFF 1976).

	Thüringen (Thür. Senke u. Südthür.)	Kassel- Reinhardswald	Hessen Solling
Salinar- Rötfolge	Röttone	Basisgips	Basisgips
Solling-Folge	Chirotherienplatten	Stammen- Schichten	Tonige Grenzschieben
	Schluff- Sandsteinpartien	Karlshafen- Schichten	Karlshafen- Schichten
	Bankiger Sandstein	Trendelburg- Schichten	Trendelburg-Sch. Zone der roten Tone
	Tonige Zwischenschichten (Äquivalente)	Wilhelmshausen- Schichten	Tonige Zwischensch. Zone der grauen Tone
	Solling-Basis sandstein		Wilhelmshausen-Sch.
Hardegsen- Folge	Thüringischer Bausandstein	Violette Grenzzone	Violette Grenzzone

sandsteinlage und geht nach oben in grobsandige Lagen über. Diese sind dickbankiger, graubraun oder gelbweiß gefärbt und schräg geschichtet. Zum Hangenden sind die Sandsteine zunehmend mit Eisenoxid gefleckt, daher auch „Tigersandstein“. Auf vielen Schichtflächen finden sich Rippelmarken, Strömungsrinnen, Steinsalzseudomorphosen, Wurm Spuren und Reptilfährten. Die oberste Schicht der Solling-Folge bildet eine **gelbgraue Sandsteinbank** und enthält ebenfalls Chirotherienfährten. Darüber folgen die Röttone. Soweit die verkürzte Darstellung nach der Kartenerläuterung in Anlehnung an MOTZKA & LAEMMLEN (1967). Die Schüttung der Sandsteine erfolgte aus westlicher oder südwestlicher Richtung. Als Liefergebiet kommen die Rheinischen Masse oder ein Transport entlang der Südgrenze der Rheinischen Masse in Betracht. Am Top der Rhön-Schwelle ist eine Aufarbeitung älteren Materials nicht ausgeschlossen (BACKHAUS 1968).

2.5 Geologie des Fährtenvorkommens

Für den Bereich des ehemaligen Steinbruchs ist die Einordnung in die oberen 7–8 Meter der Solling-Folge gesichert. Das entspricht dem Thüringischen Chirotheriensandstein. Die von Kulick und Motzka im Aufschluss beobachteten Sandsteine sind von grauweißer bis bräunlicher Färbung.

In der Aufnahme der 1,85 m mächtigen Steinbruchwand sind Hinweise auf Fährten in mindestens zwölf Schichtflächen vermerkt (Abb. 4, Anhang 1). Die dokumentierten Fährtenflächen sind davon die beiden untersten, da nur diese nicht

vom Abbau betroffen waren. Nach Kulick's Notizen lagen die beiden Fährtenflächen ca. 8 m unter dem Röt. Nach dieser Angabe wäre das Fährtenvorkommen in den unteren Bereich des Thüringischen Chirotheriensandsteins einzuordnen und würde den Karlshafen-Schichten entsprechen. Diese detaillierte Korrelation bleibt jedoch offen, da die betreffende Sedimentfolge am Rand der Rhön-Schwelle reduziert entwickelt ist.

Der Fährtenabschnitt besteht aus einer (Wechsel-)Folge von im Dezimeter-Bereich gebankter mittel- bis feinkörniger Sandsteine von weiß-grauer Farbe, die von geringmächtigen grünlichen Tonsteinen getrennt werden. Die überwiegend gute Sortierung lässt auf relativ lange Transportwege schließen. Auffallend sind drei 30–40 cm dicke Sandsteinbänke. Die unteren weisen Schrägschichtung auf. Zwischen diesen Bänken befinden sich jeweils zwei geringmächtige horizontal geschichtete Bänke. Deren plattige Absonderung ist durch zwischengelagerte dünne, graue oder graugrüne pelitische Lagen hervorgerufen. Oszillations- und Strömungsrippeln auf den Schichtflächen deuten auf Bildung in einem flachen Wasserkörper hin (Abb 5). Das Profil belegt fortlaufende Sedimentation mit Stillstandsphasen, in denen Tone abgelagert wurden. Die grüngraue Farbe der Tonsteine zeigt reduzierendes Milieu und permanente Wassersättigung an. Ein Trockenfallen der Flächen erfolgte offenbar nicht. Entgegen den Notizen von J. Kulick sind auf dem Fährtenplan und auf Fotos keine Trockenrisse vorhanden. Dafür zeigen einige Fotos verbreitet Spuren von wurmförmigen Invertebraten, was für Wasserbedeckung spricht. Alle Anzeichen, eingeschlossen den Wechsel von geringmächtigen

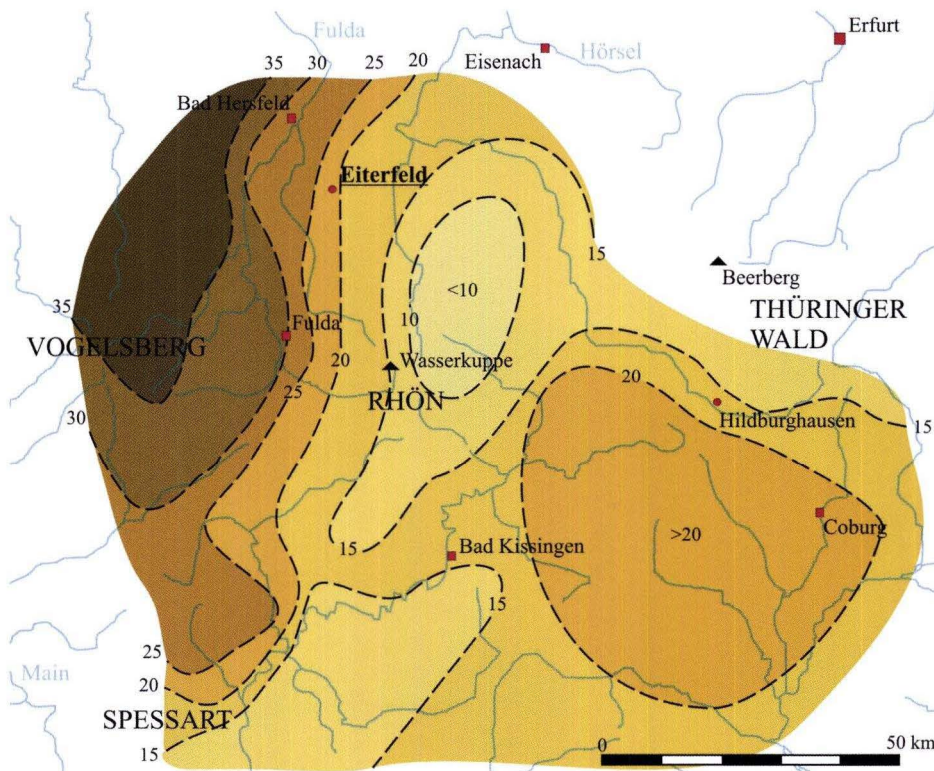


Abb. 3. Darstellung der Mächtigkeiten der Solling-Folge im Bereich der Rhön-Schwelle (Angaben in Meter), nach BACKHAUS (1968). Die Mächtigkeiten zeichnen die Konturen der Rhön-Schwelle nach. Gebiete ohne Daten sind nicht farbig dargestellt. Die Lage der Ortschaften, Gewässer und Landschaftsbezeichnungen entsprechen der heutigen Topographie.

tigen Sandsteinen und Peliten, weisen auf leicht bewegte bis ruhige Bedingungen hin.

Die Flächen standen periodisch bis ständig unter flacher Wasserbedeckung. Während relativer Trockenphasen konnten die Flächen von Tetrapoden überquert werden und in Überschwemmungsphasen wurden infolge positiver Sedimentation deren Eindrücke und Fährten konserviert. Die Schwankungen in der synsedimentären Standfestigkeit bzw. Belastbarkeit der

Flächen einzelner Bänke ist bei Bedarf aktualistisch nachzuvollziehen. Auch ohne solche Untersuchungen ist bei permanent flacher Wasserbedeckung für die sandigen Wechsellagerungen der oberen Solling-Folge bei Eiterfeld und darüber hinaus durchgehend höhere Standfestigkeit anzusetzen. Jedenfalls war die Konsistenz des Substrates in der Regel so hoch, dass Eindrücke größerer *Chirotherien* mit Fußlängen gegen 25 cm in keinem nachweisbaren Falle nennenswert eingesunken sind.

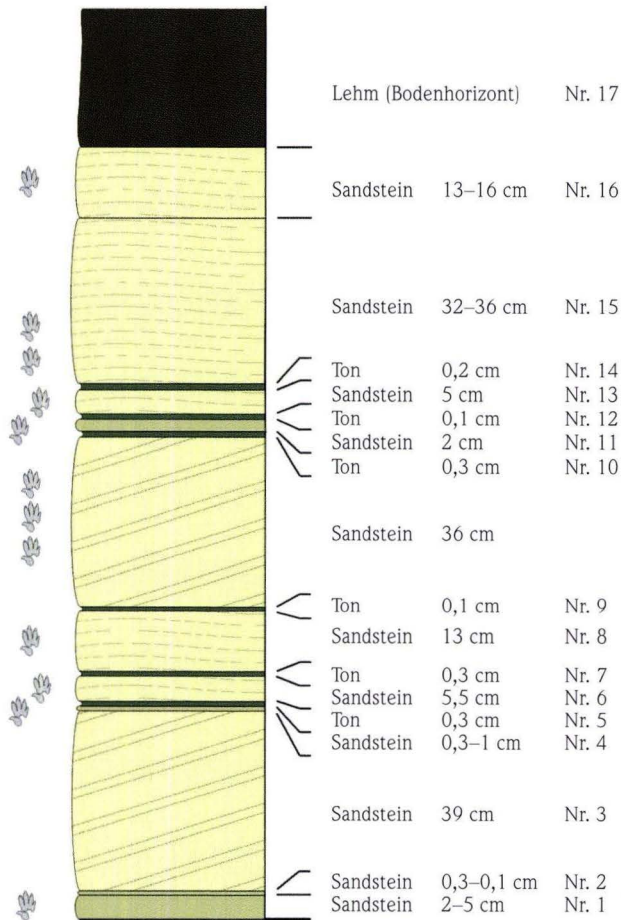


Abb. 4. Graphische Umsetzung der Profildokumentation von J. Kulick. Die untere und obere Fläche entsprechen den Schichtflächen Nr. 1 und 4, vgl. Text sowie Anhang 1.

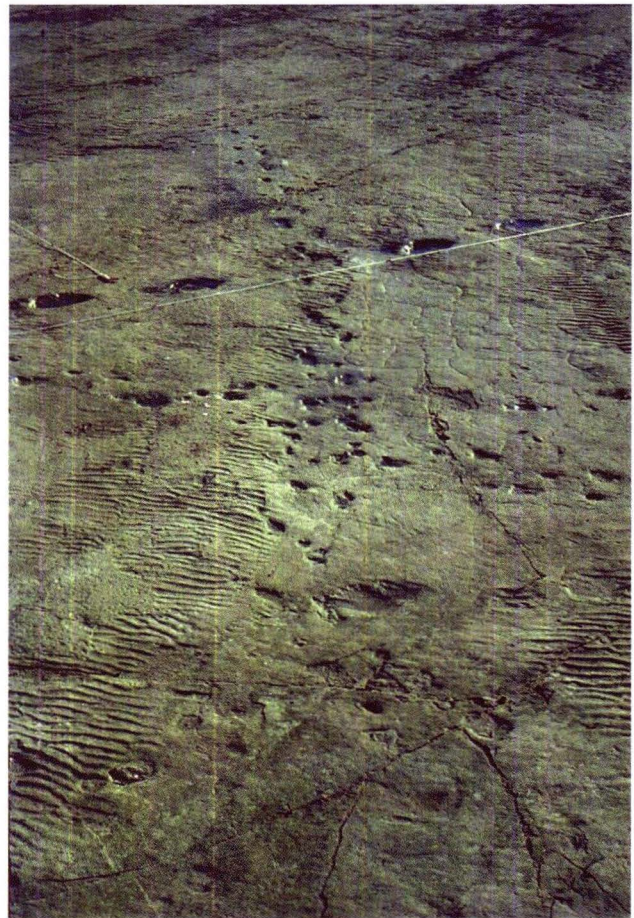


Abb. 5. Rippelmarken und Fährten von *Chirotherium barthii* (u22) und *Chirotherium sickleri* (u20) auf der unteren Fläche (Foto: R. Motzka).

3. Fundgeschichte und Material

3.1 Fundgeschichte

Im Sommer 1963 wurde im Steinbruch der Firma Hartmann bei der Neukartierung der geologischen Karte von Hessen, Bl. 5224 Eiterfeld, von R. Motzka das hier beschriebene Vorkommen entdeckt und unmittelbar darauf gemeinsam mit J. Kulick, beide waren Mitarbeiter des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung, näher erschlossen. Nachdem zunächst Rippelmarken auf der Steinbruchsohle eine erste Auf-

merksamkeit erweckten, folgte die Feststellung von auffälligen Trittsiegeln. Mit Zustimmung des Steinbruchbetreibers wurde noch im Herbst 1963 ein Teil Steinbruchsohle vom Schutt beräumt. Anfang November 1963 wurde dann die obere freigelegte Fläche mit Fährten von R. Motzka und J. Kulick aufgenommen. Die Dokumentation erfolgte unter dem Druck der ständig drohenden Zuschüttung und Einebnung des Stein-

bruchgeländes. Dies verzögerte sich jedoch, so dass die Aufnahme der unteren Fährtenfläche im September 1964 erfolgen konnte (Abb. 6). Neben den geologischen Dokumentationen wurde von verschiedenen Seiten über den weiteren Umgang mit der Entdeckung verhandelt. Eine beabsichtigte Unterschutzstellung und der dazu erforderliche Erwerb des Geländes scheiterten jedoch immer wieder. Parallel dazu wurde der inzwischen aufgegebene Steinbruch zur Ablagerung von Schutt verwendet. Als schließlich 1977 eine unterschriftsreife Übernahme durch den Landkreis und das Land Hessen erfolgen sollte, war das Areal bereits soweit verfüllt, dass man davon Abstand nahm und in der Folgezeit die Einbebnung des Geländes vorgenommen wurde.

Ungeachtet der unklaren Zukunft des Aufschlusses verfolgte J. Kulick den Plan der wissenschaftlichen Bearbeitung der Fährten weiter. Aber die angestrebte Veröffentlichung über die Eiterfelder Fährtenflächen kam nicht voran. Per Korrespondenz wendete sich J. Kulick in den 1970er Jahren an einen der Verfasser (H.H.). Dadurch war anhand von Fotos eine erste Bestimmung möglich. Das Ergebnis wurde J. Kulick mitgeteilt und dieser stimmte zugleich einer Übernahme von Fotos in die zweite Auflage der „Saurierfährten“ (HAUBOLD 1984: 138–139) zu. In der Bildunterschrift wurden die „Fährtenflächen im Thüringischen Chirotheriensandstein bei Eiterfeld als die bedeutendste neuere Entdeckung von Buntsandsteinfährten“ hervorgehoben. Die Zusammensetzung der Ichnofauna repräsentierte nach Auswertung der übersandten Unterlagen mit *Chirotherium barthii*, *Isochirotherium herculis*, *Dicynodontipus geinitzi* und *Chirotherium sickleri* das für die Solling-Folge charakteristische Spektrum. Abgesehen von diversen lokalen Zeitungsnotizen blieb das die einzige Publikation. Im Jahr 2004 konnte dann der originale Fährtenplan aus dem Archiv des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie in Wiesbaden durch Vermittlung von T. Keller für eine Bearbeitung zur Verfügung gestellt werden. Unabhängig davon –

aber doch synchron – erwachte auch in Eiterfeld das Interesse an dem Vorkommen, und am 15. Juli 2004 gelang die Gründung der „Interessengemeinschaft Saurierspuren Eiterfeld e.V.“

Noch im November des Jahres 2004 konnte unter Aufsicht des Hessischen Landesamtes für Denkmalpflege ein Bagger-schurf erfolgen. Dieser legte 2 m unter Flur einen schmalen Streifen der unteren Teilfläche frei (Abb. 7). Das Ergebnis: Die Fläche mit den Eindrücken und Fährten von Chirotherien hat die fast 40jährige Überdeckung offenbar ohne Beeinträchtigung überdauert.

3.2 Das Belegmaterial und der Fährtenplan

Aufgrund der geschilderten Fundumstände sowie der Erhaltungsbedingungen befinden sich die Eindrücke und Fährten auf der Fläche im Aufschluss, und eine Entnahme von Originalen aus dem Verband der Fläche ist im Prinzip nicht erfolgt. Auch die Alternative beim Erhalt fossiler Fährten – die Bergung der Ausgüsse – entfällt. Da die Entdeckung der Fährtenfläche gegen Ende des Abbaus auf der Sohlfläche des Steinbruches erfolgt ist, lagen die hangenden Teile nicht mehr oder bestenfalls nur sehr untergeordnet vor. Solche Stücke, also die Ausgüsse der Eindrücke, sind nur ausnahmsweise vorhanden. Dabei bieten für Vorkommen von Chirotherien gerade die Ausgüsse (die Negativformen) oft die optimale Information.

Wie im Anhang 2 aufgelistet gibt es Belegmaterial von begrenztem Umfang in den Beständen verschiedener Organisationen, beim Hessischen Landesmuseum in Darmstadt (HLMD), beim Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) und in der neuerdings angelegten Sammlung der Interessengemeinschaft Saurierspuren Eiterfeld (IGSE). Alle Exemplare sind kleine Teilstücke mit einzelnen Eindrücken bzw. Ausgüssen (Hypo- bzw. Epireliefs) von Hand- und Fußformen. Die Erhaltung der Eindruckformen ist in allen Fällen im Vergleich zu ähnlichen Vorkommen in der Solling-Folge recht



Abb. 6. Freigelegte Fährtenflächen während der Kartierarbeiten 1964, Ansicht aus Richtung Eiterfeld (Foto: Nachlass J. Kulick).

undeutlich und deswegen die Bestimmbarkeit der Fährten eingeschränkt. Solange die originale Fläche nicht wieder aufgedeckt ist, kommt allen aufbewahrten Originalen und den Gipsabformungen besondere Bedeutung zu. Denn diese sind der substanzielle Beleg. Die umfassende Dokumentation des Vorkommens ist der Fährtenplan.

Noch im Herbst 1963 ist durch den persönlichen Einsatz von R. Motzka die Fläche im Maßstab 1 : 10 auf Millimeterpapier aufgenommen und damit die Entdeckung in vorbildlicher Weise zumindest auf Papier gesichert worden. Der Originalplan (Abb. 8) besteht aus fünf etwa ein Meter breiten und unterschiedlich langen Rollen. Zusammengefügt hat der Plan eine Abmessung von 3,10 m x 1,90 m. Mit den Aufzeichnungen von J. Kulick ist dieser Plan das originäre Dokument vom Zeitpunkt der Entdeckung und der ersten vollständigen Freilegung der Fläche. Schon lange erschien eine umfassendere Dokumentation und Analyse der Eiterfelder Fläche auch im Vergleich zu anderen Vorkommen mit *Chirotherium*-Fährten bedeutsam und wünschenswert und dafür ist der vorliegende Plan auch ohne die Freilegung des Vorkommens geeignet.

Zur Sicherung des fragilen Originalplanes wurde als erster Schritt eine Digitalisierung in Originalgröße (Maßstab 1 : 10) vorgenommen. Dies erlaubt die Nutzung, Bearbeitung, Verteilung, Erschließung und Wiedergabe in elektronischen Systemen für eine Publikation und elektronische Archivierung. Die Digitalisierung der fünf Teile des Planes erfolgte mit einem A0 Scanner, so dass der Plan in Einzelbildern und zusammengefügt vorhanden ist.

Als nächster Schritt erfolgte eine Vektorisierung des Fährtenplanes anhand einer Kopie des Originals; eine automatische Vektorisierung des Originalplanes war durch das Millimeterpapier nicht möglich. Die Kopie konnte jedoch automatisch vektorisiert werden (mit dem Programm Corel Draw), allerdings wurden die Umrisse aller Details manuell nachbearbeitet. Da sich diese aus einer Vielzahl von Einzelkurven zusammensetzen und für eine differenzierte farbige Füllung der Eindrücke die Kurven geschlossen sein müssen. Durch die farbige Darstellung kann man den Verlauf der Fährten nachvollziehen. Viele Umrisse sind im Original offen und dies stellt die meist proximal fehlenden Begrenzungen von Eindrücken dar. Um die betreffenden Fährten originalgetreu wieder zu geben, wurde über die farbigen Eindrücke noch eine zweite Ebene gelegt, in der die Umrisse wie im Original übernommen sind. Eine beliebige Verkleinerung des neuen Planes auf die Formate A0 bis A4 ist durch die prozentuale Reduktion der einmal erstellten Vektorgrafik realisierbar (Abb. 9 und Anhang 5). Um auch diese Möglichkeit zu schaffen, erfolgte eine spezielle Korrektur der Linienstärken, Schriftgrößen und Positionen. Zur Erläuterung für die Nutzung: Es entsprechen Format A0 dem Maßstab 1 : 30, A1 entspricht 1 : 40, A2 entspricht 1 : 60, A3 entspricht 1 : 80 und A4 entspricht 1 : 120.

Für den Fall der erneuten Freilegung bietet der Plan zusammen mit den Darlegungen dieser Publikation eine hilfreiche Orientierung bei der Neuerschließung des Vorkommens und darüber hinaus für den Vergleich zwischen dem Informationsstand im Jahr 1963 und der dann anzutreffenden Situation.



Abb. 7. Baggeraufschluß auf der Wiese am Parkplatz im November 2004: 2 m unter der Wiesenflur ist die Fährtenfläche erreicht (Foto: D. Krause).

