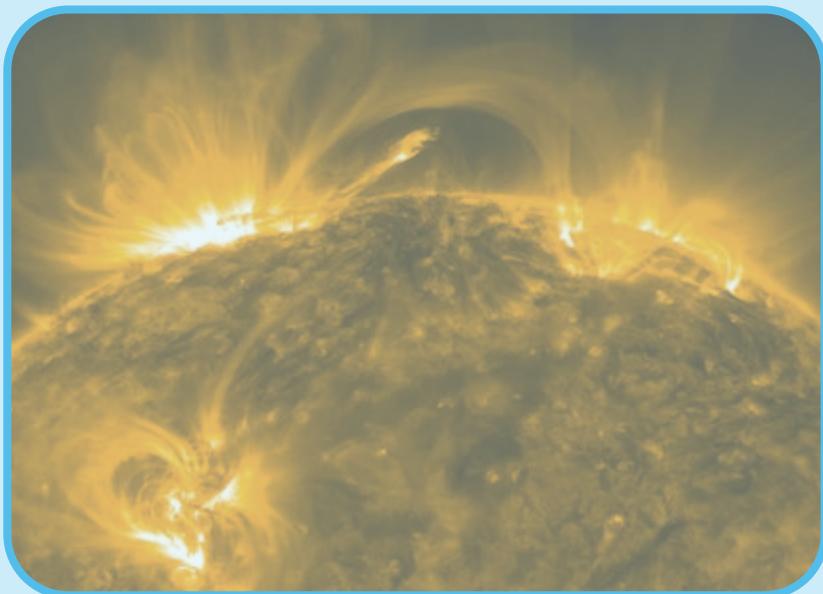


**Nassauischer Verein
für Naturkunde**



**Jahrbücher des
Nassauischen Vereins
für Naturkunde**



Band 145

Wiesbaden 2024

ISSN 0368-1254

**Nassauischer Verein
für Naturkunde**



**Jahrbücher des
Nassauischen Vereins
für Naturkunde**

Band 145

Wiesbaden 2024

ISSN 0368-1254

Titelbild



Quelle: NASA/SDO/AIA

zum Beitrag von LISA-MARIE ZESSNER
und PATRICK ONDRATSCHEK

© Nassauischer Verein für Naturkunde, Wiesbaden 2024

ISSN 0368-1254

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

Herausgabe und Vertrieb:

Nassauischer Verein für Naturkunde

c/o Museum Wiesbaden

Friedrich-Ebert-Allee 2, 65185 Wiesbaden

e-Mail: webmaster@naturkunde-online.de

<http://www.naturkunde-online.de>

Schriftentausch / publication exchange / échange de publications:

Hessische Landesbibliothek

Rheinstraße 55/57, 65185 Wiesbaden

Telefon: (0611) 9495-1816 Frau Jennifer Hale

e-Mail: jennifer.hale@hs-rm.de

Schriftleitung:

Prof. Dr. B. Toussaint

65232 Taunusstein

Telefon: (06128) 71737

E-Mail: b.toussaint@t-online.de

Satz, Layout, Bildgestaltung: Prof. Dr. B. Toussaint, Taunusstein

Druck und Verarbeitung: AC medienhaus GmbH, Wiesbaden

Printed in Germany/Imprimé en Allemagne

Die digitalen Versionen unserer Jahrbücher können als pdf-Dateien von der Homepage des Nassauischen Vereins für Naturkunde (www.naturkunde-online.de) heruntergeladen werden. Da sich das digitale Archiv unseres Jahrbuchs in der **Zoologisch-Botanischen Datenbank (ZoBoDat)** in Linz/Österreich befindet, sind alle Inhalte dieser Open-Access-Plattform und somit auch unser Jahrbuch per Volltextsuche dort abrufbar (www.zobodat.at).

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Inhaltsverzeichnis

Editorial	5
 Wissenschaftliche Abhandlungen	
WERNER GNATZY & JÜRGEN TAUTZ	
Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution	7
SUSANNE STEIB	
Die Wildkatze (<i>Felis silvestris</i> SCHREBER 1777) im Taunus – neue Erkenntnisse zu Verbreitung und Populationsdichte	37
WILFRIED ROSENDAHL & DORIS DÖPPES	
Eiszeit-Safari im nördlichen Oberrheingraben – ausgewählte Funde und Datierungen zur Großsäugerfauna der letzten Kaltzeit	49
HEINER FLICK & HEINZ-DIETER NESBOR	
Das südöstliche Rheinische Schiefergebirge im Erdaltertum (Paläozoikum) – vom tropischen Randmeer zum alpinotypen Deckengebirge	77
SVEN SCHMIDT & BENJAMIN HOMUTH	
Geogefahren in Hessen – Erfassung und Bewertung von Georisiken durch den Geologischen Landesdienst des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)	111
HARTWIG E. FRIMMEL	
Die Bedeutung des Südlichen Afrikas als mineralischer Rohstofflieferant	135
CHRISTOPH ANTWEILER	
Anthropozän – Menschen machen Erdgeschichte	169
INGO DORSTEN, DIETER KRAUS & ARNDT KARGER	
Speläologie im Breitscheider Karst – Forschungsstand und Erkenntnisse aus dem größten Höhlensystem Hessens	201
LISA-MARIE ZESSNER & PATRICK ONDRATSCHEK	
Unser Heimatstern, die Sonne – wie wir sie vermessen und verstehen können	233

Verein

HELMUT ARNOLD

Bericht über den Nassauischen Verein für Naturkunde (NVN) im Jahr 2023	253
---	-----

Publikationen des NVN aus dem Jahr 2023

Jahrbücher des NVN, Bd. 144 (2023)	261
--	-----

Buch-Rezensionen

M. OKRUSCH & H. E. FRIMMEL (2022): Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde	263
M. GEYER, E. NITSCH & TH. SIMON (2023): Geologie von Baden-Württemberg	267
W. GNATZY & J. TAUTZ (2023): Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution. Faszinierend und bedroht	271
W. E. H. BLUM & P. SCHAD (2024) Bodenkunde in Stichworten	273
U. FROMMER & ST. TISCHENDORF (2024): Die Wegwespen Hessens. Vorkommen – Ökologie – Bestandssituation	275
M. SUCCOW & L. JESCHKE (2024): Deutschlands Moore. Ihr Schicksal in unserer Kulturlandschaft	277

Werte Mitglieder des Nassauischen Vereins für Naturkunde, sehr geehrte Damen und Herren!

Seit 1844 erscheint das Jahrbuch des Nassauischen Vereins für Naturkunde (bis 1866: Verein für Naturkunde im Herzogthum Nassau) bis auf Krisen- und Kriegszeiten jährlich und zumeist auf hohem und breitem naturkundlichem Niveau (vgl. www.naturkunde-online.de).

Unsere Jahrbücher dokumentieren in besonderer Weise das Selbstverständnis des Vereins und seiner Mitglieder, mit einer fachlich ausgewiesenen regelmäßigen Publikation das Interesse an der – keineswegs nur regionalen – Natur und an ihrer Erforschung zu wecken sowie die allgemeine naturkundliche Bildung zu fördern.

Die Jahrbücher bieten von Anfang an – auch vielen namhaften – Wissenschaftlern und Hobbyforschern aus dem Kreis der Vereinsmitglieder und von außerhalb ein Forum, ihre Arbeitsergebnisse aus allen Gebieten der Naturkunde und zu Umweltfragen den Vereinsmitgliedern und der Öffentlichkeit mitzuteilen. Dabei gehen wissenschaftliche Genauigkeit, anschauliche Darstellung und verständliche Ausdrucksweise zumeist Hand in Hand. Die Jahrbücher haben einen guten Ruf und werden von der Hessischen Hochschul- und Landesbibliothek in Wiesbaden auch international getauscht.

Vor diesem Hintergrund rufen der Schriftleiter und der Vorstand des Nassauischen Vereins für Naturkunde dazu auf, dieses fachliche Forum stärker als bisher zu nutzen. Die Jahrbücher sollen Plattform für naturkundliche Beiträge sein, die sich nicht ausschließlich auf Wiesbaden oder die ehemalige nassauische Region, sondern auch auf andere Bundesländer beziehen. Auch internationale Themen, ggf. auch in englischer Sprache, könnten interessieren. Nationale wie internationale Fachleute sind eingeladen, die Ergebnisse ihrer naturkundlichen Studien in den Jahrbüchern des Nassauischen Vereins für Naturkunde zu veröffentlichen. Die Texte sollten allerdings so geschrieben sein, dass sie auch von interessierten Laien verstanden werden. Auch das angestrebte Themenspektrum wird die Gesamtheit der Naturwissenschaften, durchaus unter Bezug auf aktuelle Fragestellungen wie u. a. Klimawandel, umfassen.

Ab 2015 kann die digitale Version der Jahrbücher von der Homepage des Nassauischen Vereins für Naturkunde (<http://www.naturkunde-online.de>) und der ZOBODAT (www.zobodat.at) heruntergeladen werden und steht somit einem großen Leserkreis zur Verfügung. Somit können Autoren für sich selbst und für ihr Anliegen werben.

Für Rücksprachen steht zur Verfügung

Prof. Dr. Benedikt Toussaint

E-Mail: b_toussaint@web.de oder b.toussaint@t-online.de

Dieser Band beinhaltet wiederum ein breites Themenspektrum, das sich in neun äußerst interessanten Beiträgen widerspiegelt. Der erste Fachbeitrag widmet sich der unglaublichen Formenvielfalt und funktionellen Raffinesse der Insekten, der zweite der sich in Hessen wieder ausbreitenden Wildkatze. Im dritten Beitrag werden die in den jungpleistozänen Sedimenten des Oberrheingrabens gefundenen Fossilien von Großsäugern vorgestellt. Der vierte Beitrag beschäftigt sich mit dem neu definierten alpinotyen Deckenbau im Lahn-Dill-Gebiet und im Kellerwald. Beim nächsten Beitrag geht es um Georisiken, z. B. Hangrutsche, Erdfälle oder Erdbeben. Der sechste Beitrag beleuchtet die nicht ganz kritik- und risikofreie Rolle Südafrikas als Lieferant mineralischer Rohstoffe für die EU und insbesondere Deutschland. Im siebten Beitrag plädiert der Autor dafür, das sog. ‚Anthropozän‘ als formale Epoche in die Zeittafel der Erdgeschichte einzuführen. Der achte Beitrag befasst sich mit der Entdeckung des Erdbachtunnel- und Herbstlabyrinth-Advent-Höhlensystemen bei Breitach. Der neunte und letzte Beitrag ist der Vermessung der Sonne und der Auswertung der Daten gewidmet.

Auf diese Fachbeiträge folgt der Rechenschaftsbericht des Vereinsvorsitzenden für das Jahr 2023.

In der Rubrik „Neue Publikationen“ wird der im Jahr 2023 erschienene Band 144 des Jahrbuchs des Nassauischen Vereins für Naturkunde vorgestellt.

Der Band endet mit der Rezension von sechs empfehlenswerten Fachbüchern, die 2023 und 2024 erschienen sind.

Der vorliegende Band 145 unseres Jahrbuchs umfasst insgesamt 279 Seiten, die es allesamt verdienen, gelesen zu werden.

Invitation to external resp. foreign authors to publish in our annals

In special cases English writing scientists are also invited to publish the results of their natural scientific studies in the annals of the Nassau Natural History Society (Jb. Nass. Ver. Naturkde.). Our annuals should serve as platform for potential authors to publish. The authors have a wide range of contributions, but the publications should be written in a popular scientific way. The topics need not be directly related to Hesse and surrounding German countries; but should, if possible. The readers of the annals have great interest in geo- and biosciences in a very broad sense, in meteorology – especially in connection with the climate change –, archaeology/prehistory and astronomy. Please note that only scientifically substantiated articles on current topics are selected for publication.

Every everybody can download the digital version of the annals of the Nassau Natural History Society from its homepage (see www.naturkunde-online.de) and from the homepage of ZOBODAT (www.zobodat.at).

For any questions please feel free to contact

Prof. Dr. Benedikt Toussaint (b_toussaint@web.de; b.toussaint@t-online.de)

Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution

WERNER GNATZY & JÜRGEN TAUTZ

Insekten, Anpassungen, Konstruktionen, Schlüsselrolle in Ökosystemen

K u r z f a s s u n g : Im Laufe der Evolution haben die Insekten eine schier unglaubliche Formenvielfalt und funktionelle Raffinesse entwickelt. Das Design ihres Außenskeletts ist so phantasievoll und ungewöhnlich, oft auch bizarr, dass man nur staunen kann. Dass Insekten für jedes noch so spezielle Problem Konstruktionslösungen finden können, macht sie überaus erfolgreich. Sie wurden so zu entscheidenden Bindegliedern in den komplexen Netzwerken der Natur. In den Ökosystemen unseres Planeten spielen die Insekten eine entscheidende Rolle. Die menschengemachte Umweltzerstörung greift empfindlich in diese Kreisläufe ein. Das gefährdet das Überleben der Insekten, mit dramatischen Auswirkungen auch für uns Menschen.

Insects – models of evolutionary success

Insects, adaptations, constructive solutions, key role in ecosystems

A b s t r a c t : During evolution, insects have developed an almost incredible variety of forms and functional sophistication. The design of their exoskeleton is so imaginative and unusual, often bizarre, that one can only be amazed. The fact that insects can find design solutions for every problem, no matter how specific, makes them extremely successful. They thus became crucial links in the complex networks of nature. Insects play a crucial role in our planet's ecosystems. Man-made environmental destruction has a serious negative impact on the ecosphere. This endangers the survival of insects, with dramatic effects for us humans, too.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Die Welt der Insekten	8
2.1	Warum ist das so?	10
2.2	Die Formenvielfalt der Insekten	11
3	Woran erkennt man Insekten?	14
4	Das Anthropozän und seine Auswirkungen auf die Insektenwelt ...	17
4.1	Eine Studie macht Schlagzeilen	18
4.2	Die Zahl der Insekten befindet sich im Sinkflug	20
5	Spektakuläre Erfindungen der Insekten – Beispiele	25
5.1	Vorderbeine der Männchen der Gelbrandkäferart <i>Dytiscus marginalis</i> begünstigen die Paarungsstellung	25
5.2	Sehen bei Dämmerlicht: Facettenaugen mit Antireflexbelag	27
5.3	Heiß auf Waldbrände: Kiefernprachtkäfer, die fliegenden Feuermelder	31

6	Danksagung	34
7	Literatur	34
8	Anhang	36

1 Einleitung

Die beiden Verfasser haben im Jahr 2023 das Buch „Insekten, Erfolgsmodelle der Evolution. Faszinierend und bedroht“ veröffentlicht (W. GNATZY & J. TAUTZ 2023; siehe Cover des Buches auf der letzten Seite). Auf einigen Kapiteln dieses Buches, die auszugsweise abgeändert und ergänzt wurden, basiert dieser vorliegende Beitrag. Eine ausführliche Auflistung der die hier angesprochenen Themen vertiefende Literatur findet sich in diesem Buch.

2 Die Welt der Insekten

Insekten bilden ein Universum, das uns Menschen so fremd ist, wie es fremder kaum sein könnte. Wenn man nicht gerade ein Insektenforscher ist, gibt es im Grunde nur zwei große Bereiche, in denen sich die Welt der Insekten und der Menschen spürbar berühren und so die Insekten in das Bewusstsein der meisten Menschen treten: Entweder als Überträger von Krankheiten (beispielsweise durch Stechmücken, Flöhe und Bettwanzen) oder als Schädlinge, die zu Ernteverlusten führen (z. B. durch Wanderheuschrecken, Blattläuse und Raupen). So verwundert es nicht, dass den meisten Menschen Insekten abstoßend erscheinen oder sogar furchteinflößend. Aber es gibt auch einen Bereich, in dem Insekten uns Menschen unverzichtbare Helfer sind: Ihre Rolle als Bestäuber der Blütenpflanzen.

Die Welt der Insekten ist uns fremd, weil sie zwar die gleichen Aufgaben und Probleme zu lösen haben, wie alle anderen Tiere auch, uns Menschen eingeschlossen. Aber die Lösungen, die sie im Laufe ihrer Evolution gefunden haben, sind von den Lösungen der Wirbeltiere so grundverschieden, dass wir uns gar nicht oder nur mit erheblicher Fantasie in die Welt der Insekten versetzen können. Die Evolution baut auf Strukturen auf, die, wenn sie einmal erfunden worden sind, immer weitere Neuentwicklungen hervorbringt. Bei den Insekten ist dies die mehr als 400 Millionen Jahre alte Erfindung eines Skelettes, das den Körper außen umhüllt und nicht wie bei uns im Inneren des Körpers liegt. Der äußere harte Panzer schützt alle inneren Organe. Der Panzer ist aber keine gleichförmige Umhüllung, sondern er bildet die Basis zur Herausbildung von Strukturen, die an die jeweilige Lebensweise der Insekten angepasst sind: Beine und Flügel erlauben die Fortbewegung, Sinnesorgane vermitteln Information über die Umwelt, besondere Strukturen erlauben die optische oder akustische Kommunikation. Andere Strukturen dienen dem Nahrungserwerb, der Fortpflanzung oder der Feindvermeidung.

Die Gruppe der Insekten scheinen über nahezu unbegrenzte Entfaltungsmöglichkeiten zu verfügen. Unsere Fantasie reicht nicht aus sich auszudenken, was es bei den Insekten tatsächlich zu entdecken gibt. Es ist sogar umgekehrt. Die Insekten bieten die Vorlagen für ungezählte Figuren und Geschichten auf dem Feld des Science-Fiction.

Das Grundmodell besitzt sechs Beine, die ideale Anzahl, um sich über jede beliebige Oberfläche sicher fortbewegen zu können. Die meisten Insekten besitzen zwei Paar Flügel. So wurde der Luftraum von ihnen schon nahezu 100 Millionen Jahre vor anderen flugfähigen Tieren erobert. Riesenlibellen des Karbons, der Steinkohlezeit, erreichten Flügelspannweiten von 70 cm. Demgegenüber stehen bei den Zwergwespen heute Winzlinge von einer „Größe“ von 0,15 Millimeter. Die Miniaturisierung ist generell ein Thema bei Insekten, wenn es um deren Sinnesorgane geht, mit denen jede nur denkbare Umweltgröße erfasst, kategorisiert und gemessen wird. Physikalische Phänomene werden von Insekten auch auf höchst raffinierte Weise eingesetzt, wenn es im Kommunikationsverhalten darum geht, auffällig zu werden, oder im Gegenteil für andere Lebewesen unkenntlich zu werden. Wie überhaupt die Beziehung zwischen Räubern und Beute eine der stärksten gestaltenden Umstände ist, die in der Welt der Insekten Erstaunliches hervorgebracht hat.

Natürliche Selektion und sexuelle Selektion sind die beiden Motoren, die im Laufe der Evolution Organismen mit ihren Eigenschaften und Fähigkeiten entstehen lassen und verändern können. Die Resultate der natürlichen Selektion sichern das Leben und Überleben. Strukturen, Eigenschaften und Fähigkeiten, die so entstanden sind, machen bei näherer Betrachtung in jedem Fall sehr viel Sinn, was ihre Funktionen und ihren Einsatz betrifft. Anders die sexuelle Selektion. Hier entstehen nicht selten Strukturen, die nicht nur skurril erscheinen, sondern für deren Besitzer in dessen Alltag sogar eher hinderlich sein können. Durch die Auswahl der Männchen, die sie zur Paarung zulassen, treiben die Weibchen die Herausbildung solcher Merkmale voran.

Es gibt Kriterien, unter denen die Insekten die eindeutig erfolgreichsten Organismengruppe im Laufe der bisherigen und sicherlich auch der zukünftigen Entwicklung des Lebens auf unserer Erde sind.

Insekten sind unsere ständigen Begleiter: Sie haben sich Lebensräume erschlossen wie keine andere Tiergruppe, sie sind wahre Kosmopoliten. Man begegnet ihnen beinahe überall (auf der Erde): In den schwül-warmen Regenwäldern der Tropen, in den trockensten Wüsten, in den fast siedend heißen Quellen des Yellowstone-Nationalparks, in Petroleumpfützen auf Erdölfeldern, in sauren Pferdemägen und auch in sorgfältig verschlossenen Haferflockengläsern im Küchenschrank. Dank eigens produzierter Frostschutzmittel überleben sie extreme Kältegrade oder haben sie sich in den Gletscherspalten der Antarktis und im ewigen Eis des Himalayas eingerichtet. Und den wasserlebenden Larven einer afrikanischen Mücke schadet selbst jahrelange Dürre nichts, sobald es regnet, erwachen sie aus

ihrem Trockenschlaf. Nur einen Lebensraum haben die Insekten so gut wie nicht erobert, die Ozeane.

2.1 Warum ist das so?

Der Grund dafür könnte das Tracheensystem sein, das ihnen keine Möglichkeit lässt, im Meer Räubern zu entkommen. Die Verwandten der Insekten im Meer, kleine Krebse etwa, atmen mit Kiemen und können sich gefräßigen Fischen durch Abtauchen ins Dunkel entziehen. In ein paar Dutzend Metern Tiefe aber, so Maddrell, drücke bei Insekten der hohe Wasserdruck das Gas in den Tracheolen zusammen und lasse das System kollabieren. Und wenn die Insekten sich durch transparente Körper an der Wasseroberfläche unsichtbar machten, wie es manch ein Krebschen tut, dann würde die Luft im Innern des Röhrensystems Licht reflektieren und für Fische weithin sichtbar sein.

Ein paar Insekten aber leben dennoch im Ozean: Einige flinke Wasserläufer tummeln sich in Nähe der Küsten auf der Meeresoberfläche, und die Läuse der Gattung *Echinophthirius* tauchen auch in größere Tiefen hinab – als „blinde Passagiere“ von Robben; mit Hilfe ihrer schuppenartigen Körperhaare halten sie dabei einen Luftmantel fest, der sie wie eine Taucherglocke umgibt.

Die Artenzahl der Insekten ist unerreicht und wir können sie nur erahnen. Etwa drei Viertel aller bekannten Tierspezies, heute fast eine Million Arten, zählen zu den Insekten – von winzigen Wespen und Mini-Käfern, gerade 0,21 Millimeter lang und damit kleiner als manch einzellige Amöbe, bis zu den größten, den Stabheuschrecken mit über 30 Zentimeter Länge; von Morphofaltern, Marienkäfern und Bienen bis zu Gottesanbeterinnen und Schnaken. Die meisten Spezies sind vermutlich noch gar nicht entdeckt und beschrieben, manche Forscher schätzen ihre Zahl auf 15 oder gar 30 Millionen.

In schier unbegreiflicher Individuenzahl bevölkern sie den Planeten: Etwa eine Trillion – eine Ziffer mit 18 Nullen hinter der Eins – leben nach Berechnungen des kanadischen Entomologen Brian Hocking auf der Erde. Sie wiegen zusammen etwa 2,7 Milliarden Tonnen – fünfmal so viel wie alle heute lebenden Menschen. Auf jeden einzelnen heute lebenden *Homo sapiens* kommen ca. 166 Millionen Insekten.

Was die Insekten bald zur vorherrschenden Tiergruppe auf der Erde machte, war die Entwicklung von Flügeln. Als erste Tiere überhaupt eroberten die Insekten den Luftraum. Das älteste fossil bekannte Fluginsekt *Delitzchala bitterfeldensis*, schon ein perfekter Flieger, ist etwa 320 Millionen Jahre alt. Nach einer der vielen Theorien entwickelten sich die Schwingen aus paddelartigen Auswüchsen am Thorax, mit denen urtümliche Wasserinsekten herumgerudert sein könnten. Bislang lässt sich diese Vermutung jedoch nicht beweisen, denn bei den fossilen Belegen klafft eine Lücke von etwa 40 Millionen Jahren in dieser wichtigen Epoche der Insekten-Evolution.

2.2 Die Formenvielfalt der Insekten

Die Cuticula ist die Grundlage der aberwitzigen Fülle an Formen und Funktionen. Sie ist ein besonderer Werkstoff – leicht und dennoch fest, strapazierfähig und äußerst formbar. Schon die Vorfahren der Insekten hatten diese Substanz entwickelt und aus Chitin, zusammen mit dem Protein Sklerotin, daraus ihr Stützgerüst – ein „äußeres Skelett“ – gebaut. Einen Panzer, auch Exoskelett genannt, der nach außen schützt und nach innen Muskeln und Gewebe stützt. Erstmals im Tierreich ermöglichte er die Bildung von gegliederten Beinen mit Gelenken. Die „Gliedertiere“ oder Arthropoda – neben den Insekten auch Krebse, Spinnen und Tausendfüßer – gleiten und kriechen daher nicht wie Schnecken und Würmer, sondern können sich äußerst zielgerichtet bewegen, sogar rennen und springen.

Auch die vielfältigen Farbvarianten, die Insektenkörper auszeichnen, lassen sich auf Eigenschaften der Cuticula zurückführen: Eingelagerte Pigmente ebenso wie durch mikroskopisch kleine Strukturen der Cuticula. Präzis platzierte Rillen auf den Flügelschuppen einiger südamerikanischen Morphofalter etwa brechen das Licht derart, dass nur leuchtendes Blau reflektiert wird und die Flügel der Schmetterlinge metallisch irisieren.

Selbst das Instrumentarium der Mundwerkzeuge ist formenreich: Mit harten Kiefern halten Libellen die Beute fest, verteidigen sich Ameisen gegen Angreifer, zerbeißen Heuschrecken Pflanzenblätter, bohren Käfer Löcher ins Holz, um dort Eier abzulegen. Mit feinsten Nadelröhren dringen Stechmücken, Wanzen und Flöhe in Pflanzenstiele oder Lebewesen, um wie mit einem Trinkhalm Pflanzensäfte, Blut oder andere Körperflüssigkeiten einzusaugen. Schmetterlinge schlürfen Nektar mit röhrenförmigen Rüsseln: wenn dieser „Tankrüssel“ nicht im Einsatz ist, wird er einfach unter dem Kopf zusammengerollt. Derlei effiziente „Werkzeuge“ sind aus Strukturen entstanden, die bei den Vorfahren der Insekten noch Beine waren.

Auch die sechs Beine der Insekten sind variantenreich – das Merkmal, an dem sie sich am sichersten erkennen lassen und dank derer sie Hexapoda, „Sechsbener“, genannt werden: Hochgeschwindigkeitsläufer wie die südafrikanischen Schwarzkäfer der Gattung *Onymacris* verfolgen ihre Beute auf langen Stelzen mit einem Tempo von bis zu einem Meter pro Sekunde; zugleich halten die Beine die in Wüsten lebenden Käfer vom glühend heißen Boden fern und verhindern so deren Austrocknung.

Ihre muskelbepackten Oberschenkel machen Heupferde und Grashüpfer zu Sprungkünstlern, die schnell und überraschend vor Feinden fliehen können. Doch sind die weiten Sätze nicht direkt auf Muskelkraft zurückzuführen: Heuschrecken etwa verdrehen ihre Hinterbeinschienen und speichern so Spannung, die – im rechten Augenblick gelöst – das Tier explosionsartig in die Luft katapultiert. Wasserzikaden und Schwimmkäfer haben ihre Beine zu Rudern umgebaut, und Maulwurfsgriillen graben sich mit ihren Vorderbeinen durch die Erde, um in den Tunneln nach fressbaren Wurzeln zu suchen.

Insektenbeine dienen nicht allein der Fortbewegung: Die Vorderextremitäten der Gottesanbeterin etwa sind zu einem höchst effektiven Fangapparat umgebaut, der blitzschnell auf Beutetiere herabschießt. Mit einem speziellen Borstensaum an den Beinen sammeln Bienen Pollen und transportieren ihn als „Höschen“ in den heimischen Stock; einige Wasserkäfermänner heften sich bei der Paarung mit Saugnapfen an den Vorderextremitäten an die Partnerin. Manche Grillen und Heuschrecken hören sogar mit ihren Vorderbeinen; sie haben dort Ohren entwickelt. Eine trommelfellartige Membran, das Tympanum, nimmt die Vibrationen auf. Nervenzellen übermitteln die Schwingungen an den Hörnerv, der wiederum Impulse an das Gehirn weiterleitet. Und die Weibchen mancher Schmetterlinge wählen den Eiablageplatz auf Pflanzen nach dem Geschmack aus, den sie mit den Füßen auf einem Blatt trommelnd „ertasten“.

Mehr als ein Drittel aller Insektenpezies, etwa ein Viertel aller bekannten Tierarten, gehört zu den Käfern; und von denen sind bislang etwa 370.000 beschrieben. Zur „Lebensfähigkeit“ hat wohl die besondere Konstruktion ihrer Flügel entscheidend beigetragen: Zum Fliegen benutzen sie nur die hinteren, besonders empfindlichen Schwingen. Nach dem Flug werden die zusammengefaltet und unter die modifizierten Vorderflügel geklappt. Diese „Elytren“, Flügeldecken, sind panzerartig; so können Käfer ein Leben auf dem Boden führen, unter dichtem Gestrüpp, durchs Falllaub rennen und in enge Rindenspalten krabbeln, ohne sich die sensiblen Hautflügel zu verletzen.

Käfer existieren seit etwa 250 Millionen Jahren, doch explodierte ihre Artenzahl, als sich vor etwa 140 Millionen Jahren die ersten bedecktsamigen Blütenpflanzen entwickelten, zu denen heute Obstbäume und Blumen zählen. Es war ein geradezu klassisches Szenario der Evolution – mit einer neuen, ungenutzten Nahrungsquelle, den Blütenpflanzen, und einer Tiergruppe, den Käfern, die in der Lage waren, ihre Ernährung auf das Grünzeug und seine Früchte umzustellen. So spornten sich Pflanzen und Käfer in einem evolutionären Wettrüsten unablässig zur Bildung immer neuer Formen an; ein besonders schönes Beispiel von gemeinsamer Entwicklung, der „Coevolution“.

Um die gefräßigen Kerbtiere abzuwehren, mussten die Pflanzen sich verteidigen. Sie bildeten dicke Fruchthüllen oder Schalen um ihre Samen herum, versteckten ihre Pollen, überzogen ihre Blätter mit klebrigen Haaren oder bildeten giftige Inhaltsstoffe, biologische Insektizide. Die Käfer wiederum entwarfen trickreiche Gegenstrategien: Sie erwarben bohrende Mundwerkzeuge, wie der Haselnussbohrer, der (damit) auch durch harte Nusschalen dringt, um seine Eier abzulegen. Oder sie schalteten die chemischen Waffen aus: Die Larven des Marienkäfers *Epilachna cucurbita* etwa durchbeißen die Adern jener Gurkenblätter, die sie fressen wollen, bevor Gifte mobilisiert und in die Blätter gepumpt werden können.

Käfer waren wohl auch die ersten Tiere, die regelmäßig die Blüten dieser neuen Pflanzengruppe, der Bedecktsamer, bestäubten. Bis dahin hatten die meisten Gewächse den Pollen der männlichen Geschlechtsorgane mit dem Wind verstreuen

und daher riesige Mengen produzieren müssen, um eine Befruchtung zu garantieren – ein Lotteriespiel, das viele Kräfte verschleuderte. Einige Insekten spezialisierten sich nun darauf, den energiereichen Pollen als Nahrung zu nutzen: Sie zogen von Pflanze zu Pflanze und verbreiteten den Blütenstaub weitaus zuverlässiger als der Wind.

Pollen produzierende Gewächse, die für Insekten attraktiver waren als andere, hatten so bald einen Vorteil bei der Vermehrung. Zunehmend wurden andere Kerbtiere – vor allem Bienen, Wespen und Schmetterlinge – in das Geschlechtsleben der Blütenpflanzen einbezogen. Die Pflanzen steigerten ihre Attraktivität für die Flieger und lockten sie mit bunten Farben und süßen Düften gezielt an. Als Belohnung für den Pollentransport bezahlten sie mit energiereicher Währung – Nektar.

Bei den Liaisons von Pflanzen und Insekten entstanden vielfältige Spezialisierungen und Abhängigkeiten, bei denen so manches Gewächs ohne den arteiligen Bestäuber nicht mehr auskam – und umgekehrt (siehe Orchideen + Prachtbienen). So ist eine madagassische Orchidee auf die Bestäubung durch den Schmetterling *Xanthopan morgani praedicta* angewiesen: Nur der bis zu 28 Zentimeter lange Rüssel des Falters erreicht die Nektarquelle am Grunde des fast 30 Zentimeter tiefen Blütenkelches.

Zu den wichtigsten Pollenüberträgern überhaupt wurden die Bienen, von denen es weltweit wahrscheinlich 30.000 bis 40.000 Spezies gibt: die meisten leben solitär, nur wenige Arten in Völkern. Als bislang letzte große Errungenschaft in der Evolution der Insekten – neben Exoskelett, Flügeln und der vollständigen Metamorphose – sind mehrfach unabhängig voneinander Staatengemeinschaften entstanden, in denen das Ganze alles, das Individuum nichts zählt. Der Aufstieg der Termiten und Ameisen begann vor etwa 130 Millionen Jahren, Wespen und Bienen folgten 40 Millionen Jahre später.

Strikte Arbeitsteilung und die Ausbildung morphologisch deutlich unterscheidbarer Kasten – Königin, Arbeiterinnen und Soldaten – kennzeichnen diese Staaten. Die allermeisten Mitglieder haben keine eigenen Nachkommen und sind bereit, ihr Leben dem Ganzen, dem „Superorganismus“, zu opfern. So entstehen riesige Völker – zum Beispiel bei den afrikanischen Treiberameisen *Anoma willverthi* mit mehr als 22 Millionen Individuen. Die sozialen Insekten dominieren heute viele Lebensräume der Erde: Die Gesamtbiomasse an Termiten in der afrikanischen Savanne übersteigt bei weitem das Gewicht der riesigen Herden von Gnus, Zebras und all den anderen Grasfressern. Und Arbeiterinnen eines einzigen Bienenvolkes können am Tag zwei bis drei Millionen Blüten anfliegen und bestäuben.

Insekten sind also nicht nur ihrer schieren Masse und enormen Vielfalt wegen die „wesentlichen Tiere dieser Erde“: Ohne sie wäre die Welt eine andere – weniger bunt, weniger duftvoll, denn etwa 80 Prozent aller bunten Blütenpflanzen sind völlig oder teilweise davon abhängig, von Insekten bestäubt zu werden. Die Konsequenz: Die meisten Pflanzen würden ohne ihre Pollenüberträger extrem selten

oder sogar aussterben: es gäbe keine Äpfel, Melonen, Feigen, Pfirsiche, Kirschen, Heidelbeeren, Kiwis, Zitrusfrüchte und Pflaumen. Die Landschaften wären von grünen, windbestäubten Pflanzen dominiert – von Gräsern, Kiefern oder Fichten.

Zudem würde die Welt im Müll versinken, in Pflanzenstreu und Tierkadavern. Auf einem Quadratmeter eines nordamerikanischen Laubwaldes hat man mehr als 35.000 Insekten gezählt, die sich vor allem von toter organischer Materie ernähren. Neben Bakterien und Pilzen tragen Insekten maßgeblich zur Zersetzung der grünen Pflanzenmasse bei. Und als Fleisch- und Aasfresser vertilgen alleine die Ameisen mehr tierische Kost als alle Fleisch fressenden Säugetiere zusammen.

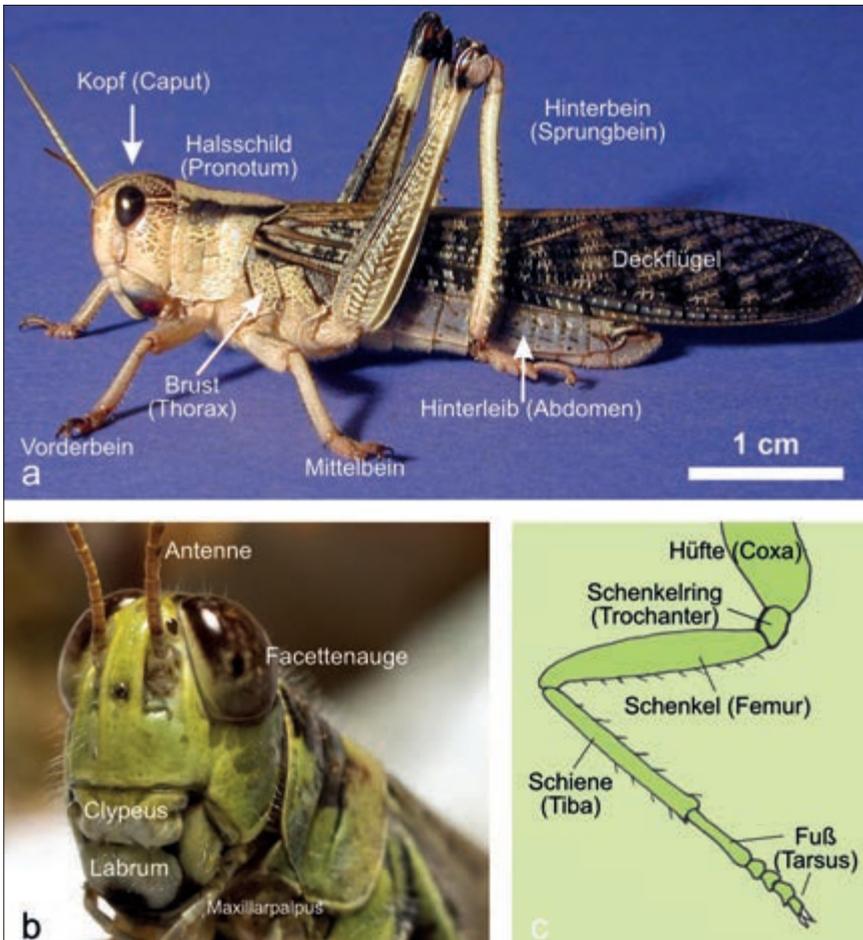
Insekten sind die heimlichen Herrscher der Welt – und die meisten unter ihnen sind Superspezialisten, die winzige Nischen besetzen. Der asiatische Eulenfalter *Lobocraspis griseifusca* etwa trinkt keinen Blütennektar, sondern schlürft die Tränen von Büffeln und Rindern. Häufig versammelt sich ein Kränzchen von Schmetterlingen um ein Rinderauge und alle tunken ihre Rüssel in die (salzhaltige) nahrhafte Flüssigkeit an den Augenlidern. Ein anderer orientalischer Falter hat sogar seine saugenden Mundwerkzeuge umgebaut. Damit durchsticht er die Haut von Säugetieren, um deren Blut zu trinken; der Schmetterling ist damit – ökologisch gesehen – zur Stechmücke geworden.

Auf Inseln, wo oft viele Insektenformen fehlen, besetzen andere Arten auf manchmal überraschende Weise freie Nischen: Die Raupe des Nachtfalters *Ei-*ipithecia oricloris** auf Hawaii etwa ist eine Meisterin des Überraschungsangriffs: Als grüner Zweig getarnt, lauert die Raupe reglos, bis Beute, meist ein kleines Insekt, über sie hinwegläuft: dann packt sie – ruck, zuck – mit ihren Vorderbeinen zu und verspeist das Opfer. Einen höchst bizarren Lebensstil haben die Biologen Andreas Weißflog und Ulrich Maschwitz von der Universität Frankfurt am Main auch bei einer etwa zwei Millimeter langen, malaysischen Fliege entdeckt: Ganz ohne Flügel und Beine lebt das Insekt praktisch bewegungsunfähig in Kolonien von Treiberameisen, von denen es gefüttert und auch transportiert wird – wohl weil es Ameisenlarven gleicht.

3 Woran erkennt man Insekten?

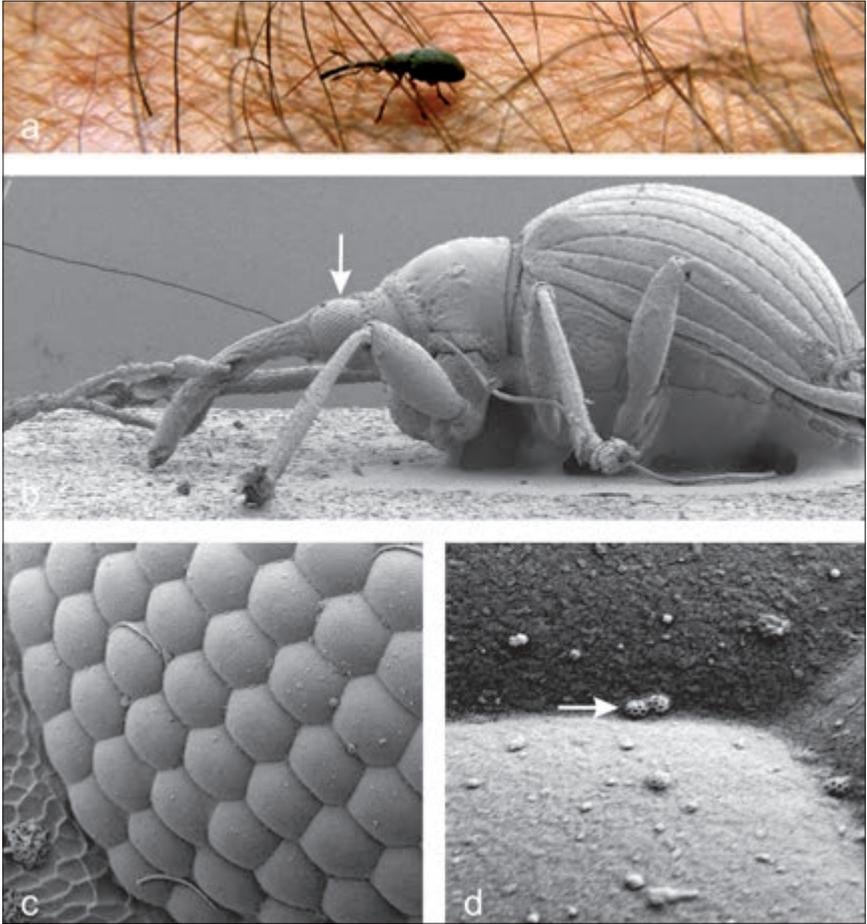
Obwohl die auch Kerbtiere oder Gliederfüßler genannten Insekten unterschiedlicher nicht aussehen könnten, haben sie unglaublich viele Gemeinsamkeiten. Insbesondere besteht der Insektenkörper immer aus drei Teilen: Kopf (Caput), Brust (Thorax) und Hinterleib (Abdomen). Dieser drei Körperabschnitte sind immer vorhanden und somit ein signifikantes Erkennungsmerkmal, auch wenn sie vielfach im Laufe der Evolution in Anpassung an sich ändernde Gegebenheiten umgestaltet wurden.

Am Beispiel der Wanderheuschrecke wird in der nachstehenden Abbildung 1 der Insekten-Grundtyp vorgestellt.



Abbildungen 1a-c: **a** An dieser Heuschrecke lassen sich die drei Körperabschnitte Kopf, Brust und Hinterleib gut erkennen. Im Laufe der Evolution wurden diese bei vielen Insektenarten artspezifisch umgestaltet. **b** Heuschreckenkopf von vorn: Er trägt die Antennen, die Facettenaugen und die Mundwerkzeuge. Der Grundtyp *beißend-kauend* (wie hier bei der Heuschrecke) wurde bei anderen Insektenarten, in Anpassung an die unterschiedlichsten Lebensweisen, zu *leckend* oder *stechend saugend* umgeformt. **c** Insekten besitzen immer drei Beinpaare (s. Abb. 1a), die gelenkig aufgebaut sind. Sie können, je nach Insektenart, zum Laufen, Hüpfen, Graben, Schwimmen, Beutefangen, aber auch zur Tonproduktion oder als Hörorgane eingesetzt werden; © W. Gnatzy.

Figures 1a-c: **a** In this grasshopper, the three body sections, head, thorax and abdomen, are clearly visible. In the course of evolution, these have been reshaped in many insect species. **b** Locust head from the front: it bears the antennae, the compound eyes and the mouthparts. The basic chewing type (as shown here in the grasshopper) has been modified to licking or sucking in other insect species in order to adapt to different ways of life. **c** Insects always have three pairs of legs (see Fig. 1a), which are articulated. Depending on the insect species, they can be used for running, hopping, digging, swimming, catching prey, and also for sound production or as auditory organs; © W. Gnatzy.



Abbildungen 2a-d: Winziger Rüsselkäfer mal „normal“, mal „riesengroß“. **a** Dieser Rüsselkäfer war mit bloßem Auge gerade noch zu sehen. **b** Bei 100-facher Primärvergrößerung (PV) wird der Käfer unter dem Rasterelektronenmikroskop scharf und plastisch dargestellt. **c** Bei einer PV von 1000 x sind die Facetten des Käfer-Auges zu erkennen. **d** Bei einer PV von 10 000 x sind (zufällig auf die Facetten gelandte) winzige Brochosomen (Ausscheidungsprodukte von Zwergzikaden) sichtbar. Brochosomen, die leicht verdriftet werden, werden in speziellen Drüsenzellen der Malpighischen Gefäßen von Zwergzikaden gebildet und schützen diese vor klebrigem Honigtau, da sie Wasser abweisend sind; © W. Gnatzy.

Figures 2a-d: Tiny weevil sometimes “normal”, sometimes “huge”. **a** This weevil was just visible to the naked eye. **b** At 100 x primary magnification (PV), the weevil is sharp and plastic under the Scanning-Electron-Microscope. **c** At a PV of 1000 x, the facets of the weevil’s eye are visible. **d** At a PV of 10 000 x, tiny brochosomes (excretory products of dwarf cicadas) are visible (accidentally landed on the facets). Brochosomes, which are easily drifted, are formed in special glandular cells of Malpighian vessels of leafhoppers and protect them from sticky honeydew by being water repellent; © W. Gnatzy.

Nicht nur an dem meistens für das bloße Auge wahrnehmbaren „Dreiteiler mit sechs Beinen“ sind die Insekten zu erkennen, sondern auch ihre manchmal erstaunlich großen Facetten- oder Komplexaugen sind für sie charakteristisch und ein Alleinstellungsmerkmal. Das Facettenauge stellt eine besondere Entwicklung zum Bildsehen hin dar. Es besteht aus vielen wabenartig zusammengesetzten Einzelaugen (Sehkeile, Ommatidien). Das wahrgenommene Bild setzt sich mosaikartig aus den Bildpunkten der Einzelaugen zusammen (siehe auch Kap. 5.2).

Die funktionellen Details des Facettenauges wie überhaupt die ästhetischen Aspekte des Insektenkörpers lassen sich wie auch allgemein der ungeheuer schöne Mikrokosmos der Natur allerdings nur mit raffinierter Technik erschließen. Und trotzdem sind wir weit davon entfernt, die Komplexität in der Vernetzung der Welt der Insekten mit der von uns Menschen auch nur im Ansatz zu durchschauen.

Mit der Miniaturisierung der Bilder, die hier kurz angesprochen wird, sind weniger die Makroaufnahmen und das Lichtmikroskop gemeint, die letztlich nur große Lupen sind. Vielmehr handelt es sich um das Rasterelektronenmikroskop (REM), das uns weitere, völlig neue Sichtweisen ermöglicht. Mit einem herkömmlichen Lichtmikroskop lässt sich das REM nur hinsichtlich der Aufgabe, eine Oberfläche abzubilden, vergleichen. Der Bildaufbau wird jedoch nicht durch eine optische Abbildung, sondern durch eine punktweise Objektastastung mit einem fein fokussierten Elektronenstrahl und der dadurch lokal ausgelösten Wechselwirkungsprozesse realisiert, wobei das Bild das Ergebnis des abtastensynchronen Registrierens dieses Wechselwirkungssignals ist. Wie die nebenstehende Abbildungen 2b-c zeigen, zeichnet sich das REM durch seine hohe Auflösung (Nanometerbereich) und Schärfentiefe (Faktor 100) aus.

4 Das Anthropozän und seine Auswirkungen auf die Insektenwelt

Die Menschen haben die Erde seit mehr als 200 Jahren so stark verändert, dass Wissenschaftler inzwischen davon ausgehen, dass die ERDE nun in eine neue erdgeschichtliche Epoche eingetreten ist: das Anthropozän. Den Begriff Anthropozän prägte vor etwa zehn Jahren der holländische Atmosphärenchemiker und spätere Nobelpreisträger Paul Crutzen. Der Einfluss des Menschen auf den Planeten Erde ist unübersehbar geworden, nicht zuletzt, weil die Bevölkerungszahl 2023 auf acht Milliarden Köpfe gewachsen ist, d. h. die Erdbevölkerung hat sich seit 1950 mehr als verdreifacht. Die schwerwiegendste Veränderung des Planeten durch den Menschen ist wahrscheinlich der Städtebau, die Anhäufung von Stahl, Glas, Beton und Ziegeln. Auch mit der Einführung der Landwirtschaft hat der Mensch die Welt verändert. Etwa 38 Prozent des nicht von Eis bedeckten Bodens dienen heute dem Anbau von Nutzpflanzen. William Ruddiman, ein Paläoklimatologe an der Universität von Virginia, lässt diese Epoche schon mit der Einführung des

Ackerbaus vor etwa 8000 Jahren beginnen. Seiner Ansicht nach sind die Menschen seit jener Zeit die beherrschende – und verändernde – Kraft auf diesem Planeten. Für Paul Crutzen fängt das Anthropozän dagegen erst mit dem späten 18. Jahrhundert an, mit der Industrialisierung. Andere Wissenschaftler legen den Beginn der neuen Epoche in die Mitte des 20. Jahrhunderts, als Bevölkerungszahl und Konsum rasch anstiegen.

Fest steht, der Mensch ist seit Jahrzehnten dabei, seine Lebensgrundlagen auf dem Planeten Erde zu zerstören: (Ur-) Wälder wurden und werden rücksichtslos abgeholzt oder durch Brandrodung vernichtet. Zunehmend verschwinden Pflanzen- und Tierarten. Ganze Ökosysteme und Naturlandschaften mit ihrer biologischen Vielfalt werden Tag für Tag vernichtet. Die zunehmend industrialisierte Landwirtschaft schafft immer mehr und immer riesigere Monokulturen. Massentierhaltung führt dazu, dass ungeheure Mengen an Gülle anfallen; zusätzlich belasten Aquakulturen die Meere. Messungen zeigen, dass der CO₂-Ausstoß durch die Industrie (u. a. durch die Produktion von Stahl und Zement) ständig steigt. Das gilt auch für die Luftfahrt und den Autoverkehr. Weitere Faktoren: Immer mehr Bodenflächen werden versiegelt, durch Landflucht bei wachsender Bevölkerungszahl konzentriert sich die Menschheit in Megastädten. Um deren Einwohner mit Grundnahrungsmitteln und Trinkwasser zu versorgen, wird das Umland massiv belastet. Ein Massensterben von Flora und Fauna ist in vollem Gange. Die fatalen Auswirkungen sind nicht zu übersehen. Fast täglich gibt es alarmierende Meldungen zum Treibhauseffekt und dem Klimawandel, verbunden mit einer Destabilisierung von Meeresströmungen und von Eismassen. Meldungen über anhaltende Dürreperioden und zunehmende Versteppung, gewaltige Überschwemmungen, kaum beherrschbare Waldbrände und weitere Schreckensnachrichten sind Anzeichen dafür, dass unserem Planeten der Kollaps droht. Das Wissen darum ist inzwischen auch in das öffentliche Bewusstsein breiter Bevölkerungsschichten gelangt; für die Politik wird es höchste Zeit zu handeln.

4.1 Eine Studie macht Schlagzeilen

Die dramatischen Veränderungen der Umwelt wirkten und wirken sich zunehmend negativ auch auf die Insektenwelt aus. Erstmals Im Herbst 2017 rückte das Problem in den Focus einer breiteren Öffentlichkeit, die Rede war vom *Insektensterben*. Was war geschehen? Im Wissenschaftsjournal »PLoS One« war eine detaillierte Studie über einen Besorgnis erregenden Rückgang der Biomasse von heimischen Insekten erschienen. Der Befund fand auch auf den Titelseiten der Weltpresse Beachtung und selbst die New York Times berichtete über die sogenannte »Krefeld-Studie«. Sie war durch Kooperation zwischen Mitgliedern des Entomologischen Vereins Krefeld und Forschern aus verschiedenen Ländern entstanden. Über 27 Jahre hinweg waren an Standorten, vorwiegend in Nordrhein-Westfalen, aber auch in Rheinland-Pfalz und Brandenburg, Malaise-Fallen

aufgestellt worden, mit denen Insekten gefangen wurden. Die gesammelten Insekten wurden nach einem standardisierten Protokoll ausgewertet. Das Ergebnis der Langzeitstudie war erschreckend. In den beprobten Gebieten war die Biomasse der Fluginsekten mehr als 75 Prozent zurückgegangen; im Sommer, zur Hochsaison der meisten Insekten, erreichte der Schwund gar Spitzenwerte von bis zu 82 Prozent. Besonders beunruhigend war, dass diese Zahlen in Schutzgebieten ermittelt wurden, also in jenen Biotopen, die von intensiver Nutzung ausgenommen sind und nach allgemeiner Ansicht die „Hot Spots“ der Biodiversität in Deutschland darstellen.

Heftige Kritik an der Studie kam vor allem aus den Reihen der Agrarlobby. So wurde bemängelt, dass die Ergebnisse der Krefeld-Studie aufgrund von zahlreichen methodischen und statistischen Schwächen keine allgemeingültige Aussagekraft hätten. Die Daten seien ja **nur** in Schutzgebieten erhoben worden und würden nicht den Zustand der gesamten Landschaft repräsentieren.

Doch unabhängig von dem Kleinkrieg um die methodische Reinheit der Modelle war die Krefeld-Studie die beste Datengrundlage, die 2017 für Deutschland vorlag. Denn obwohl gerade Insekten als Bestäuber oder auch als Nahrung für Tiere eine hohe ökologische Bedeutung haben, gab es in Deutschland vorher kein so aussagekräftiges, langfristig orientiertes Monitoring-Programm.

Dagegen hatte eine Studie aus dem Jahr 1983 keine Beachtung in der Öffentlichkeit gefunden, in der bereits die Auswirkungen der intensiven Landwirtschaft auf die Fauna in Agrarbiotopen (hier Winterweizenfelder in der Nähe von Kiel) untersucht worden waren. Im Unterschied zur Krefeld-Studie war die Beprobung mit Hilfe von Bodenfallen erfolgt. Es wurden überwiegend Laufkäfer (Carabidae) gefangen, von denen die meisten Arten flugunfähig sind und sich ständig am Boden aufhalten. Während 1951 die Ausbeute, in Bezug auf die Anzahl der Individuen und die Artenvielfalt, sehr umfangreich war, konnten 30 Jahre später auf eben diesen Feldern nur einige wenige Carabiden oder andere Insekten nachgewiesen werden, ein alarmierender Befund.

Inzwischen sind weitere Insektengruppen untersucht worden, wie beispielsweise Schmetterlinge und (Wild-) Bienen. Gegenstand der Untersuchungen: die Auswirkungen der fortschreitenden Biotopvernichtung und die Folgen der zunehmenden Umweltveränderungen.

Man könnte nun einwenden, dass es Areal- und Bestandsänderungen schon immer gegeben hat und einige Arten sogar auf dem Vormarsch sind (wie beispielsweise der Buchsbaumzünsler oder der asiatische Marienkäfer). Das stimmt zwar grundsätzlich, aber unter dem Strich ist ein derart massiver Verlust an Arten und Biomasse, wie er durch so viele unabhängige Daten und Beobachtungen gestützt wird, mit normalen Schwankungen nicht erklärbar. Es gibt nur wenige mediterrane Falterarten, die durch Bestandszunahme auffallen, wohl begünstigt durch den Klimawandel. Derartige Gegenbewegungen, die es immer schon gege-

ben hat, sind jedoch in der absoluten Minderheit; sie können die massiven Populationseinbrüche und Artenverluste nicht ausgleichen.

4.2 Die Zahl der Insekten befindet sich im Sinkflug

Die Frage, ob es ein gravierendes Insektensterben gibt, stellt sich inzwischen nicht mehr; vielmehr zeichnet sich ein übereinstimmendes Bild ab: (a) Artbestände und Biomasse unserer Insekten sind im freien Fall, selbst sogenannte Allerweltsarten bleiben davon nicht verschont. (b) Seit den ersten Anzeichen im 19. Jahrhundert hat sich der Rückgang fortgesetzt, und er fällt insbesondere seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts als beschleunigter Prozess auf. (c) Es ergibt sich ein alarmierendes Bild: Die Zahl unserer Insekten nimmt dramatisch ab (siehe Symbolbild Abb. 3), wobei das Insektensterben auch vor Naturschutzgebieten nicht Halt macht.



Abbildung 3: Ein „Friedhof“ toter Insekten – Symbolbild für den Niedergang einer Tiergruppe, die auch für uns Menschen unverzichtbar ist; © W. Gnatzy.

Figure 3: A “graveyard” of dead insects – symbolic image of the decline of an animal group that is also indispensable for us humans; © W. Gnatzy.

Nun möchte man meinen, dass in weniger industrialisierten Ländern die Situation besser wäre, aber auch das ist nicht der Fall.

Das Fazit: Die Insekten-Populationen sind insgesamt um ca. 75 Prozent geschrumpft, bei den Schmetterlingen sind es »nur« 35 Prozent. Solch massive und

dauerhaft negative Bestandsentwicklungen bei den Insekten können nicht ohne Folgen bleiben. Das Insektensterben ist ein ernstes globales Phänomen.

Folgen des Insektensterbens

Den Insekten kommt aufgrund ihrer vielfältigen Spezialisierungen und ihrer schieren Biomasse eine zentrale Bedeutung für die Ökosysteme zu. Gehen Biomasse und Zahl der Arten zurück, hat das zwangsläufig erhebliche Auswirkungen auch auf solche Organismen, die direkt oder indirekt mit Insekten interagieren. Eine der vielen fundamentalen „natürlichen Aufgaben“ der Insekten ist die Blütenbestäubung. Ein Großteil der weltweit mehr als 300.000 Arten von Blütenpflanzen ist auf die Bestäubung durch Insekten angewiesen, damit sie Samen bilden und sich vermehren können. Die bestäubenden Insekten erhalten für diesen „Dienst“ Nektar und/oder Pollen. Es besteht also eine wechselseitige Abhängigkeit von Blütenpflanzen und ihren Bestäubern. Ein äußerst fragiles Gleichgewicht.

Honigbienen sind nicht die wichtigsten Bestäuber

Honigbienen sind nicht die wichtigsten Bestäuber in unserer Landschaft. Vielmehr belegen Studien aus Großbritannien und Irland, dass Blütenbestäubung im Mittel zu rund 50 Prozent durch Schwebfliegen, zu 20 bis 30 Prozent durch Wildbienen, aber nur zu 2 bis 3 Prozent durch Honigbienen geleistet wird. Lediglich im direkten Einzugsbereich von Bienenstöcken sind die Zahlen deutlich zugunsten der Honigbiene verschoben. Doch auch hier haben andere Insekten, besonders Wildbienen, erheblichen Anteil an der Blütenbestäubung.

Ursachen des Insektensterbens: Das »tödliche Quintett« aus Düngung, Mahd, Pestiziden, Strukturwandel und Lichtverschmutzung

Für terrestrische Ökosysteme ist vor allem der Stickstoffeintrag ein großes Problem. Dessen ausgiebige Anwendung erzeugt einen massiven Stickstoffüberschuss im Naturhaushalt. Nach Zahlen des Umweltbundesamts liegt bei landwirtschaftlich genutzten Flächen der Stickstoffeintrag über die Luft heute bei etwa 100 Kilogramm pro Hektar. EU-weit sind heute fast zwei Drittel aller natürlichen Flächen überdüngt. Das hat eine Reihe weitreichender und schwerwiegender Folgen: Die Nährstoffbelastung von Gewässern und terrestrischen Ökosystemen nimmt rapide zu. Übermäßiger Ammonium- bzw. Nitrateintrag durch organische Dünger (Gülle) und mineralische Dünger beschleunigt die Versauerung der Ackerböden. Dadurch wird auch das Grundwasser zunehmend belastet. Lachgas als hochpotentes Treibhausgas wird freigesetzt, z. B. in der chemischen Industrie bei der Kunststoffproduktion, bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe oder wenn Moorflächen landwirtschaftlich genutzt werden. Ein zentrales Problem ist die hohe Mobilität dieser Verbindungen im Stickstoffkreislauf der Erde. Indem sie sich umfassend in der Umwelt verteilen, entfalten sie ihre Wirkung überregional, auch weit entfernt von den Orten ihrer Entstehung oder Ausbringung. Die allgegenwärtigen

ge Stickstoffbelastung wird damit zu einem der wesentlichsten Gründe, weshalb die Insekten auch in Schutzgebieten so deutlich rückläufig sind. Die sogenannte Luftdüngung mit Stickstoff ist mittlerweile ein flächendeckendes Problem. Lag sie in vorindustrieller Zeit noch bei etwa 1 bis 2 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr, liegt der Wert heute durchschnittlich bei 18 Kilogramm. Spitzenreiter in Deutschland, als Folge der dort praktizierten intensiven Massentierhaltung, ist das Münsterland, mit gemessenen Werten von 20 bis 81 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr. Die Auswirkungen auf die Artenvielfalt sind verheerend, denn gut gedüngte Pflanzen sind schlechtes Insektenfutter. Eine alte Erfahrung bei Schmetterlingszüchtern ist, dass überdüngte, mastige Pflanzen bei den Raupen Durchfall und Tod zur Folge haben; wohl als Folge der Bildung schädlicher Inhaltsstoffe wie Nitrate oder Nitrite. In der Natur belegen Schmetterlingsweibchen bevorzugt solche Pflanzen mit ihren Eiern, die im Nährstoff-Mangel stehen; die Schmetterlingsweibchen erkennen das vermutlich an einem besonderen Duftbouquet der Pflanzen. Raupen der „Allerweltsarten“ wie Tagpfauenauge, Kleiner Fuchs und Admiral fressen ausschließlich Brennnessel-Blätter. Brennnesseln sind Stickstoffzeiger, Überdüngung macht ihnen nichts aus, aber auch dort, wo sie in Saft und Kraft gedeihen, sucht man die Raupen vergeblich. Die erschreckende Erkenntnis: Alleine ein Angebot an Futterpflanzen reicht nicht aus. Das ist der Grund, weshalb selbst die Populationen dieser ansonsten häufigen »Brennnessel-Falter« heute auf weiter Fläche gesunken sind. Im Gegensatz dazu verschwinden Stickstoff meidende Pflanzen zunehmend, und mit ihnen auch jene Insekten, die auf diese Pflanzen als Nahrungsquelle angewiesen sind.

Warum Magerrasen zunehmend verschwinden

Einer der Indikatoren für das Desaster der Überdüngung ist der Stickstoff liebende Glatthafer (*Arrhenatherum*). Er breitet sich in Magerrasen zunehmend aus und verdrängt die ursprünglich lückig stehenden, sehr kräuterreichen Pflanzengesellschaften mit eher geringer Wuchshöhe. Er verwandelt so Magerrasen in monotone Graslandschaften mit großer, üppiger Wuchshöhe. Eine Kaskade weiterer Wirkungen schließt sich an: Die Anzahl an Blütenpflanzenarten sinkt mit dem Grad der Überdüngung. Hochwachsende Gräser hindern Insekten daran, an niedrig wachsende Kräuter zur Nektaraufnahme und/oder Eiablage zu gelangen. Der Hochwuchs führt zu einer signifikanten Veränderung des Kleinklimas in Bodennähe. War der ehemals niedrig wüchsige, offene Magerrasen von Hitze und Trockenheit geprägt, ist es nun in Bodennähe kühler und feuchter geworden. Das tolerieren die Larvenstadien der Magerrasenspezialisten in der Regel nicht.

Mähen „auf Teufel komm raus“

Früher wurde Grünland selten, allenfalls ein- bis zweimal pro Jahr gemäht. Mit der Intensivierung der Landwirtschaft hat sich das drastisch geändert: Man mäht gedüngte Wiesen heute bis zu sechsmal pro Jahr. Dazu werden hocheffiziente

Maschinen mit Mähwerken eingesetzt, die wahre Todesfallen sind. Kommt ein sogenannter Aufbereiter zum Einsatz, sterben rund 60 % aller auf den Pflanzen sitzenden Insekten. Zudem wird vielfach innerhalb weniger Stunden eine riesige Fläche gemäht. Insekten, die das Mähen überlebt haben, finden dann oft keine Ausweichflächen mehr. Außerdem verschwinden bei zu häufiger Mahd viele blühende Wildpflanzen, die wichtige Nektar- und Pollenquellen für Insekten sind und mit ihnen jene Insekten, die von ihnen leben. Häufig gemähte Biotope veröden rasch zu „Grünflächen“.

„Kein giftiger Land“ in dieser Zeit

Pflanzenschutzmittel (Pestizide) sollen unsere Feldfrüchte vor unerwünschten Unkräutern, Viren, Mikroorganismen, Schimmelpilzen und tierischen Schädlingen schützen. Ein grundsätzlich vernünftiges Ansinnen, wenngleich mit schlimmen Nebenwirkungen. Denn die Gifte erfassen natürlich auch Nichtzielorganismen und verbreiten sich überregional in der Umwelt. Mit dieser Wirkung stellen Pestizide neben der Luftdüngung eine zweite zentrale Bedrohung unserer Artenvielfalt dar, auch in Schutzgebieten. Dabei steigt ihr Absatz rasant an: Nach Daten des Umweltbundesamtes waren es 1998 in Deutschland noch rund 35 Kilotonnen an Pestiziden, inzwischen sind es 47 bis 48 Kilotonnen, die jährlich auf den Feldern ausgebracht werden. Hinzu kommt, dass heutige Pestizide wesentlich potenter sind als früher.

Strukturwandel. Monokulturen statt Vielfalt

Riesige Felder ohne Feldraine, ohne Hecken und Feldgehölze, keine Feuchtwiesen, keine vegetationsarmen Standorte, keine Kleingewässer: Unter anderem als Folge der Flurbereinigung beherrschen heute in der industriell betriebenen Landwirtschaft auf weiten Flächen Monokulturen das Bild. Über Jahre hinweg werden unter Einsatz von viel Chemie ein- und dieselben Nutzpflanzen angebaut. Das führt zu Bodenerosion und einer massiven Verarmung der Ackerbegleitflora und -fauna. Außerdem ist die Bodenfruchtbarkeit bedroht, die nicht beliebig durch immer mehr Dünger wieder aufgebaut werden kann. Monotone Maisäcker, Raps- und Reisfelder nehmen immer mehr zu. In den Tropen werden ursprüngliche Regenwälder vernichtet und durch Palmöl-, Soja- oder Ananasplantagen ersetzt. Bei uns dienen inzwischen knapp 20 Prozent der Landwirtschaftsfläche dem Anbau von Energiepflanzen wie Mais. Das belastet die Umwelt durch Dünger und Pestizide noch weiter und treibt das Artensterben voran. Weshalb beim heutigen Wissensstand intensive Landwirtschaft mit all ihren schädlichen Begleiterscheinungen noch immer derart stark subventioniert wird wie innerhalb der EU und der Ökolandbau noch immer ein Schattendasein fristet, ist angesichts all dieser Erkenntnisse nicht nachvollziehbar.

Auch in der Forstwirtschaft setzte man – zumindest in der Vergangenheit – oft auf Monokulturen, zum Beispiel mit der schnellwüchsigen Fichte. Die Fichte

wurde so für die einen zum „Brotbaum“ der deutschen Forstwirtschaft, für die anderen der Inbegriff naturferner Monokulturen. Entsprechender Schadinsektenbefall stellt sich bei solchen Fichtenmonokulturen sehr schnell ein, wie das Beispiel Borkenkäfer drastisch zeigt.

Als Folge des Klimawandels, die Fichte kann ausgeprägte Trockenperioden nur schwer überstehen, hat in der Zwischenzeit teilweise ein Umdenken stattgefunden. Es werden verstärkt Baumarten angepflanzt, die die zunehmenden extremen Umweltbedingungen besser aushalten. Ein Beispiel dafür ist die robuste nordamerikanische Roteiche (*Quercus rubra*) oder Spitzeiche. Nicht berücksichtigt wurde dabei, dass die meisten einheimischen Insektenarten die Roteiche als Nahrungsquelle meiden. Eine andere Insektenart profitiert jedoch. Es ist der nordamerikanische Roteichen-Zwergwickler (*Bucculatrix ainliella*). Als invasives Neozoon (eingeschleppter „Neubürger“) hat er keine natürlichen Feinde, konnte sich in Deutschland rasant ausbreiten und schädigt die Roteichen.

Lichtverschmutzung. Der helle Tod

An den natürlichen Tag-/Nacht-Rhythmus haben sich die Insekten im Laufe der Evolution in vielfältiger Weise angepasst. Allerdings verändert sich zunehmend das nächtliche Stadt- und Landschaftsbild durch künstliche Beleuchtung. In den siedlungsintensiven Gebieten breitet sich des Nachts eine Lichtglocke aus, die über viele Kilometer, selbst aus dem Weltall, wahrgenommen werden kann. Beleuchtete Straßen und Häuser machen die Nächte heller. Dieses Phänomen wird als Lichtverschmutzung bezeichnet. Das hat gravierende Folgen für nachtaktive Insekten, wobei das künstliche Licht sich nicht nur auf deren Verhalten und Rhythmik auswirkt, sondern auch ihre Orientierung beeinflusst. Denn nachtaktive, flugfähige Insekten orientieren sich normalerweise am schwachen Licht der Gestirne. So reicht beispielsweise Nachtfaltern die geringe Helligkeit des Mondes von nur 0,002 bis 0,4 Lux für die Futter- und Partnersuche. Künstliche Lichtquellen, wie Straßenlaternen oder die Außenbeleuchtung an Gebäuden mit einer vieltausendfachen Helligkeit, üben jedoch auf viele Insekten eine magische Anziehungskraft aus. Besonders Lichtquellen mit einem hohen UV-Anteil locken zahlreiche Nachtfalter und andere nachtaktive Insekten an. Die Tiere steuern gezielt auf die Lampen zu und umkreisen diese teilweise bis zur totalen Erschöpfung. Die geschwächten Insekten werden im Laufe der Nacht oder bei Tagesanbruch dann massenhaft Opfer verschiedener Insektenfresser wie Spinnen, Kröten, Vögel, Spitzmäusen oder Igel.

Warum wir auch in Zukunft Insekten brauchen

Seit über 300 Millionen Jahre gibt es Insekten. Während dieser langen Zeitspanne gelang es ihnen, nahezu alle Lebensräume auf diesem Planeten zu besiedeln. Doch jetzt ist ihre Zukunft ungewiss. Zwar sehen viele Zeitgenossen Insekten vor allem als lästige Unruhestifter und Schädlinge an, für sie ist deren Verschwinden

ein Grund zur Freude. Tatsächlich ist es aber eine Katastrophe, denn die Insekten brauchen uns nicht, aber wir brauchen sie. Denn wenn es immer weniger Insekten gibt, steht das gesamte Netzwerk, in dem Tiere und Pflanzen eng verwoben sind, auf dem Spiel. Die Welt wird zur Ödnis, d. h. die bunte Vielfalt der Blütenpflanzen bricht zusammen. Für uns Menschen käme es zu einer enormen Einbuße an Lebensqualität. Vor allem aber werden wir nicht mehr in der Lage sein, von den faszinierenden Fähigkeiten der Insekten zu lernen. Dazu kommt ein riesiges Arsenal an biochemischen Verbindungen, die in der Insektenwelt synthetisiert werden, die uns unschätzbare Dienste leisten können, etwa im Kampf gegen immer schwerer zu beherrschende Bakterienstämme. Ohne antibakteriell, antiviral und antimykotisch wirkende körpereigene Substanzen könnten Insekten nicht überleben. Diesen Schatz haben wir für unsere Zwecke noch längst nicht annähernd gehoben und wir sollten ihn nicht so leichtfertig aufs Spiel setzen.

5 Spektakuläre Erfindungen der Insekten – Beispiele

Die gesamte Raffinesse, aber auch Ästhetik der Erfindungen der Insekten erschließt sich auch durch das Vordringen in kleinste Größenordnungen. Dabei ermöglicht das Rasterelektronenmikroskop völlig neue Sichtweisen (siehe Kap. 3.2.). Die folgenden Abbildungen zeigen anhand dreier Beispiele, welche unglaublichen Erfindungen die Insektenwelt hervorgebracht hat (siehe GNATZY & TAUTZ 2023).

5.1 Haftapparate an den Beinen der Männchen der Gelbrandkäferart *Dytiscus marginalis* begünstigen die Paarungsstellung

Johann Leonard Frisch, ein Pionier entomologischer Forschung und universaler Geist der Frühaufklärung, schrieb 1721: „Von dem grossen schwarzen Wasserkäfer mit dem gelben Saum“ [gemeint ist eine von mehreren ähnlich aussehenden Gelbrandkäferarten]. „Aber die Männlein haben an den vorderen Füßen eine besondere Knie-Scheibe, womit sie sich sehr fest an etwas an hangen können ...“.[Er gibt auch den Vorteil dieser Fußbildung an]: „... dass diese Knie-Scheiben dem Männlein dreyerley Vorteile geben. Der erste ist im Gatten mit dem Weiblein, dass er sich fest auf die glatten Flügel oben ankleben kann ...“ (Abb. 4).

Vergleicht man die Vorderbeine eines Gelbrandkäfermännchens mit denen eines Weibchens, fällt die ungewöhnliche Form der Vorderbeine des Männchens auf. Sie sind zu einem scheibenförmigen Halteapparat ausgebildet. Dieser komplexe Halteapparat besteht aus den drei letzten Fußgliedern (Tarsalgliedern). Auf dem ersten Fußglied sind zwei große und ca. 50 kleine Saugnäpfe zu erkennen (Abb. 5).



Abbildung 4: Dieses Männchen der Gelbrandkäferart *Dytiscus marginalis* hat sich mit seinem Haftapparat am Vorderbein (weißer Pfeil) und den Krallen seines Mittelbeinpaars (weißer Kreis) am Halsschild wie auch am Ende des Hinterleibs des Gelbrandkäferweibchens fest verankert. Es befindet sich so in einer günstigen Paarungsstellung; © W. Gnatzy.

Figure 4: This male of the yellow blister beetle species *Dytiscus marginalis* has firmly anchored itself to the neck shield as well as to the end of the abdomen of the female yellow blister beetle with its adhesive apparatus on the foreleg (white arrow) and the claws of its middle leg pair (white circle). It is thus in a favorable mating position; © W. Gnatzy.

Alle Saugnäpfe sitzen auf kurzen Stielen. Dem gesamten Halteapparat sitzen dicht an dicht gedrängt kräftige, spitz zulaufende Borsten auf. Die Saugnäpfe sind durch eine Art Gelenk beweglich und können sich so Unebenheiten von Oberflächen anpassen. Ist ein Gelbrandkäfermännchen bei seiner Jagd nach einem Weibchen erfolgreich, packt es das Weibchen und versucht, sich auf dessen Rücken in Paarungsstellung zu bringen. Um auf dem sehr glatten Halsschild des Weibchens nicht abzurutschen, versucht das Männchen, mit den Saugnäpfen der Vorderbeine eine zugfeste Verbindung herzustellen: Beim Andrücken der Vorderbeine finden zunächst die beiden großen Saugnäpfe Kontakt, anschließend die vielen Minisaugnäpfe. Das geschieht, indem sich deren elastischen Ränder jeder Unebenheit anschmiegen. So verbunden hält das Männchen das Weibchen oft mehrere Tage lang mit seinem Klammergriff fest.

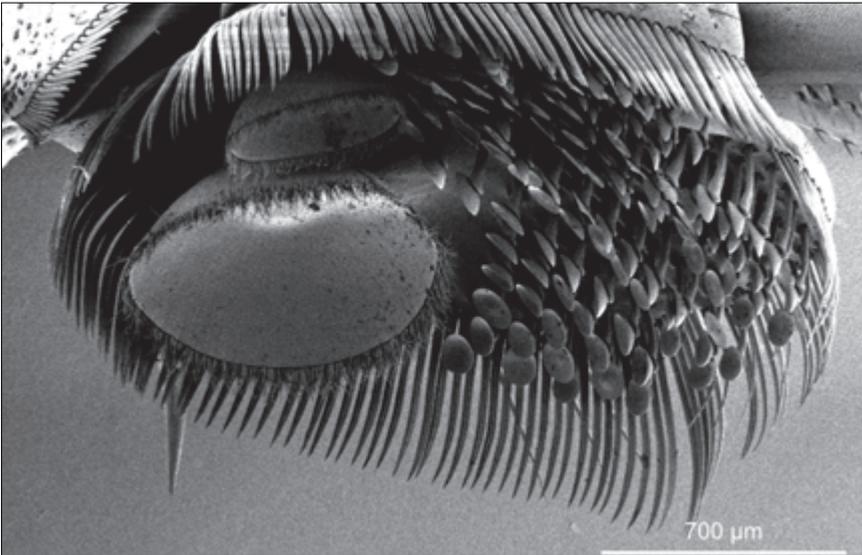


Abbildung 5: Vorderbein eines Gelbrandkäfermännchens. Die zwei größeren und die vielen kleinen Saugnäpfe des Haftapparats umgibt ein Kranz aus spitz zulaufenden Borsten; raster-elektronoptische Aufnahme; © W. Gnatzy.

Figure 5: Foreleg of a male yellow fire beetle. The two larger and the many smaller suckers of the adhesive apparatus are surrounded by a ring of tapered bristles; scanning electron micrograph; © W. Gnatzy.

5.2 Sehen bei Dämmerlicht: Facettenaugen mit Antireflexbelag

Unser einheimischer Mittlerer Weinschwärmer (*Deilephila elpenor*; Sphingidae), ein Nachtfalter, hat, gemessen an seiner Körpergröße (30 mm), zwei auffallend große, halbkugelige Facettenaugen (Durchmesser: 2,5–3 mm), die aus vielen sechseckigen Einzelaugen (Ommatidien) bestehen (Abb. 6).

Bei lichtmikroskopischer Vergrößerung wirkt die Corneaoberfläche der Facettenaugen (Linsen der Einzelaugen) nicht glatt, sondern angeraut. Bei ca. 100.000-facher Vergrößerung ist die Besonderheit der Nachtfaltercornea zu erkennen: Die Oberfläche ist mit winzigen, konisch geformten Noppen (Höhe: 200–250 nm; 1 nm = 1 Millionstel eines Millimeters) besetzt (Abb. 7a, b).

Der Durchmesser einer Noppe liegt mit ca. 100 nm unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Auch der Abstand zwischen den einzelnen Noppen ist mit ca. 200 nm kleiner als die Wellenlänge des Lichts. Pro Quadratmikrometer drängen sich, regelmäßig angeordnet, Tausende dieser Noppen. Die Nanonoppen, die die gesamte Corneaoberfläche der nachtaktiven Schwärmer überziehen, wirken sich in mehrfacher Hinsicht vorteilhaft aus: Erstens erfolgt der Übergang vom niedrigbrechenden Medium Luft (Brechungsindex $n = 1$) zur hochbrechenden

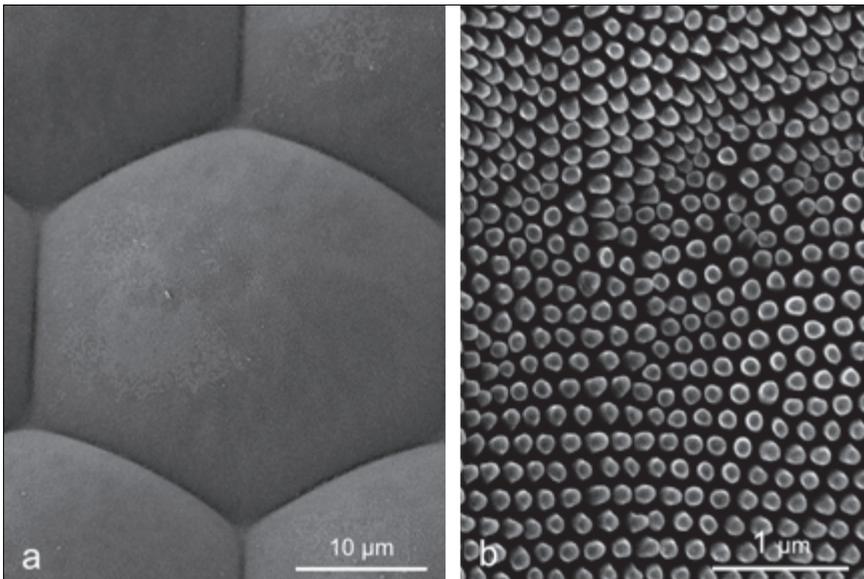


Abbildung 6: Die beiden halbkugeligen Facettenaugen des einheimischen Mittleren Weinschwärmers (*Deilephila elpenor*) sind auffallend groß und bestehen aus Tausenden von sechseckigen Einzelaugen (Ommatidien); © W. Gnatzy.

Figure 6: The two hemispherical compound eyes of the native middle wine hawkmoth (*Deilephila elpenor*) are conspicuously large and consist of thousands of hexagonal individual eyes (ommatidia); © W. Gnatzy.

(durchsichtigen) Cuticula der Cornea ($n = 1,5-1,6$) nicht abrupt, sondern allmählich. Dieser elegante Kunstgriff der Natur zur Verhinderung von Reflexion verhilft

den nachtaktiven Schwärmern zu ihrer guten Sicht, denn das in der Dämmerung vorherrschende Blaulicht der Wellenlänge 450 nm wird von der Cornea überhaupt nicht reflektiert. Auch noch kürzere Wellenlängen bis in den UV-Bereich werden zu weniger als 1 % zurückgestreut. Der aus Noppen bestehende Antireflexbelag ermöglicht so den Nachtfaltern, selbst bei den schwierigen Lichtverhältnissen, wie sie beispielsweise abends herrschen, ganz normal zu fliegen. Die Nachtfalter finden aus diesem Grund selbst in der Dämmerung erfolgreich Blüten. Zweitens verraten sich (Nacht-)Schwärmer nicht gegenüber Fressfeinden, da verräterische Reflexe, wie sie durch die Spiegelung von Licht auf Facettenaugen mit glatter Oberfläche entstehen, unterbunden werden. Drittens verstärkt die Noppenstruktur die hydrophoben Eigenschaften der Corneaoberfläche im Vergleich zu einer planen Fläche. Das hängt damit zusammen, dass die Kontaktfläche zu Wasser und Schmutzpartikeln durch das Noppenprofil wesentlich verkleinert und die Haftung verringert wird. Schmutzpartikel werden deshalb nicht wie bei einer glatten Oberfläche von Wassertropfen aufgenommen und lediglich verlagert, sondern haften an den herabrollenden Tropfen und werden entfernt. Zusätzlich wird dieser Vorgang durch die Krümmung der Cornea verstärkt. Folge ist, dass Wasser und

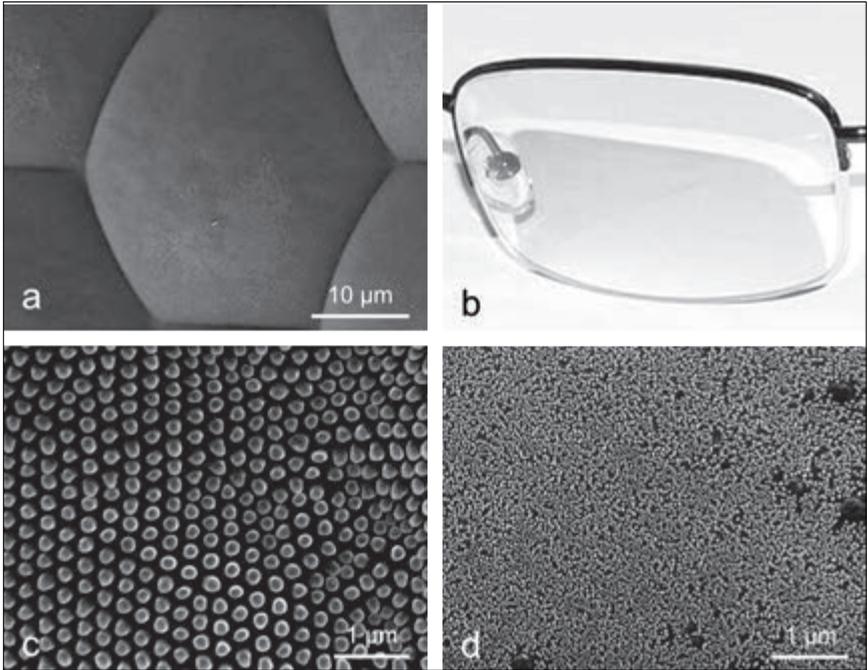


Abbildungen 7a-b: **a** Die Corneaoberflächen, das heißt die Linsen der Facettenaugen, wirken bei geringer rasterelektronenoptischer Vergrößerung nicht glatt, sondern angeraut. **b** Bei 100.000-facher Vergrößerung zeigt sich, dass die Corneaoberfläche mit winzigen, konisch geformten Noppen besetzt ist; © W. Gnatzy.

Figures 7 a-b: **a** The corneal surfaces, i.e., the lenses of the compound eyes, do not appear smooth but roughened at low scanning electron optical magnification. **b** At 100,000 × magnification, it can be seen that the corneal surface is studded with tiny, conically shaped nubs; © W. Gnatzy.

Schmutz auf den Facettenaugen aberlen und die Sicht nicht behindern, sodass Nachtfalter auch bei stärkerem Regen unterwegs sein können.

Bei einer Vielzahl von Geräten stellen Lichtreflexionen ein echtes Problem dar, beispielsweise bei Displays von digitalen Kameras und von Mobiltelefonen oder Endoskopen, wie sie in der Medizin verwendet werden. Solche Reflexionen lassen Bilder dunkler erscheinen, stören den Lichtweg, erzeugen Geisterbilder. Inspiriert von den Noppenstrukturen der Nachtfalter gelang in jüngster Zeit die Entwicklung von kostengünstigen und unkomplizierten Verfahren zur Herstellung pyramidaler und hohler, säulenartiger Strukturen, ähnlich den Noppen auf der Nachtfaltercornea, die sich für Bildschirme, Displays und Brillengläser eignen.