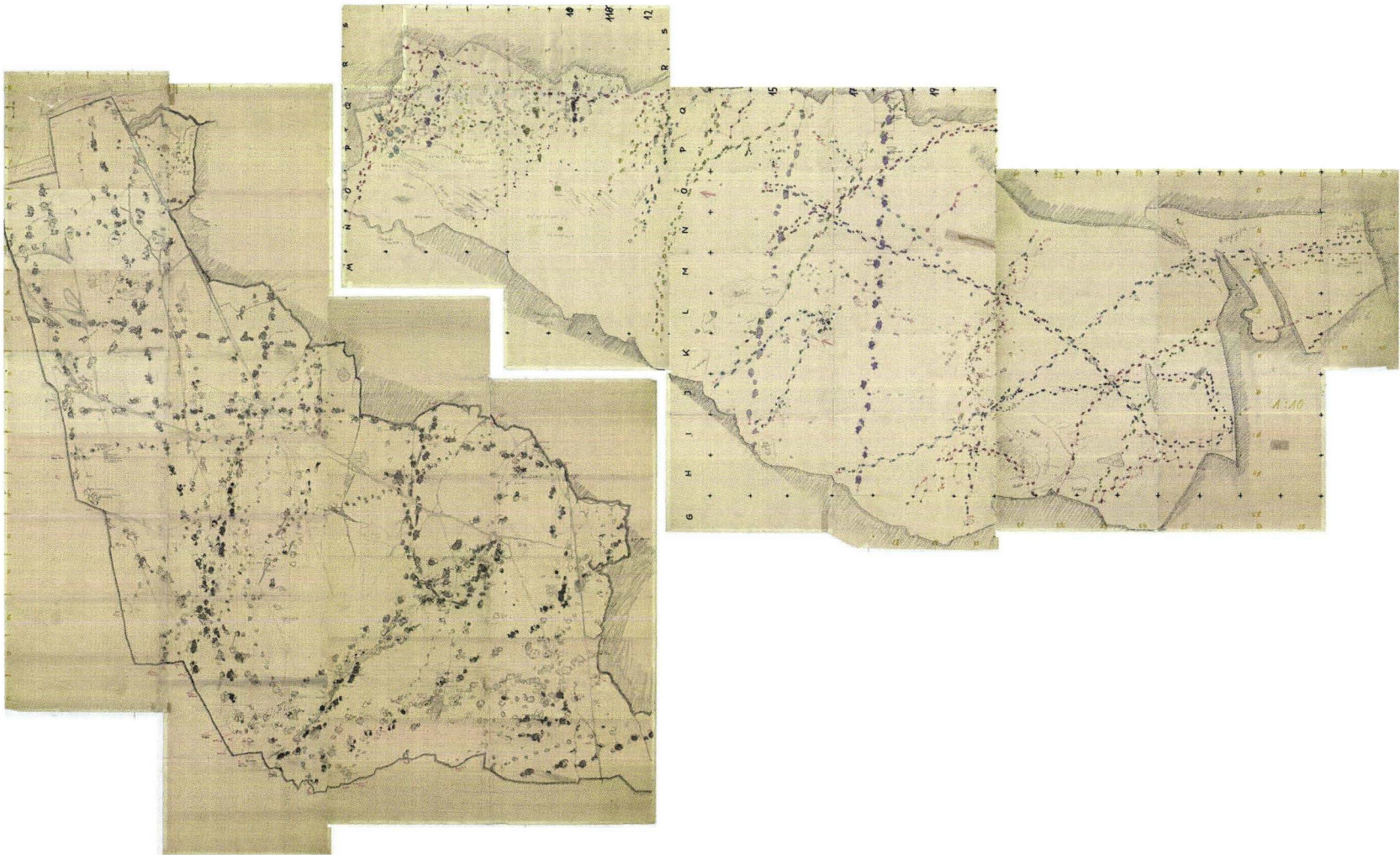


Abb. 8. Reproduktion des originalen Fährtenplanes beider Flächen – aufgenommen von R. Motzka 1963 und 1964, Archiv Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

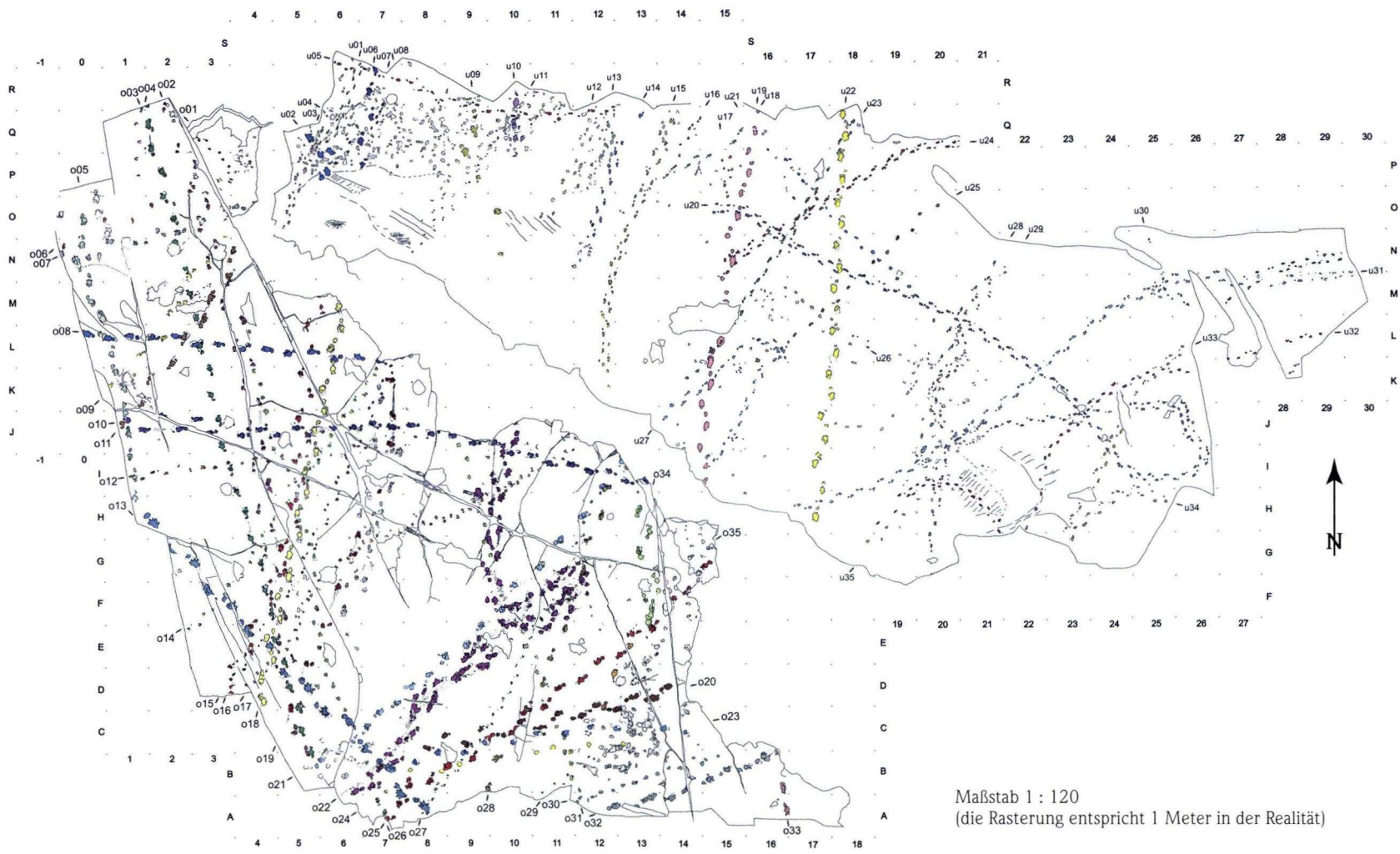


Abb. 9. Vektorisierter Plan der Fährtenflächen von Eiterfeld.

4. Methodik – Studium fossiler Tetrapodenfährten

4.1 Grundlagen zur Analyse der Eiterfelder Fährten

Grundlage der Analyse bildet der Fährtenplan im Maßstab 1 : 10. Auf dem 1,90 m x 3,10 m großen Dokument ist der Verlauf von insgesamt 70 Fährten fixiert. Zu jeder Fährte wurde eine Beschreibung des Fährtenmusters und der Merkmale der Eindrücke angefertigt. Die Terminologie zur Charakterisierung der Fährten und Eindrücke folgt den bewährten Darstellungen (HAUBOLD 1971a, b, 1984 und LEONARDI 1987).

Aus sprachlichen Gründen wird im Text vielfach nur von **Händen** (Hand = manus; m) und **Füßen** (Fuß = pes; p) gesprochen; gemeint sind damit in der Regel Hand- und Fußindrücke.

Die Begriffe proximal (hinten), distal (vorn), lateral (außen) und medial (innen) beziehen sich bei Beschreibungen auf die Position innerhalb der **Fährte**.

Die **Zehen** der Hand- und Fußindrücke werden von medial nach lateral mit den römischen Ziffern I bis V bezeichnet. **Wülste** sind wallartige Sedimentstrukturen, die bei tiefem Einsinken der Hände bzw. Füße infolge Aufpressung des Substrates in der Umrandung der Eindrücke entstanden sind. **Rückschubwälle** sind Aufpressungen des Substrates im Bereich der Hand- oder Fußsohlen der Eindrücke, die durch Abstoßen des Fußes oder der Hand vom Substrat infolge der Fortbewegung entstanden sind.

Die Umrissform der Eindrücke und andere Merkmale der Flächen wurden von den Originalunterlagen auf Transparentpapier übertragen und daran die Vermessungen vorgenommen. So konnten über 16 000 Messwerte für eine metrische Auswertung gewonnen werden. Überdies diente die Kopie auf Transparentpapier als Vorlage für die Vektorisierung des Fährtenplanes (vgl. oben sowie Abb. 8 und 9), so dass diese als Grundlage für alle weiteren Arbeiten geeignet ist und das inzwischen fragile Originaldokument ersetzen kann.

In den älteren Notizen und kurzen Berichten über die Fährtenflächen von Eiterfeld finden sich die Bezeichnungen „Oberplatte“ und „Unterplatte“. Da es sich nicht um Platten, sondern um zwei etwas voneinander separierte Schichtflächen handelt, werden in dieser Abhandlung die Bezeichnungen „obere Fährtenfläche“ und „untere Fährtenfläche“ bzw. Teilfläche verwendet.

Von vorhandenem Belegmaterial (s. auch Anhang 2) wurden in der Sammlung des Hessischen Landesmuseums Darmstadt (HLMD) 25 Abgüsse gesichtet. Die Interessengemeinschaft Saurierspuren Eiterfeld e.V. (IGSE) übernahm vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) 14 Abgüsse und 4 Originale sowie weitere 4 Originale von privater Hand. Eine weitere Abkürzung bezieht sich auf das frühere Hessische Landesamt für Bodenforschung (HLfB → HLUG). Die Abgüsse und Originale wurden zur Dokumentation unter seitlich einfallendem Licht fotografiert.

Auf der oberen und unteren Fährtenfläche konnten jeweils 35 Fährten nachvollzogen werden, so dass mindestens 70 Fährten vorliegen. Nicht enthalten sind darin zahlreiche einzelne Eindrücke, die kein Fährtenmuster erkennen lassen. Auf dem vektorisierten Plan sind diese nicht farbig dargestellt. Auf dem originalen Fährtenplan von J. Kulick und R. Motzka waren die Fährten bereits von 1 bis 65 nummeriert, ohne eine Trennung nach oberer und unterer Fläche. Die Nummerierung erfasst jedoch nicht alle auf dem Plan erkennbaren Fährten. Lediglich in Kulick's Aufzeichnungen sind auch diese Fährten nummeriert vermerkt. Alternativ und zur vollständigen Erfassung auch weiterer Fährten nach Aufdeckung der Fläche ist hier für die Fährten beider Flächen eine neue Nummerierung zugrunde gelegt worden. Diese Zählung bezieht sich auf die Schnittpunkte einer jeden Fährte mit der äußeren Begrenzung der Fläche und folgt dem genordneten Plan von links oben nach rechts unten. Die Fährten sind gezählt von o01 bis o35 und von u01 bis u35; „o“ steht für die obere Fährtenfläche und „u“ für die untere Fährtenfläche (vgl. Anhang 3 und 4).

4.2 Fährtenparameter und Berechnungen

Für die metrische Auswertung einer Fährte sind der Messpunkt an jedem Eindruck und die Mittellinie der Fährte maßgebliche Bezugsgrößen. Der Messpunkt wird konventionell an der Basis des dritten Zehs von Hand- bzw. Fußabdruck angesetzt (Ende des frei beweglichen Teils), das entspricht dem Mittelpunkt des Eindrucks. Die Laufrichtung des Fährtenerezeugers repräsentiert die Mittellinie. Diese wurde von dem Mittelpunkt der Verbindungslinien zwischen jeweils rechtem und linkem Hand- und Fußabdruck abgeleitet. Wobei die Mittelpunkte wiederum die Endpunkte der Strecke bilden, auf deren Hälfte die Verbindungspunkte der Mittellinie liegen (Abb. 10).

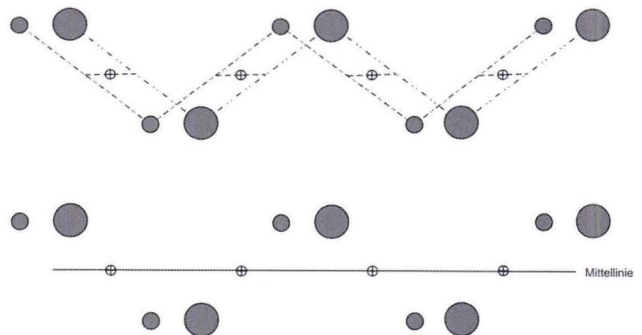
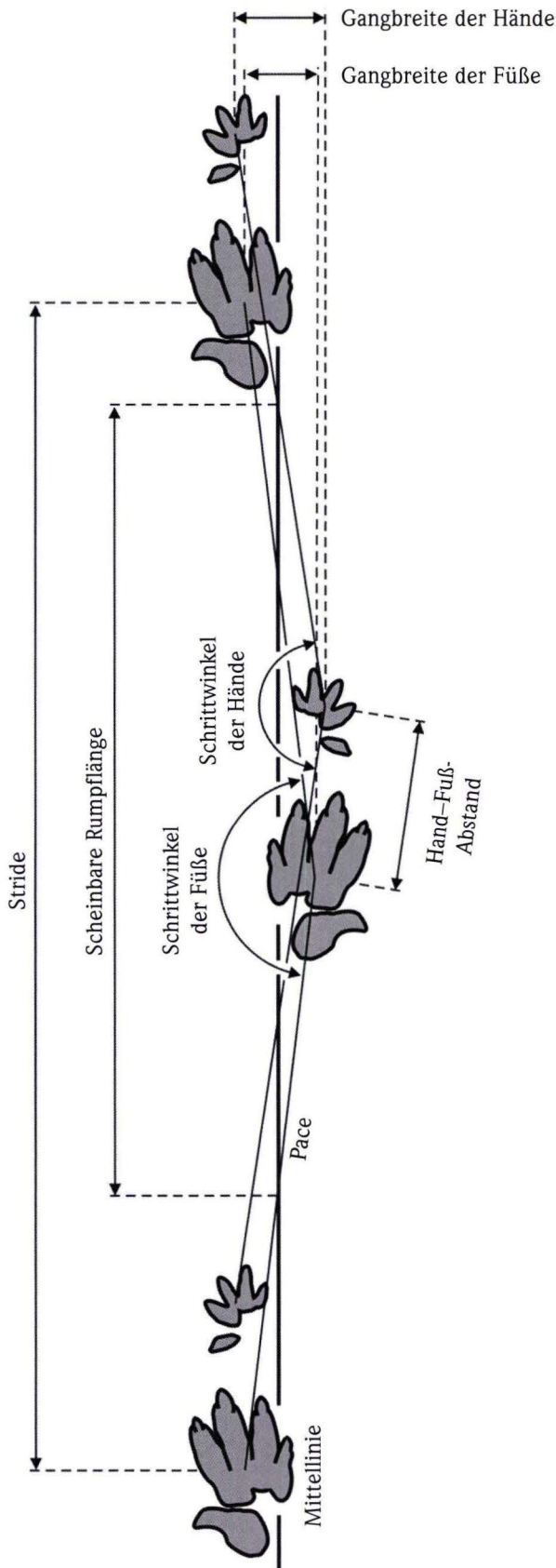


Abb. 10. Schema zur Ermittlung der Mittellinie bei Tetrapodenfährten, Laufrichtung von rechts nach links (nach VOIGT & HAUBOLD 2000).



Die nächste wichtige Einheit betrifft das Schrittmaß. Es wird als Doppelschritt, auch einseitige Schrittlänge, ermittelt und als sog. Stridelänge, auch **Stride**, bezeichnet. Das ist der Abstand vom linken oder rechten Fußeindruck bis zum räumlich vorausgehenden linken oder rechten Fußeindruck. Weniger bedeutsam ist die einfache Schrittlänge, als **Pace** bezeichnet. Das ist die direkte Verbindungslinie von rechtem und linkem Fuß oder rechter und linker Hand (Abb. 11) (HAUBOLD 1971a, b, 1984).

Das **Fährtenmuster** beschreibt die relative Position der einzelnen Eindrücke zueinander im Verlauf einer Fährte (Abb. 12). Aus dem Fährtenmuster lassen sich Hinweise auf die relative Geschwindigkeit und Effektivität des Gangs der Fährtenereuzer ableiten. Das Muster reicht von wechselseitiger Anordnung der Eindrücke bei geringer relativer lokomotorischer Effektivität und Geschwindigkeit über alternierende Anordnung der Eindruckpaare bis zum **Übertreten** der Hand durch den Fuß innerhalb eines Eindruckpaares. Übertreten belegt in der Regel höhere Gangart und Geschwindigkeit. Das Fährtenmuster und vor allem das Übertreten stehen aber auch in Abhängigkeit zur Körperproportion, das Verhältnis der Rumpflänge zur Länge der Extremitäten.

Der **Hand-Fuß-Abstand** bezieht sich auf jeweils ein Hand-Fuß-Paar. Wie beim Fährtenmuster ist eine Beziehung zu Gangart und Geschwindigkeit gegeben. Das gilt auch für Gangbreite und in signifikanter Weise für den Schrittinkel. **Schrittinkel** und Geschwindigkeit sind direkt proportional, je höher die Geschwindigkeit, desto größer die Schrittinkel, fällt die Geschwindigkeit, werden auch die Schrittinkel kleiner. Die Gangbreite verhält sich umgekehrt proportional zum Schrittinkel, wird der Schrittinkel kleiner, erhöht sich die Gangbreite und umgekehrt.

Aus der Anordnung der Eindrücke kann auch auf die Größe des Fährtentieres geschlossen werden. Ein Maß für die **scheinbare Rumpflänge** folgt aus dem Abstand vom Kreuzungspunkt der Mittellinie mit der Verbindungslinie von linkem und rechtem Fuß (Pace), bis zum Kreuzungspunkt der

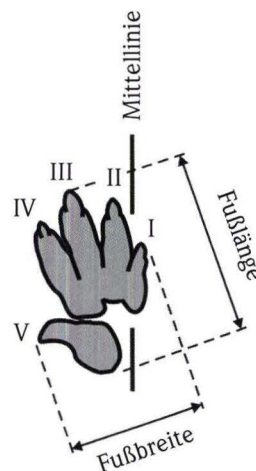


Abb. 11. Eindruck und Fährtenparameter am Beispiel von *Chirotherium barthii* (nach HAUBOLD 1971a).

Mittellinie mit der Verbindungslinie von rechter Hand und der folgenden linken Hand (Abb. 11). Diese Distanz entspricht dem Abstand von Becken- und Schultergelenk (Gleno–Acetabular-Länge) und kommt der tatsächlichen Rumpflänge nahe. Rechnerisch ermittelte Werte sind dagegen meist zu hoch (HAUBOLD 1984, THULBORN 1990). Die Lage und Definition der Eindruck- und Fährtenparameter sind am Beispiel von *Chirotherium barthii* demonstriert (Abb. 11).

Die **Fußlänge (pl)** ist eine weitere zentrale Größe. Im Falle von Tetrapoden der Trias entspricht die vierfache Fußlänge etwa der Beinlänge bzw. der Hüfthöhe (HAUBOLD 1984). Daraus kann man in Kombination mit dem Fährtenmuster, der Stridelänge, und der Fallbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) eine Funktion für die **Geschwindigkeit** ableiten. Die Berechnung der **Laufleistung** geht vor allem auf ALEXANDER (1976, 1977) zurück. Detaillierte Angaben zur Berechnung der Laufleistung sind bei THULBORN (1990) aufgeführt.

Die Berechnung erfolgt nach der ALEXANDER-Formel:

$$v = 0,25 \times \text{Fallbeschleunigung}^{0,5} \times \text{Stride}^{1,67} \times \text{Hüfthöhe}^{-1,17}$$

Da die Stridelänge direkt in der Fährte ablesbar ist, hängt das Ergebnis von der exakten Einschätzung der Hüfthöhe ab. Nach ALEXANDER (1976) resultiert bei einer um 10 % zu hoch

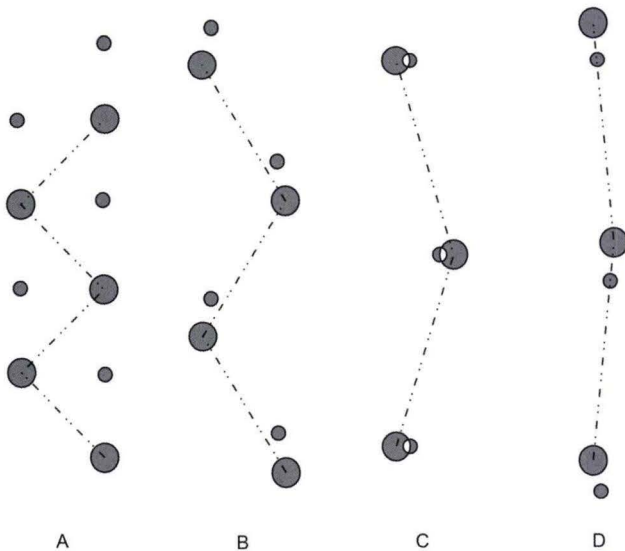


Abb. 12. Grundmuster der Anordnung von Hand- und Fußindrücken bei Tetrapodenfährten. A: Hand- und Fußindrücke liegen wechselseitig gegenüber; B: alternierende Anordnung der Hand-Fuß-Paare; C: Übertreten der Hände durch die Füße – die Fußindrücke liegen auf gleicher Höhe wie die Handindrücke; D: weites Übertreten – der Handeindruck liegt hinter dem dazu gehörigen Fußeindruck (nach HAUBOLD 1971a, 1984).

eingeschätzten Hüfthöhe eine um 11 % zu niedrige Geschwindigkeit. Nach THULBORN (1990) ist diese Formel nur bei langsamer Gangart zuverlässig, so dass zudem die **relative Laufleistung** zu bewerten ist. Sie gibt Auskunft über die Gangart in der sich ein Tier bewegt: Gehen, Traben und Rennen. Zur Berechnung dient das Verhältnis Stridelänge zur Hüfthöhe (S/h) mit dem Ergebnis der **relativen Stridelänge**. Eine etwa gleichwertige Aussage erlaubt das Verhältnis Stride zu Fußlänge (S/pl) (Tab. 2).

Tab. 2. Bewertung der relativen Laufleistung (= Gangart von Tetrapodenfährten nach THULBORN (1982, 1990) und HAUBOLD (1984), vgl. Tab. 3.

Gangart	Stride/Hüfthöhe	Stride/Fußlänge
Gehen	< 2,0	< 8 : 1
Traben	2,0–2,9	8 : 1–11,5 : 1
Rennen	> 2,9	> 11,5 : 1

Da die Länge der Fußindrücke erheblich von der Überlieferung und teilweise auch von der Gangart kontrolliert ist, geht in die Berechnung der Laufleistung bei fossilen Fährten somit die Fußlänge als vergleichsweise problematischer Faktor ein. Nur bei plantigrader Fußhaltung und optimaler Überlieferung werden die Fußproportionen annähernd originalgetreu wiedergegeben. Bei zunehmender Digitigradie und verstärktem Eintreten in das Substrat wird der Fuß in seiner Projektion auf der abgebildeten Fläche verkürzt (KLEIN & HAUBOLD 2003). Die Erhebungen zu Geschwindigkeit und relativer Laufleistung sind unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen zu sehen. Sie sind jedoch maßgebliche Größen für die Bewertung fossiler Fährten, vor allem zur Analyse so umfangreicher Daten, wie sie für die Fläche bei Eiterfeld nach dem Fährtenplan ermittelt werden können.

Da der Fährtenplan im Maßstab 1 : 10 vorliegt, ist für die Messwerte und die darauf bezogenen Berechnungen eine Fehlergrenze von etwa 10 % zu berücksichtigen. Bei statistischen bzw. Durchschnittswerten verringert sich die Fehlergrenze sogar geringfügig. Die Auswertung der Fährtenmaße wurde mit Excel-Tabellenkalkulationen durchgeführt, zu jeder Fährte ist eine Tabelle erstellt und die Werte und errechneten Verhältnisse danach in Diagrammen dargestellt worden. Ein Beispiel dafür bietet die längere Fährte o21 eines *Chirotherium barthii* (Abb. 13).

5. Systematische Paläontologie

5.1 Bestimmung und Ichnotaxonomie

Ein Ichnogenus und eine Ichnospecies wird an Hand einer Auswahl von Kriterien, der sog. Ichnotaxobasis diagnostiziert und bestimmt. Die allgemeinen Prinzipien der Ichnotaxonomie sind den Gegebenheiten der Bestimmung und Interpretation von Tetrapodenfährten anzupassen. Das bedeutet, die Ausbildung von Hand- und Fußeindrücken, sowie das Fährtenmuster gelten als die zentralen Merkmalskomplexe. Ergänzend und von nachrangiger Bedeutung sind Accessoires an Eindrücken und im Verlauf der Fährte wie Schleifspuren der Zehen und des Schwanzes. Entscheidend für eine angemessene Bestimmung fossiler Tetrapodenfährten und die resultierende Ichnotaxonomie ist zudem die Beachtung der extramorphologischen Phänomene (PEABODY 1948, HAUBOLD 1996). Das meint, nur solche Merkmale sind relevant für eine Bestimmung, welche anatomisch kontrollierte Details reflektieren. Sedimentologische und gangbedingte Veränderungen und Variationen sind dagegen als extramorphologische Einflüsse als Kriterien für die Bestimmung auszugrenzen.

Wenn man diese Prinzipien auf Chirotherien der Trias anwendet, sind die Morphologie einer Eindruckform und das Fährtenmuster nicht nur von Parametern wie der Anatomie und Größe des Erzeugers, sondern auch von der Gangart, der Geschwindigkeit und von der Beschaffenheit des Substrates, also dessen Korngröße und Feuchtigkeitsgehalt abhängig (KLEIN & HAUBOLD 2003). Die genannten Faktoren kontrollieren in differenzierter Weise die Morphologie der überlieferten

Eindrücke und das Fährtenmuster. Zur Identifikation der Fährten und Eindrücke gilt es deshalb charakteristische Merkmale herauszufiltern.

Taxonomisch relevante Parameter der Eindruckmorphologie von Hand- und Fußeindruck sind:

- Länge und Breite sowie die Relation dieser Maße,
- die Ausbildung und Zahl der Zehen sowie ihre Relation und Position zueinander, Zehnwinkel, Krümmungen, die Beschaffenheit von Zehenpolstern bis hin zu Klauen,
- die Ausbildung der Sohle nach Position, Umfang, morphologischen Details.

5.2 Die Ichnotaxa

Da auf dem Fährtenplan nur Umrisszeichnungen der Eindrücke vorliegen, bilden diese und das jeweilige Fährtenmuster die Basis der Bestimmung. Auf Grund der allgemeinen Undeutlichkeit der Eindrücke haben die Fährtenparameter ein besonderes Gewicht.

Folgende Ichnotaxa lassen sich auf der Eiterfelder Fläche bestimmen:

Chirotherium barthii KAUP 1835

Chirotherium sickleri KAUP 1835

Brachychirotherium BEURLIN 1950, cf. *Brachychirotherium* sp.

Isochirotherium HAUBOLD 1971, cf. *I. herculis* (EGERTON 1839)

Dicynodontipus RÜHLE VON LILIENSTERN 1944, cf. *D. geinitzi* (HORNSTEIN 1876)

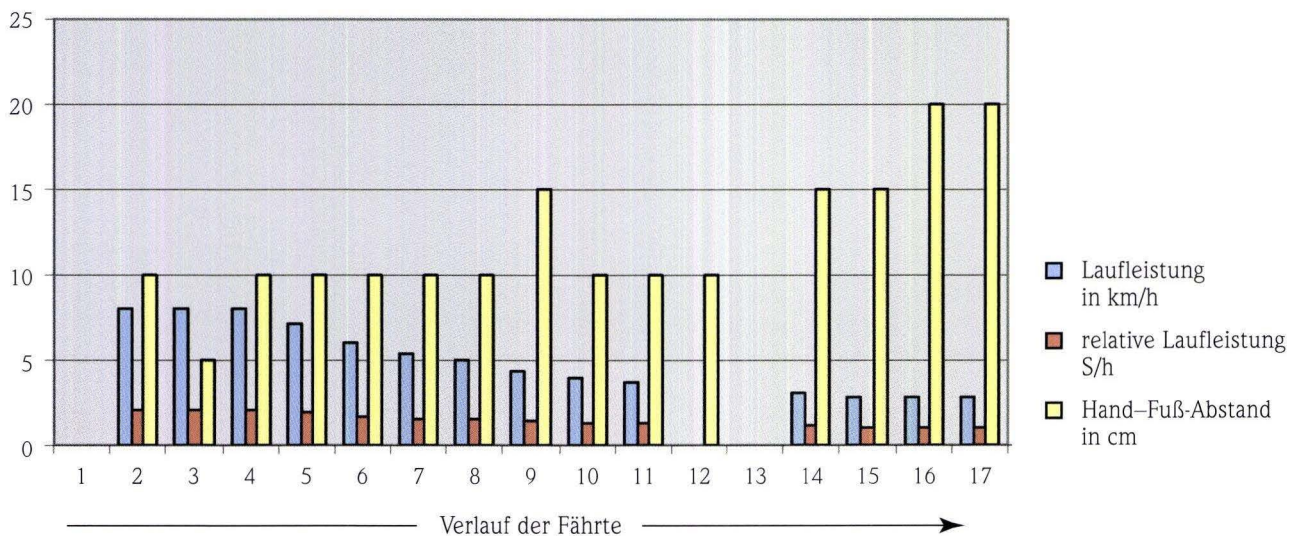


Abb. 13. Analyse der rund 10 m langen Fährte Nr. 021 – *Chirotherium barthii*. Das Diagramm stellt das Verhältnis des Hand-Fuß-Abstandes zur Laufleistung dar. Im Verlauf der Fährte kann man eine Verringerung der Geschwindigkeit und die damit verbundene Vergrößerung des Hand-Fuß-Abstandes erkennen (dazu auch Anhang 3 und 4 unter Fährte 021).

Seit der ersten Entdeckung und Beschreibung von Tetrapodenfährten im Thüringischen Chirotheriensandstein bei Hildburghausen (SICKLER 1834, KAUP 1835, vgl. HAUBOLD 2006) gibt es vielfältige Studien zu äquivalenten Vorkommen in der Solling-Folge, im Buntsandstein der Germanischen Trias sowie darüber hinaus. Zu den in Eiterfeld identifizierten Formen folgen in diesem Kapitel maßgebliche Kriterien für die Charakterisierung in Anlehnung an ausgewählte aktuellere systematische und beschreibende Publikationen über Befunde vorrangig aus der Solling-Folge (HAUBOLD 1966, 1967, 1971a, b, 1984; HAUBOLD & KLEIN 2002; KARL & HAUBOLD 1998; KLEIN & HAUBOLD 2003, 2004, 2007). Nach den vorliegenden Unterlagen lassen sich die auf anderen Flächen dokumentierten Merkmale an den Fährten und Eindrücken der Eiterfelder Fläche nur bedingt nachvollziehen. Das kann stellvertretend die Gegenüberstellung der Eindruckformen auf den Abb. 14 und 15 veranschaulichen. Das Gleiche wird wegen der beschriebenen sedimentologischen Gegebenheiten auch für die freigelegten Objekte gelten. In Anbetracht dieser Problematik bedarf die Einbindung der Eiterfelder Formen in den Kontext der Ichnofauna der Solling-Folge einer umfassenden Begründung in der nachstehenden formalen systematischen Abhandlung.

5.2.1 *Dicynodontipus*

Dicynodontipus RÜHLE VON LILIENSTERN 1944

Dicynodontipus geinitzi (HORNSTEIN 1876)

Diese Fährtenform hat erstmals HORNSTEIN (1876, 1902) als *Chelichnus geinitzi* von Karlshafen an der Weser aus der Solling-Folge beschrieben. RÜHLE VON LILIENSTERN (1944) beschrieb *Dicynodontipus hildburghausensis* aus dem Thüringischen Chirotheriensandstein bei Hildburghausen, und bei der Untersuchung gleicher Fährten von Harras bei Hildburghausen wurde deutlich (HAUBOLD 1966), dass all diese Formen unter

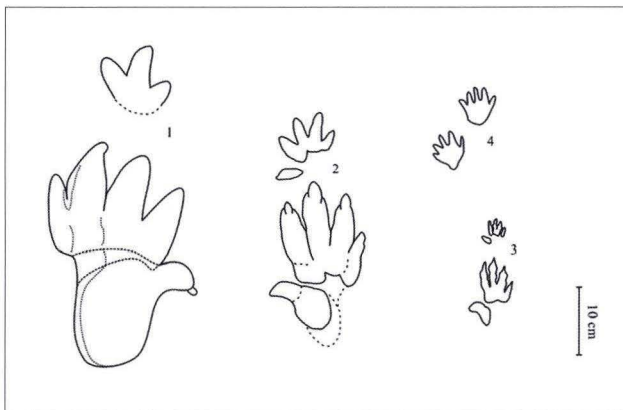


Abb. 14. Prinzipielle Eindruckmorphologie der Hand-Fuß-Paare der bei Eiterfeld bestimmten Ichnotaxa nach ausgewählten Beispielen in anderen Vorkommen der Solling-Folge. 1 *Isochirotherium herculis*; 2 *Chirotherium barthii*; 3 *Chirotherium sickleri*; 4 *Dicynodontipus geinitzi* (alle nach HAUBOLD 1971a).

Dicynodontipus geinitzi (HORNSTEIN 1876) zusammenzufassen sind. Umfangreiches und repräsentatives Material der Fährten von Karlshafen befindet sich im Naturkundemuseum Kassel.

Beschreibung:

Pes: Pentadactyler plantigrader Eindruck, dessen Sohle 2/3 umfasst und von der fünf kurze, vorwärts weisende Zehen ausgehen. Die Achsen der Zehen I–V divergieren 50°. Die Länge der Zehen nimmt von I nach II zu, III und IV sind gleich lang. Die ersten vier Zehen entspringen auf einer Linie der Sohle. Zeh V liegt lateral etwas zurück und ist mitunter nicht eingedrückt. In flachen Eindrücken treten am Vorderrand der Sohle die distal gewölbten Polster der Metatarsalphalangen-Verbindung heraus, da die proximalen Phalangen auf festerem Untergrund kaum noch dem Boden auflagen, erscheinen die Eindrücke der Zehenspitzen gelegentlich mit Spuren von scharfen Klauen isoliert vor dem Sohleneindruck.

Manus: Die Handeindrücke gleichen denen der Füße, von denen man sie durch geringere Größe und die nach innen gerichtete Hauptachse (Zeh III) zur Mittellinie + 18° bis + 32° unterscheiden kann.

Fährte: Relativ schmale quadrupede Fährten; Schrittwinkel bei normalem Gang nicht unter 100°; die Handeindrücke können bei schnellem Gang weit von den Füßen übertreten werden, nur bei langsamem Gang liegen die Hände kurz vor den Füßen; danach waren Schwankungen in der Laufgeschwindigkeit möglich; Gangbreite 60–100 mm (HAUBOLD 1971a, b, 1966).

Anwendung auf die Eiterfelder Fährten: Für die Identifizierung von *Dicynodontipus* sind im Falle Eiterfeld der Umriss der Eindrücke und das Fährtenmuster ausschlaggebend. Nur diese Fährten zeigen variables Übertreten der Hände durch

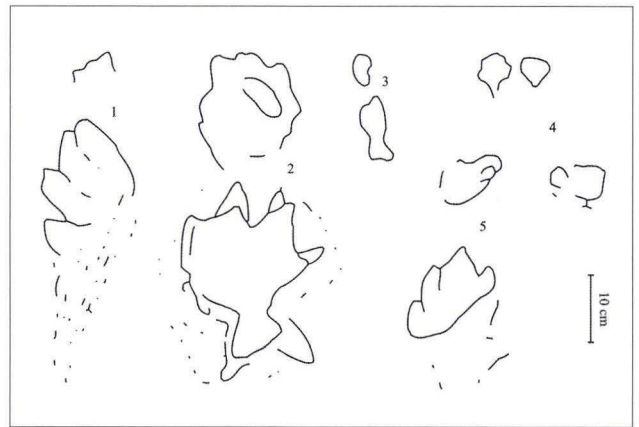


Abb. 15. Beispielskizzen der Eindruckmorphologie von Hand-Fuß-Paaren auf der Fährtenfläche bei Eiterfeld: 1 cf. *Brachychirotherium* sp.; 2 *Isochirotherium*, cf. *I. herculis*; 3 *Chirotherium sickleri*; 4 *Dicynodontipus* sp. (2 Hand-Fuß-Paare); 5 *Chirotherium barthii*. Im Vergleich zu den auf Abb. 13 dargestellten optimalen Eindruckformen wird die extramorphologisch beeinträchtigte Überlieferung deutlich. Die Bestimmung der Formen ist damit nur bedingt und anhand der Information im Verlauf der längeren Fährten begründet.

die Füße. Ein weiterer Anhaltspunkt ist die Form der Hände und Füße. Alle Eindrücke sind etwa so lang wie breit, bei rundem bis ovalem Umriss, dabei sind die Hände etwas kleiner als die Füße. Obwohl eine Zuordnung der Fährten Nr. o14, o15, o17 und u11 (vgl. Anhang 3) zu *D. geinitzi* sehr wahrscheinlich ist, werden sie hier als *Dicynodontipus* sp. angesprochen, da nähere Merkmale kaum zu erkennen sind.

Zur Deutung: *Dicynodontipus* kann man der Gruppe der Therapsiden (sog. säugetierähnliche Reptilien) zuordnen. Das folgt aus der Morphologie der Eindrücke, deren Sohle eine fersenähnliche Bildung am Hinterrand, und eine nur geringe Separation zum Metatarsalbereich erkennen lässt. Die Eindrücke der Zehen lassen funktionell auf die für Therapsiden bezeichnende Phalangenformel 23333 schließen. Ein weiterer Anhaltspunkt liegt in dem Fährtenmuster, so dass man die Deutung auf Cynodontier eingrenzen kann. Da vergleichbare Skelette in der Germanischen Trias Mittel- und Westeuropas nur aus den jüngeren Abschnitten bekannt sind, kommt den betreffenden Fährten aus der frühen Trias in diesem Raum Bedeutung zu (HAUBOLD 1971b).

5.2.2 *Chirotherium*

Chirotherium KAUP 1835 gilt gleichsam als Begriff für Tetrapodenfährten im Buntsandstein und sogar der Trias allgemein. Dabei ist dieser Typ mit den Arten *C. barthii* KAUP 1835 und *C. sickleri* KAUP 1835 durch die Entdeckung bei Hildburghausen zunächst auf Thüringischen Chirotheriensandstein fokussiert gewesen. Und auch nach heutiger Kenntnis ist die Verbreitung beider Arten offenbar auf Schichten vergleichbaren Alters beschränkt, auf die Solling- und die hangende Röt-Folge sowie deren Äquivalente nahezu weltweit. Den wichtigsten Nachweis dazu repräsentieren die Vorkommen in der Moenkopi-Formation von Arizona (PEABODY 1948). Beide Arten sind somit obligatorisch für Eiterfeld und auf sie entfällt die überwiegende Mehrzahl der bestimmbareren Fährten (vgl. Anhang 3).

Kennzeichen für *Chirotherium*: Fußzeh III am längsten, Zeh IV länger als II, bei großen Arten kürzer, Fußzeh V etwas lateral hinter der Zehengruppe I–IV; Hand- zu Fußfläche bei vollständiger Überlieferung der Eindrücke wie 1 : 2–1 : 3,5. Schrittwinkel meist 160°–170° (HAUBOLD 1971a).

Zur Beschreibung von *Chirotherium barthii* (Abb. 11, Abb. 14-2, Abb. 25)

Pes: Die Zehengruppe I–IV ist geschlossen, länger als breit und unter einem Winkel von 30°–40° gespreizt. Die Zehengruppe II, III, IV ist basal vereinigt, Zeh I ist etwas abgesondert, kurz und schlank. Zeh III ist am längsten, II und IV sind etwa gleich lang. Die Metatarsalregion der ersten vier Zehen ist gewölbt und schmal, der Eindruck des V. Zehs ist von den anderen isoliert, lateral gekrümmt und fällt durch sein breites rundes Basalpolster auf. Die Endphalange V ist durch Ein-

schnürungen gegen das basale Polster abgesetzt. In ihrem Erscheinungsbild kann die V. Endphalange variabel sein, längs- bis queroval oder rückwärts zugespitzt. An keinem Eindruck war bisher am V. Zeh eine Klaue zu beobachten. Die anderen Zehen tragen sichtbar Klauen.

Manus: Alle Zehen sind relativ kurz, II und III davon am größten, da am stärksten belastet. Zehen I und V können ggf. im Eindruck fehlen. Zeh V ist stets schmal und von den anderen isoliert. Der Zehenwinkel I–V beträgt über 100°. Die Metatarsalregion weist im Eindruck proximal eine Einschnürung an der Basis von Zeh III auf.

Fährte: Wichtige Merkmale sind der hohe Schrittwinkel, oft über 170°, und die entsprechend geringe Gangbreite (sog. schnürender Gang) und das bei relativ kurzer Stridelänge, Stride : Fußlänge um 5:1. Ein wichtiger Unterschied zu *C. sickleri* besteht in der Richtung der Hand- und Fußachsen (Zeh III). Die Hand wird stärker gegen die Mittellinie geneigt als der Fuß, umgekehrt bei *C. sickleri* (HAUBOLD 1971b, 2006).

Anwendung auf die Eiterfelder Fährten: Bei den *C. barthii*-Eindrücken ist der III. Zeh länger als die Zehen II und IV und der Umriss erscheint symmetrisch im Gegensatz zu *C. sickleri*. Der abgespreizte V. Zeh ist meist eindeutig erkennbar. Viele *C. barthii*-Fährten zeigen schnürenden Gang. Einen bedingt verlässlichen Anhaltspunkt zur Unterscheidung bietet die Größe der Eindrücke; *C. barthii*-Eindrücke sind etwa doppelt so lang wie die von *C. sickleri*.

Zur Beschreibung von *Chirotherium sickleri* (Abb. 14-3, Abb. 25)

Bei *C. sickleri* ist Zeh I im Vergleich zu *C. barthii* noch mehr in den Verband der Zehengruppe I–IV integriert, und Zeh IV ist deutlich länger als II, entsprechend erscheint die Fußzehengruppe II–IV weniger symmetrisch.

Pes: Die Zehengruppe I–IV ist länger als breit. Zeh III wird am längsten, IV länger als II, Zeh I ist viel kürzer, nahezu rudimentär und kann sogar im Eindruck fehlen. Der Zehenwinkel I–IV beträgt 21°–27°. Mitunter lassen sich an Zeh IV drei Zehenpolster und das Metatarsalphalangenpolster erkennen, dazu kommt noch die Klaue. Der schlanke V. Zeh liegt seitlich außen und isoliert von der schmalen Metatarsalregion I–IV, sein Metatarsalphalangenpolster ist nur wenig ausgedehnter als der Phalangenteil. Zeh V erscheint meist flacher eingedrückt als die vorderen Zehen.

Manus: Die Hand ist bei vollständiger Erhaltung etwas länger als breit, bei flachen Eindrücken können die Zehen I und V fehlen. Zeh III ist am längsten. Zeh V ist isoliert und seitlich abgespreizt. Die Zehen II–IV zeigen mitunter drei Zehenpolster und eine Klaue.

Fährte: Da die Hauptlast auf den Fußzehen II–IV liegt, können I und V in den Eindrücken im Verlauf einer Fährte fehlen. Bei stellenweise scheinbar bipedem Gang fehlen die Eindrücke der Hände, diese sind dann aber in der Regel vom Fuß übertreten oder auf dem Substrat nicht überliefert (HAUBOLD 1971b).

Anwendung auf die Eiterfelder Fährten: Bei *C. sickleri* ist der abgespreizte V. Zeh stets charakteristisch, und die Fußindrücke im Vergleich zu *C. barthii* kleiner und weniger symmetrisch. Zudem erscheinen die Eindrücke der Füße stets deutlich länger als breit, und eine asymmetrisch gelegene Spitze markiert den III. Zeh. Die Anordnung der Zehen ist aber nur am äußeren Umriss nachvollziehbar. Die kleinen Handeindrücke beschränken sich auf rundliche Umrisse.

5.2.3 *Brachychirotherium*

Brachychirotherium BEURLÉN 1950 ist als besondere Gruppe bzw. selbständige Gattung zunächst aus dem Keuper beschrieben worden (KARL & HAUBOLD 1998). In der Folgezeit hat man dann verschiedentlich Fährten der tieferen Trias und auch aus der Solling-Folge zu *Brachychirotherium* gestellt: *B. praeparvum* (HAUBOLD 1967), *B. harrasense* (HAUBOLD 1967) und *B. kuhni* DEMATHIEU & HAUBOLD 1982. Diese Formen sind verschieden von *Chirotherium* und *Isochirotherium* aber auch die Interpretation als *Brachychirotherium* ausgehend von dem Typus aus dem Keuper ist nach neueren Studien inzwischen problematisch (KARL & HAUBOLD 1998, KLEIN & HAUBOLD 2003, 2007). Vor einer näheren Abklärung sollte man derartige Formen aus der Solling-Folge aber noch unter diesem Namen führen, da sie durchaus eine separate Gruppe von Chirotherien repräsentieren.

Auf der Fläche bei Eiterfeld ist nur eine Fährte, und zudem wegen der undeutlichen Eindruckmorphologie mit Vorbehalt, als *Brachychirotherium* zu bestimmen (Abb. 15-1, Nr. 019, Anhang 3). Infolge der höheren Konsistenz des Substrates erscheinen sogar die Eindrücke entlang der Fährte uneinheitlich. Dennoch sind Eindruckform und Fährtenmuster gegenüber den anderen Chirotherien differenziert. Die Fährte Nr. 019 kann am ehesten mit *B. harrasense* und *B. praeparvum* in Beziehung gebracht werden, so dass offenbar auch ein Vertreter dieser Gruppe die Fläche in Eiterfeld überquert hat.

5.2.4 *Isochirotherium*

Als Ergebnis der Akkumulation umfangreicher und weit verbreiteter Funde von Tetrapodenfährten in der Solling-Folge und äquivalenten Schichten erwies sich eine Differenzierung der lange unter *Chirotherium* zusammengefassten Formen als sinnvoll. Als erster hatte PEABODY (1948) nach dem Studium der Funde in der Moenkopi-Formation in Arizona eine Unterteilung in Groß-Hand- und Klein-Hand-Gruppe fixiert. Die Anwendung dieses Erkenntnis auf das Material aus dem Thüringischen Chirotheriensandstein sowie auf die seit den 1960er Jahren aus der Mittel-Trias Frankreichs bekannt gewordenen Formen (DEMATHIEU 1970) wurden *Chirotherium* und *Isochirotherium* mit den Typusarten einerseits *Chirotherium barthii* und andererseits *Isochirotherium soergeli* diagnostiziert (HAUBOLD 1971a); typische Arten dieser Gattungen wurden

ausgewählt. Das Letztere war kurz zuvor noch als *Chirotherium* beschrieben worden (HAUBOLD 1967). Die auffälligsten Unterschiede zwischen beiden Gattungen liegen

1) in der relativen Größe der Handeindrücke zu denen der Füße, bei *Isochirotherium* sind die Handeindrücke deutlich kleiner und

2) in den Proportionen der Fußzehengruppe I–IV, an den Fußindrücken von *Isochirotherium* ist der II. Zeh der längste.

Ferner erreichen die Fährten von *Isochirotherium* nur ausnahmsweise den extrem schnürenden Gang. Aus dem Thüringischen Chirotheriensandstein erfüllen zahlreiche aber auch untereinander verschiedene Fährten diese Kriterien, so dass außer *I. soergeli* noch *I. herculis* (EGERTON 1839), *I. hessebergense* (HAUBOLD 1971b) und *I. jenense* (HAUBOLD 1971b) vorliegen.

Allgemeine Beschreibung zu *Isochirotherium*

(Abb. 14-1)

Pes: Fußzehen II und III am längsten, Zeh IV meist nur so lang wie I und oft lateral abgespreizt. Basispolster von Zeh V proximal hinter der Metatarsalphalangen-Verbindung I–IV und bei großen Formen häufig mit dieser vereinigt. Das distale Phalangensegment von Zeh V ist nur noch gering belastet.

Manus: Die Handeindrücke erscheinen vergleichsweise klein, so dass die Relation Hand- zur Fußfläche 1 : 4,5–1 : 6,8 beträgt.

Fährte: Die Eindrücke der Füße sind von der Mittellinie stark auswärts gedreht, da die Zone der Hauptbelastung parallel zur Achse von Zeh II verläuft, Schrittwinkel ca. 165° (HAUBOLD 1971a, HAUBOLD & KLEIN 2002, KLEIN & HAUBOLD 2004).

Anwendung auf die Eiterfelder Fährten: Da es sich bei den auf der Fläche als *Isochirotherium* identifizierten Fährten ausschließlich um große Eindrücke handelt, fällt die Wahl der Bestimmung auf *Isochirotherium herculis*. Die Form ist auf der Fährtenfläche zwar unterrepräsentiert, die Zuordnung der drei Fährten (Nr. 011, 013 und u02, vgl. Anhang 3) ist aber eindeutig. Bei den Eindrücken, die zu *Isochirotherium* gestellt werden, sind die Fußzehen II und III als längste und untereinander gleich lang erkennbar. Dank der Größe der Eindrücke lassen sich selbst bei der allgemein undeutlichen Überlieferung die Proportionen der Fußzehen identifizieren. Ausbildung und Größe der Hand- und Fußindrücke, als auch das Muster der drei genannten Fährten begründen eine Bestimmung als *Isochirotherium*, cf. *I. herculis*.

5.2.5 Zur Deutung der Chirotherien

Die Entwicklung der Deutung der Chirotherien oder exakter der Verursacher der so genannten Fährten nahm ihren Anfang mit der Entdeckung von *C. barthii* im Jahr 1833. Ein zentrales und sogar bis heute nicht vollständig gelöstes Problem betrifft den Nachweis von Skelettresten der *Chirotherium*-Tiere im Buntsandstein. Darauf kann man nach den vorstehen-

den Erläuterungen über das Vorkommen bei Eiterfeld zwar keine weiterführende Lösung anbieten, aber es lässt sich immerhin aus dem paläontologischen und geologischen Kontext eine plausible Erklärung für das Problem formulieren.

Der eigentliche Lebensraum der Chirotherien lag in den Erosionsgebieten, das waren die erwähnte Rheinische und Böhmisches Masse. In größerer Distanz zu diesen Bereichen kam das von dort stammende Abtragungsmaterial in der beschriebenen Rand- und Schwellenfazies, also auch bei Eiterfeld, zur Akkumulation. Das waren die Rahmenbedingungen sowohl für den temporären Aufenthalt der Chirotherien als auch für die Entstehung und Konservierung ihrer Fährten. Auch aus der auf der Eiterfelder Fläche erhaltenen Szenerie kann man nicht erkennen, warum die Tiere in dieses Areal kamen und was sie im Einzelnen veranlasst hat, die Flächen zu durchstreifen. Abgesehen von Wurmsspuren gibt es keine befriedigenden Hinweise auf eine Nahrungsmotivation für die recht unterschiedlichen Tiere. Man könnte vermutlich mit einiger Phantasie aus dem Verlauf der dokumentierten Fährten die eine oder andere Interaktion konstruieren. Wirklich beantwortet wäre damit nichts.