Abbildungen 8a-d: Vergleich: Antireflexbelag auf der Cornea eines Schwärmers bzw. auf einem Brillenglas. **a** Corneaoberfläche einer Facette eines Weinschwärmers. **b** Brillenglas mit Lotuseffekt. **c** Noppen auf der Corneaoberfläche eines Weinschwärmers; rasterelektronenoptische Aufnahme (Primärvergrößerung 10.000-fach). **d** Noppen auf einem Brillenglas mit Lotuseffekt; rasterelektronenoptische Aufnahme (Primärvergrößerung 10.000-fach). Fazit: Im Vergleich zur Cornea des Nachtschwärmers sind die Noppen auf dem Brillenglas kleiner und ihre Anordnung ist unregelmäßiger; © W. Gnatzy.

Figures 8a-d: Comparison: Antireflection coating on the cornea of a wine hawkmoth and on an eyeglass lens. **a** Corneal surface of a facet of a wine hawkmoth. **b** Eyeglass lens with lotus effect. **c** Nubs on the corneal surface of a wine hawkmoth; scanning electron optical image (primary magnification 10,000 x). **d** Nubs on an eyeglass lens with lotus effect; scanning electron optical image (primary magnification 10,000 x). Conclusion: Compared to the cornea of the moth, the nubs on the spectacle lens are smaller and their arrangement is more irregular; © W. Gnatzy.

Die Probe aufs Exempel: Brillengläser mit Lotuseffekt unter dem Rasterelektronenmikroskop. Beim Kauf einer neuen Brille kann der Kunde zwischen einer Brille mit und ohne (teurem) Lotuseffekt wählen. Dass die Hersteller von Brillengläsern bisher wohl doch noch nicht ganz die Perfektion der Natur erreicht haben, zeigt der direkte Vergleich der Corneaoberfläche eines Weinschwärmers mit der Oberfläche einer modernen Brille, ausgestattet mit diesem Lotuseffekt (Abb. 8).

5.3 Heiß auf Waldbrände: Kiefernprachtkäfer, die fliegenden Feuermelder

Naturgemäß flüchten alle Tiere, auch die meisten Insekten, wenn in ihrer Umgebung ein größeres Feuer ausbricht. Doch eine kleine Gruppe von Insekten, darunter der einheimische Schwarze Kiefernprachtkäfer (*Melanophila acuminata*), ist pyrophil (feuerliebend). Es gibt verschiedene Prachtkäferarten, die durch Waldbrände magisch angezogen werden. Ihr massenhaftes Auftreten bei einem Brand 1924 in Kalifornien soll sogar Feuerwehrleute bei den Löscharbeiten behindert haben. Wenn ein Wald brennt, entstehen Temperaturen von 425 bis 1000 °C und verursachen eine Wärmestrahlung im nahen bis mittleren Infrarot-(IR-)Bereich (Wellenlänge 2–4 µm). Gerade in diesem Bereich entsteht in unserer Atmosphäre ein sogenanntes IR-Fenster. Das bedeutet, dass IR-Strahlung über weite Strecken nahezu ungehindert durchgelassen wird, ohne absorbiert zu werden. Was hat der Kiefernprachtkäfer davon? Umfangreiche Untersuchungen ergaben, dass sie Sinnesorgane besitzen, die extrem empfindlich auf IR-Strahlung reagieren. Hat also ein Kiefernprachtkäfer Brandgeruch erschnüffelt, breitet er seine Flügel aus und schwingt sich in die Höhe. Über den Baumkronen angekommen, versucht er, das Feuer mithilfe seiner IR-Sinnesorgane zu lokalisieren, wobei er den Körper im Flug leicht aufgerichtet hält (Abb. 9).

Die Miniaturfeuermelder der Kiefernprachtkäfer sind im Vergleich zu den herkömmlichen Feuermeldern, wie sie jetzt in jedem Haushalt Pflicht sind, winzig und mit dem bloßen Auge kaum zu erkennen. Männchen wie Weibchen besitzen je zwei solcher „Feuermelder“, das heißt Infrarot-(IR-)Sinnesorgane. Sie liegen in einer ovalen (ca. 300 × 150 × 100 µm großen) Vertiefung des Exoskeletts, unmittelbar hinter den Hüften (Coxen) des mittleren Beinpaars (Abb. 10).

Wie werden die IR-Sinnesorgane des Kiefernprachtkäfers erregt? Die Wärmestrahlung erzeugt in den Sensoren kurze Druckimpulse, die innerhalb von Millisekunden die extrem empfindliche Spitze der mechanosensitiven Sinneszelle verformen. Diese durch die IR-Strahlung ausgelösten, mikromechanischen Vorgänge sind 100-mal schneller als ein Wimpernschlag! Auch genügt ein Wärmefluss von nur wenigen Milliwatt pro Quadratzentimeter, das ist etwa so viel, wie unsere Haut an Wärme abstrahlt (!), um die IR-Sinneszelle zu erregen. Der Käfer fühlt sozusagen mit seinen IR-Sensillen Wärme. Ganz im Gegensatz zu den vergleichsweise klobigen technischen Feuermeldern lokalisieren (orten) Männchen

und Weibchen der Kiefernprachtkäfer IR-Strahlung mit ihren winzigen, äußerst empfindlichen IR-Organen. Sie spüren Waldbrände auf, auch wenn diese kilometerweit entfernt sind. An solchen ungewöhnlichen Rendezvousplätzen erfolgt dann die Paarung, selbst wenn das Feuer noch nicht erloschen ist. Die Larven der Käfer entwickeln sich in den verkohlten Baumstämmen.



Abbildung 9: Kiefernprachtkäfer beim Lokalisieren einer Hitzequelle. Die Lage der beiden IR-Sinnesorgane ist durch Pfeile angedeutet; © W. Gnatzy.

Figure 9: Pine fruit beetle locating a heat source. The location of the two IR sensory organs is indicated by arrows; © W. Gnatzy.

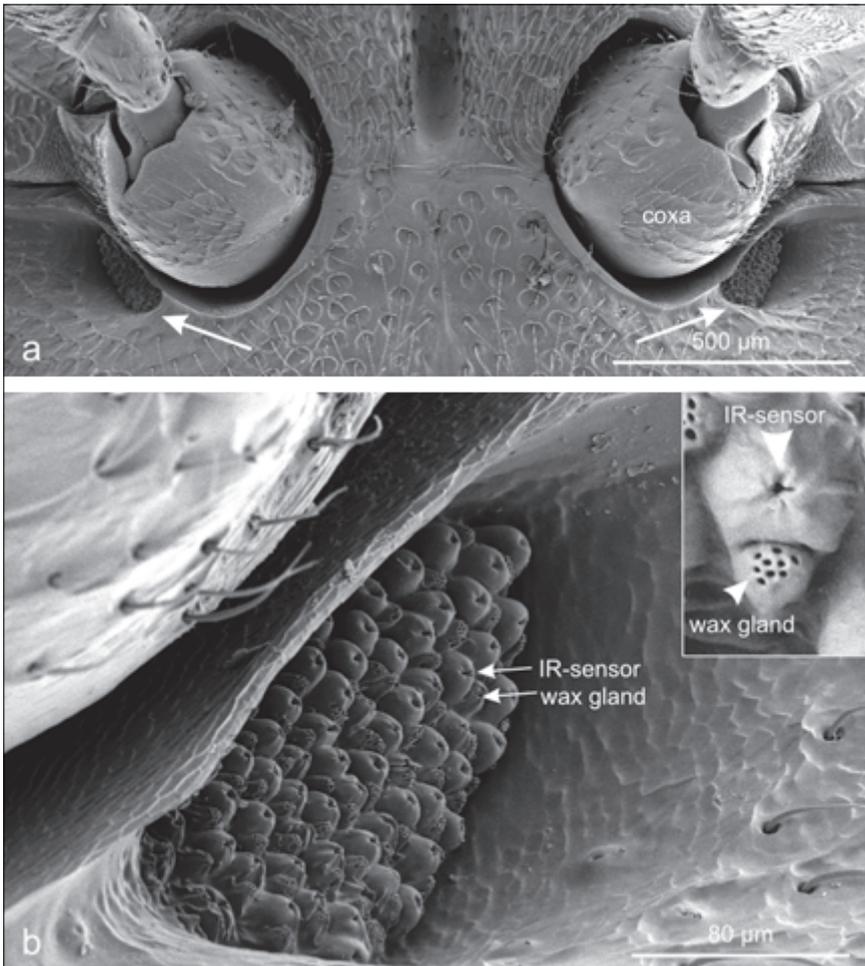


Abbildung 10: **a** Die IR-Sinnesorgane befinden sich unmittelbar hinter den Hüften (Coxen) des mittleren Beinpaars (Pfeile). **b** Die ca. 80–100 IR-Sensoren und die ebenso vielen Wachsdrüsen liegen in einer ovalen Vertiefung des Exoskeletts. **Inset:** IR-Sensor und Wachsdrüse; stärkere rasterelektronenoptische Vergrößerung; © W. Gnatzy.

Figure 10: **a** The IR sensory organs are located immediately behind the hips (coxae) of the middle pair of legs (arrows). **b** The approx. 80–100 sensors and the same number of wax glands are located in an oval depression of the exoskeleton. **Inset:** IR sensor and wax gland; stronger scanning electron optical magnification; © W. Gnatzy.

6 Danksagung

Die Autoren danken Herrn Schmitz (Univ. Bonn) für die großzügige Bereitstellung von Tiermaterial (*Melanophila acuminata*), Herrn Manfred Ruppel (Univ. Frankfurt) für seine ausgezeichnete Hilfe bei der Herstellung der rasterelektronoptischen Aufnahmen. Unser Dank gilt auch Frau Christina Gnatzy für ihre kompetente Unterstützung bei der Gestaltung der Abbildungen eins bis zehn und dem Design des Coverbildes. Für kritische und hilfreiche Anmerkungen danken wir dem Schriftleiter des Nassauischen Vereins für Naturkunde, Herrn Toussaint.

7 Literatur

Der Beitrag basiert auf dem Buch:

GNATZY, W & TAUTZ, J. (2023): Insekten, Erfolgsmodelle der Evolution. Faszinierend und bedroht. – 272 S.; Berlin, Heidelberg (Springer).

Vertiefende Literatur zu den drei vorgestellten Fallstudien:

5.1 Haftapparate an den Beinen der Männchen der Gelbrandkäferart *Dytiscus marginalis* begünstigen die Paarungsstellung

ADIS, J. (1974): Der „Klammergriff“ des *Dytiscus marginalis*-Männchens. – *Zool. Anz.*, **193**: 101-102.

FRISCH, J.L. (1721): Beschreibung von allerley Insecten in Teutschland, nebst nützlichen Anmerkungen und nöthigen Abbildungen von diesem kriechenden und fliegenden inländischen Gewürme, zur Bestätigung und Fortsetzung der gründlichen Entdeckung, so einige von der Natur dieser Creaturen heraus gegeben, und zur Ergänzung und Verbesserung der anderen. Anderer Teil; Berlin (Christoph Gottlieb Nicolai); (<http://resolver.sub.uni-goettingen/.de/purl?PPN397698313>).

KORSCHOLT, E. (1923/24): Bearbeitung einheimischer Tiere: Der Gelbrand *Dytiscus marginalis* L. – 863 S.; Leipzig (Verlag Engelmann).

NAUMANN, H. (1955): Der Gelbrandkäfer. – Die Neue Brehm-Bücherei, **162**: 80 S.; Wittenberg Lutherstadt (A. Ziemsen Verlag).

WESENBERG-LUND, C. (1943): Biologie der Süßwasser-Insekten. – 682 S.; Kopenhagen, Berlin (Gyldendal & Springer).

5.2 Sehen bei Dämmerlicht: Facettenaugen mit Antireflexbelag

BERNHARD, C.G. & MILLER, W.H. (1962): A corneal nipple pattern in insect compound eyes. – *Acta Physiol Scand.*, **56**: 385-386.

BERNHARD, C.G., MILLER, W.H. & MOLLER, A.R. (1965): The insect corneal nipple array: A biological, broad-band impedance transformer that acts as an antireflection coating. – *Acta Physiol Scand.*, **63**: 1-79.

BERNHARD, C.G., GEMME, G. & SALLSTRO, J. (1970): Comparative ultrastructure of corneal surface topography in insects with aspects on phylogenesis and function. – *Z. Vergl Physiol.*, **67**: 1-24.

- LOHMÜLLER, T., HELGERT, M., SUNDERMANN, R., BRUNNER, J. & SPATZ, P. (2008): Biomimetic interfaces for high-performance optics in the deep-UV light range. – *Nano Letters*, **8**: 1429-1433.
- LOHMÜLLER, T., SPATZ, P. & BRUNNER, R. (2008): „Entspiegelung nach dem Vorbild von Mottenaugen“. – *Physik in unserer Zeit*, **39**: 266-267.
- PEISKER, H. & GORB, ST.N. (2010): Always on the bright side of life: anti-adhesive properties of insect ommatidia grating. – *J Exp Biol.*, **213**: 3457-3462.
- WELSCH, B. (1977): Ultrastruktur und funktionelle Morphologie der Augen des Nachtfalters *Deilephila elpenor* (Lepidoptera, Sphingidae). – *Cytobiol.*, **11**: 378-400.
- YAGI, N. & KOYAMA, N. (1963): The compound eyes of lepidoptera. Approach from Organic Evolution. – 320 S.; Tokyo (Shinkyō Press).

5.3 Heiß auf Waldbrände: Kiefernprachtkäfer, fliegende Feuermelder

- EVANS, W.G. (1966a): Morphology of the infrared sense organs of *Melanophila acuminata* (Coleoptera, Buprestidae). – *Ann. Entomol. Soc. Am.*, **59** (5): 873-877.
- EVANS, W.G. (1966b): Perception of infrared radiation from forest fires by *Melanophila acuminata* DeGeer (Coleoptera, Buprestidae). – *Ecology*, **47**: 1061-1605.
- EVANS, W.G. (1975): Wax secretion in the infrared sensory pit of *Melanophila acuminata* (Coleoptera, Buprestidae). – *Quaestiones entomologicae*, **11**: 587-589.
- MANEE, A.H. (1913): Observations on Buprestidae at Southern Pines, North Carolina (Coleop.) – *Entolol. News*, **24**: 167-171.
- SCHMITZ, H. & SCHÜTZ, S. (2000): Waldbrandortung durch *Melanophila acuminata*. Die spezialisierten Sinnesorgane des „Feuerkäfers“. – *Biologie in unserer Zeit*, **30**: 266-273.
- VONDRAN, T., APEL, K.H. & SCHMITZ, H. (1995): The infrared receptor of *Melanophila acuminata* DeGeer (Coleoptera, Buprestidae): ultrastructural study of a unique insect thermos-receptor and its possible descent from a hair mechanoreceptor. – *Tissue & Cell*, **27**: 645-658.

Prof. em. DR. WERNER GNATZY
 FB Biowissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt a. M.
 wernergn@gmx.de

Prof. em. DR. JÜRGEN TAUTZ
 Biozentrum der Julius-Maximilians-Universität Würzburg
 tautz@biozentrum.uni-wuerzburg.de

Manuskripteingang: 9. September 2023

8 Anhang



Werner Gnatzy
Jürgen Tautz

Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution

Faszinierend und bedroht

SACHBUCH

 Springer

Die Wildkatze (*Felis silvestris* SCHREBER 1777) im Taunus – neue Erkenntnisse zu Verbreitung und Populationsdichte

SUSANNE STEIB

Wildkatze, Taunus, Rückzugsorte, Ausbreitung, Monitoring, Schutzbemühungen

Kurzfassung: Die Wildkatze gehört zu den seltenen Säugetierarten in Deutschland. Einst in den meisten Landesteilen Hessens durch massive Bejagung ausgerottet, erholen sich die Bestände zusehends. Der Taunus, vor allem Rheingau- und Hintertaunus, gehören zu den Gebieten, in denen die Wildkatze überdauern konnte. Verschiedene Untersuchungen zeigen die Ausbreitung der Art in den vergangenen 30 Jahren – nicht nur im Taunus. Neuere Untersuchungen im Rahmen des FFH-Monitorings zeigen eine bemerkenswert hohe Populationsdichte von 1 Individuum/100 km². Aufgrund einer jahrzehntelangen Isolation der Taunus-Population kann diese genetisch von den Beständen in Mittel- und Südwestdeutschland unterschieden werden. Eine genetische Verarmung ist in der Population jedoch nicht festzustellen. Damit sich die Taunus-Wildkatzen in Zukunft weiter ausbreiten können, sollte die Prüfung möglicher Barrieren und Vernetzungsachsen in anliegende Waldgebiete Teil zukünftiger Schutzbemühungen sein.

The wildcat (*Felis silvestris* SCHREBER 1777) in the Taunus – new findings on distribution and population density

Wildcat, Taunus, refuges, dispersal, monitoring, conservation efforts

Abstract: The wildcat is one of the rare mammal species in Germany. Once extinct in most parts of Hesse due to massive hunting, populations are recovering rapidly. The Taunus, especially the Rheingau and Hintertaunus regions, are among the areas where the wildcat has managed to survive. Various studies show the spread of the species over the past 30 years - not only in the Taunus. Recent studies conducted as part of FFH monitoring show a remarkably high population density of 1 individual/100 km². Due to decades of isolation of the Taunus population, it can be genetically distinguished from the populations in central and south-western Germany. However, there is no evidence of genetic impoverishment in the population. To ensure that the Taunus wildcats can continue to spread in the future, conservation efforts should include examining possible barriers and connectivity routes into adjacent forest areas.

Inhaltsverzeichnis

1	Die Wildkatze – Schutzstatus, Verbreitung, Gefährdung	38
2	Der Taunus als Rückzugs- und ausbreitungsgebiet	40
3	Neue Erkenntnisse aus dem FFH-Monitoring 2021 ..	43
4	Literatur	46

1 Die Wildkatze – Schutzstatus, Verbreitung, Gefährdung

Die Wildkatze gehört zu den seltenen Säugetierarten in Deutschland. Ihr Verbreitungsgebiet war durch massive Verfolgung durch den Menschen und erhebliche Arealverluste in den vergangenen beiden Jahrhunderten stark geschrumpft (PICHOCKI 1990). In der Roten Liste Deutschlands wird die Art als „gefährdet“ eingestuft (MEINIG et al. 2020) und ist im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) §7 Abs. 2 Nr. 13 und 14 sowie der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie der Europäischen Union – EU (1992) im Anhang IV gelistet, sie unterliegt demnach national wie auch international einem strengen Schutz. Deutschland ist für die Art in hohem Maße verantwortlich (MEINIG et al. 2020).



Abbildung 1: Wildkatze mit typischer Fellzeichnung; Foto: Helmut Weller.

Figure 1: Wildcat with typical fur pattern; photo: Helmut Weller.

Die Wildkatze (Abb. 1) ist eine Art der waldreichen Mittelgebirge und gilt als Charakterart für naturnahe, struktur- und waldreiche Landschaften, die weitgehend unzerschnitten geblieben sind (SIMON et al. 2006). In Hessen war die Wildkatze Anfang des 20. Jahrhunderts in den meisten Landesteilen aufgrund massiver Bejagung und Lebensraumverlusts ausgestorben. Kleine Populationen überdauerten nur im Hinter- und Rheingau-Taunus sowie dem hessischen Bergland rund um den Meißner (RAIMER 2006). Ihr Bestand hat sich in Hessen in den letzten 30 Jahren wieder erholt und es besteht ein nahezu durchgängig besiedeltes Verbreitungsareal zwischen den Reliktorkommen (DIETZ et al. 2023; Abb. 2). Verschie-

dene Studien unter anderem im hessischen Rothargebirge, Kellerwald, in der Rhön und im Vogelsberg (SCHNEIDER & NORGALL 2016; REINERS et al. 2014; SIMON & HUPE 2008) zeigen, dass die Art weite Teile ihrer ehemaligen Verbreitungsgebiete wieder für sich erobern konnte. Seit wenigen Jahren gibt es auch zunehmend Nachweise im südlichen Odenwald und der Grenzregion Hessen-Baden-Württemberg-Bayern (BUND Hessen 2023). Die Vorkommen in Hessen liegen zwischen den großen und mehr oder weniger zusammenhängenden Wildkatzenvorkommen in Mitteldeutschland (Solling-Harz-Hainich) und in Westdeutschland (Eifel-Hunsrück). Damit spielt Hessen in der zukünftigen Vernetzung dieser Areale eine besondere Rolle (NITSCH & NORGALL 2006).

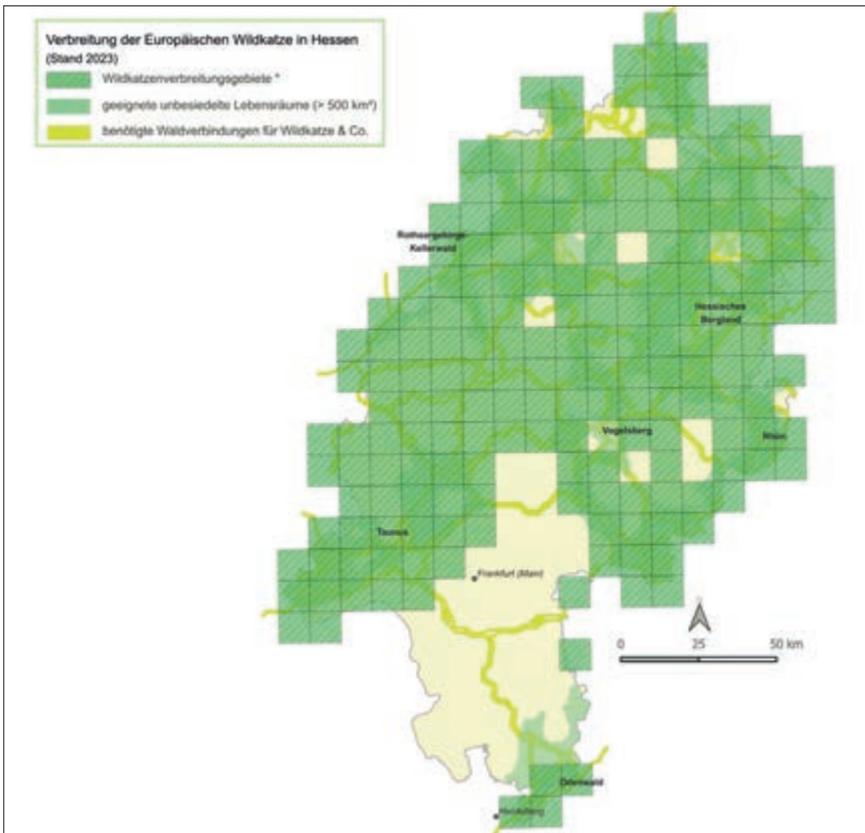


Abbildung 2: Verbreitung der Wildkatze in Hessen (Stand 2023). Je Quadrant C1-Nachweis von mindestens einer Europäischen Wildkatze. Datengrundlage: Bundesamt für Naturschutz, zuständige Länderfachbehörden und -institutionen, BUND.

Figure 2: Distribution of the wildcat in Hesse (as of 2023). At least one European wildcat detected in each C1 quadrant. Data source: Federal Agency for Nature Conservation, responsible state authorities and institutions, BUND.

Der Erhaltungszustand der Art wird nach dem FFH-Bericht 2019 als „günstig“ bewertet (WEISSBECKER et al. 2019), nachdem er in den Berichtsperioden 2001–2006 als „ungünstig, unzureichend“ und 2007–2013 als „ungünstig, unzureichend, sich verbessernd“ beschrieben wurde (SIMON & LANG 2016). In der Roten Liste der Säugetiere Hessens aus dem Jahr 2023 wird die Wildkatze in die Kategorie „Vorwarnliste“ (V) eingestuft (DIETZ et al. 2023).

Die wichtigsten Gefährdungsursachen stellen heute eine zunehmende Lebensraumzerschneidung durch Verkehrswege und der Tod an Straßen dar (DIETZ et al. 2023; KLAR et al. 2010; HMULV 2004). Durch die Zerschneidung der Populationsareale kommt es in Deutschland und somit auch in Hessen zur Inselbildung und Isolation, was bis zum regionalen Aussterben kleiner Populationen führen kann (SIMON et al. 2006). Wenn auch in Hessen noch nicht akut, stellt auch die Hybridisierung mit Hauskatzen eine zunehmende Gefahr dar (DIETZ et al. 2023). In neueren Untersuchungen lag die Hybridisierungsrate in zwei Regionen in Baden-Württemberg bei über 50 % (ROLSHAUSEN et al. 2024). Das wesentliche Ziel des Arten- und Naturschutzes ist daher die Stützung und Vernetzung bestehender Populationsareale.

2 Der Taunus als Rückzugs- und Ausbreitungsgebiet

Bis zur generellen Jagdfreigabe 1848 kamen Wildkatzen in Hessen in allen größeren Waldgebieten des 17. und 18. Jahrhunderts vor, so auch im Taunus (RAIMER 2006). Danach wurden sie in den meisten Regionen ausgerottet und überlebten trotz des hohen Waldreichtums nur auf 3 % der Landesfläche, u. a. im Hintertaunus und im Hochtaunus. Nach der Einführung der ganzjährigen Schonung, Aufklärung der Jäger und weiterer Schutzbemühungen stabilisierte sich die Population im Rheingau-Taunus zum Ende der 1980er-Jahre, die Kernbereiche der Population befanden sich in den Wäldern der Forstämter Rüdesheim, Eltville und Bad Schwalbach (RAIMER 1988 in SIMON & SCHMIEDEL 2016). Der Hochtaunus wurde dagegen aufgrund nur weniger glaubhafter Sichtungen weiterhin als gefährdete Subpopulation bewertet (REIF 1994 in RAIMER 2006).

Im „Gutachten zur gesamthessischen Situation der Wildkatze“ aus dem Jahr 2003 wird für den Bereich „D41 Taunus“ eine Besiedlung mit zwei Vorkommen beschrieben (FENA 2005), die durch die Autobahn A 3 getrennt werden (RAIMER 1988 in SIMON & SCHMIEDEL 2016; HMULV 2004). Das westliche Areal umfasst den Rheingau-Taunus vom Hinterlandswald bis zum Wiesbadener Hochtaunus, das östliche Areal den Hochtaunus um den Feldberg über den Hintertaunus bis an die Lahn (HMULV 2004). Der Schwerpunkt befindet sich im Rheingau-Taunus mit 3,7 Meldungen pro 100 km², im Hochtaunus sind es 1,2 Meldungen pro 100 km², weshalb dort eine geringere Besiedlungsdichte angenommen wird. Eine Ausbreitung nach Süden oder Osten wird für unwahrscheinlich betrachtet, da der

Ballungsraum Rhein-Main und die waldarme Wetterau angrenzen. Die Wanderung Richtung Norden (Westerwald) sei jedoch möglich (FENA 2005). Die A 3 wird als weitgehend unpassierbare Barriere betrachtet (KOCK & ALTMANN 1999).

Nachfolgende Studien aus den Jahren 2009 beschreiben eine Ausbreitung bzw. weitere Stabilisierung der Populationen im Taunus. Bei einem groß angelegten Monitoring im Auftrag des hessischen Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND Hessen) mittels Baldrian-Lockstock Methode (Abb. 3) wurde im Westen Hessens ein Gebiet von 1.400 km² mit 400 Lockstöcken zum Nachweis der Wildkatze beprobt. Von 58 gesammelten Haarproben stammten 34 von der Wildkatze, wobei 33 der getätigten Wildkatzenachweise außerhalb des bekannten Populationsareals lagen (ITN 2009). Die Autoren vermuten eine Arealvergrößerung im Norden (Rothaargebirge) und Süden (Taunus), die sich bereits durch zunehmende Sichtbeobachtungen und Totfunde in den zurückliegenden fünf Jahren andeutete. Die bis dahin bekannte Nordgrenze in Höhe des Forstamts Weilrod verschob sich in Richtung Lahn bzw. B 49. Nachweise aus dem hessischen Westerwald zwischen Taunus und Rothaargebirge fehlten weiterhin (ITN 2009).



Abbildung 3: Eine Wildkatze am Lockstock. Durch den Baldrian angezogen reibt sie sich daran und hinterlässt Haare; Foto: Helmut Weller.

Figure 3: A wildcat at the lure stick. Attracted by the valerian, it rubs itself against it and leaves hairs behind; photo: Helmut Weller.

Im Artgutachten 2009 im Auftrag des Servicezentrums Forsteinrichtung und Naturschutz (FENA) wird die hohe Bedeutung des Rheingau-Taunus als eines der Kernareale der Wildkatzenpopulation in Deutschland bestätigt. Die in einem et-

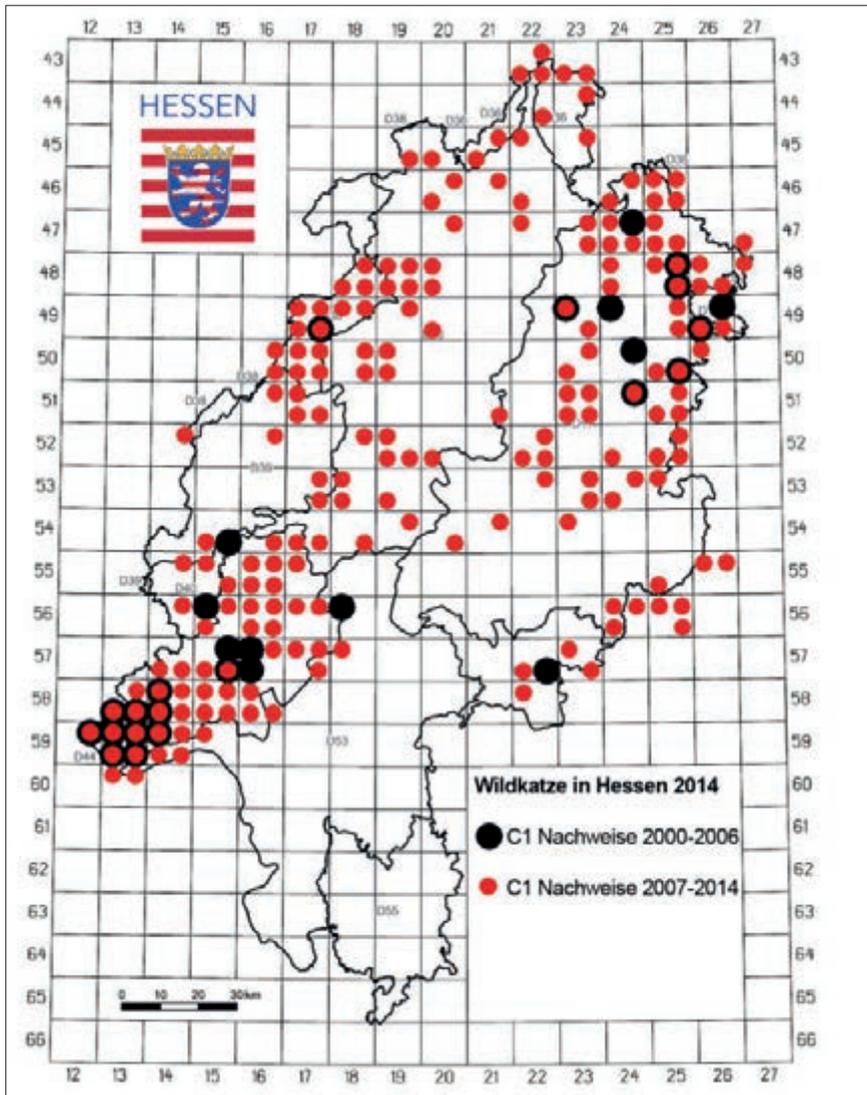


Abbildung. 4: Verbreitung der Wildkatze in 2014 auf der Basis von Messtischblattquadranten. Jedem Quadranten liegt mindestens 1 C1-Nachweis zugrunde. Darstellung der Daten von 2000–2006 in schwarz, 2007–2014 in rot. Aus: SIMON & LANG (2016).

Figure. 4: Distribution of the wildcat in 2014 on the basis of grid quadrants. Each quadrant is based on at least 1 C1 record. Data from 2000–2006 shown in black, 2007–2014 in red. From: SIMON & LANG (2016).

wa 204 km² großen Gebiet mittels Lockstockmethode festgestellte Populationsdichte liegt zwischen 0,6 und 1 Individuen/100 km², was im Vergleich mit anderen Gebieten einen sehr hohen Wert darstellt (FENA 2010). Im Jahr 2012 konnte die Wildkatze schließlich mit 22 Individuen in erstaunlich hoher Zahl im Wiesbader Stadtwald nachgewiesen werden (SIMON & SCHMIEDEL 2016), in den Jahren 2015 und 2016 gelang Nachweise von acht bzw. fünf verschiedenen Wildkatzen im Wald zwischen Hofheim und Eppstein (Main-Taunus-Kreis; M. ORF, pers. Mitteilung). Diese Zahlen spiegeln die Ergebnisse des Artgutachtens 2014 (SIMON & LANG 2016) wider, in dem der Taunus mit Nachweisen in 51 Messtischblätterquadranten (MTBQ) als nahezu flächig besiedelt beschrieben wird. Vor allem im Hintertaunus haben die Nachweise deutlich zugenommen (SIMON & LANG 2016; Abb. 4). In weiteren, vom BUND Hessen durchgeführten Lockstock-Monitorings konnten in den Jahren 2016 bzw. 2020/21 am Winterstein bei Ober-Mörlen sechs und bei Butzbach fünf verschiedene Wildkatzen nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass auch der östliche Taunusrand im Übergang zur Wetterau inzwischen wieder durch die Art besiedelt ist.

Der Taunus ist im „Biotopverbundkonzept für die Wildkatze in Hessen“ als eines der wichtigen Quellgebiete für die Ausbreitung der Art beschrieben. Ihm entspringen vier prioritäre Hauptkorridore, welche die Populationsareale in Hessen verbinden und der Region daher eine herausragende Bedeutung zukommen lassen (ITN 2010).

3 Neue Erkenntnisse aus dem FFH-Monitoring 2021

Deutschland ist dazu verpflichtet, den Erhaltungszustand der Wildkatze, als Anhang IV-Art der FFH-Richtlinie, im Rahmen der FFH-Berichtspflicht alle sechs Jahre an die Europäische Union zu melden. Ein Kriterium ist hierbei die Bewertung des Zustands der Population, wozu vor allem die durchschnittliche Populationsdichte als Bewertungsgrundlage herangezogen wird. Um diese für den nationalen FFH-Bericht 2025 in den einzelnen Bundesländern zu ermitteln, wurden bundesweit Wildkatzenbestände in 13 repräsentativen Referenzgebieten mittels der Lockstockmethode erfasst (ROLSHAUSEN et al. 2024).

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) beauftragte den BUND Hessen mit der Planung und Durchführung der Lockstockerfassung im Winter 2021. Gemäß den methodischen Vorgaben des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) und der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung (SGN), Zentrum für Wildtiergenetik, wurden zwei Referenzgebiete in den hessischen Kernlebensräumen der Wildkatze ausgewählt, in denen die Beprobungen stattfinden sollten: Im Hessischen Bergland und im Taunus, wobei sich die weiteren Ausführungen auf das Referenzgebiet Taunus beziehen. Das Gebiet erstreckte sich über die Gemeinde Weilrod bis nach Selters, Bad Camberg-Schwickershau-

sen und Dombach (Hochtaunuskreis bzw. Landkreis Limburg-Weilburg) und wurde definiert durch ein 10x10 km großes Rasterquadrat, in dem 50 Lockstöcke ausgebracht wurden (Abb. 5). Diese wurden von Februar bis April insgesamt 10-mal im Abstand von einer Woche kontrolliert.

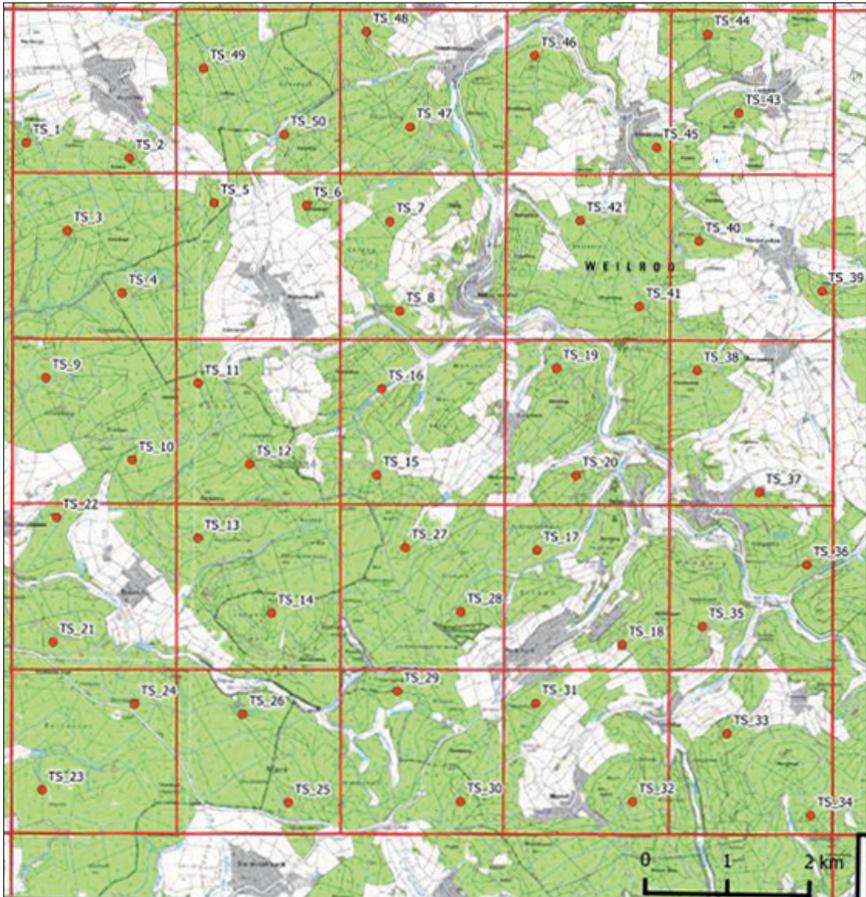


Abbildung 5: Lage des Referenzgebiets Taunus und Verteilung der Lockstockstandorte (rote Punkte mit Nummern) in ausgewählten Rasterquadraten (rot). Karte: BUND Hessen.

Figure 5: Location of the Taunus reference area and distribution of decoy sites (red dots with numbers) in selected raster squares (red). Map: BUND Hessen.

Die Vorarbeiten für das Monitoring begannen bereits im November 2020. Die Verteilung und Auswahl der Lockstockstandorte wurden zunächst mithilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) via Luftbild vorgenommen, die Platzierung im Gelände hing dann von den örtlichen Gegebenheiten ab. Es ergab sich jedoch bei keinem der vorab ausgewählten Standorte eine größere Abweichung

als 50 m zum endgültigen Standort. Die betroffenen HessenForst-Forstämter Weilrod, Weilmünster, Königstein, Wiesbaden-Chauseehaus sowie Privatwaldbesitzende wurden informiert und um Unterstützung bzw. die Betretungserlaubnis ihrer Waldflächen gebeten. Die Kooperationsbereitschaft war sehr hoch und so waren die Forstämter auch hinsichtlich der Ansprache von freiwilligen Helferinnen und Helfern für die Lockstockkontrolle aus den Reihen der Jägerschaft sehr hilfsbereit. Auch Revierförsterinnen und Revierförster sowie Ehrenamtliche des BUND erklärten sich bereit, bei der Untersuchung mitzuwirken. So fanden sich 25 Freiwillige, die einen oder mehrere Lockstöcke, zum Teil im Team, betreuten.

Am Ende des Sammelzeitraums wurden 180 Haarproben zur Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Zentrum für Wildtiergenetik in Gelnhausen, geschickt. Die Ergebnisse der genetischen Untersuchungen ergaben im ersten Schritt der Artermittlung anhand der mitochondrialen DNS 154 Wildkatzen nachweise. Die Genotypisierung ergab 83 Individuen, davon 77 Wildkatzen, eine Hauskatze und fünf Hybrid-Verdachtsfälle. Darunter befanden sich 54 männliche und 24 weibliche Wildkatzen, in fünf Fällen ließ sich das Geschlecht nicht identifizieren (ROLSHAUSEN et al. 2024).

Im bundesweiten Vergleich ist die Populationsdichte im Referenzgebiet Taunus mit etwa einem Individuum pro Quadratkilometer die höchste. Ein ähnlicher Wert wurde bereits im Jahr 2009 für den Rheingau-Taunus festgestellt (FENA 2010). Der positive Trend für die Wildkatze, der seit einigen Jahren zu beobachten ist, scheint weiter anzuhalten (ROLSHAUSEN et al. 2024).

Zugleich zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen eine genetische Trennung der Taunus-Population von den Beständen in Mittel- und Südwestdeutschland. Der Grund liegt wahrscheinlich in einer jahrzehntelangen Isolation der Taunus-Wildkatzen, nachdem die Art vor gut einem Jahrhundert in weiten Teilen Deutschlands ausgerottet wurde. Eines der wenigen verbliebenen Refugien war der Rheingau-Taunus, dieser war jedoch durch den Rhein von den angrenzenden Beständen getrennt. Diese Trennung ist heute noch in der DNS der Wildkatzen zu sehen, wenngleich es trotz der Isolation zu keiner nennenswerten genetischen Verarmung in den Taunus-Wildkatzen kam (ROLSHAUSEN et al. 2024). Es ist anzunehmen, dass mit steigender Populationsdichte im Taunus sich die Wildkatzen zunehmend in umliegende Waldgebiete ausbreiten und sich mit den dort lebenden Tieren vermischen werden.

Die Prüfung möglicher Barrieren und Vernetzungsachsen vom Taunus in angrenzende Waldgebiete wie den Westerwald, Pfälzerwald und ins Gladenbacher Bergland sollte in Zukunft Teil der Schutzbemühungen für die Wildkatze sein, damit sich die Population auch auf lange Sicht guter Vitalität erfreuen kann. Dabei spielt insbesondere die Verbesserung der Querungsmöglichkeiten von Straßen wie der A 3 eine große Rolle, zum Beispiel durch die Gestaltung von für die Wildkatze geeigneten Durchlässen.

4 Literatur

- BUND Hessen (2023): Sie ist zurück: Wildkatze erobert den Odenwald! BUND gelingt erstmaliger Nachweis im Süden Hessens. Pressemitteilung vom 23.09.2023; <https://www.bund-hessen.de/pm/news/hessischer-odenwald-bund-geltingt-erstmalig-wildkatzen-nachweis/>
- Europäische Union – EU (1992): Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen.
- DIETZ, M., HÖCKER, L., LANG, J., & SIMON, O. (2023): Rote Liste der Säugetiere Hessens, 4. Fassung; Wiesbaden (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).
- FENA (Bearbeiter: NOWAK, C., HAASE, P., STEYER, K. & FROSCH, C., Senckenberg, Gelnhausen) (2010): Genetische Analyse von Katzenhaarproben zur Ermittlung der Siedlungsdichte der Wildkatze (*Felis silvestris*) im Rheingau-Taunus-Kreis, Sondergutachten 2009, 2. Fassung 2010. – 46 S.; Gießen (im Auftrag des Servicezentrums Forsteinrichtung und Naturschutz (FENA)).
- FENA (Bearbeiter: DENK, M., JUNG, J. & HAASE, P., Forschungsinstitut Senckenberg, Forschungsstation für Mittelgebirge) (2005): FFH-Artgutachten zur gesamthessischen Situation der Wildkatze (*Felis silvestris* SCHREBER, 1777), Artgutachten 2003 (überarbeitete Version Febr. 2005). – 64 S.; Kassel (im Auftrag des Dienstleistungszentrums für Landwirtschaft, Gartenbau und Naturschutz).
- Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz – HMULV (Bearbeiter: DENK, M., JUNG, J. & HAASE, P.) (2004): Die Situation der Wildkatze in Hessen. – Reihe Natura 2000, 104 S.; Wiesbaden.
- Institut für Tierökologie und Naturbildung – ITN (2009): Zum Vorkommen der Wildkatze *Felis silvestris silvestris* im Westen von Hessen. Projektstudie im Rahmen des länderübergreifenden BUND-Projektes „Ein Rettungsnetz für die Wildkatze“ zur fachlichen Grundlagenermittlung für einen Wildkatzenwegeplan zwischen dem Taunus und dem hessischen Rothaargebirge (Im Auftrag des BUND Hessen). – 44 S.; Gonterskirchen.
- Institut für Tierökologie und Naturbildung – ITN (2010): Biotopverbund-Konzept für die Wildkatze (*Felis silvestris silvestris*) in Hessen (im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung). – 19 S.; Gonterskirchen.
- KLAR, N., HERRMANN, M. & KRAMER-SCHADT, S. (2010): Effects and Mitigation of Road Impacts on Individual Movement Behavior of Wildcats. – *Journal of Wildlife Management*, **73** (5): 631-638.
- KOCK, D. & ALTMANN, J. (1999): Die Wildkatze (*Felis silvestris* Schreber 1777) im Taunus. – *Jb. nass. Ver. Naturkde.*, **120**: 5-21.
- MEINIG, H.; BOYE, P.; DÄHNE, M.; HUTTERER, R. & LANG, J. (2020): Rote Liste und Gesamtartenliste der Säugetiere (Mammalia) Deutschlands. – *Naturschutz und Biologische Vielfalt*, **170** (2): 73 S.
- NITSCH, J. & NORGALL, T. (2006): Die Wildkatze braucht ein Rettungsnetz. – *NAH Akademie-Berichte*, **5**: „Kleine Katzen – Große Räume“, 5-6; Wetzlar.
- PICHOCKI, R. (1990): Die Wildkatze *Felis silvestris*. – *Die neue Brehm Bücherei*, **189**: 232 S.; Magdeburg (Verlags KG Wolf).
- RAIMER, F. (2006): Die Wildkatzenpopulationen in Hessen und Niedersachsen seit dem 18. Jahrhundert – Verfolgung, Bedrohung, Schutz und Wiederausbreitung. – *NAH Akademie-Berichte*, **5**: „Kleine Katzen – Große Räume“, 69-78; Wetzlar.
- REINERS, T., TIESMEYER, A., CARL, S., STEYER, K. & NOWAK, C. (2014): Wissenschaftliche Begleituntersuchung zum länderübergreifenden Wildkatzenmonitoring im Biosphärenreservat Rhön 2013–2014, Schlussbericht. – 27 S.; Würzburg (im Auftrag der Regierung von Unterfranken, Bayrische Verwaltungsstelle Biosphärenreservat Rhön, Senckenberg Forschungsinstitut – Fachgebiet Naturschutzgenetik).

- ROLSHAUSEN, G., COCCHIARARO, B., MÜLLER, M. & NOWAK, C. (2024): Abschlussbericht: Populationsgenetische Analyse der Haarproben von Wildkatzen für den nationalen FFH-Bericht 2025. – 19 S.; Gelnhausen (Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Zentrum für Wildtiergenetik).
- SCHNEIDER, S. & NORGALL, T. (2016): Die Wildkatze in Hessen – Ergebnisse des genetischen Monitorings im BUND-Wildkatzenprojekt (Jahre 2012–2015). – Jahrbuch Naturschutz, **16**: 79-85.
- SIMON, O., HUPE, K., GÖTZ, M. & TRINZEN, M. (2006): Die Europäische Wildkatze *Felis silvestris silvestris* Schreber, 1777: Biologie und Verhalten. –NAH Akademie-Berichte, **5**: „Kleine Katzen – Große Räume“, 7-12; Wetzlar.
- SIMON, O. & HUPE, K. (2008): Nachweis der Wildkatze (*Felis silvestris silvestris*) im Nationalpark Kellerwald-Edersee und den umgebenden Waldgebieten der Breiten Struth, des Hohen Kellers und des nördlichen Burgwaldes mit Hilfe der Lockstockmethode im Winter 2007/08. – Jahrbuch Naturschutz in Hessen, **12**: 17-22.
- SIMON, O. & SCHMIEDEL, K. (2016): Untersuchung zum Vorkommen der Wildkatze (*Felis silvestris silvestris*) im Wiesbadener Wald im Winter 2011/2012. – Umweltbericht, **23**: 78 S. (Magistrat der Landeshauptstadt Wiesbaden, Umweltamt).
- SIMON, O. & LANG, J. (2016): Gutachten zur Verbreitung der Wildkatze *Felis s. silvestris* (Art des Anhangs IV der FFH-Richtlinie) in Hessen, Sondergutachten 2014, Version 2 (07.03.2016). 83 S.; Gießen (Servicezentrum Forsteinrichtung und Naturschutz – FENA).
- WEISSBECKER, M., BERG, T., GESKE, C., HENKY, Y., JOKISCH, S., JÜNEMANN, M., KRUMMEL, N., MAHN, D., OPITZ, A., SCHWENKMEZGER, L. & WERNING, K. (2019): Der FFH-Bericht 2019: Ergebnisse und Schlussfolgerungen für Hessen. – Jahrbuch Naturschutz in Hessen, **18**: 116-124.

Persönliche Mitteilungen:

ORF, Michael: Untere Naturschutzbehörde Main-Taunus-Kreis, Hofheim

SUSANNE STEIB

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Landesverband Hessen

Managerin Naturschutzprojekte

Geleitsstraße 14

60599 Frankfurt

E-Mail: susanne.steib@bund-hessen.de

Manuskripteingang: 20. August 2024

Eiszeit-Safari im nördlichen Oberrheingraben – ausgewählte Funde und Datierungen zur Großsäuger- fauna der letzten Kaltzeit

WILFRIED ROSENDAHL & DORIS DÖPPES

Oberrheingraben, Quartär, Oberpleistozän, Weichsel-Glazial, ¹⁴C-Methode, Großsäuger

K u r z f a s s u n g : Der Oberrheingraben ist eine der bedeutendsten geologischen Strukturen Europas. In diesem Senkungsraum wurden Sedimente in hoher Mächtigkeiten akkumuliert. Das betrifft insbesondere auch quartäre Ablagerungen im Zusammenhang mit der Flussgeschichte des Rheins und seiner Nebenflüsse. Mit den darin erhaltenen, pleistozänen Großsäugerresten stellen diese quartären Sedimente ein wichtiges kontinentales Klimaarchiv dar. Nach einer allgemeinen Kurzdarstellung der geologisch-stratigrafischen Situation im nördlichen Oberrheingraben sowie der ¹⁴C-Methode werden zwölf ausgewählte Großsäugerfunde aus dem letzten Glazial und ihre Datierungsergebnisse vorgestellt. Die Untersuchungen sind Teil des interdisziplinären, von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH Heidelberg geförderten Forschungsprojektes „Eiszeitfenster Oberrheingraben“. In den letzten Jahren wurden darin mehr als 300 Datierungen an Funden durchgeführt.

Ice Age safari in the northern Upper Rhine Graben – selected finds and datings of large mammals of the last glacial period

Upper Rhine Graben, Quaternary, Late Pleistocene, Weichselian glacial, ¹⁴C-method, large mammals

A b s t r a c t : The Upper Rhine Graben is one of the most important geological structures in Europe. In this subsidence zone, sediments were accumulated in great thickness. This applies in particular to Quaternary deposits associated with the river history of the Rhine and its tributaries. Together with the Pleistocene large mammal remains preserved in them, these Quaternary sediments represent an important continental climate archive. After a general brief description of the geological-stratigraphic situation in the northern Upper Rhine Graben and the ¹⁴C method, twelve selected large mammal finds from the last glacial period and their dating results are presented. The investigations are part of the interdisciplinary research project „Ice Age Window Upper Rhine Graben“, which has been funded by the Klaus Tschira Stiftung gGmbH Heidelberg. Over the last few years, more than 300 datings of bone finds have been carried out.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	50
2	Zur oberen quartären Schichtenfolge im nördlichen Oberrheingraben	50
3	Neue quartärpaläontologische Forschungen im „Eiszeitfenster Oberrheingraben“	53

4	Grundlage der ¹⁴ C-Methode	54
4.1	Kalibration und Kalenderjahre	55
4.2	Material und Probenaufbereitung	56
5	Ausgewählte Großsäugerfunde und ihre Datierungen	56
6	Ausblick	71
7	Dank	71
8	Literatur	71

1 Einleitung

Der Oberrheingraben (ORG) ist eine bedeutende tektonische Bruchstruktur in der europäischen Erdkruste. Er erstreckt sich auf bis zu 40 km Breite und 300 km Länge in Süd-Nord-Richtung von Basel bis Mainz/Wiesbaden.

Diese Senkungszone ist eine außergewöhnliche Sedimentfalle, deren älteste Schichten ins Paläogen (Eozän) zurückreichen. Für den Zeitbereich Paläogen bis Holozän ist eine Schichtenfolge mit Fossilinhalt (Mikro- und Makroreste) mit einer größten Mächtigkeit von über 3000 m dokumentiert. Diese Abfolge schließt damit auch die Ablagerungen (Kiese, Sande und Tone) der verschiedenen quartären Kalt- und Warmzeiten mit ein.

2 Zur oberen quartären Schichtenfolge im nördlichen Oberrheingraben

Der ORG zwischen Basel und Mainz/Wiesbaden ist eine der größten tektonischen Bruchzonen Europas. Zusammen mit dem Rhône-graben als südliche Verbindung und weiteren tektonischen Senkungsfeldern weiter nördlich wie die Wetterau und Niederhessische Senke bis zum Oslo-Viking-Graben in Norwegen formt der Oberrheingraben das größte aktive Grabenbruchsystem Europas. Diese Senkungszone ist darüber hinaus auch eine bedeutende geomorphologische Leitstruktur, z. B. für Faunenwanderungen.

Der ORG wurde seit dem Paläogen im Zusammenhang mit der Alpenhebung geformt. Er kann auf Grund unterschiedlicher Bruchstrukturen und Absenkungstiefen in zwei Teile untergliedert werden. Der südliche Teil (sORG) reicht von Basel bis Karlsruhe, der nördliche (nORG) von Karlsruhe bis Mainz/Wiesbaden.

Seitdem der Rhein das alleinige Entwässerungssystem zwischen den Alpen und der Nordsee bildet, stellt der ORG eine bedeutende Sedimentfalle für den Rhein und seine Zuflüsse dar. Aus diesem Grund bietet der ORG ein einzigartiges Potential für eine durchgehende Sedimentakkumulation und -erhaltung seit dem Ende des Neogens (PRZYROWSKI & SCHÄFER 2014). So wurden z. B. westlich von Heidelberg, im sogenannten „Heidelberger Becken“, einhergehend mit der Gra-

benabsenkung über 350 m quartäre Sedimente abgelagert, die ein sehr wichtiges kontinentales Klimaarchiv für Mitteleuropa darstellen (GABRIEL et al. 2013). Im nORG bestehen die oberen quartären Sedimente aus einer Sand- und Kiesfolge mit tonigen Zwischenhorizonten. Hydrogeologisch wurden die höchsten Einheiten (0–30 m) von oben nach unten in ein „Oberes Kieslager“ (OKL) und einen „Oberen Zwischenhorizont“ (OZH), eine Tonlage, gegliedert. Zeitlich stufte man das OKL als eine Ablagerung des letzten Glazials ein. Der OZH sollte entsprechend das letzte Interglazial repräsentieren.

Mit dem Ziel, ein besseres Verständnis über die geologische Entwicklung des zentralen nORG in Korrelation mit den klimagekoppelten Entwicklungen der alpinen und nordeuropäischen Gletscher zu erhalten, begann 2002 das „Heidelberg Basin Drilling Project“, initiiert durch die Geologischen Landesbehörden in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen (GABRIEL et al. 2008, 2013). Grundlage des Projektes waren drei tiefreichende Kernbohrungen in Heidelberg-Neuenheim, Viernheim und Ludwigshafen-Parkinsel. In Bezug auf die oben genannten stratigraphischen Interpretationen der oberen Schichtenfolge im nORG ergaben die Analysen der Bohrkerninhalte, dass die Einheiten OKL und OZH längere Zeiträume abdecken als angenommen. Pollenanalysen zeigen, dass die Sedimente auch das frühe Mittelpleistozän miteinschließen (KNIPPING 2004, 2008) bzw. mindestens 400.000 Jahre zurückreichen. Das gilt auch für alle Faunenreste aus den Kies- und Sandgruben im ORG, welche somit z. T. auch aus älteren Glazial- bzw. Interglazialzyklen stammen können. Überraschend war, dass über die Pollenanalysen die letzte Warmzeit im OZH nicht nachgewiesen werden konnte (KNIPPING 2004). Somit steht fest, dass wärmeliebende Faunenelemente aus den Kies- und Sandgruben im nORG mit Baggertiefen bis zu 30 m sich nicht mehr relativ bzw. stratigraphisch dem letzten Interglazial zuweisen lassen, sondern auch deutlich älter sein können. Ob die kälteliebenden Arten aus dem OKL ein letztglaziales Alter haben oder auch aus älteren Kaltzeiten stammen, kann nur durch chemisch-physikalische Datierungen, z. B. mit Hilfe der ^{14}C -Methode, an Einzelfunden nachgewiesen werden. Da diese Methode aber nur bis maximal 50.000 Jahre zurückreicht, sind Alters- und Umweltaussagen älterer Funde grundsätzlich nur in der Kombination mit weiteren Untersuchungen wie z. B. Analysen der stabilen Isotopenverhältnisse der Elemente Stickstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) sowie Paläogenetik mit zeitlichen Berechnungen der Gensequenzveränderungen ausgewählter Arten möglich. Nach der neuen Nomenklatur für die Stratigraphie im ORG werden die alten Gliederungseinheiten OKL und OZH zusammengefasst und nun als „Mannheim-Formation“ bezeichnet (ELLWANGER et al. 2010; GEYER & GWINNER 2011).

Seit Langem werden die quartären Kies- und Sandlager im nORG für wirtschaftliche Zwecke, vor allem für das Baugewerbe, abgebaut. Wegen des hohen Grundwasserspiegels kann die Rohstoffgewinnung nur mittels Nassbaggerei, d. h. in kleinen Seen über Ausbaggerung unter der Wasseroberfläche bis in eine Tiefe

von rund 30 m erfolgen. Deshalb sind die Funde von quartären Faunen- und Florenresten aus den Kies- und Sandgruben Belege aus dem gesamten Schichtpaket.

Das über entsprechende Funde im nORG belegte Großsäugerspektrum beinhaltet z. B. *Panthera spelaea* (Höhlenlöwe), *Panthera pardus* (Leopard), *Ursus spelaeus/arctos* (Höhlen- und Braunbär), *Crocota crocota spelaea* (Höhlenhyäne), *Palaeoloxodon (Elephas) antiquus* (Waldelefant), *Mammuthus primigenius* (Mammut), *Mammuthus trogontherii* (Steppenmammut), *Equus* sp. (Wildpferd), *Sus scrofa* (Wildschwein), *Bos primigenius* (Aurochse), *Bison priscus* (Steppenbison), *Bubalus murrensis* (Wasserbüffel), *Cervus elaphus* (Rothirsch), *Capreolus capreolus* (Reh), *Megaloceros giganteus* (Riesenhirsch), *Dama dama* (Damhirsch), *Alces alces* (Elch), *Alces latifrons* (Breitstirnelch), *Rangifer tarandus* (Rentier), *Coelodonta antiquitatis* (Wollhaarnashorn), *Stephanorhinus hemioechus* (Steppennashorn), *Stephanorhinus kirchbergensis* (Waldnashorn), *Trogontherium cuvieri* (Riesenbiber) und *Hippopotamus amphibius* (Flusspferd) (z. B. SCHWEISS 1988; KOENIGSWALD 1988; ROSENDAHL 2001; ROSENDAHL & DÖPPES 2011). Auch botanische Mikro- und Makroreste (Pollen und Baumstämme) sind Teil des Fundspektrums (z. B. SCHWEISS 1988).

Die besondere Abbausituation bringt es mit sich, dass zu den Funden bzw. ihrer Fundlagen keine detaillierten stratigraphischen Aussagen getroffen werden können. Im besten Fall liegen Informationen zur Baggertiefe und zum Sedimentcharakter der Fundzonen vor.

Über die oben genannten stratigraphischen Interpretationen der Schichtenfolgen erfolgte in der Vergangenheit auch die zeitliche Zuordnung der Großsäugerreste aus den Kies- und Sandgruben. Alle an kältere Klimaverhältnisse zugewiesenen Arten wie z. B. Mammut, Wollhaarnashorn, Moschusochse oder Rentier wurden als letztglaziale, d. h. weichselzeitliche Faunen angesehen. Alle wärmeliebenden Arten, z. B. Damhirsch, Flusspferd, Wasserbüffel oder Waldelefant, die zumeist an der Basis der Kiesgruben im Grenzbereich OKL/OZH lagen, sollten aus dem letzten Interglazial, d. h. dem Eem, stammen. Für Funde von klimaindifferenter Arten (z. B. Höhlenbär, Braunbär, Höhlenlöwe oder Höhlenhyäne) erfolgte eine zeitlich relative Einordnung über die Fundtiefe und/oder Fundvergesellschaftung.

Basierend auf dieser Betrachtung wurden z. B. für das letzte Interglazial „exotische“ Faunenelemente (Flusspferd und Wasserbüffel) im nORG publiziert (KOENIGSWALD 1988, 1991). Gleiches gilt für den Erstnachweis für ein Vorkommen von Breitstirnelch und Riesenbiber während des letzten Interglazials (KOENIGSWALD & MENGER 1997).

3 Neue quartärpaläontologische Forschungen im „Eiszeitfenster Oberrheingraben“

Zur interdisziplinären Erforschung pleistozäner Knochenfunde aus den Kies- und Sandgruben im nördlichen Oberrheingebiet wurde Ende 2016 an den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim und dem dort angeschlossenen Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH (CEZA) in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Evolutionäre und adaptive Genomik (Prof. Hofreiter) ein großes, interdisziplinäres, von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH Heidelberg gefördertes Forschungsprojekt unter dem Titel „Eiszeitfenster Oberrheingraben“ initiiert. Im Rahmen des Projektes werden vor allem Funde aus der sehr bedeutenden und einzigartigen Sammlung Reis erforscht, welche mehr als 15.000 quartärpaläontologische Funde umfasst, craniale und postcraniale Skelettelemente, hauptsächlich aus dem Fundgebiet „Oberrheingraben“. Die Sammlung wurde 2016 von der Familie Reis aus Deidesheim als Zustiftung an die Reiss-Engelhorn-Museen gegeben. Damit sind die Funde dauerhaft für zukünftige Forschungen, für die Allgemeinheit und in der Region gesichert.

Klaus Reis (1935–2018) sammelte seit den 1950er-Jahren Zähne und Knochen eiszeitlicher Säugetiere aus den Kiesgruben im Gebiet des nORG, z. B. bei Bobenheim-Roxheim oder Eich.

Hinsichtlich der zeitlichen Reichweite der Sammlungsobjekte decken diese vor allem das Ober- und Mittelpleistozän (bis ca. 600.000 Jahre) ab, aber auch altpleistozäne Funde sind vorhanden. Da heute durch die Technik der „Saugbaggerei“ nur noch Kleinfunde (unter 30 cm) gemacht werden können, sind Großfunde (z. B. komplette Schädel), wie zahlreich in der Sammlung Reis vorhanden, kaum mehr möglich. Das komplette pleistozäne Artenspektrum ist in der Sammlung Reis belegt. Nicht nur die einzigartige Vielfalt der Funde, sondern auch der gute Erhaltungszustand und die Probenquantität sind eine bedeutende Forschungsgrundlage.

Ergänzend dazu sind auch oberrheinische Funde aus anderen privaten Sammlungen und Museen Gegenstand der Forschung, so z. B. aus dem Museum der Stadt Bensheim, dem Staatlichen Museum für Naturkunde Karlsruhe oder dem Museum Weinheim.

Am CEZA befinden sich mehrere Labore mit modernsten Analysegeräten, um die quartären Knochenarchive zu untersuchen und hinsichtlich ihrer Klima- und Umweltinformationen zu entschlüsseln. Dazu gehören neben einem Massenspektrometer zur Analyse der leichten Isotope Kohlenstoff (^{12}C) und Stickstoff (^{15}N) für Ernährungsrekonstruktionen im Klaus-Tschira-Labor für physikalische Altersbestimmung auch eines der modernsten AMS-Geräte zur ^{14}C -Datierung, ein Massenspektrometer vom Typ MICADAS (Mini Carbon Dating System). Die Daten aus Mannheim tragen die Laborkennung MAMS. Im CEZA werden sowohl

Proben von Museen und Forschungseinrichtungen datiert als auch Auftragsarbeiten von Vereinen und Privatpersonen (www.ceza.de).

4 Grundlagen der ^{14}C -Methode

Die geeignete Methode zur Datierung von Skelettresten aus dem Zeitraum der letzten 50.000 Jahre ist die Radiokarbon- oder ^{14}C -Methode. Sie wurde Ende der 1940er-Jahre von dem späteren Nobelpreisträger Willard Frank Libby von der Universität Chicago entwickelt und zur Anwendung gebracht (ARNOLD & LIBBY 1949; LIBBY 1952). Ein bedeutender Schritt in der Methodenverbesserung war 1977 die Entwicklung der Beschleuniger-Massenspektroskopie (AMS = Accelerator Mass Spectrometry) an der Universität Oxford. Dadurch konnte nicht nur die notwendige Probenmenge deutlich minimiert, sondern auch die Messgeschwindigkeit und -genauigkeit stark erhöht werden.

Das Element Kohlenstoff (C) ist eines der wichtigsten chemischen Bestandteile der Biosphäre. Organische Kohlenstoffverbindungen sind Bestandteil allen Lebens. Drei Isotope des Kohlenstoffs kommen in der Natur vor. Dies sind die stabilen Isotope ^{12}C (98,89 %) und ^{13}C (1,11 %) sowie das instabile bzw. radioaktive Isotop ^{14}C (10^{-10} %). Radiokohlenstoff (^{14}C) entsteht ständig in den oberen Schichten der Atmosphäre durch Wechselwirkung von Neutronen der kosmischen Strahlung mit Stickstoffatomen. Bei der Kernreaktion fängt ^{14}N ein Neutron ein und gibt dafür ein Proton ab, aus ^{14}N wird so ^{14}C . Das instabile, radioaktive ^{14}C zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5730 ± 40 Jahre durch β -Zerfall wieder zu ^{14}N , einem Elektron und einem Antineutrino. Chemisch verhält sich ^{14}C wie die anderen Kohlenstoffisotope und verbindet sich mit Sauerstoff zu CO_2 . In die Biosphäre gelangt das ^{14}C über die Photosynthese der Pflanzen und in weiterer Folge in die tierische Nahrungskette. Dieser Zyklus wird auch als Kohlenstoffkreislauf bezeichnet. Solange ein Lebewesen aktiver Teil dieses Kreislaufes ist, bleibt der ^{14}C -Anteil im Kohlenstoff im Gleichgewicht. Mit dem Tod eines Organismus ändert sich das, es wird kein neues ^{14}C mehr zugeführt und der radioaktive Zerfall der initialen Menge beginnt. Nach 5730 ± 40 Jahren ist gemäß der Halbwertszeit nur noch die Hälfte des ursprünglichen ^{14}C -Gehaltes vorhanden. Nach weiteren 5730 ± 40 Jahren wiederum nur die Hälfte davon. Die derzeit bestimmbare maximale Altersgrenze liegt bei etwa 50.000 Jahren.

1958 konnte Hessel de Vries nachweisen, dass es natürliche zeitliche Schwankungen im $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis gab, so dass die Modellannahme eines in Zeit und Ort konstanten ^{14}C -Anfangswertes nicht erfüllt ist (DE VRIES 1958). Für die errechneten ^{14}C -Alter bedeutet dies, dass die Datierungen nicht Sonnen- oder Kalenderjahren entsprechen, sondern im Vergleich zu diesen zu jung ausfallen. Die Abweichungen können in bestimmten Zeitabschnitten z. B. deutlich über 1000 Jahre liegen. Für die natürlichen Schwankungen im atmosphärischen $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Ver-

hältnis gibt es drei Hauptursachen. Während die Änderungen des erdmagnetischen Dipolfeldes hauptsächlich für langfristige Änderungen verantwortlich sind, werden die kurzfristigen Schwankungen über die Sonnenaktivität gesteuert (sog. DeVries-Effekt). Auch der Austausch von Kohlenstoff aus verschiedenen Reservoirs der Geo- und Biosphäre mit der Atmosphäre kann Schwankungen begründen.

Da es in der Atmosphäre zu einer sehr schnellen Durchmischung kommt, machen sich die ^{14}C -Schwankungen weltweit gleichzeitig bemerkbar, so dass das Problem einer lokal unterschiedlichen Konzentration ausgeschlossen werden kann.

Neben den genannten natürlichen Schwankungen gibt es auch anthropogen verursachte Veränderungen. Dazu gehören der sogenannte „Suess-Effekt“, welcher den Einfluss der seit Mitte des 19. Jahrhunderts erfolgten Industrialisierung bzw. der Verwendung von fossilen Brennstoffen auf den ^{14}C -Gehalt in der Atmosphäre beschreibt und den „Kernwaffen-Effekt“ (GEYH 2005). Letzterer bezieht sich auf die starke Erhöhung des atmosphärischen ^{14}C -Gehaltes durch oberirdische Kernwaffentests zwischen 1950 und 1963.

4.1 Kalibration und Kalenderjahre

Die über die ^{14}C -Methode ermittelten Messergebnisse werden als konventionelle ^{14}C - oder AMS- ^{14}C -Alter bezeichnet. Als Null-Bezugspunkt gilt das Jahr 1950. Das gemessene Datum wird als Zahlenwert mit einer Standardabweichung (\pm Wert) und dahinter dem Symbol BP angegeben. BP steht für „before present“ = „vor heute“. Ein ^{14}C -AMS-Alter von 2.250 BP bedeutet, dass eine Probe ein Alter von 2.250 ^{14}C -Jahren vor 1950 hat. Da diese ^{14}C -Altersdaten systematisch zu jung sind und auch die zeitlich schwankenden im ^{14}C -Anfangsverhältnis nicht berücksichtigen, müssen die Werte korrigiert und kalibriert, d. h. in Kalenderjahre umgerechnet, werden.

Dies wird z. B. über Jahrringkurven bestimmter Baumarten (Dendrochronologie) oder jahresgeschichtete Seeablagerungen (Warvenchronologie) erreicht. Dazu werden die ausgezählten Kalenderdaten der jeweiligen Jahresschicht mit ^{14}C -Daten an dieser Stelle verglichen und über die Datenabweichung Korrekturen errechnet. Uran-Thorium-datierte Speläotheme aus China und den Bahamas sowie laminierte grönländische Eisbohrkerne dienen ebenfalls zur Erstellung von Kalibrationskurven (REIMER et al. 2009). Grundsätzlich können Daten bis zur Grenze der Methode bei 50.000 Jahren kalibriert werden. Die kalibrierten Altersangaben werden mit dem Kürzel „calBP“ gekennzeichnet und als Wert mit 68 %-Wahrscheinlichkeit (1σ) und 95 %-Wahrscheinlichkeit (2σ) angegeben.

4.2 Material und Probenaufbereitung

Zur Datierung mit der ^{14}C -Methode eignen sich alle kohlenstoffhaltigen organischen und anorganischen Materialien wie z. B. Holz, Torf, Knochen, Zähne, Leder, Muschelschalen oder Speläotheme (GEYH 2005).

Da es während der Ablagerungen im Boden zu Kontamination kommen kann, werden die Proben zuerst von groben Verunreinigungen und Fremdkohlenstoff befreit, die das Alter verfälschen können. Zu beachten ist auch, dass Proben durch Substanzen mit einem anderen ^{14}C -Alter kontaminiert sein können. So wurden beispielsweise früher viele pleistozäne Knochenfunde mit Knochenleim präpariert. Verschiedene Reinigungsprozesse im Rahmen der Probenaufbereitung können helfen, Kontaminationsprobleme zu minimieren.

Da das Knochenkarbonat offenporig und kontaminationsanfällig ist, wird aus Knochen das vorwiegend aus Proteinen bestehende Kollagen extrahiert und im Weiteren zur Datierung verwendet. Kollagen ist gegenüber kontaminierenden Austauschvorgängen deutlich weniger anfällig.

Im letzten Schritt wird die gefriergetrocknete Probe durch Verbrennung in Kohlendioxid umgewandelt und der Kohlenstoff daraus anschließend in eine feste Graphitform konvertiert. Für die Messung mit der AMS-Technik sind nur noch kleinste Kohlenstoffmengen im mg-Bereich notwendig. Die Graphitprobe wird im Massenspektrometer mit Cäsium-Ionen beschossen, um geladene C-Ionen zu erhalten. Durch unterschiedliche Massen der Ionen werden im Beschleuniger die Ionen des ^{14}C -Isoptops abgetrennt. Aus dem Verhältnis ^{14}C zu ^{12}C kann das Alter berechnet werden.

5 Ausgewählte Großsäugerfunde und ihre Datierungen

Nachfolgend werden für das Oberpleistozän repräsentative Großsäuger hinsichtlich ihrer Merkmale, ihrer Lebensweise, genetischen Beziehungen und Vorkommen kurz vorgestellt. Ausgewählte Funde von einzelnen Lokalitäten aus dem nORG werden mit ihren Datierungen präsentiert. Abbildungen dazu finden sich zusammengefasst am Ende des Kapitels.

Wollhaarmammut, Mammut

Mammuthus primigenius (Blumenbach, 1799)

Wenn es ein Tier gibt, das synonym für Dauerfrostboden Eiszeit steht, dann ist es das Mammut (Abb. 1). Das Wort ›Mammut‹ kommt aus dem Estnischen und bedeutet Erdmaulwurf (maa – Erde, mutt – Maulwurf). Die Bezeichnung steht im Zusammenhang mit frühen Funden dieser großen Tiere, welche in Sibirien gemacht wurden.

Anhand von solchen Permafrostfunden bzw. Eismumien, welche mit Haaren, Haut, Muskelgewebe, inneren Organen und sogar teilweise mit Blut und Magenfüllungen erhalten sind, kann das Aussehen genau rekonstruiert werden (ROSENDAHL & DÖPPES 2018). Hinweise über die Gestalt der Eiszeitriesen geben aber auch Höhlenmalereien und eiszeitliche Kleinkunstwerke, wie z. B. die berühmten Elfenbeinfiguren von der Vogelherdhöhle auf der Schwäbischen Alb (CONARD & KIND 2017).

Das Mammut war perfekt an die Lebenswelt der letzten Eiszeit angepasst (JÖGER & KAMCKE 2005). Dazu zählen das lange Haarkleid, die kleinen Ohren und der kurze Schwanz. Am Schwanzansatz befand sich als Kälteschutz ein Hautlappen, der als After- oder Analklappe bezeichnet wird. Talgdrüsen zum Einfetten des Fells, um sich vor Feuchtigkeit zu schützen, fehlten. Das Mammut der letzten Eiszeit war im Durchschnitt nicht größer als heutige Asiatische Elefanten (*Elephas maximus*). Die Kopfrumpflänge betrug 6 bis 7,5 m, die Schulterhöhe 2,8 bis 3,7 m und das Gewicht lag bei 5 bis 8 Tonnen. Besonders große Tiere finden sich unter alten Bullen. Das etwa 45.000 Jahre alte Mammutskelett von Siegsdorf bei Traunstein ist ein außergewöhnlich gut erhaltenes Beispiel dafür (ZIEGLER 1994).

Kühe und Kälber lebten in Herden, Bullen als Einzelgänger; Jungbullen in Gruppen. Elefanten haben nur einen Backenzahn pro Kieferhälfte in Benutzung. Der Zahn wandert von hinten nach vorne und wird dabei allmählich abgenutzt. Von hinten schiebt dann ein weiterer Zahn nach. Man nennt das einen horizontalen Zahnwechsel. Im Alter von ca. 60 Jahren fällt der letzte Backenzahn aus. Bei erwachsenen Tieren müssen die Zähne pro Tag etwa 250 kg pflanzliche Nahrung zermahlen. Die maximale Lebenserwartung der großen Pflanzenfresser lag bei etwa 65 Jahren.

Genetische Untersuchungen haben gezeigt (CHANG et al. 2017), dass *Mammothus primigenius* mit Asiatischen Elefanten näher verwandt ist als mit dem Afrikanischen Elefanten (*Loxodonta africana*).

Das Mammut starb auf dem Festland am Ende der letzten Eiszeit aus. Nur auf Inseln vor der Küste Nordostsibiriens, z. B. der Wrangelinsel, überlebten Zwergmammuts bis vor 3.500 Jahren (JÖGER & KAMCKE 2005).

Ein besonderer Mammutfund aus dem nORG ist der gut erhaltene Schädel aus dem Waidsee bei Weinheim (TK 50, L 6516 Mannheim; R 4738 99, H 5486943). Dieser See entstand als Grundwassersee in den Jahren 1966 bis 1970 während des Baus der Autobahn 5 zwischen Darmstadt und Heidelberg. Als Kies- und Sandgrube genutzt, wurden hier während dieser Zeit 2 Millionen Kubikmeter Sediment als Schüttmaterial für Trassen und Dämme an der Baustelle gewonnen.

Bei dem bedeutendsten Fund aus dem Waidsee handelt sich um den Oberschädel eines erwachsenen Tieres (Abb. 2). Der 1,5 Zentner schwere Fund wurde 1967 in etwa 15 m Tiefe entdeckt und ist heute als besonderes Highlight im Museum Weinheim zu bestaunen. Sein rechter Stoßzahn ist schon zu Lebzeiten abgebrochen, der linke brach beim Ausbaggern ab. Das Alter des Schädels wurde in der

Vergangenheit immer nur geschätzt und an unterschiedlichen Stellen mit Werten von 10.000 bis 20.000 Jahre angegeben. Im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt „Eiszeitfenster Oberrheingraben“ wurde eine 1 cm große Knochenprobe vom Hinterhaupt des Schädels für eine ^{14}C -Datierung entnommen. Die Datierung erbrachte ein ^{14}C -Alter von 36.980 ± 250 Jahren BP (MAMS-47354). Der kalibrierte Alterswert ist 42.127–41.389 Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Wollhaarnashorn, Wollnashorn oder Fellnashorn

Coelodonta antiquitatis Blumenbach, 1799

Wollhaarnashörner waren eine spezialisierte und sehr gut an die glazialen Umweltverhältnisse angepasste Nashornart (KOENIGSWALD 2007).

Zahlreiche Knochenfunde aus unterschiedlichen Fundstellensituationen, Mumienfunde aus dem Dauerfrostboden Sibiriens und den Erdwachsschichten von Starunia in der Ukraine sowie altsteinzeitlichen Höhlenmalereien und Ritzzeichnungen vermitteln ein sehr genaues Bild über das Aussehen dieser imposanten Pflanzenfresser (Abb. 3). Ihre Kopfrumpflänge liegt zwischen 3,2 und 3,6 m, die Schulterhöhe reicht von 1,5 bis 1,7 m und das bei einem Gewicht von 1,5 bis 2,9 Tonnen. Der Körper war durch eine dichte, bis zu 9 cm langen Behaarung vor der Kälte geschützt. Eine Anpassung an das Klima sind auch die kleinen Ohren und der kurze Schwanz. Das Wollhaarnashorn hatte, bis auf die Behaarung, eine große Ähnlichkeit mit dem Breitmaulnashorn (*Ceratotherium simum*) in Afrika. Der tief gesenkte Kopf war mit zwei Hörnern ausgestattet. Das größere, weiter vorne sitzende Horn hatte eine Länge von etwa 110 cm. Das hintere, kleinere, konnte eine Länge von 45 cm erreichen. Die aus Keratin bestehenden Hörner vergehen als organische Substanz im Boden schnell und sind deshalb nur über Permafrostbedingungen erhalten. Das vordere Horn ist bei vielen Funden auf der Vorderseite abgeflacht. Man nimmt an, dass es mit gesenktem Kopf als eine Art „Schneeschieber“ eingesetzt wurde, um an Grasnahrung zu gelangen.

Kühe und Kälber lebten vermutlich in kleinen Gruppen zusammen, während Bullen als Einzelgänger unterwegs waren.

Im Gegensatz zum Mammut gelangte das Wollhaarnashorn nicht in den äußersten Nordosten Eurasiens und über die Beringstraße nach Nordamerika. Das Wollhaarnashorn starb ebenfalls am Ende der letzten Eiszeit aus.

Einer der zahlreichen Funde aus der Sammlung Reis ist ein fast vollständiger Schädel eines Wollhaarnashorns. Er wurde in der Kiesgrube „Minthe-Loch“ (TK 50, L 6316 Worms; R 3459700, H 5514200), auch Eicher See genannt, 2,5 km nordöstlich des Dorfes Eich, gefunden. Die Grube ist direkt mit dem Rhein verbunden, der Wasserstand daher unmittelbar vom Fluss abhängig. Der Kies wird mit einem Schwimmbagger geborgen, welcher eine Tiefe von 35 m erreichen kann (SCHWEISS 1988). Hier wurden seit der Ausbeutung der Kiesgrube nach 1944 zahlreiche Tierknochen geborgen.

Beim fast vollständigen Schädel (Abb. 4) fehlen die letzten Molaren (M3) und der rechte Prämolare (P3). Die Zähne sind stark abgekaut. Die ^{14}C -Probe stammt vom rechten Felsenbein an der Schädelbasis. Die Datierung erbrachte ein ^{14}C -Alter von 43.130 ± 1000 Jahren BP (MAMS-25004). Der kalibrierte Alterswert ist 47.969–44.332 Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Steppenbison

Bison priscus Bojanus, 1827

Steppenbisons mit ihren seitlich ausladenden Hörnern waren wesentlich größer als der nordamerikanische Bison (*Bos/Bison bison*) oder das europäische Wisent (*Bos/Bison bonasus*).

Ihr Aussehen kann anhand von Mumienfunden aus dem Dauerfrostboden Alaskas sehr gut rekonstruiert werden (Abb. 5). Ein bedeutender Fund dazu ist „Blue Babe“, die Eismumie eines etwa 35.000 Jahre alten Steppenbisonbullens, welche 1979 nahe Fairbanks bei der Suche nach Gold gefunden wurde. Aber auch altsteinzeitliche Höhlenmalereien, z. B. aus der berühmten Höhle von Altamira in Spanien, vermitteln einen Eindruck vom Aussehen dieser 700 bis 800 kg schweren Wildrinder. Bei einer Kopfrumpflänge von 2 bis 3 m wiesen sie eine Schulterhöhe von 1,5 bis 2 m auf. Auffallend sind der Buckel am Widerrist, der nach vorne gerichtete Bart und die abfallende Rückenlinie. Oberschädelknochen mit Verletzungen an der Stirn sind ein Beleg für Ritualkämpfen unter den Bullen (KOENIGSWALD 2007). In großen Herden oder als Einzelgänger waren die Steppenbisons in den gletscherfreien Gebieten anzutreffen.

Über genetische Studien ist eine nähere Verwandtschaft zum amerikanischen Bison als zum europäischen Wisent nachgewiesen (EDWARDS et al. 2004).

Wie viele andere Großsäuger, so starben auch diese großen Grasfresser zum Ende der letzten Eiszeit aus.

Der hier präsentierte Stirnschädel mit seitlich ausladenden Hornzapfen stammt aus dem Waldsee Viernheim (TK 50, L 6516 Mannheim; R 4702580, H 5489264) und ist im Museum Viernheim ausgestellt (Abb. 6).

Die 2 g schwere Datierungsprobe stammt von der Schädelrückseite. Die Datierung erbrachte ein ^{14}C -Alter von 41.230 ± 420 Jahren BP (MAMS-56323). Das kalibrierte Alter ist 44.794–43.754 Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Auerochse, Ur

Bos primigenius Bojanus 1827

Der Auerochse gehörte zu den großen Pflanzenfressern Europas. Aus dem nördlichen Europa sind männliche Exemplare mit einer Schulterhöhe von bis zu 1,85 m überliefert. Tiere dieser Art mit einer Schulterhöhe von 2 m sind ausschließlich dem Pleistozän zuzuordnen.

Seine Körpermasse betrug wahrscheinlich zwischen 700 kg und 1000 kg. Das Aussehen lässt sich anhand von Knochenfunden, Höhlenmalereien, historischen Beschreibungen und zeitgenössischen Darstellungen rekonstruieren. Die Hörner gingen zunächst nach den Seiten ab und konnten bis einen Meter lang werden. Die Spitzen verliefen leicht nach oben und etwas nach innen gekrümmt. Die Hörner waren bei Stieren und Kühen gleich ausgebildet. Die Kühe waren jedoch deutlich kleiner. In der Regel waren Stiere schwarz oder schwarzbraun und Kühe fuchsrötlich-braun gefärbt (VAN VUURE 2005). Auerochsen waren schnelle und wendige Tiere. Die alten Stiere lebten einzeln und gesellten sich für die Paarungszeit zu den Herden. Der Auerochse mit seinen hochkronigen Zähnen war auf das Gras in offenen Laubwäldern, Waldsteppen und feuchten Niederungen großer Teile des gemäßigten und subtropischen Eurasiens spezialisiert.

Nach neueren Genforschungen gelten nahöstliche Populationen des Auerochsen als Stammform des europäischen Hausrindes (BOLLOGINO et al. 2006; STOCK et al. 2009).

Die Wildform des Auerochsen starb im 17. Jahrhundert aus (VAN VUURE 2005).

Alle zehn Auerochsen Schädelfragmente, die sich in der Sammlung Reis befinden, stammen aus Bobenheim-Roxheim. Hierbei handelt es sich um einen Fundstellenkomplex aus verschiedenen Kiesgruben des heutigen Silbersees, einem Altarm des Rheins, östlich von Bobenheim-Roxheim. Zum Zeitpunkt der Entnahme aus dem Wasser hatte die Sedimentausbeutung eine Tiefe von ca. 20 m erreicht.