Und, warum findet man auf den Flächen oder in deren Umfeld keine substanziellen Hinweise für die Deutung der Chirotherien, z.B. Skelettreste? Die Antwort darauf bietet die sandige Fazies. Diese ist für den Erhalt von Knochensubstanz ungeeignet. Es fehlen aber auch, zumindest bis dato, jegliche Hinweise auf Abdrücke von Kadavern oder Skelettresten. Ohne diese Diskussion weiter zu führen, eine Lösung kann nur mit einem grundsätzlich anderen Ansatz gefunden werden. Folgende gezielt formulierte Fragen helfen hier weiter:

- Welche Gestalt kann man sich für diese Tiere vorstellen?
- Was ist für die Gestalt aus dem schnürenden Gang der Fährten zu folgern?
- Wie sind die kleineren Hände gegenüber den Füßen zu verstehen?
- Welche Hinweise zur Anatomie der Hände und Füße bieten die Eindrücke?

Die Fragen sollen hier nicht einzeln verfolgt und beantwortet werden. Sie weisen aber den Weg zur Suche nach bekannten Tierformen im großen Rahmen der Trias, die diesen Vorgaben nahe kommen. Erst im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden Skelettfunde in kontinentalen Schichten der Trias Südafrikas, Südamerikas, Osteuropas und dann sogar in Südeuropa bekannt und so interpretiert, dass sie für die Entwicklung einer überzeugenden Deutung der Chirotherien angewendet werden konnten.

Hinter diesen allgemein gehaltenen Formulierungen steht die Erfahrung, dass bis in die Gegenwart immer wieder die verständliche aber irreführende Neigung besteht, einen ganz bestimmten Fund aus einem mehr oder weniger sowohl räumlich als auch stratigraphisch entfernten Vorkommen als die Lösung für das „*Chirotherium*-Problem“ zu benennen. Dieser Ansatz ist aus zwei Gründen abzulehnen: 1) der Fund stammt

nicht aus den Fährten-schichten, wie oben dargelegt und 2) die Fährten der Chirotherien in den Horizonten der Solling-Folge sind so vielfältig, dass eine bestimmte Skelettform bestenfalls ein Problem löst.

Bei dem durchaus verständlichen Streben nach Detaillösungen, eine allgemeine Interpretation verspricht eine realistischere Antwort und diese lautet: Die **Chirotherien gehören zu den Archosauriern**. Archosauria definiert man im phylogenetischen Sinne als die letzten gemeinsamen Ahnen der heute lebenden Krokodile und Vögel und all ihrer Nachkommen (in Anlehnung an GAUTHIER 1986, SERENO 1991). Diese Definition sagt nicht direkt, wie der Archosauria-Ahne in der Unter-Trias ausgesehen hat, sondern dass wir von der Existenz einer Form ausgehen, welche die Bedingung der Ausgangsform der heute lebenden Krokodile und Vögel erfüllt hat. Immerhin kennen wir heute aus kontinentalen Ablagerungen der Trias mehrere Archosaurier. Keiner davon ist der Ahne per Definition, aber alle stehen diesem Ahnen vergleichsweise nahe. Skelettrekonstruktionen solcher Formen – *Proterosuchus*, *Vjushkovia*, *Euparkeria*, *Postosuchus*, *Saurosuchus*, *Riojasuchus* und *Stagonolepis*, *Terrestriusuchus*, *Lagosuchus* und *Marasuchus* – vermitteln dank der Darstellungen von GREGORY S. PAUL (z. B. in SERENO 1991 und PAUL 2002) wenigstens einen Teileindruck des Potenzials von Trias-Archosauriern.

Die Chirotherien auf der Eiterfelder Fläche sind Nachweis für die Existenz von vier verschiedenen nach Skeletten theoretisch unterscheidbaren Gattungen, die jeweils einer bestimmten größeren Gruppe der Archosaurier angehören. In Anbetracht des geologischen Alters der Fundschicht stehen diese Formen dem basalen Archosauria-Stadium im Sinne der genannten Definition nahe. Mit anderen Worten, alle Chirotherien der Solling-Folge gehören zu einer frühen Radiation (Phase der evolutiven Entfaltung) der Archosaurier, aus der man die heute lebenden Krokodile und die vogelartigen Dinosaurier (= Vögel) nach der aktuell wahrscheinlichen Hypothese ableiten kann.

Alle Befunde der Chirotherien, namentlich auf Schichtflächen der Solling-Folge, bestätigen eine bemerkenswerte Vielfalt der betreffenden Tierformen. Obgleich sowohl in der Solling-Folge als auch in äquivalenten Ablagerungen der tieferen Trias weltweit geeignete Kandidaten nach Skelettresten bislang höchst selten sind, bieten die wenigen Bezugspunkte zusammen mit der o.g. Hypothese zur Stammesgeschichte eine fundierte Grundlage. Die Vorstellungen zu den Chirotherien als auch jene über Präsenz und Beschaffenheit der Archosaurier sind für eine wechselseitige Ergänzung geeignet und bewirken gleichsam eine Potenzierung der Kenntnisse über die frühe Entfaltung der bedeutendsten Tetrapoden des Mesozoikums.

Die Deutung von Chirotherienfährten und anderer Fährtenformen des Buntsandsteins wird in vorliegender Arbeit nicht näher begründet. So soll hier der Hinweis auf aktuelle Ergebnisse zu diesem Thema genügen: Die Einbindung insbeson-

dere von *Chirotherium barthii* in die Vorstellungen zur Herausbildung der Dinosaurier ist bei HAUBOLD & KLEIN (2000, 2002) begründet. Daraus abgeleitete Erkenntnisse bilden zusammen mit den Rekonstruktionen von *Euparkeria* und *Saurosuchus* von G. S. PAUL (2002) die Grundlage für die Ausführung der naturgetreuen Rekonstruktion von *C. barthii* als Bronzeplastik für das „*Chirotherium*-Monument“ auf dem Marktplatz in Hildburghausen (HAUBOLD 2006).

Für die Präsentation des primären Originalmaterials (Typusmaterials) zu *C. barthii* in der Fundheimat Hildburghausen war es erforderlich, die weit über Europa verstreuten Stücke zu suchen und anhand von Abgüssen zusammenzuführen. Daraus ist dann immerhin auf einer Fläche von 30 m² ein Fragment der 1834–35 bei Hildburghausen entdeckten Fährtenfläche mit Formen aus Polyester zusammengesetzt worden. Diese zeigen vier Fährten von insgesamt 40 m Länge mit 126 Hand- und Fußindrücken des *C. barthii*. Daneben finden sich

nochmals ca. 100 Eindrücke von Teilstücken der Fährten von *C. sickleri* und *Dicynodontipus geinitzi*. Es liegt nahe, die Situation des weltberühmten Vorkommens bei Hildburghausen mit jener von Eiterfeld zu vergleichen. Positiv in Hildburghausen ist die exzellente Erhaltung der Eindruckformen von *Chirotherium barthii*, aber nur eine originale Platte von kaum 2 m² ist am Ort erhalten und der tatsächliche Umfang der einst aus einem Steinbruch geborgenen Fläche lässt sich nur schätzen: Vielleicht waren es 200 m². Bei Eiterfeld handelt es sich um 350 m² im Aufschluss vorliegende Fährtenfläche. Diese enthält nach der hier analysierten Dokumentation 70 Fährten, davon erstrecken sich allein die von *Chirotherium barthii* über eine Länge von 160 m. Bereits dieser quantitative Vergleich mit Hildburghausen veranschaulicht eindringlich, welche einmalige Information die Eiterfelder Fläche bietet; dies wird in dem folgenden und abschließenden Kapitel eingehend dargelegt.

6. Beschreibung und Interpretation

6.1 Auswertung der Eiterfelder Fährten

Die wesentliche Seite der Studie ist vorgegeben durch die Informationen des Planes, indem die langen und zusammenhängenden Fährten und das jeweilige Fährtenmuster sich für eine metrische Auswertung empfehlen, aus der man das lokomotorische Verhalten der Fährtenherzeuger rekonstruieren kann.

Prinzipiell ergibt sich analog zur Bestimmung und der Form der Eindrücke bei der metrischen Auswertung der Fährten eine Differenzierung in zwei Grundmuster 1) *Dicynodontipus* und 2) *Chirotherien*. Vordergründiges Kriterium ist der Hand–Fuß-Abstand.

Bei *Dicynodontipus* verhält sich dieser Abstand proportional zur Geschwindigkeit. Da mit steigender Schritt-, also Stridelänge, infolge des zunehmenden Übertretens der Abstand größer wird, und der Fuß Eindruck immer weiter vor dem der Hand liegt.

Die umgekehrte Situation liegt bei *Chirotherium barthii*, *Chirotherium sickleri* sowie den als *Isochirotherium* und *Brachychotherium* bestimmten Fährten vor. Im Zusammenhang mit größerer Stridelänge und steigender Geschwindigkeit wird der Hand–Fuß-Abstand geringer. In dem jeweiligen Eindruckpaar nähert sich der Fuß Eindruck zunehmend dem der Hand an bis zum partiellen Übertreten. Dieses für *Chirotherien* bekannte Grundmuster kann man auf der Eiterfelder Fläche nicht immer nachvollziehen.

Bei dem Großteil der Fährten lässt sich jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen Hand–Fuß-Abstand und Geschwindigkeit feststellen. Das gilt auch für die direkt aus der Fährtenanordnung messbare Rumpflänge. Wenn eine Beziehung von Hand–Fuß-Abstand zur Geschwindigkeit gegeben ist, dann verhält sich die scheinbare Rumpflänge proportional zum

Hand–Fuß-Abstand. Mit größerem Hand–Fuß-Abstand steigt auch die scheinbare Rumpflänge.

Das bedeutet, je langsamer die Tiere gelaufen sind, desto realitätsnäher sind auch die als scheinbare Rumpflänge ermittelten Werte, und bei steigender Stridelänge bzw. höheren Geschwindigkeiten ist von einer negativen Abweichung gegenüber den realen Maßen der Rumpflänge auszugehen.

Für Schrittinkel und Gangbreite ergeben graphische Darstellungen geradliniger *Chirotherien*-Fährten meist spiegelbildliche Funktionen, das heißt, die Werte sind direkt von einander abhängig. Eine Abweichung zeigt sich beim Kurvenverlauf der Fährte: die Gangbreite bleibt konstant während die Schrittinkel schwanken.

Zur Geschwindigkeit bzw. Gangart der *Chirotherien* kann übereinstimmend mit Beobachtungen von anderen Vorkommen (HAUBOLD 1984: 201) festgestellt werden, dass Traben in keinem Falle überschritten wird. Nach den erhobenen Daten der Eiterfelder Fläche bewegten sich etwa 90 % der *Chirotherien* in langsamer bis schneller Gangart (Tab. 3). Auf der oberen Teilfläche haben sich die meisten Individuen schneller fortbewegt, als jene auf der unteren Teilfläche. Die Gründe dafür könnten in der Sedimentbeschaffenheit und in der Verteilung der Ichnotaxa zu suchen sein. Auf der unteren Teilfläche überwiegen die kleineren Fährten *Chirotherium sickleri*.

Einige Anhaltspunkte zum Verhalten der *Chirotherien* ergeben sich schließlich aus der Konsistenz des Substrats und der Laufleistung. Wie aus der Tiefe von Eindrücken abzuleiten ist, wurde die Fläche auch bei weichem, nachgebendem Untergrund und selbst bei Wasserbedeckung überquert. Das geht aber immer mit geringer lokomotorischer Effektivität einher. Höhere Laufleistungen, wie sie bei *Dicynodontipus* vorliegen,

wurden stets nur bei trockenem, standfestem Substrat erreicht. Grundsätzlich erweisen sich nach den Fährtenmustern Geschwindigkeit, Leistungsfähigkeit und Standfestigkeit als durch die Konsistenz des Substrates limitiert. Höhere lokomotorische Effizienz bzw. Geschwindigkeit und Standsicherheit sind korreliert mit tragfähigem, stärker ausgetrocknetem Untergrund. Weiches, wasserreiches Substrat reduzierte dagegen Gangart und Geschwindigkeit.

6.1.1 Sediment und Erhaltung der Fährten

In dem mittelkörnigen gut sortierten Sandstein (Psammit) sind die einzelnen Eindrücke zum Teil nur mäßig gut überliefert, je kleiner der Eindruck, umso undeutlicher ist er. Nach den meisten vorliegenden Abgüssen und Originalen sind die Eindrücke sehr flach, haben einen undeutlichen Umriss und zeigen keine Details der Hand- und Fußflächen oder Phalangenpolster der Zehen. Das gilt auch bei tiefem Eintreten in das Sediment. Nach den Aufzeichnungen von J. Kulick ist auf der oberen Teilfläche sogar mit Unterfährten zu rechnen. Die Fläche, auf der die Erzeuger liefen, lag dann in einem etwas höheren Niveau, und die Umrisse der Eindrücke haben sich durch die Sedimentlagen auf die dokumentierte Fläche durchgedrückt (Abb. 16 und 17). Nach allen Anzeichen erfolgte bei der Bildung der Fährtenflächen eine geringfügige Unterbrechung der Sedimentation, aber kein Wechsel der Ablagerungsbedingungen. So sind die Fährten nicht, wie es optimal wäre, in eine Ton-Sand-Wechselage, sondern in Sand getreten worden, und auch die folgende Lage besteht aus Sand. Möglicherweise finden sich günstigere Bedingungen im hangenden Bereich der Fläche, jedenfalls lässt sich das nach der Profilaufnahme (Abb. 4, Anhang 1) vermuten.

Tab. 3. Statistische Verteilung der Gangarten nach Ichnotaxa und Fährtenflächen, in absoluten Zahlen. Die Laufleistung konnte für 67 der 70 Fährten berechnet werden, rennende Gangart ist in keinem Falle erreicht worden.

	obere Fährtenfläche		untere Fährtenfläche		Gesamt	
	gehen	traben	gehen	traben	gehen	traben
<i>Chirotherium</i> sp.	4	2	0	0	4	2
<i>Chirotherium barthii</i>	15	1	5	0	20	1
<i>Chirotherium sickleri</i>	3	0	23	0	26	0
<i>Isochirotherium</i> sp.	2	0	0	0	2	0
cf. <i>Brachychiroth.</i> sp.	0	1	0	0	0	1
<i>Dicynodontipus</i> sp.	2	1	1	0	3	1
nicht bestimmbar	2	0	3	2	5	2
Gesamt	28	5	32	2	60	7

Die für die Eiterfelder Fläche gegebene sedimentäre Situation ist allerdings, bei allen Einschränkungen im Detail, die Voraussetzung für den Erhalt längerer Fährten in situ. Denn eine solche großflächige Information ist in der Regel nur einer Positivfläche, also Eindrücken im Epirelief vorbehalten.

An einigen Abgüssen ist zu erkennen, dass in den Eindrücken noch die Ausgüsse stecken. Diese sind beim Abbau der hangenden Bank von deren Schichtunterseite abgebrochen. J. Kulick beschreibt dies in seinen Notizen als „Steinkernerhaltung“.

Die etwas beeinträchtigte Erhaltung kann auch durch über dem Substrat bewegtes Wasser oder nachfolgendes Überspülen der Flächen nach einem Trockenfallen entstanden sein. Insgesamt folgt aus den Eindrücken, dass die Tiere zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Fläche überquert haben. Das beweisen unterschiedlich tiefe Eindrücke dicht nebeneinander verlaufender bis sich kreuzender Fährten.

6.1.2 Anzahl der Eindrücke und Größe der Fläche

Die Anzahl der auf dem Fährtenplan (Abb. 9) dokumentierten Eindrücke beträgt 2644. Die tatsächliche Anzahl übertrifft vermutlich 2700, da wohl einige kleinere und vereinzelt Eindrücke bei der Aufnahme aus technischen Gründen nicht berücksichtigt worden sind. Auf die obere Fährtenfläche entfallen 638 Fußeindrücke, 382 Handeindrücke und 78 Eindrücke ohne erkennbare Zugehörigkeit zu einer Fährte. Das sind insgesamt 1098 Eindrücke. Auf die untere Fährtenfläche entfallen 710 Fußeindrücke, 516 Handeindrücke und 320 sonstige Eindrücke, also insgesamt 1546 Eindrücke. Die exakten Ausdehnungen der oberen und unteren Fläche betragen 147 m² und 165 m². Für den gesamten Aufschluss kann man rund 350 m²

veranschlagen. Daraus resultiert nach den auf dem Plan ausgewiesenen Eindrücken eine durchschnittliche Dichte von acht Eindrücken pro Quadratmeter.

6.1.3 Entstehung der Fährtenfläche

Flächen mit fossilen Tetrapodenfährten repräsentieren ein Biotop im Übergangsbereich von Sedimentation und Erosion. Das in der Regel feuchte, feinkörnige und bis zu einem gewissen Grade konsistente Substrat bildet die Voraussetzung für den Erhalt von Fährten, wenn ein solcher Bereich von Tieren überquert wird. Wie am Beispiel Eiterfeld zu zeigen ist, können die Idealbedingungen für den Erhalt und die Erhaltung der Eindrücke Einschränkungen erfahren haben.

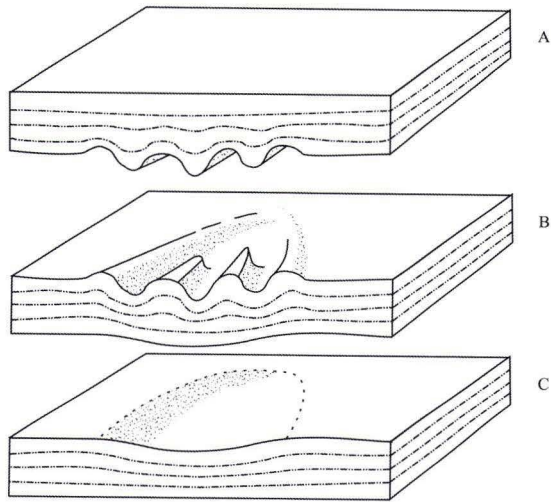


Abb. 16. Schema zur Überlieferung von Hand- oder Fußindrücken im Rahmen des Sediments als direkte und indirekte Eindrücke:

A: Hyporelief (Ausguss oder Negativform);

B: Epirelief (Eindruck oder Positivform);

C: Untertrack (sog. Unterfährte, durchgepauster Eindruck in Sedimentlagen unterhalb der originalen Lauffläche) (modifiziert nach LEONARDI 1987).

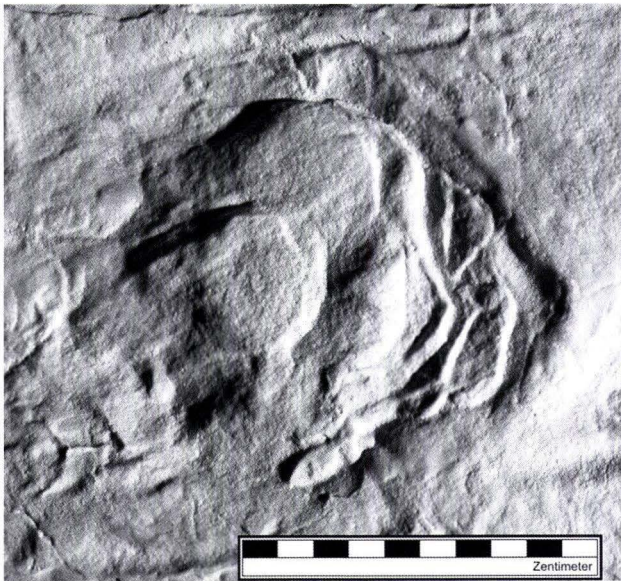


Abb. 17. Von einem Abguss hergestelltes Epirelief, deutlich sind die deformierten Sedimentschichten im Eindruck zu erkennen, die Umriss der Eindrücke haben sich in tieferen Sedimentlagen abgezeichnet. HLMD V4667 F1971-4 – unbestimmter Eindruck.

Ist das Sediment zu grobkörnig, bildet es kaum Einzelheiten ab, ist es zu feucht, füllen sich die tieferen Eindrücke mit Wasser und dies kann den Umriss verändern. Grundsätzlich ist feuchtes Milieu und vor allem Wasser wichtig, wobei ungeachtet des Wechsels von Wasserbedeckung und Trockenfallen, die Überdeckung der Eindrücke erst durch weitere Sedimentation deren Konservierung auf einer Schichtfläche sicherstellt.

Aber selbst wenn die Eindrücke mit Sediment ausgefüllt worden sind, kann das ihre Erhaltung gefährden. Erst wenn neben einer Sedimentationsunterbrechung auch eine wenigstens geringfügige Veränderung des Ablagerungsregimes erfolgt sind Fährten durch eine Trennschicht nicht nur abgebildet, sondern dann auch aktuell auf der betreffenden Fläche wieder freizulegen.

Wie schon in Kap. 2 zur Geologie beschrieben, finden sich in dem Profil Hinweise darauf, dass die Sedimentation von Stillstandsphasen unterbrochen war. Diese Stillstands-Flächen standen periodisch unter flacher Wasserbedeckung. Die grün-graue Farbe der Tonsteine lässt auf dauernde Wassersättigung schließen. Und für den Bereich in dem die Fährten entstanden sind ist ein litoral-marines oder litoral-lakustrines Milieu zu postulieren.

6.2 Die Eiterfelder Ichnofauna – Interpretation

6.2.1 Das ichnotaxonomische Spektrum

Nach den Bestimmungen folgt, dass auf der unteren Fährtenfläche kleinere Formen wie *Chirotherium sickleri* überwiegen, während auf der oberen Fährtenfläche die größeren wie *Chirotherium barthii* und *Isochirotherium herculis* dominieren. Da beide Schichtflächen dicht aufeinander folgen ist das kein Hinweis auf eine kontrollierte Verbreitung der Ichnotaxa. In der Summe weist das ichnotaxonomische Spektrum beider Flächen etwa ausgeglichene Anteile von *Chirotherium barthii* und *Chirotherium sickleri* auf, und auf beide Typen entfallen rund 70 % aller Fährten (Abb. 18–20, Tab. 4).

Diese Zusammensetzung liegt im Rahmen der allgemein aus der Solling-Folge bekannten Ichnofauna. Wobei zufälligen Faktoren und auch den Erhaltungsbedingungen eine selektive Funktion einzuräumen ist. Damit sind sowohl die geringen Anteile von *Brachychirotherium*, *Isochirotherium* und *Dicynodontipus* sowie das Fehlen kleiner Formen erklärt.

Rhynchosauroides und vor allem *Rotodactylus* sowie *Dicynodontipus* kennt man von anderen Vorkommen in den oberen Horizonten der Solling-Folge mitunter massenhaft (Harras bei Hildburghausen und Karlshafen an der Weser). In Eiterfeld könnte der fehlende Nachweis auf sedimentologische Bedingungen der Flächen hinweisen, indem das Substrat für die Konservierung der Eindrücke kleiner und leichter Tetrapoden eventuell zu fest und zu grob war. Vielleicht sind die Eindrücke kleiner Tiere auf der Fläche schlichtweg nicht erkannt oder beachtet worden. Zudem könnten sie als Sohlflächen bereits beim Steinbruchbetrieb sowie bei der Freilegung und Reinigung für die Aufnahme vergleichsweise stärker sekundär erodiert worden sein. J. Kulick bemerkt in seinen Aufzeichnungen von 1964 in Bezug auf kleinere Fährten: „Vorhanden waren sie bestimmt, wie Einzelfunde in Steinbrüchen des gleichen Horizontes in der weiteren Umgebung zeigen.“ Belege sind ein Abguss im Hessischen Landesmuseums Darmstadt

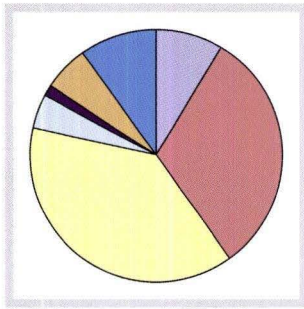


Abb. 18. Ichnotaxonomisches Spektrum in der Gesamtbetrachtung.

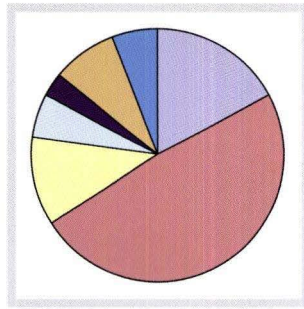


Abb. 19. Ichnotaxonomisches Spektrum der oberen Fährtenfläche.