Das Stirn-Fragment mit beiden Hornzapfen (Abb. 7) hat eine Spannweite von 105 cm und kommt aus der Kiesgrube Willersinn (TK 50, L 6316 Worms; R 3455 700, H 5495200). Für die Datierung wurde ein Teil des Felsenbeins verwendet. Als Ergebnis wurde ein ^{14}C -Alter von 44.770 ± 470 Jahre BP (MAMS-32880, LINDAUER et al. 2022) ermittelt. Der kalibrierte Alterswert ist 48155–46.045 Jahre calBP (95 % Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Elch

Alces alces (Linnaeus, 1758)

Der Elch mit einer Schulterhöhe von bis zu 2,10 m und einem mittleren Gewicht von rund 450 kg ist die größte heute lebende Hirschart.

Die Bullen sind deutlich größer als die Kühe und tragen ein zur Seite gerichtetes Schaufelgeweih mit einer Spannweite von bis zu 2 m. Das bis zu 20 kg schwere Geweih besteht aus verzweigten Stangen und großen Schaufeln. Die Geweihenden verraten nichts über das Alter der Tiere. Um das Gewicht des Geweihs zu tragen, sind im Brustwirbelbereich Muskeln und Bänder verstärkt ausgebildet. Dadurch ergibt sich der charakteristische, mit längeren Haaren bedeckte Elchbuckel. Lange Beine und die breiten Hufe, die mit einer Schwimmhaut versehen sind, verhindern das Einsinken im morastigen Untergrund und Schnee. Eine Schwimmhaut zwischen den Hufen haben nur Elche.

Sie ernähren sich von Blättern, Trieben, Wasser- und Sumpfpflanzen. Der Elch kommt in den Wäldern Nordeuropas, Nordasiens und Nordamerikas vor. Südlich von Skandinavien und westlich von Polen wurde der Elch ausgerottet.

Genetische Untersuchungen an mehreren Elchfunden, darunter auch das hier vorgestellte Stück aus dem Oberrheingraben, geben einen Einblick in die Populationsgeschichte der Art in Europa und Nordamerika (DUSSEX et al. 2020). Der Ursprung der heutigen Elchlinien ist auf mehrere Refugialpopulationen während des letzten Hochglazials zurückzuführen.

Das linke Geweihstück mit Schädelfragment stammt aus der Privatsammlung Frank Menger und wurde in der Kiesgrube der Firma Rohr an der Erlache bei Bensheim (TK 50, L 6316 Worms; R 4706730, H 5501027) gefunden. Die Grube liegt im Bereich eines ehemaligen Flusssystemes des nacheiszeitlichen Neckarlaufes, der sich am Ostrand der Rheinebene entlang schlängelte, etwa in Höhe von Pfungstadt nach Nordwesten abgog und bei Trebur in den Rhein mündete.

Für die Datierung wurde ein Teil des rechten Felsenbeins verwendet. Als Ergebnis wurde ein ^{14}C -Alter von 10.495 ± 28 Jahre BP (MAMS-42507, DUSSEX et al. 2020) ermittelt. Der kalibrierte Alterswert ist $12.621\text{--}12.283$ Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Rothirsch

Cervus elaphus Linnaeus, 1758

Rothirsche verdanken ihren Namen dem rotbraunen Sommerfell.

Nur Männchen tragen ein stangenförmiges, weitverzweigtes Geweih. Mit teils bis zu 20 Enden kann es bis zu 11 kg schwer werden. Aus der Zahl der Enden lässt sich das Lebensalter nicht erschließen, da die Geweihentwicklung von mehreren Faktoren bestimmt wird. Grundsätzlich haben ältere Hirsche ein mächtigeres Geweih. Gemessen an den Geweihen war der Rothirsch der Eiszeit deutlich kräftiger als der rezente Hirsch. Die nach Geschlechtern getrennten Rudel lieben heute strukturreiche Waldlandschaften mit offenen Lichtungen. Alte Hirsche sind Einzelgänger.

Rothirsche repräsentieren eine intermediäre Gruppe, die nicht an bestimmte Lebensräume gebunden ist, und kommen sowohl in den Warm- als auch in den Kaltzeiten vor (MEIRI et al. 2013). Im Gegensatz zum Wollhaarmammut, Wollhaarnashorn und Steppenbison sind Rothirsche stärkere Laubfresser.

Das Hinterhaupt mit beiden Geweihstangen, deren Enden teilweise abgebrochen sind, stammt aus einer Kiesgrube bei Bobenheim-Roxheim (Abb. 8). Für die Datierung wurde ein Teil des Felsenbeins verwendet. Als Ergebnis wurde ein ^{14}C -Alter von 49.870 ± 1410 Jahre BP (MAMS-54361) ermittelt. Das Ergebnis liegt sehr nah an der Datierungsgrenze der ^{14}C -Methode, so dass es hierzu keinen aussagekräftigen kalibrierten Alterswert gibt.

Riesenhirsch

Megaloceros giganteus (Blumenbach, 1799)

Riesenhirsche waren die größten Hirsche der letzten Eiszeit (Abb. 9). Nur männliche Hirsche trugen ein Geweih. Dieses konnte bis zu 4 m Spannweite (YALDEN 1999) erreichen und bis zu 40 kg schwer werden. In äsender Haltung erkannte man gut die zahllosen Spitzen, die als Abwehr gegenüber Raubtieren dienten. Über jungpaläolithische Malereien und Gravierungen aus Höhlen hat man eine gute Vorstellung von ihrem Aussehen. Bei dem markanten Buckel dürfte es sich um ein Fellbüschel und nicht um einen Fetthügel handeln. Ob sie wie andere Hirscharten in Rudeln lebten, ist nicht sicher.

Genetisch sind Riesenhirsch und Damhirsch verwandt (HUGHES et al. 2006).

Riesenhirsche durchstreiften bis ins Spätglazial die offenen Landschaften Europas. Ihr Verbreitungsgebiet befand sich im Übergangsbereich zwischen dem des Rentieres und des Rothirsches. Sie verloren mit der Wiederbewaldung nach der letzten Eiszeit ihren Lebensraum und starben aus. In West-Sibirien lebten sie bis vor ca. 7.600 Jahren (STUART et al. 2004).

Ein bemerkenswerter Fund in der Sammlung Reis ist der fast vollständige Oberschädel samt Geweih mit einer Spannweite von ca. 1,45 m (Abb. 10) aus einer Kiesgrube bei Bobenheim-Roxheim. Für die Datierung wurde ein Teil des Felsenbeins verwendet. Als Ergebnis wurde ein ^{14}C -Alter von 41.840 ± 350 Jahre BP (MAMS-39488, LINDAUER et al. 2022) ermittelt. Das ergibt ein kalibriertes Datum von 45.237–44153 Jahre cal BP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Rentier

Rangifer tarandus (Linnaeus, 1758)

Das Rentier ist die einzige Hirschart, die domestiziert wurde und bei der auch die Weibchen ein Geweih tragen. Die Geweihe sind unsymmetrisch, stangenförmig und weit verzweigt. Die tiefste Sprosse bildet eine kleine Verbreiterung, die sogenannte „Schneeschaufel“. Man nahm früher an, dass sie zum Räumen des Schnees diente. Die männlichen Geweihe sind mit 50 bis 130 cm deutlich ausladender als die 20 bis 50 cm großen weiblichen Geweihe. Die Männchen werfen ihr Geweih im Herbst und die Weibchen erst im Frühjahr ab.

Lange Beine, breite Klauen mit scharfen Schalenrändern und lange Afterklauen sind eine Anpassung an steiniges, schlammiges und schneebedecktes Gelände. Während der großen Wanderungen umfasst die Rentierherde mehrere hunderttausend Tiere. Die im Frühsommer geborenen Jungtiere können eine Stunde nach der Geburt laufen.

Die Nahrung der Rentiere besteht aus Gras, Flechten, Moosen und Pilzen. Rentiere durchstreifen heute im Sommer die Tundra und im Winter die Taiga Nord- und Nordamerikas sowie auf Grönland und anderen arktischen Inseln.

Das rechte Stirnfragment mit einer 85 cm langen Geweihstange aus der Sammlung Reis stammt aus einer Kiesgrube bei Bobenheim-Roxheim. Ein 2,2 g schweres Knochenstück aus dem Stirnfragment ergab ein ^{14}C -Alter von 38.410 ± 170 Jahre BP (MAMS-66977). Der kalibrierte Alterswert ist 42.573–42.245 Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Wildpferd

Equus ferus Boddaert, 1784

Linnaeus vergab dem Pferd den wissenschaftlichen Namen *Equus caballus* Linnaeus, 1758 und bezog sich dabei auf die weitverbreiteten Hauspferde. Die Wildpferdeform wird allgemein mit *Equus ferrus* Boddaert 1785 bezeichnet.

Anhand von altsteinzeitlichen Höhlenmalereien und Gravierungen sowie Permafrostmumien aus Sibirien und zahlreichen Knochenfunden lässt sich das Erscheinungsbild der eiszeitlichen Wildpferde gut beschreiben. Wildpferde haben eine kurze Stehmähne, kurze Beine und einen gedrungenen Körper. Das Fell ist braun, schwarz oder tigergescheckt. Nach einer elf Monate andauernden Tragezeit kommt das Fohlen (selten zwei) zur Welt. Es kann sofort stehen und laufen.

Die hochkronigen Zähne der Pferde bilden mit ihren verschiedenen Baumaterialien (Dentin und Zahnschmelz) Schneidekanten aus und ermöglichen die perfekte Verwertung der nährstoffarmen Nahrung, bestehend überwiegend aus Steppengräsern. Das Wildpferd war ein typisches und weitverbreitetes Faunenelement der Mammutsteppe.

Wildpferde sind die Stammform des heutigen Hauspferds, das vor ca. 5.500 Jahren im westlichen Teil der eurasischen Steppe domestiziert wurde (LIBRADO et al. 2021).

Der vollständig erhaltene Pferde-Unterkiefer (Abb. 11) stammt aus der Sammlung Reis und wurde in einer Kiesgrube bei Bobenheim-Roxheim gefunden. Für die Datierung wurde ein Teil des linken Felsenbeins verwendet. Als Ergebnis wurde ein ^{14}C -Alter von 35.870 ± 330 Jahre BP (MAMS-46803) ermittelt. Der kalibrierte Alterswert ist 41.636–40.346 Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Höhlenhyäne

Crocota crocuta spelaea (Goldfuß, 1832)

Höhlenhyänen waren etwas größer als die afrikanischen Tüpfelhyänen. Das kräftige Gebiss ist typisch für Knochenverwerter und Fleischfresser. Die Muskulatur der Vorderbeine und des Nackenbereiches war stärker ausgebildet als bei anderen Raubtieren. Dies wird als Anpassung an das Heben und Tragen schwerer Beutetiere gedeutet.

Höhlenhyänen hatten kürzere Gliedmaßen als die heutigen Tüpfelhyänen und waren somit noch nicht so gut an das schnelle Laufen angepasst. Wahrscheinlich hatte das Fell ein ähnliches Fleckenmuster. Sie lebten in Rudeln und waren hauptsächlich Aasfresser. Sie hatten keine feste Fortpflanzungszeit und brachten ihre zwei (selten ein oder drei) Jungen nach einer Tragzeit von drei Monaten zur Welt.

Eine Besonderheit zu dieser Tierart sind die sogenannten Hyänenhorste. Dabei handelt es sich um Verstecke, z. B. Höhlen, die zur Aufzucht der Jungen sowie als Nahrungsdepots verwendet wurden. Letzteres ist der Grund dafür, dass man in solchen Hyänenhorsten häufig unzählige verbissene Knochen der unterschiedlichsten eiszeitlichen Beutetiere und Koproolithen (fossile Exkreme, Kot) findet. Durch Hyänen verbissene Knochenreste finden sich aber auch häufig außerhalb von Horsten. Die Höhlenhyäne besiedelten die Ebenen von der Iberischen Halbinsel bis zum Peloponnes, die Britischen Inseln und vom südlichen Nordseeraum über Mittel-, Ost-Europa bis nach Nordost-Asien. Die Höhlenhyäne findet man nicht im Gebirge.

Höhlenhyänen starben vor der kältesten Phase der letzten Eiszeit aus (STUART & LISTER 2007).

Ein Beispiel für seltene Raubtierfunde aus der Sammlung Reis ist das Schädelfragment einer Höhlenhyäne aus einer Kiesgrube bei Bobenheim-Roxheim. Anhand des markanten Schädelkammes (Abb. 12) ist die Zuordnung zur Höhlenhyäne eindeutig. Die Datierungsprobe stammt vom linken Felsenbein und ergab ein ^{14}C -Alter von 46.750 ± 560 Jahre BP (MAMS-32878, LINDAUER et al. 2022). Das kalibrierte Alter ist 51.399–47.830 Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Höhlenbär

Ursus spelaeus Rosenmüller, 1994

Der Höhlenbär ist nach dem Mammut das bekannteste Tier der ausgestorbenen eiszeitlichen Fauna (Abb. 13). Höhlenbären waren nicht die Vorfahren, sondern Zeitgenossen der Braunbären. Ihre Verhaltensweisen ähnelten sich.

Höhlenbären lebten nicht in Höhlen, sondern besiedelten als Pflanzenfresser auch weite Bereiche des Flachlandes und des Hochgebirges. Sie suchten die Höhlen lediglich als Unterschlupf, hauptsächlich während der vegetationsarmen Zeit der Wintermonate, auf. Vor allem alte und schwache Tiere oder Bärinnen starben nach der Geburt der Jungen während der Winterruhe in Höhlen. Auf diese Weise sind im Laufe von zehntausenden von Jahren in vielen Höhlen riesige Knochenlager entstanden. Die ein bis zwei (selten drei) Jungtiere lebten bis zu zwei Jahre bei der Mutter. Die Männchen waren viel größer und schwerer als die Weibchen.

Als reine Herbivoren ernährten sich Höhlenbären hauptsächlich von Blättern, Beeren und krautigen Pflanzen (BOCHERENS et al. 2011; HOLLAND 2013; HORACEK et al. 2012; FRISCHAUF et al. 2016; DÖPPES et al. 2018).

Außer den Knochen belegen verschiedene Lebensspuren ebenfalls die Anwesenheit der Höhlenbären in Höhlen. Bekannt sind z. B. „Bärenschliffe“, Kratzspuren, Tatzenabdrücke, Schlafkuhlen und sogar Nierensteine (siehe z. B. ROSENDAHL & DÖPPES 2006).

Die Kenntnisse über die Evolution der Höhlenbären haben sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert. Während man früher annahm, dass es nur eine einzige Höhlenbärenart gegeben hätte, weiß man heute aus morphologischen und vor allem genetischen Untersuchungen, dass im gleichen geologischen Zeitraum vier große mitochondriale DNA-Linien existierten (*Ursus spelaeus spelaeus*, *Ursus spelaeus eremus*, *Ursus spelaeus ladinicus* und *Ursus ingressus*), was zu einer deutlich komplexeren Biogeographie der europäischen Linien führt als bisher angenommen (RABEDER et al. 2004; GRETZINGER et al. 2019).

Der Höhlenbär war in Eurasien (FORTES et al. 2016; RABEDER & FRISCHAUF 2016; KNAPP et al. 2009) beheimatet und starb vor dem letzten Hochglazial aus (PACHER & STUART 2009).

Der hier präsentierte, fast vollständige Höhlenbärenschädel (Abb. 14) ist aus der Privatsammlung Volker Faath und stammt von der Fundstelle Trebur-Geinsheim bzw. dem Kieswerk Kiebert (TK 50, L 6116 Darmstadt-West; R 3456160, H 5526680) mit dem gleichnamigen großen Baggersee Kiebert. Seit 2004 wird der Abbau hier von der Firma Dyckerhoff betrieben.

Der Schädel hat ein ^{14}C -Alter von 43.790 ± 460 Jahre BP (MAMS-15548; ROSENDAHL & DÖPPES 2011). Der kalibrierte Alterswert ist $47.333\text{--}45.230$ Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).

Höhlenlöwe

Panthera spelaea Goldfuß, 1810

Der namengebende Erstfund stammt aus der Zoolithenhöhle auf der Fränkischen Alb. Die Benennung bezieht sich auf seinen Fundort und nicht auf seinen Lebensraum.

Hinsichtlich des Aussehens von Höhlenlöwen (Abb. 15) belegen altsteinzeitliche Höhlenmalereien, z. B. aus der Grotte Chauvet in Frankreich, und Ritzzeichnungen eine für Löwen typische Schwanzquaste und kurze Mähne (z. B. ROSENDAHL & ROSENDAHL 2024). Der Höhlenlöwe glich diesbezüglich also mehr dem Indischen oder Persischen Löwen (*Panthera leo persica*) als seinem afrikanischen Verwandten. Wie ihre heutigen Verwandten auch, lebten Höhlenlöwen im Rudel und machten Jagd auf große bis mittelgroße Huftiere wie z. B. Rentiere, Wildpferde, Hirsche, Wildrinder und Saiga-Antilopen. Höhlen wurden nur gelegentlich als Unterschlupf oder auf der Nahrungssuche aufgesucht. Höhlenlöwen waren ungefähr zehn Prozent größer als heutige afrikanische Löwen. Ihre Kopfrumpflänge betrug 140 bis 230 cm, die Schulterhöhe 90 bis 150 cm. Das Gewicht lag bei etwa 140–400 kg, die Lebenserwartung bei rund 20 Jahren (HEMMER

2011). Die nach vorne ausgerichteten Augen dienten speziell bei der Jagd zur exakten Einschätzung von Entfernungen. Ihre beweglichen Ohren ermöglichten ein ausgeprägtes räumliches Hören. Es wird vermutet, dass, ähnlich wie bei heutigen Löwen, bis zu vier Jungtiere nach drei bis vier Monaten Tragzeit zur Welt kamen. Bezüglich Höhlenlöwenjungtiere wurden 2015 einzigartige Funde im sibirischen Dauerfrostboden entdeckt, nämlich Mumien von zwei Höhlenlöwenbabys (ROSENDAHL & DÖPPES 2018).

Höhlenlöwen waren weit verbreitet, sogar bis in die alpinen Regionen. Skelettreste aus zahlreichen aus Höhlen- und Freilandfundstellen sind bekannt. Aus der beim Mammut schon erwähnten Fundstelle von Siegsdorf bei Traunstein stammt auch ein gut erhaltenes Teilskelett eines Höhlenlöwen (ZIEGLER 1994). An einer Knochenprobe von diesem Fund wurden 2004 an der Universität Mainz auch die ersten paläogenetischen Untersuchungen durchgeführt (BURGER et al. 2004).

Wie neue genetische Untersuchungen zeigen, war der europäische Höhlenlöwe eine eigene Art (STANTON et al. 2020) und nicht, wie lange vermutet, eine Unterart des heutigen Löwen (*Panthera leo*). Die Trennung der Entwicklungslinien beider Arten erfolgte bereits vor etwa 1,85 Millionen Jahren.

Mit dem Ende der letzten Kaltzeit starb der Höhlenlöwe aus (STUART & LISTER 2011). Neben klimatisch-ökologischen Gründen wird auch die Jagd des Menschen auf den „König der Eiszeittiere“ als Ursache dafür diskutiert.

Der fast vollständige Schädel (Abb. 16) aus der Sammlung Reis stammt aus einer Kiesgrube bei Bobenheim-Roxheim. Der linke Gesichtsschädel ist nicht erhalten. Für die Datierung wurde ein Teil des Felsenbeins verwendet. Als Ergebnis wurde ein ¹⁴C-Alter von 28.240 ± 110 Jahre BP (MAMS-32877) ermittelt. Der kalibrierte Alterswert ist 32.917–31.855 Jahre calBP (95 %-Wahrscheinlichkeit, 2-sigma).



Abbildung 1: Lebensechte Rekonstruktion einer Mammutkuh mit Jungtier (*Mammuthus primigenius*) in natürlicher Umgebung; Rekonstruktion: Remie Bakker/manimalworks; Foto: rem Mannheim.

Figure 1: Lifelike reconstruction of a mammoth cow with cub (*Mammuthus primigenius*) in a natural environment; reconstruction: Remie Bakker/manimalworks; photo: rem Mannheim.



Abbildung 2: Mammutschädel (*Mammuthus primigenius*) aus dem Waidsee bei Weinheim im Museum Weinheim; Foto: W. Rosendahl.

Figure 2: Mammoth skull (*Mammuthus primigenius*) from the Waidsee near Weinheim in the Weinheim Museum; photo: W. Rosendahl.



Abbildung 3: Lebensechte Rekonstruktion eines Wollhaarnashorns (*Coelodonta antiquitatis*) in natürlicher Umgebung; Rekonstruktion und Foto: Remie Bakker/manimalworks.

Figure 3: Lifelike reconstruction of a woolly rhinoceros (*Coelodonta antiquitatis*) in a natural environment; reconstruction and photo: Remie Bakker/manimalworks.



Abbildung 4: Oberschädel eines Wollhaarnashorns (*Coelodonta antiquitatis*) von der Fundstelle Eich See; Foto: rem, Mannheim.

Figure 4: Upper skull of a woolly rhinoceros (*Coelodonta antiquitatis*) from the Eich Lake site; photo: rem, Mannheim.



Abbildung 5: Lebenschte Rekonstruktion eines Steppenbisons (*Bison priscus*) in natürlicher Umgebung; Rekonstruktion und Foto: Remie Bakker/manimalworks.

Figure 5: Lifelike reconstruction of a steppe bison (*Bison priscus*) in a natural environment; reconstruction and photo: Remie Bakker/manimalworks.



Abbildung 6: Schädel eines Steppenbisons (*Bison priscus*) aus dem Waldsee Viernheim im Museum Viernheim; Foto: W. Rosendahl.

Figure 6: Skull of a steppe bison (*Bison priscus*) from the ‚Waldsee‘ (forest lake) Viernheim in the Viernheim Museum; photo: W. Rosendahl.



Abbildung 7: Schädelfragment eines Aurochs (*Bos primigenius*) aus der Kiesgrube Willersinn bei Bobenheim-Roxheim; Foto: rem Mannheim.

Figure 7: Skull fragment of an aurochs (*Bos primigenius*) from the Willersinn gravel pit near Bobenheim-Roxheim; photo: rem Mannheim.



Abbildung 8: Schädelfragment mit Geweihstangen eines Rothirsches (*Cervus elaphus*) aus einer Kiesgrube von Bobenheim-Roxheim; Foto: rem Mannheim.

Figure 8: Skull fragment with antler of a red deer (*Cervus elaphus*) from a gravel pit in Bobenheim-Roxheim; photo: rem Mannheim.



Abbildung 9: Lebenschte Rekonstruktion eines Riesenhirschen (*Megaloceros giganteus*); Rekonstruktion: Ramon López/Quagga; Foto: rem Mannheim.

Figure 9: Lifelike reconstruction of a giant deer (*Megaloceros giganteus*); reconstruction: Ramon López/Quagga; photo: rem Mannheim.



Abbildung 10: Oberschädel mit Geweih eines Riesenhirschen (*Megaloceros giganteus*) aus einer Kiesgrube von Bobenheim-Roxheim; Foto: rem Mannheim.

Figure 10: Upper skull with antler of a giant deer (*Megaloceros giganteus*) from a gravel pit in Bobenheim-Roxheim; photo: rem Mannheim.



Abbildung 11: Unterkiefer eines Wildpferdes (*Equus ferus*) aus einer Kiesgrube von Bobenheim-Roxheim; Foto: rem Mannheim.

Figure 11: Lower jaw of a wild horse (*Equus ferus*) from a gravel pit in Bobenheim-Roxheim; photo: rem Mannheim.



Abbildung 12: Schädelfragment einer Höhlenhyäne (*Crocuta crocuta spelaea*) aus einer Kiesgrube von Bobenheim-Roxheim; Foto: rem Mannheim.

Figure 12: Skull fragment of a cave hyena (*Crocuta crocuta spelaea*) from a gravel pit in Bobenheim-Roxheim; photo: rem: Mannheim.



Abbildung 13: Lebensechte Rekonstruktion einer Höhlenbärin mit zwei Jungtieren (*Ursus spelaeus*); Rekonstruktion: Remie Bakker/manimalworks; Foto: Marc Steinmetz.

Figure 13: Lifelike reconstruction of a cave bear with two cubs (*Ursus spelaeus*); reconstruction: Remie Bakker/manimalworks; photo: Marc Steinmetz.



Abbildung 15: Lebensechte Rekonstruktion eines Höhlenlöwen (*Panthera spelaea*) in natürlicher Umgebung; Rekonstruktion: Ramon López/Quagga; Foto: W. Rosendahl.

Figure 15: Lifelike reconstruction of a cave lion (*Panthera spelaea*) in a natural environment; reconstruction: Ramon López/Quagga; photo: W. Rosendahl.



Abbildung 14: Höhlenbärenschädel (*Ursus spelaeus*) aus der Privatsammlung Faath von der Fundstelle Trebur-Geinsheim; Foto: rem Mannheim.

Figure 14: Cave bear skull (*Ursus spelaeus*) from the private collection Faath from the site Trebur-Geinsheim; photo: rem Mannheim.



Abbildung 16: Oberschädel eines Höhlenlöwen (*Panthera spelaea*) aus einer Kiesgrube von Bobenheim-Roxheim; Foto: rem Mannheim.

Figure 16: Upper skull of a cave lion (*Panthera spelaea*) from a gravel pit in Bobenheim-Roxheim; photo: rem Mannheim.

6 Ausblick

Radiokarbondatierungen an Knochenfunden von pleistozänen Großsäugern aus dem nördlichen Oberrheingraben sind eine wichtige Grundlage für das Verständnis zum zeitlichen Auftreten der unterschiedlichen Arten während der jüngeren Hälfte des letzten Glazial in diesem Gebiet. Damit und mit ergänzenden Untersuchungen wie Paläogenetik und Isotopenanalysen ergibt sich die Möglichkeit einer detaillierten Klima- und Umweltrekonstruktion für den Oberrheingraben als wichtiger Faunen- und Florenkorridor zwischen dem südlichen- und nördlichen Europa. Jeder neue Fund und jede neue Analyse leistet einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der Paläoumwelt in diesem besonderen geographischen Raum. Die zukünftige Auswertung von Untersuchungsergebnissen aus dem Projekt „Eiszeitfenster Oberrheingraben“ und die Fortsetzung der Forschungen, werden neue und interessante Aspekte für die „Eiszeit-Safari“ im nördlichen Oberrheingraben ermöglichen.

7 Dank

Ohne die großzügige und mehrjährige Förderung durch die Klaus Tschira Stiftung gGmbH Heidelberg wäre der neue Blick auf die pleistozäne Großsäugerfauna im Oberrheingraben nicht möglich gewesen. Für diese Unterstützung danken wir herzlich und ganz besonders.

Für ihre wichtige und vielfältige Mitwirkung am Projekt „Eiszeitfenster Oberrheingraben“ danken wir Dr. Ronny Friedrich und Dr. Susanne Lindauer vom Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH an den Reiss-Engelhorn-Museen Mannheim sowie Frank Menger aus Groß-Rohrheim und den kooperierenden Museen und ihren Leitungen.

8 Literatur

- ARNOLD, J. R. & LIBBY, W.F. (1949): Age determination by radiocarbon content: checks with samples of known age. – *Science*, **110** (2869): 678-680.
- BOCHERENS, H., STILLER, M., HOBSON, K. A., PACHER, M., RABEDER, G., BURNS, J. A., TÜTKEN, T. & HOFREITER, M. (2011): Niche partitioning between two sympatric genetically distinct cave bears (*Ursus spelaeus* and *Ursus ingressus*) and brown bear (*Ursus arctos*) from Austria: Isotopic evidence from fossil bones. – *Quaternary International*, **245**: 238-248.
- BOLLONGINO R, EDWARDS CJ, ALT K.W, BURGER J. & BRADLEY, D.G. (2006). Early history of European domestic cattle as revealed by ancient DNA. – *Biol Lett.*, **2** (1):155-159.
- BURGER, J., ROSENDAHL, W., LOREILLE, O., HEMMER, H., ERIKSSON, T., GÖTHERSTRÖM, A., HILLER, J., COLLINS, M.J., WESS, T. & ALT, K.W. (2004): Molecular phylogeny of the cave lion *Panthera leo spelaea*. – *Molecular Phylogenetics and Evolution*, **30**: 841-849.

- CHANG, D., KNAPP, M., ENK, J., LIPPOLD, S., KIRCHER, M., LISTER, A., MACPHEE, R.D.E., WIDGA, C., CZECHOWSKI, P., SOMMER, R., HODGES, E., STÜMPPEL, N., BARNES, I., DALÉN, L., DEREVIANKO, A., GERMONPRÉ, M., HILLEBRAND-VOICULESCU, A., CONSTANTIN, S., KUZNETSOVA, T., MOL, D., RATHGEBER, Th., ROSENDAHL, W., TIKHONOV, A.N., WILLERSLEV, E., HANNON, G., LALUEZA-FOX, C., Joger, U., POINAR, H., HOFREITER, M. & SHAPIRO, B. (2017): The evolutionary and phylogeographic history of woolly mammoths: a comprehensive mitogenomic analysis. – *Scientific Report*, 7: 44585.
- CONARD, N.J. & KIND, C.-J. (2017): Als der Mensch die Kunst erfand. Eiszeithöhlen der Schwäbischen Alb. – 192 S., Stuttgart (WBG/Theiss).
- DE VRIES, H.I. (1958): Variation in concentration of radiocarbon with time and location on earth. - Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, **61**: 1-9; Amsterdam.
- DÖPPES, D., RABEDER, G., FRISCHAUF, C., KAVCIK-GRAUMANN, N., KROMER, B., LINDAUER, S., FRIEDRICH, R. & ROSENDAHL, W. (2018): Extinction pattern of Alpine cave bears - new data and climatological interpretation. – *Historical Biology*, **31** (4): 422-428.
- DUSSEX, N., ALBERTI, F., HEINO, M.T., OLSEN, R.A., VAN DER VALK, T., RYMAN, N., LAIKRE, L., AHLGREN, H., ASKEYEV, I.V., ASKEYEV, O.V., SHAYMURATOVA, D.N., ASKEYEV, A.O., DÖPPES, D., FRIEDRICH, R., LINDAUER, S., ROSENDAHL, W., ASPI, J., HOFREITER, M., LIDÉN, K., DALÉN, L. & Díez-Del-Molino, D. (2020): Moose genomes reveal past glacial demography and the origin of modern lineages. – *BMC Genomics*, **21** (1): 854; doi: 10.1186/s12864-020-072089-3.
- EDWARDS, G.J., MACLIGH, D.E., DORNEY, K.M., MARTIN, L., RUSSELL, N., HORWITZ, L.K., MCINTOSH, N., MACDONALD, K.G., HELMER, D., TRESSET, A., VIGNE, J.-D. & BRADLEY, D.G. (2004): Ancient DNA analysis of 101 cattle remains: Limits and Prospects. – *Journal of archaeological science*, **31** (6): 695-710.
- ELLWANGER, D., GABRIEL, G., HOSELMANN, C., WEIDENFELLER M. & WIELAND-SCHUSTER, U. (2010): Mannheim-Formation. – In: Litholex (Online-database); Hannover: BGR. Last update: 03.11.2010. Record No 1000011. Available from: <http://www.bgr.bund.de/litholex>.
- FORTES, G.G., GRANDAL-D'ANGLADE, A., KOLBE, B., FERNANDES, D., MELEG, I.N., GARCÍA-VÁZQUEZ, A., PINTO-LLONA, A.C., CONSTANTIN, S. & DE TORRES, T.J. (2016): Ancient DNA reveals differences in behaviour and sociality between brown bears and extinct cave bears. – *Molecular Ecology*, **25** (19): 4907-4918.
- FRISCHAUF, C., GOCKERT, R., KAVCIK-GRAUMANN, N. & RABEDER, G. (2016): »Kiszevély knives« indicate the menu of Alpine cave bears. Comparative studies on wedge shaped defects of canines and incisors. – *Cranium*, **33**: 14-17.
- GABRIEL, G., ELLWANGER, D., HOSELMANN, C. & WEIDENFELLER, M. (Hrsg.) (2008): The Heidelberg Basin Drilling Project. – *Quaternary Science Journal (Eiszeitalter und Gegenwart)*, **57** (3/4): 432 S.
- GABRIEL, G., ELLWANGER, D., HOSELMANN, C., WEIDENFELLER, M., WIELAND-SCHUSTER, U. & The Heidelberg Basin Project Team (2013): The Heidelberg Basin, Upper Rhine Graben (Germany): a unique archive of Quaternary sediments in Central Europe. – *Quaternary International*, **292**: 43-58.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (2011): *Geologie von Baden-Württemberg*. – 627 S., Stuttgart (Schweizerbart Verlag).
- GEYH M. A. (2005): *Handbuch der physikalischen und chemischen Altersbestimmung*. – 211 S.; Darmstadt (WBG).
- GRETZINGER, J., MOLAK, M., REITER, E., PFRENGLE, S., URBAN, C., NEUKAMM, J., BLANT, M., CONARD, N.J., CUPILLARD, C., DIMITRIJEVIĆ, V., DRUCKER, D.G., HOFMAN-KAMIŃSKA, E., KOWALCZYK, R., KRAJCARZ, M., KRAJCARZ, M., MÜNZEL, S.C., PERESANI, M., ROMANDINI, M.
- RUFÍ, I., SOLER, J. et al. (2019): Large-scale mitogenomic analysis of the phylogeography of the Late Pleistocene cave bear. – *Scientific Reports*, **9** (1): 10700.
- HEMMER, H. (2011): The story of the cave lion *Panthera leo spelaea* (Goldfuss, 1810) – a review. – *Quaternaire, Suppl.* **4**: 201-208.

- HOLLAND, L. (2013): Correlation between the degree of dental abrasion, ontogenetic age and nutrition of Alpine cave bears (DARA method). – 43 S.; Unpublished Diploma thesis, University Vienna, Austria; doi: 10.25365/thesis.28207
- HORACEK, M., FRISCHAUF, C., PACHER, M. & RABEDER, G. (2013): Stable isotopic analyses of cave bear bones from the Conturines cave (2,800 m, South Tyrol, Italy). – Braunschweiger Naturkundliche Schriften, **11**: 47-52.
- HUGHES S., HAYDEN, T.J., DOUADY, C.J., TOUGARD, C., GERMONPRÉ, M., STUART, A., LBOVA, L., CARDEN, R.F., HÄNNI, C. & SAY, L. (2006): Molecular phylogeny of the extinct giant deer, *Megaloceros giganteus*. – Molecular Phylogenetics and Evolution, **40**: 285; doi:10.1016/j.ympev.2006.02.004.
- JÖGER, U. & KAMCKE, C. (Hrsg.) (2005): Mammut. Elefanten der Eiszeit. – 116 S.; Braunschweig (CARGO)
- KNAPP, M., ROHLAND, N., WEINSTOCK, J., BARYSHNIKOV, G., SHER, A., NAGEL, D., RABEDER, G., PINHASI, R., SCHMIDT, H.A. & HOFREITER, M. (2009): First DNA sequences from Asian cave bear fossils reveal deep divergences and complex phylogeographic patterns. – Molecular ecology, **18** (6): 1225-1238.
- KNIPPING, M. (2004): Pollenanalytische Untersuchungen an einem mittelpleistozänen Interglazial bei Mannheim. – Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, **D10**: 199-217.
- KNIPPING, M. (2008): Early and Middle Pleistocene pollen assemblages of deep core drillings in the northern Upper Rhine Graben, Germany. – Netherlands Journal of Geosciences. Geologie en Mijnbouwen, **87** (1): 51-66.
- KOENIGSWALD, W. VON (1988): Paläoklimatische Aussage letztinterglazialer Säugetiere aus der nördlichen Oberrheinebene. - In: KOENIGSWALD, W. VON (Hrsg.): Zur Paläoklimatologie des letzten Interglazials im Nordteil der Oberrheinebene. – 205-316, Stuttgart (Gustav Fischer).
- KOENIGSWALD, W. VON (1991): Exoten in der Großsäugerfauna des letzten Interglazials von Mitteleuropa. – Eiszeitalter und Gegenwart, **41**: 70-84.
- KOENIGSWALD, W. VON (2007). Mammalian faunas from the interglacial periods in Central Europe and their stratigraphic correlation. – Developments in Quaternary Sciences, **7**: 445-454.
- KOENIGSWALD, W. VON & MENGER, F. (1997): Mögliches Auftreten von *Trogontherium cuvieri* und *Alces latifrons* im letzten Interglazial der nördlichen Oberrheinebene. – Cranium, **14**: 2-10.
- LIBBY, W. F. (1952): Radiocarbon Dating. – 132 S.; Chicago (University of Chicago Press).
- LIBRADO, P., KHAN, N., FAGES, A., KUSLIY, M.A., SUCHAN, T., TONASSO-CALVIÈRE, L., SCHIAVINATO, S., ALIOGLU, D., FROMENTIER, A., PERDEREAU, A., AURY, J.M., GAUNITZ, C., CHAUVÉY, L., SEGUIN-ORLANDO, A., DER SARKISSIAN, C., SOUTHON, J., SHAPIRO, B., TISHKIN, A.A., KOVALEV, A.A., ALQURAIISHI, S. et al. (2021): The origins and spread of domestic horses from the Western Eurasian steppes. – Nature, **598** (7882): 634-640; doi: 10.1038/s41586-021-04018-9.
- LINDAUER, S., KNIPPER, C., DÖPPES, D., KNAPP, H., FRIEDRICH, R. & ROSENDAHL, W. (2022): Investigating cave bear remains - an overview on methods with focus on radiocarbon dating and stable isotopes. – e-Research Reports of Museum Burg Golling, **2**: 1-20.
- MEIRI, M., LISTER, A. M., HIGHAM, T. F. G., STEWART, J. R., STRAUS, L. G., OBERMAIER, H., GONZÁLEZ-MORALES, M.R., MARÍN-ARROYO, A.B. & BARNES, I. (2013): Late-glacial recolonization and phylogeography of European red deer (*Cervus elaphus* L.). – Molecular Ecology, **22**: 4711-4722.
- PACHER, M. & STUART A. J. (2009): Extinction chronology and palaeobiology of the cave bear (*Ursus spelaeus*). – Boreas, **38** (2): 189-206; doi:10.1111/j.1502-3885.2008.00071.x
- PRZYROWSKI, R. & SCHÄFER, A. (2014): Quaternary fluvial basin of the northern Upper Rhine Graben. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (Journal of Applied and Regional Geology), **166** (1): 71-98.

- RABEDER, G. & FRISCHAUF, C. (2016): Fossile Bären in Höhlen. – In: SPÖTL, C., PLAN, L. & CHRISTIAN, E. (Hrsg.): Karst und Höhlen in Österreich. – *Denisia* 37, Kataloge des Oberösterreichisches Landesmuseums NS 177, Wissenschaftliches Beiheft zur Zeitschrift „Die Höhle“, **61**: 183-198.
- RABEDER, G., HOFREITER, M., NAGEL, D. & WITHALM, G. (2004): New Taxa of Alpine Cave Bears (Ursidae, Carnivora). – *Cahiers scientifiques du Centre de Conservation et d'Étude des Collections (Muséum d'Histoire naturelle de Lyon)/Hors Série*, **2**: 49-67.
- REIMER, P.J., BAILLIE, M. G. L., BARD, E., BAYLISS, A., BLACKWELL, P.G., BRONK RAMEY, C., BUTZIN, M., CHENG, H., EDWARDS, R.L., FRIEDRICH, M., GROOTES, P.M., GUILDERTON, T.P., HAJDAS, I., HEATON, T.J., HOGG, A.G., HUGHEN, K.A., KROMER, B., MANNING, S.W., MUSCHELER, R. et al. (2009): IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. – *Radiocarbon*, **51**: 1111-1150.
- REIMER, P.J., AUSTIN, W., BARD, E., BAYLISS, A., BLACKWELL, P.G., BRONK RAMEY, C., BUTZIN, M., CHENG, H., EDWARDS, R.L., FRIEDRICH, M., GROOTES, P.M., GUILDERTON, T.P., HAJDAS, I., HEATON, T.J., HOGG, A.G., HUGHEN, K.A., KROMER, B., MANNING, S.W., MUSCHELER, R., PALMER, J.G. et al. (2020): The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). – *Radiocarbon*, **6**: 725-757.
- ROSENDAHL, W. (2001): Zum Oberpleistozän in der hessischen Oberrheinebene - Geologie und Paläontologie (Exkursion A am 17. April 2001). – *Jahresbericht und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge*, **83**: 37-50.
- ROSENDAHL, W. & DÖPPES, D. (2006): Trace fossils from bears in caves of Germany and Austria. – *Scientific Annals, School of Geology Aristotle University of Thessaloniki, Special Volume*, **98**: 241-249.
- ROSENDAHL, W. & DÖPPES, D. (2011): Pleistocene Bear Remains from Gravel Pits of the Northern Upper Rhine Graben. – *Quaternaire, hors-série*, **4**: 117-126.
- ROSENDAHL, W. & DÖPPES, D. (2018): Tiermumien: Dino, Mammut & Co. – *Spektrum der Wissenschaft*, **9**: 40-47.
- ROSENDAHL, W. & ROSENDAHL, G. (2024): Von Löwen, Menschen und Löwen-Menschen. – In: Wiegand, H. & Rosendahl, W. (Hrsg.): *Museen, Menschen, Möglichkeiten – Festschrift für Alfred Wiczorek*. – 76-89; Oppenheim.
- SCHWEISS, D. (1988): Jungpleistozäne Sedimentation in der nördlichen Oberrheinebene im Nordteil der Oberrheinebene Paläoklimaforschung. – In: KOENIGSWALD VON, W. (Hrsg.): *Zur Paläoklimatologie des letzten Interglazials im Nordteil der Oberrheinebene*. – 19-78; Stuttgart (Gustav Fischer).
- STANTON, D.W.G., ALBERTI, F., PLOTNIKO, V., ANDROSOV, S., GRIGORIEV, S., FEDOROV, S., KOSINTSEV, P., NAGEL, D., VARTANYAN, S., BARNETT, R., ERSMARK, E., DÖPPES, D., GERMONPRÉ, M., HOFREITER, M., ROSENDAHL, W., SKOGLUND, P. & DALÉN, I. (2020): Early-Pleistocene origin and extensive intra-species diversity of the extinct cave lion. – *Scientific Reports*, **10**: 12621; doi.org/10.1038/s41598-020-69474-1.
- STILLER, M., BARYSHNIKOV G., BOCHERENS, H., GRANDAL D'ANGLADE, A., HILPERT, B., MÜNZEL, S.C., PINHASI, R., RABEDER, G., ROSENDAHL, W., TRINKAUS, E., HOFREITER, M. & KNAPP, M. (2010): Withering away – 25,000 years of genetic decline preceded cave bear extinction. – *Molecular Biology and Evolution*, **27** (5): 975-978.
- STOCK, F. & EDWARDS, C., BOLLONGINO, R., FINLAY, E., BURGER, J. & BRADLEY, D. (2009): Cytochrome b sequences of ancient cattle and wild ox support phylogenetic complexity in the ancient and modern bovine populations. – *Animal genetics*, **40**: 694-700; doi: 10.1111/j.1365-2052.2009.01905.x.
- STUART, A. J., KOSINTSEV, P. A., HIGHAM, T. F. & LISTER, A. M. (2004): Pleistocene to Holocene extinction dynamics in giant deer and woolly mammoth. – *Nature*, **431**: 684-689.
- STUART, A. J. & LISTER, M. (2007): Patterns of Late Quaternary megafaunal extinctions in Europe and northern Asia. – *Courier-Forschungsinstitut Senckenberg*, **259**: 263-287.

- STUART A.J. & LISTER A.M. (2011): Extinction chronology of the cave lion *Panthera spelaea*. – Quaternary Science Review, **30**: 2329-2340.
- VAN VUURE, C. (2005): Retracing the Aurochs - History, Morphology and Ecology of an extinct wild Ox. – 431 S., Sofia and Moscow (Pensoft Publishers).
- VALDEN, D.W. (1999): The History of British Mammals. – 305 S.; London (T & A.D. Poyser).
- ZIEGLER, R. (1994): Das Mammut (*Mammuthus primigenius* Blumenbach) von Siegsdorf bei Traunstein (Bayern) und seine Begleitfauna. – Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, **26**: 49-80.

PROF. DR. WILFRIED ROSENDAHL
Reiss-Engelhorn-Museen
Zeughaus C5
68159 Mannheim
E-Mail: wilfried.rosendahl@mannheim.de

DR. DORIS DÖPPES
Reiss-Engelhorn-Museen
Zeughaus C5
68159 Mannheim
E-Mail: doris.doeppes@mannheim.de

Manuskripteingang: 3. September 2024

Das südöstliche Rheinische Schiefergebirge im Erdaltertum (Paläozoikum) — vom tropischen Randmeer zum alpinotypen Deckengebirge

HEINER FLICK & HEINZ-DIETER NESBOR

Rheinisches Schiefergebirge, Devon/Karbon, Lahn-Dill-Gebiet, Kellerwald, Deckentektonik

Kurzfassung: Zur Entwicklung der variszischen Orogenese in Mitteleuropa gehört ein alpinotyper Deckenbau im Rhenohercynikum. Dieser konnte im Teilbereich des Rheinischen Schiefergebirges in dessen Südosten (Lahn-Dill-Gebiet und Kellerwald) im Laufe der letzten Jahrzehnte erfasst werden. Dabei handelt es sich um drei Deckensysteme unterschiedlicher Herkunft und Überschiebungsweite, die z. T. intensiv ineinander verschuppt sind. Zwei davon haben ihre Wurzel auf der Süd- bzw. Nordseite des Rheischen Ozeans. Deren Transport führte im weiteren Verlauf im Lahn-Dill-Gebiet lokal zu kleinräumigen Deckenüberschiebungen auch im Autochthon, immerhin z. T. noch im Kilometermaßstab. Die bisher erfassbaren Decken werden vorgestellt.

The southeastern Rhenish Massif during the Palaeozoic — development from a tropical realm to alpine-type nappe tectonics

Rhenish Massif, Devonian/Carboniferous, Lahn-Dill area, Kellerwald, alpine type nappe tectonics

Abstract: Alpine-type nappe tectonics have been recognized within the Rhenohercynian Zone of the Variscan Orogen of Central Europe for quite some time now. In the course of the last few decades the same tectonic development could be worked out for the Lahn-Dill and Kellerwald areas within the Rhenish Massif (Rheinisches Schiefergebirge). Here, three groups of regional nappes can be recognized, exhibiting different source areas and different reach of thrusting, often accompanied by intense internal imbrication. For two of these nappe piles the source area has been located at the southern and the northern flanks of the Rheic Ocean, respectively. Within the autochthonous units of the Lahn-Dill area additional local thrusting of the order of a few kilometers followed in the wake of the emplacement of the regional nappes. In this paper, the different nappes – so far identified – of these three groups are described.

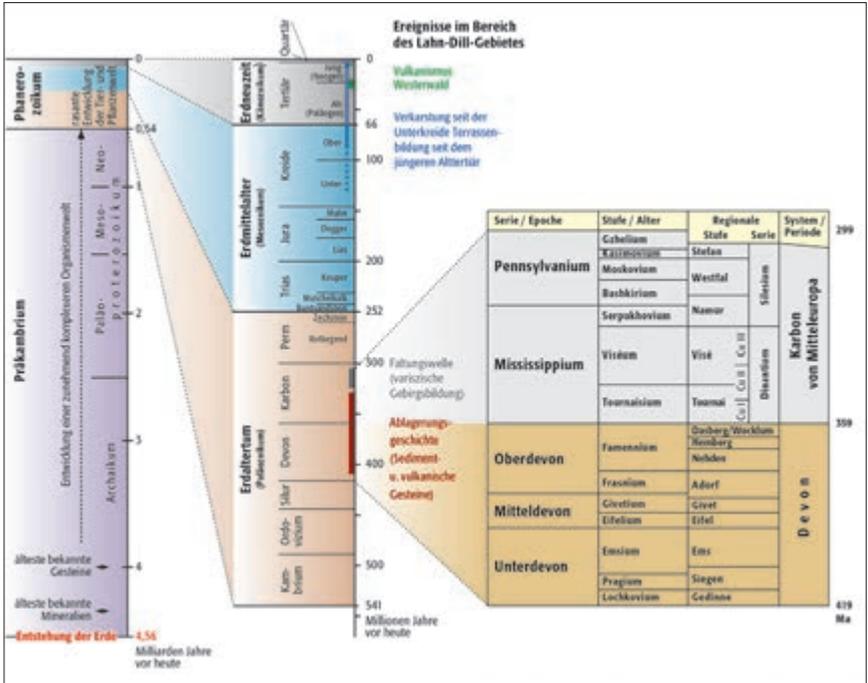
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	78
2	Abriss der Ablagerungsgeschichte im Autochthon	83
3	Variskische Gebirgsbildung – Transport tektonischer Decken in das Rheinische Schiefergebirge	90
4	Decken im südöstlichen Rheinischen Schiefergebirge	91
4.1	Armorikanische Decken	93
4.1.1	Gießen-Decke	93
4.1.2	Hörre-Decke	95

4.1.3 Steinhorn-Decke 96
 4.1.4 Lindener-Mark-Decke 97
 4.1.5 Lohra-Decke 97
 4.2 Rhenoharzynische Decken 97
 4.2.1 Kammquarzit-Decke 99
 4.2.2 Bicken-Ense-Decke 100
 4.2.3 Wildstein-Decke 100
 4.2.4 Frankenbach-Decke 100
 4.3 Parautochthone Decken 101
 4.3.1 Hohensolms-Decke 102
 4.3.2 Asslar-Decke 102
 5 Resumé 103
 6 Danksagung 104
 7 Literatur 105

1 Einleitung

Das Rheinische Schiefergebirge umfasst im variskischen Grundgebirge als Teil der Rhenoharzynischen Zone (Benennung von KOSSMAT 1927) eine Abfolge, die wei-



testgehend während der Unterdevon- bis Unterkarbonzeit abgelagert wurde (Abb. 1). Die heutige Geländeoberfläche wird dabei großflächig von den Sedimentfolgen des Unterdevons eingenommen. Der auflagernde jüngere Schichtstapel wurde weitgehend abgetragen, so dass dieser ab dem Mitteldevon – bedingt durch den nach Nordosten abtauchenden Faltenbau – vor allem in den nördlichen bis östlichen Randbereichen erhalten geblieben ist (Abb. 2). Hierzu gehört im Südosten des Rheinischen Schiefergebirges das Lahn-Dill-Gebiet (Abb. 3), das als geologische Struktureinheit aus den landeskundlichen Regionen von Taunus und Westerwald herausgeschnitten wurde. Dies steht in Zusammenhang mit Bergbau-

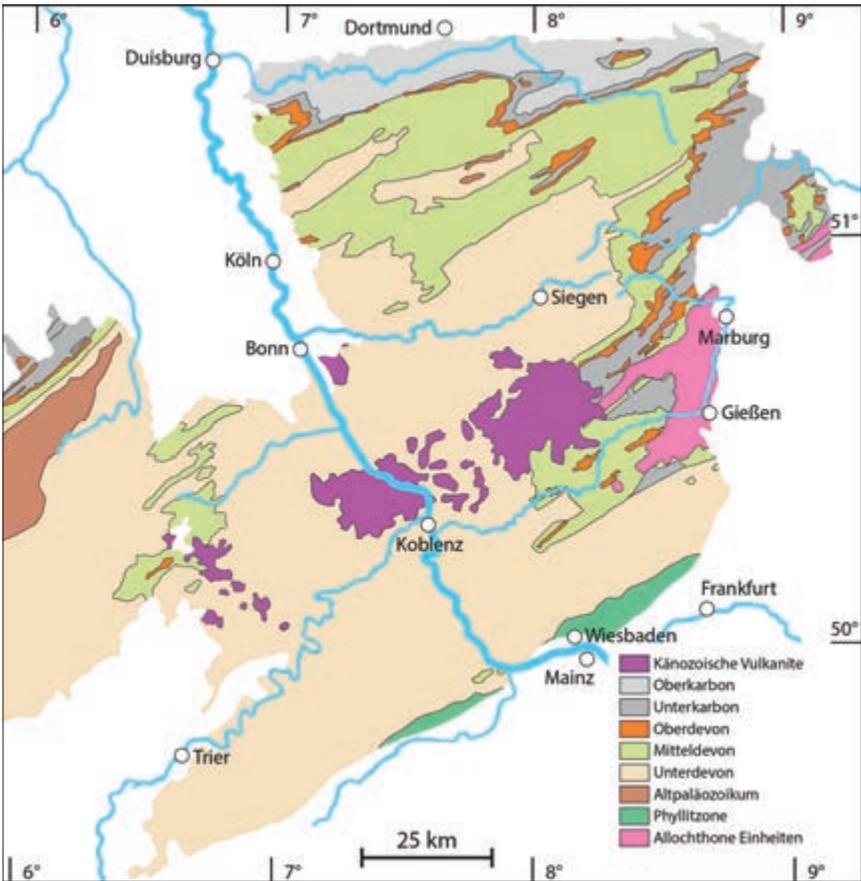


Abbildung 2: Geologische Karte des Rheinischen Schiefergebirges (aus H. FLICK 2013).

Figure 2: Geological map of the Rhenish Massif (from H. FLICK 2013).

← Abbildung 1: Erdgeschichtliche Tabelle mit Auszug für Devon und Karbon (aus H. FLICK 2020).
 Figure 1: Stratigr. column with window of the Devonian and Carboniferous (from H. FLICK 2020).

Geologie des Lahn–Dill-Gebietes

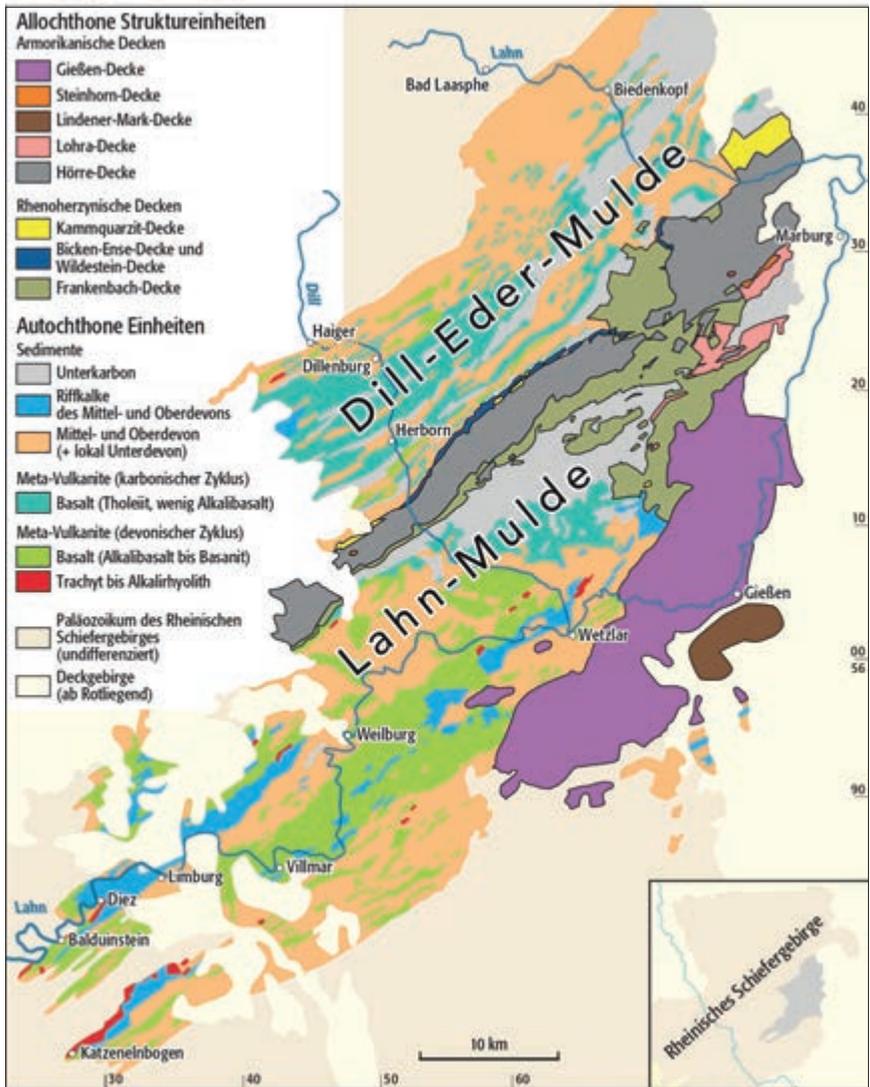


Abbildung 3: Geologische Karte des Lahn-Dill-Gebietes (aus H. FLICK & NESBOR 2021a).

Figure 3: Geological map of the Lahn-Dill area (from H. FLICK & NESBOR 2021a).

aktivitäten mit dem Schwerpunkt der als Lahn-Dill-Typ bezeichneten Eisenerze, die ihre Fortsetzung im Kellerwald finden (Abb.4). Seit BECHER (1789) ist dieses Gebiet geowissenschaftlich in zunehmender Intensität bearbeitet worden. Ausgehend von einer bis vor etwa 50 Jahren ortsständigen (autochthonen) Interpretati-

on der Gesteinseinheiten haben seitdem Ungereimtheiten innerhalb der in diesem Raum auftretenden Abfolgen zu einem Umdenken geführt. In der Folge wurde dieses fixistische Weltbild zunehmend durch ein mobilistisches, aus den Erkenntnissen der Plattentektonik entwickeltes Modell abgelöst. Der daraus zu folgernde Anteil von ortsfremden (allochthonen) Einheiten, d. h. tektonischer Decken, ist in

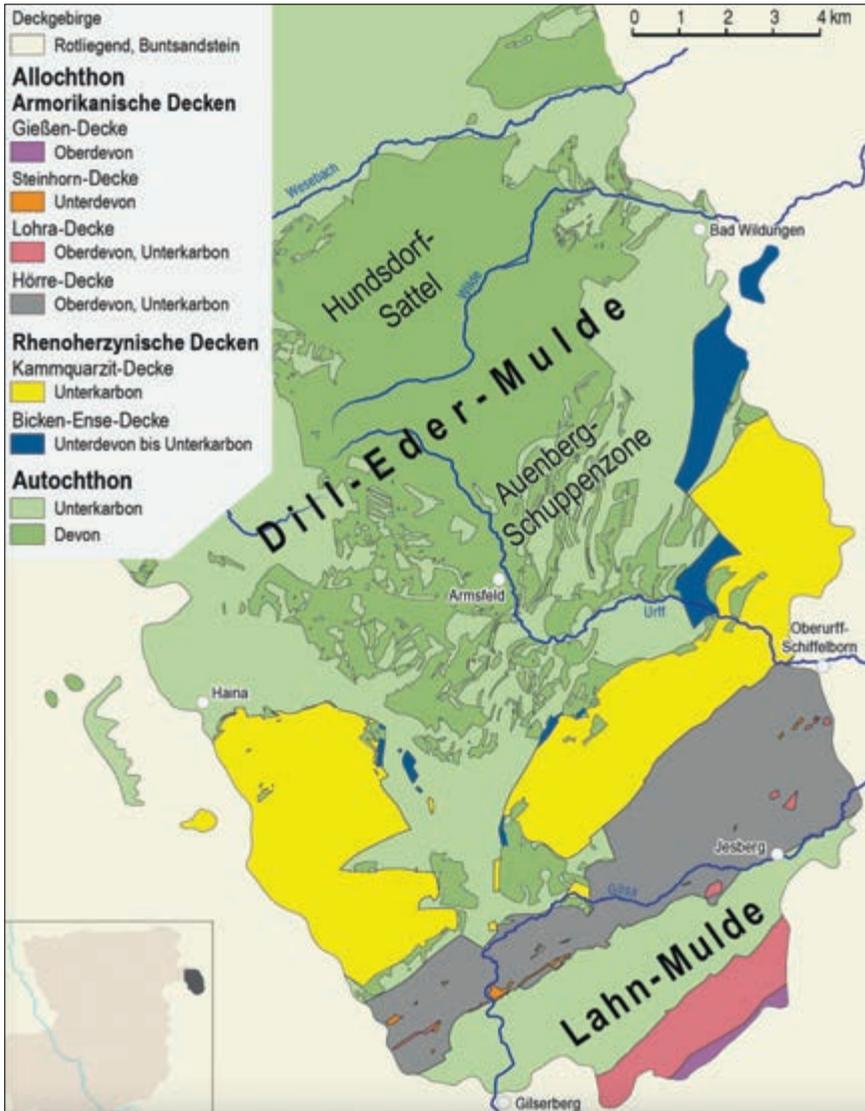


Abbildung 4: Geologische Karte des Kellerwaldes (aus H. FLICK & NESBOR 2021b).
 Figure 4: Geological map of the Kellerwald (from H. FLICK & NESBOR 2021b).



Abbildung 5: Autochthon und Allochthon im Lahn-Dill-Gebiet und Kellerwald.
Figure 5: Autochthonous and allochthonous areas in the Lahn-Dill area and the Kellerwald.

den letzten Jahren bestätigt und erweitert worden (vgl. NESBOR 2021), so dass es folgerichtig ist, in der Darstellung von Lahn-Dill-Gebiet und Kellerwald Autochthon und Allochthon zu unterscheiden (Abb. 5) (s. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: Geologie von Hessen 2021).

2 Abriss der Ablagerungsgeschichte im Autochthon

Lahn-Dill-Gebiet und Kellerwald sind als Teil des Rheinischen Schiefergebirges auch Teil der Rhenoherzynischen Zone im Variskischen Gebirge, das im Laufe der Karbon-Zeit entstanden war. Sie gehören damit zum Mikrokontinent (Terran) Avalonia, der sich im frühen Ordovizium (zur stratigraphischen Abfolge s. Tabelle in Abb. 1) vom Südkontinent Gondwana gelöst hatte und unabhängig von weiteren Mikrokontinenten in deren Vorfeld nach Norden gedriftet ist. Dadurch öffnete sich der Rheische Ozean (benannt nach der Titanin Rhea aus der griechischen Mythologie) mit einer Breite bis schätzungsweise 4.000 km (NANCE et al. 2010, 2012). Im frühen Silur vereinigte sich Avalonia mit dem Kontinent Baltika (Nordeuropa). Zusammen kollidierten beide im späten Silur bis frühen Devon mit Laurentia (bestehend aus Nordamerika und Grönland), wodurch an der Nahtstelle der beiden Kontinente das Kaledonische Gebirge entstand. Dabei entstand der Großkontinent Laurussia (= Old-Red-Kontinent). Für die weitere Entwicklung der Rhenoherzynischen Zone bzw. des Rheinischen Schiefergebirges war der avalonische Krustenanteil am Südrand von Laurussia bestimmend (ausführliche Literaturangaben bei NESBOR 2021).

Bereits im Silur entwickelte sich an dessen Südrand eine Subduktionszone, über der sich ein vulkanischer Bogen bildete mit einer intensiven magmatischen Tätigkeit. Subduktionszonen sind Regionen auf der Erde, in denen die schwere basaltische Ozeankruste unter die leichtere kontinentale Kruste abtaucht. Das mit dem subduzierten Ozeanboden in großen Mengen in den heißen Erdmantel gelangte Meerwasser begünstigt die Bildung von Magma, das an die Erdoberfläche aufsteigt und zu intensivem Vulkanismus führt.

Die am Südrand von Laurussia geförderten vulkanischen Produkte sind in die späteren Sedimentfolge immer wieder eingeschaltet. Hierzu gehören die sog. Porphyroide, die innerhalb der unterdevonischen Sedimente großflächig verbreitet sind. Die mineralogische und geochemische Zusammensetzung dieser vulkanischen Gesteine (Andesite bis Rhyolithe) entspricht der aus jungen Vulkangebieten, wie sie verbreitet rund um den Pazifik, im sog. Pazifischen Feuerring, zu finden sind (VON RAUMER et al. 2017). Mit dem steilen Abtauchen der ozeanischen Kruste des Rheischen Ozeans war eine Dehnung in dessen kontinentalen Vorland verbunden, wodurch sich dort das Rhenoherzynische back arc-Becken öffnete (Abb. 6) und sich der Südteil von Avalonia, den magmatischen Bogen einschließend, zunehmend abtrennte (NESBOR 2019, 2021). Diese Aufspaltung in Nord- und Süd-Avalonia schritt über die gesamte Devon-Zeit fort, wobei sich weiter im Westen ein kleinerer Bereich ozeanischer Kruste öffnete – der Lizard-Ozean. Diesen Relikte sind ganz im Südwesten Englands aufgeschlossen. Ein vergleichbarer geotektonischer Vorgang findet zurzeit in Südost-Asien im Bereich von Japan statt. Vereinfacht gesagt ist dort über einer Subduktionszone, in der die pazifische Ozeanplatte unter die asiatische Kontinentalplatte abtaucht, ein vulkanischer Bo-

gen aktiv. Hinter diesem hat sich durch Dehnungsprozesse die Japan-See geöffnet (back arc-Becken), deren Boden bereits überwiegend aus ozeanischer Kruste besteht.

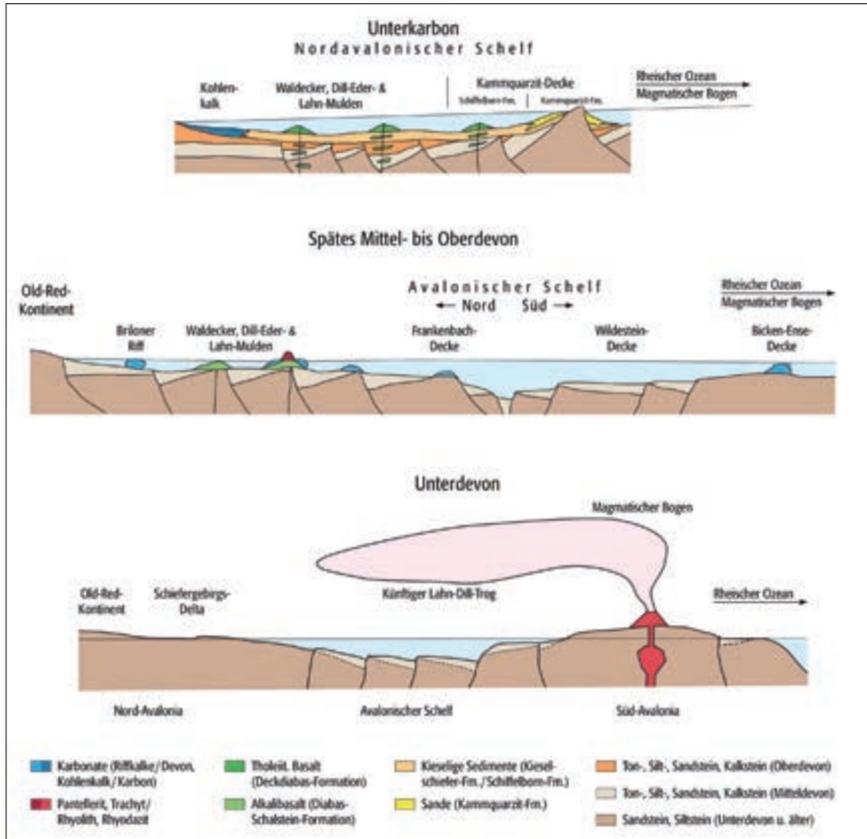


Abbildung 6: Tektonische Entwicklung des östlichen Rheinischen Schiefergebirges von Devon bis Unterkarbon (schematisch ohne Maßstab) (oben und Mitte: aus NESBOR 2019, Abb. 6 bzw. Abb. 9, verändert).

Figure 6: Tectonic evolution of the eastern Rhenish Massif from the Devonian to the Lower Carboniferous (schematic without scale) (above and center: from NESBOR 2019, figure 6 and figure 9 respectively, modified).

Die starke Dehnung des sich öffnenden Rhenohertzynischen Beckens führte zu einer zunehmenden Ausdünnung der avalonischen Kruste, die wiederum mit einer starken Absenkung des Beckens einherging. Hierdurch wurde im Laufe des Unterdevons Raum für die Aufnahme und Akkumulation von bis zu 10.000 m Sediment geschaffen, das ein aus nördlicher Richtung vom Old-Red-Kontinent gespeistes Delta – vergleichbar in der Größe mit dem heutigen Mississippidelta –

lieferte (STETS & SCHÄFER 2002, 2011). Zusätzlich fand bis zur Mitte des Unterdevons ein Sedimenteintrag aus südlicher Richtung statt. Die zum Teil sehr reinen Quarzsande wurden am Nordrand Süd-Avalonias im Brandungsbereich aufbereitet und nach Norden in das Rhenoherynische Becken bis in die Nordflanke dieser Senkungsstruktur transportiert. Heute bilden diese ehemaligen Strandablagerungen das prominenteste Schichtglied des Hochtaunus, den Taunusquarzit. Durch die zunehmende Entfernung Süd-Avalonias aufgrund der fortschreitenden Krustendehnung konnten danach Sedimentschüttungen aus südlicher Richtung die Beckenachse nicht mehr überschreiten und fehlen daher im jüngeren Schichtenstapel des Rheinischen Schiefergebirges.

Im späten Unterdevon führte das Nachlassen der Sedimentanlieferung vom Old-Red-Kontinent zur Rückverlagerung des Deltas, wobei gleichzeitig das Meer durch einen Meeresspiegelanstieg nach Norden auf den Kontinent vorrückte (Transgression). Mit dieser Veränderung ging eine durchgehend feinkörnige Sedimentation (Tone und Silte) einher. Deren bekannteste Einheit sind die im gesamten Rhenoherynikum auftretenden, leicht carbonatischen Tonsteine vom Typ der Wissenbacher Schiefer (benannt nach dem Ort Wissenbach am Nordwestrand des Dillgebietes) aus dem Unteren Mitteldevon (Eifelium). Deren Sedimenteintrag wurde verschiedentlich durch sandige Schüttungen von Norden her unterbrochen. Sie haben auch das nordwestliche Lahn-Dill-Gebiet erreicht und sind wie der sogenannte Eifelquarzit im südwestlichen Dill-Gebiet aus dem Oberen Eifelium bekannt.

Mit dem Einsetzen der Wissenbacher Schiefer wird das Lahn-Dill-Gebiet (s. Abb. 3) als geologische Einheit im Süden vom Taunus und im Norden vom Siegerland abgegrenzt. In dessen Fortsetzung nach Nordosten bildet die Sackpfeifen-Überschiebung die Grenze. In Fortsetzung des Lahn-Dill-Gebietes bildet der Kellerwald einen auf der West-, Süd- und Ostseite vom nachvariskischen Deckgebirge eingefassten Sporn des Rheinischen Schiefergebirges (s. Abb. 2). In dessen Nordwesten rechnet die vom Hundsdorfer Sattel in der Fortsetzung der Sackpfeifen-Überschiebung überschobene Wittgensteiner Mulde nicht mehr zum Kellerwald.

Im tieferen oberen Mitteldevon (Givetium) wurden große submarine Rutschmassen innerhalb des Flachmeeres abgelagert, die aus einem bunten Spektrum an Geröllkomponenten bestehen und vom südwestlichen Dill-Gebiet bis in die mittlere Lahnmulde zu verfolgen sind (Uebernthal- bzw. Daberg-Formation). Sie stammen von lokal entstandenen Inseln, deren übersteilte Flanken instabil wurden und ins Rutschen kamen (SALAMON 2003). Grund dafür waren weitere Dehnungsvorgänge, einhergehend mit einer tektonischen Zerblockung des Untergrunds und Verkippung der entstandenen Schollen.

Diese tektonischen Vorgänge lösten einen intensiven Vulkanismus aus, der vom späten Mitteldevon bis zum frühen Oberdevon seinen Schwerpunkt hatte. Während die oben beschriebene, auf dem vulkanischen Bogen aktive vulkani-

sche Tätigkeit an Plattenränder gebunden war, fanden die vulkanischen Eruptionen nun innerhalb der Platte in einem der Dehnung unterliegenden Becken (s. Abb. 6) statt (Intraplatten-Vulkanismus). Entsprechend unterschieden sich seine Produkte mineralogisch und geochemisch grundlegend. Untergeordnet wurden Kieselsäure-reiche Gesteinsschmelzen, vorrangig jedoch Kieselsäure-arme alkalibasaltische Magmen gefördert (NESBOR 2004). Solch eine als bimodaler Vulkanismus bezeichnete Dualität ist, zusammen mit der weiter unten beschriebenen vulkanischen Spätphase, in jungen Intraplatten-Vulkangebieten weit verbreitet (z. B. Rhön, Vogelsberg, Kanarische Inseln, etc.).

Die nach Ablagerung im submarinen Milieu einsetzende Diagenese führte durch mineralogische Umsetzungen zu einer Vergrünung, aus dem basaltischen Ausgangsgestein wurde ein Diabas. Die intensiven magmatischen Aktivitäten ließen große, sich gegenseitig überschneidende submarine Vulkankomplexe entstehen, die nur selten die Meeresoberfläche überragten (NESBOR et al. 1993; KÖNIGSHOF et al. 2010). Neben Lavaströmen – oft als Kissenlava (Pillowlava) entwickelt – bildeten sich während des submarinen Fließens der Lava große Mengen sog. Pillowfragment-Brekzien, die sich aus Pillowbruchstücken und Partikeln aus basaltischem Glas zusammensetzen. Dazu kommen weitere Vulkaniklastit-Typen unterschiedlicher Entstehung. Infolge der Schieferung während der weiter unten beschriebenen Gebirgsbildung erhielten diese vulkanischen Ablagerungen ein plattig-schaliges Aussehen und wurden daher von den nassauischen Bergleuten als Schalstein bezeichnet.

Die unmittelbar nach Ablagerung einsetzende submarine Verwitterung im Schalstein betraf besonders die wenig stabilen vulkanischen Gläser. Gleichzeitig führten Setzungsprozesse der schnell in großer Mächtigkeit abgelagerten Abfolge zum Aufstieg des aufgeheizten, zwischen den vulkanischen Partikeln eingeschlossenen Porenwassers. Bei dieser raschen Entglasung der Partikel wurden vor allem Silizium, Eisen und Kalzium freigesetzt und mit nach oben zum Meeresboden transportiert (H. FLICK et al. 1990). Beim Eintritt der mineralbeladenen Lösungen in das Sauerstoff-reiche Meerwasser wurden die mitgeführten Stoffe oxidiert und als roter Erzschlamm auf dem Meeresboden ausgefällt. Diese als Lahn-Dill-Typ bezeichneten kieseligen bis carbonatischen Eisenerze wurden im sogenannten Grenzlager abgebaut, in dem etwa am Übergang vom Mittel- zum Oberdevon aufgrund einer längeren Unterbrechung oder dem Ende der vulkanischen Aktivitäten wirtschaftlich gewinnbare Mächtigkeiten erreicht worden waren.

Den mengenmäßig untergeordneten Anteil am bimodalen Vulkanismus bildeten trachytische bis alkalirhyolithische Magmen, deren Produkte unter dem nicht mehr gebräuchlichen Namen „Keratophyr bzw. Quarzkeratophyr“ bekannt geworden sind. Bei letzterem handelt es sich um sog. Pantellerite, die für ein sich öffnendes Becken (Rifting) typisch sind (NESBOR 2024). Diese Schmelzen schufen vor allem Inseln auf einem vorwiegend basaltischen Unterbau. Da sie dort einer entsprechend starken Erosion ausgesetzt waren, sind in besonderem Maße

ihre Abtragungsprodukte verbreitet. Die Hauptphase des devonischen Intraplatten-Vulkanismus im Lahn-Dill-Becken endete im tiefen Oberdevon. Nach einer Pause setzte im höheren Oberdevon die vulkanische Tätigkeit mit der schwächeren Spätphase erneut ein.

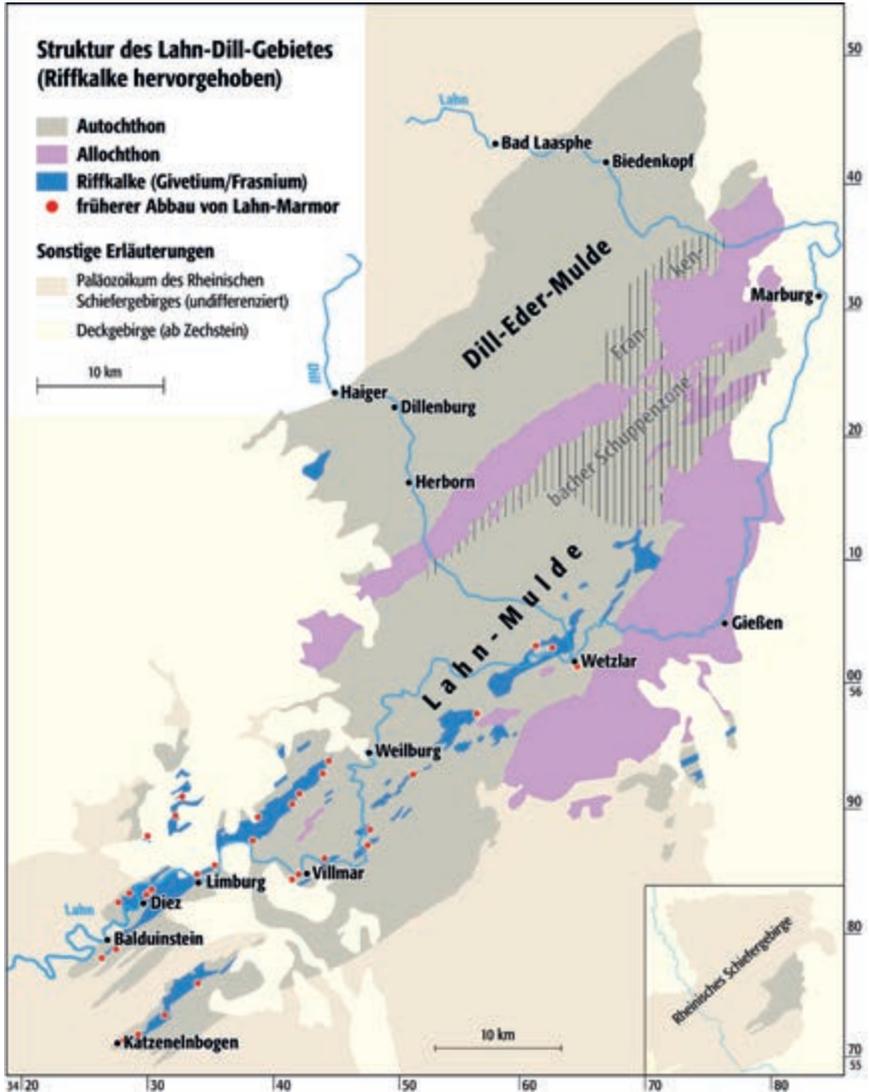


Abbildung 7: Die devonischen Riffkalke im Lahn-Dill-Gebiet, Abbaustellen für Lahnmarmor markiert (aus H. FLICK 2020).
Figure 7: Devonian reef limestones in the Lahn-Dill area, excavation sites for dimension stones (Lahn Marble) marked (from H. FLICK 2020).

Ab dem mittleren Givetium hatte der Vulkanismus im Lahn-Dill-Gebiet durch entsprechende Untiefen die Voraussetzungen für den lokalen Aufbau von Korallen-Stromatoporen-Riffen geschaffen (Abb. 7), wie sie sich bereits in größerem Umfang als Saumriffe vor den Küsten des Old-Red-Kontinentes entwickelt hatten (s. H. FLICK 2020), dort aber bereits im frühen Givetium eingesetzt hatten (Löw et al. 2022). Vulkanische Aktivitäten konnten dabei immer wieder zu Unterbrechungen im Riffwachstum führen (s. KÖNIGSHOF & H. FLICK 2023). Längere Pausen in den vulkanischen Aktivitäten ließen schon im Givetium mächtigere Riffe wachsen (z. B. das Unica-Riff in Villmar, s. KÖNIGSHOF 2007). Die bedeutsamere Riffentwicklung erfolgte im unteren Oberdevon wie die Vorkommen z. B. bei Hahnstätten oder Wirbelau in der Lahn-Mulde (s. KÖNIGSHOF 2007) oder das einzige Riff in der Dill-Eder-Mulde bei Herborn (KREBS 1966) zeigen. Zum Ende des Frasnium brachten spätestens die zwei sog. Kellwasser-Ereignisse – benannt nach einer Lokalität im Harz – das Riffwachstum weltweit zum Absterben. Damit gingen Sauerstoff-freie (euxinische) Bedingungen einher, die den größten Teil des marinen Lebens vernichteten. Die nach ihrem Erscheinungsbild als Massenkalk bezeichneten Riffkalle standen in der Lahn-Mulde aufgrund ihrer Vielfalt in Struktur und Farbentwicklung in zahlreichen kleineren Brüchen bis Anfang der 70er-Jahre des letzten Jahrhunderts als Nassauer oder Lahnmarmor in Abbau. Unter entsprechend vielen Lokalitätsbezeichnungen hat er über Deutschland hinaus Abnehmer gefunden (BECKER & KIRNBAUER 1998; KIRNBAUER 2008; BECKER & WABEL 2021).

Zerblockung, Vulkanismus und Riffentwicklung hatten den Meeresraum zergliedert und strukturiert, was sich im tiefen Oberdevon in eher kleinräumigen unterschiedlichen Ablagerungen spiegelt, wie plattigem Kalkstein (sog. Cephalopodenkalk), Tonschiefer, Sandstein, Kieselschiefer und dem Abtragungsschutt von bevorzugt trachytischen Vulkaninseln. Im weiteren Verlauf des Oberdevons (Famennium) glich sich das Relief allmählich aus, wobei die verbreitete bekannte Rotfärbung der feinklastischen Sedimente in den Beckenbereichen, neben Sandsteinhorizonten, den weiteren Einfluss des Old-Red-Kontinents anzeigt. Die Zufuhr ließ im hohen Famennium erheblich nach, so dass in der Wocklum-Stufe (s. Abb. 1) vor allem mit Tonschiefern ein unmerklicher Übergang zum Unterkarbon erfolgte.

Zuvor war es im höheren Famennium nach längerer Unterbrechung des Vulkanismus lokal zu der für Intraplatten-Vulkangebiete typischen, sog. primitiven Spätphase gekommen (NESBOR 2004). Als primitive Magmen werden solche bezeichnet, die sehr schnell (oft innerhalb weniger Stunden) unmittelbar aus dem Erdmantel aufsteigen und daher unverändert (primitiv) sind. Sie führen oft Bruchstücke aus dem Erdmantel mit und ermöglichen damit Einblicke in dessen mineralogische sowie geochemische Zusammensetzung.

Das Unterkarbon brachte mit einer zunehmenden Verringerung der Materialzufuhr von Norden her einen Umschwung in der Ablagerungsdynamik. So wird

das Tournaisium bis tiefe Viséum zunächst von kieseligen Schwarz- und Alaun-schiefern dominiert, die geringe bis fehlende Sauerstoffgehalte belegen, gefolgt von Ablagerungen, die vor allem aus den Skeletten abgestorbener Kieselalgen bestehen. Diese sog. Kulm-Kieselschiefer spiegeln eine extrem geringe Sedimentationsrate wider, die nur wenige Millimeter pro 1000 Jahre betrug. Die Sedimentzufuhr aus dem nördlichen Hinterland (Laurussia) kam damit fast völlig zum Erliegen. Nur lokal sind bis zu drei Kalksteinhorizonte eingeschaltet, die unter der Bezeichnung Erdbacher Kalke bekannt gemacht worden sind (KREBS 1966).

Die Ablagerung der Kulm-Kieselschiefer wurde von erneuten vulkanischen Aktivitäten begleitet. Ihr Ausmaß steht dem devonischen Vulkanismus nicht nach und ist Anzeichen für erneut stärkere Dehnungsbewegungen im Rhenoherynischen back arc-Becken. Gefördert wurden subalkalische, sog. Tholeiitische Basalte, die im submarinen Milieu mächtige Vulkangebäude aus meist Pillowlaven schufen. Da sie durch das umgebende Meerwasser rasch verwittert wurden, fanden entsprechend Stoffverschiebungen wie im Mitteldevon statt. Diese führten durch damit verbundene Mineralneubildungen ebenfalls zu einer Grünfärbung des Gesteins sowie zur Abscheidung vorzugsweise roter Eisenkiesel. Sie bilden heute verwitterungsresistente Klippen und Blöcke, die im Gelände z. T. eine Trennung der verschiedenen Lavaströme ermöglichen. Der geringe Eisengehalt der Eisenkiesel reichte meist jedoch nicht für Bergbauaktivitäten aus (LIPPERT 1970). Erste vulkanische Aktivitäten sind aus dem tiefen Tournaisium (Unterkarbon 1) bekannt (BUGGISCH et al. 1981). Analog zum Devon gab es auch im Unterkarbon eine unbedeutende vulkanische Nachphase mit primitiven Schmelzen, die zahlreiche Bruchstücke aus dem Erdmantel mitbrachten (NESBOR 1997, 2004).

Im höheren Unterkarbon (mittleres bis oberes Viséum, s. Abb. 1) erfolgte nunmehr eine Sedimentzufuhr von Süden mit der Schüttung von Grauwacken. Das sind Gesteine mit einem Korngrößenspektrum von Kiesen (lokal) über Sande (hauptsächlich) bis zu Tonen, die in subaquatischen Sedimentströmen als sog. Turbidite mit entsprechend charakteristischen Sedimentgefügen abgelagert wurden. Ihre Komponenten bestehen neben den vorherrschenden Quarzkörnern aus unterschiedlichen Gesteinsbruchstücken, die eine unzureichende Aufarbeitung des an die Küste gelieferten Materials belegen (Unterschied zum Taunus-Quarzit, s. oben) und Rückschlüsse auf ihre Herkunft erlauben. Solche Sedimente sind typisch für Gebirgsbildungsvorgänge und werden weltweit als Flysch bezeichnet. Im Rheinischen Schiefergebirge sind die von Süden geschütteten Grauwacken ein Beleg für die Schließung des Rheischen Ozeans und die Ankündigung der variskischen Gebirgsbildung (Orogenese). Diese Sedimententwicklung wird nach Norden zu jünger und geht am Nordrand des Rheinischen Schiefergebirge im inzwischen weitgehend zum Unterkarbon gerechneten Namurium (s. Abb. 1), dem sogenannten Flözleeren, in das sog. Molassestadium über. Die mit einer schwachen Metamorphose einhergehende Deformation durchlief den Raum des Rheinischen Schiefergebirges vor 325–305 Mio. Jahren (AHRENDT et al. 1978, 1983).

3 Variskische Gebirgsbildung — Transport tektonischer Decken in das Rheinische Schiefergebirge

Im Verlauf von Devon und Unterkarbon wurde die den Rheischen Ozean bildende ozeanische Platte subduziert und dieser damit geschlossen, wie die Flyschsedimente anzeigen (s. oben). Im Fortgang dieser Bewegung kam es zur als variskische Gebirgsbildung bezeichneten Kontinent/Kontinent-Kollision zwischen Laurussia und Gondwana unter Einschluss des zwischenliegenden Armorikanischen Terran-Ensembles. Dabei entstand der etwa von Nord- bis Südpol reichende Pangaea genannte Großkontinent. Vergleichbare Vorgänge haben Alpen und Himalaja gebildet.

Mit der Kollision ging eine erhebliche Verkürzung und damit gleichzeitig eine entsprechende Verdickung der Kruste einher. Dieses äußerte sich in größerer Tiefe in plastischer Verformung und daran gebundene Metamorphose, d. h. durch Mineralneubildungen Umwandlung in neue Gesteine. In geringerer Tiefe, im oberen Stockwerk, reagierten die Gesteinspakete starrer mit Faltung-, Verschuppung- und schließlich Deckenbildung auf die Krustenverkürzung. Diese z. B. aus den Alpen bekannten Vorgänge lassen sich auch in der Rheinoherzynischen Zone des Variskischen Gebirges eindrucksvoll belegen.

Bei der Kollision wurde Laurussia sukzessiv vom Armorikanischen Terran-Ensemble überfahren, indem dessen oberes Stockwerk abgeschert, dabei extrem gefaltet (alpinotyper Faltenbau), zerbrochen und (wie Eisschollen) als sog. Tektonische Decken vom Untergrund gelöst zunächst auf Südavalonia überschoben wurde (Armorikanische Decken). In fortgesetzter Bewegung wurden auch dort Gesteinspakete abgeschert und beim Überfahren von Nordavalonia mitgenommen (Rheinoherzynische Decken). Hierbei wurden diese Decken in die Deformation des autochthonen Untergrundes einbezogen mit der Folge interner Verschuppung sowie kleinräumiger lokaler Deckenüberschiebungen (Parautochthone Decken).

Als Folge dieser Prozesse unterscheiden sich die Gesteinseinheiten der Decken nicht nur in einer abweichenden faziellen Entwicklung von dem unterlagernden Autochthon, sondern auch in ihrem andersartigen tektonischen Baustil. Während im Autochthon ein weiträumiger Falten- und Schuppenbau vorherrscht, sind die Deckeneinheiten durch eine kleinteilige, besonders intensive Deformation gekennzeichnet. Schon im Kartenbild sind deren unregelmäßige Umrisse und das Auftreten tektonischer Fenster und Klippen auffällig (s. Abb. 9 u. 10). Vor der sich nach Norden bewegendes Deckenfront entwickelten sich Flysch-Becken, die die turbiditisch transportierten Kulm-Grauwacken aufnahmen (Abb. 8a). Beim Vorranschreiten der Decken wurde dieser Flysch selbst wiederum überfahren. Im Zuge der weiteren tektonischen Einengung entstand ein ausgeprägter Schuppenbau, und die Gesteinseinheiten wurden in unterschiedlichem Maße steil gestellt. Infolgedessen entstanden als weiteres tektonisches Element spätvariskische Auf-

schiebungen, an denen die liegenden Deckeneinheiten und sogar das unterlagernde Autochthon jeweils auf die jüngeren Decken aufgeschoben wurden (Abb. 8b).

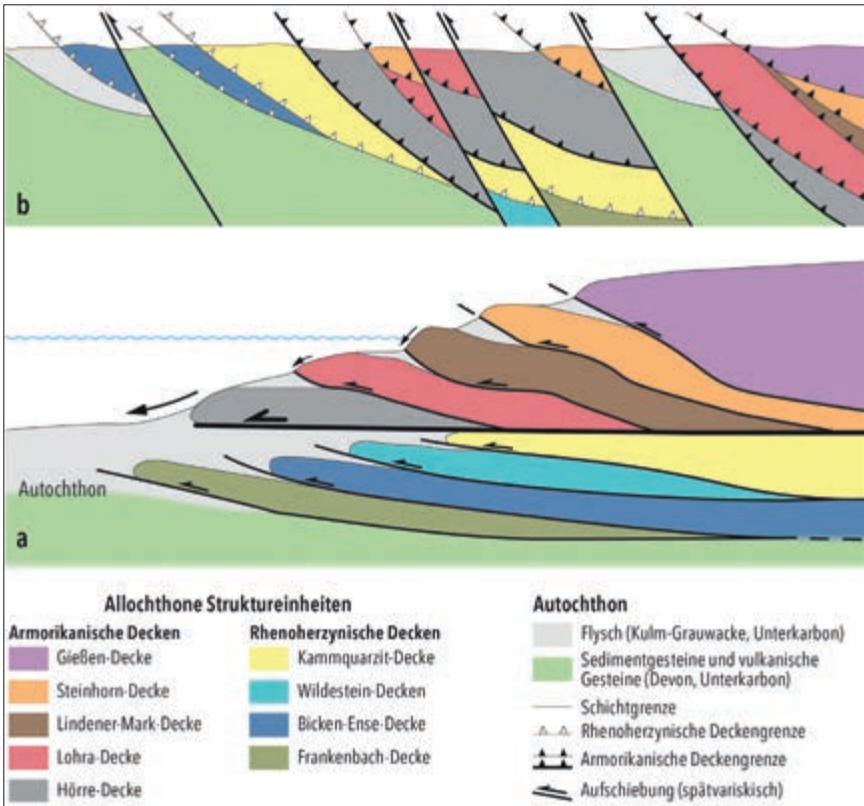


Abbildung 8: Abfolge des Rhenohercynischen und des Armorikanischen Deckenstapels im Lahn-Dill-Gebiet und im Kellerwald. **a:** Unmittelbar nach der Platznahme der Decken. **b:** In einem späten Stadium nach weiterer Einengung. Frankenbach-, Wildestein- und Lindener-Mark-Decke sind im Kellerwald nicht aufgeschlossen (aus NESBOR 2019).

Figure 8: Succession of the Rhenohercynian and Armorican nappe stacks in the Lahn-Dill area and in the Kellerwald. **a:** directly after thrusting. **b:** at a later phase after further compression. Frankenbach-, Wildestein- und Lindener-Mark nappes are not exposed in the Kellerwald area (from NESBOR 2019).

4 Decken im südöstlichen Rheinischen Schiefergebirge

Die Erkenntnis deckentektonischer Prozesse in Faltengebirgen hat vielerorts sehr lange gebraucht, sich durchzusetzen. Das gilt besonders für das mitteleuropäische Variszikum. Entsprechendes hatte schon KOSSMAT (1927) bei seiner Zonengliederung angesprochen, ist damit aber ohne Resonanz geblieben.

Im Südosten des Rheinischen Schiefergebirges führten schon länger Ungereimtheiten in dessen Schichtenfolge zu Diskussionen. Das betraf vor allem den ursprünglich als Sattelstruktur verstandenen Raum der Hörre-Zone mit bereits oberdevonischen Grauwacken und gleichzeitig fehlendem Vulkanismus im Unterschied zu gleichaltrigen Ablagerungen der angrenzenden Lahn- und Dill-Eder-Mulden. Als markantestes Glied der Hörre-Zone galt der Kammquarzit, der von der Hörre über Kellerwald und Oberharz bis nach Gommern (im Flechtinger Höhenzug) bei Magdeburg anzutreffen ist und jeweils eigene Regionalnamen bekommen hatte. Dass dessen Sedimentmaterial von Baltika herzuleiten war (HOMRIGHAUSEN 1979), war nicht problematisch, solange alle Ablagerungen im Rheinischen Schiefergebirge autochthon gedeutet wurden.

Erstmals konkrete Belege für eine Deckentektonik im Rheinischen Schiefergebirge erbrachten Untersuchungen aus Göttingen zur Gießener Grauwacke. Diese umfassten strukturelle Hinweise durch flache diskordante Überlagerung oder nicht in den umliegenden tektonischen Baustil passende liegende Falten (EDER et al. 1977; AHRENDT et al. 1977; ENGEL et al. 1983; BIRKELBACH et al. 1988). Dazu kamen im damals schon bekannten älteren Nordteil – jetzt als Ältere Gießen-Decke bezeichnet (H. FLICK & NESBOR 2021) – mit Datierungen der Grauwacke aus dem Frasnium (damals Adorf-Stufe) durch HENNINGSSEN (1966) und WITTIG (1974) sowie weiteren Schichtanteilen, die bis in das Unterdevon hinunterreichen (DÖRR 1990), stratigraphische und sedimentologische Ungereimtheiten zu den umgebenden Abfolgen. Desweiteren konnte die südlich von Wetzlar anzutreffende, durch phyllitische Tonschiefer geprägte und deshalb exotisch erscheinende Solmstal-Formation als Gleitschicht zur Gießen-Decke interpretiert werden.

Im Rahmen einer Übersichtsanalyse von allochthonen Einheiten im gesamten Rhenoharzynikum wurde auch die Hörre-Zone neben der Gießen-Decke als Decke gedeutet (ENGEL et al. 1983) und damit die Auffassung von KOSSMAT (1927) bestätigt. Die Bezeichnung Hörre-Zone wurde zunächst aber beibehalten (s. auch BIRKELBACH et al. 1988). In diesem Zusammenhang wurde der Kammquarzit weiterhin dem Deckensystem der Hörre zugerechnet, wenngleich dies durch davon abseitige Vorkommen (z. B. BISCHOFF & STOPPEL 1957) bereits unvereinbar erschien. Allerdings konnte für die unvereinbaren gleichzeitigen Faziesverhältnisse von Flachwasser neben Tiefwasser kein tragfähiges Modell gefunden werden (s. ENGEL et al. 1983).

Einen Durchbruch hinsichtlich der Unterscheidung von Autochthon und Allochthon und damit der Etablierung verschiedener tektonischer Decken im Rheinischen Schiefergebirge erbrachten Provenienz-Untersuchungen an Zirkonen im Schwermineralspektrum sandiger Sedimente durch ECKELMANN et al. (2014), ergänzt durch MENDE et al. (2019). Die Decken waren von der variskischen Deformationswelle erfasst und dabei nicht nur intern, sondern auch mit weiteren Schichtfolgen in einer tektonischen Melange zerschert worden. Im Bereich der Frankenbacher Schuppenzone (s. Abb. 3) war dies in Form der sog. Hessischen

Schieferserie als Übergangsbereich von den exotischen zu den eindeutig autochthonen Formationen gedeutet worden. Weitergehende Untersuchungen haben gezeigt, dass neben den Decken aus dem Armorika-Terrane-Ensemble (Armorikanische Decken) vom Südrand des Rheischen Ozeans weitere Decken dessen Nordrand, d. h. Baltika/Avalonia, zuzuordnen sind (Renoherzynische Decken) (BENDER & NESBOR 2017; NESBOR 2019; H. FLICK & NESBOR 2021a u. b). Das betrifft nicht nur die Kammquarzit-Formation. Darüber hinaus sind insbesondere für die vulkanischen Abfolgen innerhalb des Autochthons der östlichen Lahn-Mulde horizontale Überschiebungen im Kilometermaßstab schon seit Langem beschrieben worden (KAYSER 1901, 1907b; AHLBURG 1906), denen somit ein Deckencharakter zuzusprechen ist und die entsprechend als Parautochthone Decken bezeichnet werden können (H. FLICK 2021).

4.1 Armorikanische Decken

Bei den Armorikanischen Decken (Abb. 9) handelt es sich um einen Deckenstapel mit für das Rheinische Schiefergebirge fremden Schichteinheiten, die stratigraphisch vom Ordovizium bis zum Unterkarbon reichen und deren Provenienz ihre Herkunft aus dem Armorikanischen Terranensemble belegt.

4.1.1 Gießen-Decke

Die Gießen-Decke ist Teil eines Deckensystems, das sich vom Rheinischen Schiefergebirge über den Kellerwald und das Werra-Grauwackengebirge bis in den Harz (Südharz- und Selke-Mulde) verfolgen lässt. Sie besteht aus zwei Teildecken, wobei die eine – hier Untere Gießen-Decke genannt – auf ein kleineres Gebiet im Norden beschränkt ist (DÖRR 1990).

Die Untere Gießen-Decke umfasst in zwei Einheiten eine geringmächtige Abfolge von nur wenigen 10er-Metern bei einer stratigraphischen Reichweite vom Emsium (Unterdevon) bis zum tiefen Famennium (Oberdevon) (DÖRR 1990). Die tiefere Krofdorf-Formation baut sich aus schwarzen, gebänderten Tonschiefern mit Einschaltungen von Rotschiefern und mit schwarzen Kiesel- und Alaunschiefern auf. In dieser Abfolge sind im unteren Frasnium Metabasalte und untergeordnet Tuffite eingeschaltet, deren Spurenelementchemismus sie als ehemalige Ozeanboden-Tholeiite (MOR-Typ) ausweist (MEYER 1981; WEDEPOHL et al. 1983; DÖRR 1990), womit sie sich eindeutig von den Vulkaniten im Autochthon unterscheiden (s. NESBOR 2004, 2024). Die zweite Einheit wird von der Älteren Gießengrauwacke-Formation gebildet, die in das höhere Franium bis tiefe Famennium einzustufen ist (HENNINGSEN 1966; Dörr 1990). Vorläufergrauwacken treten schon im mittleren Frasnium auf. Sowohl Krofdorf-Formation als auch Ältere Gießengrauwacke-Formation finden ihre Fortsetzung in einem schmalen Streifen im südlichen Kellerwald, wo sie unter das Deckgebirge abtauchen (s. Abb. 4).

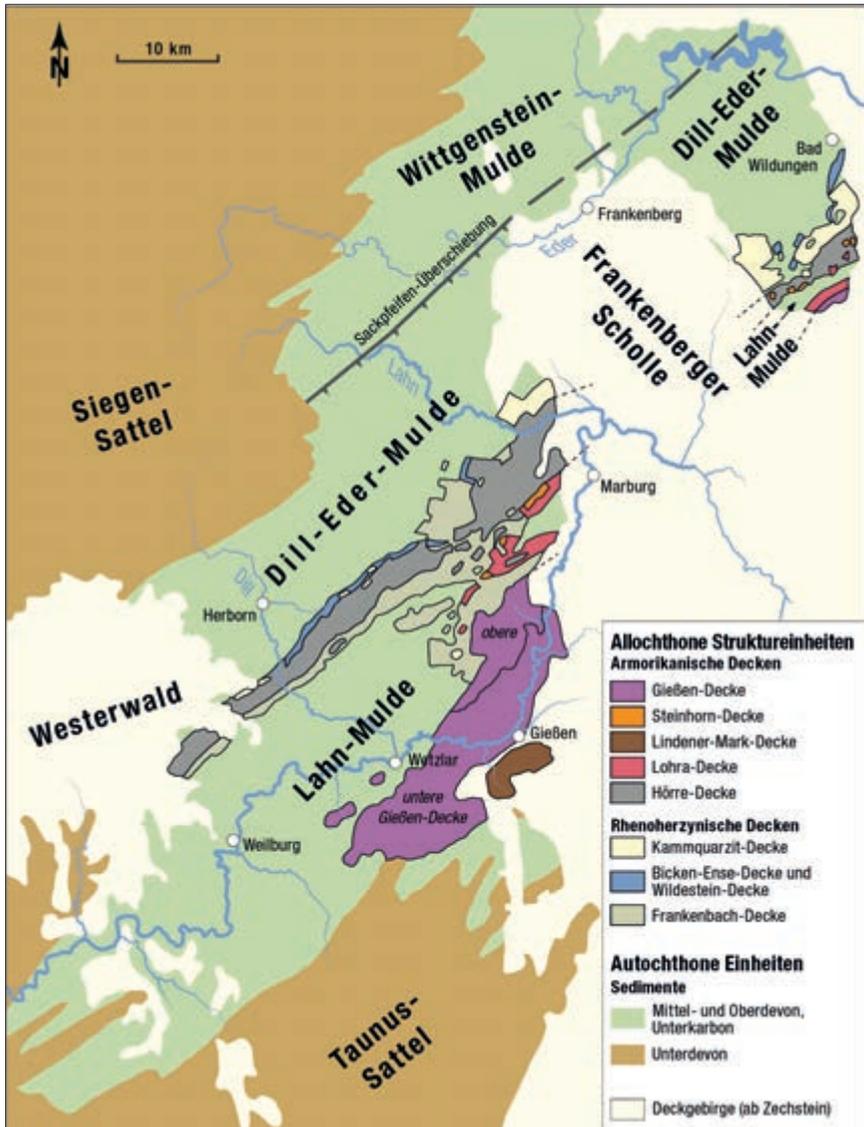


Abbildung 9: Die Armorikanische Decken, hervorgehoben in der geologischen Karte vom Lahn-Dill-Gebiet und Kellerwald (verändert aus H. FLICK & NESBOR 2021b).

Figure 9: The American nappes highlighted in the geological map of the Lahn-Dill area and the Kellerwald (modified from H. FLICK & NESBOR 2021b).

Die analog als Obere Gießen-Decke bezeichnete Einheit nimmt mit der Jüngerer Gießengrauwacke-Formation den Hauptteil der Gießener Grauwackentafel

ein, dabei wird die Mächtigkeit auf einige hundert Meter geschätzt. Ihr Alter lässt sich aufgrund von Pflanzenfunden nicht genauer als Unterkarbon angeben. Auffällig ist unter den Schwermineralen der Gehalt an Granat (HENNINGSEN 1966; DÖRR 1990), wie er auch für die autochthonen Grauwacken der Kulmgrauwacke-Formation belegt ist. Die ehemals in zahlreichen Steinbrüchen abgebauten Gesteine zeigen die typischen Merkmale proximaler turbiditischer Ablagerungen mit zugehörigen Sohlmarken. Für die Deckennatur spricht das tektonische Inventar mit flacher Überlagerung von gefaltetem Autochthon wie am Nauborner Kopf südlich Wetzlar (EDER et al. 1977; AHRENDT et al. 1977) oder die liegenden Falten in mächtigen Grauwackebänken wie bei Niederwetz (ENGEL et al. 1983; BIRKELBACH et al. 1988). Zur Oberen Gießen-Decke wird die Solmstal-Formation am Südrand der Grauwacketafel gerechnet. Es handelt sich um stark zerscherte phyllitische bis phyllonitische Tonschiefer, vergleichbar mit der Nördlichen Phyllitzone am Taunussüdrand, damit höher metamorph als im umgebenden Autochthon. Darin eingeschaltet sind Scherkörper von Meta-Tholeiten mit den gleichen geochemischen Merkmalen (MOR-Typ) wie die in der Krofdorf-Formation.

4.1.2 Hörre-Decke

Die Hörre-Decke bildet eine tektonische Einheit, die vom Lahn-Dill-Gebiet über den Kellerwald bis in den Harz nachweisbar ist. Als Hörre-Zone galt sie im Lahn-Dill-Gebiet zusammen mit dem lange hinzugerechneten Kammquarzit (s. Kap. 4.2.1, Kammquarzit-Decke) als trennende Struktur zwischen einer Dill-Eder-Mulde und einer Lahn-Mulde auch noch, nachdem sie nicht mehr als Sattelstruktur (KAYSER 1907a, b) angesehen werden konnte. Im Kellerwald beschränkt sich die Hörre-Decke auf eine schmale Zone im Süden (s. Abb. 4, 9).

Die Hörre-Decke umfasst eine Schichtenfolge, die vom tiefen Famennium (höheres Nehden) bis in das Unterkarbon reicht und aus insgesamt sieben Formationen aufgebaut wird (BENDER 2006, 2008). Diese sind in zahlreiche Scherkörper zerlegt und wiederholen sich dadurch im Profil mehrfach. Als stratigraphisch tiefste Einheit beschränkt sich die Petersburg-Formation (BENDER 2008) auf eine Schuppe südwestlich Weidenhausen (südwestlich Gladenbach) und besteht aus z. T. gebänderten, unterschiedlich gefärbten siltigen bis kieseligen Schiefen mit Tonschieferanteilen der mittleren Nehden-Stufe (tiefes Famennium). Es folgt in größter Verbreitung die Ulmbach-Formation aus der oberen Nehden- bis unteren Hemberg-Stufe (mittleres Famennium) mit vorherrschend Grauwacken (im Kellerwald als ältere Urfer Grauwacke bekannt), dazu Sandsteine und Tonschiefer sowie geringmächtige Kalksteinbänke. Die Ulmbach-Formation wird überlagert von der Weitershausen-Formation aus der oberen Hemberg- bis tiefen Wocklum-Stufe (hohes Famennium). Typisch für deren dünnbankige Kalkbänke mit Linsen von Hornstein (Chert) und mergeligen Schiefen ist eine intensive kleinräumige Verfaltung. Den Übergang zum Unterkarbon bildet die Endbach-For-

mation aus der hohen Wocklum-Stufe (höchstes Famennium) bis zum tiefen Tournaisium mit kieseligen Schiefern, Tonschiefern, geringmächtigen Quarziten und Grauwacken. Die folgende Gladenbach-Formation besteht aus Kiesel- und Alaunschiefern sowie Kalkbänken aus dem mittleren bis höheren Tournaisium. Das hohe Tournaisium wird von plattigen Tonschiefern der Bischoffen-Formation aufgebaut, die bei Sinn als Dachschiefer abgebaut wurden und nach den Gewinnungen im Kulmtonschiefer (s. Kap. 4.3.1, Hohensolms-Decke) zu den jüngsten Dachschiefen im Rheinischen Schiefergebirge gehören. Die jüngste Einheit der Hörre-Decke bildet die Elnhausen-Formation aus dem höchsten Tournaisium bis mittleren Viséum mit mächtigen grobkörnigen Grauwacken (als jüngere Urfer Grauwacke im Kellerwald bekannt) und eingeschalteten Tonschiefern.

4.1.3 Steinhorn-Decke

Die im Kellerwald auf der Südostseite der Hörre-Decke verbreitete Steinhorn-Decke (s. Abb. 4, 9) wurde von ECKELMANN et al. (2014) aufgestellt. Die tiefste Einheit bildet die Untere Steinhorn-Formation aus Graptolithen-führenden Ton-, Karbonat- und bituminösen Schiefern des höheren Silurium (JAEGER 1962). Die Obere Steinhorn-Formation mit Ton- und Karbonatschiefern umfasst das höchste Silurium bis tiefste Emsium, wobei in letzteren Graptolithen-führende Kieselgalen auftreten. Das weitere Emsium wird von der Michelbach-Formation aus quarzitischen und karbonatischen unreinen Sandsteinen mit Zwischenschichten aus z. T. auch kieseligen Tonschiefern aufgebaut. Für darin eingeschuppte petrographisch unterschiedliche Einheiten sind entsprechend Lokalnamen geprägt worden (Erbsloch-Grauwacke, Schönau-Kalk, Silberstollen-Kalk).

Im Lahn-Dill-Gebiet wird die Damm-Mühle-Formation im Nordosten des Dill-Gebietes als Einheit der Steinhorn-Decke zur Frankenbacher Schuppenzone gerechnet. Ihre Abfolge mit Grauwacken, Tonschiefern, Sandsteinen und Kalksteinen gehört in das Emsium bis in das Mitteldevon, wobei die Grauwacken mit der Erbsloch-Grauwacke gleichgesetzt werden. Für die Fauna in den sogenannten Herzyn-Kalken war die Verwandtschaft zu Böhmen schon früh erkannt worden (KAYSER 1907a; s. Diskussion bei AHLBURG 1919). Hinzuzurechnen sind, in die Hörre-Decke zwischen Ulmbach und Dill eingeschuppt, die Pentamerusquarzit-Formation, ein eingekieselter Kalkstein, und die Greifensteinkalk-Formation aus dem Grenzbereich Unter-/Mitteldevon, wobei beide Formationen durch z. T. mehrfach aufgewältigte Schürfe erfasst worden sind. Die Greifensteinkalk-Formation zeigt insbesondere in ihrer Trilobitenfauna engste Beziehungen zum Barandium in Böhmen (U. FLICK 1999, 2018). Inwieweit weitere bis in den Kellerwald als solche angesprochenen Vorkommen hinzuzurechnen sind, ist noch nicht abschließend geklärt.

4.1.4 Lindener-Mark-Decke

Die von KEGEL (1953) beschriebenen exotisch wirkenden Gesteinseinheiten der Lindener-Mark-Decke südlich von Gießen beinhalten eine diskontinuierliche Abfolge vom höheren Ordovizium bis zum hohen Unterdevon und ist damit die Deckeneinheit mit der stratigraphisch größten Reichweite. Es ist allerdings davon auszugehen, dass darin mehrere nicht zusammenhängende Schuppen-Einheiten erfasst werden. Zu den bekannteren Schichtgliedern gehört die ordovizische Andreasteich-Formation. Deren quarzitischer Sandstein wurde schon länger mit dem Armorikanischen Quarzit verglichen, was durch Zirkon-Provenienzanalysen erhärtet werden konnte (MENDE et al. 2019). Entsprechende Geröllfunde im Vogelsberg belegen die ursprünglich deutlich größere Ausdehnung (STRUVE 1975). Eine Provenienz von der Südseite des Rheischen Ozeans ist ebenso für die unterdevonische Dalmanitensandstein-Formation belegt (MENDE et al. 2019). Die Makrofaunenfunde darin haben zu unterschiedlichen Einstufungen im Unterdevon geführt, die aktuelle Bearbeitung der umfangreichen Trilobitenfauna aus der Senckenberg-Sammlung spricht für ein Pragianum-Alter (U. FLICK 2022, ausführliche Diskussion darin).

4.1.5 Lohra-Decke

Die Lohra-Decke, in der nordöstlichen Lahn-Mulde als Teil der Frankenbacher Schuppenzone in einzelne Schuppen zerlegt, bildet im Süden des Kellerwaldes eine durchgehende Zone. Sie wird von zwei Einheiten aufgebaut. Die Lohra-Formation aus dem Famennium besteht aus schwarzen Ton- und Kieselschiefern sowie Grauwacken, in der Lahn-Mulde sind auch Kalksteine beteiligt. Die Kehngrauwacke-Formation des Viséum (Tournaisium ist nicht nachgewiesen) wird von schwarzen Tonschiefern, glimmerreichen Grauwackenschiefern und Grauwacken gebildet und ist im Kellerwald als Hundshausen-Grauwacke bezeichnet worden. Sie findet in der Tanner Grauwacke im Mittelharz ihre Fortsetzung (BENDER & STOPPEL 2006). In der Lahn-Mulde ist sie auch konglomeratisch entwickelt. Ihre feldspatreiche Ausbildung ist als „Marburger Granit“ bekannt geworden.

4.2 Rhenohertzynische Decken

Bei den Rhenohertzynischen Decken (Abb. 10) handelt es sich um Schichteinheiten aus dem hohen Unterdevon bis Unterkarbon, die faziell eigenständig sind und entsprechend nicht in die autochthonen Folgen des Rheinischen Schiefergebirges passen. Von ihrer Provenienz her sind diese Avalonia/Baltika zuzurechnen.

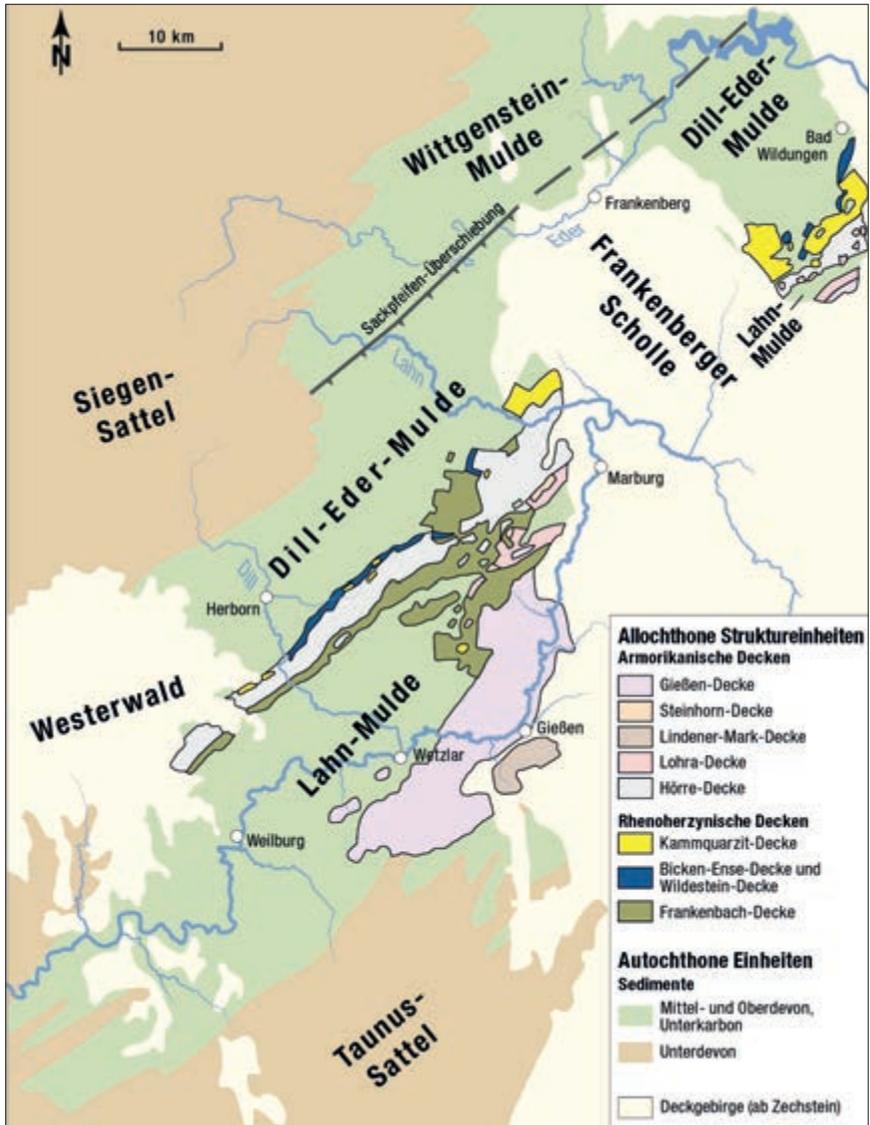


Abbildung 10: Die Rhenohercynischen Decken, herausgehoben in der geologischen Karte vom Lahn-Dill-Gebiet und Kellerwald (verändert aus H. FLICK & NESBOR 2021b).

Figure 10: The Rhenohercynian nappes highlighted in the geological map of the Lahn-Dill area and the Kellerwald (modified from H. FLICK & NESBOR 2021b).

4.2.1 Kammquarzit-Decke

Die Kammquarzit-Decke erstreckt sich vom Lahn-Dill-Gebiet über den Kellerwald und Harz bis nach Gommern bei Magdeburg, wobei das namengebende Gestein ursprünglich jeweils eigenständige Bezeichnungen erhielt (s. oben). Eine Fortsetzung nach Südwesten gab es möglicherweise in der Südportugiesischen Zone auf der Iberischen Halbinsel. Die Kammquarzit-Decke begleitet die Hörre-Decke auf deren NW-Seite mit den größten Vorkommen im Kellerwald und am Wollenberg nordwestlich Marburg im Lahn-Dill-Gebiet. Weiter nach Südwesten löst sie sich in kleinere Schollen auf. Der enge Kontakt zur Hörre-Decke verleitet dazu, beide als zusammenhängende tektonische Einheit zu deuten (noch HUCKRIEDE et al. 2004; BENDER 2006), wengleich auch kleinere Vorkommen südlich der Hörre-Decke schon länger bekannt waren (z. B. BISCHOF & STOPPEL 1957). Ebenfalls sedimentologische Kriterien wiesen im Gegensatz zu den Hörre-gesteinen auf eine Herkunft des Materials von Laurussia (HOMRIGHAUSEN 1979), die durch Zirkon-Provenienzanalysen bestätigt werden konnte (ECKELMANN et al. 2014).

Der Hauptteil der Kammquarzit-Decke wird von der Kammquarzit-Formation eingenommen. Diese wird von einem aus Strandsanden hervorgegangenen, diagenetisch eingekieselten Sandstein (Orthoquarzit) aufgebaut, der z. T. turbiditisch umgelagert wurde. Eingeschaltet sind wenige schiefbrig-sandige Zwischenlagen. Bei mächtigeren Verbandsverhältnissen wird der Übergang zur kieseligen Beckenfazies erkennbar (Schiffelborn-Formation), in der im Kellerwald Metabasalte als Lavaströme und Lagergänge eingeschaltet sind (s. Abb. 6). Im Dillgebiet tritt lokal ein Olisthostrom hinzu, bestehend aus Kammquarzit-Bruchstücken, schwarzem Tonstein, Kieselschiefer und Metabasalt (Hohenburg-Formation).

Schon früh war das unterkarbonische Alter des Kammquarzits erkannt (KOCH 1858) und ist später von SCHMIDT (1926, 1933) bestätigt worden. Zwischenzeitlich war er jedoch von KAYSER (1907a, b) mit silurischen Quarziten im Kellerwald (Teil der Steinhorn-Decke) gleichgesetzt worden, weil das gut in das Konzept der Hörre-Zone als Sattelstruktur zwischen Lahn-Mulde und Dill-Eder-Mulde gepasst hatte.

Unter dem Aspekt der Autochthonie und Zusammengehörigkeit mit der Hörre-Zone sind die Bildungs- und Sedimentationsumstände bisher sehr kontrovers diskutiert worden (HOMRIGHAUSEN 1979; WIERICH 1999; JÄGER & GURSKY 2000), ohne ein plausibles Modell zu bieten. Dieses könnte darin bestehen, dass nach Schollenkippen infolge der Krustendehnung auf Südavalonia über dem Meeresspiegel exponierte devonische Sandsteine aufgearbeitet wurden (NESBOR 2019).

4.2.2 Bicken-Ense-Decke

Die Bicken-Ense-Decke lässt sich – entlang der Hörre-Decke auf die Dill-Eder-Mulde überschoben – vom Lahn-Dill-Gebiet bis in den Kellerwald verfolgen. Kleinere Schollen sind auch in das Autochthon von Lahn- und Dill-Eder-Mulde eingeschuppt. Sie wird von grünlichen und gelben, vor allem aber dunkelgrauen Tonschiefern und sandigen Tonschiefern der Bicken-Ense-Formation gebildet. Diese führen lokal knollige Kalke, z.T. sind auch intern stark verschuppte, mehrere Dekameter mächtige Kalksteinsfolgen eingeschaltet. Früher wurden sie den sog. Herzynkalken hinzugerechnet und mit stratigraphisch definierten Lokalnamen versehen. Nach Conodontenfunden reicht die stratigraphische Reichweite vom hohen Emsium bis in das Unterkarbon (tiefes Tournaisium, BENDER 1997; BENDER & STOPPEL 2006) und belegt eine Schwellensituation für diesen langen Zeitraum (H. FLICK & U. FLICK 2017). Bei den in der vorgefundenen Makrofauna bisher untersuchten Trilobiten sind Verwandtschaften zu böhmischen und marokkanischen Faunen, aber auch zum autochthonen Rheinischen Schiefergebirge festzustellen, was auf eine Randlage zum Rheischen Ozean hinweist (U. FLICK 2021). Bekanntestes Vorkommen der Bicken-Ense-Formation ist der ehemalige Abbau im Steinbruch Benner bei Mittenaar-Bicken mit seinem Aufschluss der beiden Kellwasser-Horizonte im mittleren Bereich (BUGGISCH 1972, 1991; BENDER 1997), die das Frasnium beschließen, womit weltweit die Riffbildung für lange Zeit geendet hat.

4.2.3 Wildestein-Decke

Die zusammen mit der Bicken-Ense-Decke auf die Dill-Eder-Mulde am Rand zur Hörre-Decke auf wenige Scherkörper beschränkte Wildestein-Decke (s. Abb. 2) wird von roten, grünlichen, gelblichen und grauen Tonschiefern sowie Kiesel-schiefern der Wildestein-Formation aufgebaut, die vermutlich das gesamte höhere Oberdevon umfassen. Davon nachgewiesen ist bisher nur das höhere Famennium (BENDER 1997).

4.2.4 Frankenbach-Decke

Die Frankenbach-Decke, Teil der Frankenbacher Schuppenzone (BENDER & NESBOR 2017) und beschränkt auf das Lahn-Dill-Gebiet (s. Abb. 3), umfasst eine Schichtenfolge aus Sedimenten und Vulkaniten des Unteremsiem bis höheren Unterkarbon. Zum Teil dem Autochthon äquivalent, sind daneben auch abweichende Einheiten vertreten, unter denen die Mornshausen-Formation mit kieseligen Tonschiefern, Alaunschiefern und Kieselschiefern aus dem Givetium bis Frasnium (BENDER 2006, 2008) heraussticht. Schon KEGEL (1933) erkannte deren fremdartigen Charakter und sah sie als lokalen Vertreter der Hörre-Zone an. Ihr

eigenständiger struktureller Charakter zeigt sich in der Überschiebung durch die Hörre-Decke, auf die wiederum die Frankenbach-Decke überschoben wurde.

4.3 Parautochthone Decken

In der östlichen Lahn-Mulde sind vulkanische Abfolgen aus dem Mittel- bis Oberdevon bzw. Unterkarbon anzutreffen, die zwar denen des Autochthons gleichen, aber tektonisch eine gewisse Eigenständigkeit aufweisen. Und zwar erweist sich, dass sie ungeachtet einer internen Verschiebung in so großem Maßstab diskordant über jüngere Einheiten überschoben sind, dass die Bezeichnung als Parautochthone Decken (Abb. 11) berechtigt ist.



Abbildung 11: Die Parautochthone Decken in der östlichen Lahn-Mulde (Hohensolms- und Asslar-Decke). **M** tektonische Mühlberg-Klippe, Ortschaften: **A** Aßlar, **B** Bechlingen, **E** Ehringshausen, **H** Hohensolms (aus H. FLICK 2025)

Figure 11: Par-autochthonous nappes in the eastern Lahn Syncline (Hohensolms and Asslar nappes). **M** tectonic inlier of Mühlberg summit; towns and villages: **A** Aßlar; **B** Bechlingen; **E** Ehringshausen; **H** Hohensolms (from H. FLICK 2025).

4.3.1 Hohensolms-Decke

Die Hohensolms-Decke (H. FLICK 2021), früher von AHLBURG als Hohensolmer Diabasdecke bezeichnet (KEGEL 1922), wird durch die Deckdiabas-Formation aus tholeiitischen Metabasalten aufgebaut, die dem Autochthon äquivalent sind (s. Kap. 2). Die Vulkanite des höheren Tournaisium bis tieferen Viséum (früher Unterkarbon 2, s. Abb. 1) sind im Bereich der Kulmtafel des Lemptales (KAYSER 1901; AHLBURG 1908; s. auch KEGEL 1922) auf die verfaltete Folge der Kulmgrauwacke-Formation (höheres Viséum) überschoben. Eingeschaltet finden sich Kieselschiefer, die während Eruptionspausen zur Ablagerung kamen und z. T. als Gleithorizonte an der Basis, aber auch für interne Scherbewegungen gedient haben und als Ausschnitte von Duplexstrukturen gedeutet werden können. Wichtig für die Ansprache als Decke ist die flache bis mehr oder weniger horizontale Überlagerung des Autochthons, wie im Lemptal nördlich Ehringshausen erkennbar (s. H. FLICK 2021). Die Auswirkungen des Auflastdrucks in den Kulmtonschiefern der Kulmgrauwacke-Formation haben dort zu lokal abbaufähigen Dachschiefern geführt, den jüngsten im Rheinischen Schiefergebirge (so ehem. Grube Gnade Gottes im Lemptal). Die tektonische Situation der Hohensolms-Decke wird besonders am Mühlberg bei Bechlingen offensichtlich, die dort eine tektonische Klippe in mehr als 1 km Entfernung außerhalb der großen flächenhaften Verbreitung bildet und deshalb wiederholt Beachtung gefunden hat (KAYSER 1901, 1907b; WEYL 1967, 1980).

4.3.2 Asslar-Decke

Die Asslar-Decke (H. FLICK 2021) ist eine Zusammenführung der von AHLBURG (s. KEGEL 1922) als Werdorfer Oberdevondecke und Aßlarer Mitteldevondecke bezeichneten Einheiten. Sie umfasst die auf die Hohensolms-Decke überschobenen Sedimente der oberdevonischen Nehden-Hemberg-Formation sowie Vulkanite der obermitteldevonischen Diabas-Schalstein-Formation. Am Schwanzberg im Bornbachtal nördlich Aßlar kommt der intern auf das Oberdevon überschobene Riffkalkblock aus der givetischen Massenkalk-Formation hinzu. Wichtiger Aufschluss für die tektonische Deutung ist neben der Situation in der ehemaligen Roteisensteingrube Heinrichsseen in Ehringshausen (KAYSER 1901) die horizontale Überlagerung von mitteldevonischem Schalstein über unterkarbonischem Deckdiabas am sogenannten Lokschuppen im Bechlinger-Bachtal am Ortsausgang von Aßlar nach Bechlingen (AHLBURG 1908; WEYL 1963, 1980; FRANKE 2007). Die Asslar-Decke geht nach Südwesten in den Schalstein-Hauptsattel (mittlere Lahn-Mulde) über, wobei die unzureichenden Aufschlussverhältnisse keine nähere Aussage über die Zusammenhänge erlauben. FRANKE (2007) nimmt eine Überschiebungswerte von 8 km an, aber ohne weitere Begründung, so dass

nicht erkennbar wird, inwieweit ein Zusammenhang zwischen beiden tektonischen Einheiten besteht oder bestehen könnte.

5 Resumé

Im Rheinischen Schiefergebirge wurde ein Deckenbau im Zuge der variskischen Orogenese schon vor bald 100 Jahren erwogen (KOSSMAT 1927). In einer stark durch Schuppenbau geprägten Region im Südosten führten unvereinbare strukturelle, sedimentologische und/oder stratigraphische Verhältnisse mit den umgebenden Folgen zu kontroversen Diskussionen. Bewegung in der Deutung gab es aber erst, als durch das Aufkommen der Plattentektonik ein mobilistisches Weltbild das statische ablöste. Nachdem mit der Gießener Grauwacke und der Hörre-Zone die auffälligsten Struktureinheiten als Decken bestätigt wurden (EDER et al. 1977; AHRENDT et al. 1977; ENGEL et al. 1983), kam es erst durch die Zirkon-Provenienzanalysen zu einer Erweiterung des strukturellen Bildes (ECKELMANN et al. 2014; MENDE et al. 2019), wodurch sich die Anzahl der unterscheidbaren Decken erhöht hat. Dabei zeigte sich, dass das Material für die Deckenüberschiebungen im Rahmen der variskischen Orogenese nicht nur aus dem Armorikanischen Terran-Ensemble von der Südseite des Rheischen Ozeans stammt (Armorikanische Decken), sondern ebenso von dessen Nordseite (Rhenoherynische Decken). Schließlich war bei den Bewegungen auch das Autochthon intern von deckenartigen Überschiebungen erfasst worden (Parautochthone Decken), wie prinzipiell bereits von KAYSER (1901) und AHLBURG (1908) festgestellt wurde.

Es lassen sich demnach im Rheinischen Schiefergebirge drei Deckensysteme unterscheiden (Abb. 12). Diese dokumentieren unterschiedliche Schubweiten und damit räumlich wesentlich getrennte Wurzelbereiche. Inwieweit die Unterscheidung der Decken bestätigt bleibt oder weitere Trennungen oder Zuordnungen nötig werden, muss gegenwärtig offenbleiben. So wird die Zusammengehörigkeit der Unteren und Oberen Gießen-Decke bereits von DÖRR (1990) aufgrund der deutlichen stratigraphischen Trennung in Frage gestellt. Es ist denkbar, dass die Untere Gießen-Decke stattdessen als Untere Hörre-Decke zu bezeichnen wäre.

Die Beschränkung der Decken auf den Raum des südöstlichen Rheinischen Schiefergebirges ist dem gegenwärtigen Aufschlussniveau mit einem generellen Abtauchen des Schichtenstapels nach Nordosten geschuldet. Eine ursprüngliche größere Verbreitung belegt zum einen das weitere Rhenoherynikum (s. oben). Zum anderen zeigt das Inselstadium des Rheinischen Schiefergebirges, das es nach der variskischen Orogenese für die weitere Erdgeschichte bis heute (etwa 300 Mio. Jahre vor heute; s. Abb. 1) eingenommen hat, dass es für diesen Zeitraum Abtragungsgebiet geworden und weitestgehend geblieben ist. Entsprechend müssen hierfür Gesteinseinheiten zusätzlich über den autochthonen Folgen vorhanden gewesen sein, was sich auch aus den erkennbaren höheren Belastungsdrücken

in den paläozoischen Abfolgen erschließen lässt und nicht aus dem Autochthon ableitbar ist. Die Bewegungen der Armorikanischen und Herzynischen Decken im Verlauf der variskischen Orogenese haben ihre Wurzeln soweit entblößt, dass südlich von der Rhenoheryznischen Zone deren unteres, kristallines Stockwerk direkt vom nachvariskischen Deckgebirge diskordant überlagert wurde.

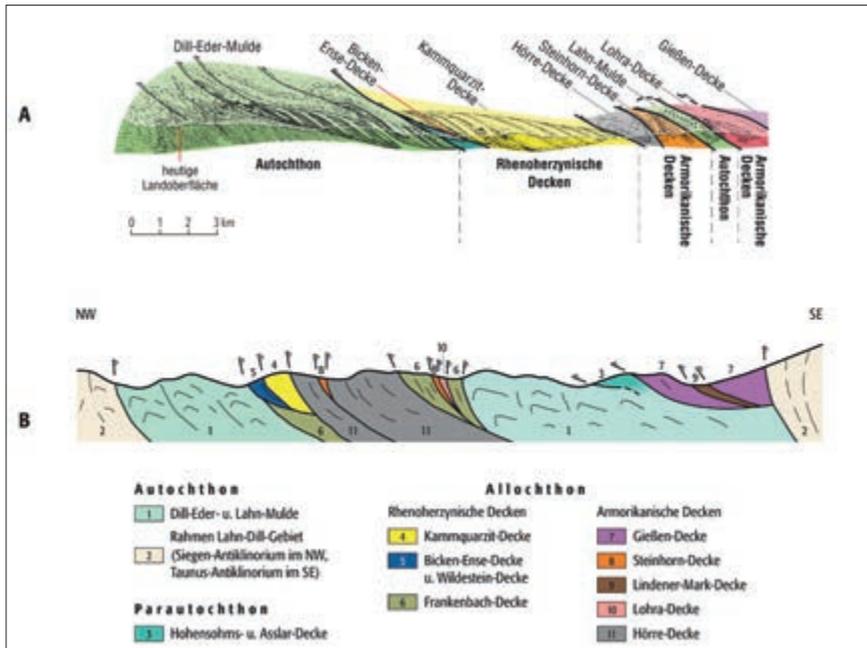


Abbildung 12: Strukturprofile durch Lahn-Dill-Gebiet und Kellerwald (ohne Maßstab).

A: Profil durch den Kellerwald (aus H. FLICK & NESBOR 2021b, nach MEISCHNER 1991 verändert).

B: Profil durch das Lahn-Dill-Gebiet.

Figure 12: Structural sections through Lahn-Dill area and Kellerwald (without scale).

A: Section through Kellerwald (from H. FLICK & NESBOR 2021b, modified from MEISCHNER 1991).

B: Section through Lahn-Dill area.

6 Danksagung

Abstract und englische Bildunterschriften wurden von Herrn B. Bogner, M.Sc., Friedberg, durchgesehen, professionelle graphische Unterstützung leistete Herr M. Manske, Bad Grönenbach. Den Genannten sei auch an dieser Stelle gedankt.

7 Literatur

- AHLBURG, J. (1908): Die Tektonik der östlichen Lahnmulde. – Z. deutsch. Geol. Ges., **60**, Mber. 12: 300-317, 8 Abb., 1 Taf.; Berlin.
- AHLBURG, J. (1919): Über die Verbreitung des Silurs, Hercyns und Rheinischen Devons und ihre Beziehungen zum geologischen Bau im östlichen Rheinischen Gebirge. – Jb. Preuß. Geol. L.-Anst., **60**, (1): 1-82, 2 Abb., 1 Taf.; Berlin.
- AHRENDT, H., HUNZIKER, J. C. & WEBER, K. (1978): K/Ar-Altersbestimmungen an schwachmetamorphen Gesteinen des Rheinischen Schiefergebirges. – Z. dt. geol. Ges., **129**: 229-247, 23 Abb., 2 Tab., 3 Taf.; Hannover.
- AHRENDT, H., CLAUER, N., HUNZIKER, J.C. & WEBER, K. (1983): Migration of folding and metamorphism in the Rheinisches Schiefergebirge deduced from K-Ar and Rb-Sr Age determinations. – In: Martin, H. & Eder, F.W. (Hrsg.): Intracontinental Fold Belts. – 323-338, 5 Abb., 2 Tab.; Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (Springer).
- AHRENDT, H., ANDERLE, H.-J., BEHR, H.-J., MEISL, S. & WEBER, K. (1977): Exkursion G. Tektonische Entwicklung des östlichen Rheinischen Schiefergebirges. – Exkursionsführer Geotagung, **77** (I): 93-169, 39 Abb.; Göttingen.
- BECHER, J. P. (1789): Mineralogische Beschreibung der Oranien-Nassauischen Lande nebst einer Geschichte des Siegenschen Hütten- und Hammerwesens. – 624 S., 4 Beil.; Marburg (Neue Akademische Buchhandl.).
- BECKER, A. & KIRNBAUER, T. (1988): Zur Gewinnung und Verwendung des Lahnmarmors. – In: KIRNBAUER, T. (Hrsg.) unter Mitarb. von SCHNEIDER, J.: Geologie und hydrothermale Mineralisationen im rechtsrheinischen Schiefergebirge. – Jb. nass. Ver. Naturkde., Sonderbd. **1**: 237-244, Abb. 62-65, Tab. 12; Wiesbaden.
- BECKER, A. & WABEL, W. (2021): Vom Tropenriff zum Denkmal. 400 Jahre Schupbacher Marmor. – 180 S., 186 Abb., 3 Tab.; Schupbach (Selbstverlag).
- BENDER, P. (1997) mit einem Beitrag von HERBIG, H.G.: Paläozoikum der Hörre. – In: BENDER, P., LIPPERT, H.-J. & NESBOR, H.-D. (1997): Blatt 5216 Obersched, 2. Aufl. – Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000: 111-156, Abb. 7, Tab. 11-15; Wiesbaden.
- BENDER, P. (2006): Geologische Karte der Hörre (zwischen Dill und Lahn) und der Frankenbacher Schuppenzone, 1 : 40.000; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Umwelt u. Geologie).
- BENDER, P. (2008): Lahn- und Dill-Mulde. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland VIII – Devon. – Schr.-R. dt. Ges. Geowiss., **52**: 221-246, 1 Abb., 2 Tab.; Hannover.
- BENDER, P. & NESBOR, H.-D. (2017): Geologische Karte von Hessen 1:25 000 (GK25), Bl. 5217 Gladenbach, 2. Aufl.; Wiesbaden (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).
- BENDER, P. & STOPPEL, D. (2006): Der Ost- und Südostrand des Rheinischen Schiefergebirges: Lahn-Doll-Gebiet, Kellerwald, Taunus. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland VI – Unterkarbon (Mississippium). – Schr.-R. dt. Ges. Geowiss., **41**: 358-378, 10 Abb.; Hannover.
- BIRKELBACH, M., DÖRR, W., FRANKE, W., MICHEL, H., STIBANE, F. & WECK, R. (1988): Die geologische Entwicklung der östlichen Lahnmulde (Exkursion C am 7. April 1988). – Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F., **70**: 43-74, 16 Abb.; Stuttgart.
- BISCHOFF, G. & STOPPEL, D. (1957): Zum Alter des Wollen-Kellerwald-Quarzits. – N. Jb. Geol. Paläont. Mh., **1957**, 1: 14-24, 4 Abb.; Stuttgart.
- BUGGISCH, W. (1972): Zur Geologie und Geochemie der Kellwasserkalke und ihrer begleitenden Sedimente (Unters Oberdevon). – Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforschung, **62**: 1-68, 19 Abb., 6 Tab., 13 Taf., Wiesbaden.
- BUGGISCH, W. (1991): The global Frasnian-Famennian “Kellwasser Event”. – Geol. Rdschau, **80**: 49-72, 12 Abb.; Stuttgart.

- BUGGISCH, W., RABIN, A. & HÜHNER, G. (1981): Zum Alter des unterkarbonischen Deckdiabases (Effusiv-Diabas) bei Oberscheld (Dill-Mulde, Rheinisches Schiefergebirge). – *Geol. Jb. Hessen*, **109**: 37-55, 3 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.) (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016; Hannover.
- DÖRR, W. (1990): Stratigraphie, Stoffbestand und Fazies der Gießener Grauwacke (östliches Rheinisches Schiefergebirge). – *Geol. Abh. Hessen*, **91**: 1-94, 22 Abb., 5 Tab., 5 Kt.; Wiesbaden.
- ECKELMANN, K., NESBOR, H.-D., KÖNIGSHOF, P., LINNEMANN, U., HOFMANN, M., LANGE, J.-M. & SAGAWA, A. (2013): Plate interactions of Laurussia and Gondwana during the formation of Pangaea – Constraints by U-Pb LA-SF-ICP-MS detrital zircon ages of Devonian and Early Carboniferous siliciclastics of the Rheinisches Schiefergebirge (Rhenohercynian zone, Central European Variscides). – *Gondwana Research*, **25**: 1484-1500, 8 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- EDER, W., ENGEL, W. & FRANKE, W. (1977): Paläogeographie an der Wende Mittel-/Oberdevon (Faziesübergang Schelf/Becken am Beispiel von Briloner Massenkalk, Padberger Kalk und Flinz; Aufschlüsse 4 bis 6). – In: BENDER, P., EDER, W., ENGEL, W., FRANKE, W., LANGENSTRASSEN, F., WALLISER, O.H. & WITTEN, W.: Exkursion A – Paläogeographische Entwicklung des östlichen Rheinischen Schiefergebirges, demonstriert an einem Querschnitt. – Exkursionsführer Geotagung, **77** (I): 22-29, Abb. A12-A15; Göttingen.
- ENGEL, W., FRANKE, W., GROTE, C., WEBER, K., AHRENDT, H. & EDER, F.W. (1983): Nappe Tectonics in the Southeastern Part of the Rheinisches Schiefergebirge. – In: MARTIN, H. & EDER, F.W. (Hrsg.): Intracontinental Fold Belts. – 267-287, 6 Abb., 1 Taf.; Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (Springer).
- FLICK, H. (2013): Das Rheinische Schiefergebirge – eine geologische Geschichte. – *Aufschluss*, **64**: 208-237, 37 Abb.; Heidelberg.
- FLICK, H. (2020): Lahnmarmor – die geologischen Grundlagen. – *Jb. nass. Ver. Naturkde*, **141**: 27-48, 15 Abb.; Wiesbaden.
- FLICK, H. (2021): Geologische Karte von Hessen 1:25 000 (GK25), Bl. 5316 Ballersbach, 2. Aufl. – Wiesbaden (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).
- FLICK, H. (2025): Parautochthonous nappes in the south-eastern Lahn-Dill area, induced by alpine-type nappe thrusting in the Rhenish Massif (Germany). – *Palaeodiversity and Palaeoenvironments*; in Vorbereitung; Frankfurt a. M. (Senckenberg Gesellschaft f. Naturforschung).
- FLICK, H. & FLICK, U. (2017): Der Boden unter unseren Füßen – ein erdgeschichtlicher Gang durch die Gemarkung Ballersbach. – *Ballersbacher Blätter*, **2017**: 3-22, 22 Abb., Ballersbach.
- FLICK, H. & NESBOR, H.-D. (2021a): Lahn-Dill-Gebiet. – In: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG): *Geologie von Hessen*. – 49-77, 14 Abb., 1 Tab., Stuttgart (Schweizerbart).
- FLICK, H. & NESBOR, H.-D. (2021b): Kellerwald. – In: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG): *Geologie von Hessen*. – 77-88, 5 Abb., 1 Tab., Stuttgart (Schweizerbart).
- FLICK, H., NESBOR, H.D. & BEHNISCH, R. (1990): Iron ores of the Lahn-Dill type formed by diagenetic seeping of pyroclastic sequences – a case study on the Schalstein section at Gänsberg (Weilburg). – *Geol. Rdsch.*, **79**: 401-415, 11 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- FLICK, U. (1999): Die Trilobiten von Greifenstein/Hörre – Ableger einer böhmischen Fauna im Rheinischen Schiefergebirge. – *Jb. nass. Ver. Naturkde*, **120**: 23-50, 11 Abb., 1 Tab., 2 Taf.; Wiesbaden.
- FLICK, U. (2018): Die Trilobiten-Fauna im Greifenstein-Kalk der Typlokalität (Grenzbereich Emsium/Eifelium) – ein Zwischenbericht. – *Jb. nass. Ver. Naturkde*, **139**: 133-161, 6 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.

- FLICK, U. (2021): Die Trilobiten-Fauna im Ballersbach-Kalk (Bicken-Formation) an der Typlokalität (Trilobita; Unter-/Mitteldevon). – Geol. Jb. Hessen, **140**: 5-34, 11 Abb., 2 Tab., 3 Taf., Wiesbaden.
- FLICK, U. (2022): Trilobitenfunde aus dem Dalmaniten-Sandstein (Unterdevon) von Kleinlinde bei Gießen (Rheinisches Schiefergebirge). – Beiträge Naturkd. Osthessen, **59**: 85-109, 4 Abb., 4 Taf.; Fulda.
- FRANKE, W. (2007): Paläogeographie und Tektonik des autochthonen Lahngebietes (Exkursion C am 12. April 2007). – Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F., **89**: 151-165, 8 Abb.; Stuttgart.
- HENNINGSSEN, D. (1966): Die paläozoischen Grauwacken bei Gießen und ihre Fortsetzung unter der südlichen Hessischen Senke. – Ber. Oberhess. Ges. Natur-Heilkde. Gießen, N.F. Naturwiss. Abt., **34** (1-2): 19-31, 1 Abb., Gießen.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Hrsg.) (2021): Geologie von Hessen. – 705 S., 300 Abb., 42 Tab., 2 Tafeln; Stuttgart (Schweizerbart).
- HOMRIGHAUSEN, R. (1979): Petrographische Untersuchungen an sandigen Gesteinen der Hörre-Zone (Rheinisches Schiefergebirge, Oberdevon-Unterkarbon). – Geol. Abh. Hessen, **79**: 84 S., 16 Abb., 5 Tab., 13 Taf.; Wiesbaden.
- HUCKRIEDE, H., WEMMER, W. & AHRENDT, H. (2004): Palaeogeography and tectonic structure of allochthonous units in the German part of the Rheno-Hercynian Belt (Central European Variscides). – Int. J. Earth Sci., **93**: 414-431, 8 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- JAEGER, H. (1962): Das Silur (Gotlandium) in Thüringen und am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges (Kellerwald, Marburg, Gießen). – In: ERBEN, H.K. (Hrsg.): 2. Internationale Arbeitstagung Silur/Devon-Grenze und die Stratigraphie von Silur und Devon. – Bonn, Bruxelles 1960, Symposiumsband. – 108-135, 3 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- JÄGER, H. & GURSKY, H.-J. (2000): Alter, Genese und Paläogeographie der Kammquarzit-Formation (Visé) im Rhenohertzynikum – neue Daten und neue Deutungen. – Z. dt. geol. Ges., **151** (4): 415-441; Stuttgart.
- KAYSER, E. (1901): Ueber grosse flache Ueberschiebungen im Dillgebiet. – Jb. kgl. preuß. geol. L.-Anst u. Bergakad. f. 1900, **21**: 7-25, 8 Abb., 1 Taf.; Berlin.
- KAYSER, E. (1907a): Erl. geol. Kt. Preußen u. benachbar. B.-St., Lfg. 101, Bl. 5315 Herborn, 72 S., 3 Abb.; Berlin.
- KAYSER, E. (1907b): Erl. geol. Kt. Preußen u. benachbar. B.-St., Lfg. 101, Bl. 5316 Ballersbach, 70 S., 12 Abb., 2 Taf.; Berlin.
- KEGEL, W. (1922): Abriß der Geologie der Lahnmulde. Erläuterungen zu einer von Johannes Ahlburg hinterlassenen Übersichtskarte und Profildarstellung der Lahnmulde. – Abh. preuß. geol. L.-Anst., N. F., **86**, 81 S., 2 Abb., 6 Taf.; Berlin.
- KEGEL, W. (1933): Blatt 5217 Gladenbach. – Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesländern: 28 S.; Berlin.
- KEGEL, W. (1953): Das Paläozoikum der Lindener Mark bei Gießen. – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **7**: 1-55, 3 Abb., 3 Taf.; Wiesbaden.
- KIRNBAUER, T. (2008): Nassauer Marmor oder Lahnmarmor – ein weltweit bekannter Naturwerkstein aus Deutschland (Nassau Marble or Lahn Marble – a famous Devonian dimension stone from Germany). – In: SIEGISMUND, S. & SNETHLAGE, R. (Hrsg.): Denkmalgesteine – Festschrift Wolf-Dieter Grimm. – Schriftenr. dt. Ges. Geowiss., **59**: 187-218, 11 Abb., 3 Tab., 4 Taf.; Hannover.
- KOCH, C. (1858): Paläozoische Schichten und Grünsteine in den Herzoglich-Nassauischen Ämtern Dillenburg und Herborn, unter Berücksichtigung allgemeiner Lagerungsverhältnisse in angrenzenden Ländertheilen. – Jb. Ver. Naturk. Herzogt. Nassau, **13**: 85-329, 3 Taf.; Wiesbaden.
- KÖNIGSHOF, P. (2007): Mittel- bis oberdevonische Rifffkarbonate in der Lahnmulde (südliches Rheinisches Schiefergebirge) (Exkursion H am 13. April 2007). – Jb. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **89**: 261-272, 7 Abb.; Stuttgart.

- KOSSMAT, F. (1927): Gliederung des varistischen Gebirgsbaues. – Abh. sächs. geol. L.-Anst., **1**: 1–39, 2 Abb., 2 Taf.; Leipzig.
- KREBS, W. (1966): Der Bau des oberdevonischen Langenaubach-Breitscheider Riffes und seine weitere Entwicklung im Unterkarbon (Rheinisches Schiefergebirge). – Abh. senckenberg. naturforsch. Ges., **511**: 1-105, 18 Abb., 3 Tab., 13 Taf.; Frankfurt a.M.
- LIPPERT, H.-J. (1970), unter Mitarbeit von HENTSCHEL, H., & RABIEN, A.: Blatt 5215 Dillenburg, 2. Aufl. - Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000: 550 S., 18 Abb., 56 Tab., 6 Taf., 3 Beibl.; Wiesbaden.
- LÖW, M., SÖTE, T. BECKER, R.T., STICHLING, S., MAY, A., ABOUSSALAM, Z.S. & ZOPPE, S.F. (2022): The initial phase of the Hönne Valley Reef at Binolen (northern Rhenish Massif, Middle Devonian). – *Palaeobio Palaeoenviron*, **102** (3): 573-612, 15 Abb.; Frankfurt a. M. (Springer); <http://do.org/10.1007/st2549-022-00540-4>.
- MEISCHNER, D (1991): Kleine Geologie des Kellerwaldes (Exkursion F am 5. April 1991). – Jb. nass. Ver. Naturkde., **73**: 115-142, 10 Abb. Wiesbaden.
- MENDE, K., LINNEMANN, U., NESBOR, H.-D., MILITZER, A., JANSEN, U., KÖNIGSHOF, P., BAHLBURG, H., HOFMANN, M., GERDES, A., BERNDT, J. & NAWRAT, J. (2019): Provenance of exotic Ordovician and Devonian sedimentary rock units from the Rhenish Massif (Central European Variscides, Germany). – *Tectonophysics*, **755**: 127-159, 13 Abb., 11 Taf.; Amsterdam.
- MEYER, K. (1981): Geochemische Untersuchungen an Spiliten, Pikriten, Quarzkeratophyren und Keratophyren des Rhenoharzynikums; Diss. Univ. Göttingen. – 121 S., 13 Abb., 28 Tab.; Göttingen.
- NANCE, R.D., GUTIÉRREZ-ALONSO, G., KEPPIE, J.D., LINNEMANN, U., MURPHY, J.B., QUESEDA, C., STRACHAN, R.A. & WOODCOCK, N.H. (2010): Evolution of the Rheic Ocean. – *Gondwana Res.*, **17** (2-3): 194-222: Amsterdam.
- NANCE, R.D., GUTIÉRREZ-ALONSO, G., KEPPIE, J.D., LINNEMANN, U., MURPHY, J.B., QUESEDA, C., STRACHAN, R.A. & WOODCOCK, N.H. (2012): A brief history of the Rheic Ocean. – *Geosci. Frontiers*, **3** (2): 125-135; Amsterdam.
- NESBOR, H.-D. (1997): Petrographie der vulkanischen Gesteine. – In: BENDER, P., LIPPERT, H.-J. & NESBOR, H.-D. (1997): Blatt 5216 Oberscheld, 2. Aufl. - Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000: 169-207, Abb. 8-14, Tab. 16-18; Wiesbaden.
- NESBOR, H.-D. (2004): Paläozoischer Intraplattenvulkanismus im östlichen Rheinischen Schiefergebirge – Magmenentwicklung und zeitlicher Ablauf. – *Geol. Jb. Hessen*, **131**: 145-182, 21 Abb., 4 Tab.; Wiesbaden.
- NESBOR, H.-D. (2019): Alpinotype Deckentektonik im Rheinischen Schiefergebirge (Exkursion I am 26. April 2019). – *Jb. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.*, **101**: 197-226, 12 Abb.; Stuttgart.
- NESBOR, H.-D. (2021): Geotektonisch-paläogeographische Entwicklung Mitteleuropas im Paläozoikum. – In: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: Geologie von Hessen. – 17-33, 7 Abb., Stuttgart (Schweizerbart).
- NESBOR, H.-D. (2024): Paläozoischer Vulkanismus im Rheinischen Schiefergebirge als Indikator für die geotektonischen Entwicklung in Mitteleuropa. *Geol. Jb. Hessen*, **140**: (im Druck).
- NESBOR, H.-D., BUGGISCHE, W., FLICK, H., HORN, M. & LIPPERT, H.-J. (1993): Vulkanismus im Devon des Rhenoharzynikums. Faziale und paläogeographische Entwicklung vulkanisch geprägter mariner Becken am Beispiel des Lahn-Dill-Gebietes. – *Geol. Abh. Hessen*, **98**: 3-87, 37 Abb., 8 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.
- SALAMON, M. (2003): Grobklastische Beckensedimente (Olisthostrome) des Oberen Mitteldevons im Lahn-Dill-Gebiet – Zeugen einer aktiven Rift-Tektonik. – *Geol. Abh. Hessen*, **111**: 1–209, 61 Abb., 10 Tab., 8 Taf.; Wiesbaden.
- SCHMIDT, H (1926): Der Kellerwaldquarzit – Eine Fazies des Unterkarbons. – *Z. dt. geol. Ges., Monatsber.*, **77**: 202; Berlin.
- SCHMIDT, H (1933): Der Kellerwaldquarzit mit einer Beschreibung seiner Fauna und der aus der Tanner Grauwacke. – *Geol. Palaeont. Abh., N.F.*, **19** (23): 3-55, 297-3494 Abb., 5 Taf.; Jena.

- STETS, J. & SCHÄFER, A. (2002): Depositional Environments in the Lower Devonian Siliciclastics of the Rheinohercynian Basin (Rheinisches Schiefergebirge, W-Germany) – Case Studies and a Model – *Contr. Sed. Geol.*, **22**: 1-77, 35 Abb., 3 Tab.; Stuttgart.
- STETS, J. & SCHÄFER, A. (2011): The Lower Devonian Rheinohercynian Rift – 20 Ma of sedimentation and tectonics (Rhenish Massif, NW-Germany). – *Z. dt. Ges. Geowiss.*, **162**: 93-115, 18 Abb.; Stuttgart.
- STRUVE, W. (1975): die ältesten Fossilien Hessens. – *Natur u. Museum*, **105**: 268-282; Frankfurt a. M.
- RAUMER, J.F. VON, NESBOR, H.-D. & STAMPFLI, G.M. (2017): The north-subducting Rheic Ocean during the Devonian: consequences for the Rheinohercynian ore sites. – *Int. J. Earth Sci.*, **106** (7): 2279-2296, 7 Abb.; 1 Tab.; Heidelberg.
- WEDEPOHL, K.H., MEYER, K. & MUECKE, G.K. (1983): Chemical Composition and Genetic Relations of Meta-Volcanic Rocks from the Rheinohercynian Belt of Northwest Germany. – In: MARTIN, H. & EDER, F.W. (Hrsg.): *Intracontinental Fold Belts.* – 231-256, 7 Abb., 8 Tab.; Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (Springer).
- WEYL, R. (Hrsg.) (1967): *Geologischer Führer durch die Umgebung von Gießen.* – 184 S., 44 Abb., 7 Tab.; Gießen (Mittelhess. Druck- und Verlagsgesellschaft).
- WEYL, R. (Hrsg.) (1980): *Geologischer Führer durch die Umgebung von Gießen.* – 193 S., 46 Abb., 7 Tab.; Gießen (Mittelhess. Druck- und Verlagsgesellschaft).
- WIEREICH, F. (1999): Orogene Prozesse im Spiegel synorogener Sedimente – Korngefüge-kundliche Liefergebietsanalyse siliziklastischer Sedimente im Devon des Rheinischen Schiefergebirges. – *Marburger Geowiss.*, **1**: 1-224, 36 Abb., 20 Taf.; Marburg.
- WITIG, R. (1974): Tiefobere Devonische Grauwacken unter der Hessischen Senke. – *Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch.*, **102**: 46-57, 3 Abb.; Wiesbaden.

PROF. DR. HEINER FLICK Carl-Orff-Ring 5
87616 Marktoberdorf
E-Mail: heiner-flick@t-online.de

DR. HEINZ-DIETER NESBOR
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustr. 186
65203 Wiesbaden
E-Mail: dieter-nesbor@t-online.de

Manuskripteingang: 3. Juli 2024

Geogefahren in Hessen – Erfassung und Bewertung von Georisiken durch den Geologischen Landesdienst des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)

SVEN SCHMIDT & BENJAMIN HOMUTH

Geogefahren, Rutschungen, Subrosion, Erdbeben, Geologie von Hessen

Kurzfassung: Die Fachgebiete Ingenieurgeologie und Geophysik des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) befassen sich mit der Bewertung der Auswirkungen von Gesteins- und Gebirgseigenschaften oder natürlicher Erschütterungen auf Bauvorhaben bzw. Bauwerke. So werden Locker- und Festgesteine in Hessen hinsichtlich ihrer Eignung als Baugrund und Baustoff erfasst und charakterisiert. Besondere Beachtung finden dabei solche Eigenschaften, die zu Baugrundproblemen oder Geogefahren führen können. Hier sind insbesondere die Gefährdungen durch Erdfälle und -senken (Subrosion), Erdrutsche und Steinschlag zu nennen. Erdbeben sind natürliche Erschütterungen infolge tektonischer Aktivität der Erdkruste, die ebenfalls einen negativen Einfluss auf Bauwerke oder Hänge haben können. Das HLNUG registriert, dokumentiert und bewertet solche Ereignisse im Hessischen Erbebedienst (HED). Informationen zu den o.g. Geogefahren werden landesweit gesammelt, archiviert und stehen öffentlichen wie privaten Bauherren für die Nutzung der Geosphärenressource Bauraum zur Verfügung. Neben der Erfassung solcher Ereignisse ist die Planung und Durchführung von Untersuchungen zum Ausmaß von Geogefahren (Georisiken) aus dem geologischen Untergrund und die Konzipierung von Vorkehrungen zu ihrer Begrenzung oder Vermeidung eine wichtige Aufgabe der Ingenieurgeologen und Geophysiker des HLNUG.

Geohazards in Hessen – Recording and assesment of georisiks by the Geological Survey of the Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)

Geohazards, landslides, subrosion, earthquakes, geology of Hesse

Abstract: The engineering geology and geophysics sections of the Hessian State Office for Nature Conservation, Environment and Geology (HLNUG) deal with the assessment of the impacts of rock and mountain properties or natural vibrations on construction projects or structures. Loose and solid rocks in Hesse are recorded and characterized regarding their suitability as building ground and construction material. Special attention is given to properties that can lead to ground problems or geohazards. In particular, the hazards of sinkholes and subsidence (subrosion), landslides, and rockfalls are mentioned. Earthquakes are natural vibrations due to tectonic activity of the earth's crust, which can also negatively affect structures or slopes. The HLNUG records, documents, and evaluates such events in the Hessian Earthquake Service (HED). Information on the aforementioned geohazards is collected, archived, and made available to public and private builders for the use of the geosphere resource building space. In addition to recording such events, planning and conducting investigations into the extent of geohazards (georisiks) from the geological subsurface and designing measures to limit or avoid them is an important task of the engineering geologists and geophysicists at HLNUG.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	112
2	Rutschungen und Felsstürze	113
3	Erdfälle und -senken	118
4	Das Fachinformationssystem (FIS) „Geogefahren Hessen“	122
5	Erdbeben in Hessen	126
5.1	Erdbebenserie im Taunus	129
6	Literatur	133

1 Einleitung

Das Erkennen und Erfassen von Geogefahren ist entscheidend für eine effektive Landesplanung. In Hessen ist das Auftreten von geologisch verursachten Naturgefahren wie Rutschungen und Felsstürzen, Erdfällen und -senken und Erdbeben seit langem bekannt (ADERHOLD, HEINRICHS & HOMUTH 2020) und diese Ereignisse werden vom Geologischen Landesdienst in Hessen seit über 75 Jahren fortlaufend dokumentiert. Geogefahren treten regional in unterschiedlichen Ausmaßen und Erscheinungsformen auf. Neben den geologischen und tektonischen Strukturen von Hessen, als geogene Ursache für Geogefahren, werden solche Ereignisse häufig von extremen Wetterereignissen beeinflusst und ausgelöst. Auch menschliche Eingriffe in natürliche geologische Systeme aufgrund von Lagerstättenabbau und Bautätigkeit können solche Geogefahren (z. B. Rutschungen, anthropogen induzierte Erdbeben usw.) auslösen oder reaktivieren. Die Auftretensdichte und -häufigkeit solcher Geogefahrenereignisse ist von der örtlichen Geologie und von langfristig ablaufenden geologischen Prozessen der exogenen und endogenen Dynamik der Erde abhängig. Besonders Geogefahren als Folge von Prozessen der exogenen Dynamik (Verwitterung und Erosion), also Rutschungen, Steinschlag und Subrosionsprozesse, werden von klimatischen und morphologischen Gegebenheiten in sehr starkem Maße bestimmt. Erdbeben treten in Zusammenhang mit tektonisch aktiven Störungszonen auf und sind als Prozesse der endogenen (aus dem Erdinneren kommenden) Dynamik der Erde von Klimaeinflüssen unabhängig.

Die Geogefahr „Rutschungen“ verursacht erhebliche Schäden an Siedlungen und Verkehrsstraßen und kann unter Umständen Menschenleben gefährden. Die Begriffe „Rutschung“ oder auch „Massenbewegung“ umfassen als Überbegriffe die natürlichen Erscheinungen der Erosion und Reliefbildung, z. B. Erdrutsche, Felsstürze, Steinschlag, Schlammströme, Muren und Hangbewegungen. Treibende Ursache dieser Vorgänge ist die Schwerkraft, die zur Verlagerung von Erd- und Felsmassen talabwärts führt. Die hierbei zu beobachtenden Bewegungsabläufe sind sehr vielfältig und von verschiedenen Faktoren abhängig. Wasser (Klima),

Reliefenergie und die Beschaffenheit des geologischen Untergrunds spielen dabei die Hauptrolle. Die Bewegungen können sehr schnell (z. B. Felsstürze, Muren), aber auch sehr langsam (Talzuschub, Bodenkriechen) ablaufen. Die dabei bewegten Massen erreichen Volumina von wenigen Kubikmetern bis zu einigen hunderttausend Kubikmetern. Auch in Hessen treten solche Rutschungen in vielen geologischen Einheiten in unterschiedlichster Form und Dichte auf (siehe Abb. 1).

In den nördlichen und östlichen Landesteilen Hessens ist die sogenannte „Subrosionsgefährdung“ ein Schwerpunkt des ingenieurgeologischen Interesses (siehe Abb. 6). Dieser Begriff umfasst alle Erscheinungen, die mit der Auslaugung (Lösung) wasserlöslicher Gesteine im Untergrund verbunden sind. Infolge der Austrocknung prähistorischer Meere im mitteleuropäischen Raum während der geologischen Epochen des Zechsteins, des Oberen Buntsandsteins (Röt), des Mittleren Muschelkalks und des Mittleren Keupers unter wüstenartigen, ariden Klimabedingungen sind auf einem großen Teil der Landesfläche Hessens marine, evaporitische Ablagerungen („Eindampfungsgesteine“) in Form von Salz-, Gips- und Karbonatgesteinen vorhanden (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2021). Deren Auflösung und Verkarstung durch Oberflächen- und Grundwasser führt zu langsamen Senkungen beziehungsweise plötzlichen Einbrüchen an der Erdoberfläche. Diese Verformungen der Erdoberfläche führen immer wieder zu Schäden an Gebäuden, Verkehrswegen, Leitungstrassen und landwirtschaftlichen Nutzflächen.

Südhessen mit seinen Ballungsräumen liegt im nördlichen Teil einer überregional bedeutenden und aktiven tektonischen Störungszone, dem sogenannten Oberrheingraben. Die Erbenaktivität in diesem Bereich ist die Folge der Kollision zwischen Afrikanischer und Eurasischer Platte. Die Druckbelastung durch die Afrikanische Platte führt zu Spannungen in den nördlich anschließenden Plattenbereichen der Eurasischen Kontinentalplatte. Der Oberrheingraben erfährt von Süden her einen Druck. Dieser Druck erzeugt Spannungen in der Erdkruste, welche sich über Jahrzehnte oder Jahrhunderte aufbauen und sich in wenigen Sekunden ruckartig in Form eines Erdbebens lösen. Erdbeben treten vermehrt an vorhandenen Störungszone in der Erdkruste auf. In Hessen treten jährlich mehrere Erdbeben auf, deren Erschütterungen von der Bevölkerung wahrgenommen werden. Auch Erdbeben, die zu Gebäudeschäden führten, sind in Hessen bereits aufgetreten.

2 Rutschungen und Felsstürze

Durch die Gravitation bedingte Rutschungen in verschiedensten Erscheinungsformen und -größen können prinzipiell in fast ganz Hessen auftreten. Ungünstige geologische und hydrogeologische Verhältnisse in Verbindung mit der Morphologie sind die geologisch bedingten Ursachen, die dann durch meteorologische Er-

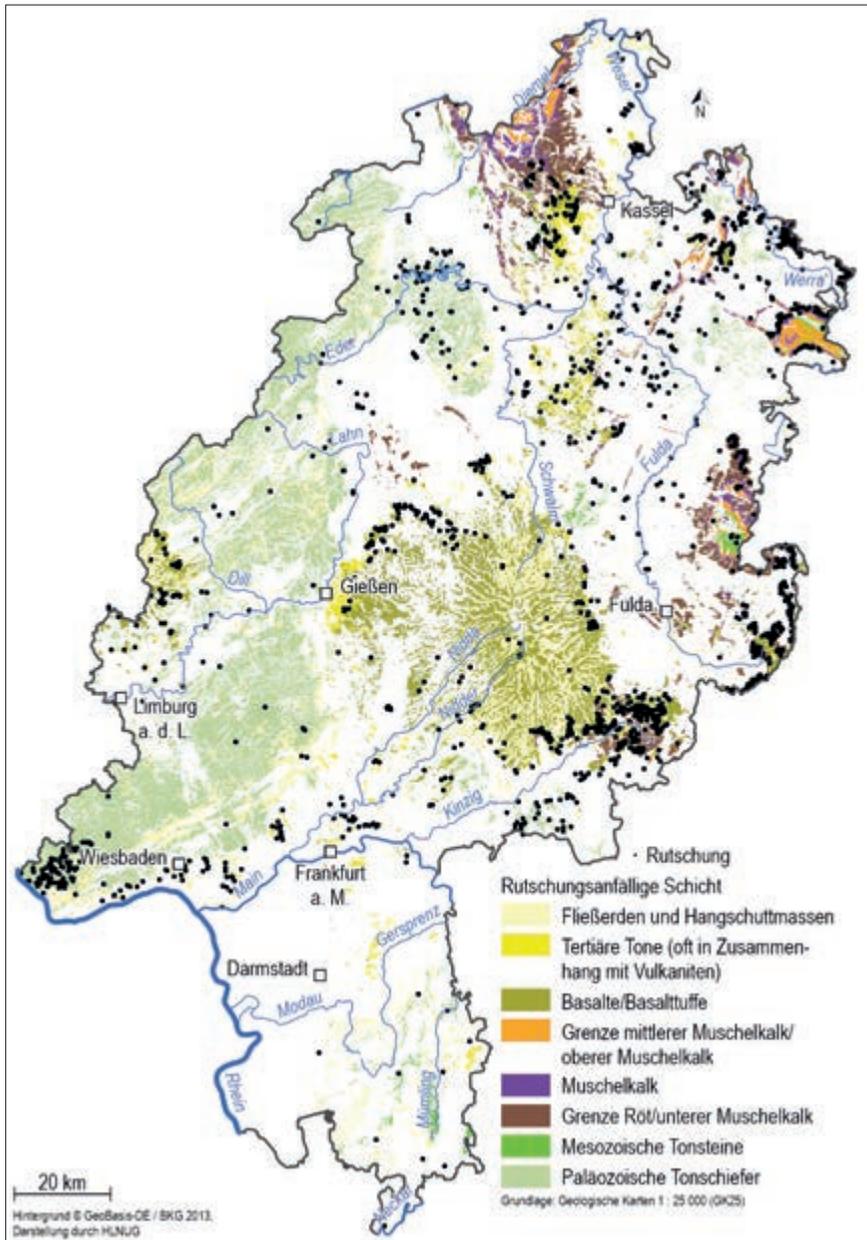


Abbildung 1: Die Verbreitung von Rutschungen in Hessen und ihre Abhängigkeit von der regionalen Geologie.

Figure 1: The distribution of landslides in Hesse and their dependence on the regional geology.

eignisse wie z. B. Schneeschmelze oder Starkniederschlägen als Auslöser Rutschungen oder Felsstürze hervorrufen. Im Laufe der Erdgeschichte wurden in Hessen unterschiedliche Gesteinsschichten gebildet, die aufgrund ihrer mineralogisch-petrographischen Eigenschaften und geologisch-tektonischer Vorgeschichte unterschiedlich schnell und stark verwittern und erodieren. Sie neigen deshalb mehr oder weniger zur Entstehung von Rutschungen (Abb. 1). Einen umfassenden Überblick über Rutschungen in Hessen und ihre Abhängigkeit von regionalen geologischen Verhältnissen ist in ADERHOLD, ALBERTI, HEINRICHS & HOMUTH (2024) dargestellt.



Abbildung 2.: Abrissbreich der Rutschung im Berstädter Markwald (Gemeinde Wölfersheim, Wetteraukreis), der einen Waldweg zerstörte; Foto: HLNUG.

Figure 2: Scarp area of the landslide in the Berstädter Markwald (Municipality of Wölfersheim, Wetterau District), that destroyed a forest road; photo: HLNUG.

Treten solche Massenbewegungen in Siedlungen oder im Einflussbereich von Verkehrswegen auf, besitzen sie ein erhebliches Schadenspotenzial. Auch kleinere Rutschungen stellen eine Gefahr für Siedlungsgebiete oder Verkehrswege dar. Steile Hänge und ungünstige geologische Standortbedingungen fördern in der Regel das Entstehen von Rutschungen. Dass dies nicht immer so sein muss, zeigt sich z. B. im Ausstrichbereich tertiärer Tonschichten und verwitterter tertiärer Vulkanite. Die Hangneigung beträgt hier oft nur wenige Grad, trotzdem reichen geringe

Eingriffe in das Hanggleichgewicht z. B. durch langanhaltende Niederschläge oder minimale Veränderungen der Hanggeometrie aus, um Rutschungen auszulösen. So ereignete sich z. B. 2020 im Berstädter Markwald (Gemeinde Wölfersheim, Wetteraukreis) eine flache Rutschung in rutschungsanfälligen tertiären Sedimenten, die eine überregionale Trinkwasserleitung gefährdete (Abb. 2). Die gleichen Phänomene sind auch im Ausstrich von Gesteinen des Oberen Muschelkalks zu beobachten, die zum „Fließen“ oder „Kriechen“ neigen.