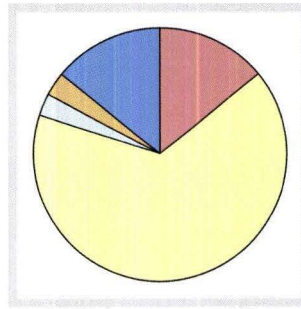


Abb. 20. Ichnotaxonomisches Spektrum der unteren Fährtenfläche.

Legende

- *Chirotherium* sp.
- *Chirotherium barthii*
- *Chirotherium sickleri*
- *Isochirotherium* sp.
- cf. *Brachychirotherium* sp.
- *Dicynodontipus*
- nicht bestimmbar

(Inventarnummer: V4657 F1968/16, Abb. 21) mit einem kleinen Eindruck von knapp drei Zentimetern Länge und ein Originalstück im Bohrkernlager des HLUG (Eiterfeld 18) auf dem drei kleine Zehen zu erkennen sind. Eine weitere Klärung dieser Fragen ist erst nach dem Wiederaufdecken der Flächen möglich. Zu testen wäre in dieser Hinsicht ferner das Spureninventar auf weiteren Lagen (Abb. 4) im Hangenden der beiden Flächen. Die o. g. Dominanz von *C. barthii* und *C. sickleri* ist keinesfalls geeignet, als Beleg für die Fixierung einer besonderen faunistischen Situation oder gar einer spezifischen „Ichnofazies“. Denn dies würde die Zufälligkeit des bei Eiterfeld auf nur zwei Flächen dokumentierten Fährteninventars nicht angemessen reflektieren.

Tab. 4. Statistische Verteilung der Ichnotaxa im Aufschluss des Vorkommens bei Eiterfeld, vgl. Fährtenplan Abb. 8, 9 und Anhang 5 (n = Anzahl der jeweils bestimmten Fährten).

	obere Fährtenfläche		untere Fährtenfläche		Gesamt	
	n	%	n	%	n	%
<i>Chirotherium</i> sp.	6	17	0	0	6	9
<i>Chirotherium barthii</i>	17	49	5	14	22	31
<i>Chirotherium sickleri</i>	4	11	23	66	27	39
<i>Isochirotherium</i> sp.	2	6	1	3	3	4
cf. <i>Brachychiroth.</i> sp.	1	3	0	0	1	1
<i>Dicynodontipus</i> sp.	3	9	1	3	4	6
nicht bestimmbar	2	6	5	14	7	10
Gesamt	35	100	35	100	70	100

6.2.2 Analyse der Laufrichtungen

Eine allgemeine Übersicht der Fährten (Abb. 8 und Anhang 5) deutet darauf hin, dass eine parallel nach der Ufer- oder Strandlinie bevorzugt ausgerichtete Bewegung nicht gegeben ist. Der Verlauf der Fährten und das erkennbare lokomotorische Verhalten der Fährtenenerzeuger erscheinen eher zufällig. Sedimentologische Merkmale und die wechselnde Erhaltung der Eindrücke zeigen, dass sich die Tiere sowohl über wasserreiches, als auch über trockenes Substrat bewegt haben. Die vorliegende Fläche bietet Einblick in einen weiträumigen Aufenthaltsbereich von *Chirotherien* in und am Flachwasser der oben geschilderten Fazies-Situation.

Die Vielzahl der dokumentierten Fährten und die Länge der Distanzen über die sie auf den Flächen erhalten sind, bietet sich aber für eine Zusammenstellung und Analyse der Laufrichtungen an. Diese in der Ichnologie bei entsprechender Datenlage bewährte Methode erlaubt Aussagen zu einer mög-

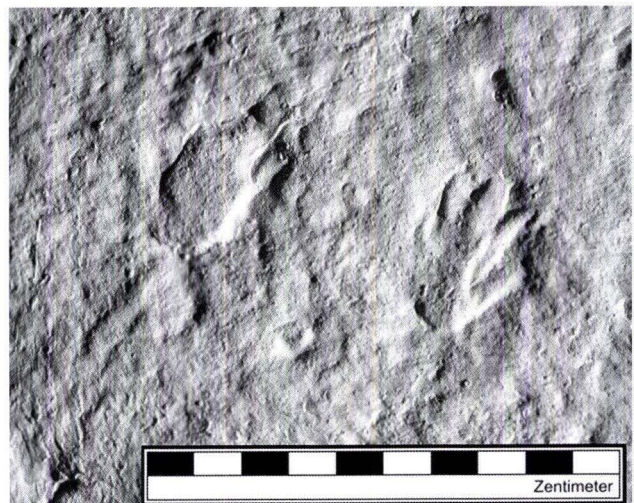


Abb. 21. Abguss eines kleinen Eindrucks HLMD V4657 F1968/16 – unbestimmt.

lichen Orientierung der Fährten und eventuell zum Verhalten der Fährttiere.

Zur Analyse der Laufrichtungen wurde das Programm „Steonett“ genutzt. Die quantitative Auswertung erfolgte in sog. Klufrosen, wie sie zur graphischen Darstellung der Richtung von in einem Gesteinskörper vorhandenen Klüften verwendet wird. Um eine Repräsentativität zu gewährleisten, wurden von jeder Fährte drei Werte genommen; bei geradlinigen Fährten sind dann alle drei Werte gleich. Eine höhere Anzahl der Werte würde nur zu einer breiteren Streuung im Diagramm-Mittelpunkt führen und keine generellen Tendenzen herausbilden. Die Richtung der ausgefüllten Sektoren gibt die Laufrichtung im 360°-Kreis an und geht vom Mittelpunkt aus. Das bedeutet, die Angaben beziehen sich also immer auf die Richtung, in welche die Tiere gelaufen, nicht auf die Richtung, aus der sie gekommen sind. Die Länge der Sektoren repräsentiert die relative Anzahl der Individuen, welche in die betreffende Richtung gelaufen sind.

Für die obere Fährtenfläche (Abb. 22) zeigt sich eine breite Streuung der Richtungen, die meisten Werte liegen zwischen 0° und 90°, also zwischen Norden und Osten. Maxima sind bei 30° (NE-NNE) und gegenüberliegend bei 210° (SW-SSW) zu verzeichnen.

Auf der unteren Fährtenfläche liegen dagegen klare Haupttendenzen vor (Abb. 23). Es sind zwei Maxima ausgebildet, eines liegt zwischen 0° und 25°, also Nord bis NE und das andere liegt bei 210° bis 215° (etwa SSW).

Für die Zusammenschau beider Flächen (Abb. 24) zeichnet sich ein ähnliches Bild, wie für die untere Fährtenfläche ab. Es sind Haupttendenzen bei einer gewissen Streuung vorzugsweise nach Norden bis NE markant. In der entgegengesetzten Richtung liegt ein Maximum bei 210° (etwa SSW). Diese Richtung tritt zudem durch eine sehr geringe Streubreite hervor.

Paläogeographisch lag das Eiterfelder Fährtenvorkommen zur Zeit der Solling-Folge am NW-Rand der Rhön-Schwelle (Abb. 3).

In südsüdwestlicher Richtung lag die Spessart-Schwelle, über die wohl eine Verbindung zum Festland der Rheinischen Masse gegeben war. Im Norden bis NNE lag die Eichsfeld-Altmark-Schwelle und im Osten die Böhmisches Masse.

Obwohl man davon ausgehen darf, dass die Randbereiche von Hochgebieten weitere Züge von Chirotherien beeinflusst haben, ein gesicherter Bezug der Fährtenrichtungen zu dem geographischen Rahmen ist auf der Eiterfelder Fläche nicht erkennbar. Einige bevorzugte Laufrichtungen folgen aus der Parallelität ausgewählter Fährten. Das betrifft in der einen Richtung die Fährten Nr. o08 und o10; o05, o03, o26 und o31; o18, o19, und o16; o20, o30, und o32; u01, u03, u11, u12, u14, u15, u19 und u22 (Abb. 9, 24 und 25).

6.2.3 Rekonstruktion des Environments

Wie bereits in dem Kapitel zur Geologie ausgeführt, kann man die Bildung der Fährten bei Eiterfeld im Rahmen des Thüringischen Chirotheriensandstein interpretieren. Unter Bezugnahme auf die Aussagen diverser sedimentologischer Studien und Autoren sind die Fährten in einem niedrig-energetischen, wellenbeeinflussten und vielleicht karbonatreichen Flachwassermilieu entstanden, welches im Buntsandstein im Übergang von fluviatil geprägten Sandebenen zu dem Playa-See im Beckenbereich gelegen hat. Als eine Art Randfazies breiteten sich diese Sedimente mit fortschreitender Transgression bis auf die Schwellen aus (BINDIG 1991). Solche Bildungen sind also zeitlich nicht eng begrenzt, sondern von der Transgression kontrollierte, wandernde Faziesgürtel (LANG 2001). Die betreffenden Fazies sind gleichsam periodische bis episodische Änderungen der fluviatilen Sedimentzufuhr, welche im weiteren Rahmen vom Klima und Änderungen des Meeresspiegels kontrolliert waren (VAN DER ZWAN & SPAAK 1992) oder man kann das Geschehen auch vereinfacht als allochthon beeinflusste Sedimentation sehen (AIGNER & BACHMANN 1992). Für die Entstehung der Horizonte mit Fährten in

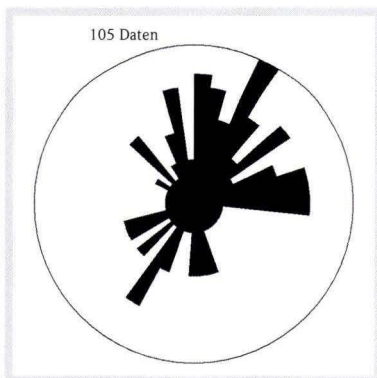


Abb. 22. Laufrichtungsanalyse der oberen Fläche.

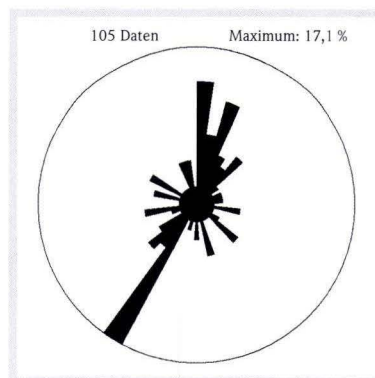


Abb. 23. Laufrichtungsanalyse der unteren Fläche.

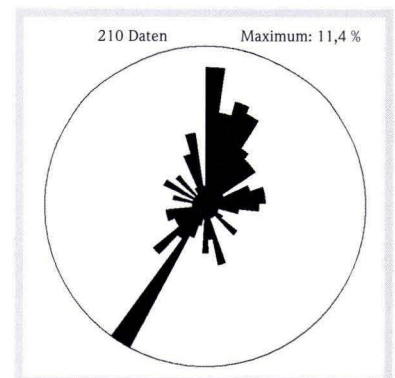


Abb. 24. Laufrichtungsanalyse der Fährten von beiden Flächen kombiniert.

der Solling-Folge bilden also Überflutungen und Sedimentzufuhr eine entscheidende Voraussetzung. Hinweise auf dieses Geschehen sind neben den akkumulierten Sandsteinen ggf. Trockenrisse und Rippelmarken.

So kennzeichnen die bei periodisch flacher Wasserbedeckung in flachen Depressionen entstandenen Rippelmarken auf der unteren Fährtenfläche (Abb. 25) eine wesentliche Seite des Faziesbereiches mit Fährten. Auffällig sind hier mitunter massenhaft Spuren von Invertebraten. Die lagenweise dichte Besiedlung durch benthonische Organismen lässt auf einen Sedimentationsraum mit vermutlich wechselnder Salinität und zum Teil extremen Lebensbedingungen schließen (WYCISK 1984). Die Invertebratenspuren belegen aber nicht zwingend marines Milieu, denn sie können ebenso in einem lakustrinen Milieu entstanden sein.

Anzeichen für Salinität in der oberen Solling-Folge südlich von Eiterfeld sind Steinsalzpseudomorphosen (BACKHAUS 1968). Die graugrüne Farbe der dünnen Tonsteinlagen zeigt reduzierendes Milieu als Folge dauernder Wassersättigung an.

Weitere Anhaltspunkte für ein litoral-lakustrines Milieu sind flach geneigte Schrägschichtung und Horizontalschichtung der Sandsteine und Pelit-Sand-Wechselagerungen. Alle diese Punkte deuteten bei den Eiterfelder Fährtenflächen auf ein stark durchfeuchtetes Sediment eines großräumigen Flachwasserareals in Ufernähe (Flachwasser-Faziesgürtel), welches durch periodische Wasserspiegelschwankungen beeinflusst war.

Auf eine gewisse Ufernähe am Rand einer Schwelle bzw. eines Hochgebietes deuten Flächen mit Fährten prinzipiell hin, da in diesen Bereichen ihre optimalen Überlieferungsbedingungen gegeben sind. Mithin repräsentieren Fährtenflächen ein Teilbiotop terrestrischer Tetrapoden, gelegen im Übergangsbereich von Sedimentations- und Erosionsgebiet. Letzteres waren die von den Fährtenenerzeugern wohl besiedelten Hochgebiete, die Rheinische und die Böhmisches Masse. Aus diesen Bereichen sind die betreffenden Tetrapoden in Richtung Sedimentationsgebiet vorgedrungen. Kontrolliert von der episodischen Ausbreitung der jeweiligen Randfazies ist es im Verlauf der Trias im Raum Hessen, Thüringen und Nordbayern



Abb. 25. Blick auf die untere Fährtenfläche in Richtung Westen. In der rechten Bildhälfte verläuft die mit 23 m längste Fährte eines *Chirotherium sickleri* (Nr. u20) und quer dazu in der Bildmitte die 10 m lange Fährte eines *C. barthii* (Nr. u22) (Foto: Nachlass J. Kulick).

wiederholt zur Entstehung subaquatischer Ichnozöosen gekommen (HAUBOLD & KLEIN 2002). Insbesondere gegen Ende der Solling-Folge lagen verbreitet bestens geeignete Bedingungen für die Konservierung von Fährten vor. Die Flächen bei Eiterfeld sind aufgrund ihrer einmalig erhaltenen Ausdehnung und vielen langen Fährten eines der bemerkenswertesten Zeugnisse der Fährtenenvironments der Buntsandsteinzeit. Paläogeographisch liegt das Areal am NW-Rand der Rhön-Schwelle zwischen Rheinischer und Böhmischer Masse. Zugleich war die Rhön-Schwelle Teil einer SW–NE vom Odenwald bis zur Eichsfeld-Altmark-Schwelle verlaufenden Schwellenzone. Die weithin vorherrschenden Fazies- und Lebensbedingungen in dieser Region gegen Ende der Solling-Folge, im Übergang von der Unter- zur Mittel-Trias, kann man sich anhand der bei Eiterfeld einmalig konservierten Situation repräsentativ vorstellen.

Danksagung: Der Dank der Verfasser geht an Herrn Thomas Keller vom Landesamt für Denkmalpflege in Wiesbaden für die Überlassung der Eiterfelder Dokumentation zur Bearbeitung. Für bedeutsame und eindrucksvolle Informationen aus der Zeit der Entdeckung und Dokumentation des Vorkommens danken wir Frau Dr. Renate Motzka-Nöring, Wiesbaden. Herrn Holger Kulick danken wir für die Bereitstellung von Unterlagen aus dem Nachlass seines 1996 verstorbenen Vaters Dr. Jens Kulick. Weiterhin danken wir allen Mitgliedern der Interessengemeinschaft Saurierspuren-Eiterfeld e.V. stellvertretend und besonderes auch persönlich Herrn Günter Hinkel für rege Unterstützungen. Bei der Sichtung von Abgussmaterial waren Herr Dr. Martin Hottenrott vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie Wiesbaden und Frau Dr. Gabriele Gruber vom Hessischen Landesmuseum Darmstadt in sehr dankenswerter Weise hilfreich.

7. Schriftenverzeichnis

- AIGNER, T. & BACHMANN, G. H. (1992): Sequence stratigraphic framework of the German Triassic. – *Sedimentary Geology*, **80**: 115–135; Amsterdam.
- ALEXANDER, R. M. (1976): Estimates of speeds of Dinosaurs. – *Nature*, **261**: 129–130; London.
- ALEXANDER, R. M. (1977): Mechanics and scaling of terrestrial locomotion. – In: PEDLEY, T.J. (ed.): *Scale Effects in Animal Locomotion*: 93–110; London (Academic Press).
- BACHMANN, G. H. & KOZUR, H. W. (2004): The Germanic Triassic: Correlation with the international chronostratigraphic scale, numerical ages and Milankovitch cyclicity. – *Hallesches Jb. Geowiss.*, **B26**: 17–62; Halle.
- BACKHAUS, E. (1960): Zur Neugliederung des Odenwälder Buntsandsteins und ein Vergleich mit Nordhessen. – *N. Jb. Geol. Paläont., Mh.*, **1960**: 292–313; Stuttgart.
- BACKHAUS, E. (1968): Fazies, Stratigraphie und Paläogeographie der Solling-Folge (Oberer Buntsandstein) zwischen Odenwald – Rhön und Thüringer Wald. – *Oberrhein. geol. Abh.*, **17**: 1–164; Karlsruhe.
- BACKHAUS, E. (1994): Der Einfluß der Tektonik und des skytisch-anisischen Meeresspiegelanstiegs auf die Faziesgliederung des Oberen Buntsandsteins im Germanischen Triasbecken. – *Z. dt. geol. Ges.*, **145**: 325–342; Hannover.
- BEURLIN, K. (1950): Neue Fährten Funde aus dem Fränkischen Trias. – *N. Jb. Geol. Paläont., Mh.*, **1950**: 308–320; Stuttgart.
- BINDIG, M. (1991): Räumliche und zeitliche Entwicklung der fluviatilen Environments der Solling-Formation (Buntsandstein, Germanische Trias). – Diss. TH Darmstadt: 218 S.; Darmstadt.
- BOIGK, H. (1952): Möglichkeiten und Wege zu einer Feingliederung im Mittleren Buntsandstein, erläutert an den Verhältnissen des nordwestlichen Vorharzes. – *Z. dt. geol. Ges.*, **103**: 102–105; Hannover.
- BOIGK, H. (1956): Vorläufige Mitteilung über eine neue Gliederung des Mittleren Buntsandsteins im Raume Südhannover. – *Geol. Jb.*, **72**: 325–340; Hannover.
- BOIGK, H. (1959): Zur Gliederung und Fazies des Buntsandsteins zwischen Harz und Emsland. – *Geol. Jb.*, **76**: 597–636; Hannover.
- DEMATHEIU, G. (1970): Les empreintes de pas de vertébrés du Trias de la bordure Nord-Est du Massif Central. – *Cahiers de Paléontologie*: 211 S.; Paris (Centere Natl. Recherche Sci.).
- DEMATHEIU, G. & HAUBOLD, H. (1982): Reptilienfährten aus dem Mittleren Buntsandstein von Hessen (BRD). – *Hallesches Jb. Geowiss.*, **7**: 97–110; Gotha.
- EGERTON, P. G. (1839): On two casts in sandstone of the impressions of the hindfoot of a gigantic *Chirotherium* from the New Red sandstone of Cheshire. – *Proc. geol. Soc. London*, **3** (59): 14–15; London.
- GAUTHIER, J. A. (1986): Saurischian monophyly and the origin of birds. – *Mem. Calif. Acad. Sci.*, **8**: 1–55; Berkeley.
- HAUBOLD, H. (1966): Therapsiden- und Rhychocephalen-Fährten aus dem Buntsandstein Südthüringens. – *Hercynia, N.F.* **3**: 147–183; Leipzig.
- HAUBOLD, H. (1967): Eine Pseudosuchierfährtenfauna aus dem Buntsandstein Südthüringens. – *Hallesches Jb. mitteldt. Erdgesch.*, **8**: 12–48; Leipzig.
- HAUBOLD, H. (1971a): Ichnia Amphibiorum et Reptiliorum fossilium – In: KUHN, O. (Hrsg.): *Handbuch der Paläoherpetologie*, Teil 18: 124 S.; Stuttgart (Gustav Fischer Verlag).
- HAUBOLD, H. (1971b): Die Tetrapodenfährten des Buntsandsteins in der Deutschen Demokratischen Republik und in Westdeutschland und ihre Äquivalente in der gesamten Trias. – *Paläontol. Abh., A*, **IV** (3): 395–548; Berlin.
- HAUBOLD, H. (1984): Saurierfährten (2. Aufl.). – Die Neue Brehm-Bücherei, **479**: 231 S., Wittenberg Lutherstadt (A. Ziemsen Verlag).
- HAUBOLD, H. (1996): Ichnotaxonomie und Klassifikation von Tetrapodenfährten aus dem Perm. – *Hallesches Jb. Geowiss.*, **B18**: 23–88; Halle.
- HAUBOLD, H. (2006): Die Saurierfährten *Chirotherium barthii* KAUP, 1835 – das Typusmaterial aus dem Buntsandstein bei Hildburghausen/Thüringen und das „*Chirotherium*-Monument“. – *Veröff. Naturhist. Mus. Schleusingen*, **21**: 3–31; Schleusingen.
- HAUBOLD, H. & KLEIN, H. (2000): Die dinosauroiden Fährten *Parachirotherium* – *Atreipus* – *Grallator* aus dem unteren Mittelkeuper (Obere Trias: Ladin, Karn,