Eine „bucklige“ Hangmorphologie ist meist ein deutlicher Hinweis auf schon abgelaufene Bewegungen. Obstbäume sterben aufgrund von abgesicherten Wurzeln ab und können so auf anhaltende oberflächennahe Bewegungen hindeuten. Der Säbelwuchs von Bäumen oder die unterschiedliche Schrägstellung von Bäumen eines sogenannten „betrunkenen Waldes“ weisen auf anhaltende rezente Bewegungen eines Hanges hin. Auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen halten sich die Schäden durch Rutschungen meist in Grenzen und werden von den Eigentümern hingenommen. Treten Rutschungen dagegen in Gebieten mit empfindlichen Einrichtungen menschlicher Infrastruktur zusammen, sind die Schäden oftmals erheblich. In besonderem Maße von derartigen Gefährdungen betroffen sind, schon aufgrund ihrer Länge, Verkehrswege. Bei der Planung von Verkehrswegen werden alte Rutschmassen oft nicht erkannt, was zu großen Problemen führen kann. Die B 458 westlich von Dietges in der Rhön musste in den 1980er-Jahren aufgrund von reaktivierten alten Rutschungen, die die alte Straßentrasse schwer beschädigten, nach Norden auf die gegenüberliegende Talseite verlegt werden. Eine Verlegung der Trasse erwies sich damals als wirtschaftlicher und nachhaltiger als eine Sanierung der beschädigten Bundesstraße. Nicht immer ist eine Linienführung von Straßen oder Schienen möglich, die alte Rutschungen oder rutschungsanfällige Gesteinsschichten zu umgehen vermag. Der technische und finanzielle Aufwand zum Bauen in solchen Rutschgebieten ist dann oft enorm. Neben durch natürliche Faktoren verursachten Rutschungen werden jedoch auch immer wieder im Zuge von Baumaßnahmen Rutschungen ausgelöst bzw. alte, vor hunderten oder tausenden Jahren entstandene Rutschungen aktiviert. Diese befinden sich häufig in einem sehr labilen Hanggleichgewicht und oft reichen geringe Eingriffe in die Hanggeometrie, z. B. während Straßenbauarbeiten, um die Rutschung teilweise oder als Ganzes zu reaktivieren.

Die häufigste rezente Bewegungsform bei Massenbewegungen ist das „Fallen“. Steinschläge oder Felsstürze an Hängen treten in allen geologischen Abfolgen auf, die natürliche oder künstliche Steilkanten bilden. Die Bandbreite der hierbei bewegten Volumina von Fels und kohäsiven Lockergesteinen reicht von weniger als 1 m^3 bei einfachem Steinschlag bis zu mehreren hunderttausend Kubikmetern bei einem Bergsturz. Im nordhessischen Ringgau ereignete sich am Schickeberg bei Breitau (Werra-Meißner-Kreis) 1956 ein größerer Felssturz an der Schichtgrenze von Tonsteinen des Oberen Buntsandstein (Röt) zu Kalksteinschichten des Unteren Muschelkalks. Im Zuge dieses Felssturzes wurden ca. 250.000 m^3 hangabwärts

bewegt (ACKERMANN 1958). Bei einem Felssturz am Nollig in Lorch am Rhein (Rheingau-Taunus-Kreis) 1919/20 trat eine großflächige Felsgleitung auf. Blockmassen der unterdevonischen Hunsrückschiefer stürzten bis an die unterhalb liegenden Gebäude der Ortschaft und beschädigten diese zum Teil schwer (PRINZ & STRAUSS 2018; ADERHOLD et al. 2024).

Solche imposanten Bergstürze sind jedoch die Ausnahme. Meist stürzen nur wenige Steine und Felsbrocken mit einem Gesamtvolumen von unter 1 m^3 aus einer Felswand oder einem steilen Hang ab (Abb. 3). Stehen unterhalb der Absturzstelle der Felsmassen Häuser oder verlaufen dort Verkehrswege, können jedoch auch in solchen Fällen Sach- und Personenschäden die Folge sein. Zur Beurteilung der Steinschlag- bzw. Felssturzgefährdung ist es deshalb wichtig zu wissen, wo gefährdete Bereiche liegen und ob dort schon einmal Felsstürze stattgefunden haben. Die Beurteilung des Trennflächengefüges der anstehenden geologischen Schichten ist bei der Gefährdungsbeurteilung ebenso unverzichtbar wie Hangneigungskarten auf Grundlage von hochgenauen digitalen Höhenmodellen. Durch Abgleich der so ermittelten geologischen Gefährdung mit der vorliegenden Landnutzung können besonders gefährdete Gebiete erkannt werden.



Abb. 3: Kleiner Felssturz an der L 3031 zwischen Beuerbach (Gemeinde Hünstetten; Rheingau-Taunus-Kreis) und Bad Camberg (Landkreis Limburg-Weilburg) in unterdevonischen Ton-schiefern im März 2022; Foto: HLNUG.

Figure 3: Small rockfall on the L 3031 between Beuerbach (Municipality of Hünstetten; Rheingau-Taunus District) and Bad Camberg (Limburg-Weilburg District) in lower Devonian clay shales in March 2022; photo: HLNUG.

3 Erdfälle und -senken

Der Begriff „Erdfall“ bezieht sich in Mitteldeutschland und Hessen auf mehr oder weniger rundliche, Dezimeter- bis 10er-Meter große, schacht- bis trichterförmige Einbrüche an der Erdoberfläche (Abb. 4), deren Entstehung auf den Einsturz natürlich entstandener Hohlräume im Untergrund zurückgeführt wird. Schon früh erkannte man aufgrund von Bergbautätigkeit den Zusammenhang zwischen Hohlraumbildung und wasserlöslichen Gesteinen im Untergrund als Ursache für das Auftreten von Erdfällen (BRUST 2008; KUPETZ & BRUST 2008). Durch Subrosion entstehen meist entlang von Klüften und Störzonen Hohlräume im Untergrund, die durch Einsturz bis an die Erdoberfläche hochbrechen können und dort die charakteristischen schacht- bis trichterförmigen Erdfälle bilden. Liegen diese Erdfälle im Wald, bleiben sie lange unverändert, während sie auf landwirtschaftlich genutzten Flächen oder in Siedlungsgebieten schnell verfüllt und eingeebnet werden.



Abbildung 4: Dieser Erdfall bei Meinhard-Grebendorf (Werra-Meißner-Kreis) ist durch Auslaugung von Anhydriten und Gipsen des Oberen Buntsandstein und durch den Einbruch des dadurch gebildeten unterirdischen Lösungshohlraums entstanden; Foto: HLNUG 2020.

Figure 4: This sinkhole near Meinhard-Grebendorf (Werra-Meißner District) was formed by the dissolution of anhydrites and gypsum in the Upper Buntsandstein and the subsequent collapse of the resulting underground cavity; photo: HLNUG 2020.

Dieses Hochbrechen kann in verschiedenen Phasen über einen längeren Zeitraum ablaufen (Abb. 5) oder aber auch in einem einzigen schlagartigen Ereignis erfolgen. Neben diesen Bruchereignissen, die zur Bildung von Erdfällen führen, sind auch viele Erd- bzw. Subrosionssenken in Hessen bekannt. Sie entstehen, wenn das Deckgebirge über dem Subrosionshorizont so instabil ist, dass es nicht

zur Ausbildung von größeren Hohlräumen kommen kann. Das durch die subterranen Verwitterung entstehende Massendefizit wird durch das mehr oder weniger kontinuierliche Nachsinken der Deckschichten kompensiert. An der Erdoberfläche entstehen Senken mit flachen Rändern, die je nach Lage oft vernässen und Feuchtgebiete oder flache Seen bilden.

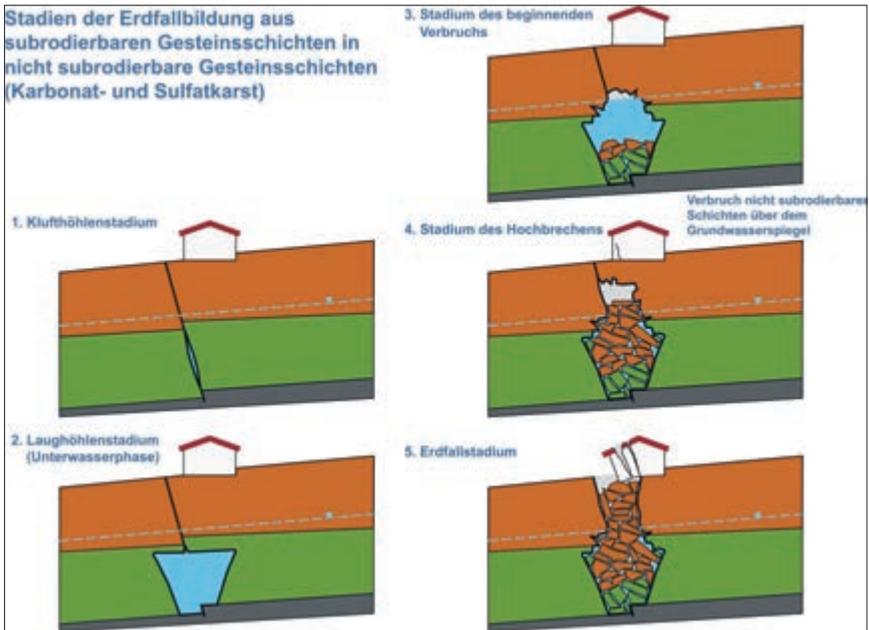


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Hochbrechens eines durch Subrosion entstandenen Hohlraums. Solche Hohlraumbildung kann oberflächennah in wenigen Metern Tiefe auftreten, aber auch in mehreren hundert Meter Tiefe (aus SCHMIDT & KATZSCHMANN 2015a).

Figure 5: Schematic representation of the collapse of a cavity formed by subrosion. Such cavity formation can occur near the surface at depths of just a few meters, but also at depths of several hundred meters (from SCHMIDT & KATZMANN 2015a).

Infolge der geologischen Geschichte Hessens lagern unter einem großen Teil der Landesfläche auslaugungsfähige Gesteinsschichten verschiedenen Alters in unterschiedlichen Tiefen (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2021). Damit ist in Teilen Hessens die Grundvoraussetzung für Subrosionsprozesse gegeben. Seit der Ablagerung von Evaporiten (Eindampfungsgesteinen) vor ca. 255 Millionen Jahren im Zechstein (Oberperm), in dem die ältesten und mächtigsten Folgen auslaugungsfähiger Sedimente in Hessen abgelagert wurden, kam es bis zum Ende der Trias vor 200 Millionen Jahren auch im Oberen Buntsandstein, im Mittleren Muschelkalk und im Mittleren Keuper zur Bildung von Salinarabfolgen im Gebiet des heutigen Nord- und Ost Hessens. In diesen

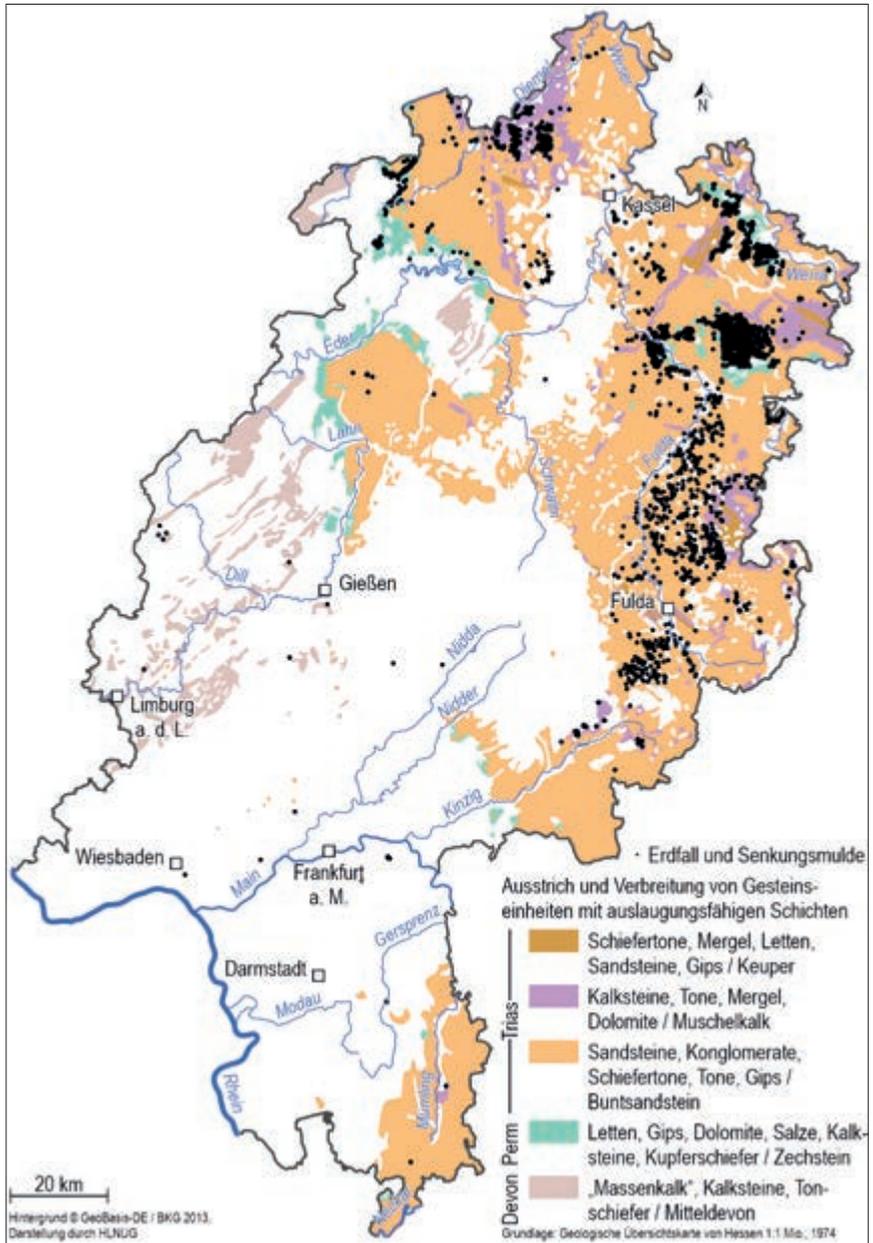


Abbildung 6.: Bekannte Erdfälle und -senken in Hessen und die Abhängigkeit zur regionalen Geologie.

Figure 6: Known sinkholes and depressions in Hesse and their relationship to regional geology.

Salinaren kam es zur Ausfällung und Ablagerung von chemischen Sedimenten wie Steinsalzen, Sulfaten in Form von Gips bzw. Anhydrit und Karbonaten. Alle diese genannten Gesteine besitzen eine unterschiedlich gute Wasserlöslichkeit. Steinsalz und Gipse sind sehr viel leichter löslich als Kalke (Löslichkeitsverhältnis Steinsalz - Gips - Kalk: 10.000 -100 -1). Die Hauptverbreitungsgebiete dieser Gesteine sind die nord- und osthessischen Triasgebiete (siehe auch Abb. 6), unter denen Salinarabfolgen des Zechsteins anstehen oder anstanden (ADERHOLD 2005). Prinzipiell subrosionsgefährdet sind neben Steinsalz- und Gipsschichten auch alle Kalkgesteine, also auch die Karbonate der Triasgebiete, des Tertiärs im nördlichen Oberheingraben und der hessischen Senke oder devonische Massen- und Rifffalke des Rheinischen Schiefergebirges.



Abbildung 7: Der sogenannte „Nasse Wolkenbruch“, ein Großerdfall bei Trendelburg (Landkreis Kassel), der durch die Lösung von Zechstein-Steinsalz in mehreren hundert Metern Tiefe entstanden ist; Foto: HLNUG.

Figure 7: The so-called „Nasser Wolkenbruch,“ a large sinkhole near Trendelburg (Kassel District), formed by the dissolution of Zechstein rock salt at depths of several hundred meters; photo: HLNUG.

Mindestens seit dem jüngeren Mesozoikum (Oberkreide) unterliegt der Teil Hessens, auf dem zwischen der Zechsteinzeit im Oberen Perm und der Trias Evaporite abgelagert wurden, einer verstärkten Verwitterung und Abtragung. Diese

Prozesse führten auch zu einer zunehmenden Verkarstung bzw. Subrosion tiefer liegender Salinargesteine. Besonders intensive Verwitterungsphasen traten im Tertiär und während der pleistozänen Interglaziale auf. Viele dieser auslaugungsfähigen Gesteinsfolgen haben über tektonische Strukturen Verbindung mit fließendem Grundwasser. Dies führte und führt immer wieder zum Auftreten von Erdfällen oder -senken. Die Häufung von größeren Erdfallereignissen während der letzten Jahre im östlich angrenzenden Thüringen (SCHMIDT & KATZSCHMANN 2015a, 2015b; SCHMIDT 2017; SCHMIDT et al. (2021) zeigt, dass die Gefährdung durch Erdfälle auch in Hessen nicht aus dem Auge verloren werden darf. Auch in Hessen gibt es zahlreiche Beispiele für große Erdfallereignisse in der Vergangenheit, wie die Trendelburger Wolkenbrüche oder das Seeloch bei Kathus. Die Entstehung der Trendelburger Wolkenbrüche, zwei Großerdfällen, dem „Trockenen und dem Nassen Wolkenbruch“, wird auf Auslaugungsprozesse (sog. tiefer Salinarkarst) in den wasserlöslichen Gesteinsschichten (Steinsalz und Anhydrit/Gips) der Zechstein-Formation (Oberer Perm) zurückgeführt. Dies wasserlöslichen Gesteinsschichten stehen unterhalb der Schichten des Unteren und Mittleren Buntsandsteins in 800 bis 1000 m Tiefe an. Der „Nasse Wolkenbruch“ hat einen Durchmesser von ungefähr 150 m und ist mit Wasser gefüllt (Abb. 7), der „Trockene Wolkenbruch“ hat einen Durchmesser von 70 m und eine Tiefe von rund 20 m. Das Seeloch bei Kathus (Bad Hersfeld; Landkreis Hersfeld-Rothenburg) mit einem Durchmesser von 100 m geht ebenfalls auf Auslaugung von Steinsalzen des Oberen Perms in ca. 500 m Tiefe zurück. Diese Großerdfälle zeigen, welches Gefahrenpotential solch ein Erdfall hat, wenn er in Siedlungen auftreten würde.

4 Das Fachinformationssystem (FIS) „Geofahren Hessen“

Als Folge der prognostizierten globalen Klimaänderung muss damit gerechnet werden, dass sich Probleme, die mit extremen Witterungsereignissen verbunden sind, auch in Hessen häufen. Die Klimaänderung äußert sich direkt im vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen wie zum Beispiel Starkregen, lang anhaltenden Niederschlagsperioden, Hochwässern, Sturzfluten, die zu dem vermehrten Auftreten von Hangrutschungen führen können. Erst Anfang August 2024 kam es in dem Trendelburger Ortsteil Gottsbüren (Landkreis Kassel) nach sturzflutartigen Regenfällen zu Überschwemmungen und kleineren Hangrutschungen mit erheblichem Schadenspotential. Aber auch langanhaltende Trockenperioden vermögen durch tiefgreifende Austrocknung des Baugrunds Schäden an Häusern und Gebäuden zu verursachen.

Ein Kataster mit allen in Hessen bekannten Rutschungen, Erdfällen usw. aus Vergangenheit und Gegenwart ist notwendig, um besonders gefährdete Gebiete zu lokalisieren und abgrenzen zu können. Die Prozessräume, in denen z. B. Lösungsvorgänge von Subrosionsprozessen ablaufen, befinden sich überwiegend im

tiefen Untergrund. Sie sind kaum oder nur mit sehr hohem technischen und finanziellen Aufwand zu erkunden. Eine aussagekräftige, belastbare flächenhafte Bewertung größerer Landesteile ist näherungsweise nur über die möglichst komplette Erfassung der Auswirkungen an der Erdoberfläche möglich. Auch besonders rutschungsanfällige Gebiete können durch eine systematische Erfassung aller bekannten oder morphologisch erkennbaren Rutschereignisse besser abgegrenzt und bewertet werden. Durch die landesweite ingenieurgeologische Kartierung des HLNUG werden solche Geogefahren mit ihren Dimensionen und räumlichen Lage fortlaufend erfasst. Gebiete, in denen Geogefahren besonders aktiv sind, weisen sich durch regionale Häufungen z. B. von Rutschungen aus. Durch Abgleich mit der lokalen geologischen Situation kann das Ausmaß des bestehenden Risikos in solchen Gebieten weiter differenziert werden. Analog dazu können in der Vergangenheit abgelaufene Rutschungen als Fläche identifiziert und kartiert werden. Eine räumliche Häufung zeigt auch hier besonders rutschungsanfällige Gebiete und deren geologische Ursache auf.

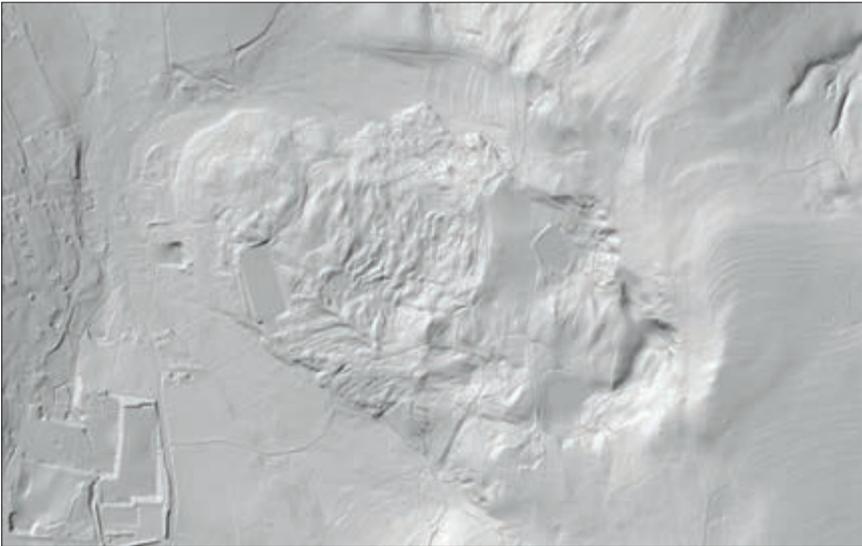


Abbildung 8: Schummerungskarte eines auf LIDAR-Daten basierenden digitalen Geländemodells (DGM), auf der deutlich die morphologischen Merkmale einer alten Rutschung bei Reulbach in der Rhön (Landkreis Fulda) zu erkennen sind. In der rechten Bildhälfte ist der steile Abrissbereich erkennbar, dem die Rutschmassen mit „buckeliger“ Morphologie vorgelagert sind. An dieser Rutschung sind Gesteine des Oberen Buntsandsteins, des Unteren Muschelkalks und tertiäre Vulkanite beteiligt (SCHMIDT 2000).

Figure 8: Shaded relief map of a digital terrain model (DTM) based on LIDAR data, clearly showing the morphological features of an ancient landslide near Reulbach in the Rhön (Fulda district). The steep scarp can be seen in the right half of the image, with the deposited landslide mass displaying a „hummocky“ morphology. The rocks involved in this landslide include Upper Buntsandstein, Lower Muschelkalk, and Tertiary volcanic rocks (SCHMIDT 2000).

Das HLNUG baut aus diesem Grund derzeit ein Fachinformationssystem (FIS) „Geogefahren Hessen“ auf, in dem Rutschungen und Subrosionsobjekte erfasst werden sollen. Erdbeben werden hier nicht erfasst, da der Hessische Erdbebendienst (HED) diese gesondert registriert, auswertet und dokumentiert. Grundlage des FIS Geogefahren Hessen ist eine relationale Oracle-Datenbank. Hier werden alle wichtigen Informationen erfasst, wie geographische Koordinaten, Alter, Durchmesser, Tiefe, Ursache, verursachte Schäden etc., aber auch Hinweise auf andauernde oder jüngere Aktivität. Die Ausgabe von Datensätzen einzelner Objekte erfolgt später dann über so genannte Berichte. Mit Hilfe der Berichtsprogrammierung wird auch eine Verknüpfung mit dem digitalen Bildarchiv möglich, so dass die Berichte neben den Sachdaten auch Fotos, Skizzen usw. enthalten können. Im FIS „Geogefahren Hessen“ werden diese erhobenen Daten analysiert und verwaltet. In dieser Datenbank werden zukünftig alle Sachdaten zu bekannten Rutschungen oder Subrosionsformen auf dem Gebiet von Hessen zentral gesichert und vorgehalten. Durch die Kombination und Verschneidung raumbezogener Daten aus einem Geo-Informationssystem mit anderen Fachdaten des HLNUG können komplexe Abfragen zum Thema Geogefahren durchgeführt werden.

Zur Bewertung der Gefährdungssituation durch Rutschungen oder Subrosionserscheinungen kann für Bauprojekte schon jetzt auf die im HLNUG erfassten Rutschungen und Rutschungsverdachtsflächen oder Subrosionsformen, deren lokale Häufung und Verdachtsflächen als wichtigste Hinweise zurückgegriffen werden. Diese Daten sind für eine ingenieurgeologische Bewertung der Gefährdung unverzichtbar, deshalb ist eine möglichst lückenlose flächenhafte Aufnahme von solchen Erscheinungen wichtig. Bei neu auftretenden Rutschungen, Felsstürzen, Erdfällen oder -senken usw. ist das HLNUG auf die Mithilfe von lokalen Behörden, Ingenieurbüros und Bürgern angewiesen, die solche Ereignisse melden. Auch Ergebnisse von Baugrunderkundungen, z. B. im Zuge von Straßenbauten, sind für eine Verbesserung dieser Datengrundlage unentbehrlich. Die Verbesserung der regionalen geologischen Kenntnisse erfordert eine fortlaufende Erkundungstätigkeit des geologischen Landesdienstes in den von Geogefahren betroffenen Regionen Hessens. Bei alten, morphologisch noch sichtbaren Formen stehen neben der klassischen ingenieurgeologischen Kartierung heute auch modernere Hilfsmittel, wie z. B. „Digitale Höhenmodelle“ auf Basis von LIDAR-Vermessungsflügen zur Verfügung, die in Verbindung mit GIS-Systemen eine wertvolle Ergänzung darstellen. So wird in Hessen, wie in vielen Teilen Deutschlands, durch die Landesvermessung die Landoberflächen mittels Befliegungen mit Laserscantechnik turnusmäßig neu vermessen. Mit den dabei ermittelten Daten ist es möglich, hochgenaue digitale Geländemodelle zu berechnen, welche die Geländeoberfläche ohne Bewuchs in bisher nicht verfügbarer Qualität darstellen (Abb. 8 und 9). Die dabei sichtbar werdenden, meist fossilen, d. h. vor langer Zeit abgelaufenen Ereignisse hinterlassen oft für die landwirtschaftliche Bearbeitung ungeeignete Flächen und

werden deshalb forstwirtschaftlich genutzt. Schummerungskarten auf Grundlage digitaler Höhenmodelle durch LIDAR-Befliegungen liefern aber auch für diese Bereiche hervorragende Arbeitsgrundlagen.



Abbildung 9: Schummerungskarte auf Grundlage eines LIDAR basierten Geländemodells, kombiniert mit einer digitalen Geologischen Karte. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus Nordhessen östlich von Hundelshausen (Stadt Witzenhausen; Werra-Meißner-Kreis), auf dem deutlich Erdfälle zu erkennen sind. Die Erdfälle sind auf Aulagungsprozesse in Anhydritschichten des Zechsteins (Oberperm) zurückzuführen, die bis in Gesteinsschichten des Buntsandsteins hochgebrochen sind.

Figure 9: Shaded relief map based on a LIDAR-derived terrain model, combined with a digital geological map. The image shows a section of Northern Hesse east of Hundelshausen (City of Witzenhausen; Werra-Meißner District), where sinkholes are clearly visible. These sinkholes are attributed to dissolution processes in anhydrite layers of the Zechstein (Upper Permian), which have been broken through into the Buntsandstein rock layers.

Der Gefährdungsgrad ist in starkem Maße von der Landnutzung abhängig. Auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen ist er meist gering. Erst mit der Bebauung oder der Einbeziehung solcher Flächen in die Bau- und Raumplanung entsteht die Notwendigkeit einer präziseren Untersuchung und Bewertung des Gefahren- und Schadenspotenzials. Die ingenieurgeologischen Fachinformationssysteme (FIS) geben die erforderlichen allgemeinen Hinweise auf Georisikoregionen und den Gefährdungsgrad. Im Bedarfsfall klären dann endgültige, detaillierte, projektbezogene ingenieurgeologische Untersuchungen des Baugrundes vor Ort das konkrete Gefahrenpotenzial.

5 Erdbeben in Hessen

Die Erdbebenaktivität in Hessen wird mit seismischen Stationen des Hessischen Erdbebendienstes (HED) am Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie überwacht. Der HED betreibt mit Stand vom 01.05.2024 23 Messstatio-

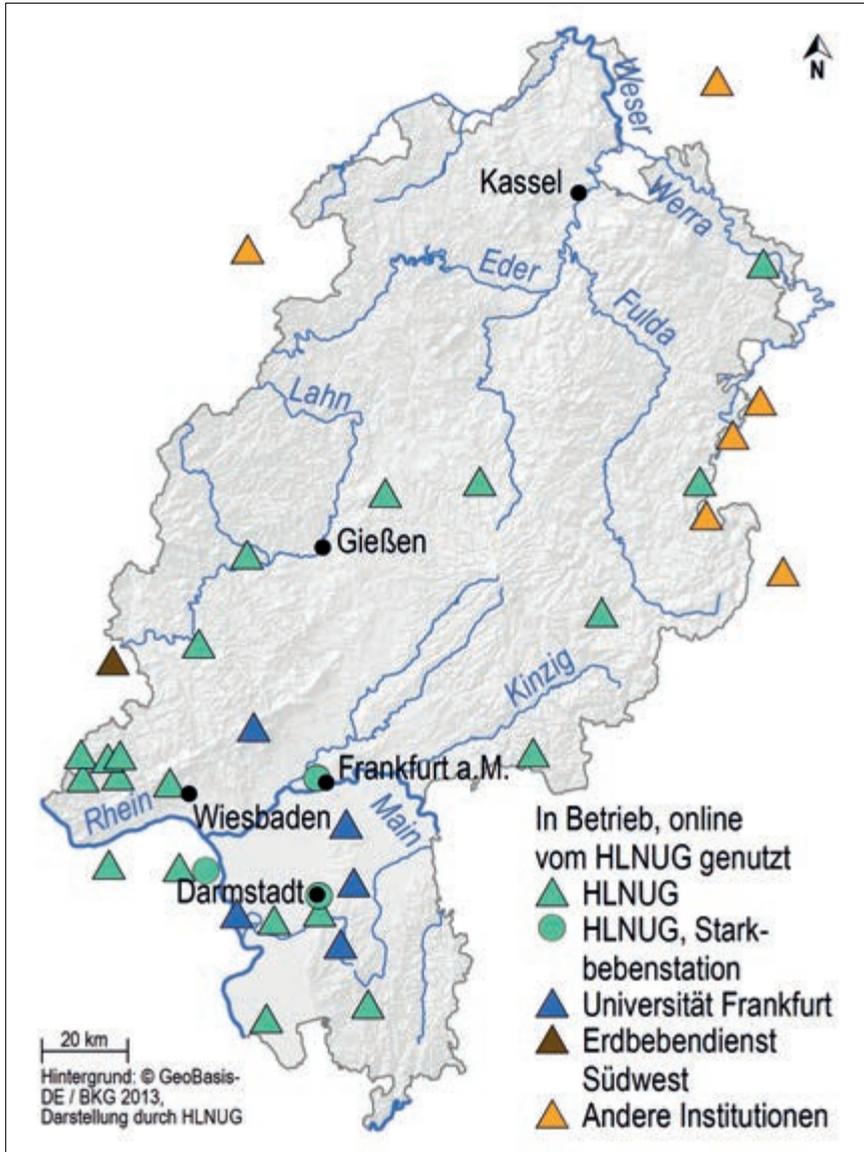


Abbildung 10: Übersichtskarte der Messstationen des HED und angrenzender Institutionen.
 Figure 10: Map of earthquake stations of the HED and neighbouring institutions.

nen. Die Goethe Universität Frankfurt betreibt eine zum Deutschen Regionalnetz zugehörige Erdbebenstation auf dem Kleinen Feldberg im Taunus, deren Daten vom HED verwendet werden. Zusätzlich werden aktuell vier temporäre Stationen im Taunus östlich von Bad Schwalbach betrieben. Des Weiteren steht der HED im Datenaustausch mit den Erdbebendiensten der angrenzenden Bundesländer. Die Stationsverteilung ist in Abb. 10 dargestellt.

Die Erdbebenaktivität in Hessen konzentriert sich vor allem auf den südlichen Landesteil. Hier werden zahlreiche schwache Erdbeben unterhalb der Fühlbarkeitsschwelle registriert. Daneben erinnern aber auch immer wieder schwach fühlbare Erdbeben daran, dass der Untergrund in Hessen tektonisch aktiv ist. Alle 10 bis 20 Jahre ist außerdem mit einem mittelschweren Erdbeben (Magnitude $M_L=3,5$ bis 5) zu rechnen, das potentielle Schäden nach sich ziehen kann (ADERHOLD et al. 2024).

Der hessische Erdbebenkatalog (HOMUTH 2022; KRACHT 2021) gibt einen Überblick über die Erdbebenaktivität in und um Hessen. Er dient als wichtige Eingangsgröße für die Bestimmung der seismischen Gefährdung von Hessen. Aufgrund ihrer Schütterwirkung werden Erdbeben in Hessen und im Umkreis von 50 km außerhalb der Landesgrenze betrachtet, da diese vermehrt noch potentiell in Hessen spürbar sind (Abb. 11).

Die seismische Aktivität im Oberrheingraben ist nicht auf die Grabenrandstörungen beschränkt, sondern füllt den gesamten Graben aus. Im Taunus, im Odenwald und entlang des Mittelrheintals kann eine weitere Erdbebenhäufung festgestellt werden. Die stärksten historischen Erdbeben in dem Intensitätsbereich VI bis VII traten in den Jahren 858, 1733 und 1858 in Mainz, 1619 im südlichen Taunus, 1767 in Rothenburg/Fulda sowie als Erdbebenschwarm in Groß-Gerau (Oktober 1869 bis Februar 1871) mit 2067 Erdstößen, davon 92 mit makroseismischer Reichweite über Groß-Gerau hinaus (LANSBERG 1931) auf sowie 1871 in Lorsch und im Odenwald auf. Das stärkste Erdbeben in den letzten Jahren fand im Jahr 2014 bei Ober-Ramstadt im Odenwald mit einer Magnitude von $M_L = 4,2$ statt. Dies war auch das letzte Schadenserdbeben in Hessen. Das bisher stärkste, messtechnisch belegte, tektonische Erdbeben in Hessen mit einer Magnitude von $M_L = 4,9$ fand am 24.02.1952 zwischen Worms und Lorsch statt (ADERHOLD et al. 2024).

Geologisch gesehen ist die Erdbebenaktivität in Hessen eine Folge des Wechselspiels zwischen dem aus der Kollision von Afrikanischer und Europäischer Platte resultierenden Spannungsfeld und alten Bruchstrukturen. Störungszonen im Untergrund, die günstig zum aktuellen Spannungsfeld ausgerichtet sind, werden eher reaktiviert als Störungszonen mit anderweitiger Orientierung.

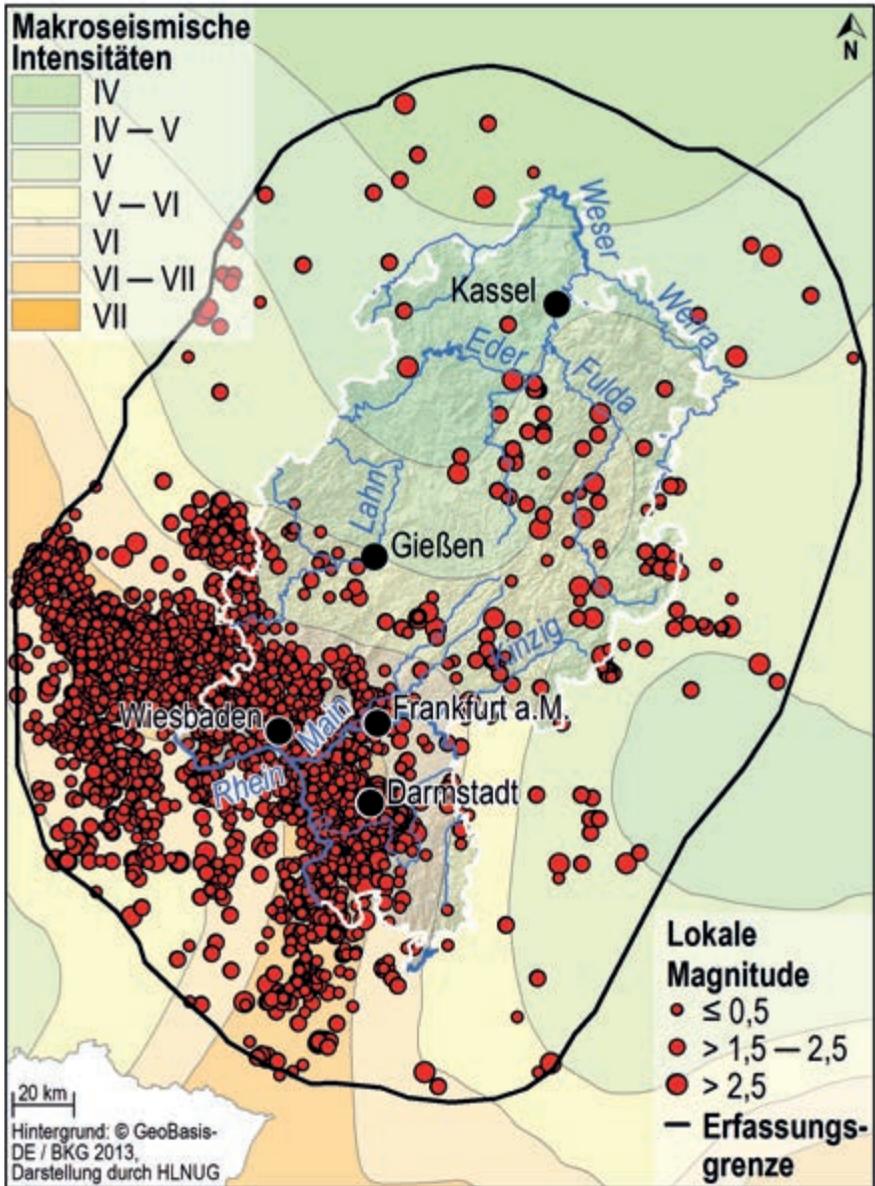


Abbildung 11: Karte der Erdbebenaktivität in Hessen nach hessischem Erdbebenkatalog (Stand: 31.12.2023).

Figure 11: Map of earthquake activity in Hesse according to the earthquake catalogue of the state of Hesse (status as at December 31, 2023).

5.1 Erdbebenserie im Taunus

Nachdem in den Jahren 2014 bis 2018 vor allem der Odenwald tektonisch und seismisch aktiv war mit ca. 500 Erdbeben in der Nähe von Ober-Ramstadt mit Magnituden im Bereich von $M_L = -0,6$ bis 4,2 (HOMUTH et al. 2014; HOMUTH & RÜMPKER 2017), ist die Haupterdbebenregion Hessens seit Anfang 2018 die Region östlich von Bad Schwalbach im Taunus (HOMUTH 2020).

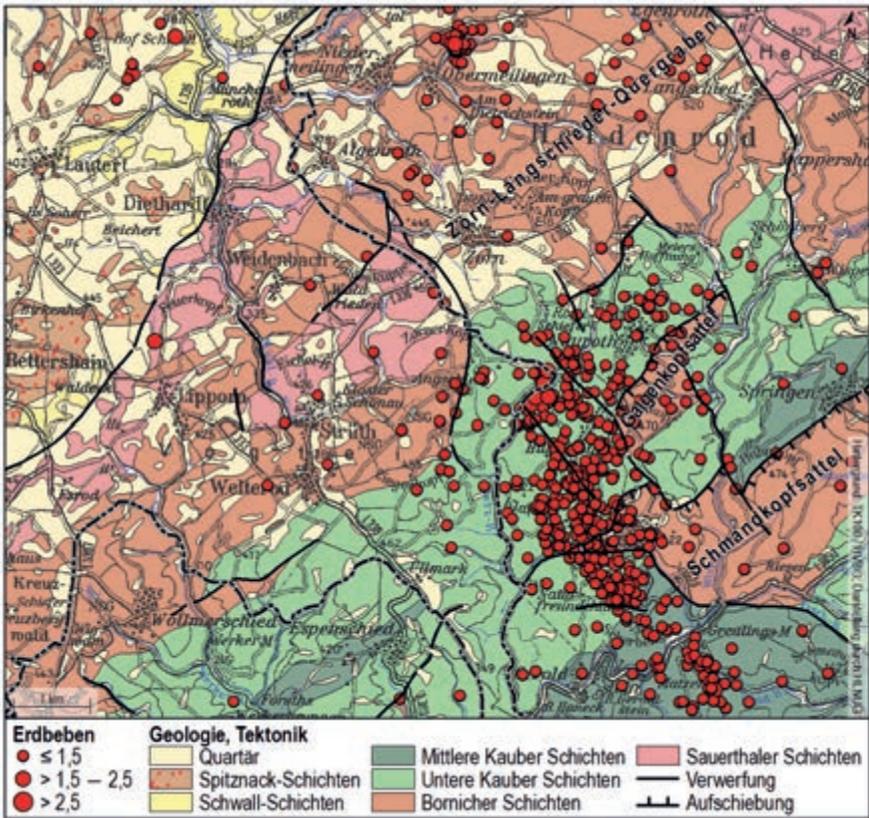


Abbildung 12: Relativlokationen der Erdbeben östlich von Bad Schwalbach im Taunus zusammen mit geologischen Einheiten und Störungen (schwarz) nach GK25 5813 Nastätten für den Zeitraum 2018–2024. Die Erdbebenlokationen sind als rote Kreise proportional zur Magnitude wiedergegeben.

Figure 12: Relative locations of the earthquakes east of Bad Schwalbach together with geological units and faults (black) according to GK25 5813 Nastätten for 2018–2024. The earthquake locations are shown as red circles proportional to the earthquake magnitude.

Seit Januar 2018 kommt es in der Nähe von Bad Schwalbach im Taunus an der hessisch-rheinlandpfälzischen Grenze zu einer erhöhten seismischen Aktivität

mit einer großen Anzahl an Erdbeben (Abb. 12). Während der Zeit von Januar 2018 bis April 2024 konnten über 600 Erdbeben mit Magnituden von $M_L = -0,8$ bis $M_L = 2,5$ lokalisiert werden.

Eine Besonderheit stellen die für diesen Erdbebenherd typisch auftretenden Signalformen dar, welche durch sehr schnell aneinander gereichte, oft überlappende Ereignisse charakterisiert werden (für Beispiele siehe HOMUTH 2020).

Zur Untersuchung der Eigenschaften der Erdbebenaktivität im Taunus wurden Absolut- und Relativlokalisierungen nach unterschiedlichen Auswertemethoden durchgeführt. Absolutlokalisierungen werden beim HED standardmäßig unter Verwendung des NonLinLoc-Algorithmus (LOMAX et al. 2000) in der Software SeisComp (GFZ 2008) bestimmt. Die Relativlokalisierungen erfolgten mit dem HypoDD Double-Difference-Algorithmus (WALDHAUSER & ELLSWORTH 2000). Mittels dieser Relativlokalisierung können Fehler in der Lokalisierung aufgrund von Unsicherheiten im Geschwindigkeitsmodell minimiert werden. Der Double-Difference-Algorithmus erlaubt eine simultane Relokalisierung einer großen Anzahl an Erdbeben über große Distanzen. Dabei werden P- und S-Wellenlaufzeitunterschiede kombiniert und die Residuen (double differences) für Paare von Erdbeben durch Anpassung der vektoriiellen Differenz der Hypozentren (Erdbebenherde) minimiert. Lokalisierungslösungen werden gefunden durch eine iterative Anpassung der Vektordifferenzen zwischen benachbarten Paaren (WALDHAUSER & ELLSWORTH 2000).

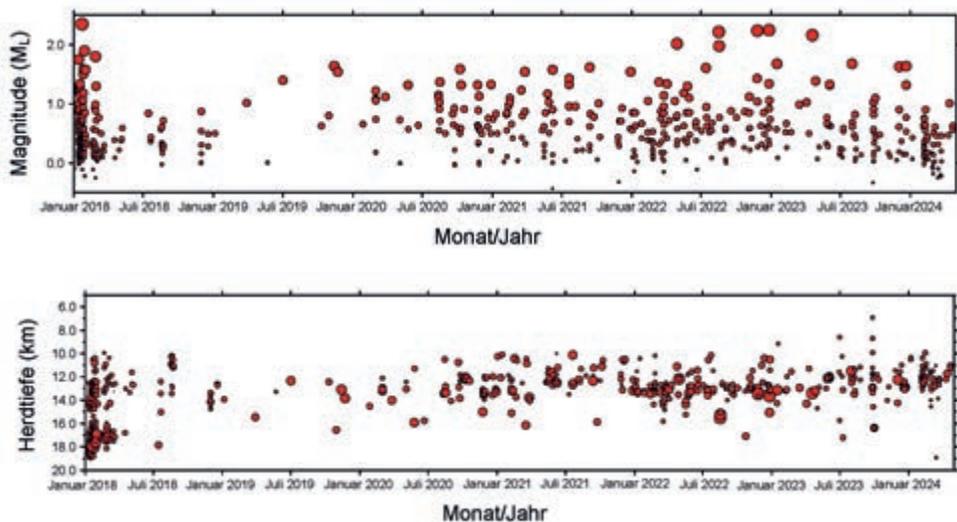


Abbildung 13: Magnitudenverteilung (oben) und Tiefenverteilung (unten) der Erdbeben östlich von Bad Schwalbach im Taunus.

Figure 13: Magnitude (above) and depth (below) distribution of earthquakes east of Bad Schwalbach.

In Abb. 13 ist die Magnituden- und Herdtiefenverteilung der Erdbeben östlich von Bad Schwalbach dargestellt. Im Vergleich zur Erdbebenserie im Odenwald der Jahre 2014 und 2015 (HOMUTH & RÜMPKER 2017) fehlt ein klares stärkeres Hauptereignis. Dieses Fehlen eines Hauptereignisses mit einer Magnitude, die deutlich (mindestens eine Magnitudenstufe) die Magnituden der restlichen Erdbeben übersteigt, als auch der zeitliche Verlauf der seismischen Aktivität lassen darauf schließen, dass es sich bei der Erdbebenaktivität östlich von Bad Schwalbach im Taunus um mehrere Erdbebenschwärme handelt, die jeweils von einer gewissen Zeit von „seismischer Ruhe“ voneinander getrennt sind. Die Hypozentren erstrecken sich über einen Tiefenbereich von 9 bis 19 km mit einer lateralen Ausdehnung von etwa 6 km (HOMUTH 2020). Im Unterschied zur Erdbebenserie im Odenwald ist die seismische Aktivität im Taunus auf ein größeres Gebiet verteilt und wird nach Norden durch weitere angrenzende aktive Erdbebenherde im Bereich des Zorn-Langschieder Quergrabens fortgesetzt (siehe Abb. 12).

Rückschlüsse auf den Bruchmechanismus eines Erdbebens und das Spannungsregime einer Region können anhand einer Analyse von Herdflächenlösungen erfolgen. Eine Herdflächenlösung enthält Informationen über die Streichrichtung der Störungsfläche (strike), den Einfallwinkel (dip) und den Winkel der Bewegungsrichtung auf der Bruchfläche (rake). Die Herdflächenlösung stellt die räumliche Abstrahlcharakteristik der Erdbebenwellen (meist P-Wellen) dar. Sie kann genutzt werden, um die Orientierung der Herd- und Hilfsfläche (Nodalflächen), die Richtung der Dislokationsvektoren und die Orientierung der Hauptspannungen im Erdbebenherd zu bestimmen. Eine Möglichkeit zur Erstellung der Herdflächenlösung bietet die Verwendung der Polaritäten (Richtung der Ersteinsätze) der P-Wellen. Die Darstellung erfolgt durch die Projektion auf eine um den als punktförmig angesehenen Erdbebenherd gedachte Kugel (HOMUTH 2015). Zur Bestimmung der Herdmechanismen der Erdbeben östlich von Bad Schwalbach wurden Herdflächenlösungen anhand von Polaritäten von Ersteinsätzen in den Seismogrammen erstellt. Es konnte ein schräg-aufschiebendes Spannungsregime festgestellt werden (Abb. 14; Tab. 1). Der Hauptteil der Erdbeben ereignet sich entlang einer Störzone im Bereich der unteren Kauber-Schichten des Unterems, die an die Bornicher Schichten des Galgenkopf- und Schmandkopf-Sattels angrenzen und durch Aufschiebungen abgegrenzt werden (Abb. 12). Die generelle Bruchrichtung im Erdbebenherd entspricht dem in der Region bekannten Spannungsverlauf in NW–SE-Richtung (HOMUTH et al. 2014).

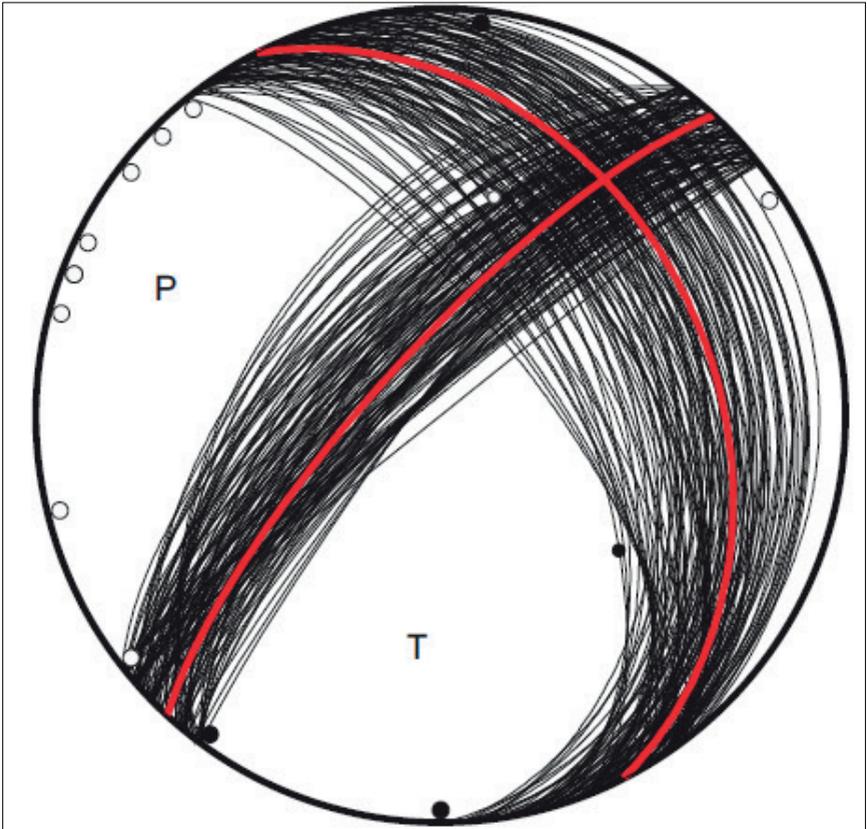


Abbildung 14: Herdflächenlösung des Erdbebens vom 22.01.2018 um 07:35 ($M_L = 2,5$). P = Kompressionsachse; T = Dehnungsachse.

Figure 14: Fault plane solution of the earthquake on January 22, 2018 at 07:35 a. m. ($M_L = 2.5$). P = pressure axis; T = tension axis.

Tabelle 1: Ergebnisse der Herdflächenanalyse. Die Nodalflächen (Strike/Dip/Rake) zeigen eine leicht schräge Aufschiebung für alle Ereignisse (STOCKEMER 2020)

Table 1: Results of the focal mechanism analysis. The nodal planes (strike/dip/rake) show slightly oblique solutions for all events (STOCKEMER 2020)

Datum	Uhrzeit (UTC)	Breitengrad	Längengrad	Magnitude (M_L)	Tiefe (km)	Strike/Dip/Rake
13.01.2018	12:32:00	50,130	7,930	1,7	17,0	293/23/-65
22.01.2018	07:20:00	50,140	7,920	2,4	18,0	323/32/-19
22.01.2018	07:35:00	50,140	7,930	2,3	17,0	299/27/-38
26.02.2019	02:05:00	50,237	7,886	1,8	7,2	243/90/78
22.03.2019	03:44:02	50,135	7,900	1,5	11,8	298/48/-47

Aus jetziger Sicht ist es am wahrscheinlichsten, dass eine alte, bereits vorhandene Bruchstruktur im tieferen Untergrund reaktiviert wird. Hier könnte das Auftreten von Fluiden ein Auslösungsmechanismus sein, der das Phänomen der Erdbebenschwärme erklären könnte.

6 Literatur

- ACKERMANN, E. (1958): Die Sturzfließung am Schickeberg südlich Eschwege.– Notizbl. Hess. L.-A. f. Bodenforsch., **87**: 172-187, 1-33.
- ADERHOLD, G. (2005): Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karstgefährdeten Gebieten Hessens. – Geologische Abhandlungen Hessen, **115**: 100 S.; Wiesbaden.
- ADERHOLD, G., HEINRICHS, C. & HOMUTH, B. (2020): Geogefahren in Hessen – Auftreten, Ursachen, Maßnahmen und Sicherung. – 20 S.; Wiesbaden.
- ADERHOLD, G., ALBERTI, M., HEINRICHS, C. & HOMUTH, B. (2024): Massenbewegungen und Erdbeben in Hessen. – 404 S.; Wiesbaden.
- BRUST, M.K. (2008): Die „Mansfeldischen Kalkschloten“ und ihre Bedeutung für den historischen Kupferschiefer-Bergbau. – Exkursionsführer und Veröff. d. Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft **235**: 10-18; Hannover.
- Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH (2008): The SeisComP seismological software package. GFZ Data Services; doi:10.5880/GFZ.2.4.2020.003.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2021): Geologie von Hessen. – 705 S., 300 Abb., 2 Taf., 42 Tab; Stuttgart (Schweizerbart).
- HOMUTH, B. (2015): Hochauflösende Erfassung der Seismizität im nördlichen Oberrheingraben: Schwarmbeben, Spannungsregime und Seismische Gefährdung. Diss. Univ. Frankfurt. – 191 S.; Frankfurt a. M.; <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/frontdoor/index/index/docId/37870>.
- HOMUTH, B. (2020): Mikroseismizität in Hessen – Die Erdbebenserie bei Bad Schwalbach im Taunus. – Jahresbericht 2019 des Hess. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG): 187-192; Wiesbaden.
- HOMUTH, B. (2022): Neufassung des Erdbebenkataloges des Landes Hessen. – Tag.-Bd. 82. Jahrestag. Dt. Geophysikal. Ges. 7.–10. März 2022 in München: 140; München.
- HOMUTH, B. & RÜMPKER, G. (2017): The 2014–2015 earthquake series in the northern Upper Rhine Graben, Central Europe. – *Journal of Seismology*, **21**: 83; doi: 10.1007/s10950-016-9584-6.
- HOMUTH, B., RÜMPKER, G., DECKERT, H. & KRACHT, M. (2014): Seismicity of the northern Upper Rhine Graben – Constraints on the present-day stress field from focal mechanisms. – *Tectonophysics*, **632**: 8-20; doi: 10.106/j.tecto.2014.05.037.
- KRACHT, M. (2021): Der seismische Katalog Hessen (SKHe). – *Geol. Abh. Hessen*, **140**: 121-136, 8 Abb., 3 Tab.; Wiesbaden.
- KUPETZ, M. & BRUST, M. K. (2008): Historisches zum Begriff der „Mansfeldischen Kalkschloten“ sowie ein Beitrag zur nomenklatorischen Bestimmung dieses Höhlentyps. – Exkursionsführer und Veröff. d. Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft **235**: 61-74; Hannover.
- LANDSBERG, H. (1931): Der Erdbebenschwarm von Groß-Gerau 1869–1871. – *Gerl. Beitr. Geophysik*, **34**: 367-392.
- LOMAX, A., VIRIEUX, J., VOLANT, P. & BERGE, C. (2000): Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear

- locations. – In: THURBER, C.H. & RABINOWITH, N. (eds.): *Advances in Seismic Event Location*. – 101-134; Amsterdam (Kluwer).
- PRINZ, H. & STRAUSS, R. (2018): *Ingenieurgeologie*, 6. Auflage. – 898 S.; Berlin (Springer).
- Schmidt, S. (2000): *Rutschungen in der Rhön – Eine Gefahren und Risikoanalyse des Mittleren und Oberen Ulstertals (Hessische Rhön)*. – *Marburger Geowissenschaften*, 2: 1-7; 1 CD-ROM 241 S., 28 Karten, 14 Tabellen, 34 Fotos, 58 Abb.; Marburg.
- SCHMIDT, S. (2017): *Das Fachgebiet Ingenieurgeologie im Geologischen Landesdienst der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie – Erfassung und Bewertung von Georisiken in Thüringen*. – *Geowiss. Mitt. Thüringen*, 14: 5-18; Jena.
- SCHMIDT, S. & KATZSCHMANN, L. (2015a): *Das Subrosionskataster der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)*. – 17. *Geoforum Umhausen 2015*, Tagungsband. – 45-58; Umhausen.
- SCHMIDT, S. & KATZSCHMANN, L. (2015b): *Aktuelle Erdfälle in Thüringen – von der Erkundung bis zur Einrichtung von Frühwarn- und Beobachtungssystemen*. – 17. *Geoforum Umhausen 2015*, Tagungsband. – 59-70; Umhausen.
- STOCKEMER, J. (2020): *Erdbebenuntersuchungen im Raum Bad Schwalbach*. Bachelorarbeit, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz; Mainz.
- WALDHAUSER, F. & ELLSWORTH, W.L. (2000): *A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California*. – *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90: 1353-1368.

DR. SVEN SCHMIDT & DR. BENJAMIN HOMUTH
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Abteilung G – Geologie und Boden
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Die Bedeutung des Südlichen Afrikas als mineralischer Rohstofflieferant

HARTWIG E. FRIMMEL

Mineralische Rohstoffe, Südliches Afrika, Wirtschaftsgeologie, zukünftige Verfügbarkeit

K u r z f a s s u n g : Die Länder des Südlichen Afrikas, an erster Stelle Südafrika, sind weithin bekannt als ausgesprochen reich an einer Vielzahl mineralischer Rohstoffe. Dies liegt zum einen in einer für die Erzbildung, aber auch für den Erhalt von Erzkörpern in für den Menschen zugänglichen Tiefen besonders günstigen geologischen Entwicklungsgeschichte. Zum anderen rührt besagter Reichtum von einer schon im 19. Jahrhundert begonnenen intensiven Erforschung der regionalen Geologie und teils pionierartiger Explorationstätigkeit. Daraus resultierender Bergbau hat jedoch mittlerweile in vielen Bereichen einen hohen Reifegrad erreicht und die noch vorhandenen Vorräte schwinden. Dies gilt ganz besonders für Gold, in geringerem Maß für Diamant. Bei anderen, vornehmlich Platingruppen-Metallen, Chrom, Mangan und Vanadium, untergeordnet auch Uran, wird weiterhin eine sehr hohe und eventuell sogar noch weiter steigende Abhängigkeit von Südafrika (in Bezug auf Uran von Namibia) existieren. Wandelnde globale geopolitische Gegebenheiten, wie die wachsende Abkoppelung der BRICS-Staaten vom Westen und damit einhergehende Annäherung von Ländern wie Südafrika und Namibia an China, Russland und Indien, aber auch soziopolitische Veränderungen in diesen Ländern erhöhen das zukünftige Versorgungsrisiko für die EU, und vor allem auch Deutschland, in Bezug auf die Rohstoffe, deren Vorräte im Südlichen Afrika konzentriert sind.

The significance of Southern Africa as supplier of mineral resources

Mineral resources, Southern Africa, economic geology, future availability

A b s t r a c t : The countries of Southern Africa, foremost South Africa, have been well known for being unusually well endowed with a variety of mineral resources. This is due, on the one hand, to a geological history that was particularly conducive to the formation of ore deposits as well as to a high preservation potential of these deposits at accessible crustal depths. On the other hand, the said mineral wealth goes back to intense research of the regional geology and exploration of, at times, pioneering quality since the 19th century. The resulting mining activity has reached in many areas a high maturity with dwindling reserves. This holds true especially for gold and, to a lesser extent, diamond. Regarding other resources, in the first instance platinum group metals, chromium, manganese and vanadium, subordinately also uranium, a strong and probably even further increasing dependence on South Africa (in the case of uranium on Namibia) is predicted. Changing global geopolitical circumstances, such as the growing dissociation of the BRICS countries from the West and thus the increasingly closer ties of countries such as South Africa and Namibia with China, Russia and India, as well as sociopolitical changes in these countries increase the future supply risk for the European Union in general and Germany in particular with respect to those resources that are concentrated in Southern Africa.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	136
2	Der geologische Rahmen	138
3	Wirtschaftliche Relevanz ausgewählter Lagerstättenbeispiele	147
3.1	Witwatersrand Gold	147
3.2	Bändereisenerz und Manganerz	150
3.3	Platingruppen-Metalle und Stahlveredler aus dem Bushveld Komplex	151
3.4	Buntmetall-Vererzungen in panafrikanischen Gebirgsgürteln	151
3.5	An panafrikanische Granite gebundene Uran-Lagerstätten	154
3.6	Edelsteine	155
4	Das südliche Afrika als zukünftiger Rohstofflieferant für Europa und die Welt.....	157
5	Fazit und Ausblick	164
6	Literatur.....	166

1 Einleitung

Im Museum Wiesbaden steht das Jahr 2024 im Zeichen der Sonderausstellung „Der Hase ist des Jägers Tod – Kultur und Natur des südlichen Afrikas“. Der Subkontinent des Südlichen Afrikas¹ ist gemeinhin bekannt für spektakuläre Natur, innerhalb und außerhalb von Nationalparks, die alljährlich Millionen von Touristen anlockt. Das Spektakuläre daran wird gerne in vielfältigen herausragenden Landschaftsformen und einer noch relativ gut erhaltenen Tierwelt (symbolisiert durch die legendären „Big Five“) gesehen. Mindestens so spektakulär ist jedoch auch der geologische Untergrund – kaum eine andere Region bietet Gesteinsaufschlüsse, die eine Zeitspanne von mehr als 3,6 Milliarden Jahre Erdgeschichte dokumentieren. Dies inkludiert Gesteinseinheiten von besonders hohem wirtschaftlichem Wert. So hält das Südliche Afrika eine Reihe von wirtschaftsgeologischen Weltrekorden.

Knapp ein Drittel des gesamten je von Menschenhand geschürften Goldes und der noch vermuteten Vorräte sind in einer einzigen Erzprovinz, dem Witwatersrand Becken in Südafrika, konzentriert. Mit über 80 % der weltweit bekannten Platinvorräte liegt der Bushveld Komplex in Südafrika bei weitem an erster Stelle hinsichtlich gegenwärtiger als auch zukünftiger Versorgung mit diesem kritischen Metall. Die gleiche geologische Einheit steht für die weltweit größten Vorräte an Chrom. Auch hinsichtlich Manganerz nimmt Südafrika eine führende Stellung ein, sowohl in der derzeitigen Produktion als auch in den noch vorhandenen Vor-

¹ Der Begriff „Südliches Afrika“ ist nicht eindeutig definiert und kann, je nach Organisation, sich auf bis zu 17 Länder beziehen, inklusive der diversen Inseln im südwestlichen Indischen Ozean. Die Abgrenzung nach Norden ist unklar. In dieser Arbeit wird der Begriff auf die fünf Länder Botswana, Lesotho, Namibia, Südafrika und Eswatini (bis 2018 Swaziland) angewandt, die auch die Zollunion des Südlichen Afrikas (SACU) umfassen.

räten. Keine andere Region der Welt produziert so viele Diamanten wie das Südliche Afrika. Die Liste von Superlativen ließe sich fortsetzen.

Die Ausbeutung dieser und anderer Bodenschätze begann in großem Maßstab gegen Ende des 19. Jahrhunderts, um in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts einen vorläufigen Höhepunkt zu erreichen, wenn auch so manches Erz lokal auch schon viel früher von einheimischen Stämmen genutzt worden war. Es steht außer Zweifel, dass der wirtschaftliche und damit auch kulturelle Aufstieg des Südlichen Afrikas eng mit dem außergewöhnlichen mineralischen Reichtum verknüpft war und ist.

Jahrzehntlang wurde die Lagerstättenforschung (in Bezug auf mineralische Lagerstätten) in Europa und ganz besonders in Deutschland vernachlässigt. Bergbau gilt hierzulande als etwas Schmutziges, Umweltgefährdendes, das man eben nicht vor der eigenen Haustür haben will. Diese ablehnende Haltung führte in der Folge zu einer drastischen Reduzierung an Professuren für Lagerstättenforschung, ja zur Schließung ganzer geologischer und mineralogischer Institute an Universitäten und anderen staatlichen Einrichtungen. Das negative Image der Geowissenschaften drückt sich auch darin aus, dass dieser für das Wohlbefinden unserer Gesellschaft essenzielle Wissenschaftszweig im Schulunterricht nur äußerst stiefmütterlich behandelt wird. Im Laufe des letzten Jahrzehnts erfuhr diese Ablehnung gegenüber Lagerstättengeologie jedoch eine Kehrtwende, nachdem die Erpressbarkeit der westlichen Industrie durch marktbeherrschende einzelne rohstoffproduzierende Länder augenscheinlich geworden war. Es sei an die Selten-Element-Krise um 2010 erinnert, in der China seine Monopolstellung bei der Produktion von seltenen Metallen, wie beispielsweise Neodym oder Samarium – kritische Rohstoffe für die Herstellung von Permanent- und Hochleistungsmagneten und somit für Windenergiegewinnung ausnutzte. Dies wurde durch den Umstand ermöglicht, dass China weit über 90 % des weltweiten Angebots stellte. Seither gab es ein regelrechtes Erwachen aus dem Dornröschenschlaf der Politik, was unter anderem dazu führte, dass die EU-Kommission nun regelmäßig Studien veröffentlicht zur Kritikalität mineralischer Rohstoffe, also der wirtschaftlichen Signifikanz einerseits und dem Versorgungsrisiko andererseits. In diesem Zusammenhang rücken die klassischen Rohstoffländer wie jene des Südlichen Afrikas wieder in den Vordergrund des wirtschaftlichen und somit auch politischen Interesses der Industrieländer, letztlich auch Deutschlands. Ziel dieses Beitrags ist es daher, anhand ausgewählter Beispiele aufzuzeigen, worin die Ursachen für die genannten Superlative unter den Lagerstätten im Südlichen Afrika und deren wirtschaftsgeologische Bedeutung für die Welt im Allgemeinen und für Deutschland im Besonderen liegen.

2 Der geologische Rahmen

Die Geologie des Südlichen Afrikas ist geprägt von einer der ältesten Landmassen der Erde, dem Kaapvaal Kraton (Abb. 1), der im Laufe der letzten drei Milliarden Jahre sukzessive durch Anlagerung neuer kontinentaler Kruste im Zuge von Gebirgsbildungsprozessen (Orogenesen) und Kollision mit anderen Kratonen immer größer wurde. Daraus resultierte eine Collage aus uralten kontinentalen Krustenfragmenten, die durch jüngere, heute tief erodierte Gebirgsgürtel miteinander verschweißt sind. Auch wenn noch etliche Fragen zur Entstehungsge-

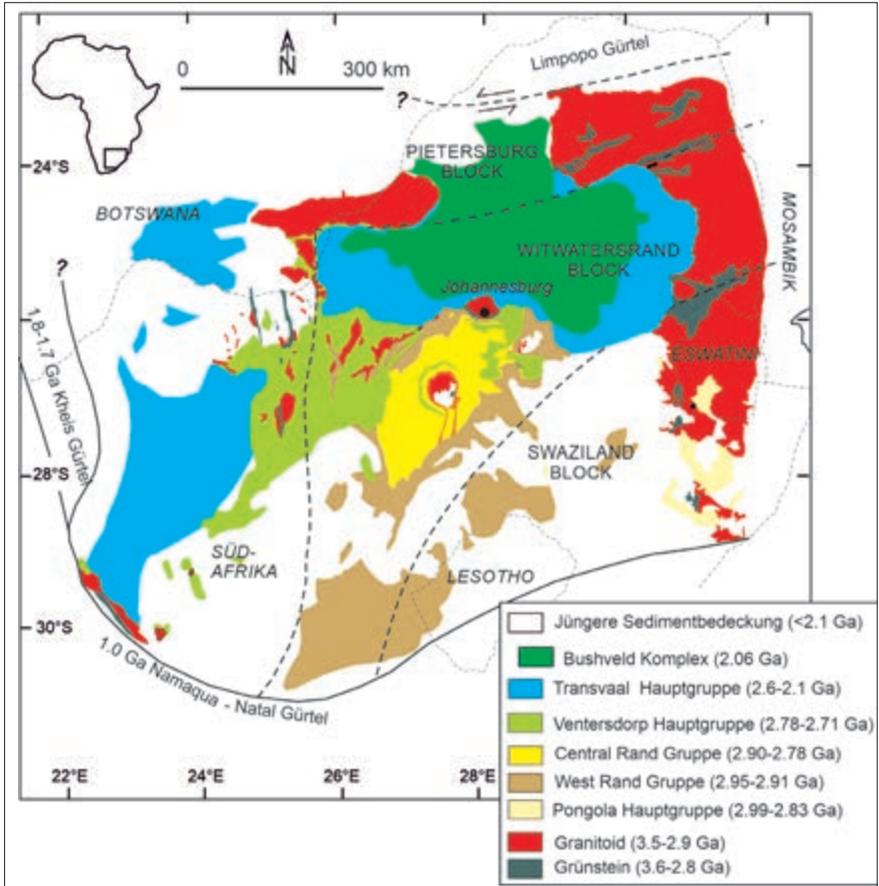


Abbildung 1: Die geologischen Großeinheiten des Kaapvaal Kraton in Südafrika, Eswatini und Lesotho; jüngere Überdeckung wurde zur besseren Übersicht in Teilen weggelassen; modifiziert nach FRIMMEL & NWAILA (2020).

Figure 1: Principal geological units of the Kaapvaal Craton in South Africa, Eswatini and Lesotho; younger cover rocks are in places not shown; modified after FRIMMEL & NWAILA (2020).

schichte des Kaapvaal Kratons ungelöst bleiben, so führten doch eine Vielzahl von Forschungsarbeiten über die letzten Jahrzehnte – oft angetrieben durch wirtschaftliche Interessen – dazu, dass eben dieser Kraton der vielleicht am besten untersuchte ist. Eine umfassende Zusammenfassung des aktuellen Wissensstandes findet sich bei KRÖNER & HOFMANN (2019).

Im „Ancient Gneiss Complex“ in Eswatini im östlichen Kaapvaal Kraton liegen einige der ältesten Gesteine der Welt, nachgewiesen durch an Zirkonkörnern gewonnenen Uran-Blei-Altersdaten zwischen 3,66 und 3,45 Milliarden Jahren (Ga). Zirkon bildet sich primär bei der Kristallisation von Magma im Zuge kontinentaler Krustenbildung, die obigen Alter belegen also eine schon sehr frühe Differentiation von kontinentaler Kruste im Kaapvaal Kraton. Diese uralten Gesteine bestehen hauptsächlich aus Granit, Tonalit, Trondhjemit und Granodiorit sowie mafischen bis ultramafischen Vulkaniten und Ganggesteinen, die alle später, vor ca. 3,2 Ga, hochgradig metamorph überprägt wurden (KRÖNER, HOFFMANN, WONG et al. 2019). Der Anteil an ehemaligen Sedimentgesteinen im Ancient Gneiss Complex ist sehr gering. Ähnliche Gesteine etwas jüngeren Alters finden sich in mehreren, über den Kraton verteilte Granitoid-Grünsteingürteln (Abb. 1), von denen der Barberton Grünsteingürtel der berühmteste und am besten untersuchte ist. Bemerkenswert darin ist die älteste gut erhaltene Sedimentabfolge, die 3,22 Ga Moodies Gruppe, die uns Einblicke in paläoarchaische Umweltbedingungen im kontinentalen als auch flachmarinen Bereich gewährt (HEUBECK 2019).

Die erste kontinentale Kruste auf unserem Planeten bildete sich mit allergrößter Wahrscheinlichkeit nicht durch plattentektonische Prozesse – dafür war der Erdmantel damals noch viel zu heiß. Aber schon im Laufe des Archaikums dürften sich erste, wenngleich auch noch sehr kleinräumige, starre Lithosphärenplatten gebildet haben, und erste Subduktionsprozesse könnten schon um 3 Ga (vielleicht sogar schon vor 3,2 Ga) eingesetzt haben (SHIREY & RICHARDSON 2011; VAN HUNEN & MOYEN 2012). Platznahme voluminöser Granitkörper um etwa 3,1 Ga führte zur Stabilisierung des zentralen und südöstlichen Kaapvaal Kratons, der fortan immer wieder als Grundgebirge für jüngere intrakratonische Beckenabtragungen diente.

Von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung dank ihres Goldreichtums ist hierbei die Sedimentation der 2,95–2,79 Ga alten Witwatersrand Hauptgruppe (FRIMMEL & NWAILA 2020). Deren oberer Teil, die 2,90–2,79 Ga alte Central Rand Gruppe (Abb. 1), besteht zum größten Teil aus fluviatilen Sandsteinen und Konglomeraten. Letztere beherbergen die weltweit größten Konzentrationen von Gold (Abb. 2) und sind auch hoch angereichert an Uran in Form von detritären Uraninitkörnern (FRIMMEL, SCHEDEL & BRÄTZ 2014). Die goldführenden Quarzgeröll-Konglomerate spiegeln eine in der Erdgeschichte einmalige Anreicherung von Gold in der Erdkruste wider, welche durch die zeitliche Überschneidung von Gunstsituationen in der litho-, bio- und atmosphärischen Entwicklung erklärt werden kann. Saurer Regen aus einer de facto O₂-freien, aber an H₂S angereicher-

ten Atmosphäre ermöglichte tiefgründige chemische Verwitterung im Hinterland und Lösung gewaltiger Goldmengen im Flusswasser (FRIMMEL & HENNIGH 2015). Gleichzeitige Entwicklung von entweder ersten Photosynthese-betreibenden Mikroben (Cyanobakterien) oder anaerober, chemoautotropher Mikroben wie *Acidithiobacillus ferroxidans* ermöglichten einen oxidativen Gradienten, der zur Ausfällung von Gold auf der Oberfläche solcher Mikroben führte. Reste solcher mancherorts extrem goldreichen Mikrobenmatten sind noch als Kerogenlagen auf ehemaligen Erosionsflächen an der Basis der Central Rand Gruppe erhalten. In den meisten Fällen wurden diese Mikrobenmatten jedoch bei Starkregenereignissen wieder erodiert und das feinblättrige Gold darin mechanisch weiter transportiert, um andernorts, bei abnehmender Strömungsenergie, aufgrund ihrer hohen Dichte als Schwermineral in Form von Mikronuggets abgelagert zu werden und so Seifenlagerstätten zu bilden (FRIMMEL & HENNIGH 2015).

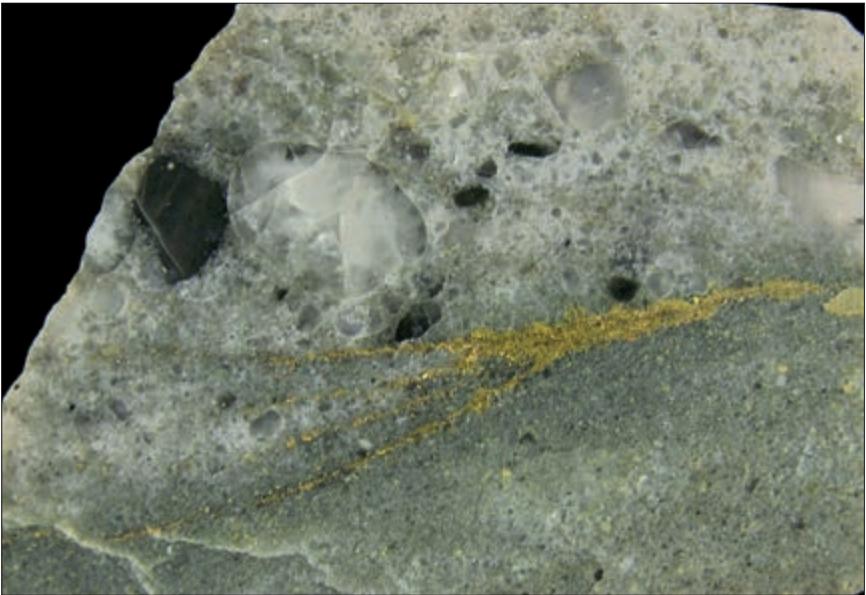


Abbildung 2: Ca. 2,9 Ga altes Konglomerat mit schräg geschichteter Schwermineral-Ansammlung an seiner Basis, hauptsächlich aus detritären Goldkörnern bestehend. Diese bildete sich auf einer alten Erosionsfläche oberhalb einer Sandstein- (nun Quarzit-)Schicht. Bildbreite: ca. 6 cm; Basal Reef, unterste Central Rand Gruppe, Welkom Goldfeld; Foto: H. E. Frimmel.

Figure 2: Ca. 2.9 Ga conglomerate with cross-bedded heavy mineral concentrate at its base, consisting mainly of detrital gold particles. They were deposited on an old erosion surface on top of a former sandstone (now quartzite) bed. Width of photograph: ca. 6 cm; Basal Reef, lowermost Central Rand Group, Welkom goldfield; photograph: H. E. Frimmel.

Der Schließung des Central Rand Beckens folgte eine Phase der Erosion und kurz darauf, vor ca. 2,78 Ga, die Ablagerung der nächsten stratigraphischen Groß-

einheit, der Ventersdorp Hauptgruppe (siehe Abb. 1). Sie war in erster Linie durch den Austritt enormer Mengen an Flutbasalt geprägt, die über große Teile des Kaapvaal Kratons ausströmten. An deren Basis liegt ein basales, fluviatiles Konglomerat, welches dort, wo es die unterlagernden goldführenden Sedimente der Central Rand Gruppe anschneidet, nun auch wieder sehr reich an resedimentiertem Seifengold ist („Ventersdorp Contact Reef“). Bislang trug allein dieser Erzhorizont rund 8 % der gesamten südafrikanischen Goldproduktion bei.

Die nächstjüngere Großeinheit, die Transvaal Hauptgruppe (siehe Abb. 1), ist ebenso von herausragender ökonomischer Bedeutung. Auch sie beginnt über einer kratonweiten Diskordanz, die eine weitreichende Einebnung der alten Landoberfläche nach einer Gebirgsbildungsphase entlang des Nordrandes des Kratons reflektiert, mit einem basalen fluviatilen Konglomerat („Black Reef“). Lokal ist auch dieses goldführend, und zwar überall dort, wo es seinen Detritus von der Erosion des unterlagernden Ventersdorp Contact Reef oder der alten Erzkörper in der Central Rand Gruppe bezog. Das Alter dieses Konglomerats ist nur indirekt bestimmt und dürfte um 2,6 Ga liegen. Von viel größerem wirtschaftlichen Wert ist jedoch der Umstand, dass die teils karbonatische, teils siliziklastische Sedimentationsgeschichte der Transvaal Hauptgruppe bis ca. 2,06 Ga währte (ZEH, WILSON & OVTCHAROVA 2016) und damit zeitlich eine der ganz großen Umbruchsphasen in der Geschichte unseres Planeten einschließt – das große Oxidationsereignis (engl. „great oxidation event“, GOE). Es handelte sich hierbei nicht um ein kurzzeitiges Ereignis, sondern um eine vermutlich über viele Millionen Jahre andauernde Entwicklung von einer extrem Sauerstoff-armen zu einer Sauerstoff-reichen Atmosphäre. Damit legte das GOE den Grundstein für all die weiteren Evolutionsschritte, die letztlich erst das moderne Leben auf der Erde ermöglichten. Dieser Übergang fand von ca. 2,4 bis 2,1 Ga statt (LYONS, REINHARD & PLANAVSKY 2014), also in der Zeitspanne, in der die Sedimente der Transvaal Hauptgruppe abgelagert wurden.

Die durch erste Photosynthese-betreibende Mikroben ausgelöste Produktion von Sauerstoff hatte profunde Auswirkungen auf die gesamte Hydro-, Bio- und Atmosphäre. Vor dem GOE war Eisen im Meerwasser als Fe^{2+} gelöst. Das mit dem GOE nun auftretende O_2 oxidierte dieses Fe^{2+} , was zur massenhaften Ausfällung von Eisenoxiden, Magnetit und Hämatit, führte (BEKKER, SLACK, PLANAVSKY et al. 2010). Dies wurde vor allem dort begünstigt, wo anoxische ozeanische Tiefenwässer mit viel gelöstem Fe^{2+} durch Meeresströmungen in mit O_2 angereicherte Wässer in seichteren Meeresbereichen in Kontakt kam. Solche Umwälzungen von Meerwasser fanden insbesondere in Folge grundlegender Klimaveränderungen statt. Während Kaltzeiten war die Erde mehr oder minder mit Eis bedeckt, was Meeresströmungen und damit die Durchmischung der Ozeane unterband. Die Produktion von CO_2 durch Vulkanismus verlief jedoch in solchen Kaltzeiten ungehindert weiter. Sobald die atmosphärische CO_2 -Konzentration einen kritischen Wert überschritt und somit ein Treibhauseffekt eintrat, kam es zum raschen Ab-

schmelzen der Meereisbedeckung, beschleunigt durch einen gleichzeitigen Anstieg in der Albedo, zum Einsetzen von Meeresströmungen und damit zur Vermischung von Fe^{2+} -reichen Tiefenwässern mit O_2 -reichem Meerwasser in seichteren Regionen und folglich zur Ausfällung von Eisenoxiden, Eisensilikaten und feinstkörnigem Quarz (Chert). Das resultierende Gestein ist als Bändereisenerz bekannt und stellt den weltweit wichtigsten Rohstoff für die Stahlindustrie dar. In ähnlicher Weise kam es auch zu einer Anreicherung von Manganoxiden. Kaum in einer anderen Region der Welt sind solche frühproterozoischen Ablagerungen besser erhalten als in der südlichen Kalahari, weshalb die Northern Cape Provinz von Südafrika einer der wichtigsten Lieferanten von Eisenerz und die wichtigste Quelle für Manganerz weltweit ist.

Kurz nach Ende der Ablagerungsgeschichte der Transvaal Hauptgruppe wurde der Kaapvaal Kraton von einem magmatischen Ereignis gigantischen Ausmaßes erfasst, der schüsselförmigen Intrusion (sog. Lopolith) des 2056 Millionen Jahre (Ma) alten Bushveld Komplexes (siehe Abb. 1) in die Gesteine der unteren Transvaal Hauptgruppe (CAWTHORN 2015; ZEH, SCHALTEGGER, WILSON et al. 2015). Dieser Komplex stellt mit einer flächenhaften Ausdehnung von ca. 350 x 450 km den weltweit mit Abstand größten lagigen Intrusionskörper und eine der reichsten Erzprovinzen dar. Seine Dimension wird noch erheblich größer, rechnet man den genetisch und zeitlich äquivalenten Molopo Farms Komplex im südlichen Botswana hinzu. Der magmatische Komplex besteht aus der bis zu 8 km mächtigen lagigen, aus einer Serie von Lagergängen (Sills) aufgebauten mafischen und ultramafischen Rustenberg Layered Suite, der darüber lagernden, bis zu 3 km mächtigen vulkanischen Rooiberg Gruppe und voluminöser, darin intrudierter Granite. Mit einem Gesamtvolumen von rund $1 \times 10^6 \text{ km}^3$ ist der Bushveld Komplex vergleichbar mit den allergrößten magmatischen Provinzen, den Deccan Traps in Indien und den Siberian Traps in Russland, die beide für globale Massenaussterben an der Kreide-Tertiär- bzw. der Perm-Trias- Grenze verantwortlich gemacht werden.

Der nächste geologische Superlativ im südlichen Afrika ließ nicht lange auf sich warten. Rund 30 Millionen Jahre nach Platznahme des Bushveld Komplexes wurde der Kaapvaal Kraton in seinem Zentrum durch einen gigantischen Impakt betroffen, der die weltweit größte erhaltene Impaktstruktur hinterließ, den 2023 Ma alten Vredefort Dom südwestlich des Bushveld Komplexes und inmitten des ehemaligen Witwatersrand Beckens (siehe Abb. 1). Ein Asteroid von etwa 20–25 km Durchmesser dürfte hierbei einen etwa 250–280 km großen Impaktkrater erzeugt haben. Dank des hohen Alters – die Vredefort Struktur ist die zweitälteste bekannte Impaktstruktur auf Erde – kann von einer weitgehenden Erosion der ursprünglichen Kraterstruktur ausgegangen werden: geschätzte 8 bis 10 km (HUBER, KOVALEVA, RAE et al. 2023). Asteroide sind bekannt dafür, erhebliche Konzentrationen von siderophilen Elementen wie Gold und Platingruppen-Metallen (PGM) zu beinhalten. Der Umstand, dass in der unmittelbaren Umgebung des Vredefort

Doms die weltweit größten Ansammlungen von Gold (im Witwatersrand Becken) und von PGM (im Bushveld Komplex) liegen, könnte zu dem Schluss verleiten, diese Metalleanreicherungen im zentralen Kaapvaal Kraton gingen auf den Impakt zurück. So plausibel auch eine solche metallogenetische Erklärung erscheinen mag, die geologischen und vor allem geochronologischen Befunde sprechen dagegen: Die Goldvererzungen im Witwatersrand Becken fanden rund 800 bis 900 Millionen Jahre, die Platingruppen-Vererzungen im Bushveld Komplex noch immerhin über 30 Millionen Jahre vor dem Impakt statt. Nichtsdestotrotz hatte der Impakt einen gewissen Effekt auf die Witwatersrand Goldlagerstätten. Dort ermöglichte die durch den Impakt ausgelöste Zerrüttung des Wirtsgesteins die Zirkulation von Krustenfluiden, welche zur lokalen Mobilisation der ursprünglich detritären Goldpartikelchen führte (FRIMMEL, HALLBAUER, GARTZ 1999). Gleichzeitig kam es beim Impakt, bedingt durch die dabei freigesetzte enorme Energie, zur Aufschmelzung der getroffenen Krustengesteine und zur Bildung eines Sees aus Impaktschmelze im ehemaligen Krater. Das bei dessen Abkühlung erstarrende Gestein versiegelte die darunter lagernden Sedimentgesteine, unter anderem auch die goldführenden Konglomerate, und schützte sie somit vor späterer Erosion. Die Einzigartigkeit der Witwatersrand Goldlagerstätten liegt also in deren erstaunlich guten Erhaltung begründet. Letztere ist aber auch durch die Position inmitten eines der ältesten und stabilsten Kratone zu erklären. Andernorts wären ähnliche Goldlagerstätten durch jüngere tektonische Prozesse wieder zerstört worden. Der Kaapvaal Kraton erfuhr jedoch in den letzten zwei Milliarden Jahren keine nennenswerte tektonische oder metamorphe Überprägung mehr.

Stattdessen war die geologische Entwicklung während der letzten zwei Milliarden Jahre durch wiederholte Kollision des Kaapvaal Kratons mit anderen Kratonen und damit einhergehenden Gebirgsbildungsphasen geprägt, beginnend mit der Kollision mit dem Zimbabwe Kraton und dem daraus resultierenden 2,0 Ga alten Limpopo Gebirgsgürtel. Im Zuge der globalen Zyklen von Bildung und Zerfall von Superkontinenten wurde dem Kalahari-Zimbabwe Kraton sukzessive kontinentale Kruste an seinem Rand hinzugefügt, in erster Linie über magmatische Bögen oberhalb von alten Subduktionszonen, und der Kontinent wuchs durch die tektonische Verschweißung mit anderen Kratonen oder Kratonfragmenten (Abb. 3). Besondere Rollen spielten hierbei die Bildung des Superkontinents Rodinia vor etwa 1,2 – 1,0 Ga und dann jene des Großkontinents Gondwana vor rund 550 Millionen Jahren (Ma). Insbesondere die neoproterozoische Sedimentationsgeschichte während der Dispersion von Kontinentfragmenten im Zuge des Zerfalls von Rodinia und die darauffolgende panafrikanische Orogenese an der Grenze von Präkambrium zu Kambrium spielten eine große Rolle in der regionalen Metallogene. In kontinentalen Riftbecken bildeten sich besonders in vom offenen Ozean abgeschnürten Meeresbecken Sulfidanreicherungen aus hydrothermalen Exhalationen am Meeresboden, aus denen lokal wirtschaftlich bedeutende Buntmetall-Lagerstätten hervorgingen. Beispiele hierfür finden sich in neoproterozoi-

schen Ablagerungen im Südwesten und Norden Namibias als auch, verdeckt unter jungem Kalaharisand, im nordwestlichen Botswana. Während der panafrikanischen Orogenese wurden aus dem daraus hervorgehenden Gebirge (Damara Orogen) die vorher gebildeten synsedimentären Pb-Zn-Cu-Sulfid-Anreicherungen teilweise mobilisiert und durch hochsalinare Fluide in Vorlandbecken transportiert, was dort zu weiteren Vererzungen führte, oftmals in alten Karststrukturen (FRIMMEL, DEANE & CHADWICK 1996). Im Kernbereich des Damara Orogens bewirkte hochgradige Metamorphose das partielle Aufschmelzen der tief versenkten Krustengesteine. Dabei freigesetzte granitische Schmelzen waren stark an Uran angereichert, sodass es zur Bildung der weltweit größten magmatischen Uranlagerstätten kam. Diese finden sich heute in der zentralen Namibwüste (z. B. SPIVEY, PENKETHMAN & CULPAN 2010).

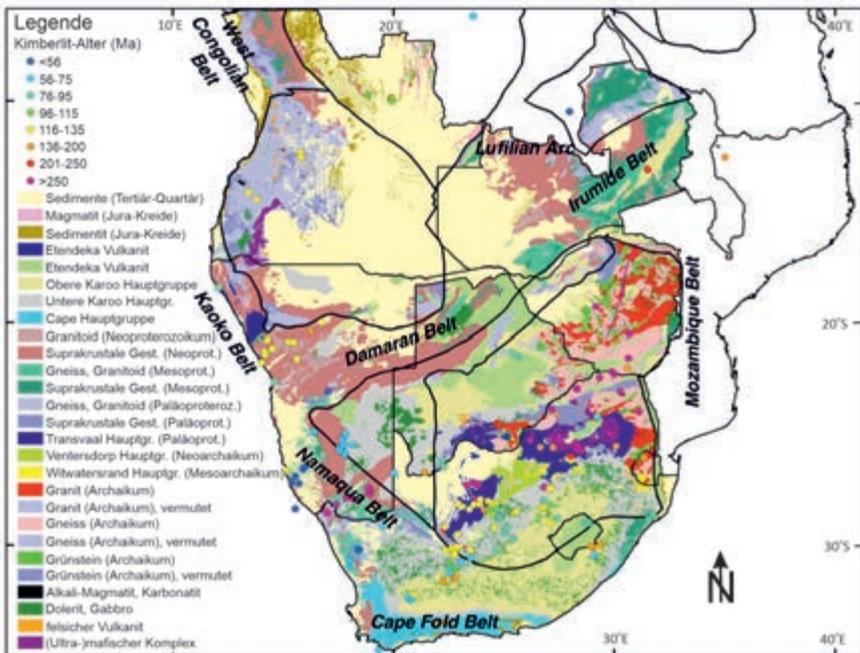


Abbildung 3: Geologische Karte des Südlichen Afrikas mit Lokation unterschiedlich alter Kimberlit-Schlote; modifiziert nach JELSMA et al. (2009).

Figure 3: Geological map of Southern Africa with location of kimberlite pipes of variable age; modified after JELSMA et al. (2009).

Seit der panafrikanischen Orogenese, also während des gesamten Phanerozoikums, verhielt sich das Südliche Afrika, mit Ausnahme der permotriassischen Gebirgsbildung (Kap-Orogenese) entlang der Südküste von Südafrika (Abb. 3), als stabiler kontinentaler Krustenblock. Teile davon wurden im Mesozoikum im

Vorlandbecken des Kap-Orogens leicht überflutet, was zur Ablagerung der Karoo Hauptgruppe führte. Diese wurde abgelöst von flächenhafter Extrusion von Flutbasalten im Zusammenhang mit dem Auseinanderbrechen Gondwanas, zuerst am Südostrand, wo die Antarktis sich vom südlichen Afrika trennte (183 Ma alter Karoo-Ferrar Flutbasalt), dann am Westrand im Zuge der Öffnung des Südatlantiks (132 Ma alter Parana-Etendeka Flutbasalt; WILL & FRIMMEL 2018). Neben der Effusion riesiger Mengen basaltischer Laven kam es auch zu teils explosiven Eruptionen von rhyolitischer Lava – ganz dem Typus eines bimodalen Magmatismus entsprechend, wie er für kontinentale Riftgräben zu erwarten ist. Es kam aber nicht nur zu Vulkanismus, sondern auch zur Intrusion von hauptsächlich granitischen Magmen in relativ seichte kontinentale Krustenstockwerke, wo sich zahlreiche Plutone und Stöcke, vor allem im zentralen Namibia, bildeten (Abb. 3). Hoch differenzierte Variationen solcher granitischer Intrusionskörper und damit assoziierte Pegmatitkörper können lokal reich an Edelsteinen sein.

Seit der Kreide war der größte Teil des Südlichen Afrikas Festland und damit der Verwitterung und Erosion ausgesetzt sowie der Ablagerung alluvialer und colluvialer Sedimente. Unabhängig von jeglichen krustalen Prozessen wurde das Südliche Afrika vor allem im Laufe des Mesozoikums von einer ganz besonderen Art des Magmatismus immer wieder erfasst: der Platznahme von Kimberlit (Abb. 3). Dieses sehr seltene Kalium-reiche ultramafische Vulkangestein stammt aus tieferen Regionen des Erdmantels (einige hundert Kilometer). Das kimberlitische Magma trat dabei explosionsartig an der Erdoberfläche aus, subvulkanische Schloten (Diatreme), gefüllt mit kimberlitischer Brekzie, und Explosionstrichter hinterlassend (siehe Abb. 4). Die ökonomische Relevanz dieser Gesteine liegt in deren Potenzial, Diamant zu führen. Sie stellen die prinzipielle primäre Quelle von Diamanten dar. Dabei agierten die kimberlitischen Schmelzen lediglich als eine Art Förderband, als Transportmedium, um Diamantkristalle, die sich unter Umständen schon viele hunderte Millionen Jahre vorher tief im Erdmantel gebildet hatten, durch den Erdmantel und die Erdkruste an die Oberfläche zu befördern. Allein der Umstand, dass die Diamantkristalle an der Erdoberfläche ankamen und nicht am Weg dorthin retrograd zu Graphit umgewandelt wurden, zeugt von einer enorm hohen Aufstiegsgeschwindigkeit der kimberlitischen Schmelzen. Zeitliche Höhepunkte in der Kimberlitbildung im Südlichen Afrika lagen bei ca. 130 und 90 Ma (Abb. 3), und dies kann durch thermische Perturbationen im Erdmantel unterhalb eines Superkontinents (in diesem Fall Pangäa) und damit mit fundamentaler Reorganisation von Plattenbewegungen erklärt werden (JELSMA, BARNETT, RICHARDS et al. 2009). Schon seit langem leitet die empirische Erkenntnis, dass bevorzugt Kimberlite innerhalb eines alten Kratons diamantführend sind, die Exploration nach neuen Lagerstätten. Auch in diesem Punkt erscheint das Südliche Afrika begünstigt. Eine Vielzahl von Kimberlit-Vorkommen liegen dort innerhalb der Kratongrenzen (siehe Abb. 3), was die Region zum seit über 100 Jahren weltweit wichtigsten Förderer von Diamanten macht.



Abbildung 4: Ehemaliger Kimberlitschlot („Big Hole“) in Kimberley, wurde von 1871 bis 1914 abgebaut und lieferte 14.504.566 Karat Diamant (ca. 3000 kg). Die Form dieses durch Handarbeit gegrabenen Lochs entspricht ziemlich genau der Form des ehemaligen Kimberlit-Diatremms; Foto: H. E. Frimmel.

Figure 4: Former kimberlite pipe (Big Hole) in Kimberley was mined from 1871 to 1914 and yielded 14.504.566 carat diamond (ca. 3000 kg). The shape of this hand-dug hole corresponds almost exactly to that of the original kimberlite diatreme; photograph: H. E. Frimmel.

Erstaunlicherweise ist das üdliche Afrika, im Gegensatz zum östlichen Südamerika mit einer vergleichbaren geologischen Geschichte, heute nicht tiefgründig erodiert, sondern stellt geomorphologisch ein Hochland dar mit steilem Abfall zu den Küsten (Escarpement). Diese Steilstufen erreichen an etlichen Stellen über 2000 m Höhe und inkludieren die höchsten Berge Namibias und Südafrikas mit Höhen von > 2500 m ü. NN in Küstennähe. Sogar das mit Kalaharisand gefüllte Becken inmitten des Subkontinents liegt über 1000 m ü. NN. Es gibt keinerlei plattentektonischen Grund hierfür, schließlich ist der Subkontinent umgeben von passiven und nicht von aktiven Kontinentalrändern. Diese ungewöhnliche Hochlage liegt vermutlich in einer thermischen Anomalie im unterlagernden Erdmantel begründet und ist das Resultat von wiederholten Hebungsphasen des gesamten Subkontinents während der letzten Jahrtausende. Sie bewirkte, dass Erosionsflächen, die sich vor rund 70 bis 40 Ma gebildet hatten, bekannt als „The African Surface“ (BURKE & GUNNELL 2008), heute etliche hundert Meter über dem Meeresspiegel liegen und Plateauberge bilden. Die hierfür verantwortliche Hebung ist von enormer wirtschaftlicher Relevanz, verdanken wir ihr doch erst den Zugang

zu vielen der Minerallagerstätten in der Region. Ohne diese neotektonische Hebung wären viele der Lagerstätten heute in noch viel zu großer Tiefe, um mit derzeit verfügbaren Abbaumethoden genutzt werden zu können. Gleichzeitig führte sie zu wiederholter Verkarstung vererzter Karbonatgesteine und damit komplexer Oxidation der Erzminerale, was zu einmaliger Mineralienvielfalt in solchen Lagerstätten führte. Schließlich ist ihr auch die Konzentration von Schwermineralen, wie Ilmenit oder Diamant, zu höchst ergiebigen Lagerstätten in alluvialen Seifen entlang der West- und Ostküste zu verdanken.

3 Wirtschaftliche Relevanz ausgewählter Lagerstättenbeispiele

Dank der oben zusammengefassten besonderen geologischen Rahmenbedingungen können im Südlichen Afrika eine Reihe von Minerallagerstätten genutzt werden, die von herausragender ökonomischer Bedeutung waren und zum Teil noch sind, oft aber auch zu einem hohen ökologischen Preis. Die besondere wirtschaftliche Relevanz wird im Folgenden am Beispiel von den sechs vielleicht relevantesten Beispielen von Lagerstättentypen im Südlichen Afrika kurz erläutert.

3.1 Witwatersrand Gold

Der mit Abstand größte Teil des im vergangenen Jahrhundert geförderten Goldes kam aus dem Witwatersrand Becken. Seit der Entdeckung der dortigen Goldfelder im Jahr 1885 wurden bislang über 53.300 t Gold gefördert. Über Jahrzehnte kamen rund zwei Drittel der jährlichen Goldproduktion aus Südafrika (Abb. 5a). Die Einnahmen daraus trugen wesentlich zum wirtschaftlichen Aufstieg Südafrikas in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bei, von dem insbesondere die weiße Bevölkerung unter dem damaligen Apartheid-Regime profitierte. Der wirtschaftliche Erfolg etlicher der großen internationalen Bergbau- und Explorationsfirmen begründete sich auf dem Goldbergbau in Südafrika (z. B. Anglo American, Anglovaal, Goldfields). Die Situation wandelte sich grundlegend in den letzten drei Jahrzehnten, zeitgleich mit dem politischen Wandel vom weißen Apartheid-Regime zu einer demokratisch gewählten, mehrheitlich schwarzen Regierung. Heute rangiert Südafrika nur noch an 8. Stelle der führenden goldproduzierenden Länder. Die Förderquote sinkt seit Jahren (Abb. 5a). Mittels einer Hubbert-Linearisierung lässt sich die hypothetische förderbare Gesamtmenge auf etwa 59.000 t abschätzen (Abb. 5b), was sich sehr gut mit den noch nachweislich vorhandenen abbauwürdigen Vorräten (Reserven) von 5000 t deckt. Weitere geschätzte 30.000 t Gold werden noch in größerer Tiefe vermutet, sind jedoch mit derzeitigen konventionellen Abbaumethoden nicht wirtschaftlich gewinnbar und gelten daher als Ressourcen (FRIMMEL 2014). Schon heute sind die Goldminen im Witwatersrand die tiefsten Bergbaubetriebe der Welt, mit Untertageabbau bis zu Tiefen von über

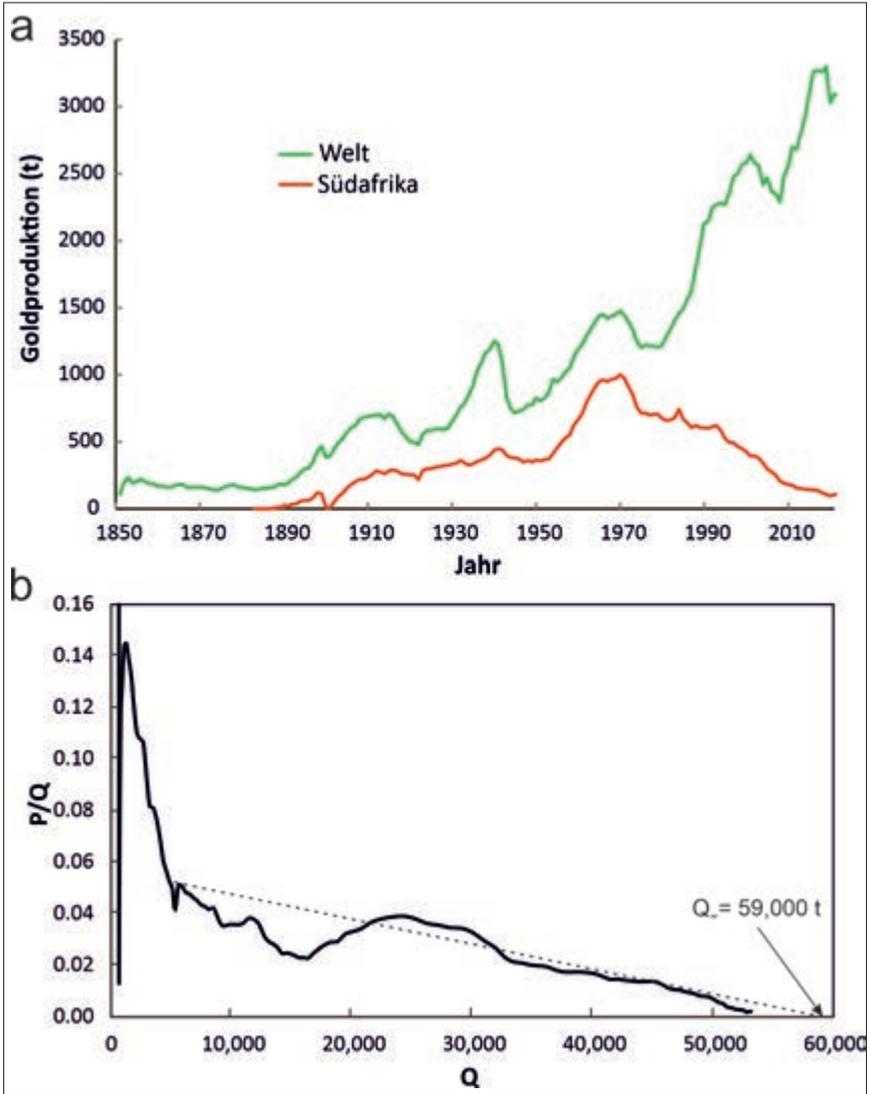


Abbildung 5: (a) Globale Goldförderung im Vergleich zu jener von Südafrika seit 1850; (b) Verhältnis von jährlicher südafrikanischer Goldproduktion (P) zu kumulativer Produktion (Q) versus Q mit Hubbert Linearisierung, die die theoretische gesamte förderbare Menge an Gold in Südafrika abschätzen lässt (Q_{∞}); Diagramm: H. E. Frimmel.

Figure 5: (a) Global gold production in comparison to that of South Africa since 1850; (b) Ratio of annual gold production P over cumulative production (Q) versus Q with Hubbert Linearisation, which enables a rough approximation of the hypothetical total amount of mineable gold in South Africa (Q_{∞}); diagram: H. E. Frimmel.

4 km (Abb. 6). Temperaturen von über 60 °C dort unten verlangen teure, energieintensive Kühlungsmaßnahmen an den Abbauörtern. Südafrika entwickelte sich jedoch von einem Billigstromland zu einem der Länder mit den höchsten Strompreisen. Die Löhne der Bergarbeiter steigen seit Jahren im zweistelligen Prozentbereich. So ist es nicht verwunderlich, dass die Produktionskosten der südafrikanischen Goldminen mittlerweile zu den höchsten der Welt zählen. Hinzu kommt die Angst vor dem Verlust von zehntausenden von Arbeitsplätzen. Sie verleitet Gewerkschaften und Bergarbeiter dazu, sich gegen Einführung oder auch nur Tests jeglicher alternativer, mehr oder minder automatisierter Abbaumethoden zu wehren. Die Motivation, in die Modernisierung der Minen zu investieren, ist unter solchen Umständen gering und wird von der Politik auch nicht gefördert. Unter diesen Umständen ist das Ende eines Giganten in Sicht.



Abbildung 6: Noch immer werden die goldführenden Konglomerate in den Witwatersrand Goldfeldern mit arbeitsintensiven konventionellen Methoden in bis zu 4 km Tiefe abgebaut; photograph: H. E. Frimmel.

Figure 6: The auriferous conglomerates in the Witwatersrand goldfields are still being mined by labour-intensive conventional methods at depths as high as 4 km; photograph: H. E. Frimmel.

Ein weiteres Problem liegt im Umstand, dass die goldführenden Konglomerate des Witwatersrand auch ein enormes Reservoir von Uran sind. Der Mangel an atmosphärischem Sauerstoff zur Zeit der Sedimentablagerung ermöglichte den Transport von detritären Uraninitkörnern und -geröllen in den archaischen Flüssen und deren Anreicherung als Schwermineral in den Goldseifen. Dies führte dazu, dass die Konglomerate der Witwatersrand Hauptgruppe nicht nur die welt-

größte Konzentration von Gold beinhalten, sondern gleichzeitig auch eine der weltgrößten Uran-Ressourcen darstellen (FRIMMEL 2019). So schlummert noch eine Ressource von über 200.000 t U_3O_8 in diesen Gesteinen. Eine noch viel größere Menge, knapp 1 Mt U_3O_8 , ist jedoch fein verteilt in der Vielzahl von Bergbauhalden. Dies entspricht rund 9 % der weltweiten Uran-Ressourcen (FRIMMEL & MÜLLER 2011). Neben dessen wirtschaftlicher Bedeutung birgt diese Uran-Anhäufung auch ein enormes ökologisches Problem. Die alten Halden sind zum Teil inmitten von verbautem Gebiet, und Staub aus ihnen verteilt radioaktive Partikel in tausende von Haushalten (NWAILA, GHORBANI, ZHANG et al. 2021).

3.2 Bändereisenerz und Manganerz

Neben magmatischen Eisenoxid-Apatit und magmatogen hydrothermalen Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätten spielt heute de facto nur noch Bändereisenerz eine Rolle als prinzipielle Eisenquelle für die Stahlerzeugung. Die vier wichtigsten Förderländer sind in abnehmender Reihenfolge Australien (960 Mt Fe in 2023), Brasilien (440 Mt), China (280 Mt) und Indien (270 Mt). Südafrika nimmt mit einer Förderung von 61 Mill. t in 2023 Rang 8 ein (United States Geological Survey 2024). Das südafrikanische Eisenerz wird aus der ca. 2,4 Ga alten Hotazel Formation der Transvaal Hauptgruppe gewonnen. Diese Formation beinhaltet drei sedimentäre Manganoxid-Schichten, die mit Bändereisenerz in Wechsellaagerung liegen. Mit einem Fe_2O_3 -Gehalt von 70–97 % stellen letztere eine wichtige Eisen-Quelle dar. Reicherze finden sich vor allem dort, wo in späteren Zeiten, vor allem vor ca. 2,0 Ga und 45 Ma, die Erze durch Erosion freigelegt und durch meteorische Wässer oxidiert wurden. Die reichsten Eisenerze sind mittlerweile abgebaut und die bekannten Reserven von ca. 1000 Mt Erz mit 670 Mt Fe darin sind im Vergleich zu den anderen führenden Eisenerz-fördernden Ländern eher gering (bloß 0,6 % der globalen Vorräte).

Ganz anders ist die Situation in Bezug auf Mangan. Zwei Manganerzfelder werden in der Northern Cape Provinz von Südafrika unterschieden: die Kalahari und Postmasburg Manganfelder im Norden beziehungsweise Süden. Der Mn-Gehalt des Erzes liegt bei > 68 %, die jährliche Förderrate bei etwa 7,2 Mt und damit deutlich über jener von anderen Mangan-fördernden Ländern (Gabon: 4,6 Mt, Australien: 3,3 Mt). Mit 36 % der weltweiten Förderung steht Südafrika an der Spitze. Dies wird sich auch in Zukunft nicht so rasch ändern, da die Manganfelder in der südlichen Kalahari rund 38 % der globalen Mangan-Reserven beherbergen und damit deutlich mehr als die diesbezüglich nächstwichtigen Länder (China, Australien, Brasilien und die Ukraine). Noch eklatanter ist die Vormachtstellung Südafrikas bei den globalen Mangan-Ressourcen. Hierbei liegt Südafrikas Anteil bei über 70 %. Dies bezieht sich nur auf die Mangan-Ressourcen an Land und schließt Manganknollen am Meeresboden aus. Die industrielle Nutzung von letzteren wird jedoch in absehbarer Zukunft (noch) nicht realisierbar sein. Dem

stehen schwere Bedenken und große Unsicherheiten hinsichtlich Umweltbelastung, aber auch noch nicht geklärte grundsätzliche rechtliche Fragen sowie rein wirtschaftliche Limitierungen im Weg. Somit wird Südafrika auf absehbare Zeit der mit Abstand wichtigste Lieferant von Mangan bleiben.

3.3 Platingruppen-Metalle und Stahlveredler aus dem Bushveld Komplex

Die Rustenberg Layered Suite im unteren Teil des Bushveld Komplexes beherbergt bis zu 2 m mächtige Chromit-reiche (43–47 % Cr_2O_3) Lagen, die sich über mehr als 100 km im Streichen verfolgen lassen. Sie beinhalten ca. 94 % der Weltvorräte (Ressourcen) an Chromit, dem prinzipiellen Chromerz. Mit rund 18 Mt pro Jahr, was einem Anteil von 44 % der Weltproduktion entspricht, ist Südafrika mit Abstand der wichtigste Chromproduzent der Welt, gefolgt von Kasachstan (6,5 Mt/Jahr). Die nachgewiesenen Reserven im Bushveld Komplex belaufen sich auf ca. 200 Mt oder 36 % der globalen Reserven (Unites States Geological Survey 2024). Etliche dieser stratiformen Chromitit-Lagen sind hoch angereichert an PGM (Platin, Iridium, Osmium, Palladium, Rhodium und Ruthenium) mit PGM-Gehalten von 2,0–4,4 g/t. Damit beinhaltet der Bushveld Komplex die bei weitem größten Vorräte an solchen PGM. Die derzeit bekannten Reserven belaufen sich auf ca. 63.000 t, was etwa 90 % der globalen Reserven entspricht (Unites States Geological Survey 2024). Zu diesem bereits enormen Erzreichtum kommen noch riesige Vorräte an Vanadium, welches im Wesentlichen in Magnetit-reichen Lagen im oberen Bereich der Rustenberg Layered Suite konzentriert ist. Diese Lagen weisen V_2O_5 -Gehalte von 0,6 bis 1,8 Gew.% auf. Mit einer jährlichen Produktion von rund 9100 t (in 2022, entsprechend 9,1 % der globalen Produktion) liegt Südafrika an dritter Stelle, hinter China (70 %) und Russland (17 %). Die geschätzten Reserven im Bushveld Komplex liegen bei 3,5 Mt (ca. 13 % der globalen Reserven).

Die obigen Zahlen verdeutlichen die enorme Bedeutung des Bushveld Komplexes für die globale Versorgung mit Platin und Palladium – beides essenzielle Komponenten in einer Vielzahl von Katalysatoren, in erster Linie in Verbrennermotoren – als auch im Hinblick auf die Stahlveredler Chrom und Vanadium.

3.4 Buntmetall-Vererzungen in panafrikanischen Gebirgsgürteln

Etliche Bereiche in panafrikanischen Gebirgsgürteln, vor allem im Damara Gürtel im zentralen Namibia und seinen Fortsetzungen nach Südwesten im Gariep Gürtel sowie nach Nordwesten in den Kaoko Gürtel, waren von Buntmetall-Vererzungen betroffen, die eine Vielzahl von kleineren Lagerstätten, aber auch einige wenige große Lagerstätten hinterließen. Letztere umfassen die Rosh Pinah Pb-Zn-Lagerstätte im Süden Namibias in einem neoproterozoischen kontinentalen Riftgraben, dessen Füllung die vulkano-sedimentären Gesteinsabfolgen im östlichen



Abbildung 7: Beispiele von Mineralen, für die Tsumeb Weltruf erlangte: (a) Herausragende Kristalle von Azurit (tiefblau), zum Teil umgewandelt in Malachit (grün) auf einer Matrix von Smithsonit und Otavit (weiß). Letzteres Mineral, ein Cadmium-Karbonat, wurde erstmals aus Tsumeb beschrieben und nach dem dortigen Otavi Bergland benannt; Bildbreite: ca. 8 cm; (b) Gitterartige Cerussit-Verwachsung; Bildbreite: ca. 5 cm; Sammlung und Foto: H. E. Frimmel.

Figure 7: Examples of minerals for which Tsumeb became world-famous: (a) excellent crystals of azurite (dark blue), partly replaced by malachite (green) on a matrix of smithsonite and otavite (white). The latter mineral, a cadmium carbonate, was first discovered in Tsumeb and named after the Otavi Mountainland; width of photograph: ca. 8 cm; (b) grid-like intergrowth of cerussite crystals; width of photograph: ca. 5 cm; collection and photograph: H. E. Frimmel.

Gariep Gürtel erzeugte (FRIMMEL 2018). Seit 1969 wurden dort rund 28 Mt Erz mit im Schnitt 7 % Zn, 2 % Pb, 0,1 % Cu und 11 g/t Ag gewonnen. Die nachgewiesenen und vermuteten Reserven und Ressourcen belaufen sich auf insgesamt ca. 33 Mt Erz. Damit spielt Rosh Pinah (und Namibia insgesamt) zwar nicht in der vordersten Liga von Pb- und Zn-Produzenten, aber die Mine stellt nach wie vor einen wichtigen Wirtschaftsfaktor für Namibia dar.



Abbildung 8: Pseudomorph umgewandelter Azuritkristall, der nun vollständig als Malachit vorliegt und dabei dennoch seine ursprüngliche Azurit-Form beibehalten hat; Bildbreite: ca. 10 cm; Sammlung und Foto: H. E. Frimmel.

Figure 8: Pseudomorphic replacement of an azurite crystal, which is now entirely converted to malachite, though still preserving the original shape of azurite; width of photograph: ca. 10 cm; collection and photograph: H. E. Frimmel.

In den Vorlandbecken der Damara und Kaoko Gebirgsgürtel befinden sich unzählige, meist kleine Buntmetall-Vererzungen. Besonderen Berühmtheitsgrad

unter ihnen erlangte die größte unter ihnen, die Cu-Pb-Zn Lagerstätte Tsumeb im Otavi-Bergland. Dort wurden von 1905 bis 1996 rund 30 Mt Erz abgebaut, aus denen 1,7 Mt Kupfer, 2,8 Mt Blei, 0,9 Mt Zink und 80 t Germanium gewonnen wurden (MELCHER 2003). Mit durchschnittlich 10 % Pb, 4,3 % Cu, 3,5 % Zn, 100 g/t Ag und 50 g/t Ge war der Metallgehalt des Erzes nicht nur hoch, sondern auch vielfältig. Tsumeb war eine der wichtigsten Quellen für Germanium und Gallium, die beide heute als kritische Metalle gelten. Die Lagerstätte ist jedoch mittlerweile erschöpft. Der außerordentliche Berühmtheitsgrad von Tsumeb beruht aber auch auf dessen einzigartiger Vielfalt an unterschiedlichen Mineralen. Bislang wurden nicht weniger als 489 Mineralarten von dort beschrieben, davon 72 Erstbeschreibungen. Über 25 Mineralarten sind ausschließlich aus Tsumeb bekannt und von ca. 40 Mineralarten stammen die weltweit besten Exemplare von Tsumeb (Abb. 7). Dieser herausragende Mineralreichtum liegt an tiefgründiger supergener Oxidation der primären sulfidischen Erzminerale durch meteorische Wässer entlang von Karststrukturen, wobei sich die Verkarstung und damit einhergehende Oxidation immer wieder über einen langen Zeitraum von rund 500 Millionen Jahren bis heute erstreckte. Die wiederholte Einwirkung von meteorischen Wässern über solch lange Zeit und unter unterschiedlichen physikalisch-chemischen Bedingungen führte nicht nur zur Oxidation von primären sulfidischen Erzen zu Sulfaten, Karbonaten, Oxiden, Hydroxiden, Arsenaten, Vanadaten und Molybdaten, sondern auch zu komplexen Kristallisationsabfolgen mit einzigartigen Mineralumwandlungen unter Beibehaltung der Form des Ausgangsminerals – sogenannten Pseudomorphosen (Abb. 8).

3.5 An panafrikanische Granite gebundene Uran-Lagerstätten

Der zentrale Abschnitt der Namibwüste – geologisch geprägt durch hochgradig metamorphe und magmatische Gesteine im westlichen Damara Orogen – ist hoch angereichert an Uran. An vorderster Stelle stehen hierbei an Granit gebundene Lagerstätten, mit Rössing als Typlokalität. Die Rössing Mine ist seit 1976 in Betrieb und galt als die weltweit größte magmatische Uranlagerstätte. Sie entwickelte sich in der Zwischenzeit zum weltweit am längsten in Betrieb befindlichen Uran-Tagebau, dessen Betriebsende kürzlich von 2026 auf 2036 verlängert wurde dank einer Reserve von noch rund 72 Mt mit einem U_3O_8 -Gehalt von 0,039 %. Jährlich werden ca. 16–21 Mt Gestein abgebaut, wovon ca. 41 % Abraum sind. Die Menge des aus dem Erz extrahierten U_3O_8 belief sich in den letzten Jahren auf typischerweise 2100 bis 2500 t/Jahr. Dessen Verkauf – rund 72 % davon gingen an China – machte etwa 10 % der gesamten namibianischen Exporte aus. Intensive Exploration führte zur Entdeckung einer Reihe weiterer, ähnlicher Lagerstätten mit insgesamt über 1000 Mt Erz mit U_3O_8 -Gehalten zwischen 0,02 und 0,05 %. Verwitterungsbedingte Umlagerung primärer Uran-Anreicherungen führte vielerorts zu sekundären Uranlagerstätten in alten, mit Krustenkalk (engl. calcrete)

gefüllten ehemaligen Flussläufen. Ihnen wird zwar großes Potenzial für die Zukunft beigemessen (sie sollen Vorräte von immerhin weiteren knapp 600 Mt Erz enthalten), aber deren U_3O_8 -Gehalt ist mit 0,01 bis 0,02 % sehr niedrig.

3.6 Edelsteine

Im Sinne von Wertschöpfung ist Diamant mit Abstand der wichtigste Edelstein. Mit der Entdeckung von Diamanten in Kimberlit in der Typlokalität Kimberley im Jahr 1871 stieg Südafrika rasch zum weltweit wichtigsten Produzenten dieses begehrten Edelsteins auf. Bis zum Ersten Weltkrieg kamen faktisch alle Diamanten auf dem Weltmarkt von Südafrika (Mc KECHNIE 2019) und De Beers gewann rasch eine Monopolstellung. Dies inkludierte seit 1908 Diamanten von der namibianischen Westküste, wo sie in fossilen Strandterrassen als sekundäre Seifenlagerstätten auftreten. Zwischen den beiden Weltkriegen wurde der globale Diamantmarkt zunehmend von sekundären Lagerstätten in Westafrika beliefert, doch danach gewann De Beers seine Vormachtstellung zurück, und enorme Explorationsbemühungen wurden mit einer Reihe von Neuentdeckungen in Ostafrika, Demokratischer Republik Kongo (DRC), Botswana, Angola, Eswatini, Lesotho und letztlich auch Südafrika belohnt. Die globale Diamantförderung stieg stark an auf über 40 Millionen Karat pro Jahr in den 1970er-Jahren, mit den meisten Diamanten immer noch aus dem Südlichen Afrika, aber mit zunehmender Konkurrenz aus Russland. In den 1980er-Jahren stieg die Weltproduktion nochmals kräftig an, um schließlich 2006 einen Höhepunkt zu erreichen mit über 170 Millionen Karat. Dazu trug wesentlich die Entdeckung der Argyle Lagerstätte in Australien bei mit jährlich 26 bis 34 Millionen Karat in den 2000er-Jahren und jene von diamantführenden Kimberliten in Kanada in den 1990er-Jahren. Zum Zeitpunkt des bisherigen Höhepunkts in der globalen Diamantförderung in 2006 war das Südliche Afrika (Südafrika, Namibia, Angola, Botswana, Zimbabwe und Lesotho) mit einem Anteil von über 40 % die weltweit wichtigste diamantfördernde Region. Botswana (24 %) und Südafrika (10 %) spielten hierbei die größten Rollen. Außerhalb dieser Region trugen in erster Linie Australien (20,5 %) und Kanada (9 %) zur globalen Förderung bei. Die australischen Diamanten sind jedoch von deutlich schlechterer Qualität und werden zum Großteil als Industriediamanten verwendet, sodass das Ranking in Bezug auf Wertschöpfung deutlich anders aussieht. Seither hat sich die weltweite Diamantförderung beinahe halbiert. Im Jahr 2022 betrug die gesamte Förderung an Schmuckdiamanten nur noch 76 Mill. Karat, mit Russland an vorderster Stelle (28 %), gefolgt von Botswana (24 %), Kanada (21 %), Angola (10 %) und Südafrika (5 %). Im Vergleich dazu wurden im selben Jahr insgesamt 46 Mill. Karat an Industriediamanten gefördert, die meisten davon aus der Demokratischen Republik Kongo und Russland (jeweils 24 %), gefolgt von Botswana (15 %) und Südafrika (13 %). Dies zeigt, dass Südafrika zwar seine frühere Vormachtstellung längst eingebüßt hat – die Vorräte gehen zur Neige –, aber

das gesamte Südliche Afrika, inklusive 2,3 Mill. Karat von der namibianischen Küste, mit 35 % immer noch die produktivste Region in der Welt ist.



Abbildung 9: Langprismatischer Jeremejewit auf Mikroklin – einer der wenigen auf Matrix erhaltenen Kristalle dieses extrem seltenen Edelsteins; Meile 72 nördlich Swakopmund, Namibia; Bildbreite: ca. 4 cm; Sammlung und Foto: H. E. Frimmel.

Figure 9: Long-prismatic jeremejevite on microcline – one of the very few crystals of this extremely rare gemstone that is still preserved on its matrix; Mile 72 north of Swakopmund, Namibia; width of photograph: ca. 4 cm; collection and photograph: H. E. Frimmel.

Andere Edelsteine spielen im Vergleich zu Diamanten eine nur sehr untergeordnete, aber nicht genau bezifferbare wirtschaftliche Rolle. In diesem Zusammenhang sind in erster Linie an Pegmatit gebundene Lagerstätten von Turmalin, Topas und Aquamarin in Namibia zu nennen. Der größte Teil davon wird im Kleinstbergbau (artisanalem Bergbau) gewonnen. Hierbei sind zwar Tausende von Arbeitskräften involviert, der Handel erfolgt jedoch meist über den Schwarzmarkt und es gibt keine belastbaren Zahlen zu konkreten Fördermengen. Eine mineralogische Besonderheit ist das Vorkommen des Minerals Jeremejewit. Erstmals 1883 am Suktujberg im Nerschinsk District in der Adun-Tchilon Bergkette in Sibirien (Russland) entdeckt und danach jahrzehntelang von keinem weiteren Ort bekannt, entpuppte sich dieses Aluminiumborat mit einer Mohs'schen Härte von 7 (so wie Quarz) in den 1970er-Jahren als einer der seltensten Edelsteine der Welt. Auslöser war eine Entdeckung in einem kleinen Pegmatitkörper an der Küste Namibias (Meile 72 nördlich von Swakopmund), wo bis 5 cm lange, kornblumenblaue, schleifbare Kristalle gefunden wurden (Abb. 9). Das Vorkommen

ist jedoch längst erschöpft. Seit 2001 werden auch sehr selten schleifwürdige Jeremejewitkristalle auf der Farm Ameib im Erongogebirge im zentralen Namibia geborgen.

4 Das südliche Afrika als zukünftiger Rohstofflieferant für Europa und die Welt

Das Südliche Afrika ist eine der klassischen Bergbauregionen der Welt. Die Förderung von mineralischen Bodenschätzen dort trug entscheidend zum wirtschaftlichen Aufstieg von Ländern wie Südafrika, Namibia und Botswana bei.

Der Startschuss für Bergbau im industriellen Maßstab erfolgte 1852, als der Okiep Distrikt im Namaqualand im Westen Südafrikas zum ersten offiziellen Bergbaudistrikt im gesamten südlichen Afrika erklärt wurde. Mit der Entdeckung der Diamanten bei Kimberley und später von Gold am Witwatersrand, was zur Gründung der wichtigsten Metropole – Johannesburg – führte, begann ein einzigartiger Aufstieg des Bergbaus in Südafrika. So trug der Bergbau beispielsweise 1970 über 21 % des Bruttoinlandproduktes (BIP) bei, allein 17 % kamen vom Bergbau im Witwatersrand, als die Goldförderung dort mit ca. 1000 t pro Jahr ihren Höhepunkt erreichte. Mehr als die Hälfte des gesamten Exportvolumens wurde durch den Abbau mineralischer Rohstoffe erwirtschaftet (54 % in den 1970er-, 61 % in den 1980er-Jahren). Entsprechend hoch war auch der Anteil der im Bergbau Beschäftigten, typischerweise so um die 10 % aller Beschäftigten. Allein im Goldbergbau fanden bis zu einer halben Million Menschen unmittelbar Arbeit, im gesamten Bergbausektor über 800.000. Der Anteil des Bergbau-Sektors am BIP sank in den Jahren danach sukzessive (1975: 14 %, 1995: 11 %, 2011: 9,6 %, 2022: 7,5 %), was weniger einer Abnahme von bergbaulicher Aktivität, sondern vielmehr einer Diversifizierung der südafrikanischen Wirtschaft mit einem stark steigenden Anteil des Dienstleistungssektors geschuldet ist.

Südwestafrika (das heutige Namibia), von den europäischen Kolonialisten lange Zeit als ein Streifen wertloser Wüste abgetan, gelangte in den Fokus wirtschaftlichen Interesses, nachdem dort etliche Erzlagerstätten (an erster Stelle Tsumeb) und schließlich 1908 Diamanten entdeckt worden waren. In den folgenden Jahren, bis zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs, trugen die aus dem Verkauf der Diamanten erzielten Steuern rund zwei Drittel der gesamten Einnahmen des damaligen deutschen Schutzgebietes bei. Jahrzehnte später, in den 1970er- und 1980er-Jahren, galt der Verkauf von illegalen, aus dem Bergbau um Oranjemund von dortigen Arbeitern gestohlenen Diamanten als besonders wichtige Finanzierungsquelle des schwarzen, von der SWAPO geführten Widerstands gegen das weiße Apartheidregime, das von Südafrika das Land als de facto fünfte Provinz damals verwaltete. Dies führte schließlich 1990 zur Unabhängigkeit Namibias und der Wahl des seinerzeitigen SWAPO-Anführers, Samuel Nujoma, zum ersten

Präsidenten Namibias. Er setzte große Hoffnungen in den Bergbau als treibende Kraft für den wirtschaftlichen Aufstieg des jungen Landes, die teilweise erfüllt wurde. Heute liegt der Anteil von Bergbau am BIP bei etwa 10 %.

Bis in die 1970er-Jahre war Botswana eines der ärmsten Länder Afrikas, dessen Haupteinnahmequellen in extensiver Viehzucht und spärlich entwickeltem Tourismus lagen. Mit der Entdeckung der ersten diamantführenden Kimberlit-Schloten 1966 und dem Aufbau von Diamantminen im folgenden Jahrzehnt stieg Botswana mit einem BIP pro Kopf von rund 7642 US\$ im Jahr 2023 zum viertreichsten Land Afrikas auf (hinter den Seychellen, Mauritius und Gabun). Auch dort liegt heute der Anteil des Bergbaus am BIP bei etwa 10 % – einem Wert, der für die gesamte Region typisch ist.

Wenn auch die Signifikanz von Bergbau für die Wirtschaft im Südlichen Afrika – und somit die Bedeutung der Region als Rohstofflieferant für die (westliche) Welt – in der Vergangenheit sehr hoch gewesen sein mag, so erscheinen die Zukunftsaussichten doch eher getrübt. Dafür gibt es eine Reihe von Gründen, die vorerst am Beispiel Südafrikas – der mit Abstand stärksten Volkswirtschaft in der Region – erläutert werden sollen.

Das soziopolitische Umfeld hat sich in den letzten Jahrzehnten radikal verändert. Bis zum Ende der Apartheid im Jahr 1994 galt der Bergbau als wesentliche ökonomische Stütze des weißen Minderheitsregimes, gleichzeitig aber auch als Ort des Widerstands. Die hohe Abhängigkeit des Staatsgefüges vom Bergbau gab den früher schlecht bezahlten und sozial kaum abgesicherten Minenarbeitern eine vorerst ungeahnte Macht. Sie konnten durch Streiks nicht nur den von einer weißen Elite geführten Bergbauunternehmen, sondern dem gesamten Staatsgefüge gefährlich werden. Einer, der dies früh erkannte, war Cyril Ramaphosa, der im Kampf gegen das Apartheid-Regime als Gründer und Generalsekretär der größten und mächtigsten Gewerkschaft des Landes, der National Union of Mineworkers (NUM), eine führende und letztlich höchst erfolgreiche Rolle spielte. Seit 2018 ist er Präsident von Südafrika und einer der 15 reichsten Männer des Landes. Nicht überraschend ist, dass der reichste Mann, Nicky Oppenheimer, sein Vermögen in erster Linie dem Abbau von Diamanten in dritter Generation als Direktor von De Beers verdankt. Aber auch der ehemalige Gewerkschaftsführer, der seinerzeit Bergbau-Unternehmen wie De Beers bekämpft hatte, erlangte seither seinen Reichtum durch diverse Beteiligungen an den großen Bergbauunternehmen des Landes.

Symptomatisch für den Wandel im südafrikanischen Bergbau war das Jahr 2012, als es zu gewaltsamen Demonstrationen in platinfördernden Minen kam. Neben den üblichen Forderungen nach deutlich höheren Gehältern und besseren Arbeitsbedingungen kam es zu Rivalitäten zwischen zwei Gewerkschaftsorganisationen. Die Unruhen wurden gewaltsam, auch von Seiten der südafrikanischen Polizei und folglich zumindest mit Zustimmung des Präsidenten, niedergeschlagen, was 44 Menschen das Leben kostete (Marikana-Massaker) und monatelangen Stillstand in der Produktion nach sich zog. Die dabei zum Ausdruck gebrach-

te hohe Demonstrations- und Gewaltbereitschaft weckte nicht gerade großes Vertrauen und Investitionsbereitschaft auf Seiten der internationalen Bergbauunternehmen, und die globale Versorgung mit Platin, primär für Autokatalysatoren, war deutlich eingeschränkt. So ging die Menge an gefördertem Platin 2012 um 16 % im Vergleich zum Vorjahr zurück, der Platinpreis bewegte sich auf sehr hohem Niveau, um 1550 US\$/Unze, um danach von 2014 an wieder auf das Niveau von den 2000er-Jahren, d. h., um 900 US\$/Unze, zu sinken. Das Marikana-Massaker war der traurige Höhepunkt einer Entwicklung, die den südafrikanischen Bergbau nachhaltig beeinträchtigte – der Verschlechterung in den Arbeitgeber-Arbeitnehmer-Beziehungen. Nach der Machtübernahme durch den ANC und der Wahl von Nelson Mandela zum Staatspräsidenten im Jahr 1994 bewirkte eine enge Kooperation zwischen NUM und Bergbauunternehmen eine Phase der Stabilität. Die Arbeitgeber gewährten kontinuierliche Lohnerhöhungen, die NUM verzichtete im Gegenzug auf spontane Streiks und genoss das Privileg, als größte Einzelgewerkschaft des Landes eine Monopolstellung einzunehmen mit einer extrem hohen gewerkschaftlichen Mobilisierungsrate von über 80 %. Es begannen sich aber die Vorwürfe zu mehren, dass es Interessenskonflikte zwischen Gewerkschaftsvertretern und bergbaulichen Geschäftsführungen gäbe. Solche Vorwürfe der Korruption führten dazu, dass mehr und mehr Bergarbeiter unter Umgehung von NUM Streiks und Tarifverhandlungen organisierten, was nicht nur rivalisierenden Gewerkschaftsorganisationen Aufwind gab, sondern auch die oben erwähnte Stabilität unterminierte.

Neben den regelmäßig eingeforderten Lohnerhöhungen üben Unruhen in den Betrieben enormen Druck auf die Produktionskosten. Nicht überraschend erwirtschaftete der weltweit größte Platinproduzent, Anglo American Platinum, 2012 erstmals in seiner Geschichte einen Verlust. Die Schließung von Minen und der Verlust von Tausenden von Arbeitsplätzen waren die Folge. Neben einer zunehmenden Radikalisierung der Gewerkschaften steigt der Druck auf die Bergbauunternehmen auch von einer anderen Seite. Bergbau ist extrem energieintensiv. Galt Südafrika vor drei Jahrzehnten noch als ein Billigstrom-Land mit erheblichen Überkapazitäten, so ist der Alltag im Land seit über 15 Jahren geprägt von täglichen Stromabschaltungen und weit über der Inflationsrate steigenden Strompreisen. Viele der Probleme lassen sich auf veraltete Infrastruktur, Sabotage und Korruption zurückführen. Ein Untertage-Abbau mit Tausenden von Menschen in Tiefen von bis zu 4 km ohne verlässliche Stromversorgung ist völlig undenkbar, die Herausforderungen für Bergbauunternehmen, unter solchen Umständen zu operieren sind entsprechend hoch.

Ein weiterer Störfaktor liegt in der politischen Debatte über mögliche Nationalisierung. Seit 2009 wird das Investitionsklima durch nicht endende Diskussionen darüber verdüstert, wie und zu welchem Ausmaß der Bergbau in Südafrika verstaatlicht werden könnte. Bislang hat sich der regierende ANC dagegen ausgesprochen, aber linksradikale politische Gruppierungen propagieren solche Pläne

immer wieder. Bei den diesjährigen Parlamentswahlen erzielten diese Gruppierungen, vornehmlich MK und EFF, zusammen 25,4 % bei gleichzeitigem Verlust der absoluten Mehrheit für den ANC (40,2 %). Vorerst ist jedoch die Gefahr einer Verstaatlichung gebannt, da weder MK noch EFF an der neuen südafrikanischen Regierung beteiligt sind.

Die Erzförderung in den meisten südafrikanischen Minen verläuft im Großen und Ganzen konventionell, was viele Arbeitsplätze schafft. Schon seit vielen Jahren verharrt die Zahl der im Bergbausektor Tätigen auf einem konstant hohen Niveau von rund einer halben Million. Unter Berücksichtigung der diversen Zulieferer und der Infrastruktur um die Minen herum liegt die Anzahl der Menschen, die direkt oder indirekt vom Bergbau abhängig sind, im Bereich von Millionen. Aus rein betriebswirtschaftlichen Überlegungen gäbe es ein hohes Rationalisierungspotenzial in vielen Minen. Solche Rationalisierungsmaßnahmen würden jedoch zu Entlassungen führen, was wiederum den Widerstand der Belegschaften bewirkt und die Investitionsbereitschaft von Minenbetreibern drastisch senkt. Am stärksten kommt dieses Problem in den Goldminen des Witwatersrand zum Vorschein. Vor zwei Jahrzehnten noch schätzte die South African Chamber of Mines, dass neben den nachgewiesenen Reserven dort noch rund 36.000 t Gold als vermutete Ressource in der Tiefe schlummern könnten. Wie oben erwähnt wurden bislang über 53.300 t Gold gefördert (siehe Abb. 5a), was einer gesamten Goldmenge von rund 90.000 t entspräche. Mittels einer Hubbert-Linearisierung (siehe Abb. 5b) ließ sich grob die gesamte förderbare Menge auf rund 59.000 t abschätzen. Dies kommt den offiziell bekannt gegebenen Reserven (5000 t) und der daraus resultierenden gesamten förderbaren Menge von ca. 58.000 t sehr nahe. Bei einer jährlichen Fördermenge von rund 110 t sollten die Reserven zwar noch für weitere 45 Jahre reichen, aber der frühere Primus unter den Goldförderländern wird im globalen Vergleich nur noch eine sehr untergeordnete Rolle spielen. Sollten die südafrikanischen Minen ausfallen, so hätte dies keine signifikante Auswirkung auf den Goldmarkt, weder aus globaler noch aus europäischer Sicht. Es bleibt aber die Frage, wo bei dieser Prognose die restlichen 32.000 t verortet werden. In den letzten Jahren werden diese nicht mehr aufgeführt (United States Geological Survey 2024). Dies liegt wohl daran, dass sie in zu großen Tiefen lagern, um mit konventionellen Methoden geborgen werden zu können. Schon vor mehr als einem Jahrzehnt wurde auf die Notwendigkeit alternativer Gewinnungsmethoden (wie beispielsweise automatisierte Auslaugungsverfahren) hingewiesen (FRIMMEL 2014), aber Versuche, solch innovative Abbaumethoden zu entwickeln, wurden eher stiefmütterlich betrieben und stießen auf völlige (zum Teil gewaltsame) Ablehnung von Seiten der Minenarbeiter.

Problematisch ist auch ein stark steigender Trend in illegalem Abbau. Seit langem ist in Südafrika der private Besitz von unverarbeitetem Gold und Rohdiamanten strengstens verboten und jegliche Übertretungen dieses Gesetzes wurden schärfstens geahndet. Verstärkte, großteils unkontrollierte Immigration aus ande-

ren afrikanischen Ländern in Kombination mit der Schließung vieler Goldgruben bewirkte in den letzten Jahren mehr und mehr illegalen Abbau von Golderzen, vor allem im Witwatersrand. Dort tummelt sich eine unbekannte Anzahl von Menschen tief unter der Erde in alten Stollen, ohne oft monatelang das Sonnenlicht zu sehen. Diese illegalen Aktivitäten sind nicht nur ein enormes Sicherheitsrisiko und Grund für kriminelle Konflikte mit immer wieder tödlichem Ausgang, sie kosten der südafrikanischen Wirtschaft auch viel Geld. Im November 2023 wurden 3300 Soldaten der südafrikanischen Armee bereitgestellt, um die Polizei im Kampf gegen die illegalen Bergarbeiter zu unterstützen. Der finanzielle Schaden wird von der Regierung auf rund 3,5 Milliarden Euro jährlich geschätzt.

Eine gänzlich andere Situation bei der Rolle Südafrikas als Rohstofflieferant zeigt sich in Bezug auf die Platingruppen-Metalle. Die einzigartige Stellung des Bushveld Komplexes als weltweit mit Abstand größte Ressource von PGM garantiert Südafrika eine Vormachtstellung für die absehbare Zukunft. Nicht weniger als 90 % der bekannten Reserven (63.000 t PGM) und ein vermutlich noch größerer Anteil an Ressourcen liegen im Bushveld Komplex. Eine starke Abhängigkeit bei der Versorgung mit PGM von Südafrika ist somit vorgezeichnet. Dies betrifft im Besonderen die Autoindustrie, die mit 35 % der größte Verbraucher ist, gefolgt von Schmuckherstellung (26 %) und PGM als Wertanlage (15%). Die Bedeutung von PGM für die Autoindustrie begann in den 1980er-Jahren mit der Verschreibung von Katalysatoren in Abgasanlagen von Verbrennermotoren und stieg seither parallel zum globalen Anstieg in der Autoproduktion. Mit dem angestrebten Übergang von Verbrennermotoren zu Fahrzeugen mit Elektromotor oder Brennstoffzellen wird sich der Bedarf nach PGM sogar noch weiter erhöhen, denn sie stellen essenzielle Bestandteile von letzteren dar.

Hinsichtlich weltweiten Bedarfs liegen Europa und China zurzeit etwa gleichauf mit jeweils rund 50 t PGM pro Jahr, vor Japan und Nordamerika mit jeweils etwa der Hälfte davon. Während die USA und Kanada zumindest einen Teil ihres Bedarfs über gewisse Zeit aus eigener Produktion decken könnten (die dortigen Reserven belaufen sich auf 900 bzw. 310 t), sind die Autoindustrien von Europa, China und Japan auf den Import von PGM angewiesen. In der gegenwärtigen geopolitischen Lage ist die Situation für die EU-Länder und Japan besonders prekär, denn das Land mit den zweitgrößten Vorräten ist Russland (5500 t PGM), das in der derzeitigen angespannten politischen Situation wohl kaum als verlässlicher Lieferant gewertet werden kann. Theoretisch könnte Platin durch Palladium substituiert werden. Aber dies würde im Versorgungskrisenfall nicht weiterhelfen, denn neben Südafrika gilt auch hier wieder Russland als mit Abstand wichtigstes Förderland (jeweils 80–90 t pro Jahr).

Lange Zeit wurde der Bergbau im Südlichen Afrika von westlich orientierten Firmen und Abnehmern dominiert, was in der früheren Kolonialzeit wurzelt. In einigen Bereichen kam es nach Erlangung der Unabhängigkeit zu Teilverstaatlichungen. So ist der formale Diamantenabbau sowohl in Botswana als auch in

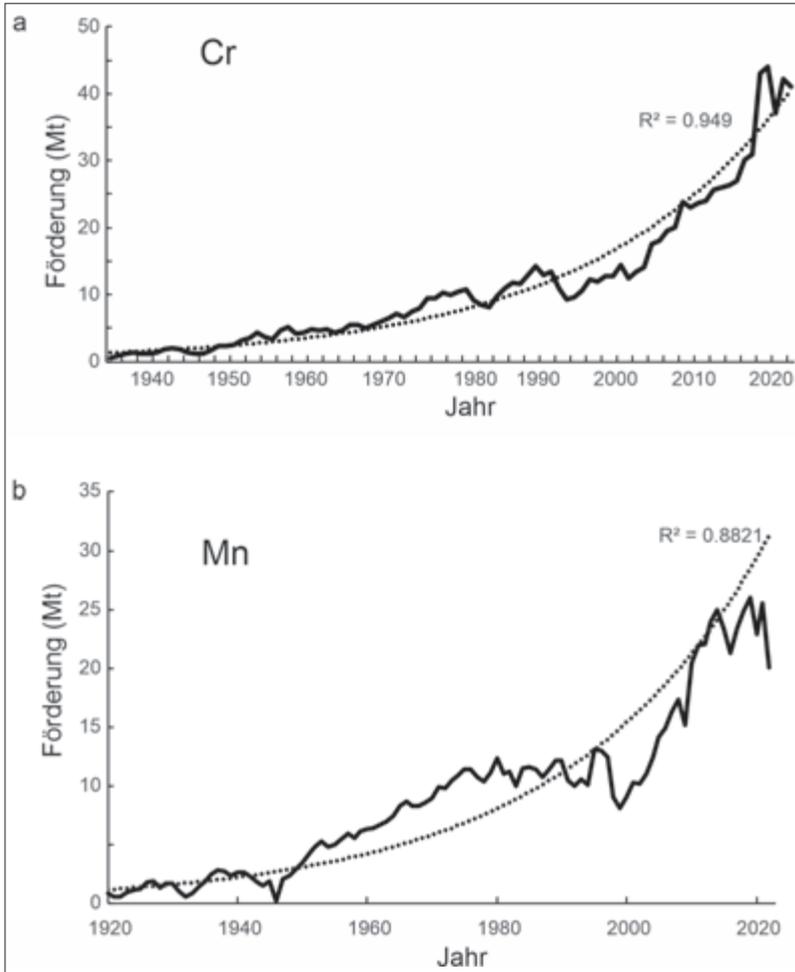


Abbildung 10: Globale Chrom- (a) und Manganförderung (b); beide zeigen einen exponentiellen Anstieg, was auf überdurchschnittlich hohe Wachstumsraten in den nächsten Jahrzehnten schließen lässt. Dieser Bedarf wird zum größten Teil aus Südafrika gedeckt werden müssen; Datenquelle: British Geological Survey für Cr (<https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldArchive.html>) und US Geological Survey für Mn (<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>); Diagramm: H. E. Frimmel.

Figure 10: Global chromium (a) and manganese (b) production curves: both show an exponential increase, from which an above-average future growth can be inferred over the next decades. It is expected that South Africa will have to meet this demand to a large extent; data sources: British Geological Survey for Cr (<https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldArchive.html>) and US Geological Survey for Mn (<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>); diagram: H. E. Frimmel.

Namibia zu jeweils 50 % in den Händen von De Beers und dem Staat (Debswana in Botswana und Namdeb in Namibia). Generell standen im letzten Jahrhundert die abgebauten Rohstoffe aber primär Abnehmern im Westen zur Verfügung, und westliche Firmen und Investoren waren die Hauptprofiteure. Diese Situation hat sich in den ersten Jahren dieses Jahrhunderts sukzessive geändert. Ein Beispiel hierfür ist der Aufkauf eines der größten PGM-Produzenten, der britischen Firma Lonmin (früher Lonrho), durch die südafrikanische Sibanye-Stillwater Aktiengesellschaft im Jahr 2019, die nun Weltführer geworden ist, neuerdings auch im Recyclen von PGM aus Altmetall.

Chinas auch in Zukunft absehbarer weiter stark steigender Hunger nach Rohstoffen hat erhebliche Auswirkungen auf den internationalen Markt und die Akquisition von Lagerstätten und Minen. Gleiches wird in Zukunft auch vermehrt auf Indien zutreffen. Der gesamte afrikanische Kontinent erlebt derzeit eine Phase der Neokolonialisierung durch China. Kaum ein anderer Bereich ist davon so betroffen wie der Bergbau, und das Südliche Afrika stellt hier keine Ausnahme dar. Die Geschichte von Samancor möge als Beispiel dienen. Diese südafrikanische Firma war bis zum Ende des 20. Jahrhunderts der weltweit führende Produzent von Stahlveredlern, in erster Linie Chrom und Mangan aus dem Bushveld Komplex bzw. den Manganfeldern in der südlichen Kalahari. Nach der Übernahme durch den früheren Hauptaktionär Billiton im Jahr 1998, der anschließend mit der australischen Firma BHP zu BHP-Billiton fusionierte, wurde der Großteil des Unternehmens 2005 an eine dubiose Firma mit erheblichen Interessen in Kasachstan, der Kermas Group, verkauft. Im Jahr 2021 wurde diese wiederum an ein chinesisches Konsortium, angeführt von der staatlichen Firma Sinosteel, veräußert. Seither werden die Mangan- und Chromerze an ausländische, hauptsächlich asiatische Firmen verkauft, die so gut wie keine Informationen über ihre Aktivitäten publizieren. Dieser Verlust von südafrikanischer Kontrolle folgt einem ähnlichen Ausverkauf von seinerzeit großen südafrikanischen Unternehmen in den Jahren zuvor: jenem von Iscor, dem seinerzeitigen südafrikanischen Stahlriesen, an Arcelor Mittal aus Indien, oder dem von Highveld Steel and Vanadium an die russische Firma Evraz. Eine ähnliche Entwicklung prägte den Buntmetallsektor. Die größten Zinkminen im südlichen Afrika werden heute von Vedanta Resources betrieben, einer Firma, die von einem indischen Milliardär (Anil Agarwal) kontrolliert wird.

Die nach Asien orientierte Verlagerung von Geschäftsinteressen könnte profunde Auswirkungen auf die Versorgung der westlichen Industrienationen haben. Jeder Industriestandort benötigt Stahlveredler wie Chrom und Mangan. Betrachtet man die globalen Produktionskurven für diese beiden Metalle über die vergangenen Jahrzehnte (Abb. 10), so zeigt sich ein im Schnitt exponentieller Wachstumstrend. Bei Mangan ist dieser Trend zwar durch eine Phase der Stagnation in den 1980er- und 1990er-Jahren unterbrochen, seither aber durch einen besonders starken Anstieg gekennzeichnet und befindet sich nun auf einem hohen Niveau

von rund 25 Mt/Jahr. Eine schwächelnde Weltwirtschaft in Folge der Covid 19-Pandemie und geopolitischer Spannungen, vor allem in der Ukraine und im Nahen Osten, hat das Wachstum in den letzten Jahren gebremst, mittelfristig ist jedoch mit einem weiteren rasanten Anstieg im Bedarf von Mangan zu rechnen. Schließlich ist es doch Bestandteil der meisten Lithiumionen-Batterien, in denen es zu deren thermischer Stabilität und damit zur Sicherheit beiträgt. Das hierfür nötige $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ wird zurzeit zu etwa 90 % in China hergestellt. In Anbetracht des durch die Politik forcierten Ausbaus der Elektromobilität wird der Bedarf nach Mangan in den kommenden Jahrzehnten überproportional steigen, vor allem in Ländern mit einer starken Automobilindustrie, wie beispielsweise Deutschland. Damit einher geht aber auch ein höher werdendes Länderrisiko bei der Versorgung mit diesen Rohstoffen.

Auch in Namibia hat sich die Bergbaulandschaft in ähnlicher Weise verändert. Bis 2019 gehörte die größte Uranmine des Landes, Rössing, der britisch-australischen Rio Tinto Gruppe, dem nach BHP-Billiton weltweit zweitgrößten Bergbauunternehmen. Im Jahr 2019 wurde die Mine jedoch von der China National Uranium Corporation (CNUC) übernommen. Nach der Entdeckung der noch größeren Rössing South Lagerstätte wird diese in der Husab Mine seit 2016 abgebaut und ist mittlerweile zum größten Uranproduzenten des Landes aufgestiegen. Die Mine wird von Swakopuranium betrieben, unter starker chinesischer Beteiligung. Über 80 % des geförderten Urans wird nach China exportiert, der Rest dem Weltmarkt zugeführt. Schon im Jahr 2011 beschloss die namibianische Regierung, dass die staatliche Explorationsfirma Epangelo Mining die Exklusivrechte über den zukünftigen Abbau von strategischen Rohstoffen besitzen soll. Dies gilt auch für Uran. Diese staatliche Kontrolle über zukünftigen Bergbau öffnet Tür und Tor für politische Einflussnahme und Korruption.

5 Fazit und Ausblick

Dank besonderer geologischer Gegebenheiten ist das südliche Afrika mit einer Vielzahl von ausgesprochen reichen Lagerstätten gesegnet, die seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts abgebaut werden. Bei manchen Rohstoffen, wie Gold und Diamanten, hat der Produktionszyklus schon einen sehr hohen Reifegrad erreicht und die abbauwürdigen Mengen schwinden. Bei anderen, in erster Linie den Platingruppen-Metallen (PGM), Stahlveredlern (Cr, Mn, V) und Uran, wird die Region auch in Zukunft eine führende Rolle spielen. Aus europäischer und ganz besonders auch deutscher Sicht bergen Länder wie Südafrika und Namibia als zukünftige Rohstofflieferanten jedoch ein erhebliches Risiko.

Namibia könnte mit rund 10 % der globalen Förderung eine wichtige Rolle in der zukünftigen Versorgung mit Uran, in erster Linie für nukleare Energiegewinnung, zukommen. Auch wenn dies für Deutschland derzeit ohne Belange zu sein

scheint, so setzen doch viele Länder, auch innerhalb der EU, auf Atomenergie als Alternative zu Erdöl und Erdgas. Schon vor Jahren zeichnete sich ein zu erwartender Engpass in der Verfügbarkeit von Uran ab den 2030er-Jahren ab, wobei einige der Lagerstätten in der Namibwüste als große Hoffnungsträger für die Zukunft galten (FRIMMEL & MÜLLER 2011). Diese werden jedoch kaum für den EU-Markt zur Verfügung stehen. Zum einen wird der größte Teil des derzeit geförderten Urans heute schon exklusiv nach China exportiert, zum anderen sind die besagten Hoffnungsträger zwar durch hohe Tonnagen gekennzeichnet, aber auch durch sehr niedrige Uran-Gehalte, bei denen die Uran-Gewinnung letztlich mehr Energie verschlingen würde als jemals in Atomkraftwerken gewonnen werden könnte (FRIMMEL & MÜLLER 2011).

Als Mitglied der BRICS Staatengemeinschaft hat sich Südafrika in den letzten Jahren mehr und mehr aus einem vornehmlich westlich orientierten Interessensgeflecht nach Asien hin orientiert, was sich unter anderem auch in einer Russland-freundlichen Haltung im Ukraine-Konflikt äußert. Dies drückt sich ebenso in den Bestrebungen der BRICS-Länder aus, die zusammen mit anderen, wie Iran oder Saudi-Arabien, vom US-Dollar als globale Leitwährung, in der auch die meisten Rohstoffe gehandelt werden, weggelassen werden wollen. Vor diesem geopolitischen Hintergrund ist die zukünftige Versorgung der EU und ganz besonders von Deutschland mit kritischen Rohstoffen aus Südafrika im Krisenfall als potenziell gefährdet zu bewerten. Dies betrifft vor allem die für die Autoindustrie essenziellen PGM sowie in etwas schwächerem Ausmaß die Stahlveredler Chrom, Mangan und Vanadium.

Bei anderen Rohstoffen, für die das Südliche Afrika in der Vergangenheit eine herausragende Rolle in der Versorgung der westlichen Welt spielte (z. B. Gold) und zum Teil immer noch spielt (z. B. Diamant), wird eine solche Abhängigkeit in Zukunft nicht mehr gegeben sein. Zum einen sind sowohl Gold als auch Diamant Luxusgüter, die für die wirtschaftliche Produktivität eines Landes nicht entscheidend sind, zum anderen können sie auch in ausreichenden Mengen aus anderen Ländern bezogen werden.

Neben den hier explizit diskutierten Rohstoffen beherbergt das Südliche Afrika auch noch eine Reihe anderer; manche von ihnen gelten als kritisch. Beispiele hierfür wären Fluorit-Lagerstätten in Namibia und vor allem Südafrika. Letzteres Land steht heute schon an dritter Stelle als Fluorit-Förderland (420 kt in 2022), aber weit abgeschlagen hinter China (5700 kt) und Mexiko (970 kt), und kann die weltweit drittgrößten Reserven an Fluorit (41 Mt) nach Mexiko (68 Mt) und China (49 Mt) aufweisen (United States Geological Survey 2024). Andere potenzielle Ressourcen für die Zukunft könnten an Pegmatit gebundene Lithium-, Beryllium- und Tantal-Lagerstätten, vor allem in Namibia, und Lagerstätten von Seltenen Erdelementen in Namibia und Südafrika sein. Sie sind aber im globalen Vergleich nicht von solchen Dimensionen, dass von diesen Ländern ein Versorgungsrisiko für die EU und Deutschland in absehbarer Zukunft abzusehen wäre.

6 Literatur

- BEKKER, A., SLACK, J.F., PLANAVSKY, N., KRAPEZ, B., HOFMANN, A., KONHAUSER, K.O. & ROUXEL, O.J. (2010): Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. – *Economic Geology*, **105**: 467-508.
- BURKE, K. & GUNNELL, Y. (2008): The African Erosion Surface: A continental-scale synthesis of geomorphology, tectonics, and environmental change over the past 180 million years. – *The Geological Society of America, Memoirs*, **201**: 1-66.
- CAWTHORN, R.G. (2015): The Bushveld Complex, South Africa. – In: CAWTHORN, R.G. (Hrsg.): *Layered Intrusions*. – 517-588; Heidelberg (Springer).
- FRIMMEL, H.E. (2014): A giant Mesoarchean crustal gold-enrichment episode: Possible causes and consequences for exploration. – In: KELLEY, K. & GOLDEN, H.C. (Hrsg.): *Building Exploration Capability for the 21st Century*. – Society of Economic Geologists, Special Publication, **18**: 209-234; Littleton.
- FRIMMEL, H.E. (2018): The Gariep Belt. – In: SIEGSMUND, S., BASEI, M.A.S., OYHANTCABEL, P. & ORIOLO, S. (Hrsg.): *Geology of Southwest Gondwana*. – *Regional Geology Reviews*. – 353-386; Heidelberg (Springer Nature).
- FRIMMEL, H.E. (2019): The Witwatersrand Basin and its gold deposits. – In: KRÖNER, A. & HOFMANN, A. (Hrsg.): *The Archaean Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa*. United States Geological Survey (2024): *Mineral Commodity Summaries 2023*. United States Geological Survey (2024): *Mineral Commodity Summaries 2023*. – *Regional Geology Reviews*. – 255-275; Cham (Springer Nature).
- FRIMMEL, H.E. & HENNIGH, Q. (2015): First whiffs of atmospheric oxygen triggered onset of crustal gold cycle. – *Mineralium Deposita*, **50**: 5-23.
- FRIMMEL, H.E. & MÜLLER, J. (2011): Estimates of mineral resource availability – how reliable are they? – *Akademie für Geowissenschaften und Geotechnologien, Veröffentlichungen*, **28**: 39-62.
- FRIMMEL, H.E. & NWAILA, G.T. (2020): Geologic evidence of syngenetic gold in the Witwatersrand goldfields, South Africa. – In: SILLITOE, R.H., GOLDFARB, R.J., ROBERT, F. & SIMMONS, S.F. (Hrsg.): *Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces*. – Society of Economic Geologists Special Publications, **23**: 645-668, Littleton.
- FRIMMEL, H.E., DEANE, J.G. & CHADWICK, P.J. (1996): Pan-African tectonism and the genesis of base metal sulfide deposits in the Northern Foreland of the Damara Orogen, Namibia. – In: SANGSTER, D.F. (Hrsg.): *Carbonate-Hosted Lead-Zinc Deposits*. – Society of Economic Geologists, Special Publication, **4**: 204-217; Littleton.
- FRIMMEL, H.E., HALLBAUER, D.K. & GARTZ, V.H. (1999): Gold mobilizing fluids in the Witwatersrand Basin: composition and possible sources. – *Mineralogy and Petrology*, **66**: 55-81.
- FRIMMEL, H.E., SCHEDEL, S. & BRÄTZ, H. (2014): Uraninite chemistry as forensic tool for provenance analysis. – *Applied Geochemistry*, **48**: 104-121.
- HEUBECK, C. (2019): The Moodies Group – A high-resolution archive of Archaean surface processes and basin-forming mechanisms. – In: KRÖNER, A. & HOFMANN, A. (Hrsg.): *The Archaean Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa*. – *Regional Geology Reviews*. – 133-169; Cham (Springer Nature).
- HUBER, M.S., KOVALEVA, E., RAE, A.S.P., TISATO, N. & GULICK, S.P.S. (2023): Can Archean impact structures be discovered? A case study from Earth's largest, most deeply eroded impact structure. – *Journal of Geophysical Research: Planets*, **128**, e2022JE007721.
- JELSMA, H., BARNETT, W., RICHARDS, S. & LISTER, G. (2009): Tectonic setting of kimberlites. – *Lithos*, **1125**: 155-165.
- KRÖNER, A., HOFFMANN, J.E., WONG, J.M., GENG, H.-Y., SCHNEIDER, K., XIE, H., YANG, J.-H. & NHLEKO, N. (2019): Archaean crystalline rocks of the Eastern Kaapvaal Craton. – In: KRÖ-

- NER, A. & HOFMANN, A. (Hrsg.): The Archaean Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa. – Regional Geology Reviews. –1-32; Cham (Springer Nature Switzerland).
- KRÖNER, A. & HOFMANN, A. (2019): The Archaean Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa. – 316 S.; Cham (Springer Nature Switzerland).
- LYONS, T.W., REINHARD, C.T. & PLANAVSKY, N.J. (2014): The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. – Nature, **506**: 307-315.
- MELCHER, F. (2003): The Otavi Mountain Land in Namibia: Tsumeb, germanium and snowball Earth. – Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, **148**: 413-435.
- NWAILA, G.T., GHORBANI, Y., ZHANG, S.E., FRIMMEL, H.E., TOLMAY, L.C.K., ROSE, D.H., NWAILA, P.C. & BOURDEAU, J.E. (2021): Valorisation of mine waste, Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand gold mines (South Africa) as an example. – Journal of Environmental Management, **295**: 113013.
- SHIREY, S.B. & RICHARDSON, S.H. (2011): Start of the Wilson Cycle at 3 Ga shown by diamonds from subcontinental mantle. – Science, **333**: 434-436.
- SPIVEY, M., PENKETHMAN, A. & CULPAN, N. (2010): Geology and mineralization of the recently discovered Rössing South uranium deposit, Namibia. – Society of Economic Geologists, Special Publications, **15**: 729-746.
- United States Geological Survey (2024): Mineral Commodity Summaries 2023.– 212 S; U.S. Geological Survey, Reston/Virginia.
- VAN HUNEN, J. & MOYEN, J.-F. (2012): Archean subduction: fact or fiction? – Annual Reviews in Earth and Planetary Science, **40**: 195-219.
- WILL, T. & FRIMMEL, H.E. (2018): Where does a continent prefer to break up? Some lessons from the South Atlantic margins. – Gondwana Research, **53**: 9-19.
- ZEH, A., WILSON, A.H. & OVTCHAROVA, M. (2016): Source and age of upper Transvaal Supergroup, South Africa: Age-Hf isotope record of zircons in Magaliesberg Quartzite and Dullstroom Lava, and implications for Paleoproterozoic (2.5-2.0 Ga) continent reconstruction. – Precambrian Research, **278**: 1-21.
- ZEH, A., SCHALTEGGER, M., WILSON, A.H. & SCHALTEGGER, U. (2015): The Bushveld Complex was emplaced and cooled in less than one million years – Results of zirconology and geotectonic implications. – Earth and Planetary Science Letters, **418**: 103-114.

PROF. DR. HARTWIG E. FRIMMEL
Lehrstuhl für Geodynamik und Geomaterialforschung
Institut für Geographie und Geologie
Universität Würzburg
Am Hubland
97074 Würzburg

Department of Geological Sciences
University of Cape Town
Rondebosch 7700
Südafrika

E-Mail: hartwig.frimmel@uni-wuerzburg.de
Tel.: 0931/3185420

Manuskripteingang: 31. Juli 2024

Anthropozän – Menschen machen Erdgeschichte

CHRISTOPH ANTWEILER

Erdsystemwissenschaften, Geologie, Geochronologie, Geoanthropologie

Kurzfassung: Menschen verändern die Geosphäre umfassend, dauerhaft und teilweise irreversibel. Für diesen Prozess, der weit über den anthropogenen Klimawandel hinausgeht, führte Atmosphärenchemiker Paul Crutzen im Jahr 2000 den Begriff „Anthropozän“ ein. Der Begriff machte daraufhin eine atemberaubende Karriere quer durch die Wissenschaften, aber auch in Massenmedien, Literatur und bildender Kunst. Die empirische Basis für den erdgeschichtlich wirkenden – nämlich das Holozän als Nacheiszeit ablösenden – Begriff waren zunächst nicht etwa geologische, sondern erdsystemische, vor allem klimatologische Befunde. Geologen befassten sich erst ab 2009 intensiv mit dem Konzept. Sie konnten bislang keine Einigkeit erlangen, ob das Anthropozän als formale Epoche in der Zeittabelle der Erdgeschichte eingeführt werden soll. Trotz des Nachweises etlicher globaler, dauerhafter und dazu zeitgleicher Spuren menschlichen Handelns wurde die Formalisierung von der Internationalen Stratigraphischen Kommission 2024 abgelehnt. Nichtsdestotrotz hat das Anthropozän als Konzept eine außerordentliche wissenschaftliche wie gesellschaftliche Bedeutung für ein Verstehen und den Umgang mit dem abrupten menschengemachten planetaren Umweltwandel.

Anthropocene – Humans make Earth History

Earth system sciences, geology, geochronology, geoanthropology

Abstract: Humans are changing the geosphere comprehensively, permanently and in some cases irreversibly. In 2000, atmospheric chemist Paul Crutzen introduced the term ‘Anthropocene’ to describe this process, which goes far beyond anthropogenic climate change. The term went on to enjoy a breathtaking career across the sciences, but also in literature and the visual arts. The empirical basis for the term, which has an impact on geological history – namely replacing the Holocene as a post-glacial period – was initially not geological, but rather earth systemic, primarily climatological findings. It was not until 2009 that geologists began to focus intensively on the concept. They have not yet been able to reach a consensus as to whether the Anthropocene should be introduced as a formal epoch in the chronological table of Earth’s history. Despite evidence of a number of global, permanent and simultaneous traces of human activity, formalisation was rejected by the International Stratigraphic Commission in 2024. Nevertheless, the Anthropocene as a concept has extraordinary scientific and social significance for an understanding and dealing with abrupt human-made planetary change.

Inhaltsverzeichnis

1	Anthropozän – viel mehr als Klimawandel	170
2	Paul Crutzens folgenreiche Intervention	175
3	Weite Resonanz und weitreichende Relevanz	179
4	Geochronologie, Stratigrafie und die Anthropocene Working Group ..	181
5	Geologen streiten – Kritik und Ablehnung der Formalisierung	185
6	Kritik der Kritik – Anthropologisierung der Geologie	189

7	Fazit – das Anthropozän ist ein begriffliches Erdbeben	192
8	Literatur	194

1 Anthropozän – viel mehr als Klimawandel

Kein Ort der Welt ist mehr gänzlich unberührt vom Menschen. Anthropozän ist der Name dafür, dass Menschen bereits heute die Erdoberfläche so stark prägen, dass man das in ferner geologischer Zukunft noch erkennen wird. Der Einfluss des Menschen ist inzwischen nicht mehr auf lokale Eingriffe in die Natur beschränkt. Menschliche Eingriffe haben die Geosphäre radikal verändert. Naturwissenschaftler kommen zum Befund, dass menschliches Handeln spätestens seit Mitte des 20. Jh. in einer Weise Veränderungen der Erdoberfläche prägt, die in der Erdgeschichte beispiellos sind.

Innerhalb der Geschichte des Menschen hat die Ausbeutung der Natur mit der Nutzung fossiler Energie völlig neue Maßstäbe erreicht. Seit rund 200 Jahren sind die menschlichen Einflüsse auf die Erdoberfläche so stark, dass sie als eigene Naturkraft anzusehen sind. Menschliche Aktivitäten betreffen jedwede Natur auf der Erdoberfläche, sie haben weltweiten Maßstab und sind teilweise unauslöschlich – so der zentrale empirische Befund. Damit hat der Mensch das Potenzial, ungewollt Instabilitäten bis hin zu katastrophalen Veränderungen im ganzen System der Geosphäre zu erzeugen – so die Befürchtung.

Das Wortkompositum benennt diesen Bruch in der jüngeren Geschichte der Erde, genauer der Geosphäre, eben das „-zän“, das „neue, ungewöhnliche“ (altgriechisch *καινός*, *kainos*), welches durch den Menschen (*ἄνθρωπος*, *ánthrōpos*) erzeugt wird. In der etablierten geologischen Zeitrechnung leben wir seit knapp 12.000 Jahren in der Erdepoche des Holozäns, dem jüngsten, nacheiszeitlichen, relativ klimastabilen Abschnitt der Periode des Quartärs. Resultate menschlicher Aktivitäten lagern sich dauerhaft im Sediment ab. Beton wird ein ganz normaler Gesteinstyp der Geologie der Zukunft sein. Aufgrund des Ausmaßes menschlicher Eingriffe in die Erdhülle (Geosphäre) und der erdgeschichtlich gesehenen Plötzlichkeit sollte dieser neuen Phase der Geschichte der Rang einer *geologischen* Erdepoche, des Anthropozäns, zugesprochen werden – so die zentrale Idee.

Im Unterschied zu anderen geologischen Perioden, die viele Millionen Jahre dauern, hätte diese Epoche des Anthropozäns bislang nur die extrem kurze Zeitdauer eines Menschenlebens. Aus geologischer Sicht ist das Anthropozän nicht einfach die „Epoche des Menschen“ oder das „menschliche Zeitalter“. Es ist vielmehr das Zeitalter, dessen jetzige *Gesteinsschichten* von Rückständen jüngster menschlicher Aktivität geprägt sind bzw., da es ja noch weiterläuft, in Zukunft sein werden. Anthropozän ist also zweierlei – einerseits eine Sache, zu der es klare geologische Befunde gibt, und andererseits eine Idee, ein Konzept.

Das Anthropozän wird „Zeitalter des Menschen“ (*age of man*), „Zeitalter der Menschheit“ (*age of mankind*) oder auch „menschliches Zeitalter“ (*human age*) genannt. Warum? Das Anthropozän ist nicht nur durch einen in geologischer Sicht abrupten Klimawandel gekennzeichnet, sondern auch durch einen dramatisch hohen Verbrauch von Naturressourcen, Wasser und Düngemitteln, eine Übersäuerung der Meere und einen drastischen Rückgang der Vielfalt des Lebendigen. Hinzu kommen etwa Bodenverluste durch Erosion und Versiegelung, der Verlust großer Teile der Moore, eine rapide Umwandlung von Deltas und eine starke Zunahme von menschlichen Objekten, vor allem Plastikabfall, in den Ozeanen. Die wichtigste Besonderheit unseres Planeten ist die Existenz von Leben. Sämtliche Lebewesen überleben dadurch, dass sie der Umwelt Ressourcen entziehen. Aber nur Menschen extrahieren der Umwelt weiter, nachdem ihre Bedürfnisse erfüllt sind. Grundlegende Einschätzungen zur Umweltdynamik sollten deshalb auf die von Menschen verursachten Veränderungen der Biomasse und der Proportionen des Lebens auf der Erde achten (HEADRICK 2022: 3).

Der menschliche Fußabdruck ist allgegenwärtig, und er wird wegen teilweise extrem langen Verweilzeiten etwa von Plastik zumindest teilweise geologisch dauerhaft sein (Tab. 1). Asphaltstücke, Plastikpartikel und radioaktive Stoffe werden zu dauerhaften Bestandteilen von Gesteinsschichten. Beton und Asphalt werden zu Gesteinen der Zukunft. Die Vielfalt der menschengemachten Objekte übertrifft bereits die heutige biologische Artenvielfalt. Die menschliche Technosphäre wächst in die Breite aber auch vertikal. In Pudong, dem dynamischen Stadtteil Shanghais, wurden im Jahr 2011 mehr Hochhäuser von über 100 Metern Höhe errichtet als in der ganzen restlichen Welt zusammen. Menschen haben nicht nur 3900 Meter in die Tiefe gebohrt, sondern errichten neuerdings auch Gebäude von über einem Kilometer Höhe.

Die Masse der von Menschen produzierten Dinge (*anthropogenic mass*), die sich etwa alle 20 Jahre verdoppelt, übertrifft mittlerweile die Biomasse des Lebens (ELHACHAM et al. 2020: 1). Menschen haben seit Beginn des Anthropozäns im engeren Sinn, also in den knapp 70 Jahren von 1950 bis 2015, etwa 30-mal so viel Gestein beziehungsweise Sedimente transportiert wie in den 70 Jahren davor. Bis zum Jahr 2000 wurden pro Erdbewohner 21 Tonnen Gestein und Boden bewegt. Das entspricht der siebenfachen Menge des natürlichen Sedimenttransports durch Flüsse ins Meer und liegt zwei Größenordnungen über der Menge des von Vulkanen in dieser Zeit weltweit ausgeworfenen Magmas (MASLIN 2022: 48). Die Technosphäre wiegt um fünf Größenordnungen mehr als die Masse der Menschen (*anthropomass*).