- ?Nor) in Franken. – Hallesches Jb. Geowiss., **B22**: 59–85; Halle.
- HAUBOLD, H. & KLEIN, H. (2002): Chirotherien und Grallatoriden aus der Unteren bis Oberen Trias Mitteleuropas und die Entstehung der Dinosauria. – Hallesches Jb. Geowiss., **B24**: 1–22; Halle.
- HAUBOLD, H. & PUFF, P. (1976): Zur Genese der Solling-Folge (Untere Trias, Buntsandstein) in Thüringen. – Schriftenr. geol. Wiss., **6**: 63–80; Berlin.
- HOPPE, W. (1976): Die paläogeographisch fazielle Entwicklung im Südtteil des Germanischen Beckens. – Schriftenr. geol. Wiss., **6**: 5–62; Berlin.
- HORNSTEIN, F. (1876): Entdeckung von Tierfährten im Buntsandstein bei Karlshafen. – N. Jb. Min. Geol. Paläont., **1876**: 923–924; Stuttgart.
- HORNSTEIN, F. (1902): Vorlage von Belegmaterial zur Geologie der Umgegend von Cassel. – Z. dt. geol. Ges., **54**: 118–121; Berlin.
- KARL, C. & HAUBOLD, H. (1998): *Brachychirotherium* aus dem Coburger Sandstein (Mittlerer Keuper, Karn/Nor) in Nordbayern. – Hallesches Jb. Geowiss., **B20**: 33–58; Halle.
- KAUP, J. J. (1835): Über Thierfährten bei Hildburghausen. – N. Jb. Min., Geogn., Geol., Petrefaktenkde., **1835**: 227–228; Stuttgart.
- KLEIN, H. & HAUBOLD, H. (2003): Differenzierung von ausgewählten Chirotherien der Trias mittels Landmarkanalyse. – Hallesches Jb. Geowiss., **B25**: 21–35; Halle.
- KLEIN, H. & HAUBOLD, H. (2004): Überlieferungsbedingte Variation bei Chirotherien und Hinweise zur Ichnotaxonomie nach Beispielen aus der Mittel- bis Ober-Trias (Anisium–Karnium) von Nordbayern. – Hallesches Jb. Geowiss., **B26**: 1–15; Halle.
- KLEIN, H. & HAUBOLD, H. (2007): Archosaur footprints – potential for biochronology of Triassic continental sequences. – New Mexico Mus. Nat. Hist. Sci., Bull., **41**: 120–130; Albuquerque.
- KRÄMER, F. (1961): Sedimentuntersuchungen im Mittleren Buntsandstein Süd-Niedersachsens. – Diss. Univ. Frankfurt: 181 S.; Frankfurt a.M.
- KRÄMER, F. & KUNZ, H. (1968): Zur Sedimentation des höheren Buntsandsteins in Osthessen und Südniedersachsen. – Oberrhein. geol. Abh., **17**: 193–216; Karlsruhe.
- KRÄMER, F. & KUNZ, H. (1969): Zum Sedimentationsablauf im Buntsandstein. – Erdöl, Kohle, Erdgas, Petrochemie, **22**: 187–192; Hamburg.
- KRAUSE, D. (2006): Die Fährtenfläche von Eiterfeld (Osthessen) im Buntsandstein, Solling-Folge. – Dipl.-Arb. Univ. Halle: 95 S.; Halle a. d. Saale (unveröff.).
- 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. (1965): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, 1 : 25 000, Bl. 5323 Schlitz. – Hess. L.-Amt Bodenforsch; Wiesbaden.
- LAEMMLEN, M. (1963): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, 1 : 25 000, Bl. 5223 Queck. – Hess. L.-Amt Bodenforsch; Wiesbaden.
- LAEMMLEN, M. (1966): Der mittlere Buntsandstein und die Solling-Folge in Südhessen und den südlich angrenzenden Nachbargebieten. – Z. dt. geol. Ges., **116**: 908–949; Hannover.
- LANG, S. (2001): Zur Sedimentologie der Solling-Formation (Trias, Buntsandstein) im Thüringer Becken. – Dipl.-Arb. Univ. Jena: 201 S.; Jena (unveröff.).
- LEONARDI, G. (1987): Glossary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology. – 51 S.; Brasilia (Departamento Nacional da Producao Mineral).
- LEPPER, J. & RÖHLING, H.G. (1998): Buntsandstein. – Hallesches Jb. Geowiss., **B, Beih. 6**: 27–34; Halle.
- MOTZKA, R. & LAEMMLEN, M. (1967): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, 1 : 25 000 Bl. 5224 Eiterfeld. – Hess. L.-Amt Bodenforsch; Wiesbaden.
- PARRISH, J. T. (1993): Climate of the supercontinent Pangaea. – J. Geol., **101**: 215–233; Chicago.
- PARRISH, J. T. (1999): Pangaea und das Klima der Trias. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.): Trias – Eine ganz andere Welt.: 37–42; München (Pfeil Verlag).
- PAUL, G. S. (2002): Dinosaurs of the Air. The Evolution and Loss of Flight in Dinosaurs and Birds. – 460 S.; Baltimore, Maryland (The Johns Hopkins University Press).
- PEABODY, F. E. (1948): Reptile and amphibian trackways from the Moenkopi Formation of Arizona and Utah. – Univ. California Publ., Bull. Dept. Geol. Sci., **27**: 295–468; Berkeley.
- PUFF, P. (2000): Der Buntsandstein im Raum Sonneberg/Südthüringen. – Beitr. Geol. Thüringen, N.F. **7**: 33–53; Jena.
- RICHTER-BERNBURG, G. (1974): Stratigraphische Synopsis des deutschen Buntsandsteins. – Geol. Jb., **A25**: 127–132; Hannover.
- RÜHLE V. LILIENSTERN, H. (1944): Eine Dicyodontierfährte aus dem Chirotheriumsandstein von Heßberg bei Hildburghausen. – Paläont. Z., **23**: 368–385; Berlin.
- SERENO, P. C. (1991): Basal archosaurs: Phylogenetic relationships and functional implications. – J. Vertebr. Paleont., **11** (suppl. 4): 1–53; Lawrence, Kansas.
- SICKLER, F. K. L. (1834): Sendschreiben an Dr. Blumenbach über die höchst merkwürdigen Reliefs der Fährten urweltlicher Tiere in den Hessberger Steinbrüchen bei Hildburghausen. – Programm des herzogl. Gymnasiums zu Hildburghausen: 16 S.; Hildburghausen.
- THULBORN, R. A. (1982): Speeds and gaits of dinosaurs. – Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., **38**: 227–256; Amsterdam.
- THULBORN, T. (1990): Dinosaur Tracks. – 410 S.; London (Chapman and Hall).
- TRUSHEIM, F. (1961): Über Diskordanzen im Mittleren Buntsandstein Nordwestdeutschlands zwischen Ems und Weser. – Erdöl, **77**: 361–367; Hamburg.
- VOIGT, S. & HAUBOLD, H. (2000): Analyse zur Variabilität der Tetrapodenfährte *Ichniotherium cotta* aus dem Tambacher Sandstein (Rotliegend, Unterperm, Thüringen). – Hallesches Jb. Geowiss., **B22**: 17–58; Halle.
- WOLBURG, J. (1962): Über Schwermineralbildungen im Mittleren Buntsandstein des Weser-Ems Gebietes. – Erdöl, **78**: 7–10; Hamburg.
- WYCISK, P. (1984): Faziesinterpretationen eines kontinentalen Sedimentationstrogs (Mittlerer Buntsandstein, Hessische Senke – Berliner geowiss. Abh., **A54**: 104 S.; Berlin.
- ZWAN, C. J. VAN DER & SPAAK, P. (1992): Lower to Middle Triassic sequence stratigraphy and climatology of the Netherlands, a model. – Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., **91** (3/4): 277–290; Amsterdam.

8. Anlagen

Anhang 1

Schichtenverzeichnis des Profils im Steinbruch „Hartmann“.

Nach der Aufnahme durch J. Kulick aus der Zeit 1963/64, modifiziert nach handschriftlichen Unterlagen, vgl. Abb. 4.

Nr.	Mächtigkeit	Lithologie	Beschreibung
17	80 cm	Lehm	Fließerde, steinig
16	13–16 cm	Sandstein	mittelkörnig, hellgrünlich-grau, Oberfläche löchrig, eisenhaltig und schwach verkieselt, vermutlich sehr viele große Fährten, 5 cm über Basis eine Schichtfläche mit Chirotherienfährten keine deutliche Schrägschichtung, nach unten übergehend in Sandstein, wechselnd dicht und porig
15	32–36 cm	Sandstein	Oberfläche sehr wulstig und löchrig, 12 und 3 cm über Basis Lockerlage mit Chirotherienfährten
14	0,2 cm	Ton	grün
13	5 cm	Sandstein	ebenplattig, anscheinend viele Fährten, spaltet in 1–3 Bänke auf, viele gute lange Wurmspuren, Rippelmarken
12	0,1 cm	Ton	grün
11	2 cm	Sandstein	gute Rippelmarken, einige Fährten
10	0,3 cm	Ton	
9	36 cm Absatz (Treppe) zur Bude	Sandstein	spaltet in 3 Bänke, in sich schräg geschichtet, Oberfläche glatt mit zahlreichen Fährten von großen und kleinen Tieren, leichte Rippelung, Fährten sind durchgetreten und gut abgebildet, 20 cm unter Oberfläche Spaltfläche der Schrägschicht ebenfalls mit Fährten
	0,1 cm	Ton	
8	13 cm	Sandstein	plattig, einzelne Fährten, schwach schräg geschichtet, eher wellig
7	0,3 cm	Ton	grün, Trockenrisse, viele Wurmspuren
6	5,5 cm	Sandstein	plattig, schlechte Fährten
5	0,3 cm	Ton	
4	0,3–1 cm	Sandstein	obere Fährtenfläche der Bruchsohle mit vielen Fährten, Oberfläche allgemein glatt, Fließrinnen um NW → SE mit Strömungsrippeln, massenhafte Wurmspuren, die oberste Lage blättert ab
3	39 cm	Sandstein	schräg geschichteter Sandstein, mit Wurmspuren
2	0,3–0,1 cm	Sandstein	Kriechspuren, Trockenrisse, Regentropfen, feinkörnig mit massenhaften Wurmspuren, hat untere Fährtenfläche überdeckt
1	2–5 cm	Sandstein	untere Fährtenfläche mit kleinen Fährten und vielen Rippelmarken, der Sandstein „blättert“ auf, in diesen wurden die Fährten gedrückt und dann von Nr. 2 zum Teil ausgelöscht, (auf Nr.1 nur mäßige Wurmfauna). Kleine Rippelmarken streichen etwas SW–NE, Strömungsrippeln und Rinnen deuten auf ablaufendes Wasser, Doppelkämme durch Wellenschlag

Anhang 2

Nachweis der Abgüsse und Originale

1. Hessisches Landesmuseum Darmstadt (HLMD)

In der Sammlung des HLMD sind zahlreiche Abgüsse vorhanden. Zu einigen ist ein Gegendruck angefertigt worden, der dem Originaleindruck auf der Fläche entspricht. Die Stücke sind fortlaufend nummeriert und teilweise mit einer Nord-Orientierung versehen. Der Bestand ist folgender:

Nr.	Inventarnummer	Bestimmung	Beschreibung
1	V4644 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i> , nicht bestimmbar	1 Handeindruck, 1 Fußendruck 2 Eindrücke
2	V4645 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	2 Handeindrücke, 4 Fußendrucke
3	V4646 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	6 Handeindrücke, 5 Fußendrucke
4	V4647 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	6 Handeindrücke, 5 Fußendrucke
5	V4648 F1968/16	nicht bestimmbar	3 Handeindrücke, 3 Fußendrucke
6	V4649 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i> , nicht bestimmbar	3 Handeindrücke, 4 Fußendrucke 1 Handeindruck, 1 Fußendruck
7	V4650 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	3 Handeindrücke, 3 Fußendrucke
8	V4651 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i> , <i>Dicynodontipus</i> sp.	3 Handeindrücke, 3 Fußendrucke 1 Eindruck
9	V4652 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	4 Handeindrücke, 4 Fußendrucke
10	V4653 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	4 Handeindrücke, 5 Fußendrucke
11	V4654 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	4 Handeindrücke, 4 Fußendrucke
12	V4655 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	4 Handeindrücke, 4 Fußendrucke
13	V4656 F1968/16	<i>Chirotherium sickleri</i>	3 Handeindrücke, 3 Fußendrucke
14	V4657 F1968/16	nicht bestimmbar	2 Eindrücke
15	V4658 F1968/16	cf. <i>Chirotherium barthii</i>	1 Fußendruck
16	V4659 F1968/16	nicht bestimmbar	1 Fußendruck
17	V4660 F1971/4	cf. <i>Chirotherium</i>	2 Handeindrücke, 2 Fußendrucke
18	V46(61) F1971/4	nicht bestimmbar	3 Handeindrücke, 3 Fußendrucke
19	V4662 F1971/4	nicht bestimmbar	4 Handeindrücke, 4 Fußendrucke
20	V4663 F1971/4	nicht bestimmbar	2 Handeindrücke, 2 Fußendrucke
21	V4664 F1971/4	nicht bestimmbar	2 Eindrücke
22	V4665 F1971/4	nicht bestimmbar	1 Handeindruck, 1 Fußendruck
23	V4666 F1971/4	nicht bestimmbar	1 Handeindruck, 1 Fußendruck
24	V4667 F1971/4	nicht bestimmbar	1 Handeindruck, 1 Fußendruck
25	V4668 F1971/4	nicht bestimmbar	2 Eindrücke

2. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)

Nach Erhebungen im Bohrkernlager des HLUG in Hünstetten/Limbach durch R. Motzka-Nöring und M. Hottenrott fanden sich 18 Gipsabgüsse und Originale. Der Bestand ist:

Nr.	Original/Gips	Größe in m	Bestimmung	Beschreibung
HLUG 01	Gips	1,45 x 0,25	<i>Chirotherium sickleri</i>	6 Hand- 6 Fußabdrücke
HLUG 02	Gips	0,70 x 0,25	nicht bestimmbar	2 Hand- 5 Fußabdrücke
HLUG 03	Gips	0,55 x 0,30	<i>Isochirotherium</i> sp.	1 Hand- 1 Fußabdruck
HLUG 04	Gips	0,40 x 0,25	nicht bestimmbar	1 Fußabdruck
HLUG 05	Gips	0,60 x 0,25	cf. <i>C. sickleri</i>	3 Hand- 3 Fußabdrücke
HLUG 06	Gips	0,70 x 0,45	nicht bestimmbar	1 Eindruck
			<i>Dicynodontipus</i> sp.	3 Eindrücke
HLUG 07	Original	0,68 x 0,45	<i>Chirotherium barthii</i>	1 Fußabdruck
HLUG 08	Gips	0,80 x 0,40	nicht bestimmbar	2 Hand- 1 Fußabdruck
HLUG 09	Gips	1,40 x 0,30	cf. <i>Dicynodontipus</i> sp.	4 Hand- 6 Fußabdrücke
HLUG 10	Gips	1,10 x 0,25	cf. <i>Dicynodontipus</i> sp.	6 Eindrücke
HLUG 11	Gips	0,50 x 0,40	nicht bestimmbar	1 Fußabdruck
HLUG 12	Original	0,35 x 0,22	nicht bestimmbar	1 Hand- 1 Fußabdruck
HLUG 13	Gips	1,50 x 0,30	cf. <i>Dicynodontipus</i> sp.	7 Hand- 7 Fußabdrücke
HLUG 14	Gips	0,90 x 0,25	nicht bestimmbar	3 Eindrücke
HLUG 15	Original	0,80 x 0,30	nicht bestimmbar	3 Eindrücke
HLUG 16	Gips	0,50 x 0,25	<i>Chirotherium sickleri</i>	2 Hand- 2 Fußabdrücke
HLUG 17	Gips	0,45 x 0,25	<i>Chirotherium barthii</i>	1 Hand- 1 Fußabdruck
HLUG 18	Original	nicht erfasst	<i>Chirotherium</i> sp.	1 Fußabdruck

3. Interessengemeinschaft Saurierspuren Eiterfeld e. V. (IGSE)

Die Interessengemeinschaft verfügt über folgende originale Fährtenplatten und Einzeldrucke:

Nr.	Bestimmung	Beschreibung
IGSE 01	<i>Chirotherium barthii</i>	1 Fußabdruck
IGSE 02	nicht bestimmbar (event. <i>Dicynodontipus</i>)	3 Eindrücke
IGSE 03	nicht bestimmbar	mindestens 5 Eindrücke
IGSE 04	<i>Chirotherium</i> sp.	1 Hand- und 1 Fußabdruck
IGSE 05	nicht bestimmbar	1 Eindruck

Anhang 3

Fährten der Fläche – Kurzbeschreibung, dazu auch Anhang 4 Tabellen 5 und 6

Alle auf dem Plan dokumentierten Fährten der oberen und unteren Fläche sind fortlaufend nummeriert aufgelistet, mit jeweiliger Bestimmung und einer Kurzbeschreibung.

Bei der Nummerierung stehen „o“ und „u“ für obere und untere Fläche, als zweistellige Zahl folgt die der jeweiligen Fährte (in Klammern ggf. die Fährten-Nummer von der Erstaufnahme). Zur Beschreibung vgl. Kap. 3 und Kap. 4. In einem zweiten Absatz ist gegebenenfalls auf Feldnotizen von J. Kulick Bezug genommen.

1. Obere Fläche

o01 *Chirotherium* sp.

Länge der Fährte: 1,1 m, Fußeindrücke: 8, Handeindrücke: 2, Stride: 38 cm, Fußlänge: 6 cm, Hand-Fuß-Abstand: 5 cm. Die Fährte verläuft in einem leichten Bogen. Die Gangart ist gehend, wobei die Geschwindigkeit im Verlauf der Fährte abnimmt und dabei zunehmend die Eindrücke der Hände auf dem Substrat vorliegen. Das Tier lief bei höherer Geschwindigkeit scheinbar biped.

Kulick erwähnt diese Fährte als sehr undeutliche Kleinfährte von *Chirotherium*. Auf dem Originalplan ist die Fährte nicht nummeriert, in den Aufzeichnungen trägt sie vermutlich Nummer 33.

o02 (15) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 14,5 m, Fußeindrücke: 30, Handeindrücke: 28, Stride: 98 cm, Fußlänge: 15 cm, Hand-Fuß-Abstand: 12,42 cm. Die geradlinige Fährte zeigt gleichförmig schnelles Gehen. Der Hand-Fuß-Abstand variiert, er ist jedoch über die Gesamtdistanz recht gleichförmig. Einigen Fußeindrücken fehlen deutliche proximale Begrenzungen.

Nach Kulick ist es eine Eilfährte von *C. barthii* mit großer Schrittlänge und großer Gangbreite, Zeh 5 fehlt meist, und ein Rückschubwall liegt in der Fußmitte. Die Tiefe der Eindrücke beträgt 7–8 mm an den Krallen. Die Hände liegen unmittelbar vor den Füßen und sind stets vollständig mit allen Zehen überliefert.

o03 (14) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 15,7 m, Fußeindrücke: 28, Handeindrücke: 25, Stride: 116 cm, Fußlänge: 16 cm, Hand-Fuß-Abstand: 12,95 cm. Die Fährte verläuft geradlinig in Richtung Nord-Süd, mit alternierender, schnürender Anordnung der Eindruckpaare. Gangart - schnelles Gehen.

Kulick beschreibt die Erhaltung als „Steinkerne“. Die Eindrucktiefe beträgt 20–21 mm an den vorderen Zehengliedern, zudem sind Rückschubwalle erhalten.

o04 *Chirotherium* sp.

Länge der Fährte: 1,65 m, Fußeindrücke: 5, Handeindrücke: (1), Stride: 80 cm, Fußlänge: 10 cm. Undeutliche Fährte, es

fehlen proximale sowie z.T. laterale Begrenzungen der Eindrücke. Gangart - langsames Traben mit leichter Beschleunigung.

Auf dem originalen Fährtenplan ist diese Fährte nicht nummeriert, in den Aufzeichnungen Kulick's ist es vermutlich Nummer 31.

o05 (24) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 6,3 m, Fußeindrücke: 15, Handeindrücke: 15, Stride: 93 cm, Fußlänge: 15,7 cm, Hand-Fuß-Abstand: 13,25 cm. Die Fährte verläuft parallel zu den Fährten o03, o26 und o31. Gangart - gleichförmiges Gehen. Die Hand-Fuß-Paare liegen alternierend, bei gleichmäßigen Hand-Fuß-Abständen.

Kulick beschreibt die Fährte als „stark schnürend“ bei kleiner Schrittlänge. Die Eindrücke liegen als „Steinkerne“ mit schwachen Seitenwülsten vor.

o06 nicht bestimmbar

Länge der Fährte: > 2,5 m, Fußeindrücke: 10, Handeindrücke: (1), Stride: 88 cm, Fußlänge: 13 cm. Die Geschwindigkeit verringert sich im Verlauf der Fährte von Traben zu Gehen. Das Fährtenmuster ist unregelmäßig, die Morphologie der Eindrücke und die proximalen Begrenzungen sind undeutlich.

o07 (29) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: > 4 m, Fußeindrücke: 9, Handeindrücke: 5, Stride: 110 cm, Fußlänge: 15 cm, Hand-Fuß-Abstand: 15 cm. Gangart - schnelles Gehen, bei sehr gleichförmiger Bewegung und alternierender Anordnung der Eindruckpaare. Gelegentlich fehlen die proximalen Begrenzungen der Fußeindrücke, und es sind nur die Metatarsal-Phalangenpolster eingedrückt, die Tiefe der Zeheneindrücke beträgt 12 mm.

o08 (28) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 7,4 m, Fußeindrücke: 15, Handeindrücke: 13, Stride: 105 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand-Fuß-Abstand: 12,5 cm. Verlauf bemerkenswert geradlinig etwa West-Ost. Stark schnürende und alternierende Anordnung der Eindruckpaare. Gang - gehend mit leichter Beschleunigung, wodurch der Hand-Fuß-Abstand abnimmt. Die Eindrücke sind sehr deutlich und vollständig, sie liegen stets als „Steinkerne“ vor und weisen Seitenwülste auf.

o09 *Chirotherium* sp.

Länge der Fährte: 3,9 m, Fußeindrücke: 9, Handeindrücke: 8, Stride: 107 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: 11,67 cm. Fährtenverlauf in leichtem Bogen. Die Eindrücke sind undeutlich und die proximalen Begrenzungen fehlen. Die scheinbar hohe Geschwindigkeit (siehe Anhang 4, Tab. 5) ist eventuell

durch eine zu niedrig bewertete Fußlänge bedingt. Gangart - schnelles Rennen bis Traben. Der Hand-Fuß-Abstand verhält sich proportional zur Geschwindigkeit.

o10 (27) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 12,55 m, Fußeindrücke: 29, Handeindrücke: 22, Stride: 86 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand-Fuß-Abstand: 13,78 cm. Fährtenverlauf in leichtem Bogen von West nach Ost, etwa parallel zu Fährte o08. Eindrücke vollständig bei alternierender Anordnung. Im mittleren Abschnitt erfolgt eine leichte Beschleunigung, aber noch im Bereich Gehen. Die Hand-Fuß-Abstände verhalten sich umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit.

Kulick beschreibt die Fährte als sehr deutlich. Die Eindrücke sind als „Steinkerne“ mit starken Seitenwülsten erhalten, die Hände liegen stets dicht an den Füßen.

o11 (26) *Isochirotherium sp., cf. I. herculis*

Länge der Fährte: 4,9 m, Fußeindrücke: 9, Handeindrücke: 7, Stride: 117 cm, Fußlänge: 20,6 cm, Hand-Fuß-Abstand: 14,43 cm. Gangart - gleichförmig gehend. Ein abnehmender Hand-Fuß-Abstand folgt ansteigender Geschwindigkeit. Zum Ende sind die Eindrücke undeutlich.

Kulick beschreibt diese Fährte als „großes Exemplar von *Chirotherium barthii*“ mit sehr schlechten Eindrücken. Diese sind 6–9 mm tief mit Seitenwülsten. Das 4. Eindruckpaar der Fährte soll 1963 oder 1964 in der Fuldaer Zeitung abgebildet gewesen sein.

o12 (25) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 7,1 m, Fußeindrücke: 23, Handeindrücke: 6, Stride: 57 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: ~ 0 cm. Die Hände und Füße sind offenbar ineinander getreten, bei dennoch gehender Gangart. Die Eindrücke zeigen keine deutlichen Umrisse und proximale Begrenzungen fehlen, Eindrucktiefe bei 9 mm.

o13 (8) *Isochirotherium sp., cf. I. herculis*

Länge der Fährte: 9,5 m, Fußeindrücke: 15, Handeindrücke: 13, Stride: 131 cm, Fußlänge: 30 cm, Hand-Fuß-Abstand: 19,09 cm. Auffällig sind die vergleichsweise großen Fußeindrücke und die erkennbaren Konturen der Zehen. Der Gang ist gleichförmig gehend, und die Eindruckpaare liegen alternierend bei konstantem Hand-Fuß-Abstand. Die Füße weisen proximal Schleifspuren auf.

Kulick bezeichnet die Folge als „Spreizfußfährte“ oder „Drachenfuß“. Die Abdrücke sind in weiches Sediment getreten worden und die Ränder stark verlaufen, so dass sie nur mit schwachen Wülsten vorliegen, Eindrucktiefe 23–34 mm.

o14 (23) *Dicynodontipus sp.*

Länge der Fährte: 7,5 m, Fußeindrücke: 30, Handeindrücke: 13, Stride: 47 cm, Fußlänge: 5,9 cm, Hand-Fuß-Abstand:

5,83 cm. Die Eindrücke sind undeutlich ohne proximale Begrenzungen. Die Handeindrücke werden im Verlauf der Fährte deutlicher, das Fährtenmuster ist alternierend. Bei etwas ungleichmäßiger Geschwindigkeit liegt die Gangart im Bereich Traben.

Kulick beschreibt die Eindrücke als rundlich, z.T. mehr breiter als lang mit Rückschubwällen, die Zehen sind am stärksten eingedrückt. Die Hände sind sehr klein, und liegen schwach einwärts gedreht vor den Füßen. Eindrucktiefe 3–6,5 mm.

o15 (22) *Dicynodontipus sp.*

Länge der Fährte: >8 m, Fußeindrücke: 26, Handeindrücke: 21, Stride: 64 cm, Fußlänge: 6,15 cm, Hand-Fuß-Abstand: 11,1 cm. Eindrücke am Anfang der Fährte klein und undeutlich. Im Verlauf werden die Eindrücke größer und etwas deutlicher. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig bei schnellem Trab, mit mehrfach wechselnder Geschwindigkeit, der Hand-Fuß-Abstand verhält sich proportional zur Geschwindigkeit bzw. zum Stride.

Kulick erwähnt eine Fußstellung vergleichbar *Chirotherium*, allerdings sind die Hände im Verhältnis zu den Füßen sehr groß und die Gangbreite auffällig weit. Eindrucktiefe 9–10 mm.

o16 (21) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 9,3 m, Fußeindrücke: 20, Handeindrücke: 15, Stride: 102 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand-Fuß-Abstand: 13,81 cm. Relativ geradlinige Fährte mit alternierender Anordnung der Eindruckpaare. Proximale Begrenzungen der Eindrücke fehlen, meist sind nur die Zehen abgebildet. Gangart - gleichförmiges Gehen.

Das Tier lief auf sehr festem Sediment. Eindrücke 14 mm tief mit schwachen Wülsten.

o17 (20) *Dicynodontipus sp.*

Länge der Fährte: 10,3 m, Fußeindrücke: 53, Handeindrücke: 25, Stride: 32 cm, Fußlänge: 5,55 cm, Hand-Fuß-Abstand: ~ 0 cm. Verlauf leicht S-förmig. Hände etwas kleiner als die Füße und stets einwärts gestellt. Die Handeindrücke liegen auf der Mittellinie, innen neben den Füßen. Es liegt der seltene Fall von Übertreten der Hände vor. Einigen Eindrücken fehlen proximale Begrenzungen. Gangart - gehend bei mehrfach wechselnder Geschwindigkeit. Die Unregelmäßigkeiten im Fährtenmuster sind auf den Kurvengang und die Geschwindigkeit zurückzuführen.