Seit 1950 wurden 99 % allen Zements auf der Welt (WATERS & ZALASIEWICZ 2018) und 99 % allen synthetischen Kunststoffes der Welt produziert (GEYER et al. 2017). Durchschnittlich wird heute auf dieser Welt pro Mensch in jeder Woche mehr als sein Körpergewicht an anthropogenen Dingen, Gegenständen, Tieren etc. produziert. Die gesamte Technosphäre der Erde hat derzeit eine Masse von

30 Billionen Tonnen. Vorstellbar wird das nur, wenn man sich klarmacht, dass dies, gleichmäßig verteilt, einer Last von 50 Kilogramm auf *jedem* Quadratmeter der Erdoberfläche entspricht (ZALASIEWICZ et al. 2017: 12, 19). Das liegt fünf Größenordnungen über der Biomasse der Menschheit.

Tabelle 1: Indikatoren der neuen Erddynamik jenseits menschengemachten Klimawandels (aktualisiert und stark gekürzt nach ANTWEILER 2022: 16-17)

Table 1: Indicators of the new Earth dynamics beyond man-made climate change (updated and heavily abridged after Antweiler 2022: 16-17)

Indikator	Heutiger Zustand, Veränderung in Vergleichsperiode	Quelle
Menschen: Anzahl	8,1 Mrd. (1960er-J: 3 Mrd., 1900: um 1,5 Mrd., 1 u.Z.: 200–400 Mio., 10.000 v. h.: 1–10 Mio.)	SMIL 2019: 307-331, SMIL 2021: 25, 69
Menschen: Kohlenstoff in Biomasse	25 Mt Menschen/129 Mt, domestizierte Säuger/5 Mt, wilde Landsäugetiere (im Jahr 2000), im Vgl. zu 10 Mt Menschen/10 Mt wilde Landsäuger/35 Mt domestizierte Säuger (im Jahr 1900)	CHRISTIAN 2018: 311
Menschen: Masse (anthropomass)	0,3 Gt, zusammen mit domestizierten Tieren 97 % der gesamten Masse terrestrischer Säuger	SMIL 2013, 2019, BARON, PHILLIPS & MILO 2018, BARNOSKY 2008
Verbreitung terr. Großsäuger	1/3 Drittel Menschen, 2/3 dom. Landsäuger, rd. 3 % restliche Landsäuger (vs. 350 Spezies prähuman)	
Haushühner (<i>Gallus gallus</i>)	23,7 Mrd., Biomasse 2,5 x Wildvögel, 1/10 Lebendgewicht Menschheit, seit Mitte 20 Jh. anthropogene Morphospecies (<i>Gallus Gallus domesticus</i>)	BENNETT et al. 2018, THOMAS, WILLIAMS & ZALASIEWICZ 2020: 98–99
Energieverbrauch	23–75 Gigajoule pro Kopf/Jahr, Holozän: 3–10, 90 % verbraucht seit 1950	CHRISTIAN 2018: 349, SYVISTSKY et al. 2020
Energiekonsum	572 EJ/J (2014), < 100 EJ/Jahr (1850); 13,7 Mio. t Öl/Jahr (2014), 6,1 Mio. t Öl/Jahr (1973)	MORRIS 2020: 128–138, SMIL 2021
Technosphäre: menschengemachte Objekte (anthropogenic mass)	30 Billionen Tonnen (tT), = ca. 4000 Tonnen/ Mensch, Gebäude und Infrastruktur 1100 Gigatonnen = 50kg/m ² , 5-faches der <i>anthropomass</i>	ZALASIEWICZ et al. 2017c: 19
Transportierte Gesteine, Sedimente durch Rohstoffausbeutung, Bauten	seit Beginn des Anthropozäns i. e. S. bis 2015 30-mal so viel wie in den 70 Jahren davor, entspricht 3- bis 7-mal dem Sedimenttransport durch Flüsse ins Meer, 21 T/Pers.	HOOKER 2000: 844-845; BRIDGE 2009; PRICE et al. 2011; COOPER et al. 2018

Das Anthropozän wird selten positiv gesehen, sondern als empirisch untermauerte Warnung vor den weltweiten Folgen von marktfokussierter Wirtschaft, fossilistischer Energienutzung und des ungebremsten Wachstums des Konsums. Plastikpartikel finden sich heute bis in die Tiefen ozeanischer Tiefseegräben. Allein die globale Masse des produzierten Plastiks ist schon jetzt größer als Gesamtgewicht aller Land- und Wassertiere (ELHACHAM et al. 2020). Aus evolutionärer Sicht besteht das Erstaunliche des Anthropozäns darin, dass eine einzige Spezies die Bio- und Geosphäre extrem schnell veränderte. Als „Produktivoren“, die unsere Nahrung selbst herstellen, sind wir erfolgreicher als alle Carnivoren und Omnivoren. Das Anthropozän erscheint als katastrophale Folge des übergroßen Erfolgs des *Homo sapiens*: Wir sind *overachiever* und das im planetaren Kontext (ERIKSEN 2016: 17-18). Dies gilt schon körperlich: zusammen mit den von ihnen domestizierten Tieren machen Menschen 97 Prozent der gesamten Masse terrestrischer Säuger aus. Ab dem Jahr 2022 begann auch die schiere Masse des von Menschen produzierten Materials die Gesamtmasse lebendiger Wesen auf diesem Planeten zu übertreffen (Abb. 1).

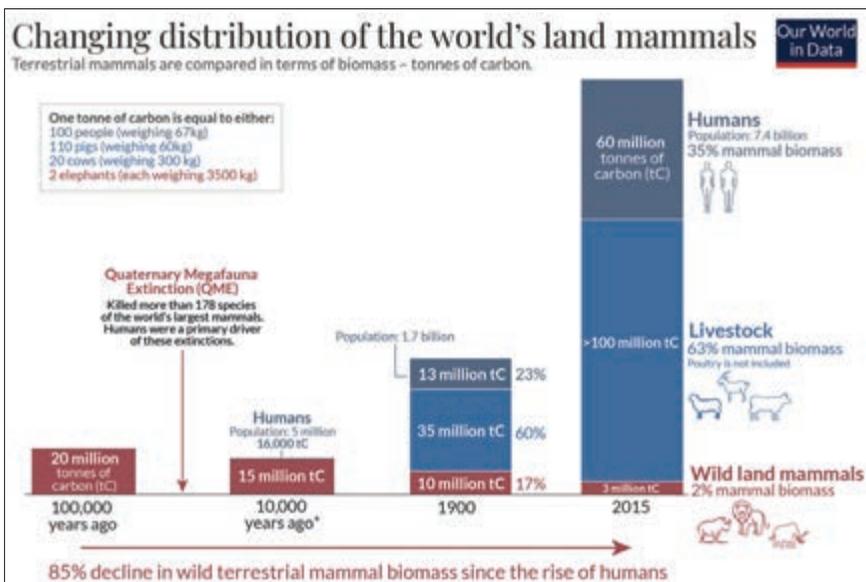


Abbildung 1: Veränderung der Verbreitung von Menschen und anderen Großsäugern (Hannah RITCHIE 2021 für Our World in Data (<https://en.wikipedia.org/wiki/Extinction#/media/File:Decline-of-the-worlds-wild-mammals.png>); CC_BY).

Figure 1: Changes in the distribution of humans and other large mammals (Hannah RITCHIE 2021 für Our World in Data (<https://en.wikipedia.org/wiki/Extinction#/media/File:Decline-of-the-worlds-wild-mammals.png>); CC_BY).

Es ist wichtig, methodische Unterschiede zwischen Erdsystemwissenschaften und Geologie festzuhalten, denn sie sind folgenreich und werden von Kulturwis-

senschaftlern, deren Kritiken am Anthropozän-Konzept ich später diskutiere, oft übersehen. Die eben genannten Feststellungen kommen nicht etwa aus der feldbasierten Geologie, sondern aus der Biologie, der Ökologie und besonders aus der Erdsystemwissenschaft. Die *Earth Systems Science (ESS)* entstand zwischen 1974 und 1980 (HEYMANN & DALMEDICO 2019). Das Erdsystem wird hier als sich selbst regulierendes System der Geosphäre verstanden, das durch Zusammenwirken nicht menschlicher physikalischer, chemischer und biologischer sowie menschlicher Kräfte, inklusive der Interaktionen und Rückwirkungen innerhalb der Sphären auf dem Planeten Erde gebildet wird (STEFFEN et al. 2005: 298).

Das Erdsystem reicht von der oberen Grenze der Atmosphäre bis in die oberste Ebene der Gesteinsschichten. Zentrale Konzepte sind Systeme, Rückkopplung, Stoffkreisläufe und Thermodynamik. Methodisch arbeitet die ESS vor allem mit Fernerkundung, großen Datenmengen und globalen Datensätzen. Die Erdsystemwissenschaftler entwickeln daraus globale Systemmodelle und Zukunftsszenarien, um Gegenwartstrends nachzuweisen und zukünftige Entwicklungen zu simulieren. Eine neuere Richtung will unter dem Begriff „Anthropocene Science“ mehr als die eher distanziert-objektiven Erdsystemwissenschaften explizit werbetäbasiert sein, stärker die Fürsorgefunktion (Stewardship) betonen und deshalb eher ausdrücklich vorschlagende als deskriptive Szenarien entwickeln (KEYS, BARDIA & WARRIER 2023: 2-4).



Abbildung 2: Plastik und Konsumkultur; Pralinenverpackung; Foto: Autor 2023.

Figure 2: Plastic and consumer culture; chocolate packaging; photo: author 2023.

Anders als Erdsystemwissenschaftler arbeiten Geologen und Geologinnen mit Hammer und Lupe (seit Jahren auch immer mehr mit modernster Technik) und

befassen sich mit sehr lang vergangenen Zuständen und Prozessen. Sie tun das nicht mit Experimenten und kaum mit Simulation, sondern mittels Beschreibung von Gesteinsschichten, lokalen fossilen Befunden, Rekonstruktion und Deduktion. Die Geologie ist eine Wissenschaft, die – wie die Ethnologie und die Ökologie – vor allem mit feldwissenschaftlicher statt laborwissenschaftlicher Evidenz arbeitet (WILL 2021: 20-21, 143-201). Unabhängig von der in der Erdsystemwissenschaft und der Geologie je spezifischen Evidenz gilt in jedem Fall: Im Anthropozän schreibt der Mensch Naturgeschichte. Der Mensch hinterlässt geologische Signaturen in den Sedimenten (Abb. 2 und 3). Stratigrafisch gesehen ist die Spur des Menschen vergleichbar mit dem extraterrestrischen Mineral Iridium, das sich als Folge eines Asteroideneinschlags in Mexiko vor 66 Millionen Jahren weltweit in Gesteinen findet.



Abbildung 3: Baustelle in Hyderabad, Indien; Foto: Autor 2017.
Figure 3: Construction site in Hyderabad, India; photo: author 2017.

2 Paul Crutzens folgenreiche Intervention

Die besondere Problematik im Anthropozän ist, dass jetzt die Menschheit als *eine* Spezies die Fähigkeit hat, solche abrupten Systemwechsel der Geosphäre (höchstwahrscheinlich) zu triggern. Diese Einsichten kulminierten 1999, ein Jahr

vor Crutzens Ausrufung des Anthropozäns, in Hans Joachim Schellnhubers Zwischenfazit des International Geosphere-Biosphere-Programms (1987–2015), wo er sagte, wir erleben eine „zweite kopernikanische Revolution“. Wir müssen uns die menschliche Exzentrizität und Exzeptionalität angesichts der Tatsache klar machen, „... dass wir kritische Grenzen auf planetarem Maßstab vielleicht irreversibel überschritten haben“ (SCHELLNHUBER 1999: C23). Die Ausrufung einer erdwissenschaftlichen Epoche, deren Pate der niederländische Meteorologe und Atmosphärenchemiker Paul Josef Crutzen (1933–2021; vgl. BENNER et al. 2021) war, spiegelt diese tiefgreifende Transformation, diesen historischen Wendepunkt oder gar Bruch, begrifflich deutlicher als der Begriff Globalisierung oder der des globalen Wandels.

Die erste breit wirksame Verwendung des Wortes „Anthropozän“ war eine mehr oder minder spontane Äußerung von Crutzen auf einer Konferenz in Cuernavaca nahe Mexiko-City am 22. bis 25. Februar 2000 (CRUTZEN 2002; CRUTZEN & STOERMER 2000: 17). Dort diskutierte eine kleine Gruppe von zwei Dutzend Experten globale Umweltveränderungen im Holozän, dem gegenwärtigen relativ klimastabilen Abschnitt der Erdgeschichte, der vor 11.700 Jahren begann. Der Konferenzleiter Will Steffen und die Kollegen erwähnten immer wieder den Begriff Holozän, was Crutzen zunehmend ärgerlicher machte:

„Schließlich platzte es aus ihm heraus: ‚Nein! Wir sind nicht mehr im Holozän. Wir sind im ...‘, er dachte einen Moment lang nach, ... ‚Anthropozän!‘. Im Saal wurde es still. Crutzen hatte offensichtlich einen Nerv getroffen. Im weiteren Verlauf der Tagung kam der Begriff immer wieder zur Sprache“ (ZALASIEWICZ 2017: 52).

So oder ähnlich wird der Beginn der Debatte immer wieder dargestellt. Zeitzeugen haben daran erinnert, dass in Crutzens Vorschlag Ideen kulminierten, die schon seit Mitte der 1980er-Jahre diskutiert worden waren (ARIZPE-SCHLOSSER 2019: 268). Crutzen, selbst weder Geologe noch Historiker, schlug vor, den Beginn des Anthropozäns mit dem ausgehenden 18. Jh. anzusetzen. Er betonte aber, dass eine präzise Datierung eher zufällig wäre. Diese chronologischen Fragen zum Beginn des Anthropozäns sollten noch zu heftigen Diskussionen führen.

Eine Bewegung hin zu einer interdisziplinären Erdsystemwissenschaft hatte es schon seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957–1958 gegeben. Hier waren neben der Geophysik die Meteorologie, Ozeanografie und Glaziologie vertreten, während etwa die Biologie noch nicht mit einbezogen war. Die Biologie und weitere Disziplinen kamen erst etwa 30 Jahre später im Rahmen der *International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)* des *International Council of Scientific Unions (ICSU, heute World Science Organization)* ab 1986 hinzu. Gefördert wurde das seit 1988 im Forschungsprogramm *Human Dimensions of Global Environmental Change* des *International Science Council (ISSC)*. Insofern ist es wichtig zu wissen, dass Crutzens Ausbruch in Cuernavaca auf eine Präsentation von Resultaten eines Projekts *PAGES (Past Global Changes)* reagierte. Dieses stand

im Kontext des IGPP und die Intervention „passierte“ bei der Jahrestagung des wissenschaftlichen Komitees des IGPP. Trotz des geologisch wirkenden Namens „Anthropozän“ war der Kontext von Crutzens Einwurf also ein erdwissenschaftlicher und noch kaum ein evolutionsbiologischer, geologischer oder gar stratigrafischer Kontext.

In jedem Fall aber stellte Crutzens Einwurf eine Intervention im wörtlichen Sinn dar. Er hatte auf den Widerspruch reagiert, andauernd von einer Epoche zu sprechen, in der der Mensch faktisch derart umfassenden Wandel der Geosphäre erzeugt hatte, ohne dass der Mensch in der Epochenbezeichnung erwähnt wird. Während die Erdsystemwissenschaftler das Konzept zunehmend annahmen, wandelte sich bei ihnen die ältere Vorstellung eines gleichmäßigen Wandels vom Holozän zum Anthropozän zu einem Bild eines klaren und abrupten Wandels des Zustands der Erde (ZALASIEWICZ et al. 2021: 8).

Klimageologisch gesehen bildet das Holozän ein warmes Interglazial bzw. eine warmzeitliche Periode des gegenwärtigen, vor 2,6 Mio. Jahren begonnenen Eiszeitalters des Quartärs. Evolutiv gesehen entwickelte sich Menschheit in dieser in der Erdgeschichte beispiellosen langen Periode gemäßigten Klimas. Mit „Anthropozän“ hatte Crutzen ein *proxy* gefunden, das mehrere grundlegende Transformationen der Geosphäre als Gesamtsystem in einer Kurzformel zusammenbrachte. Angesichts der Tatsache, dass noch um 2000 Konferenzen zum globalen Wandel stattfanden, wo menschliche Aktivitäten gar nicht erwähnt wurden, war die Hoffnung, dass mit „Anthropozän“ jetzt ein Begriff da war, der Natur- und Sozialwissenschaften anhand eines Menschheitsthemas zusammenführen könnte. Im Jahr 2001 in Amsterdam fand eine maßgebliche Konferenz: statt, die „Challenges of a Changing Earth“. Lourdes Arizpe-Schlosser war als Ethnologin an solchen Treffen beteiligt und erinnert sich: „Somehow, I felt that the veil that had separated social scientists from biophysical scientists had suddenly become more transparent“ (ARIZPE-SCHLOSSER 2019: 269).

Wie Crutzen im Nachgang der Konferenz schnell feststellte, hatte Eugene Stoermer, ein Limnologe und Erforscher mariner Kieselalgen, den Begriff des Anthropozäns bereits seit den frühen 1980er-Jahren informell in Vorlesungen an der University of Michigan und am Iowa Lakeside Lab verwendet. Wie eine ehemalige Studentin von Stoermer sich erinnert, benutzte er den Begriff aber informell und intuitiv für menschliche Einflüsse auf die Geosphäre: „I recall Gene Stoermer using the term Anthropocene, but in such a way that it did not even seem new, or even novel. It was another way that he expressed what he had observed for decades (SPAULDING 2020, nach LUCIANO 2022: 30).

Die Biologen Francis Putz und Andrew Samways hatten 1998 und 1999, also ganz kurz vor Crutzens Intervention, den Begriff „Homogenozän“ (auch „Homogozän“) vorgeschlagen, um die Auswirkungen des massiven weltweiten Austauschs von Tierarten seit den Entdeckungen („kolumbischer Austausch“, CROSBY 2003, 2015: 96ff, 116ff.) und der daraus folgenden Vereinheitlichung der Artenzu-

sammensetzung zu fassen (PUTZ 1998; SAMWAYS 1999: 65). So wird die Biodiversität etwa durch die heute rund 10.000 durch Transporte in Ballasttanks von Schiffen räumlich verlagerten Arten (Neobiota) verringert. In manchen Weltgegenden setzte dieser Prozess schon mit Beginn des 17. Jh. ein. Aufgrund der weltweiten Verbindung aller Lebensräume leben wir aus erdgeschichtlicher Sicht quasi in einer neuen, barrierearmen Welt. Ähnlich dem Urkontinent, *Pangäa* (McKINNEY 2005). Das war der Urkontinent vor der Zerspaltung in einzelne Platten. Wir haben heute zwar keinen physischen Superkontinent, aber eine biotisch weitgehend vernetzte Welt des Lebens.

Andrew Refkin, ein amerikanischer Wissenschaftsjournalist, hatte sogar schon 1992 in einem Buch über globale Erwärmung argumentiert, die Welt sei in ein geologisches Intervall eingetreten, das man als „Anthropocene“ bezeichnen könne. Refkin war ein belesener und visionärer Wissenschaftsjournalist, Crutzen aber war als Direktor des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz (1980–2000) vor allem mit seiner These berühmt geworden, ein großer Atomkrieg könne einen nuklearen Winter auslösen und alles tierische und pflanzliche Leben auslöschen. Als „Retter der Ozonschicht“ und damals meistzitiertes Wissenschaftler der Welt war er es, der mit seiner Reputation als Nobelpreisträger den Terminus „Anthropozän“ erfolgreich popularisierte. Damit war eine Alternative zum Epochenbegriff „Atomzeitalter“ gefunden.

Crutzen kontaktierte Stoermer, und sie publizierten zusammen pünktlich zur Jahrtausendwende das erste Kurzpapier im *IGPB Newsletter* (CRUTZEN & STOERMER 2000). Die Popularität verstärkte sich aber dann schlagartig mit einem einseitigen, aber m.E. alles andere als einseitigen, Artikel von Crutzen in *Nature* mit dem wirkmächtigen Titel „Geology of Mankind“ (CRUTZEN 2002). Dort gab er das Ziel aus „... to assign the term ‚Anthropocene‘ to the present, in many ways human-dominated, geological epoch, supplementing the Holocene“ (CRUTZEN 2002: 19). Das Treffen in Cuernavaca war aber *nicht* etwa eine Konferenz von Geologen, sondern von Erdsystemwissenschaftlern. Erdwissenschaftler hatten die ab ca. 1990 verfügbare Rechenkapazität von Großrechnern benutzt, um das System der Erde, insbesondere die Atmosphäre, in quantitativen Modellen darzustellen und langfristige Verläufe zu simulieren. Dabei zeigte sich zunehmend, dass die Normen des Holozäns verlassen werden – ein „Regimewechsel“ im globalen Klimasystem. Crutzen benutzte das Konzept daraufhin in vielen wissenschaftlichen Aufsätzen, die eine hohe Wirkung hatten, wie der Crutzen gewidmete Band von Benner et al. und besonders die bibliometrische Analyse von Brauch zeigen (BENNER 2021; BRAUCH 2021).

Eine weltweite Perspektive auf menschliche Umwelteffekte lag zur Jahrtausendwende in der Luft. Schon lange war bekannt, dass Menschen schon seit Langem lokale Umweltdesaster und auch teilweise regionalen Umweltwandel bewirkt hatten. Jetzt ging es aber um weltweiten Umweltwandel und die global orientierte Umweltgeschichte nahm Fahrt auf. Einige Vertreter nahmen eine sehr langzeit-

liche Perspektive ein und argumentierten, dass die Geschichte der menschlichen Kulturen und Zivilisationen eine Geschichte von Umweltdesastern sei. Die systemweiten und strukturellen Effekte der „makroparasitischen“ Aktivität des Menschen würden mindestens 5000 Jahre zurückreichen (CHEW 2000). Ebenfalls im Jahr 2000 erschien in Deutschland die große Studie „Natur und Macht“ aus der Feder des deutschen Umweltgeschichtlers Joachim Radkau (RADKAU 2000). Radkau stellte politische Kontexte des Umweltwandels in den Mittelpunkt und zeigte, dass auch das Bewusstsein dessen und die Besorgnis über rapide Umweltveränderungen nicht erst mit der Umweltbewegung einsetzten. Schon während der frühen Industrialisierung gab es eine starke Beunruhigung über drastische Umwelteffekte. Das gesellschaftliche Umweltbewusstsein nahm zu und es existierte das praktisch agierende Netzwerk der Hygienebewegung, die sich für gesundes öffentliches Leben einsetzte. Diese umwelthistorischen Arbeiten sahen eine sehr lange *longue durée* und argumentierten mit ähnlichen historischen Daten, wie später Vertreter eines „frühen Anthropozäns“.

Diese wichtigen umweltgeschichtlichen Studien argumentierten aber noch nicht mit geologischen Konzepten, Tiefenzeit und global synchronen Zeitmarkern. Diesem Schritt kam ebenfalls im Jahr 2000, aber unabhängig von Crutzen, John R. McNeill, ein Pionier ökologisch erweiterter Globalgeschichte, näher. Aufgrund historischer Erkenntnisse aus einer Vielfalt von Quellen erschloss er einen dramatischen Anstieg etlicher Phänomene der globalen Umwelt um die Mitte des 20. Jh. McNeill mutmaßte, dass ein Historiker, der am Ende des 21. Jh. auf das 20. zurückblicken würde, wohl weniger die zwei Weltkriege, den Faschismus, den Kommunismus und die Frauenbewegung herausstellen würde als vielmehr die grundlegend veränderte Beziehung des Menschen zur Umwelt (MCNEILL 2003: 17). McNeill arbeitete daraufhin mit Erdwissenschaftlern wie Steffen und Crutzen zusammen. Er befasste sich bis zu seinem Tod dauerhaft mit stratigrafischen Fragen und wurde *als Historiker* Mitglied der AWG, wo er für die historisch korrekte Verortung geowissenschaftlichen Wissens steht (WILL 2021: 222). Heute, zwanzig Jahre später, wundern sich Umwelthistoriker, die erst durch McNeill auf die globale Dimension ihres Themas hingewiesen wurden, um wie viel schneller sich seine Vermutung nach heutigem Wissen wahrscheinlich bewahrheiten wird (MARKS 2024: xi).

3 Weite Resonanz und weitreichende Relevanz

Das Anthropozän hat in vielen Wissenschaften und darüber hinaus Reaktionen hervorgerufen und es ist für grundlegende anthropologische Fragen relevant (vgl. ELLIS (2020, 2022) als Einführung und HORN & BERGTHALLER 2022 sowie THOMAS 2022 als beste Überblicke). Obwohl der Begriff im jetzigen Sinn im Jahr 2000 geprägt wurde, wurde er aber tatsächlich erst seit etwa 2010 umfassend in den

Wissenschaften benutzt, hat sich dann aber rasant verbreitet, wie Krämer anhand einer Analyse von 770 Aufsätzen des *Web of Science* zeigt (KRÄMER 2016). Dies betraf aber zunächst stark die Naturwissenschaften: Noch 2016 stellte Christoph Görg fest, dass sich in der Debatte zum Anthropozän außer aus den Geschichtswissenschaften nur wenige Beiträge aus den Sozial- und Kulturwissenschaften finden (GÖRG 2016: 11). Das war damals leicht übertrieben und hat sich inzwischen grundlegend geändert. Um das Konzept Anthropozän herum hat sich ein breites Gebiet intellektueller Debatten entwickelt. Fast jede Disziplin befasst sich zumindest am Rande mit dem Thema. Seit 2010 haben sich mehrere auf das Anthropozän spezialisierte Zeitschriften etabliert: *The Anthropocene Review*, *Anthropocene*, *Anthropocenes – Human, Inhuman, Posthuman*, *Environmental Humanities*, *Earth’s Future*, *Elementa*, *Science in the Anthropocene* und *Anthropocene Science*.

Tabelle 2: Karriere des Begriffs Anthropozän: Institutionalisierung in den Wissenschaften und Popularisierung

Table 2: Career of the term Anthropocene: institutionalization in the sciences and popularization

Auftreten	Bereiche, Disziplinen, Institutionalisierung	Medien, Autoren, Beispiele
19. Jh.	Begrifflich ähnliche Formulierung	STOPPANI 1889: „nuova forza tellurica“
1980er	Wort „Anthropozän“	STOERMER (mündlich und informell)
2000	Erdsystemwissenschaft	CRUTZEN & STOERMER 2000
2000	Geschichtswissenschaften	Umweltgeschichte: RADKAU 2000; McNEILL 2003
2004	Multidisziplinärer Ansatz	STEFFEN et al. 2004
2008	Internationale Institutionen	<i>Stockholm Resilience Center</i>
2008	Geografie	EHLERS 2008
2009	Geologie, Paläontologie	<i>Anthropocene Working Group (AWC)</i>
2010	Kultur- und Sozialwissenschaften	URRY 2010
2010	Soziale Medien	<i>Ted Talks</i>
2010	Spezielle Zeitschriften	<i>The Anthropocene Review</i>
2011	Breite Öffentlichkeit	<i>The Economist Titlestory 2011</i>
2012	Neue hybride Fachrichtung	Environmental Humanities
2014	Aufnahme in allg. Wörterbücher	<i>Oxford English Dictionary</i>
2014	Rechtswissenschaften	KERSTEN 2014
2015	Katholische Kirche	<i>Laudato si’</i> , Papst Franziskus
2015	Erste große Ausstellung	„Willkommen im Anthropozän“, Deutsches Museum München
2015	Kunstwissenschaften	DAVIS & TURPIN 2015
2016	Geologie: informelle Annahme	Weltkongress der Geologie, Kapstadt

Tabelle 2: Fortsetzung

Table 2: continued

Auftreten	Bereiche, Disziplinen, Institutionalisation	Medien, Autoren, Beispiele
2018	Abendfüllender Film	BAICHWAL DE PENCIER & BURTYNSKY 2018
2018	Spezielle Enzyklopädie	DELLASALA & GOLDSTEIN 2018 (2280 Seiten)
2021	Atlas zum Anthropozän	GEMENNE et al. 2021
2021	Erste Museumskuratorin für Anthropozän (Nicole Heller)	Anthropocene Center, Carnegie Museum of Natural History, Pittsburgh
2022	Erster universitärer Lehrstuhl (Debjeni Bhattacharyya)	Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich; für „Geschichte des Anthropozäns“
2023	Interdisziplinäres Handbuch	WALLENHORST & WULF 2023
2023	Interdisziplinäres Institut	Max-Planck-Institut für Geoanthropologie, Jena
2024	Ablehnung der Formalisierung als geologische Epoche	International Subcommission on Quaternary Stratigraphy (SQS)

Die Rezeption geht weit über die Wissenschaften hinaus. Das Wort „Anthropozän“ hat einen kometenhaften Aufstieg erlebt (siehe Tab. 2). Der Begriff hat sich sehr rasch in alle Richtungen verbreitet. Es lässt sich ein sehr breites Feld von Nutzern jenseits der Wissenschaft finden, das manche kritisch oder scherzhaft als Anthro(po)s(c)ene bezeichnet haben (CASTREE 2014; LORIMER 2017: 117, 131; ZALASIEWICZ et al. 2021: 8-11).

Der weltweit größte verlinkte Forschungsdatensatz *Dimensions* zählt am 13. Juli 2024 unter der Eingabe „anthropocene“ satte 186.291 Publikationen, 633 Datensätze, 1519 Förderungen, 84 Patente und 1581 politische Dokumente, die den Begriff „Anthropozän“ seit dem Jahr 2000 verwenden. Die *Anthropo-Scene* besteht allerdings vor allem in politischen Entscheidungsträgern, Künstlern, Literaten und kulturwissenschaftlichen Akademikern und kaum der breiten Öffentlichkeit.

Eine Karriere als Wort und eine Diskurskarriere, die sich klar zeigt, bedeutet aber nicht automatisch, dass wir auch inhaltlich eine Begriffskarriere sehen. Vielfach wird das Wort eher marketingbezogen eingesetzt. Oft fungiert das Wort einfach nur als Ersatz für „Umweltverschmutzung“, „globale Probleme“ oder fungiert gar als reiner Show-Begriff, selbst im wissenschaftlichen Kontext.

4 Geochronologie, Stratigrafie und die *Anthropocene Working Group*

In den Medien und auch in der kulturwissenschaftlichen Rezeption, sei sie zustimmend oder kritisch, wird oft fälschlich angenommen, dass Geowissenschaftler die Einführung des Anthropozäns einhellig befürworteten. Das war und ist

noch immer eindeutig nicht der Fall, was spätestens mit der jüngst erfolgten Ablehnung der Formalisierung 2024 klar wurde. Bei vielen Nutzern des Begriffs Anthropozän ist nicht klar, dass Geologen und besonders Stratigrafen spezifische Prinzipien der Periodisierung der Erdgeschichte haben. In Bezug auf das Anthropozän geht es Geologen, Paläontologen und Stratigrafen um klare physische Spuren (*signals, marker*) für anthropogene Effekte vor allem in Sedimenten. Für Erdwissenschaftler ist die bunte Tabelle der geologischen Zeit eine Art heiliger Schrift der Stratigrafie und ein Heiligtum der Geowissenschaften überhaupt. Hierin sind die „geologische Zeittafel“ (*Geological Time Scale, GTS*) bzw. die *International Chronostratigraphic Chart (ICC)* vergleichbar mit dem Periodensystem der Chemiker und dem Stammbaum der Biologen.

Die zeitliche Einteilung und Einordnung ist ein eigenes Ziel dieser Disziplinen (VON ENGELHARDT & ZIMMERMANN 1982; WILL 2021: 113-126). Dies ist wichtig, denn es unterscheidet sich von der Thematisierung menschlicher Einflüsse auf Klima und andere Geophänomene anderer Geowissenschaften, wie Geografie und Erdsystemwissenschaft. Für Vorschläge zur Formalisierung eines geologischen Zeitabschnitts muss konkrete Evidenz vorgewiesen werden, und die Art und Weise der geologischen Evidenzbildung ist in der Geologie eine besondere, die sich von anderen Wissenschaften unterscheidet (dazu detailliert WILL 2021: 143-201).

Innerhalb der stratigrafischen Geologie ist zwischen Geochronologie und Chronostratigrafie zu unterscheiden (SALVADOR 1994). Geochronologie ist der Bereich der geologischen Schichtenkunde (Stratigrafie), in dem erdgeschichtliche Ereignisse und Zeit abstrakt (immateriell) und hierarchisch eingeteilt werden. Dabei steht eine Epoche (*epoch*) für einen mittellangen Abschnitt von zehn Millionen Jahren der Geschichte des Planeten. Das ist ein längerer Abschnitt als ein Zeitalter (*age*) von einigen Millionen Jahren, aber weniger umfassend als eine Periode (*period*) oder gar eine Ära (*era*) von einigen Hundert Millionen Jahren und einem (*aeon*) von mindestens einer halbe Milliarde Jahren (DAVIES 2016: 2). Zentral für beide Ansätze sind Methoden der relativen und absoluten Datierung, z. B. durch Isotopenmessung.

Zusammen bilden die Einheiten die *International Chronostratigraphic Chart*, die wiederum die Basis der offiziellen geologischen Zeitrechnung (*Geological Time Scale, GTS*) bildet. Sämtliche Einheiten haben eine isochrone Basis, die eine konzeptuelle Oberfläche *identischer Zeit über den ganzen Globus* repräsentiert. Hier ist der Vorschlag, eine „Epoche Anthropozän“ einzuführen. Diese Zeitoberfläche wird dann in der Feldgeologie (mit verschiedenen Graden der Präzision) mit konkreten Gesteinen, Fossilien oder Spuren „korreliert“ (ZALASIEWICZ et al. 2021: 2). Damit sind wir bei der Chronostratigrafie, die materiell und feldgeologisch orientiert ist. Sie bildet den Bereich der Stratigrafie, in dem Zeit auf geologische Abfolgen (zumeist Gestein) angewendet wird. Dementsprechend gibt es eine zur geochronologischen Nomenklatur parallele eigene chronostratigrafische

Terminologie. Der entsprechende Vorschlag für das Anthropozän als Epoche ist die Einführung einer „Serie Anthropozän“, welche hierarchisch ein Niveau über der „Stufe“ als der kleinsten Einheit, die im globalen Maßstab verwendbar ist, angesiedelt ist.

Wichtig ist, dass diese anthropozäne Serie *sämtliche* geologischen Ereignisse und Ablagerungen (Gesteine oder etwa Eiskerne) des Zeitraums umfasst, egal, ob sie menschlichen Ursprungs sind oder nicht. „Anthropozäne Schichten“ würden in diesem chronostratigrafischen Rahmen gesehen *sämtliche* Schichten umfassen, die innerhalb des genau definierten Zeitintervalls abgelagert wurden, ob sie nun (a) menschengemacht sind, wie der versiegelte Boden unter Städten, (b) teilweise „natürlich“, aber innerhalb anthropogener Kontexte, etwa Seeablagerungen hinter großen Staudämmen, natürliche Sedimentansammlungen, die nur anthropogene Spuren enthalten, wie Mikroplastik (BANCONE et al. 2020), oder künstliche Radionuklide und eben auch (c) vollständig „natürliche“ Sedimente bzw. andere Gesteine mit wenigen oder keinen derartigen menschlichen Spuren (ZALASIEWICZ et al. 2010, 2021: 4).

	Geologie synchron bzw. isochron				Historische Wissenschaften diachron			
	Lok. 1	Lok. 2	Lok. 3	Lok. 4	Lok. 1	Lok. 2	Lok. 3	Lok. 4
Periode B	[A thick horizontal bar spanning all four localities]				[A thick horizontal bar spanning only Lok. 3]			
Periode A								
	[A thick horizontal bar spanning all four localities]				[A thick horizontal bar spanning Lok. 4]			

Abbildung 4: Unterschiedliche Periodisierungsprinzipien in der Geologie und den historischen Wissenschaften (Lok = Lokalität); Orig. Autor.

Figure 4: Different periodization principles in geology and the historical sciences (Lok = locality); orig. author.

Dieser Unterscheidung folgend werden erdgeschichtliche Grenzen durch *Global Boundary Stratotype Sections and Points* (oder durch *Global Standard Stratigraphic Ages* (GSSA) untermauert. GSSP (auch *Golden Spikes* genannt) sind chronostratigrafische Horizonte innerhalb einer Schichtenfolge, die, verbunden mit anderen Schichtenfolgen, als *globaler* Referenzpunkt dienen (WATERS et al. 2018). Während GSSA also einfach geochronologische Horizonte darstellen, erfordern

GSSP den Nachweis physischer Marker in einer spezifischen Schichtenabfolge von Sedimenten. Das kann auch etwa ubiquitäres Plastik in Eisablagerungen oder Flugasche in Seesedimenten sein. Der wichtigste Kandidat sind aus Atomtests stammende Radionuklide, welche als Basis des Einsetzens des Anthropozäns angesetzt werden (ZALASIEWICZ et al. 2015). Daneben gibt es aber etliche weitere Marker. Im Falle der Anerkennung wird in einer sog. Typlokalität am unteren Ende einer Schicht ein entsprechender „Fußpunkt“ angebracht. Entscheidend ist hier die Markierung, um die Grenzen einer *globalen* chronostratigrafischen Einheit klar zu bestimmen. Die Anerkennung eines GSSP erfordert global *synchrone* (bzw. *isochrone*) Änderungen. Solche synchronen (bzw. „isochronen“) Grenzen sind zu unterscheiden von Periodengrenzen, wie sie in historischen Wissenschaften, wie in der Archäologie und Geschichtswissenschaft gemacht werden. In der diesen Wissenschaften sind Epochengrenzen in verschiedenen Regionen bzw. Lokalitäten nicht zeitgleich, sondern diachron. Die Steinzeit beginnt in Mitteleuropa zu einer anderen Zeit als etwa in Asien (Abb. 4):

„The synchronicity and precision of definition of both epoch and series (by GSSP) is essential to geoscientists, as the boundary then acts as a time reference surface, around which (commonly complex and diachronous) events and processes in different parts of the world can be located and ordered in time and space, so as to construct a meaningful Earth history” (ZALASIEWICZ et al. 2021: 4).

Crutzen war kein Geologe, und Geologen mussten erst einmal realisieren, dass Crutzens Intervention so viel Literatur in den Erdwissenschaften (*earth sciences*) und in der Biologie hervorbrachte, dass der Begriff wohl doch keine vorübergehende Wissenschaftsmode war. Außerdem hatten Crutzen und andere Erdwissenschaftler Umweltparameter wie neue chemische Komponenten in der Atmosphäre oder Artensterben als Indizien angeführt. Die für das Thema zentrale Institution der Geologen ist die *Anthropocene Working Group (AWG)*, die von 2009 bis 2024 als multidisziplinär zusammengesetzter Fachausschuss der *Subcommission on Quaternary Stratigraphy (SQS)* innerhalb der geologischen Vereinigung (IUGS) existierte. Die AWG, die ab 2024 informell weiter besteht, umfasst derzeit 33 Mitglieder (Stand 6.8.2024) aus 14 Ländern, die ehrenamtlich arbeiten. Angeregt wurde die Arbeit der AWG durch eine zunächst empirisch recht allgemeine Studie der *Geological Society of London*, in der aber argumentiert wurde, dass es selbst auf der Basis eines „konservativen“ Ansatzes ein „unmissverständliches biostratigraphisches Signal“ für bleibende Auswirkungen menschlicher Zivilisation in unserer Zeit gebe (ZALASIEWICZ et al. 2008).

Die von der SQS der AWG gestellte Aufgabe war es, zu erkunden, *ob* das Anthropozän als Intervall *geologisch* untermauert werden kann. Es ging darum, Datierungsvorschläge für das Anthropozän zu prüfen, eine plausible Periodisierung zu erarbeiten und auch eigene stratigrafische Untersuchungen durchzuführen. Unter der Leitung des Paläobiologen Jan Zalasiewicz bilden stratigrafisch arbei-

tende Geologen die Mehrheit in der AGW. Daneben sind aber auch Experten aus Erdsystemwissenschaft, Ökologie, Archäologie, Geografie, Meereskunde, Bodenkunde und sogar Philosophie, Geschichtswissenschaft und Internationales Recht vertreten (SQS 2009; WATERS et al. 2014; ZALASIEWICZ et al. 2021: 2; ZALASIEWICZ et al. 2023).

Wenn man den gegenwärtig seitens der *Anthropocene Working Group* favorisierten Beginn des Anthropozäns im Jahr 1950 ansetzt, dann würde damit heute eine wohlgeerntete geologische Epoche angesetzt, die erst vor *einer menschlichen Generation* begann. Hier ist es wichtig, sich die gegenüber diesem kurzen Zeitraum viel längere *longue durée* der menschlichen Geschichte und die noch viel längere „Tiefenzeit“ der planetaren Geschichte zu vergegenwärtigen (GOULD 1990). Das beinhaltet die Annahme bzw. Einsicht, dass Zeit – entgegen extremen sozialkonstruktivistischen Annahmen – eben nicht *nur* sozial konstruiert ist. Die Geschichte der Erde begann vor rund 4,54 Milliarden Jahren. *Homo sapiens* entstand vor etwa 200.000 Jahren und wurde langsam zu einem wichtigen Faktor. Seit rund 50.000 Jahren hatte der Mensch einen nachweisbaren Einfluss auf die Welt und erst seit etwa 10.000 Jahren mit den ersten dauerhaften Siedlungen einen tatsächlich großen Impact. Mitte des 20. Jh. wurde er dann in geohistorischer Sicht urplötzlich zu einer Kraft, die den Planeten, genauer die Bio- und Geosphäre, maßgeblich formte. Ein empirisch gesicherter Bruch bildete der weltweite Trendwechsel von Bausteinen zu Beton bei Gebäuden seit etwa 1950 und die plötzliche Zunahme von Asphalt als Straßenbelag ab 1960 (ELHACHAM et al. 2020: 3).

5 Geologen streiten – Kritik und Ablehnung der Formalisierung

Nach jahrelanger Vorarbeit und systematischem Vergleich vieler Kandidaten für einen Referenzpunkt wurde 2023 der Crawford Lake im kanadischen Ontario von der AWG offiziell als „golden spike“ vorgeschlagen (WATERS et al. 2023). Das ist ein kleiner See über einer eingestürzten Karsthöhle, der wegen geringer Umlagerungen (sog. meromiktischer See) ein natürliches Archiv der Umweltveränderungen darstellt. Wie Kritiker monieren, sind durch Setzung einer solchen scharfen Marke diachrone Veränderungen (time-transgressive) und lokale bzw. regionale, ja auch „nur kontinentweite“ Variationen ausgeschlossen (RUDDIMAN 2018). Eine Dokumentation gradueller Akkumulation von spezifischen menschlichen Wirkungen ist mit diesem Ansatz nicht möglich und auch nicht beabsichtigt (EDGEWORTH et al. 2015). Hinzu kommt, dass es bislang entgegen anderslautenden Behauptungen nur wenige tatsächlich stratigrafisch dokumentierte spikes gibt.

Innerhalb der Geologie hat (a) die extreme Kürze des postulierten Anthropozäns als geologischem Intervall, (b) die Neuartigkeit der menschengemachten geologischen Signale (Technofossilien, wie Plastik) und (c) die Verknüpfung von

geologischen Folgen mit sozialen Ursachen und auch politischen Fragen Kritik auf den Plan gerufen (FINNEY & EDWARDS 2016; FINNEY 2018; RIVAL 2021). Die bislang wenigen Spikes lassen Kritiker den Vergleich mit dem Gregorianischen Kalender machen. In diesem sind menschliche Umweltfolgen, aber auch etliche geologische Ereignisse, wie Vulkanausbrüche, durchaus verzeichnet, und so hat er, wie Finney platt feststellt, die geologische Zeitrechnung mit guten Gründen ersetzt (FINNEY 2018: 217). Aus dieser Warte erscheint eine Geochronologie menschlicher Einflüsse auf die Geosphäre als anachronistisch.

Diese Kritik verkennt aber, dass die Periode ja nur bis jetzt so kurz ist und also noch lang werden könnte, in jedem Fall aber den in Umfang, Rate und Form einmaligen geophysischen Wandel durch Formalisierung markiert und so eine wichtige Einsicht der Geologie darstellt (HEAD 2019). Außerdem haben die jeweils rezentesten Einheiten der geologischen Zeitskala alle die kürzeste Dauer innerhalb ihres Ranges: die Ära Kanäozoikum mit 66 Millionen Jahren, die Periode des Quartärs mit 2,6 Millionen und die Epoche Holozän mit 11.700 Jahren und seinen Stufen von 3465 bis 4250 Jahren Dauer (ZALASIEWICZ et al. 2021: 6, 2023). So wie in der gewöhnlichen geologischen Stratigrafie werden die in der Tab. 1 gemachten Vergeiche von Veränderungen der Geosphäre in Zeitintervallen erst durch ein chronologisch präzises gefasstes Anthropozän machbar. Erst so wird es möglich, Prognosen des Klimawandels in den planetaren Kontext früherer Raum- und Zeitmaßstäbe zu setzen.

In der AWG gibt es eine Minderheit, die einen primär erdwissenschaftlich, archäologisch und historisch erweiterten Begriff des Anthropozäns vertritt (diachronous anthropocene, diachronic anthropocene). Dies ist die Summe aller empirisch nachweisbaren menschlichen Einflüsse des Homo sapiens auf die Geosphäre aller Zeiten (diachron) und auch nur regional.

Im Unterschied zu den Vertretern der Anthropocene Working Group, die größtenteils keine Geowissenschaftler sind, wird das Konzept von Geologen und Stratigrafen eher vorsichtig gesehen und auf geowissenschaftlichen Tagungen eher selten propagiert (FINNEY 2018: 217). Auch das erklärt, warum es satte 15 Jahre dauerte, bis sich die AWG zum Formalisierungsvorschlag durchgerungen hat. Es wird nach wie vor diskutiert, ob es mit dem Pleistozän (2,5 Mio. bis 11.700 v. H.) und Holozän auf eine Ebene zu stellen ist oder nicht doch eine Untergruppe des Holozäns bildet (WALKER et al. 2012; LEINFELDER 2024).

Unabhängig von der Annahme, ob es die Menschheit in ferner Zukunft noch gibt und sie so die menschengemachten Veränderungen der Geosphäre geologisch dokumentieren kann, ist eine Voraussetzung einer Epoche des Anthropozäns, dass die Spuren menschlicher Aktivität überhaupt dauerhaft erhalten bleiben. Kritiker der Anthropozän-These argumentieren, dass geologische Großereignisse, etwa vulkanische Katastrophen wie in historischer Zeit in Indonesien (Tambora, Krakatau, Toba), Erdbeben oder ein Asteroideneinschlag, jegliche menschliche Spuren auslöschen könnten. Die Erdgeschichte geht ja auch geologisch weiter, und in

ferner Zukunft werden nur durchgreifende und langfristige Störungen seitens der Menschen als Spuren erhalten bleiben (VISCANTI 2014: 382, 384-387). Angesichts der begrenzten Eingrifftiefe in die Erde und den Unsicherheiten der Erhaltung menschlicher Spuren ist die Ausrufung des Anthropozäns vielleicht voreilig (SMIL 2024: 280-284).

Die formale Einführung wurde im März 2024 durch die Subcommission on Quaternary Stratigraphy (SQS) abgelehnt (IUGS 2024; vgl. ANONYMUS 2024; EDGEWORTH et al. 2024; WITZE 2024; ZONG 2024). Dies hat viele überrascht und geschah, obwohl geäußerte fachliche Einwände (FINNEY 2014) nach mehrjährigen Studien detailliert adressiert und m.E. entkräftet wurden (WATERS et al. 2023; ZALASIEWICZ et al. 2024). Die offiziell gegebenen Gründe der Ablehnung sind folgende: Erstens setzen die ersten anthropogenen Auswirkungen auf die Geosphäre schon lange vor der Mitte des 20. Jh. ein. Zweitens würde eine neue Einheit in der offiziellen Geologischen Zeitskala GTS durch seine Untergrenze das Holozän beschneiden. Dies würde bedeuten, dass das Anthropozän eine Zeitspanne von (bislang) weniger als einem einzigen Menschenleben umfasst, während sich die üblichen Einheiten der GTS über Tausende oder sogar Millionen von Jahren erstrecken. Drittens sind die Auswirkungen des Menschen auf globale Systeme zeitübergreifend variabel und auch räumlich unterschiedlich. Ihr Einsetzen könne nicht angemessen durch einen synchronen (isochronen) geologischen Horizont dargestellt werden (IUGS 2024). Die Gegner der Formalisierung des Anthropozäns als Epoche betonen außerdem, dass die entscheidende anthropogene Schicht (Stratotypsequenz) im 2023 als Goldnagel (golden spike) vorgeschlagenen Crawford Lake im kanadischen Ontario nur 15 cm dick ist (WALKER et al. 2024: 2).

Auf den Punkt gebracht, besagt die Kritik der Geologen im Kern, der Begriff (a) stimme nicht mit gut etablierten Benennungspraktiken der Chronostratigraphie überein; er sei (b) inkonsistent zu anderen Epochen des Känozoikums; (c) seine Etymologie sei in mehrfacher Hinsicht fehlerhaft. In ähnlichem Sinne hatten sich Vertreter der Deutschen Stratigrafischen Kommission (DSK) schon früh geäußert (MÖNNIG 2016:

„Zum einen geht es darum, ein Anthropozän wie alle anderen Stratigrafischen Einheiten formal mit einem GSSP und Golden Spike zu etablieren. Die DSK hält das für wenig sinnvoll, auch wenn mit dem Eingang in die Lehrbücher die Einheit wesentlich populärer werden könnte. Als informeller Begriff ist sie schon jetzt in aller Munde, sodass die Working Group [of the ‚Anthropocene‘ der Subcommission on Quaternary Stratigraphy der ISC] mit ihrem Vorhaben vermutlich auch von dieser öffentlichen Wirkung angetrieben wird. Man muss aber aufpassen, dass wissenschaftliche Konzepte nicht mit politischen Weltanschauungen vermischt werden. Vielleicht ist es also besser, das Anthropozän auf dem Feld der Geoethik zu platzieren, und nicht auf stratigrafischen Tabellen“ (MÖNNIG 2016).

Die Kritiker aus der Geologie argumentieren, die Verwendung der Silbe „zän“ bewirke, das Anthropozän automatisch als eine Epoche bzw. Serie zu sehen, also niedrigere Zeiteinheiten gar nicht zu erwägen. Man könnte ja schließlich eine Bezeichnung als Zeitalter mit der Endung „ian“ statt „-cene“ erwägen (GIBBARD & WALKER 2014: 32; WALKER et al. 2015; HEAD & GIBBARD 2015: 21). Der spekulative Anteil im Argument für das Anthropozän als geologische Zeiteinheit ist nicht wegzudiskutieren. Aus der Perspektive einer zukünftigen Geologin können wir schließlich nicht genau wissen, was in ferner Zukunft von den menschlichen Aktivitäten übrigbleiben wird und in welcher Form (SANTANA 2019: 1077-1088; für ein Beispiel ANTWEILER 2022: 9-11). Die Kritiker schlagen vor, den Begriff nur informell zu verwenden. Dieser informelle Charakter solle stilistisch hervorgehoben werden, etwa durch konsequente Anführungszeichen („Anthropozän“, „Anthropocene“) oder durch Kleinschreibung des Begriffs im Englischen (anthropocene; RUDDIMAN et al. 2015: 39; RULL 2018: 4, 2018a).

Abgesehen von allen eher methodisch-technischen Einwänden besteht der letztlich entscheidende Grund der 2024 erfolgten Ablehnung wohl darin, dass Geologen sich traditionell für die tiefe Vergangenheit zuständig fühlen, weniger für die jüngere Vergangenheit, kaum für die Gegenwart und fast gar nicht für die Zukunft. Mein (derzeitiges!) Fazit zur geologischen Einordnung ist dennoch, dass die Argumente pro einer Formalisierung zusammen genommen stärker sind als die Gegenargumente.

Das Anthropozän wird sich im erdgeschichtlichen Zeitrahmen gesehen vielleicht weniger als eine Epoche erweisen, sondern als ein vergleichsweise kurzes Ereignis. Eine neuere Sichtweise unter Geologen, alternativ zur Formalisierung oder aber der Nichtformalisierung, schlägt deshalb vor, das Anthropozän nicht als hochrangige formale Serie/Epoche (d. h. eine chronostratigrafische Einheit und entsprechende geochronologische Einheit) anzusehen, sondern vielmehr als ein Ereignis (geological event). Dies würde etwa den großen transformativen Ereignissen der Erdgeschichte wie beispielsweise der „Großen Oxygenierung“ vor 2,4–2,1 Mrd. Jahren entsprechen. Solche „Ereignisse“ sind nicht als stratigrafische Einheiten in der geologischen Zeittafel enthalten: das Anthropozän wäre damit „nur“ ein informeller nicht-stratigrafischer Begriff (GIBBARD et al. 2021; FINNEY & GIBBARD 2023; WALKER et al. 2024).

Aus Menschensicht erscheint das Anthropozän als eine Katastrophe, geologisch gesehen allerdings bislang nur ein Augenblick. Nur wenn es tatsächlich sehr lange dauert, würde es früheren drastischen geologischen Transformationen gleichen, etwa dem am Ende des Perms vor 252 Millionen Jahren, als 96 Prozent aller Meeresarten ausstarben, oder am Ende der Kreide vor 66 Millionen Jahren. Gegen diesen Vorschlag spricht demnach, dass diese geologischen Events sehr lange und vor allem sehr unterschiedlich lang dauernde Zeitabschnitte umfassten (WATERS et al. 2022, 2023). Solche geologischen „Ereignisse“ sind mit wenigen Ausnahmen (Asteroideneinschläge) aus menschlicher Sicht extrem langsam und

jedenfalls nicht mit der Rasanzen des menschengemachten Geowandels in einer menschlichen Generation vergleichbar.

Gesellschaftstheoretisch und kulturwissenschaftlich herausfordernd ist m. E. ein eklatanter begrifflicher Widerspruch, den Burghard Müller unter dem Motto „Von wegen Anthropozän“ auf den Punkt gebracht hat. Das Anthropozän erscheint paradox als gigantischer Zwerg. Einerseits soll das Anthropozän vor so wenig Zeit wie möglich angebrochen sein, um deutlich zu zeigen, wie rapide wir Menschen die Welt umgestalten. Andererseits soll es dennoch den Rang eines großen und zeitlich tiefen Erdzeitalters bekommen, „... kraft Ernennung an der Würde der großen, tiefen, unverfügbaren Zeit partizipieren“ (MÜLLER 2021b: 12).

6 Kritik der Kritik – Anthropologisierung der Geologie

Kritiker der Formalisierung beachten zu wenig, dass die oben beschriebenen Kriterien der Formalisierung geologischer Zeiteinheiten ein Idealkonstrukt darstellen. Die Nomenklatur und die Praxis der Stratigrafie folgen dem längst nicht immer, wie Eugenio Luciano anhand detaillierter Beispiele konzise zusammengefasst hat (LUCIANO 2022). Die in Geologenkreisen immer wieder geäußerten Argumente, dass eine Formalisierung bisherigen „gut etablierten“ Praktiken zuwiderlaufe, ist nicht wirklich stichhaltig. In einer sorgfältigen Analyse zeigt der Wissenschaftshistoriker Eugenio Luciano, dass die bisherigen Vorgehensweisen der Stratigrafen alles andere als konsequent waren und es bis heute sind. Das zeigt sich bei der Analyse des International Stratigraphic Guide und seiner Anwendung (LUCIANO 2022: 32-36).

Begriffliche Diffusität und Uneinheitlichkeit zeigen sich in der chronostratigrafischen Literatur und Praxis sowohl in der Charakterisierung, der Definition als auch der Benennung stratigrafischer Einheiten – drei Aspekten, die oft vermischt werden. So sind manche Systemeinheiten nach zeitlicher Position, manche nach lithologischem Charakter, andere nach geographischen Orten benannt. Manche tragen Namen früher Menschengruppen in Wales (Ordovizium, Silur). Die Konservierung historisch etablierter Benennungen und eine vom Guide bewusst verfolgte Linie der Toleranz und Flexibilität in Bezug auf Kriterien der Definition und Charakterisierung dominieren deutlich über die terminologische Konsistenz (LUCIANO 2022: 34).

Schon die Rede von „gut etabliert“ gegenüber der Einführung ist unklar und eher strategisch zu bewerten. Wenn man das Beispiel des Wortes „Anthropozän“ selbst nimmt, kann „gut etabliert“ erstens bedeuten, dass der Begriff populär ist. Er wird verbreitet in den Medien und etwa in den bildenden Künsten verwendet. Zweitens ist er gut etabliert, in dem er sprachlich und institutionell weit verbreitet ist. So gibt es viele Übersetzungen des Terminus, etwa Anthropocène (Französisch), Anthropoceno (Spanisch), „Anthropocean“ (Niederländisch), Mannöld

(Isländisch) und Антрапацэн (Russisch). Er wurde auch in nichteuropäische Sprachen übersetzt, z. B. ins Chinesische, ins Japanische und als Antroposen in die Bahasa Indonesia. Drittens kann „gut etabliert“ heißen, dass das Wort in den Naturwissenschaften, vor allem in den Erdsystemwissenschaften und etwa in den Wasserwissenschaften, in der konkreten Forschung verwendet wird (LUCIANO 2022: 35-36). Letzteres ist eindeutig der Fall, was umso mehr für die Geistes-Sozial- und Kulturwissenschaften gilt.

Die Arbeitspraxis der AWG hat gezeigt, dass eine geisteswissenschaftliche Befassung mit geologischen Konzepten und auch speziell mit stratigrafischem Denken unerlässlich ist (WILL 2021: 216). Die Geistes- und Sozialwissenschaftler in der Gruppe stehen für eine für Geologen völlig neue Ursachen- und Prozessorientierung gegenüber ihrer traditionellen Ausrichtung, die stärker auf Effekte fokussiert ist. Die AWG ist damit nicht nur als wichtigste Institutionalisierung der Fragestellung wichtig, sondern stellt in ihrer disziplinären Vielfalt ein absolutes Novum für die Stratigrafie dar (LUNDERSHAUSEN 2018; WILL 2021: 33, 107-113, 216; ZALASIEWICZ et al. 2023: 316f.).

Auch jenseits wissenschaftstheoretischer Fragen für die Geologie sind geistes- und sozialwissenschaftliche Zugänge und besonders wissenschaftsgeschichtliche Studien ertragreich. Ich kann hier nur stichwortartige Hinweise geben (zu Details ANTWEILER 2022: Kap. 3). Die Verbreitung der Idee des Anthropozäns war mitnichten nur durch Erkenntnisinteressen geleitet. Forschungsleitend waren das Aufkommen von Systemmodellen nach dem Zweiten Weltkrieg und im Kalten Krieg, verstärkt ab 1980, die Herausbildung einer interdisziplinären Wissenschaft des Klimawandels (Climate Science), die Sorge über die weltweite Verbreitung von Radionukliden als Fallout von oberirdischen Atomwaffentests (bis 1964, rund 1500 an der Zahl) und die Popularisierung von Bildern des Planeten Erde aus dem Weltraum seit den 1970er-Jahren (HAMILTON & GRINEVALD 2015).

Wie wissenschaftsgeschichtliche Untersuchungen nachweisen, geht die Einsicht in schnellen Wandel der Geosphäre selbst nicht auf die Anthropozän-Diskussion zurück. Schon ab Mitte der 1960er-Jahre, somit 35 Jahre vor Crutzens Intervention, wurde durch die im Kontext der Raumfahrt aufkommende Erdsystemwissenschaft klar, dass die Geosphäre ein Potenzial hat, sich – in geologischen Zeitmaßstäben gesehen – extrem schnell von einem zu einem anderen Zustand zu bewegen. Dafür waren vier zentrale Einsichten wichtig, die sich zwischen 1966 und 1973 in den Geowissenschaften etablierten (BROOKE 2014: 23, 25-36; vgl. TURNER 2011): (a) die Bestätigung der Plattentektonik, (b) die Bedeutung extraterrestrischer Einschlüge für die Erdgeschichte, (c) die Relevanz (auch) plötzlichen bzw. disruptiven Wandels in der Evolution des Lebens (punctuated equilibria) und vor allem (d) die Einsicht in die Existenz der Erde als eines integrierten Systems, die sich zuerst in der Gaia-Hypothese von James Lovelock manifestierte.

Die ablehnende Fraktion der Geologen argumentiert, das Anthropozän sollte eher als kulturelles denn als geologisches Konzept gesehen werden (GIBBARD

2020; WITZE 2024: 250; so schon AUTIN 2012). Man kann sagen, dass die eigene Stellung des Anthropozäns eher eine anthropozentrische, genauer auf die Jetztzeit bezogene und damit präsentistische Sicht auf die Erdgeschichte zeigt ... eine vielleicht allzu menschliche Sicht. Die zunächst als rein geologisch anmutende Annahme, dass der Mensch auch weiterhin geologisch wirkmächtig sein wird, müsste auch gesellschaftstheoretisch unterfüttert werden, denn die derzeitige wachstumsorientierte Lebensform kann keinen stabilen Dauerzustand darstellen (OSTHEIMER 2016: 38; vgl. schon SIEFERLE 2000: 160).

Das Thema könnte für die Geologie auch grundlegende Bedeutung gewinnen. Die Geologie ist in herkömmlicher Sicht eine naturwissenschaftliche Disziplin, die sich in Zeitskalen jenseits des menschlichen Vorstellungsvermögens bewegt und gesellschaftliche Verhältnisse kaum zur Kenntnis nehmen musste. Das gilt zumindest für die klassische Geologie, allerdings nicht für die angewandte Umweltgeologie, die den Menschen als „Geofaktor“ in den Mittelpunkt stellt (HILBERG 2022; MEYER 2022), die frühe Vorläufer hatte (SUESS 1862). Mit dem Anthropozän entdeckt die Geologie als Fach insgesamt den Menschen aber ganz grundsätzlich, was wissenschaftssoziologisch interessant ist (GÖRG 2016: 9).

Was könnte die Anthropozändebatte für die Geologie bedeuten? Ein Beispiel mag die m.E. produktive Verunsicherung zeigen, welche die Idee des Anthropozäns für die Feldgeologie mit sich bringt. In der Legende geologischer Karten findet man oft die Einheit „künstliche Ablagerungen“ (artificial deposits). Dabei handelt es sich z. B. um von Menschen veränderte Böden und Schutt oder frühere Müllschichten, die mittlerweile etwa durch Versiegelung mit Beton abgedeckt sind. Aus geologischer Sicht zählen aber längst nicht sämtliche künstlichen Ablagerungen als „geologisch“. Die Gebäude, die auf der kartierten Oberfläche stehen, erscheinen nicht auf diesen Karten, auch wenn sie aus „geologischen“ Materialien, wie Steinen, Kalk und Sand gemacht sind (THOMAS et al. 2020: 58).

Da Karten grundsätzlich faktische Information mit Interpretation verbinden, stellen sich solche Fragen für Geografie und Geologie im Anthropozän in verschärfter Form.

Menschliche Spuren finden wir (in Auswahl) auf topografischen Karten oder Straßenkarten. Aus der Perspektive des Anthropozäns müssten sämtliche von Menschen erzeugten größeren Gegenstände und Materialien auch auf den geologischen Karten erscheinen, denn sie könnten ja eine in der Zukunft konsolidierte anthropozäne Schicht bilden. Betonierte oder etwa asphaltierte Flächen müssten nicht nur auf kultur- oder anthropogeografischen Karten erscheinen, sondern auch in physisch-geografischen Karten – und sie müssten sogar in geologischen Karten mit dargestellt werden (Abb. 5). Ähnliche Verunsicherungen bringen Fragen zur Zeitlichkeit, etwa danach, welche Zusammenhänge zwischen unseren Lebenszyklen und den größeren Zyklen des uns umgebenden Terrains bestehen (BJORNERUD 2020; IRVINE 2020: 10).



Abbildung 5: Kandidat für zukünftiges Technofossil am Strand von Kuta, Bali, Indonesien; Foto: Autor, 2019.

Figure 5: Candidate for future technofossil on the beach in Kuta, Bali, Indonesia; photo: author, 2019.

7 Fazit – das Anthropozän ist ein begriffliches Erdbeben

Die planetare Transformation der Geosphäre erfolgte innerhalb der Lebensspanne eines Menschen. Das Anthropozän ist mehr als diese zu befürchtende „Heißzeit“, sondern signalisiert einen Gesamteffekt menschlicher Eingriffe auf die Geosphäre. Es benennt gleichermaßen die Veränderung der Geosphäre, genauer ein erdweites Oberflächenphänomen, und auf der lokalen Ebene eine Dynamik, die einzelne Menschen, Kollektive und ganze Gesellschaften beeinflusst und gleichzeitig von diesen beeinflusst bzw. erzeugt wird. Damit sind die Ideen, die Innovationen, die politischen Systeme und sozialen Formationen und auch diejenigen, die sich diesem zerstörerischen Wandel widersetzen, Teil des Anthropozäns (THOMAS et al. 2020: vii).

Naturwissenschaftlich entwickelte sich das Thema im Austausch zwischen einer schnell entstehenden interdisziplinären Gemeinde der Erdwissenschaften in den 1980er- und 1990er-Jahren einerseits und der disziplinären Gemeinschaft der Geologen andererseits. Das beinhaltet auch organisationssoziologische und wissenssoziologische Fragen innerhalb der Geowissenschaften, weil die AWG zwar eine Institution der Geologie ist, in der aber erstens auch Nicht-Geologen eine

wichtige Rolle spielen und sich zweitens Minderheitenpositionen Gehör verschaffen. Angesichts von Crutzens Intervention und enorm breiten empirischen Befunden haben sich die Wissenschaften der geologischen Tiefenzeit teilweise geöffnet.

In geologischer wie auch in gesellschaftlich-politischer Hinsicht wichtig ist insbesondere der Nachweis etlicher synchroner, weltweiter und vermutlich dauerhafter Zeitmarker menschlicher Spuren ab etwa dem Jahr 1952. Für Geologen und Paläontologen, die sich mit tiefenzeitlichen Phänomen befassen, geht es darum, gegenwärtige Prozesse und Wege in die tiefe Zukunft zu thematisieren. Insofern ist es nicht nur eine fachliche und technische Frage, ob sich die Institutionen der Geologie zur Formalisierung des Anthropozäns durchringen. Nein, es ist auch eine kulturelle Frage innerhalb der Geologie (ZALASIEWICZ et al. 2021: 6).

Die Ablehnung der Formalisierung als Epoche spiegelt die Tatsache, dass viele Geologen einfach nicht davon überzeugt sind, dass der ökologische Einschnitt so gewaltig ist, dass so hochrangige Einheit wie eine Epoche der Erdgeschichte gerechtfertigt ist. Die Vertreter der AWG pochen auf die empirischen Befunde. Beide Seiten, Befürworter wie Kritiker einer Formalisierung, haben jeweils mehrere gute Argumente. Der letztlich entscheidende Grund der 2024 erfolgten Ablehnung besteht wohl darin, dass Geologen sich traditionell für die tiefe Vergangenheit zuständig fühlen, weniger für die jüngere Vergangenheit, kaum für die Gegenwart und fast gar nicht für die Zukunft.

Die Zurückweisung der Formalisierung wird der weiteren Diskussion keinen Abbruch tun, denn das Anthropozän stellt ein Konzept zu einem Phänomen dar, welches viele erdweite Prozesse unter einem Begriff zusammenführt. Der Begriff stellt diese Dynamiken zeitlich in den Kontext einer geologischen Langzeitperspektive („Tiefenzeit“). Die Tiefenzeit der Erde ist um Größenordnungen länger als der Alltagsverstand, aber auch als die Philosophien und Religionen annehmen. Erst aus dieser Zeitperspektive kann die derzeitige, geologisch gesehen ebene und abrupte, Transformation der Geosphäre mit dem Begriff „Anthropozän“ empirisch treffend charakterisiert und mittels Messungen auch sichtbar gemacht werden.

Christian Schwägerl, der das Konzept in Deutschland maßgeblich popularisierte und Crutzen gut kannte, berichtet, dass dieser selbst an seinem Vorschlag am wichtigsten fand, dass er intensive Debatten über das Verhältnis von Mensch und Erde auslösen könne. „Als Risiko einer formalen Anerkennung des Anthropozäns empfand er, dass die Debatte erlahmt und die Menschheit sich an ihren massiven Einfluss auf die Biosphäre und das Klima gewöhnt“ (SCHWÄGERL 2024). Auch die siegreiche Fraktion der Ablehnenden betont deutlich, dass all die Ablehnungsgründe nicht etwa besagen, menschliche Gesellschaften würden den Planeten nicht massiv und rapide verändern (ELLIS 2024: 1-3, WALKER et al. 2024: 2). So schließt auch das offizielle Statement der Internationalen Gesellschaft der geologischen Wissenschaften, das Anthropozän solle nur informell verwendet werden, aber:

“... the Anthropocene as a concept will continue to be widely used not only by Earth and environmental scientists, but also by social scientists, politicians and economists, as well as by the public at large. As such, it will remain an invaluable descriptor in human-environment interactions” (IUGS 2024).

Die politische Kernbotschaft der Rede vom Anthropozän besteht darin, uns zu einer schnellen, aber langfristig gedachten gesellschaftlichen Transformation zu motivieren. Angesichts des Anthropozäns erscheinen derzeit gängige Vorstellungen von Nachhaltigkeit und gesellschaftlicher Transformation – so wichtig sie sind – als systemisch gedacht zu stabilitätsorientiert, zeitlich zu kurzfristig, zu anthropozentrisch und wirtschaftlich immer noch zu konsumorientiert. Wir brauchen neue Welt- und Erdbilder, aber auch neue normative Menschenbilder. Angesichts der geologischen wie sozialtheoretischen Herausforderungen und vor allem angesichts des faktisch rapiden weltweiten Umweltwandels schließe ich: wir brauchen eine Geoanthropologie.

8 Literatur

- ANONYMUS (2024): Are we in the Anthropocene yet? – *Nature*, **627**: 466.
- ANTWEILER, CH. (2022): *Anthropologie im Anthropozän. Theoriebausteine für das 21. Jahrhundert.* – 653 S.; Wiesbaden (WBG Wissenschaftliche Buchgesellschaft).
- ARIZPE-SCHLOSSER, L. (2019): *Culture, International Transactions and the Anthropocene.* – 333 S.; Berlin (Springer) (The Anthropocene: Politik – Economics – Society – Science).
- AUTIN, W.J. & HOLBROOK, J.M. (2012): Is the Anthropocene an Issue of Stratigraphy or Pop Culture? – *GSA Today*, **22** (7): 60-61.
- BAICHWAL, J.N., DE PENCIER, N. & BURTYNSKY, E. (Regie) (2018): *Die Epoche des Menschen.* Film. 132 Min. (orig. „Anthropocene. The Human Epoch“, 87 Min., Mongrel Media; <https://theanthropocene.org/film/>).
- BANCONE, C.E.P., TURNER, S.D., DO SUL, J.A., & ROSE, N.L. (2020): The Palaeoecology of Microplastic Accumulation. – *Frontiers in Environmental Science*, **8**: 574008.
- BARNOSKY, A.D. (2008): Megafauna Tradeoff as a Driver of Quaternary and Future Extinctions. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**: 11543-11548.
- BAR-ON, Y.M., PHILLIPS, R. & MILO, R. (2018): The Biomass Distribution on Earth. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **115** (25): 6506.
- BENNETT, C.E., THOMAS, R., WILLIAMS, M., ZALASIEWICZ, J., EDGEWORTH, M., MILLER, H., COLES, B., FOSTER, A., BURTON, E.J. & MARUME, U. (2018): The Broiler Chicken as a Signal of a Human Reconfigured Biosphere. – *Royal Society Open Science*, **5**: 180325: 1-11 (<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsos.180325>).
- BENNER, S., LAX, G., CRUTZEN, P.J., PÖSCHL, U., LELIEVELD, J. & BRAUCH, H.G. (eds.) (2021): *Paul J. Crutzen and the Anthropocene: A New Epoch in Earth's History.* – 640 S.; Cham (Springer Nature) (The Anthropocene: Politik – Economics – Society – Science).
- BJORNERUD, M. (2020): *Zeitbewusstheit. Geologisches Denken und wie es helfen könnte, die Welt zu retten.* 2. Auflage – 246 S.; Berlin (Matthes & Seitz).
- BRAUCH, H.G. (2022): *The Anthropocene Concept in the Natural and Social Sciences, the Humanities and Law – A Bibliometric Analysis and a Qualitative Interpretation (2000–2020).* –

- In: BENNER, S., LAX, G., CRUTZEN, P.J., PÖSCHL, U., LELIEVELD, J. & BRAUCH, H.G. (eds.) (2021): Paul J. Crutzen and the Anthropocene: A New Epoch in Earth's History. – 289-439; Cham (Springer Nature) (The Anthropocene: Politik – Economics – Society – Science).
- BRIDGE, G. (2009): Material Worlds: Natural Resources, Resource Geography and the Material Economy. – *Geography Compass*, 3 (3): 1217-1244.
- BROOKE, J.L. (2014): Climate Change and the Course of Global History. A Rough Journey. – 654 S.; Cambridge (Cambridge University Press) (Studies in Environment and History).
- BURTYNSKY, E., BAICHWAL, J. & DE PENCIER, N. (2018): Die Epoche des Menschen. Film. 132 Min. (orig. „Anthropocene. The Human Epoch“).
- CASTREE, N. (2014a): The Anthropocene and Geography I: The Back Story. – *Geography Compass*, 8 (7): 436-449.
- CHEW, S.C. (2000): World Ecological Degradation. Accumulation, Urbanization, and Deforestation, 3000 B.C. – A.D. 2000. – 232 S.; Walnut Creek, Cal. (Altamira Press).
- CHRISTIAN, D. (2018): Big History. Die Geschichte der Welt – vom Urknall bis zur Zukunft der Menschheit. – 384 S.; München (Carl Hanser Verlag) (orig. “Origin Story. A History of Everything”, New York: Little, Brown & Company, 2018).
- COOPER, A.H., BROWN, T.J., PRICE, S.J., FORD, J.R. & WATERS, C.N. (2018): Humans Are the Most Significant Global Geomorphological Driving Force of the 21st Century. – *Anthropocene Review*, 5 (3): 222-229.
- CROSBY, A.W. (2003): The Columbian Exchange. Biological and Cultural Consequences of 1492. 30th Anniversary Edition. – 312 S.; Westport (Conn. & London (Praeger)) (Contributions in American Studies, 2).
- CRUTZEN, P.J. (2002): Geology of Mankind. – *Nature*, 415: 23.
- CRUTZEN, P.J. & STOERMER, E.F. (2000): The „Anthropocene“. – *IGBP Global Change Newsletter*, 41: 17-18.
- DELLASALA, D.A. & GOLDSTEIN, M.I. (chief. eds.) (2018): Encyclopedia of the Anthropocene. – 2280 S.; Dordrecht etc. (Elsevier).
- EDGEWORTH, M., DE B. RICHTER, D., WATERS, C., HAFF, P., NEAL, C. & PRICE, S.J. (2015): Diachronous Beginnings of the Anthropocene: The Lower Bounding Surface of Anthropogenic Deposits. – *The Anthropocene Review*, 2: 33-58.
- EDGEWORTH, M., BAUER, A.M., ELLIS, E.C., FINNEY, S.C., GILL, J.L., GIBBARD, Ph.L., MASLIN, M., MERRITTS, D.J. & WALKER, M.J.C. (2024): The Anthropocene Is More Than a Time Interval. – *Earth's Future*, 12 (<https://doi.org/10.1029/2024EF004831>).
- EHLERS, E. (2008): Das Anthropozän. Die Erde im Zeitalter des Menschen. – 284 S.; Darmstadt (WBG Wissenschaftliche Buchgesellschaft).
- ELHACHAM, E., BEN-URI, L., GROZOVSKI, J., BAR-ON, Y.M. & MILO, R. (2020): Global Human-Made Mass Exceeds All Living Biomass. – *Nature*, 588: 442-444.
- ELLIS, E.C. (2020): Anthropozän. Das Zeitalter des Menschen – eine Einführung. – 250 S.; München (Oekom).
- ELLIS, E.C. (2024): The Anthropocene is not an Epoch – but the Age of Humans is most definitely underway. The Conservation (https://anthroecology.org/wp-content/uploads/2024/03/ellis_2024b.pdf).
- ERIKSEN, Th.H. (2016): Overheating: An Anthropology of Accelerated Change. – 192 S.; London, New York (Pluto Press).
- FINNEY, St.C. (2014): The Anthropocene as a ratified unit in the ICS International Chronostratigraphic Chart: fundamental issues that must be addressed by the Task Group. – In: WATERS, C.N., ZALASIEWICZ, J., WILLIAMS, M., ELLIS, M.A. & SNELLING, A. (eds.): A Stratigraphical Basis for the Anthropocene; London (Geological Society) (Special Publications, 395: 23-28.
- FINNEY, St.C. (2018): Comment on BAUER & ELLIS 2018. – *Current Anthropology*, 59 (2): 216-217.

- FINNEY, ST. C. & EDWARDS, L. E. (2016): The "Anthropocene" Epoch: Scientific Decision or Political Statement? – *Geological Society of America Today*, **26** (2): 4-10.
- FRANKOPAN, P. (2023): Zwischen Himmel und Erde. Klima – eine Menschheitsgeschichte. – 1024 S.; Berlin (Rowohlt) (orig. "The Earth Transformed. An Untold History"; London (Bloomsbury).
- GEMENNE, F. & RANKOVIC, A., ANSART, TH., MARTIN, B. T., MITRANO, P., RIO, A. & Atelier de Cartographie de Sciences Po (2021): Atlas de l'anthropocène, 2. Auflage. – 174 S.; Paris (Presses de Sciences Po).
- GÖRG, CH. (2016): Zwischen Tagesgeschäft und Erdgeschichte: Die unterschiedlichen Zeitskalen in der Debatte um das Anthropozän. – *Gaia*, **25** (1): 9-13.
- GOULD, ST. JAY (1990): Die Entdeckung der Tiefenzeit. Zeitpfeil und Zeitzyklus in der Geschichte unserer Erde. – 304 S.; Stuttgart (Carl Hanser Verlag) (orig. „Time's Arrow. Time's Cycle. Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time“, Cambridge, Mass.: Harvard University, 1987).
- HAMILTON, C. & GRINEVALD, J. (2015): Was the Anthropocene Anticipated? – *The Anthropocene Review*, **2**: 59-72.
- HEAD, M. J. (2019): Formal Subdivision of the Quaternary System/Period: Present Status and Future Directions. – *Quaternary International*, **500**: 32-51.
- HEADRICK, D. R. (2022): Macht euch die Erde untertan. Die Umweltgeschichte des Anthropozäns. – 640 S.; Wiesbaden (WBG Wissenschaftliche Buchgemeinschaft) (engl. Orig. „Humans versus Nature. A Global Environmental History“, New York: Oxford University Press, 2021).
- HEYMANN, M. & DALMEDICO, A. D. (2019): Epistemology and Politics in Earth System Modeling: Historical Perspectives. – *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**: 1139-1152.
- HILBERG, S. (2022): Umweltgeologie. Eine Einführung in Grundlagen und Praxis, 2. Auflage. – 333 S.; Berlin (Springer Spektrum).
- HOOKE, R. L. E. (2000): On the History of Humans as Geomorphic Agents. – *Geology*, **28** (9): 843-846.
- HORN, E. & BERGTHALLER, H. (2022): Anthropozän zur Einführung, 3. Auflage. – 264 S.; Hamburg (Junius).
- IRVINE, R. D. G. (2020): An Anthropology of Deep Time. Geological Temporality and Social Life. – 224 S.; Cambridge etc. (Cambridge University Press) (New Departures in Anthropology).
- IUGS, International Union of Geological Sciences (2024): The Anthropocene. (https://www.iugs.org/_files/ugd/f1fc07_ebe2e2b94c35491c8efe570cd2c5a1bf.pdf?index=true&trk=public_post_comment-text, Aufruf 1.8.2024).
- KERSTEN, J. (2014): Das Anthropozän-Konzept. Kontrakt – Komposition – Konflikt. – 124 S.; Baden-Baden (Nomos).
- KEYS, P. W., BADIA, L. & WARRIER, R. (2023): The Future in Anthropocene Science. – *Earth's Future*, **12**: 1-13.
- KRÄMER, A. K. (2016): Das „Anthropozän“ als Wendepunkt zu einem neuen wissenschaftlichen Bewusstsein? Eine Untersuchung aus ethnologischer Perspektive zur Bedeutung und Verwendung des Konzeptes. – *Kölner Ethnologische Beiträge*, **45**: 92 S.
- LEINFELDER, R. (2024): Anthropozän – Anatomie eines Falls. – *SciLogs. Der Anthropozäniker*. <https://scilogs.spektrum.de/der-anthropozaniker/anatomie-eines-falls/>.
- LORIMER, J. (2017): The Anthropo-Scene: A Guide for the Perplexed. – *Social Studies of Science*, **47** (1): 117-42.
- LUCIANO, E. (2022): Is 'Anthropocene' a Suitable Chronostratigraphic Term? – *Anthropocene Science*, **1**: 29-41.
- LUNDERSHAUSEN, J. (2018): The Anthropocene Working Group and its (Inter)Disciplinarity. – *Sustainability: Science, Practice and Policy*, **14** (1): 31-45.