Nach Kulick sind die Eindrücke im vorderen Teil stets etwas tiefer eingedrückt als im hinteren Teil, gelegentlich liegen schwache Rückschubwälle vor. Eindrucktiefe 4–6 mm. Von dieser Fährte sollen 3 Gipsabgüsse genommen worden sein.

o18 (19) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 9,2 m, Fußeindrücke: 20, Handeindrücke: 19, Stride: 99 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand-Fuß-Abstand:

14,67 cm. Regelmäßige und gradlinige alternierende Anordnung der Eindruckpaare. Die Fährte verläuft parallel zu den Fährten o16 und o19. Der Hand-Fuß-Abstand ist konstant bei gleichförmigem Gehen.

Eindrucktiefe im Krallenbereich 18–20 mm, Erhaltung als Steinkerne. Es sind Seitenwülste mit deutlichen Konturen ausgebildet. Das ist ein Hinweis auf weiches Substrat.

o19 (18) cf. *Brachychirotherium* sp.

Länge der Fährte: 8,5 m, Fußeindrücke: 10, Handeindrücke: 3, Stride: 175 cm, Fußlänge: 20 cm. Die Fährte verläuft parallel zu o16 und o18. Eindrücke sehr flach bis fehlend. Mitunter kann man die einzelnen Zehen erkennen. Es sind flache Rückschubwälle ausgebildet, hinter den linken Fußeindrücken liegen Zehenschleifspuren, die vor dem Aufsetzen des Fußes entstanden sind. Die Abdrücke des linken Fußes sind stets deutlicher als die des rechten. Das Tier lief vergleichsweise sehr schnell. Auf einen langsameren Abschnitt folgte erneute Beschleunigung. Die für einen kurzen Abschnitt errechnete Höchstgeschwindigkeit liegt bei über 13 km/h. Das Substrat war vermutlich sehr fest, die Eindrucktiefe beträgt nur 15 mm.

o20 (17) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 6 m, Fußeindrücke: 14, Handeindrücke: 9, Stride: 90 cm, Fußlänge: 20,25 cm, Hand-Fuß-Abstand: 16,38 cm. Eindrücke in alternierender Anordnung. Gangart relativ gleichförmig gehend. Hand-Fuß-Abstand etwas variierend aber insgesamt gleichförmig. Der Verlauf der Fährte verliert sich auf der Fläche.

Gelegentlich zeigen die rechten Fußzehen schwache Schleifspuren, Eindrucktiefe 15–21 mm, Konturen der Eindrücke sind undeutlich und ohne Wülste, im Verlauf der Fährte zeigen zunehmend flachere Eindrücke deutlichere Konturen.

o21 (16) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 10,1 m, Fußeindrücke: 18, Handeindrücke: 13, Stride: 119 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand-Fuß-Abstand: 12 cm. Das Fährtenmuster ist alternierend. Im Verlauf der Fährte werden die Umrisse der Füße deutlicher, deren proximale Begrenzungen aber undeutlicher. Markant ist an der Fährte eine Verringerung der Schrittlänge, d.h. die Gangart verlangsamt sich vom Traben zum langsamen Gehen. Dabei verändert sich der Hand-Fuß-Abstand in der Tendenz umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit.

Das Sediment muss sehr weich gewesen sein, denn die Eindrücke sind verlaufen und weisen vorn Wülste auf aber keine Rückschub- oder Seitenwülste. Nach SW werden die Eindrücke flacher, ihre Tiefe beträgt 14–16 mm.

o22 (12) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 15,2 m, Fußeindrücke: 51, Handeindrücke: 41, Stride: 62 cm, Fußlänge: 20,4 cm, Hand-Fuß-Abstand:

15,71 cm. Das Fährtenmuster ist alternierend, bei sehr variablem Hand-Fuß-Abstand. Die Eindrücke sind unregelmäßig und ihre Morphologie undeutlich. Auffällig sind die Schleifspuren der Zehen im gesamten Verlauf der Fährte. In D 8 kann man eine Standspur und in I 9 b vermutlich eine „Scharrspur“ der linken Hand erkennen. Auffällig ist ein 330°-Kurvenverlauf, so dass die Fährte anfangs nach NE, dann nach einer scharfen Wendung etwa in der Mitte nach Süden und dann in einem Bogen in Richtung Norden verläuft. Der Gang war sehr langsames bis normales Gehen. Im Bereich der Kurven war die Geschwindigkeit nach den kurzen Schrittlängen zu urteilen deutlich reduziert, auf den mehr geradlinigen Abschnitten kann man wieder eine Beschleunigung erkennen.

Kulick hat diese Fährte passend als „Schleifspurfährte“ bezeichnet.

o23 (13) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 6 m, Fußeindrücke: 12, Handeindrücke: ?, Stride: 118 cm, Fußlänge: 20 cm. Die Konturen der Eindrücke sind undeutlich, und Handeindrücke fehlen vollständig. An den ersten Fußeindrücken dieser Fährte sind noch die Zehen erkennbar, danach folgen nur undeutliche Eindrücke mit starken Rückschubwällen. Die Bewegung war gleichförmiges Gehen. Die Eindrucktiefe beträgt 4–14 mm und 16 mm im Krallenbereich.

o24 (neu) *Chirotherium* sp.

Länge der Fährte: 5,8 m, Fußeindrücke: 11, Handeindrücke: ?, Stride: 80 cm, Fußlänge: 10,4 cm. Das Fährtenmuster ist unvollständig aber regelmäßig. Die Fußeindrücke haben keine deutlichen Konturen. Das Tier bewegte sich sehr gleichförmig im schnellen Gehen, wobei die Hände scheinbar nicht aufgesetzt worden sind.

o25 (10) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 9,7 m, Fußeindrücke: 19, Handeindrücke: 17, Stride: 106 cm, Fußlänge: 20,4 cm, Hand-Fuß-Abstand: 14,4 cm. Die Fährte verläuft geradlinig SW-NE. Die Eindrücke sind vollständig und die Anordnung der Eindruckpaare ist alternierend. Der Gang war relativ gleichförmiges Gehen, teilweise ist der Hand-Fuß-Abstand umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit.

Es liegt Steinkern-Erhaltung vor, mit guten Konturen und schwachen Wülsten bei 12–15 mm Eindrucktiefe.

o26 (11) *Chirotherium* sp.

Länge der Fährte: 11,3 m, Fußeindrücke: 34, Handeindrücke: (3), Stride: 61 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: 5,06 cm. Die Fährte verläuft parallel zu den Fährten o03, o05 und o31. Nach Norden verliert sich die Fährte vermutlich auf Grund des festeren Substrats. Die Eindrücke sind undeutlich und die proximalen Begrenzungen fehlen. Die Bewegung erfolgte bei schnellem Gehen etwas ungleichförmig.

Die Eindrucktiefe beträgt etwa 16 mm, Handeindrücke sind nur angedeutet.

o27 (9) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 8,5 m, Fußeindrücke: 33, Handeindrücke: 30, Stride: 48 cm, Fußlänge: 7 cm, Hand–Fuß-Abstand: 13 cm. Das Fährtenmuster ist gleichförmig und alternierend. Hände und Füße sind stets ohne proximale Begrenzungen, sehr flach eingedrückt und zeigen keine Zehenkonturen. Das Tier bewegte sich normal bis schneller gehend. Nach einer Beschleunigung wurde der Gang langsamer, wobei die Hand–Fuß-Abstände etwa konstant bleiben.

Die Hände sind zum Teil stark einwärts gedreht. Die Eindrucktiefe beträgt 3–10 mm.

o28 (7) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 7,5 m, Fußeindrücke: 12, Handeindrücke: 9, Stride: 136 cm, Fußlänge: 14,58 cm, Hand–Fuß-Abstand: 13 cm. Die Fährte zeigt geradlinig schnürenden Gang, die Eindrücke sind teilweise unvollständig. Das Tier ist getrabt, auf eine Beschleunigung folgt Verlangsamung. Die Tendenz beim Hand–Fuß-Abstand lässt sich bei den wenigen Handeindrücken nicht einschätzen.

Kulick beschreibt die Fährte als „Eilfährte“, mit großer Schrittlänge und starken „Rückschubhäufchen“. Der 5. Zeh ist nicht eingedrückt, die Eindrucktiefe beträgt 11–16 mm.

o29 (6) nicht bestimmbar

Länge der Fährte: 1,5 m, Fußeindrücke: 8, Handeindrücke: ?, Stride: 38 cm, Fußlänge: 7 cm. Die Eindrücke dieser Fährte sind klein und undeutlich. Die Gangart verändert sich vom schnellen Gehen zum Gehen, wobei aber die Fußlänge für diese Bewertung zu niedrig veranschlagt ist.

Kulick beschreibt 5 mm tiefe Eindrücke mit starken Rückschubwällen. Eine Negativ-Platte sollte sich laut Kulick in der Sammlung des Hlfb (heute: HLUG) befinden (Beschreibung: „H. Zeh am längsten“).

o30 (5) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 2,6 m, Fußeindrücke: 14, Handeindrücke: ?, Stride: 54 cm, Fußlänge: 9,9 cm. Die Fährte verläuft parallel zu o20 und o32, von NE nach SW. Der Gang ist geradlinig und schnürend, Handeindrücke sind nicht vorhanden. Die 8 mm tiefen Eindrücke weisen fast keine Konturen auf. Der Gang ist gehend und wechselt zwischen Beschleunigungen und Verzögern.

o31 (4) *Chirotherium* sp.

Länge der Fährte: 9,3 m, Fußeindrücke: 23, Handeindrücke: ?, Stride: 66 cm, Fußlänge: 9,9 cm. Die Fährte verläuft parallel zu o03, o05 und o26. Das Fährtenmuster ist ungleichförmig, meist fehlen die proximalen Begrenzungen der Eindrücke. Das Tier geht zunächst lange gleichförmig und schnell, ver-

langsam und beschleunigt dann wieder in den Trab.

Die Abdrücke sind undeutlich, meist sind nur vier Zehen erhalten und ihre Tiefe beträgt 7 mm.

o32 (3) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 4,1 m, Fußeindrücke: 10, Handeindrücke: 9, Stride: 93 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand–Fuß-Abstand: 13 cm. Die Fährte ist geradlinig, parallel zu o20 und o30. Durch den gleichförmigen Gang ist der Hand–Fuß-Abstand konstant.

Kulick beschreibt die Ränder der Eindrücke als stark verlaufen und distal ohne Konturen, wahrscheinlich war das Sediment weich. Die Eindrucktiefe beträgt 9–25 mm. Negativplatten sollen vorhanden sein.

o33 (2) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 0,8 m, Fußeindrücke: 3, Handeindrücke: 2, Fußlänge: 20 cm, Hand–Fuß-Abstand: 14,2 cm. Zu 2 Eindruckpaaren mit gleichem Hand–Fuß-Abstand gehört noch ein unvollständiger Fußeindruck.

o34 (34) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 2,5 m, Fußeindrücke: 12, Handeindrücke: 7, Stride: 93 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand–Fuß-Abstand: 14,2 cm. In F 13 ist vielleicht eine Standspur zu sehen, der weitere Verlauf ist nicht eindeutig. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig, obwohl gleichförmiges Gehen vorliegt.

o35 (neu) *Chirotherium barthii*

Es handelt sich um mehrere Eindrücke einer Trampelstelle, die keine nachvollziehbaren Schrittmuster erkennen lässt. Insgesamt kann man 50 Eindrücke mit undeutlichen Konturen zählen.

2. Untere Fläche

u01 (36) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 2 m, Fußeindrücke: 15, Handeindrücke: 14, Stride: 35 cm, Fußlänge: 8,3 cm, Hand–Fuß-Abstand: 5,4 cm. Die Eindrücke sind sehr klein, die Füße messen nur 6,5 cm und die Hände weisen keine proximalen Begrenzungen auf. Die Bewegung ist sehr ungleichförmig im Bereich Gehen. Die Geschwindigkeit fällt erst ab und steigt dann wieder an, der Hand–Fuß-Abstand bleibt jedoch gleichmäßig.

u02 (35) *Isochirotherium* sp., cf. *I. herculis*

Länge der Fährte: ~ 1 m, nur 5 Fußeindrücke, Fußlänge: 23 cm. Die 5 Fußeindrücke liegen nicht auf einer Linie. Nur beim ersten Eindruck sind die Konturen der Zehen erkennbar.

u03 (34) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 2 m, Fußeindrücke: 11, Handeindrücke: 11, Stride: 42 cm, Fußlänge: 10,68 cm, Hand–Fuß-Abstand: 12,3 cm. Das Fährtenmuster ist gleichmäßig alternierend. Die Eindrücke sind flach und undeutlich. Die Bewegung entspricht

etwas beschleunigtem Gehen. Der Hand–Fuß-Abstand verhält sich umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit.

u04 (37) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 2,4 m, Fußindrücke: 8, Handindrücke: 5, Stride: 68 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: ?. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig. Die Gangart wechselt vom Gehen in den Trab und verlangsamt dann wieder. Kulick erwähnt bei dieser Fährte die sehr langen Schritte.

u05 (44) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 6,9 m, Fußindrücke: 22, Handindrücke: 22, Stride: 55 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: 9,86 cm. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig mit alternierenden Eindruckpaaren. Die Bewegung ist ungleichförmig gehend. Das partielle Fehlen von Handindrücken im Verlauf der Fährte ist eher vom Substrat als durch die Geschwindigkeit bzw. die Gangart bedingt. Zwischen Hand–Fuß-Abstand und Geschwindigkeit ist kein Zusammenhang erkennbar. Kulick beschreibt die Fährte als schnürend mit langen Schritten.

u06 (neu) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 2,3 m, Fußindrücke: 5, Handindrücke: 4, Stride: 117 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand–Fuß-Abstand: 17,5 cm. Die Konturen der Eindrücke sind undeutlich, nur bei einem Fußendruck erkennt man alle Zehen deutlich. Der Gang ist gehend und wird langsamer im Verlauf der Fährte.

u07 (38) nicht bestimmbar

Länge der Fährte: 0,7 m, Fußindrücke: 9, Handindrücke: ?, Stride: 27 cm, Fußlänge: 8 cm. Das Fährtenmuster und die Konturen der Eindrücke sind undeutlich. Die Gangart liegt im Bereich langsamen Gehens.

u08 (39) nicht bestimmbar

Länge der Fährte: 1,7 m, Fußindrücke: 9, Handindrücke: ?, Stride: 41 cm, Fußlänge: 10 cm. Vermutlich sind die Hände von den Füßen übertreten. Die proximalen Begrenzungen der Eindrücke fehlen. Die Bewegung entspricht ungleichförmigem Gehen. Die sehr undeutliche Fährte beschreibt Kulick als „*Chirotherium* sp.“. Es sind nur Füße zu erkennen.

u09 (40) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 3,6 m, Fußindrücke: 7, Handindrücke: 2, Stride: 135 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand–Fuß-Abstand: ?. Die Fährte ist undeutlich, die Gangart verändert sich vom Traben zum Gehen. Proximale Begrenzungen der Eindrücke fehlen. Die Hände sind Substrat-bedingt nicht überliefert.

u10 (neu) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 1,2 m, Fußindrücke: 4, Handindrücke: 4,

Stride: 80 cm, Fußlänge: 17,33 cm, Hand–Fuß-Abstand: 13,33 cm. Die wenigen Eindrücke dieser Fährte zeigen undeutliche Konturen und die Gangart liegt im Bereich Gehen.

u11 (65) *Dicynodontipus* sp.

Länge der Fährte: 4,2 m, Fußindrücke: 22, Handindrücke: 14, Stride: 40 cm, Fußlänge: 5 cm, Hand–Fuß-Abstand: 4 cm. Die Fährte ist undeutlich mit kleinen Eindrücken. Die Bewegung ist im ersten Abschnitt gleichförmig, darauf folgt zweimal eine Beschleunigung und eine Verringerung der Geschwindigkeit. Die Gangart liegt bei langsamem bis schnellem Traben. Der Hand–Fuß-Abstand verhält sich proportional zur Geschwindigkeit.

Kulick beschreibt die Fußindrücke als kleiner gegenüber den Handindrücken. Möglicherweise liegt bei dieser Fährte ein weites Übertreten der Hände durch die Füße vor (aus dem Fährtenplan ist dies nicht eindeutig erkennbar).

u12 (41) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 2,2 m, Fußindrücke: 12, Handindrücke: 6, Stride: 48 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: 6,4 cm. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig, die Eindrücke unvollständig. Meist sind lediglich die Füße überliefert und die Hände nur schwach angedeutet. Die Geschwindigkeit ändert sich im Verlauf der Fährte vom Gehen zu langsamem Gehen.

u13 (neu) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 1,1 m, Fußindrücke: 7, Handindrücke: 3, Stride: 39 cm, Fußlänge: 10,4 cm, Hand–Fuß-Abstand: 8,7 cm. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig und die Konturen der Eindrücke undeutlich, die Bewegung erfolgte gleichmäßig mit leichter Beschleunigung im Bereich langsamen Gehens.

u14 (42) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 3,4 m, Fußindrücke: 13, Handindrücke: 13, Stride: 43 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: 7,43 cm. Das Fährtenmuster ist gleichmäßig alternierend, die Bewegung liegt im Bereich Gehen. Der Hand–Fuß-Abstand verhält sich etwa proportional zur Geschwindigkeit. Nach Kulick sind im Nordteil sehr schöne Eindrücke vorhanden, die Schritte sind zunächst kurz und breit, dann lang.

u15 (43) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 6,5 m, Fußindrücke: 30, Handindrücke: 25, Stride: 42 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: 10,61 cm. Das Fährtenmuster ist unregelmäßig bei alternierender Anordnung der Eindruckpaare. Die Eindrücke zeigen deutliche Konturen. Die Gangbreite der Fährte variiert bei gleichförmigem Gehen mit Tendenz zur Beschleunigung. Der Hand–Fuß-Abstand ist sehr unregelmäßig.

u16 (neu) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 1,1 m, Fußindrücke: 5, Handindrücke: 2,

Stride: 43 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: 10 cm. Die Eindrücke sind unvollständig mit undeutlichen Konturen. Die Bewegung entspricht relativ gleichförmigem Gehen.

u17 (47) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 1 m, Fußindrücke: 5, Handeindrücke: 3, Stride: 43 cm, Fußlänge: 7 cm, Hand–Fuß-Abstand: 8,5 cm. Die Fährte zeigt wenige undeutliche aber sehr tiefe Eindrücke. Die Bewegung entspricht relativ gleichförmigem Gehen.

u18 (46) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 3 m, Fußindrücke: 12, Handeindrücke: 9, Stride: 57 cm, Fußlänge: 10,68 cm, Hand–Fuß-Abstand: 8 cm. Die Eindruckpaare sind alternierend angeordnet. Die Fußindrücke sind recht deutlich, nur der dritte Fuß ist nicht auf dem Plan verzeichnet. Die Bewegung entspricht relativ gleichförmigem Gehen. Unabhängig davon variiert der Hand–Fuß-Abstand.

Die Fährte ist sehr tief aber undeutlich und bei P 15 weist Kulick auf ein eventuelles „Kothäufchen“ hin.

u19 (49) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 8 m, Fußindrücke: 17, Handeindrücke: 11, Stride: 100 cm, Fußlänge: 20 cm, Hand–Fuß-Abstand: 22,4 cm. Die Fährte verläuft etwa Nord–Süd. Das Fährtenmuster ist alternierend und die Eindrücke weisen gerundete Konturen auf. Die Bewegung entspricht relativ gleichförmigem Gehen und auch der Hand–Fuß-Abstand ist konstant.

u20 (50) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 23 m, Fußindrücke: 118, Handeindrücke: 111, Stride: 38 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: 9,74 cm. Mit rund 23 m ist es die längste verfolgbare Fährte der Fläche, die Eindrücke sind tief und gut erhalten. Etwa in der Mitte biegt die Fährte 220° um, wobei nach Kulick im Wendepunkt eine Standspur ausgebildet ist. Die Eindrücke sind ausgeprägt alternierend angeordnet. Der schnelle Gang bis Trab verlangsamt sich vor der Kurve und geht dann wieder in Trab über. Der Hand–Fuß-Abstand ist sehr unregelmäßig und lässt keinen Bezug zur Geschwindigkeit erkennen.

Am Ende der Fährte befinden sich nach Kulick 2 Hände mit Krallenabdrücken. Wegen des elegant geschwungenen Verlaufs bezeichnet Kulick diese Fährte als „Das Mädchen“.

u21 (48) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 5,2 m, Fußindrücke: 22, Handeindrücke: 3, Stride: 55 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: ?. Die Fährte verläuft geradlinig von NW nach SE. Bei einigen Eindrücken fehlen distale oder laterale Begrenzungen, Handeindrücke sind kaum vorhanden. Die Bewegung ist ungleichförmig, die Gangart liegt im Bereich schnelles Gehen und wechselt von langsam zu schnell.

Kulick beschreibt die Fährte als flach und unscharf.

u22 (56) *Chirotherium barthii*

Länge der Fährte: 9,7 m, Fußindrücke: 19, Handeindrücke: 18, Stride: 104 cm, Fußlänge: 22 cm, Hand–Fuß-Abstand: 15,44 cm. Die Fährte verläuft geradlinig von Süd nach Nord, parallel zur Fährte u19. Die Fußindrücke haben sehr deutliche Konturen, aber die proximalen Begrenzungen der Hände fehlen. Die Bewegung ist gleichförmig gehend, der Hand–Fuß-Abstand ist ungleichförmig und zeigt keine Relation zur Geschwindigkeit.

Kulick beschreibt die Füße als sehr gute und bis 3 cm tiefe Eindrücke.

u23 (52) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 5,3 m, Fußindrücke: 23, Handeindrücke: 18, Stride: 54 cm, Fußlänge: 12 cm, Hand–Fuß-Abstand: 8,4 cm. Die Eindrücke haben deutliche Konturen und sind alternierend angeordnet. Die Bewegung ist ungleichförmig gehend, dem entspricht ein variierender Hand–Fuß-Abstand.

u24 (51) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: > 6,2 m, Fußindrücke: 32, Handeindrücke: 32, Stride: 100 cm, Fußlänge: 12 cm, Hand–Fuß-Abstand: 11 cm. Das Fährtenmuster ist gleichmäßig alternierend. In einigen Bereichen erscheinen die Hände bei einigen Eindrücken nach links versetzt zu sein. Die Fährte verläuft am Ende in einer leichten Kurve. Die Bewegung ist ungleichförmig bei langsamem Gang, der Hand–Fuß-Abstand variiert.

u25 (45) nicht bestimmbar

Länge der Fährte: 5,6 m, Fußindrücke: 15, Handeindrücke: ?, Stride: 83 cm, Fußlänge: 10 cm. Das Fährtenmuster ist sehr gleichmäßig. Die Eindrücke haben undeutliche Konturen und werden im Verlauf der Fährte rundlicher. Die Bewegung ist relativ gleichförmig trabend bei leichter Verlangsamung.

u26 (55) nicht bestimmbar

Länge der Fährte: 2,4 m, Fußindrücke: 9, Handeindrücke: ?, Stride: 58 cm, Fußlänge: 9 cm. Die Fährte ist unregelmäßig mit undeutlichen Eindrücken. Die Gangart wechselt vom Trab zum Gehen.

u27 (53) *Chirotherium sickleri*

Länge der Fährte: 6,8 m, Fußindrücke: 33, Handeindrücke: 28, Stride: 46 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand–Fuß-Abstand: 8 cm. Die Fährte verläuft in einer 153°-Kurve und vollführt somit fast eine Kehrtwendung. Eventuell besteht ein Zusammenhang mit der Fährte u25. Diese zeigt eine zunächst schnelle und dann eine langsamere Bewegung von dem Wendepunkt an. Die Eindrücke sind teilweise sehr undeutlich, gelegentlich fehlen proximale Begrenzungen an den Füßen. Die Bewegung ist gleichförmig gehend, der Hand–Fuß-Abstand ist nur im ersten Abschnitt proportional zur Geschwindigkeit, danach kehrt sich das Verhältnis um.

u28 (58) *Chirotherium sickleri*
Länge der Fährte: 4,8 m, Fußindrücke: 15, Handindrücke: 10, Stride: 64 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: 9 cm. Das Fährtenmuster weist auf ungleichmäßig schnellen Gang hin. Der Hand-Fuß-Abstand lässt keine Beziehung zur Geschwindigkeit erkennen. Handindrücke fehlen im Verlauf der Fährte erhaltungsbedingt.

Kulick beschreibt die Eindrücke als eher schlecht bei 1 cm Tiefe. Das Tier hat mit Händen und Füßen Schleifmarken hinterlassen und dabei den Schlamm nach vorn hochgezogen.

u29 (57) *Chirotherium sickleri*
Länge der Fährte: 3 m, Fußindrücke: 22, Handindrücke: 22, Stride: 42 cm, Fußlänge: 8 cm, Hand-Fuß-Abstand: 8,13 cm. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig, einigen Eindrücken fehlen proximale Begrenzungen. Die Bewegung ist relativ gleichförmig gehend.

u30 (63) *Chirotherium sickleri*
Länge der Fährte: > 2 m, Fußindrücke: 19, Handindrücke: 20, Stride: 23 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: 10 cm. Die Fährte verläuft in einer 90°-Kurve, von Ost nach Nord. Die Eindrücke sind sehr undeutlich und an den ersten 5 Eindruckpaaren fehlen proximale und laterale Begrenzungen. Die Bewegung ist etwas ungleichförmig bei langsamem Gehen. Im Rahmen der Gesamtfläche konnte an dieser Fährte die niedrigste Geschwindigkeit mit durchschnittlich 0,72 km/h und minimal 0,18 km/h ermittelt werden.

u31 (62) *Chirotherium sickleri*
Länge der Fährte: 14,8 m, Fußindrücke: 60, Handindrücke: 56, Stride: 47 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: 9,6 cm. Die Eindrücke sind undeutlich, am Beginn sind die Schritte sehr kurz und werden dann länger. Die Eindruckpaare zeigen alternierende Anordnung. Die Geschwindigkeit ist ungleichförmig bei zunächst langsamem und dann schnellerem Gang. Der Hand-Fuß-Abstand verhält sich umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit.

u32 (59) *Chirotherium sickleri*
Länge der Fährte: 12,8 m, Fußindrücke: 59, Handindrücke: 20, Stride: 39 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: 10 cm. Die Fährte verläuft in einer S-Kurve von SW nach Ost und besteht aus 2 Teilen. Auf dem originalen Fährtenplan sind diese beiden Teile zusammenhängend dargestellt, dies ist jedoch nicht ganz sicher. Das Fährtenmuster ist ungleichmäßig, die meisten Handindrücke fehlen. Die Fährte ist trotz sehr tiefer Eindrücke undeutlich. Auf gleichförmiges Gehen erfolgt starke Beschleunigung zum Traben.

u33 (61) *Chirotherium sickleri*
Länge der Fährte: 5,3 m, Fußindrücke: 19, Handindrücke: 20, Stride: 41 cm, Fußlänge: 10 cm, Hand-Fuß-Abstand: 11,54 cm. Wegen der flachen Eindrücke ist die Fährte undeutlich und aus den Schrittabständen folgt ungleichmäßiger Gang.

u34 (64) *Chirotherium sickleri*
Länge der Fährte: 2,9 m, Fußindrücke: 14, Handindrücke: 10, Stride: 42 cm, Fußlänge: 12 cm, Hand-Fuß-Abstand: 9,14 cm. Die Fährte verläuft in einer Kurve von Ost nach Süd. Die Bewegung ist gleichförmig gehend.

Kulick beschreibt die Eindrücke als sehr schwach eingetreten aber mit teilweise sehr deutlichen Zehen- und Krallenabdrücken, besonders an den Handindrücken.

u35 (60) nicht bestimmbar
Länge der Fährte: 2,6 m, Fußindrücke: 13, Stride: 53 cm, Fußlänge: 6,5 cm. Alle Eindrücke sind undeutlich, meist fehlen die proximalen Begrenzungen. Der Gang ist ungleichförmig trabend.

Sonstige

Nach den Aufzeichnungen von Kulick und den Darstellungen auf dem Originalplan gibt es Hinweise zu Eindrücken unter den Nummern 1, 30, 32, 34 und 54. Zumeist handelt es sich dabei um vereinzelte Eindrücke von *Chirotherium*. Da diese unerheblich sind, werden sie in der vorliegenden Beschreibung nicht weiter berücksichtigt.

Anhang 4

Tab. 5. Arithmetische Mittel der Eindruck- und Fährtenparameter der Fährten von der oberen (o01–o35) und der unteren (u01–u35) Fläche.

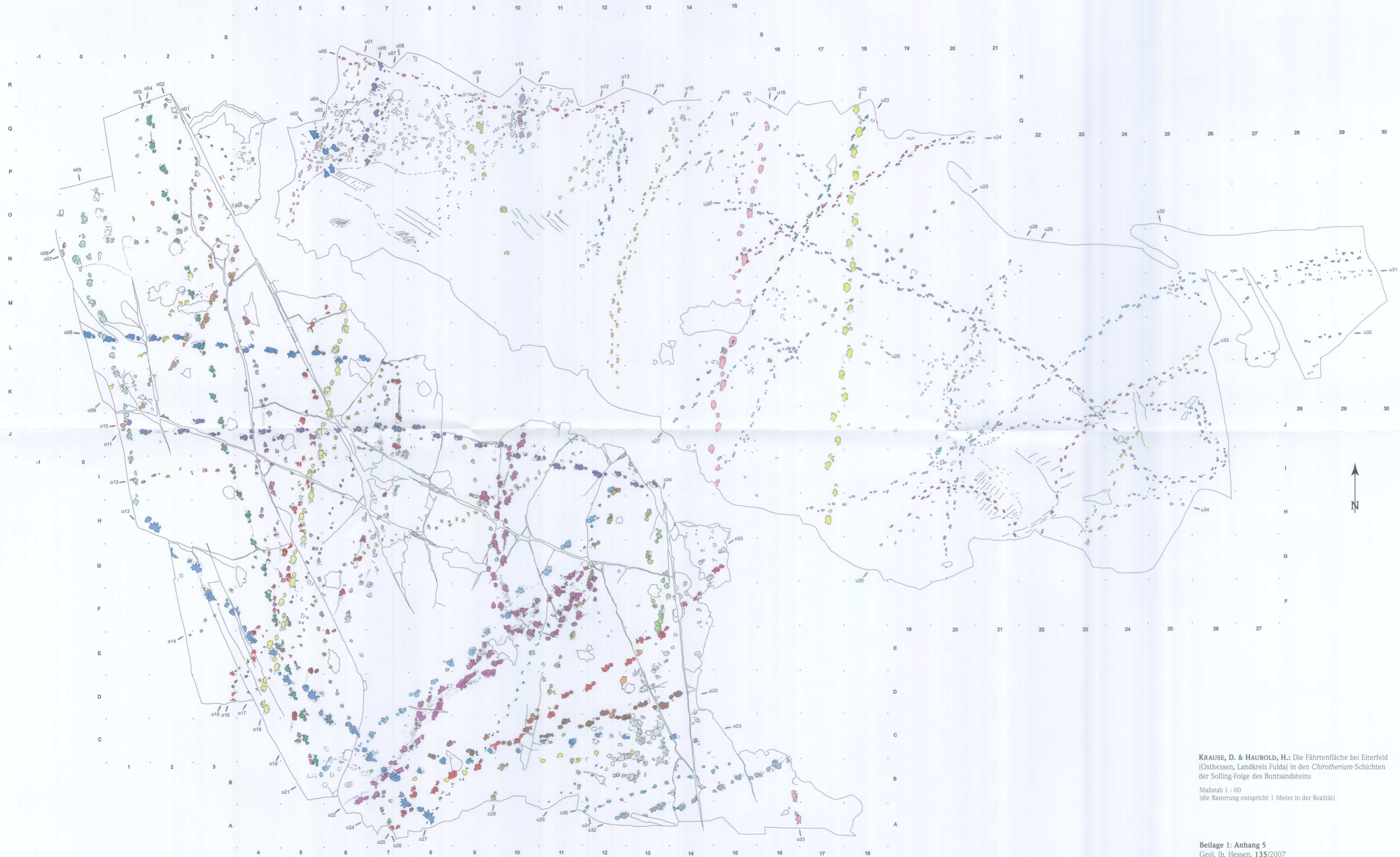
Fährte	Ichnotaxon	Länge der Fährte [m]	Stride Fuß [cm]	Pace Fuß [cm]	Gangbreite [cm]	Fußlänge [cm]	Hüfthöhe [cm]	scheinbare Rumpflänge [cm]	Hand-Fuß-Abstand [cm]	Schrittwinke Fuß [°]
o01	<i>Chirotherium</i> sp.	1,1	38,0	20,0	8,3	6,0	24,0	23,0	5,0	110–150
o02	<i>Chirotherium barthii</i>	14,5	97,6	57,7	29,3	15,0	60,0	64,7	12,4	100–135
o03	<i>Chirotherium barthii</i>	15,7	116,4	58,3	8,8	16,0	64,0	72,9	13,0	155–175
o04	<i>Chirotherium</i> sp.	1,7	80,0	42,3	9,0	10,0	40,0	>40,0	-	135–155
o05	<i>Chirotherium barthii</i>	6,3	93,2	46,7	9,5	15,7	62,8	62,0	13,3	148–170
o06	nicht bestimmbar	>2,5	88,3	47,9	16,5	13,0	52,0	>50,0	-	135–144
o07	<i>Chirotherium barthii</i>	>4,0	110,0	60,0	20,0	15,0	60,0	-	15,0	130–147
o08	<i>Chirotherium barthii</i>	7,4	105,0	53,1	8,3	20,0	80,0	95,0	12,5	155–170
o09	<i>Chirotherium</i> sp.	3,9	107,0	57,9	23,6	10,0	40,0	63,0	11,7	115–140
o10	<i>Chirotherium barthii</i>	12,6	86,4	47,0	15,9	20,0	80,0	60,8	13,8	105–166
o11	<i>Isochirotherium</i> sp.	4,9	117,1	61,9	17,3	20,6	82,4	71,0	14,4	141–155
o12	<i>Chirotherium sickleri</i>	7,1	57,2	30,2	8,9	10,0	40,0	29,6	0,0	125–160
o13	<i>Isochirotherium</i> sp.	9,5	130,5	67,3	17,8	30,0	120,0	79,4	19,1	145–163
o14	<i>Dicynodontipus</i> sp.	7,5	46,5	25,7	10,0	5,9	23,6	30,0	5,8	120–140
o15	<i>Dicynodontipus</i> sp.	>8,0	63,6	35,5	16,1	6,2	24,8	44,5	11,1	100–145
o16	<i>Chirotherium barthii</i>	9,3	101,6	56,8	24,4	20,0	80,0	69,6	13,8	115–142
o17	<i>Dicynodontipus</i> sp.	10,3	32,3	1992,0	11,2	5,6	22,4	22,6	0,0	90–125
o18	<i>Chirotherium barthii</i>	9,2	98,8	51,0	15,6	20,0	80,0	64,3	14,7	127–155
o19	cf. <i>Brachychiroth.</i> sp.	8,5	175,0	88,9	10,6	20,0	80,0	95,0	-	165–175
o20	<i>Chirotherium barthii</i>	6,0	90,2	47,7	20,2	20,3	81,0	63,8	16,4	125–140
o21	<i>Chirotherium barthii</i>	10,1	119,3	59,7	8,3	20,0	80,0	77,5	12,0	155–176
o22	<i>Chirotherium barthii</i>	15,2	62,1	39,4	24,3	20,4	81,6	50,0	15,7	35–130
o23	<i>Chirotherium barthii</i>	6,0	117,8	59,0	9,7	20,0	80,0	-	-	158–167
o24	<i>Chirotherium</i> sp.	5,8	80,0	43,0	13,0	10,4	41,6	-	-	140–150
o25	<i>Chirotherium barthii</i>	9,7	106,3	55,0	17,0	20,4	81,6	69,1	14,4	130–158
o26	<i>Chirotherium</i> sp.	11,3	60,7	31,6	6,5	10,0	40,0	-	5,1	130–173
o27	<i>Chirotherium sickleri</i>	8,5	48,2	25,3	8,4	7,0	28,0	36,0	13,0	130–150
o28	<i>Chirotherium barthii</i>	7,5	135,7	69,3	10,7	14,6	58,4	71,7	-	150–168
o29	nicht bestimmbar	1,5	37,5	20,5	10,0	7,0	28,0	-	-	100–140
o30	<i>Chirotherium sickleri</i>	2,6	53,5	27,8	5,1	9,9	39,6	-	-	152–171
o31	<i>Chirotherium</i> sp.	9,3	66,0	34,0	11,3	9,9	39,6	-	16,4	92–160
o32	<i>Chirotherium barthii</i>	4,1	93,3	47,1	8,8	20,0	80,0	71,3	13,0	145–170
o33	<i>Chirotherium sickleri</i>	0,8	-	50,0	-	20,0	80,0	-	14,2	-
o34	<i>Chirotherium barthii</i>	2,5	92,5	54,0	27,3	20,0	80,0	63,3	-	105–131
o35	<i>Chirotherium barthii</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fortsetzung Tab. 5

Fährte	Ichnotaxon	Länge der Fährte [m]	Stride Fuß [cm]	Pace Fuß [cm]	Gangbreite [cm]	Fußlänge [cm]	Hüfthöhe [cm]	scheinbare Rumpflänge [cm]	Hand-Fuß-Abstand [cm]	Schritt-winkel Fuß [°]
u01	<i>Chirotherium sickleri</i>	2,0	34,9	20,8	9,8	8,3	33,0	22,7	5,4	110–130
u02	<i>Isochirotherium</i> sp.	1,0	-	-	-	23,0	92,0	-	-	-
u03	<i>Chirotherium sickleri</i>	2,0	41,9	26,8	14,7	10,7	42,8	35,9	12,3	100–130
u04	<i>Chirotherium sickleri</i>	2,4	68,0	35,0	6,2	10,0	40,0	-	-	150–200
u05	<i>Chirotherium sickleri</i>	6,9	54,6	31,1	8,8	10,0	40,0	37,9	9,9	120–152
u06	<i>Chirotherium barthii</i>	2,3	116,7	60,0	13,3	20,0	80,0	85,0	17,5	153–158
u07	nicht bestimmbar	0,7	27,3	16,3	4,7	8,0	32,0	-	-	125–166
u08	nicht bestimmbar	1,7	40,7	25,4	15,4	10,0	40,0	20,0–25,0	0,0	75–120
u09	<i>Chirotherium barthii</i>	3,6	135,0	72,0	13,5	20,0	80,0	-	-	132–180
u10	<i>Chirotherium barthii</i>	1,2	80,0	40,0	5,0	17,3	69,2	70,0	13,3	165
u11	<i>Dicynodontipus</i> sp.	4,2	39,5	25,8	14,8	5,0	20,0	25,0	4,0	75–135
u12	<i>Chirotherium sickleri</i>	2,2	47,5	29,0	16,0	10,0	40,0	-	6,4	75–135
u13	<i>Chirotherium sickleri</i>	1,1	38,8	26,6	17,8	10,4	41,6	-	8,7	60–120
u14	<i>Chirotherium sickleri</i>	3,4	42,5	25,4	12,3	10,0	40,0	29,0	7,4	100–130
u15	<i>Chirotherium sickleri</i>	6,5	42,4	26,7	14,0	10,0	40,0	31,8	10,6	90–144
u16	<i>Chirotherium sickleri</i>	1,1	43,3	25,0	9,3	10,0	40,0	-	10,0	130–134
u17	<i>Chirotherium sickleri</i>	1,0	43,3	25,8	12,0	7,0	28,0	-	8,5	110–133
u18	<i>Chirotherium sickleri</i>	3,0	57,0	30,4	9,3	10,7	42,8	36,2	8,0	135–154
u19	<i>Chirotherium barthii</i>	8,0	100,5	51,4	13,9	20,0	80,0	74,6	22,4	134–158
u20	<i>Chirotherium sickleri</i>	23,0	38,2	23,4	11,6	10,0	40,0	31,1	9,7	43–155
u21	<i>Chirotherium sickleri</i>	5,2	55,3	29,2	7,9	10,0	40,0	-	-	137–160
u22	<i>Chirotherium barthii</i>	9,7	104,1	53,3	12,9	22,0	88,0	70,8	15,4	140–163
u23	<i>Chirotherium sickleri</i>	5,3	53,8	27,8	9,2	12,0	48,0	35,0	8,4	126–160
u24	<i>Chirotherium sickleri</i>	>6,2	99,9	23,2	11,2	12,0	48,0	31,4	11,0	90–138
u25	nicht bestimmbar	5,6	82,6	41,8	8,1	10,0	40,0	-	-	138–170
u26	nicht bestimmbar	2,4	58,4	30,1	7,1	9,0	36,0	-	-	135–170
u27	<i>Chirotherium sickleri</i>	6,8	46,0	24,4	9,1	10,0	40,0	30,3	8,0	105–165
u28	<i>Chirotherium sickleri</i>	4,8	64,1	35,6	12,2	10,0	40,0	>35,0	9,0	130–152
u29	<i>Chirotherium sickleri</i>	3,0	42,3	30,9	19,3	8,0	32,0	30,5	8,1	90–125
u30	<i>Chirotherium sickleri</i>	>2,0	23,3	19,6	15,1	10,0	40,0	-	10,0	35–110
u31	<i>Chirotherium sickleri</i>	14,8	46,7	26,5	12,3	10,0	40,0	33,5	9,6	57–153
u32	<i>Chirotherium sickleri</i>	12,8	38,8	22,2	8,7	10,0	40,0	31,8	10,0	50–185
u33	<i>Chirotherium sickleri</i>	5,3	41,4	24,1	12,5	10,0	40,0	31,9	11,5	101–143
u34	<i>Chirotherium sickleri</i>	2,9	42,4	25,6	14,6	12,0	48,0	28,4	9,1	75–126
u35	nicht bestimmbar	2,6	52,8	31,3	16,1	6,5	26,0	-	-	98–130

Tab. 6. Arithmetische Mittel der kalkulierten Laufleistungen - Geschwindigkeiten in km/h (S = Stride, h = kalkulierte Hüfthöhe, pl = Länge Fußein-
druck) für die Fahrten der oberen (o01–o35) und der unteren (u01–u35) Fläche.

Fährte	Durchschnitt [km/h]	maximal [km/h]	relativ S/h	relativ S/pl	Fährte	Durchschnitt [km/h]	maximal [km/h]	relativ S/h	relativ S/pl
o01	3,0	4,0	1,6	6,3	u01	1,8	2,2	1,1	4,2
o02	4,9	5,6	1,6	6,5	u02	-	-	-	-
o03	6,1	6,9	1,8	7,3	u03	1,8	2,4	1,0	3,9
o04	5,7	6,3	2,0	8,0	u04	4,3	6,3	1,7	6,8
o05	4,3	5,3	1,5	6,0	u05	3,0	3,5	1,4	5,5
o06	4,9	7,7	1,7	6,8	u06	4,7	5,0	1,5	5,8
o07	6,0	6,5	1,8	7,3	u07	1,2	1,4	0,9	3,4
o08	4,0	4,3	1,3	5,3	u08	1,8	2,2	1,0	4,1
o09	9,3	12,0	2,7	10,8	u09	6,0	10,7	1,7	6,8
o10	2,9	3,7	1,1	4,3	u10	3,0	3,0	1,2	4,6
o11	4,6	5,1	1,4	5,7	u11	3,9	5,8	2,0	7,9
o12	3,2	3,5	1,4	5,7	u12	2,4	3,0	1,2	4,8
o13	3,6	3,9	1,1	4,4	u13	1,6	2,5	0,9	3,7
o14	4,3	4,8	2,0	7,9	u14	2,0	3,0	1,1	4,3
o15	6,8	8,0	2,6	10,4	u15	2,0	3,5	1,1	4,2
o16	3,8	4,6	1,3	5,1	u16	2,0	2,2	1,1	4,3
o17	2,5	3,6	1,5	5,8	u17	3,1	3,3	1,6	6,2
o18	3,6	3,7	1,2	4,9	u18	3,0	3,3	1,3	5,3
o19	9,3	13,7	2,2	8,8	u19	3,7	4,0	1,3	5,0
o20	3,1	3,6	1,1	4,5	u20	1,7	3,5	1,0	3,8
o21	4,9	8,0	1,5	6,0	u21	3,1	5,1	1,4	5,5
o22	1,6	2,5	0,8	3,0	u22	3,5	4,8	1,2	4,7
o23	4,8	5,0	1,5	5,9	u23	2,4	2,8	1,1	4,5
o24	5,4	5,4	1,9	7,7	u24	1,4	2,1	0,8	3,3
o25	4,0	4,2	1,3	5,2	u25	6,0	6,9	2,1	8,3
o26	3,6	5,1	1,5	6,1	u26	3,8	6,6	1,6	6,5
o27	3,7	5,3	1,7	6,9	u27	2,3	3,8	1,2	4,6
o28	8,8	9,9	2,3	9,3	u28	3,9	4,5	1,6	6,4
o29	2,4	4,2	1,3	5,4	u29	2,5	2,9	1,3	5,3
o30	2,9	3,6	1,4	5,4	u30	0,7	1,4	0,6	2,3
o31	4,2	5,7	1,7	6,7	u31	2,3	3,5	1,2	4,7
o32	3,3	3,7	1,2	4,7	u32	1,6	6,9	1,0	3,8
o33	-	-	-	-	u33	1,9	2,6	1,0	4,1
o34	3,2	3,4	1,2	4,6	u34	1,6	1,8	0,9	3,5
o35	-	-	-	-	u35	4,7	5,3	2,0	8,1



KRAUSE, D. & HAUBOLD, H.: Die Fährtenfläche bei Eiterfeld (Osthessen, Landkreis Fulda) in den *Chirotherium*-Schichten der Solling-Folge des Buntsandsteins

Maßstab 1 : 60
(die Rasterung entspricht 1 Meter in der Realität)

Inhalt

Seite 5

H.-M. MÖBUS

Die Hessischen Gräben als mehrfach duktil entkoppelte „pull apart“-Strukturen

Seite 25

N. HUG & G. VERO

Ein vollständiges Zechsteinprofil im südlichen Odenwald: die hydrogeologische Erkundungsbohrung Langenthal BK2/05

Seite 47

G. RADTKE & E. MARTINI

Neudefinition von stratigraphischen Einheiten im Tertiär des Mainzer und Hanauer Beckens (Deutschland, Miozän): Frankfurt-Formation (= Obere Hydrobien-Schichten)

Seite 61

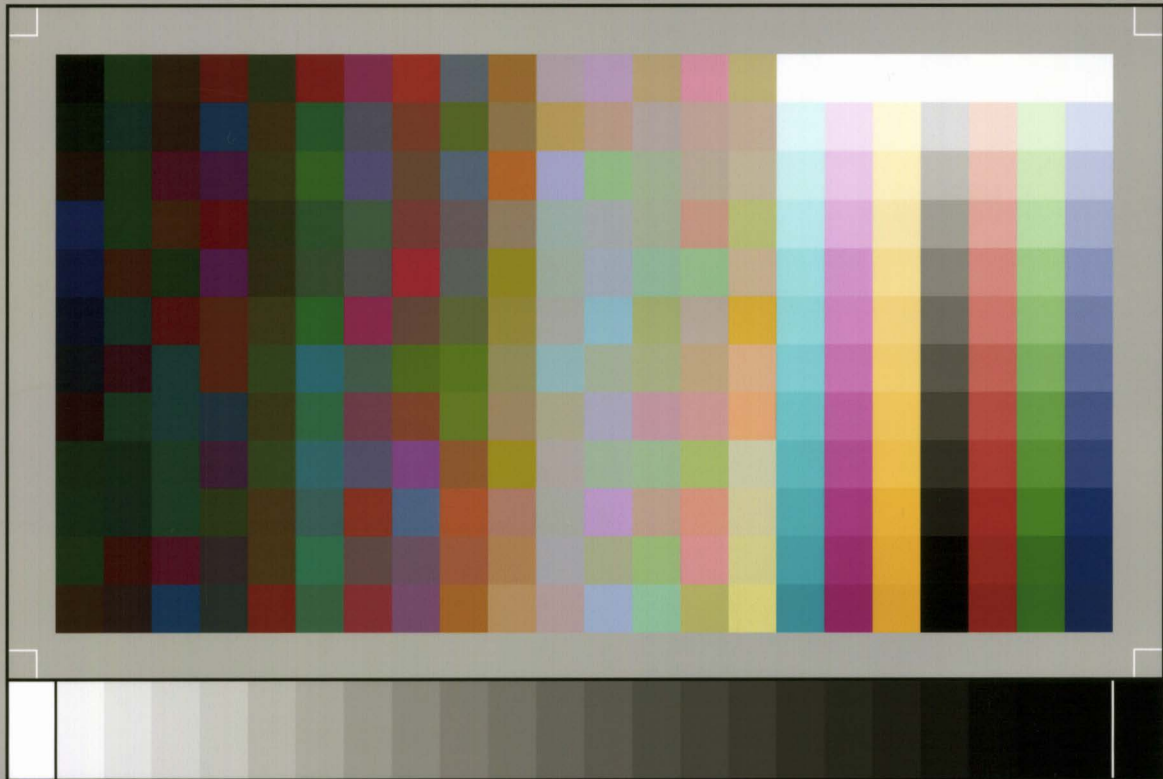
D. KRAUSE & H. HAUBOLD

Die Fährtenfläche bei Eiterfeld (Osthessen, Landkreis Fulda) in den *Chirotherium*-Schichten der Solling-Folge des Buntsandsteins



Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie

www.hlug.de



SP050509001

ScanPrint® *autopilot* Scan Target v2.0