- MARKS, R.B. (2024): *The Origins of the Modern World. A Global and Environmental Narrative from the Fifteenth to the Twenty-First Century*. 5. Auflage. – 328 S.; Lanham etc. (Rowman & Littlefield).
- MASLIN, M. (2022): *Erste Hilfe für die Erde. Die Fakten*. – 242 S.; Stuttgart (Kosmos Verlag) (Orig. "How to Save Our Planet. The Facts", London etc. (Penguin Life)).
- MCKINNEY, M.L. (2005): *New Pangea: Homogenizing the Future Biosphere*. – Proceedings of the California Academy of Sciences, **56**, Supplement I (11): 119-129.
- MCNEILL, J.R. (2003): *Blue Planet. Die Geschichte der Umwelt im 20. Jahrhundert*. – 496 S.; Frankfurt am Main, New York (Campus Verlag) (orig. "Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World", New York & London, W.W. Norton, 2000, Global Century Series).
- MEYER, D.E. (2022): *Geofaktor Mensch. Eingriffe in die Umwelt und ihre Folgen* – 339 S.; Berlin (Springer Spektrum).
- MÖNNIG, E. (2016): *Anthropozän. Meinungen „Zur Anthropozän-Debatte“* (http://www.stratigraphie.de/ergebnisse/Texte/Ergebnisse_1_4_pdf5.pdf).
- MORRIS, I. (2020): *Beute, Ernte, Öl. Wie Energiequellen Gesellschaften formen*. – 432 S.; München (Deutsche Verlags-Anstalt). (orig. „Foragers, Farmers, and Fossil Fuels. How Human Values Evolve“, New York & Oxford: Princeton University Press, 2015).
- OSTHEIMER, J. (2016): *Die Renaissance der Geisteswissenschaften in der Ära des Menschen – die Rolle der angewandten Ethik im Anthropozän-Diskurs*. – In: MARING, M. (Hrsg.): *Zur Zukunft der Bereichsethiken – Herausforderungen durch die Ökonomisierung der Welt*. – Schriftenreihe des Zentrums für Technik- und Wirtschaftsethik am Karlsruher Institut für Technologie Karlsruhe (KIT Scientific Publishing), **8**: 33-54.
- RADKAU, J. (2000): *Natur und Macht. Eine Weltgeschichte der Umwelt*. – 469 S.; München (C. H. Beck).
- RIVAL, L. (2021): *Anthropocene and the Dawn of Planetary Civilization*. – *Anthropology Today*, **37** (6): 9-12.
- RUDDIMAN, W.F. (2018): *Three Flaws in Defining a Formal 'Anthropocene'*. – *Progress in Physical Geography*, **42** (4): 451-461.
- SALVADOR, A. (ed.) (1994): *International Stratigraphic Guide. A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology and Procedures*, 2. Auflage. – 248 S.; Boulder, Col. (International Union of Geological Sciences, Geological Society of America).
- SAMWAYS, M. (1999): *Translocating Fauna to Foreign Lands. Here Comes the Homogenocene*. – *Journal of Insect Conservation*, **3** (2): 65-66.
- SANTANA, C. (2019): *Waiting for the Anthropocene*. – *British Journal of Philosophical Science*, **70**: 1073-1096.
- SHELLNHUBER, H.J. (1999): "Earth System" Analysis and the Second Copernican Revolution. – *Nature*, **402**: C19-C23 (Supplement).
- SIEFERLE, R.P. (2020): *Rückblick auf die Natur. Eine Geschichte des Menschen und seiner Umwelt*. – 292 S.; Berlin: Landt Verlag (Werkausgabe, 5).
- SMIL, V. (2013): *Harvesting the Biosphere. What We Have Taken from Nature*. – 320 S.; Cambridge, Mass. & London (The MIT Press).
- SMIL, V. (2019): *Growth. From Microorganisms to Megacities*. – 664 S.; Cambridge, Mass. & London (The MIT Press).
- SMIL, V. (2023): *Wie die Welt wirklich funktioniert*. – 432 S.; München (C.H. Beck) (Orig. "How the World Really Works", London, Viking, 2022).
- SMIL, V. (2024): *Zahlen lügen nicht. 71 Geschichten, um die Welt besser zu verstehen*. – 349 S.; München (C. H. Beck) (orig. „Numbers Don't Lie. 71 Things You Need to Know About the World“. London: Viking, 2020).
- SONA (HENKEL, A., WENDT, B., BARTH, TH., BESIO, C., BLOCK, K., BÖSCHEN, ST., DICKEL, S., GÖRGEN, B., GROSS, M., KÖHRSEN, J., PFISTER, TH. & SCHLOSSBERGER, M.) (2021): *Zur Einlei-*

- tung: Kernaspekte einer Soziologie der Nachhaltigkeit. – In: SONA – Netzwerk Soziologie der Nachhaltigkeit (Hg.): *Soziologie der Nachhaltigkeit*; Bielefeld (Transcript). – *Soziologie der Nachhaltigkeit*, I: 9-31.
- SQS International Commission on Stratigraphy, Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (2009): *Annual Report 2009*, (<http://quaternary.stratigraphy.org/wp-content/uploads/2018/04/SQSAnnual-report09.doc>).
- STEFFEN, W., SANDERSON, R.A., TYSON, P.D., JÄGER, J., MATSON, P.A., MOORE, B. III, OLDFIELD, F., RICHARDSON, K., SCHELLNHUBER, H.-J., TURNER, B.L. & WASSON, R.J. (2004): *Global Change and the Earth System. A Planet under Pressure*. – 348 S.; Berlin (Springer) (*Global Change – The IGBP Series*).
- STEFFEN, W., CRUTZEN, P.J. & McNeill, J.R. (2007): The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of nature? – *Ambio. A Journal of the Human Environment*, **36** (8): 614-621.
- STOPPANI, A. (1873): *Corso di geologia. Vol. II (Geologia stratigrafica)*. – 884 S.; Milano (G. Bernardoni e G. Brigola Editori).
- Suess, E. (1862): *Der Boden der Stadt Wien. Nach seiner Bildungsweise, Beschaffenheit und seinen Beziehungen zum bürgerlichen Leben. Eine geologische Studie* – 336 S.; Wien (W. Braumüller Universitäts-Verlagsbuchhandlung).
- SVYTSKI, J., WATERS, C.N., DAY, J., MILLIMAN, J.D., SUMMERHAYES, C., STEFFEN, W., ZALASIEWICZ, J., CEARRETA, A., GAŁUSZKA, A., HAJDAS, L., HEAD, M.J., LEINFELDER, R., McNEILL, H.R., POIRIER, C., ROSE, N., SHOTYK, W., WAGREICH, M. & WILLIAMS, M. (2020): Extraordinary Human Energy Consumption and Resultant Geological Impacts Beginning Around 1950 CE Initiated the Proposed Anthropocene Epoch. – *Communications Earth and Environment*, **1**: 1-13.
- THOMAS, J.A. (ed.) (2022): *Altered Earth. Getting the Anthropocene Right*. – 277 S.; Cambridge etc. (Cambridge University Press).
- THOMAS, J. A., WILLIAMS, M. & ZALASIEWICZ, J. (2020): *The Anthropocene. A Multidisciplinary Approach*. – 233 S.; Cambridge & Medford, Mass. (Polity Press).
- TURNER, D.D. (2011): *Paleontology. A Philosophical Introduction*. – 240 S.; Cambridge etc. (Cambridge University Press, *Cambridge Introductions to Philosophy and Biology*).
- URRY, J. (2010): Consuming the Planet to Excess. – *Theory, Culture & Society*, **27** (2-3): 191-212.
- VISCONTI, G. (2014): Anthropocene: Another Academic Invention? – *Rendiconti Lincei*, **25** (3): 381-392.
- VON ENGELHARDT, W. & ZIMMERMANN, J. (1982): *Theorie der Geowissenschaft*. – 382 S.; Paderborn etc. (Schöningh).
- WALKER, M.J., BERKELHAMMER, C.M., Björck, S., CWYNAR, L.C., FISHER, D.A., LONG, A.J., LOWE, J.J., NEWNHAM, R.M., RASMUSSEN, S.O. & WEISS, H. (2012): Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). – *Journal of Quaternary Science*, **27** (7): 649-659.
- WALKER, M.J.C., BAUER, A.M., EDGEWORTH, M., ELLIS, E.C., FINNEY, ST.C., GIBBARD, PH.L. & MASLIN, M. (2024): *The Anthropocene. A Multidisciplinary Approach – Boreas*, **53** (1): 1-3.
- WALLENHORST, N. & WULF, CH. (eds.) (2023): *Handbook of the Anthropocene. Humans between Heritage and Future*. – 1777 S.; Berlin etc. (Springer) (open source unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-25910-4>, Aufruf 1.8.2024).
- WATERS, C.N., ZALASIEWICZ, J.A., WILLIAMS, M., ELLIS, E.C. & SNELLING, A.M. (2014): A Stratigraphical Basis for the Anthropocene. – 21 S.; London (Geological Society, *Special Publications*, 395).
- WATERS, C.N., HEAD, M.J., ZALASIEWICZ, J., MCCARTHY, F.M.G., WING, S.L., HAFÉ, P.K., WILLIAMS, M., BARNOSKY, A.D., FIAŁKIEWICZ-KOZIEL, B., LEINFELDER, R., McNEILL, J.R., ROSE, N.L.,

- STEFFEN, W., SUMMERHAYES, C.P., WAGREICH, M., ZHISHENG, A., CEARRETA, A., CUNDY, A.B., FAIRCHILD, I.J., GAŁUSZKA, A., HAJDAS, I., HAN, Y., IVAR DO SUL, J.A., JEANDEL, C., SYVITSKY, J., TURNER, S.D. & ZINKE, J.: A Response to MERRITTS et al. (2023): The Anthropocene is complex. Defining it is not. – *Earth-Science Reviews*, **238** (4): 4. (<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104335>; Aufruf 2.8.2024).
- WATERS, C.N. & ZALASIEWICZ, J.A. (2018): Concrete: The Most Abundant Novel Rock Type of the Anthropocene. – In: DELLA SALA, D.A. & GOLDSTEIN, M.I. (chief. eds.): *Encyclopedia of the Anthropocene*. – 75-85; Dordrecht etc. (Elsevier).
- WILL, F. (2021): Evidenz für das Anthropozän. Wissensbildung und Aushandlungsprozesse an der Schnittstelle von Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften. – 354 S.; Göttingen (Vandenhoeck/Ruprecht) (Umwelt und Gesellschaft, 24).
- WITZE, A. (2024): Geologists Reject the Anthropocene as Earth's New Epoch – after 15 Years of Debate. – *Nature*, **627**: 249-250.
- ZALASIEWICZ, J., WILLIAMS, M., STEFFEN, W. & CRUTZEN, P. (2010): The New World of the Anthropocene. – *Environmental Science & Technology*, **44** (7): 2228-2231.
- ZALASIEWICZ, J., WILLIAMS, J.M., SMITH, A., BARRY, T.L., COE, A.L., BOWN, P.R., BRENCHELY, P., CANTRILL, D., GALE, A., GIBBARD, P.H., GREGORY, F.J., HOUNDSLOW, M.W., KERR, A.C., PEARSON, P., KNOX, R., POWELL, J., WATERS, C., MARSHALL, J., OATES, M., RAWSON, P. & STONE, P.H. (2008): Are We Now Living in the Anthropocene? – *GSA Today*, **18** (2): 4-8.
- ZALASIEWICZ, J., WATERS, C.N., WOLFE, A.P., BARNOSKY, D., CEARRETA, A., EDGEWORTH, M., ELLIS, E.C., FAIRCHILD, I.J., GRADSTEIN, F.M., GRINEVALD, J., HAFF, P., HEAD, M.J., IVAR DO SUL, J.A., JEANDEL, C., LEINFELDER, R., MCNEILL, J.R., ORESKES, N., POIRIER, C., REVKIN, A., DEB. RICHTER, D., STEFFEN, W., SUMMERHAYES, C., SYVITSKI, J.P.M., VIDAS, D., WAGREICH, M., WING, S. & WILLIAMS, M. (2017): Making the Case for a Formal Anthropocene Epoch: An Analysis of Ongoing Critiques. – *Newsletters on Stratigraphy*, **50** (2): 205-226.
- ZALASIEWICZ, J., WATERS, C.N., ELLIS, E.C., HEAD, M.J., VIDAS, D., STEFFEN, W., THOMAS, J.A., HORN, E., SUMMERHAYES, C.P., LEINFELDER, R., MCNEILL, J.R., GAŁUSZKA, A., WILLIAMS, M., BARNOSKY, A.D., DE B. RICHTER, D., GIBBARD, P.H., SYVITSKI, J., JEANDEL, C., CEARRETA, A., CUNDY, A.B., FAIRCHILD, I.J., ROSE, N.L., IVAR DO SUL, J.A., SHOTYK, W., TURNER, S., WAGREICH, M. & ZINKE, J. (2022): The Anthropocene: Comparing Its Meaning in Geology (Chronostratigraphy) with Conceptual Approaches Arising in Other Disciplines. – *Earth's Future*, **9**: 1-25.
- ZALASIEWICZ, J., HEAD, M.J., WATERS, C.N., TURNER, S.D., HAFF, P.K., SUMMERHAYES, C., WILLIAMS, M., CEARRETA, A., WAGREICH, M., FAIRCHILD, I., ROSE, N.L., SAITO, Y., LEINFELDER, R., FIAŁKIEWICZ-KOZIEL, B., AN, Z., SYVITSKI, J., GAŁUSZKA, A., MCCARTHY, F.M.G., IVAR DO SUL, J., BARNOSKY, A., CUNDY, A.B., MCNEILL, J.R. & ZINK, J. (2024): The Anthropocene within the Geological Time Scale: A response to fundamental questions. – *Episodes*, **47** (1): 65-83.
- ZALASIEWICZ, J., WATERS, C., TURNER, S., WILLIAMS, M. & HEAD, M.J. (2023): Anthropocene Working Group. – In: WALLENHORST, N. & WULF, C.H. (eds.): *Handbook of the Anthropocene. Humans between Heritage and Future*. – 315-321; Berlin etc. (Springer).
- ZONG, R. (2024): Are We in the 'Anthropocene,' the Human Age? Nope, Scientists Say. – *The New York Times*. (<https://www.nytimes.com/2024/03/05/climate/anthropocene-epoch-vote-rejected.html>).

PROF. DR. CHRISTOPH ANTWEILER
 Universität Bonn
 Institut für Orient- und Asienforschung
 Nassestraße 2
 53113 Bonn
 E-Mail: christoph.antweiler@uni-bonn.de

Manuskripteingang: 6. August 2024

Speläologie im Breitscheider Karst – Forschungsstand und Erkenntnisse aus dem größten Höhlensystem Hessens

INGO DORSTEN, DIETER KRAUS & ARNDT KARGER

Hessen, Westerwald, Kalkstein, Karst, Höhlensystem, Entdeckung, Genese, Erkenntnisse

Kurzfassung: Der Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem wird seit nunmehr 30 Jahren intensiv durch Höhlenforscher der Speläologischen Arbeitsgemeinschaft Hessen e.V. erkundet und dokumentiert. Mit 13.128 m (Stand 2024) ist das Höhlensystem das längste in Hessen und zählt zu den vier größten Höhlen in Deutschland. Dieser Beitrag bezieht sich auf die Erforschung des Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystems in Breitscheid (Hessen) ab 2009 und erläutert die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse. Außerdem gibt er eine kurze Übersicht über die Organisation der Höhlenforschung in Deutschland und Hessen und beschreibt das Karstgebiet Breitscheid-Erdbach.

Speleology in the Breitscheid Karst - state of research and findings from the largest cave system in Hesse

Hesse, Westerwald, limestones, karst landscape, cave system, discovery, genesis, findings

Abstract: The Herbstlabyrinth Advent cave system has been intensively explored and documented by speleologists from the Speläologische Arbeitsgemeinschaft Hessen e.V. for 30 years now. At 13,128 m (as of 2024), the cave system is the longest in Hesse and is one of the four largest caves in Germany. This article refers to the exploration of the Herbstlabyrinth-Advent cave system in Breitscheid (Hesse) from 2009 onwards and explains the most important scientific findings. It also gives a brief overview of the organization of cave research in Germany and Hesse and describes the Breitscheid-Erdbach karst area.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	202
2	Höhlenforschung als interdisziplinäre Wissenschaft	202
3	Das Breitscheider Karstgebiet	203
3.1	Bachschwinden und Dolinen	204
3.2	Quellen	206
4	Das Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem	206
4.1	Entdeckungsgeschichte und Beschreibung wesentlicher Höhlenteile	207
4.1.1	Das Windige Ende und der Durchbruch in die Nordwestpassage	208
4.1.2	Die Sonntagshalle	210

5	Der Südgang und die Entdeckung des Erdbachtunnels	212
5.1	Beschreibung des Erdbachtunnels	212
5.2	Das bisherige Ende – Siphone im Erdbachtunnel	214
6	Besondere wissenschaftliche Erkenntnisse	215
6.1	Eisschäden an Tropfsteinen	215
6.2	Kryogene Kalzite	216
6.3	Altersdatierung an Tropfsteinen	217
6.4	Laacher-See-Bims	219
6.5	Biospeläologie – Lebensräume in den Breitscheider Höhlen	221
6.6	Mikroorganismen („Pool-Fingers“)	224
7	Paläontologische Funde und Unterschützstellung der Höhle	225
8	Aussichten und weitere Forschungsansätze	228
9	Literatur	229

1 Einleitung

Das Breitscheider Karstgebiet im hessischen Teil des Westerwaldes wird seit 1965 systematisch erforscht und durch Höhlenforscher intensiv erkundet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf zwei großen Höhlensystemen: dem Erdbachhöhlensystem und dem Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem. Beide Höhlensysteme bilden eine hydrologische Einheit und weisen zusammen eine Gesamtganglänge von über 15 km auf. Das Höhlensystem gilt als eines der interessantesten und bedeutendsten in Deutschland.

Nachfolgend wird zunächst kurze über die wichtigsten Aktivitäten im Zusammenhang mit der Erforschung von Höhlen informiert. Anschließend werden die wesentlichen Teile der beiden Breitscheider Höhlensysteme und die Umstände ihrer Entdeckung beschrieben und dargelegt, wie insbesondere im Hinblick auf die Erforschung noch unbekannter Höhlenstrecken ein vertrauensvoll zusammenarbeitendes Team unerlässlich und warum eine interdisziplinäre Zusammenarbeit speziell im Hinblick auf die Gewinnung neuer Erkenntnisse unverzichtbar ist.

2 Höhlenforschung als interdisziplinäre Wissenschaft

Höhlenforschung (Speläologie) ist in Deutschland eine sehr breit aufgestellte und organisierte Spezialwissenschaft, die fast ausschließlich ehrenamtlich wahrgenommen wird. Die Organisationsstruktur in Deutschland basiert auf derzeit 88 einzelne Gruppierungen und Vereinen, die in sieben Landesverbänden unter dem Dach des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e. V. organisiert sind. Sehr häufig arbeiten die einzelnen Vereine mit Kommunen und Fachbehörden eng zusammen, um neben der systematischen Erforschung auch den Höhlen-

schutz zu gewährleisten. Dabei liegt die Stärke der Höhlenforschung in der interdisziplinären Arbeitsweise, die es oft erst ermöglicht komplexe Fragestellungen aufzuwerfen und daraus einzelne Forschungsansätze zu definieren. Zudem arbeiten die einzelnen Vereine oft mit einer Vielzahl von Universitäten und einzelnen Wissenschaftlern weltweit zusammen.

Die Speläologische Arbeitsgemeinschaft Hessen e. V. (SAH) ist der in Breitscheid tätige Verein und hat derzeit (Stand 2024) ca. 80 Mitglieder. Der Verein befasst sich seit 1984 mit der Erforschung und Betreuung der Höhlen und Karsterscheinungen in den zwischen den Orten Breitscheid und Erdbach am Rande des Westerwaldes ausstreichenden oberdevonischen Kalksteinen. Vor allem seit 1993 wurden viele Kilometer Höhlengänge entdeckt und dokumentiert. Neben der systematischen Erfassung des Karstformenschatzes gehören weitere Schwerpunkte zu den Aufgaben des Vereins:

- Vermessung und Kartierung aller Höhlen und Erstellung von detaillierten Karten,
- Begleitung von Forschungen zur Klimadatenerfassung und Speläothemenforschung,
- Biospeläologische Untersuchungen und Betreuung von Forschungen zur Mikrobiologie,
- Fotodokumentation und Öffentlichkeitsarbeit,
- Beratung von Behörden und Rohstoffunternehmen,
- Durchführung und Überwachung von Höhlenschutzmaßnahmen,
- Unterstützung der Gemeinde Breitscheid im Rahmen der allgemeinen Sicherungspflicht,
- Fachliche Betreuung der Schauhöhle in Breitscheid.

3 Das Breitscheider Karstgebiet

Der Begriff „Karst“ ist ursprünglich der Eigenname einer Landschaft östlich von Triest im Bereich des heutigen Sloweniens bis weit herunter nach Kroatien. Diese Landschaftsform zeichnet sich durch weitgehend fehlende oberirdische Gewässer aus, sie hat ihre Ursache in der Klüftigkeit und Löslichkeit des Gesteins. Kompakte Karbonatgesteine (Kalkstein und Dolomit) sind für Wasser praktisch undurchlässig. Da sie spröde sind, führen selbst kleine tektonische Beanspruchungen zur Bildung von Klüften. Da Niederschlagswasser oder das Wasser oberirdischer Gewässer durch die Aufnahme von atmosphärischem und aus der Atmung der Pflanzen resultierendem biogenem Kohlendioxid zu Kohlensäure wird, kommt es zu einer Erweiterung der Klüfte durch Auflösung speziell des Kalksteins (Korrosion), er wird daher wasserdurchlässig. Die Durchlässigkeit nimmt mit der Zeit noch zu.

Das weitgehende Fehlen oberirdischer Gewässer wie Bäche und Rinnsale und auch die Tatsache, dass Niederschlagswasser selbst bei Starkregenereignissen

rasch in den Untergrund absickert, beeinflusst nicht nur das Aussehen der Landschaft, sondern auch die Pflanzenwelt und die Böden, so dass insgesamt ein eigenes Landschaftsbild entsteht.

Durch die lösende Wirkung des Wassers verfügen Karstlandschaften über einen spezifischen Formenschatz, so auch zwischen den Ortschaften Breitscheid und Erdbach. Hier findet man z. B. Karrenfelder, Dolinen, Trockentäler, Bachschwinden (Ponore), Karstquellen und Höhlen auf sehr engem Raum. Der oberflächliche Austritt des verkarsteten Kalksteins umfasst eine Fläche von ca. 2,5 km² (siehe Abb. 1), es handelt sich somit um eines der kleinsten Karstgebiete in Deutschland, das aber im Vergleich zu andern Karstgebieten (z. B. Schwäbische und Fränkische Alb) auf kleinsten Raum einen exemplarischen Karst-Formenschatz aufweist. Durch den großen Höhenunterschied von über 140 m zwischen den freiliegenden Kalksteinschichten und dem Vorfluter ist eine tiefreichende Verkarstung möglich geworden. Derzeit sind 35 Höhlen zwischen Breitscheid und Erdbach erfasst. Darunter stehen das Erdbachhöhlsystem und das Herbstlabyrinth-Adventhöhlsystem mit über 2 km und 13 km Ganglängen hervor.

In Deutschland gibt es aktuell (Stand 2024) noch drei weitere Höhlensysteme mit einer Gesamtganglänge zwischen 14 und 25 km. Eine fortlaufend aktualisierte Übersicht aller großen Höhlen über 1 km Länge in Deutschland findet sich auf der Seite des Verbandes deutscher Höhlen- und Karstforscher (www.vdhk.de)

3.1 Bachschwinden und Dolinen

Am Ortsrand von Breitscheid verschwindet der gesamte Erdbach in einem Schwindenbereich, dem so genannten Kleingrubenloch, und erscheint erst ca. 1,3 km entfernt und 112 m tiefer bei der Ortschaft Erdbach wieder an der Oberfläche. Sein unterirdischer Weg verläuft dabei durch das 100 m tiefe Erdbachhöhlsystem und danach durch das Herbstlabyrinth-Adventhöhlsystem. Auf dem Weg durch das Kalkgestein verdoppelt sich seine Wassermenge durch unterirdische Zuflüsse von durchschnittlich 40 l/s auf 80 l/s am Wiederaustritt.

Weitere Bachschwinden gibt es je nach Jahreszeit und Niederschlag an den Dolinen im südlichen Bereich der Kalkgrenze (Naturdenkmale *Maibaumdoline* und *Butterfassdoline*), aber auch in einigen anderen noch offenen und überbauten Dolinen an der nördlichen Kalkgrenze (Naturdenkmale *Bahndammdoline* und *Fischweiherdoline*). Diese trichterförmigen Vertiefungen an der Erdoberfläche entstehen zumeist dort, wo sich Klufscharen kreuzen und daher das Gestein lokal besonders tektonisch zerrüttet ist. Weil in diesem Bereich die Kontaktfläche Wasser/Gestein besonders groß ist, wird hier der Kalkstein stärker und schneller gelöst als in der Umgebung. Dolinenähnliche Gebilde gibt es auch dort, wo die Decke einer oberflächennahen Höhle eingestürzt ist oder im Bereich verstürzter Karstschächte. Oft gibt es Entwässerungseinleitungen in heute nicht mehr sichtbare Dolinen, wie z. B. am Sportplatz in Breitscheid. Bachschwinden treten allgemein dort auf,

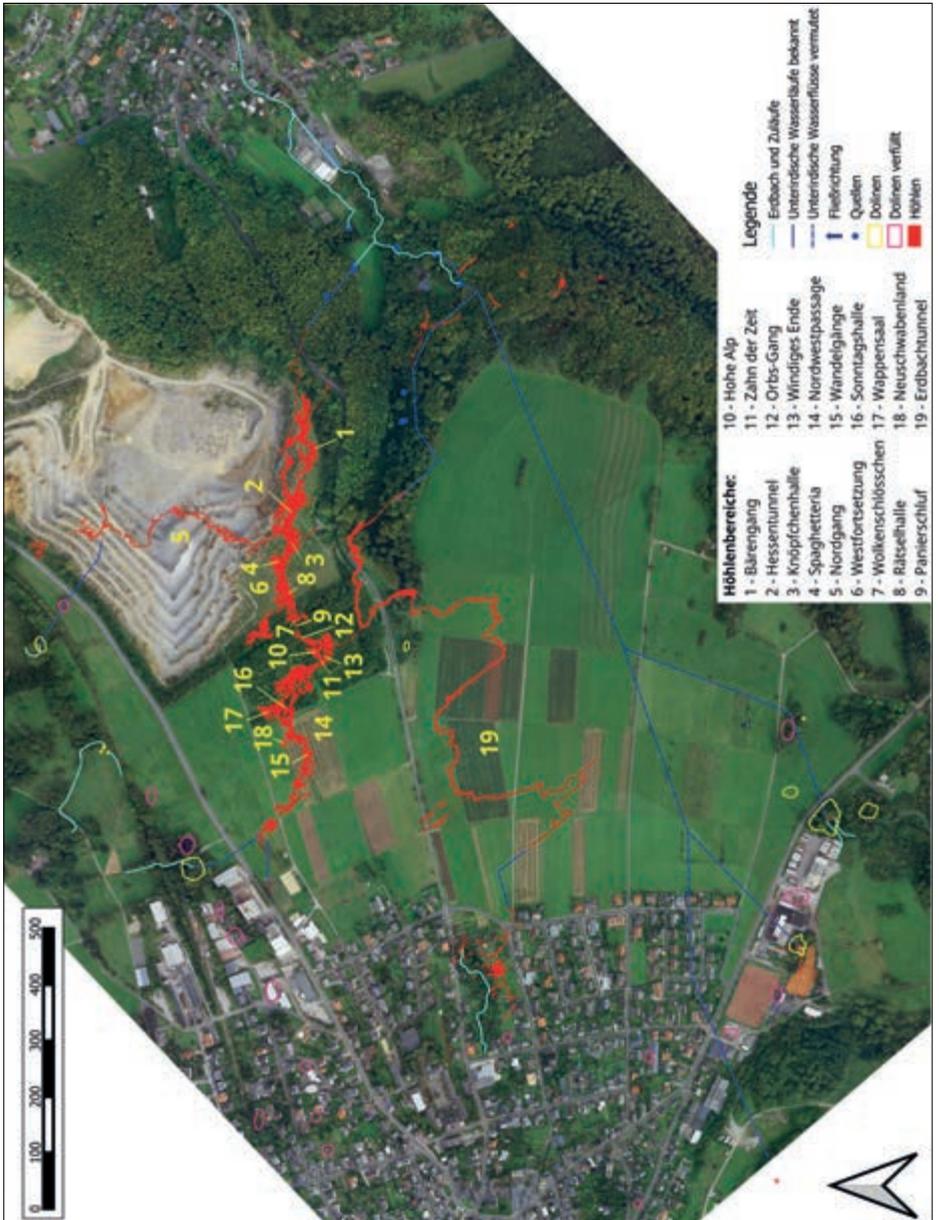


Abbildung 1: Übersicht Breitscheider Karst. Die ober- und unterirdischen Karstformen wurden in ein Luftbild übertragen.

Figure: Overview of the Breitscheid Karst. The karst forms above and below ground were transferred to an aerial image.

wo Bäche und Rinnsale an der Grenze von wasserstauenden tonigen Gesteinen auf verkarsteten Kalkstein treffen, hier versickert das Wasser in den Untergrund.

Abgesehen von den vorstehend genannten Dolinen, die auch als Bachschwinden fungieren können, gibt es in Breitscheid weitere Dolinen, die als Band um das offenliegende Karstgebiet aufgereiht sind. Allerdings sind nur noch wenige weitgehend naturbelassen. Dazu zählen als größten die Maibaum- und die Fischweiherdoline und ca. zehn kleinere im weiteren Umkreis. Die meisten anderen Dolinen, die in Breitscheid existierten, sind entweder durch die intensive Bewirtschaftung der Weide- und Ackerflächen eingeebnet, als Müllkippen missbraucht und verfüllt oder mit Industrie- und Wohngebäuden überbaut worden. Nach einer Auswertung von Luftbildern im Rahmen einer Diplomarbeit befanden sich in dem Gebiet in der Nachkriegszeit noch etwa 15 weitere Dolinen.

3.2 Quellen

Im Breitscheid-Erdbacher Karst gibt es insgesamt sechs Quellen, die allesamt am Ortsrand von Erdbach hervortreten. Die größte von ihnen ist die *Erdbachquelle*. Zu ihr gehört der „Überlauf“, ein nur bei starken Niederschlägen oder Schneeschmelze aktiver Hochwasserüberlauf. Der *Wallbrunnen* ist eine weitere Quelle, die zur Trinkwasserversorgung des Ortes Erdbach genutzt wird. Diese bzgl. Chemismus typische Karstquelle bezieht ihr Wasser aber nicht aus den Bachschwinden um Breitscheid, sondern aus größerer Tiefe. Hierfür spricht ihre konstant höhere Temperatur, die mit 13–14 °C deutlich über den für hiesige Quellen üblichen 9 °C liegt. Weitere Quellen sind die *Hoffmannsquellen* unterhalb der Erdbachquelle, der *Waldborn* und die *Weilsteinquelle*, die nur noch als Brauchwasserversorgung des Kalkwerkes dient.

Dies sind jedoch nur die sichtbaren hydrologischen Elemente des Karstes. Gerade im unterirdischen Verlauf des Erdbachs, welcher durch einen großen, luftgefüllten Tunnelgang (*Erdbachtunnel*) fließt, gibt es noch weitere Quellen und Zuflüsse. Weitgehend unbekannt ist bisher der genaue Ort des Wasserzutritts in den unterirdischen Verlauf des Erdbachs. In den bekannten und gut dokumentierten Bereichen des Erdbachtunnels kann der Zutritt des Wassers aus den Dolinen Butterfassdoline, Maibaumdoline und anderen Schwinden aus dem südlichen Bereich des Karstes nicht lokalisiert werden. Hier können nur systematische Färbeversuche nähere Erkenntnisse bringen.

4 Das Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem

Die Erforschung des Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystems begann 1993 und dauert bis heute an. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die wesentlichen Entdeckungen ab 2009. Die Beschreibung der Höhlenteile, die zwischen 1993 und

2003 entdeckt und dokumentiert wurden, erfolgte bereits ausführlich u. a. in Beiträgen im Jahrbuch des Nassauischen Vereins für Naturkunde (GRUBERT & HÜLSMANN 1998; DORSTEN & HARRIES 2006; DORSTEN, HÜLSMANN & HÜSER 2006).

Die Jahre 2003–2009 wurden dominiert von der Entdeckung und Dokumentation des Nordgangs und einer engen Zusammenarbeit mit Forschenden aus Höhlenvereinen und Instituten aus ganz Deutschland.

Eine bedeutende Erkenntnis konnte im Jahr 2003 gewonnen werden: Bei einer Befahrung fiel aufgrund des heißen Sommers eine wassergefüllte Spalte trocken und wies starken Luftzug auf. Dieser Luftzug war ein Hinweis auf weitere unbekannte Höhlenteile, daher wurde noch im selben Jahr eine Grabungskampagne eingeleitet. Diese systematische Grabung entlang der festen Höhlendecke, immer dem Luftzug folgend, wurde von vielen Höhlenforschern anderer Vereine unterstützt und führte erst nach sechs Jahren Arbeit in das erhoffte Neuland. Der daraus entstandene Verbindungsgang wurde *Panierschluf* genannt

4.1 Forschungen und Neue Entdeckungen ab 2009

Der entscheidende Durchbruch am Ende des Panierschlufs erfolgte am 03.08.2009. Der Erste Höhlenteil, der betreten wurde, war der **Orbsgang**, ein 70 m langer Gang-



Abbildung 2: Dieser wunderschöne Bereich im Orbs-Gang bot sich am Tag des Durchbruchs nach fünf Jahren Grabung. Deutlich ausgeprägt ist die Hohlkehle, die typisch für das Herbstlabyrinth ist und ein auf natürliche Weise entstandener Deich entlang des Bachlaufs; Foto: Georg Taffet.

Figure 2: This beautiful area in the Orbs passage was revealed on the day of the breakthrough after five years of excavation. The hollow groove, which is typical of the Herbstlabyrinth, and a naturally formed dyke along the course of the stream are clearly pronounced; photo: Georg Taffet.

stück mit sehr schönen Versinterungen (Abb. 2). Bei einer durchschnittlichen Gangbreite von 5 m wird der Boden durch ein ebenes Sedimentbett, meist aus verfestigtem Lehm, gebildet. Hier fließt auch in den Wintermonaten ein kleines Gerinne, welches aus einem Zulauf im Panierschluf gespeist wird. Bemerkenswert ist dieses kleine Gerinne deshalb, weil es eine gänzlich andere Abflussrichtung als alle anderen bisher bekannten Wasserabflüsse des Herbstlabyrinths aufweist. Die Tatsache, dass dieses Wasser Richtung Westen „verschwindet“, gab schon früh Anlass zu der Vermutung, dass das Herbstlabyrinth vielleicht doch eine Verbindung zum unterirdischen Erdbach aufweist. Nach den weiteren Entdeckungen im Jahr 2012 wurde diese Vermutung bestätigt. Das Herbstlabyrinth hat somit eine eigene Wasserscheide. Bemerkenswert ist noch, dass der Bach im Orbsgang einen natürlichen Deich mit einer Höhe von 10 cm geschaffen hat.

Bis zum Jahr 2012 konnten in diesen Bereichen der Höhle (*Hohe Alp, Orbsgang*) ca. 600 m neue Teile vermessen werden. Trotz des extrem heftigen Luftzugs im Panierschluf und einigen anderen Bereichen war die Suche nach weiteren Fortsetzungen schwierig. Aufgrund von Beobachtungen von Kluftsystemen und Störungen bestand die Hoffnung, dass ein Weiterkommen in westlicher Richtung möglich ist.

4.1.1 Das Windige Ende und der Durchbruch in die Nordwestpassage

Besonders schwierig gestaltete sich jedoch die Suche nach der Hauptfortsetzung. Nachdem alle Möglichkeiten in die Höhe (Kamine) und im Bereich des Verbruchs erkundet und vermessen wurden, blieb als letzte Möglichkeit die Erweiterung einer engen, schwach bewetterten Kluft im *Windigen Ende*. Und tatsächlich: Nachdem ein etwa 2 m langer Spalt erweitert war, öffnete sich eine nach unten führende Kluft. Diese führt etwa 25 m tief bis in eine Verbruchzone mit großen, sicher verkeilten Blöcken. Zunächst gestaltete sich die Suche nach weiteren Fortsetzungen schwierig, aber den entscheidenden Hinweis gab die Höhle selbst, und zwar im Rahmen der Vermessung am 31.10.2012: Während einer Pause konnte von den Vermessern ein leises Bachrauschen vernommen werden. Der Bericht des Messtrupps schlug ein „wie eine Bombe“. Allen war sofort klar, dass dieser Bach ein Zubringer in den unterirdisch verlaufenden Erdbach sein muss. Schon eine Woche später wurde ein Forschungsteam zur Erkundung eines möglichen Zustiegs zusammengestellt. Nach kurzem Suchen gelang der Abstieg in einen kleinen Canyonengang. Bachaufwärts konnte dieser etwa 50 m weit durch z. T. wildes Blockwerk verfolgt werden, bevor nach zwei kleinen Wasserfallstufen unvermittelt der Blick in eine große Halle frei wurde. Die Ausdehnung dieser Halle, die selbst mit den hellen Scurion-Lampen nicht gänzlich erfasst werden konnte, sind für devonische Höhlen sehenswert: Eine Länge von 80 m bei einer durchschnittlichen Breite und max. Höhe von 25 m. Damit hatte keiner der Anwesenden gerechnet! Umso überraschender war dann, dass der die Halle unterquerende Bach



Abbildung 3: Die Wandelgänge in der Nordwestpassage weisen über weite Abschnitte beeindruckende Gangdimensionen auf. Nicht selten „wandelt“ man durch 10–20 m breite Passagen, die oft von schönen Versinterungen begleitet sind; Foto: Georg Taffet.

Figure 3: The passages in the Northwest Passage have impressive dimensions over large sections. It is not uncommon to “walk” through 10–20 m wide passages, which are often accompanied by beautiful sintering; photo: Georg Taffet.



Abbildung 4: Sinter und Lehm wechseln sich häufig ab. Die im Bachbett der Nordwestpassage abgelagerten Basaltgerölle zeugen von einem oberflächlichen Zufluss in das Höhlensystem; Foto: Ingo Dorsten.

Figure 4: Sinter and clay frequently alternate. The basalt pebbles deposited in the stream bed of the Northwest Passage bear witness to a superficial inflow into the cave system; photo: Ingo Dorsten.

noch weitere 400 m verfolgt werden konnte. Hierbei wechseln sich teils engere Passagen mit großräumigen Gängen ab. Die beeindruckenden *Wandelgänge* mit über 10 m Deckenhöhe und beinahe 15 m Breite sind dabei besonders beeindruckend (Abb. 3).

Wegen der vielen Fortsetzungen, die teils über 30 m hohe, runde Kamine einbeziehen, wurde der gesamte Höhlenteil *Nordwestpassage* genannt (Abb. 4). Dieser Höhlenbereich wurde bis 2024 systematisch erkundet und es wurden einige Teilbereiche entdeckt, die z.T. interessante Aspekte aufweisen.

4.1.2 Die Sonntagshalle

Die *Sonntagshalle* wurde während der Vermessung des Bachlaufs in der Nordwestpassage entdeckt. Ein eher unscheinbarer Durchschlupf führte in eine Reihe kleinere Räume und Klüfte. Nachdem eine weitere Engstelle erweitert war, konnte unerwartet eine Halle von etwa $20 \times 10 \times 5$ m betreten werden (Abb. 5). Von dieser Halle zweigen einige Fortsetzungen ab, die weiter in die Höhe ziehen und zahlreiche Erkundungen nach sich führten.



Abbildung 5: Die Sonntagshalle zeichnet sich durch sehr ausgeprägten Sinterschmuck im nördlichen Teil aus; Foto: Rainer Straub.

Figure 5: The Sunday Hall is characterized by very pronounced sintered decoration in the northern part; photo: Rainer Straub.

Im Rahmen der systematischen weiteren Erkundung wurde der Zustieg zum *Wappensaal* (Abb. 6) entdeckt, nachdem systematisch dem Luftzug nachgegangen wurde. Den Wappensaal erreicht man über einen Canyonengang und ein anschließender Aufstieg von etwa 10 m führt in den Zustieg am Boden dieser großen Halle. Die Maße des Wappensaals betragen in etwa 30×10 m Grundfläche

bei einer maximalen Deckenhöhe von im Schnitt 2–5 m. Als Besonderheit sind die vielfältigen Ablagerungen von Sedimenten zu nennen und vor allem das Vorhandensein von Kryogenen Kalziten.



Abbildung 6: Der Wappensaal ist Fundort von Kryogenen Kalziten, die hier über weite Flächen auf dem Boden verteilt liegen; Foto: Ingo Dorsten.

Figure 6: The Wappensaal is the site of cryogenic calcites, which are distributed over large areas on the floor; photo: Ingo Dorsten.

Wie komplex die Nordwestpassage ist, zeigte sich auch bei einer weiteren Entdeckung, nachdem der Zulauf eines kleinen Gerinnes erweitert wurde. Auch hier war es der Luftzug, der den Hinweis darauf gab, dass es eine Fortsetzung geben muss. Die Federführung der anschließenden Grabung hatten schwäbische Höhlenforscher. Nach etwa 8 m Grabung gelangten sie in eine geräumige Halle von etwa 10 × 5 m Grundfläche.

Dieser Bereich wurde *Neuschwabenland* getauft. Als Besonderheit sind die auffälligen und gut ausgeprägten Hohlkehlen als Zeugen eines Wasserlaufs zu nennen. Vor allem aber sind es die vielen und großen Basaltgerölle, die in einem Bereich der Halle zu finden sind und ein Hinweis darauf geben, dass dieser Höhlenteil sich weiter in die Höhe ziehen muss, aber bisher nicht befahrbar ist.

Das bisherige Ende der Westpassage bildet die *Schwebebahn*, die nach Aufweitung einer Engstelle im Jahr 2019 befahrbar gemacht wurde. Dieser Höhlenbereich bildet den bisherigen Endpunkt der Nordwestpassage. Dabei handelt es sich um einen durchweg engen Höhlenbereich, der durch etliche sehr locker verteilte Blöcke gekennzeichnet ist, was ihm auch den Namen verliehen hat.

Ein Weiterkommen am Ende der Schwebebahn ist derzeit nicht absehbar, weil die Klüfte bis auf wenige Zentimeter zu eng werden.

5 Der Südgang und die Entdeckung des Erdbachtunnels

Der kleine Bach der Nordwestpassage (Schüttungsmenge im Mittel 1–2 l/s) verläuft bachabwärts direkt nach Süden. Bei einer ersten Befahrung Ende 2012 konnte dieser etwa 100 m weit verfolgt werden, bevor er an einer Engstelle 5 m in die Tiefe verschwand. Nach den Berechnungen aus den Vermessungsdaten lag der Fuß des Wasserfalls nur noch ca. 5–8 m über dem Niveau der Erdbachquelle. Da auch zudem kein Luftzug spürbar war, wurde die Stelle bei der weiteren Erforschung zunächst nicht mit höchster Priorität versehen. Ganz im Gegenteil: Aufgrund der in höheren Bereichen des **Südgangs** beobachteten Humuspartikel an den Wänden, ging man bei der Fortsetzung eher von unter Wasser stehenden Bereichen aus. Diese Engstelle wurde jedoch dann im Herbst 2013 gezielt technisch erweitert, so dass der Abstieg in die weitere Fortsetzung des Südgangs gelang. Zunächst schien alles auf einen vermuteten Siphon hinzudeuten: Der ca. 1 m breite und bis zu 5 m

hohe Canyongang war überall mit mächtigen Lehmsedimenten ausgekleidet und zog sich noch weitere 50 m weiter nach Süden. Ein dann etwa 3 m hoher Lehmberg ließ zunächst an das Ende des Ganges glauben, jedoch öffnete sich dieser unvermittelt und gab den Blick in eine hallenartige Erweiterung frei. Als die hellen Helmlampen erstmals den vollen Querschnitt erfassen konnten, erkannte man einen weiteren, viel größeren Bach in einem mächtigen Tunnelgang. Den anwesenden Erstbefahrern war sofort klar, dass dieser Bach der lange gesuchte unterirdische Erdbach sein musste. Ungläubig über die Gangdimensionen und überwältigt von der Ausprägung dieses unterirdischen Bachlaufs, den keiner in dieser Form erwartet hatte, wurde an dem Tag eine Strecke von über 1000 m begangen. Der Begriff „begangen“ muss allerdings wörtlich genommen werden, da es auf der ganzen Strecke nur zwei kleinere Hindernisse gibt, die überklettert bzw. gebückt „überwunden“ werden müssen.

5.1 Beschreibung des Erdbachtunnels

Der **Erdbachtunnel** (Abb. 7) ist ein typisch vadoser (vados = durch fließendes Wasser im luftgefüllten Bereich entstanden) Bachgang von fast 1500 m Länge, der in seinen Dimensionen von West nach Ost zunimmt. Die Raumdimensionen schwanken zwischen 2 m Deckenhöhe im Bereich des Westsiphons und 15 m im östlichen Teil. Das jeweils westliche und östliche Ende wird durch einen Siphon begrenzt. Auffällig ist, dass der Bach nur an sehr wenigen Stellen direkten Kontakt zum umgebenden Gestein hat, sondern meist in einem Bett aus verfestigten Sedimenten und Basaltgeröllen fließt. An den Wänden türmen sich abwechselnd hohe Berge ausweichen und ebenfalls befestigten Sedimenten.

Von der Höhlendecke hängen an einigen Stellen z. T. meterlange Sintergebilde, die aber aufgrund des oftmals lehmigen Überzugs oft nicht sofort erkennbar sind.



Abbildung 7: Der Erdbachtunnel im östlichen Abschnitt; Foto: Georg Taffet.

Figure 7: The Erdbach tunnel in the eastern section; photo: Georg Taffet.

Da der Erdbachtunnel von einem versinkenden Oberflächengewässer gespeist wird, sind an vielen Stellen Spuren der Zivilisation zu erkennen. Auffälligstes Merkmal ist der eingespülte Müll. So finden sich z. T. in über 10 m Höhe Plastikgegenstände eingeklemmt unter der Decke, die auf eine Überflutung des kompletten Tunnels schließen lassen. An einigen Gegenständen lassen die eingestanzten Mindesthaltbarkeitsdaten eine ungefähre Datierung einzelner Hochwasserereignisse zu. Um die genauen Wasserspiegelschwankungen zu ermitteln, betreut die SAH ein Messnetz von drei Pegeln, um eine Aussage über die Dynamik der Hochwasserereignisse geben zu können.

Der Erdbachtunnel selbst weist nur wenige Abzweigungen oder Deckenspalten auf. Zwei besonders interessante Spalten führen in die sogenannten Rampengänge. Diese sind zwei parallel verlaufende Gänge, die in einem Winkel von 30° gleichmäßig in die Höhe führen. Auf einer Länge von jeweils ca. 100 m verlaufen sie innerhalb eines Tonsteinbandes, das im Bereich von senkrechten Klüften ausgeräumt wurde. Bei diesem Tonsteinband handelt es sich wahrscheinlich um eine „bedding plane“, ein während der Entstehung dieses oberdevonischen Riffs abgelagertes toniges Sediment. Diese Rampen führen bis 25 m unter die Erdoberfläche und weisen am Ende Luftzug auf, der auf mögliche Fortsetzungen hindeutet. Diese Bereiche konnten aber wegen instabiler Zonen bisher nicht gänzlich erkundet werden.

5.2 Das bisherige Ende – Siphone im Erdbachtunnel

Ab 2015 wurden verschiedene Tauchversuche im *Westisiphon* durchgeführt. Bereits nach dem 2. Versuch konnte eine Luftglocke erreicht werden. Beim 3. Versuch gelang nach 7 m Tauchstrecke ein Auftauchen in luftegefüllte Passagen. Dabei konnte ein 80 m langer Gangabschnitt erkundet werden, bevor ein weiterer Siphon erreicht war. Ende September 2015 folgte die Vermessung. Dabei wurden weitere Teile entdeckt, darunter ein ca. 20 m hoher Dom.

Nach einer ca. 50 m langen, luftegefüllten Wasserstrecke endet der Gang und es folgt der nächste Siphon. Dieser Siphon wurde nach mehreren Tauchversuchen (zuletzt im Mai 2024) intensiv erkundet. Leider ist die Fortsetzung unter Wasser durch eingespültes Sediment so verengt, dass dort bis auf Weiteres kein Weiterkommen mehr möglich ist. Somit bleibt eine für Menschen durchgängige Verbindung zur Erdbachhöhle für die letzten 70 m versperrt. Bei einer Tauchexpedition im September 2024 konnte eine neue Unterwasserstrecke auf 15 m erkundet werden, die möglicherweise den Zugang in unbekannte Höhlengänge im Bereich der südlichen Entwässerung des Faulfeldes darstellt. Die Forschungen werden zukünftig hier fortgesetzt.

Am Ende des Erdbachtunnels befindet sich der Ostsiphon. Er bildet in Richtung Erdbach den derzeitigen Endpunkt der Höhle. Ein Tauchversuch zeigte keine weitere Fortsetzung auf, die befahrbar sind. Der Höhlengang taucht ab dort in einen stark sedimentierten und verschlammten Bereich ab, der vor allem bei Hochwasser eine Rückstauzone bildet. Die aufgestauten Wassermassen können große Teile des Erdbachtunnels komplett fluten. Eingespülter und unter der Höhlendecke eingeklemmter Kunststoffmüll weist auf Stauhöhen von bis zu 20 m hin. Dadurch bildet das Höhlensystem einen großen, natürlichen Hochwasserrückhalt.

Die Beobachtungen an dem bekannten Verlauf des Erdbachs stützen gleichfalls die Erkenntnisse aus den Färbeversuchen aus der Vergangenheit. Alle frei fließenden unterirdischen Bachbereiche weisen hohe Fließgeschwindigkeiten auf. So durchfließt das Wasser zwischen dem West- und Ostsiphon die Strecke von etwa 1,5 km in etwa einer Stunde. Die deutlich längeren Durchflusszeiten, die in verschiedensten Färbeversuchen bemessen wurden, weisen auf noch unbekannte Rückstauzonen in den unbekanntesten Höhlenteilen hin.

So wurden am 09.05.1966 5 kg Uranin AP in die Erdbachschwinde eingegeben (MATTHESS & STENGEL-RUTKOWSKI 1967: 181). Zu diesem Zeitpunkt schüttete der Erdbach vor der Versinkung 70 l/s. Nach 9 Stunden wurden am Erdbachaustritt die ersten Farbspuren nachgewiesen, sichtbare Farbe trat nach knapp 14 Stunden aus.

6 Besondere wissenschaftliche Erkenntnisse

Auch wenn das Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem besonders reich an schönen Tropfsteinformen ist und zudem ungewöhnlich große Gangformen aufweist, so sind es vor allem die vielen, teils ganz neuen Erkenntnisse und Beobachtungen aus wissenschaftlicher Sicht, die dieses Höhlensystem zu den bedeutendsten in Deutschland machen. Nachfolgend werden einige davon beschrieben.

6.1 Eisschäden an Tropfsteinen

Eine Besonderheit sind die in dem Höhlensystem vorkommenden Sinterschäden. Dabei handelt es sich meist um zerstörte Tropfsteine jeder Größe und Form, die teilweise „wild“ verstreut auf dem Höhlenboden liegen, oder um gerissene und leicht versetzt wieder zusammengewachsene Stalagmiten. An mehreren Stellen der Höhle finden sich auch abgebrochene Stalaktiten, die an senkrechten Wänden fest anhaften. Dies ist besonders eindrucksvoll in der Rätselhalle zu sehen, wodurch diese Halle ihren Namen erhielt. Aber auch an vielen anderen Stellen des Höhlensystems finden sich auffällige Sinterschäden, die weder durch den nahen Steinbruch, noch durch den Menschen verursacht sein können.



Abbildung 8: Ein mächtiger Stalagmit in einem Seitenteil des Hessentunnels ist durch die Kraft des gefrierenden Wassers aufgerissen; Foto: Ingo Dorsten.

Figure 8: A huge stalagmite in a side section of the Hessentunnel has been torn open by the force of the freezing water; photo: Ingo Dorsten.

Während die Wissenschaft in den vergangenen Jahrzehnten oft die Ursache bei Erdbeben suchte und diskutierte, deuten die Funde im Herbstlabyrinth deutlich auf die zerstörerische Kraft von Vereisungen während der letzten Eiszeiten hin (KEMPE 2008; Abb. 8).

Der Vereisungsprozess in Höhlen verläuft jedoch nicht wie ein durch die Höhle ziehender „Gletscher“, sondern vielmehr mit einzelnen flächenhaften und raumausfüllenden Vereisungen.

Dieser Prozess konnte oft erst in den Zwischenwarmzeiten einsetzen, als der Permafrost zwar sehr tief reichte, aber die Erwärmung nach und nach von der Oberfläche beginnend immer tiefer in den Untergrund eindringen konnte. Erreichte so die 0 °C-Isotherme die höheren Höhlenteile, konnte wieder Wasser (Tropfwasser, Rinnsale) in die Höhle eindringen. Da der Permafrost aber im Westerwald in eine Tiefe von mind. 50 m reichte, war noch genügend Kälte vorhanden, um auch dieses Wasser punktuell oder großflächig gefrieren zu lassen. Da dies aber nicht überall gleichmäßig und zur selben Zeit geschah, konnte das Eis aufgrund seiner plastisch fließenden Eigenschaften Druck- und Scherkräfte ausüben, die selbst massive Sintergebilde zum Abscheren brachten.

Ein direkter Nachweis des Vorhandenseins von Höhleneis konnte über sogenannte „kryogene Kalzite“ erbracht werden.

6.2 Kryogene Kalzite

Bei kryogenen Kalziten handelt es sich um kleine Partikel, deren Entstehung an kaltes Klima geknüpft ist.

Man geht davon aus, dass beim Gefrieren von Wasser immer Pfützen unter oder auf dem Eis zurückbleiben. Diese sind meist an Karbonat übersättigt, und so können Kalzitpartikel ausfallen. Da dies bei Temperaturen um den Gefrierpunkt abläuft, ist die Kristallstruktur dieser Partikel deutlich anders als bei „normalen“ Tropfsteinen (RICHTER, MISCHEL, MANGINI, IMMENHAUSER, NEUSER & DORSTEN, I. 2011)

Auch geochemisch unterscheiden sich kryogene Kalzite von Tropfsteinen. Im Gegensatz zu den Tropfsteinen, deren Altersdatierungen auf eine Bildung während der Warmzeiten hindeuten, fällt die Entstehung der im Herbstlabyrinth datierten kryogenen Kalzite in die Kaltphase vor 22.000–23.000 Jahren. Zu dieser Zeit herrschte in Breitscheid Permafrostboden vor und die Gletscher im Norden und Süden, die allerdings nicht bis nach Hessen reichten, hatten ihre größte Ausdehnung. Man spricht auch vom Maximum der letzten Eiszeit.

Im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System gibt es verschiedene Fundstellen dieser kryogenen Partikel (Abb. 9). Sie reichen in Tiefen von bis zu 55 m unter der heutigen Geländeoberfläche.



Abbildung 9: Kryogene Kalzite sind zunächst nicht besonders auffällig. Oft finden sich diese 1–2 mm großen Partikel auf Lehm und Blöcken, aber auch unter Sinter- und Lehmschichten. Erst bei einer Betrachtung unter dem Mikroskop lassen sie sich aufgrund ihrer Struktur von anderen ähnlichen Partikeln unterscheiden; Fundstätte unter einer Sinterschicht im Bärengang; Foto: Stefan Meyer.

Figure 9: Cryogenic calcites are not particularly conspicuous at first. These 1–2 mm particles are often found on clay and boulders, but also under layers of sinter and clay. Only when viewed under a microscope can they be distinguished from other similar particles due to their structure; site under a sinter layer in the *Bärengang*; photo: Stefan Meyer.

6.3 Altersdatierung an Tropfsteinen

Die Untersuchung von Tropfsteinen verrät viel über das Alter und die Entwicklung bestimmter Höhlenteile sowie über das Klima vergangener Zeiten in dieser Region. Im Rahmen mehrerer Arbeiten wurden Tropfsteine aus dem Herbstlabyrinth genau auf ihr Alter und ihre chemische Zusammensetzung untersucht.

Die Altersdatierung von Tropfsteinen macht sich den radioaktiven Zerfall von Uran zu Thorium zunutze. Uran ist im Gegensatz zu Thorium wasserlöslich. Somit wird mit dem Tropfwasser immer etwas Uran aus dem umliegenden Gestein mit in die Höhle transportiert. Dieses Tropfwasser baut im Laufe der Zeit den Tropfstein auf, und somit gelangen auch Spuren von Uran in den Tropfstein. Zur Bildungszeit liegt im besten Falle nur Uran im Karbonat des Tropfsteins vor. Dieses Uran zerfällt dann an Ort und Stelle im Laufe der Zeit zu Thorium. Es gilt: Je älter der Tropfstein, desto mehr Uran ist zu Thorium zerfallen.

Mit Massenspektrometern kann an einer kleinen Probe des Tropfsteins das Verhältnis von Uran und Thorium gemessen werden. Ist dies bestimmt, wird mit Hilfe einer mathematischen Formel das Alter der Probe berechnet. Mit dieser Me-

thode kann meist eine Genauigkeit in der Datierung von 70–200 Jahren erreicht werden.

Ein untersuchter Tropfstein (HLK2) wurde in einer kleinen Kammer nahe dem Schauhöhlenbereich (*Knöpfchenhalle*) gefunden (MISCHEL 2010). Nach der Entnahme wurde eine 1 cm dicke Scheibe des Stalagmiten für weitere geochemische Untersuchungen gesägt. Dazu wurden kleine Proben mit einem Gewicht von ca. 0,4–0,5 g für die Datierung entnommen (Abb. 10).

Als Ergebnis wurde ermittelt, dass der untere, bräunlich erscheinende Teil des Stalagmiten ca. 65.000 Jahre alt ist. Dann sieht man eine deutliche braune Schicht, welche aus Lehm besteht. Das Alter direkt oberhalb dieser Lehmschicht ist mit 14.000 Jahren erheblich jünger.

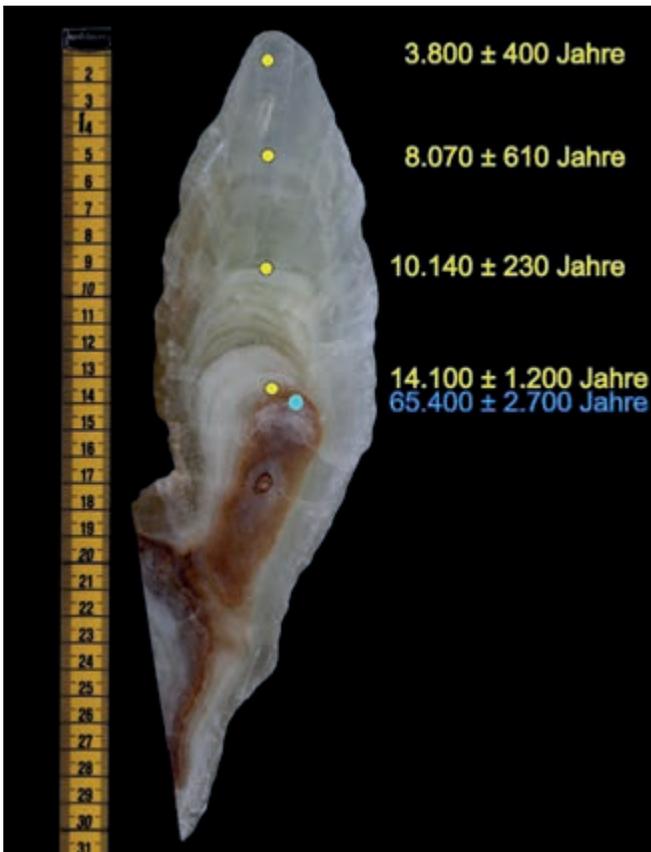


Abbildung 10: Der gesägte Stalagmit. Hier erkennt man deutlich die unterschiedlichen Wachstumsphasen; Foto: Simon Mischel.

Figure 10: The sawn stalagmite. Here you can clearly see the different growth phases; photo: Simon Mischel.

Daraus wird geschlossen, dass es im Laufe der Zeit eine Wachstumsunterbrechung des Stalagmiten gab, die ca. 50.000 Jahre dauerte. Dies entspricht der Zeit der letzten großen Vereisung. Die Gletscherausdehnung war auf ihrem Höhepunkt und die Temperaturen sehr niedrig. Der Boden war dauerhaft gefroren, sodass kein Wasser in den Boden eindringen konnte. Dadurch war ein Tropfsteinwachstum nicht möglich.

Die Untersuchungen zeigen allerdings auch, dass pauschale Altersangaben von Tropfsteinen kaum möglich sind. Anhang der gewonnenen Altersangaben dieses untersuchten Tropfsteins kann lediglich für die letzten 14.000 Jahre eine annähernde „Wachstumsgeschwindigkeit“ von 1 cm in 1000 Jahren abgeleitet werden. Das Wachstum von Tropfsteinen ist von verschiedenen Faktoren abhängig (CO₂-Sättigung der Höhlenluft, Tropfrate, Kalklösung usw.).

Der Tropfstein HLK2 wurde im Jahr 2023/2024 nochmals einer Untersuchung unterzogen. Dabei wurde analysiert, wie hoch der Schwefelgehalt in den unterschiedlichen Wachstumszonen des Tropfsteins ist. Ziel war es, ein neues, unabhängiges und möglichst präzises Alter für den Ausbruch des Laacher-See-Vulkans in der Eifel zu bestimmen und herauszufinden, welche klimatischen Folgen die Eruption hatte – nicht nur auf die Region, sondern ebenso auf das europäische und globale Klima der anschließenden Jahrzehnte und Jahrhunderte. Aufgrund seines ermittelten Alters war der Tropfstein HLK2 ein Zeitzeuge des Ausbruchs. Die Ergebnisse konkretisierten die Einordnung des Zeitpunktes des Ausbruchs und konnte über zusätzlich gemessene Sauerstoffisotope zeigen, dass sich die Umwelt und die Vegetation erst nach Jahrzehnten von dem Ausbruch erholt hatten. Sie gaben aber auch Hinweise darauf, dass der Laacher-See-Vulkan wahrscheinlich nicht an der abrupten Abkühlung der Jüngerer Dryas Kaltphase beteiligt war.

6.4 Laacher-See-Bims

Über Schlucklöcher und Spalten wurden an einigen Stellen der Höhle Gerölle von der Oberfläche eingespült. In diesen Bereichen lagern heute verschiedene Gesteinsarten wie Basalt in Form von meist abgerundeten Steinen verschiedener Größen.

Darüber hinaus findet man im Herbstlabyrinth aber auch die Überreste einer der größten Naturkatastrophen Mitteleuropas der letzten 100.000 Jahre. Vor ca. 12.900 Jahren, kurz nach der letzten großen Eiszeit, brach in der Eifel der Laacher-See-Vulkan aus. Während der vermutlich nur wenige Tage dauernden gewaltigen Eruption schleuderte der Vulkan riesige Mengen Bims und Asche aus dem Krater, die teils über 20 km in die Höhe getragen wurden. Der Wind transportierte die Asche über 500 km bis nach Südschweden, Osteuropa und Norditalien. Über weiten Teilen Deutschlands regnete es tagelang Asche und Bims, so dass in unserer Region eine bis zu 10 cm dicke Schicht niederging. Heute findet man direkt an der Oberfläche in Hessen nichts mehr davon (Ausnahme in Bodenbildungen),



Abbildung 11: Lagerungssituation von Bims und Aschen in der Hohen Alp. Deutlich sind die Bims- und Ascheschichten unter einer Sinterdecke zu erkennen; Foto: Ingo Dorsten.

Figure 11: Depositional situation of pumice and ash in the Hohe Alp. The pumice and ash layers are clearly visible under a sinter cover; photo: Ingo Dorsten.

aber in einigen Teilen der Höhlen zwischen Breitscheid und Erdbach sind große Mengen Bims und Asche eingeschwemmt und abgelagert worden (DORSTEN & HARRIES 2006). Für die Höhlenforschung ist dies ein Glücksfall, denn darüber können einige sehr bedeutende Aussagen gemacht werden:

- Einordnungen zum Alter von darüberliegenden Höhlensedimenten und Tropfsteinen: Jeder Tropfstein, der zum Beispiel auf dem Bims wächst, kann nicht älter als 12.900 Jahre sein, ebenso der Zeitpunkt der Ablagerung des über dem Bims liegenden Sediments.
- Gestalt und Entwicklungen einzelner Höhlenteile seit der Eruption: Anlagerungen an Höhlenwänden und im Bodenbereich weisen darauf hin, dass es hier kaum noch Veränderungen gegeben hat.
- Zutrittsbereiche von Wasser in die Höhle über heute nicht mehr sichtbare Bachschwinden: Es müssen zu der Zeit noch mehr aktive Wasserläufe in und durch das Höhlensystem gegeben haben als heute. So finden sich in der **Knöpfchenhalle** an vielen Stellen regelrechte Bimsbänke, wo sich der eingeschwemmte leichte Bims abgelagert hat. Weitere Fundstellen befinden sich im **Hessentunnel**, in der **Spaghetteria**, im Verbruch des **Westends** sowie im Bereich der **Hohen Alp** (Abb. 11), in den **Rampengängen** und auch im Erdbachhöhlensystem.
- Wasserrückstauhöhen: Es lassen sich auch Rückschlüsse auf die Stauniveaus des Wassers zur Zeit der Einspülung durch anhaftende Bims-Partikel an den Höhlenwänden ziehen.

- Die beiden Höhlensysteme (Herbstlabyrinth-Adventhöhlsystem und Erdbachhöhlsystem) im Breitscheider Karst sind bisher die einzigen bekannten Höhlen in Europa, in denen Bims vom Laacher-See-Vulkan nachgewiesen wurde.

6.5 Biospeläologie – Lebensräume in den Breitscheider Höhlen

Höhlen stellen in vielerlei Hinsicht ein lebensfeindliches Habitat dar. Durch die völlige Abwesenheit von Licht können Pflanzen, die allesamt auf Photosynthese angewiesen sind, in unterirdischen Lebensräumen nicht gedeihen. Daraus erklärt sich die extreme Nährstoffarmut der Höhle, welche auch der Tierwelt eine starke Anpassung abverlangt.

Die ökologische Klassifizierung der Höhlentiere lässt sich unterteilen in Eutrogloxe („Zufallsgäste“), die nur zufällig in die Höhle geraten und sich in diesem Lebensraum nicht behaupten können, Subtroglophile oder Höhlengäste, welche die Höhlen zu bestimmten Jahreszeiten aufsuchen wie etwa einige Fledermaus- und Schmetterlingsarten, sowie Eutroglophile, welche zwar ebenfalls an der Erdoberfläche vorkommen, jedoch auch dauerhaft unterirdische Populationen bilden können.

Im Weiteren werden hier jedoch nur die „echten“ Höhlentieren oder Eutroglobionten vorgestellt.

Diese haben sich komplett an das Leben untertage angepasst und können außerhalb ihres unterirdischen Habitats nicht überleben. Diese Arten haben meist oberirdische Verwandte und einige sind im Laufe ihrer Entwicklung in die Höhlen eingewandert, wo sie sich an die veränderten Lebensbedingungen im Verlauf der Evolution perfekt angepasst haben. Trotz der extremen Lebensbedingungen (Lichtlosigkeit, Nahrungsknappheit etc.) bietet die Höhle den eingewanderten Arten auch Schutz, z. B. vor Fressfeinden, Kälte und Austrocknung und gewährt darüber hinaus eine gleichbleibende Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Besondere Merkmale echter Höhlentiere sind das Fehlen der Hautpigmentierung (die Arten erscheinen weiß bis durchscheinend), fehlende oder zurückgebildete Augen sowie verlängerte Tastorgane. Bedingt durch die Nährstoffarmut haben Höhlentiere einen bis zu zehnmal längeren Lebenszyklus als ihre oberirdischen Verwandten und können oft jahrelang ohne Nahrung auskommen. In Deutschland sind derzeit rund 750 cavernicole Tierarten bekannt, von denen etwa 150 als eutroglobiont eingestuft werden.

Im Herbstlabyrinth sind bisher 97 Tierarten nachgewiesen, von denen jedoch nur einige eutroglobiont sind. Viele der echten Höhlentiere sind grundwasserbewohnend und exemplarisch sollen drei Arten näher vorgestellt werden.

Die Höhlenwasserassel (*Proasellus cavaticus*)

Die bis zu 8 mm lange Art lebt in stehenden und fließenden Höhlengewässern und ernährt sich von organischem Material, das mit dem Wasser in die Höhle eingespült wird. Da das Herbstlabyrinth auf rund 1500 m Länge vom unterirdischen Erdbach durchflossen wird, findet die Art hier eine weite Verbreitung. Die Höhlenwasserassel dient ihrerseits wiederum als Nahrungsgrundlage für räuberische Arten wie den Höhlenflohkrebs *Niphargus*, der ebenfalls im Breitscheider Karstgebiet vorkommt. In der 2024 erschienenen Roten Liste der Binnenasseln in Deutschland wird die Höhlenwasserassel als vom Aussterben bedroht geführt.



Abbildung 12: Die Höhlenwasserassel (*Proasellus cavaticus*); Foto: Klaus Bogon.

Figure 12: The cave water isopod (*Proasellus cavaticus*); photo: Klaus Bogon.

Der Höhlen-Zwergflohkrebs (*Crangonyx subterraneus*)

Diese räuberisch lebende Art ist nur ca. 3 mm groß. *Crangonyx subterraneus* ähnelt morphologisch dem verbreitet vorkommenden *Niphargus*, bewegt sich jedoch im Gegensatz zu diesem nicht seitlich, sondern mit dem Rücken nach oben schwimmend fort. Im Herbstlabyrinth wurde er bisher nur in einem kleinen seitlichen Zufluss des Erdbachs mit unbekannter Herkunft nachgewiesen.

Der Höhlen-Süßwasserpolyp (*Hydra spec.*)

Der bisher aufsehenerregendste Tierfund aus dem Herbstlabyrinth ist ein Höhlen-Süßwasserpolyp (*Hydra spec.*). Diese bis zu 10 mm große, ebenfalls räuberische Art wurde erstmals im Jahr 1878 im Höhlensee der Hilgershäuser Höhle in Nordhessen nachgewiesen und galt dann lange Zeit als verschollen. In den Jahren 2001 und 2004 konnte die Art in einigen Exemplaren in der Hilgershäuser Höhle wiedergefunden werden, die Höhle stellte bisher den einzigen Fundort dieser Art dar. Im Jahr 2023 gelang der Nachweis in einem Wasserbecken, welches ebenfalls

einen kleinen Zufluss unbekannter Herkunft zum unterirdischen Erdbach darstellt (Abb. 13).

Vielleicht wird es künftig gelingen, diese Art auch in weiteren Höhlen der Region nachzuweisen. Die Biospeläologie ist eine junge Wissenschaft, die sich erst seit einigen Jahrzehnten im Aufbau befindet und folglich dürften auch in der Zukunft noch einige spektakuläre Entdeckungen zu erwarten sein.



Abbildung 13: Höhlen-Süßwasserpolyp (*Hydra soligactis f. subterraneus*); Foto: Klaus Bogon.

Figure 13: Cave freshwater polyp (*Hydra soligactis f. subterraneus*); photo: Klaus Bogon.

Nur sehr wenig ist bisher über die in Höhlen vorkommenden Arten bekannt. Es scheint jedoch so, dass gerade in abgelegenen Höhlenteilen noch Überraschungen zu erwarten sind.

6.6 Mikroorganismen („Pool-Fingers“)

Mikroskopisch kleine Lebewesen – vor allem Pilze und Bakterien – besiedeln in enormer Artenvielfalt die unterirdischen Lebensräume. Die Erforschung dieser Mikroben steckt noch in den Anfängen.

Nur sehr wenig ist bisher über die in Höhlen vorkommenden Arten bekannt. Es scheint jedoch so, dass gerade in abgelegenen Höhlenteilen noch Überraschungen zu erwarten sind.

Im Jahr 2009 wurden in einem Wasserbecken der **Rätselhalle** des Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystems sog. Pool-Fingers entdeckt. Dabei handelt es sich um mit Kalk überkrustete Fäden aus Bakterienschleim, so genannte biogene Sinter (MEYER 2014). Diese fingerartigen „Tropfsteine“ bilden sich an den Rändern von wassergefüllten Sinterbecken und können mehrere Dezimeter lang werden (z. B. in einer Höhle in New Mexiko, USA). Neben der bekannten, oben beschriebenen Form wurden in der Rätselhalle erstmals noch weiche, lebende Pool-Fingers ohne Kalkverkrustungen entdeckt (Terra Typica). Diese waren bis 2014 die einzigen dokumentierten Vorkommen, die in den Zusammenhang mit der Entstehung von Pool-Fingers gebracht wurden.

Das Besondere im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System ist die Formenvielfalt, die die Pool-Fingers hier ausgebildet haben. Es sind mittlerweile viele Vorkommen in den unterschiedlichen Ausprägungen dokumentiert, die eine Theorie zur Genese biogener Sinter ermöglichen. Eine Pool-Finger-Form ist besonders



Abbildung 14: Diese Pool-Fingers sind besonders seltene lebende Exemplare. Die Fäden aus Bakterienschleim hängen unter Wasser vom Rand eines Kristallbeckens in der Rätselhalle herab; Foto: Stefan Meyer.

Figure 14: These pool fingers are particularly rare living specimens. The threads of bacterial slime hang down underwater from the edge of a crystal pool in the *Rätselhalle*; photo: Stefan Meyer.

interessant. Denn hier haben sich die Mikroorganismen mit organischem und mineralischem Material zu zentimeterlangen, zähen Fäden verbunden, auf deren Oberfläche sich erste Mineralien ablagern (Abb. 14). Eine weitere Form aus der Adventhöhle hat sich hier schon weiterentwickelt, indem die Fäden komplett mit Kalzitablagerungen ummantelt sind. Bei klassischen fossilen Pool-Fingers lassen sich diese biogenen Strukturen im Inneren nicht mehr nachweisen. Sie wurden vermutlich durch das weitere Kristallwachstum verdrängt.

Bei einer gemeinsamen Untersuchung mit zwei US-Wissenschaftlerinnen wurden die Funde im Herbstlabyrinth genauer dokumentiert und Proben entnommen. Die ersten Untersuchungen ergaben, dass mindestens 15 Bakterienklassen an der Bildung der lebenden Pool-Fingers beteiligt sind (MELIM, NORTHUP, SPILDE & BOSTON 2015). Eine komplexe Lebensgemeinschaft – Ursprung biogener Sinter.

7 Paläontologische Funde und Unterschutzstellung der Höhle

Das Höhlensystem umfasst u. a. eine hessenweit einmalige Fossillagerstätte mit zahlreichen hervorragend erhaltenen Zeugnissen tierischen Lebens (u. a. ca. 30.000 Jahre alte Höhlenbärenknochen aus dem Jungpleistozän (Abb. 15 und 16), welche als Oberflächen-Grabgemeinschaft auf einem ungestörten und daher höchst sensiblen Paläoboden der Höhle liegen. Dieser bis 1997 bekannte Teilbereich des Höhlensystems wurde als ortsfestes paläontologisches Bodendenkmal unter Schutz gestellt, da es bei der Entdeckung der Höhle 1993 akut von Zerstörung durch den Kalksteinabbau bedroht war.

Durch erfolgreiche Verhandlungen zwischen Gemeinde, Steinbruchbetreiber, SAH, Landesamt für Denkmalpflege Hessen (LfDH) und Naturschutz gelang es, im Jahr 1998 einen Kompromiss zu erzielen, der die Ausgrenzung der damals bekannten, noch unberührten fossilführenden Höhlenareale aus den Erweiterungsflächen des Steinbruchbetriebes gewährleistete und somit das ortsfeste paläontologische Bodendenkmal „Bärengang“ substantziell sicherte.

Naturschutzrechtlich erfolgte 1999 die Ausweisung des Höhlenkomplexes als Naturdenkmal.

Die gemeinschaftlichen Bemühungen um Schutz und Erhalt des Höhlenkomplexes wurden 2004 mit dem Hessischen Denkmalschutzpreis gewürdigt.

Zur Zeit der Denkmalfeststellung war lediglich ein aus heutiger Sicht kleinräumiger Teil des Höhlensystems bekannt.

Bei der behutsam und systematisch durchgeführten Erforschung des Höhlensystems wurden zahlreiche weitere Fossillagerstätten innerhalb des Systems erkannt. Dazu zählen vor allem die Knochen von fossilen Fledermäusen sowie von unterschiedlichen Klein- und Großsäugern (darunter Wollnashörner), welche sich außerhalb des bislang kleinräumig als paläontologisches Bodendenkmal



Abbildung 15: Versinterte und mit Lehm eingeschwemmte Knochen des Höhlenbären *Ursus spelaeus*; Foto: Stefan Meyer.

Figure 15: Sintered and clay-washed bones of the cave bear *Ursus spelaeus*; photo: Stefan Meyer.



Abbildung 16: Eingesinterter Bärenschädel von *Ursus spelaeus*; Foto: Stefan Meyer.

Figure 16: Sintered bear skull of *Ursus spelaeus*; photo: Stefan Meyer.

ausgewiesenen Arealen befinden. Auch diese Fossilien liegen eingebettet in ungestörten Paläoböden. Deshalb war es erforderlich, die Denkmalausweisung des „Breitscheid-Erdbacher Höhlensystems“ um diese weiteren Areale zu ergänzen.

Seit dem 15. Oktober 2018 steht das „Breitscheid-Erdbacher Höhlensystem“ als unbewegliches Bodendenkmal (Gesamtanlage) nach § 2 Abs. 2 des Hessischen Denkmalschutzgesetzes in der Fassung vom 28. November 2016 unter Schutz.

Die bisher bekannten Fossilagerstätten im größten Höhlensystem Hessens und in einem der bedeutendsten Systeme Deutschlands beinhalten einmalige und ungestörte Ansammlungen hervorragend erhaltener Makrofossilien und Makro-fossilassoziationen im unberührten und konservierten Zustand. Zusammen mit den sie einbettenden ungestörten Paläoböden stellt das „Breitscheid-Erdbacher Höhlensystem“ eine Fossilagerstätte von überregionaler wissenschaftlicher Bedeutung dar, die bereits in zahlreichen Publikationen dokumentiert ist.

Der ungestörte Zustand dieser Fossilagerstätten ist u. a. dadurch begründet, dass die ehemaligen Zugänge des Höhlensystems verstürzt und somit versiegelt sind. Dies verspricht eine wissenschaftliche „state of the art-Forschung“. Im Rahmen interdisziplinärer Forschungsansätze sollen z. B. DNA-basierte Erfassungen der Lebensgemeinschaften erfolgen – nur eine der Untersuchungsmethoden, die aufgrund des hervorragenden Erhaltungszustandes der Fossilien möglich ist.

Es sind aber weiterhin noch einige Fragen offen, die einer tiefergehenden Analyse bedürfen:

- Wo befand sich innerhalb des „Bäregangs“ der ehemalige Ein- und Ausgang, den die Höhlenbären nutzten, um in den Gang zu gelangen?
- Welche Geschehnisse sind für die starke Disartikulation der Höhlenbärskelette und für die „wilden Ablagerungsmuster“ der Knochenlager – oder gar für den Bruch einiger Knochen – verantwortlich?
- Wie mächtig sind die fossilienführenden Sedimentfüllungen der Höhlenböden - und welche Individuenanzahl lässt sich hieraus ableiten?
- Wie lange dauerte der Nutzungszeitraum des von den Höhlenbären genutzten Areals?
- Weshalb liegen isolierte, „helle“ und „saubere“ Knochen auf den zahlenmäßig deutlich dominierenden, stark sedimentverschmutzten Knochenlagern?
- Welche rezent-biologischen (mikrobiologischen) Faktoren sind aus konservatorischen Gründen bei der insitu-Erhaltung der Knochenlager zu berücksichtigen?
- Wie wirkte sich das Vorhandensein von Höhleneis auf die Knochenlager aus? Welche Ablagerungsprozesse wurden von Frost- und Tauphasen beeinflusst und welche Rolle nehmen mögliche eingedrungene Fließerdien oder Flutungsphasen auf die Fossilierhaltung und Ablagerung ein? Ein kristal-

lographischer Schlüssel zum Verständnis dieser klimatologisch geprägten Fragestellungen könnten die innerhalb des „Bärengangs“ nachgewiesenen kryogenen Kalzite liefern.

8 Aussichten und weitere Forschungsansätze

Der Beitrag kann in seinem Umfang längst nicht auf alle spannenden Erkenntnisse aus der Erforschung des Höhlensystems eingehen. Es ist in erster Linie ein Einblick in die Arbeitsweise der hessischen Höhlenforschung und eine Beschreibung der bedeutendsten Höhlenteile sowie der wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse. Sicher werden auch in den kommenden Jahren neue Erkenntnisse gewonnen und die eine oder andere Fragestellung beantwortet. Viele Ansätze werden die Forschung jedoch auch in den kommenden Jahrzehnten noch beschäftigen.

In den letzten Jahren wurden viele bedeutende Neuentdeckungen in den Breitscheider Höhlen und vor allem im Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem gemacht. Insbesondere die Jahre 2009–2017 waren geprägt durch immer wieder neue, teils spektakuläre Funde von großen Höhlengängen, so dass das Höhlensystem dadurch einen Längenzuwachs von 5.500 m bis auf über 13.000 m erfuhr und heute zu den bedeutendsten Höhlen in Deutschland zählt. Neben den Gangformen sind es vor allem aber die Details in vielen Höhlenbereichen, die zu neuen Überlegungen hinsichtlich Genese des Höhlensystems und dessen Alter anregen.



QR Code: Die Erforschung und wesentliche Erkenntnisse sind in einem Film zusammengefasst, der von der Speläologischen Arbeitsgemeinschaft Hessen e.V. erstellt wurde.

QR code: The research and key findings are summarized in a film produced by the Speläologische Arbeitsgemeinschaft Hessen e.V.

9 Literatur

- AL-MALABEH, A. & KEMPE, S. (2005): Origin of iron ore nuggets (“Bohnerze”) through weathering of basalt as documented by pebbles from the Herbstlabyrinth, Breitscheid-Germany. – *Acta Carsologica*, **34** (2): 459-470.
- BOHATÝ, J. (2017): Paläontologische Reise in die eiszeitliche Unterwelt von Breitscheid-Erdbach. – *Denkmalpflege & Kulturgeschichte*, **2017** (3): 37-38.
- BÖHM, R. (1985): Karst und Höhlen in der Dillmulde. – *Karst und Höhle*, **1984/85**: 101-114.
- DORSTEN, I. (2005): Erforderliche Maßnahmen für eine nachhaltige Erschließung des Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystems zur Schauhöhle; unveröff. Stellungnahme der Speläologischen Arbeitsgemeinschaft Hessen.
- DORSTEN, I. (2007): Bewertung zur Karsthydrologie und Meteorologie der Breitscheider Höhlensysteme hinsichtlich eines geplanten Tagebaus auf dem Faulfeld; unveröff. Bewertungsstudie der Speläologischen Arbeitsgemeinschaft Hessen.

- DORSTEN, I. (2009a): Neue Wege beim Ausbau einer Schauhöhle. – Der fränkische Höhlenspiegel, **56**: 42-47.
- DORSTEN, I. (2009b): Neuland im Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch., **55** (4): 81.
- DORSTEN, I. (2010): Eine neue Schauhöhle in Deutschland – das Herbstlabyrinth in Hessen setzt in Wegebau und Lichttechnik weltweit Maßstäbe. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch., **56** (1): 4-10.
- DORSTEN, I. (2016): Neue Forschungen im Herbstlabyrinth. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch., **62** (1): Seite von bis; München.
- DORSTEN, I. & HARRIES, D. (2006): Fund von Laacher-See Bims im Herbstlabyrinth-Adventhöhlen-System. – Jb. Nass. Ver. Naturkde., **127**: 131-136.
- DORSTEN, I. & HÜSER, A. (2004): Seltene Calcitbildungen im Herbstlabyrinth. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch., **50** (4): IV / 127; München.
- DORSTEN, I. & HÜLSMAN, T. (2008): Das Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem. – Stalactite, **58** (1): 3-12.
- DORSTEN, I. & ORGIS, T. (2009): Höhlenschutz und Kalksteinabbau. – Fachzeitschrift für mineralische Rohstoffe (MIRO), **45**: 31-33.
- DORSTEN, I., HÜLSMANN, T. & HÜSER, A. (2005): Das Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem – die erste Riesenhöhle Hessens. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch., **51** (1): 4-10.
- DORSTEN, I., HÜLSMANN, T. & HÜSER, A. (2006): Das Herbstlabyrinth-Adventhöhlensystem – Neue Forschungsergebnisse aus der größten hessischen Höhle. – Jb. Nass. Ver. Naturkde., **127**: 103-130.
- FINKE, M. (2006): Das Karstgebiet von Erdbach/Breitscheid im Westerwald unter besonderer Berücksichtigung anthropogener Einflussfaktoren. – 72 S.; Gießen (Institut für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen).
- FLICK, H. (2010): Lahn-Dill-Gebiet. Riffe, Erze und edle Marmor. – 116 S.; Wiebelsheim (Quelle & Meyer Verlag).
- GRUBERT, C. (1996): Zum Alter und zur Genese des Herbstlabyrinth-Adventhöhle-Systems (5315/51). – Speleogruppe'86 und Speläologische Arbeitsgemeinschaft Hessen e.V., Jahresbericht **1996**: 25-28; Wiesbaden.
- GRUBERT, C. (1999): Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System zum Naturdenkmal erklärt. – Speleogruppe'86 und Speläologische Arbeitsgemeinschaft Hessen e.V., Jahresbericht **1999**: 51.
- GRUBERT, C. & HÜLSMANN, T. (1998): Das Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid (Lahn-Dill-Kreis / Rheinisches Schiefergebirge. – Jb. Nass. Ver. Naturkde., **119**: 39-54.
- HAFERKORN, J., ALLSPACH, A. & VON KNORRE, D. (2024): Rote Liste und Gesamtartenliste der Landasseln und Wasserasseln (Isopoda: Oniscidea et Asellota p. p.) Deutschlands. – Naturschutz und Biologische Vielfalt: **170** (8): 42 S.
- HENRICH, R. (2017): Riffe, Vulkane, Eisenerz und Karst – im Herzen des Geoparks Westerwald-Lahn-Taunus. – Wanderungen in die Erdgeschichte, **33**: 208 S.; München (Verlag Dr. Friedrich Pfeil).
- HERRMANN, F.R. (1987): Steinkammer-Höhlen und Wildweiberhäuschen. Führungsblatt zu den Höhlen bei Breitscheid-Erdbach und Haiger-Langenaubach. – Archäologische Denkmäler in Hessen, **68**: 11 S.; Dillenburg (Buchdruckerei E. Weidenbach KG).
- HÜSER, A. (2001): Das Karstgebiet von Erdbach im Westerwald. Speläologie, Hydrologie und aktuelle Probleme. – Wissenschaftliche Hausarbeit, Institut für didaktische Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen; Gießen.
- KREBS, W. (1966): Der Bau des oberdevonischen Langenaubach-Breitscheider Riffes und seine weitere Entwicklung im Unterkarbon (Rheinisches Schiefergebirge). – Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft, **511**: 105 S.
- KAISER, T. & KELLER, T. (1999): Der eiszeitliche Höhlenboden von Breitscheid-Erdbach, ein paläontologisches Denkmal. – Denkmalpflege und Kulturgeschichte, **1/1999**: 15-20.

- KAISER, T., KELLER, T. & TANKE, W. (1998): Ein neues pleistozänes Wirbeltiervorkommen im Paläokarst Mittelhessens (Breitscheid-Erdbach, Lahn-Dill-Kreis). – Geologisches Jahrbuch Hessen, **126**: 71-79.
- KEMPE, S. (2005): Bemerkungen von Prof. Dr. Stephan Kempe zum Herbstlabyrinth nach einer Befahrung im Nov. 2004. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforsch., **51** (1): 12.
- KEMPE, S. (2008): Natürliche Sinterschäden, Indikatoren für glaziales Höhleneis in Mitteleuropa. – Stalactite, **58** (1): 38-42.
- MATTHESS, G. & STENDEL-RUTKOWSKI, W. (1967): Färbeversuche mit Uranin AP im oberdevonischen Riffkalkstein (Iberger Kalk) von Erdbach und Breitscheid (Dillmulde, Rheinisches Schiefergebirge). – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **95**: 181-189; Wiesbaden.
- MELIM, L. (2011): Preliminary Report on Pool fingers from Herbstlabyrinth and Adventhöhle, Germany. Samples collected July 2011 by Leslie Melim and Diana Northup with help from Ingo Dorsten, Stefan Meyer, and Simon Mischel. Sem-work November, 2011 by Leslie Melim, Michael Spilde, Diana Northup and Jordan Moroni, unveröff. – 11 S., 6 Fotos und 15 SEM-Aufnahmen.
- MELIM, L.A., NORTHUP, D.E., SPILDE, M.N. & BOSTON, P.J. (2015): Update: Living reticulated filaments from Herbstlabyrinth-Adventhöhle Cave System, Germany. – Journal of Cave and Karst Studies, **77** (2): 87-90; doi: 10.4311/2015MB0112.
- MEYER, ST. (2013): Bericht zum Forschungswochenende „Pool-Fingers“ im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid, Hessen, 8.–10. Juli 2011. – Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft für Karstkunde Harz e.V., **2013** (1, 2): 9-29.
- MEYER, ST. (2014): Neues zu den Pool-Finger-Vorkommen im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System, Hessen. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforscher, **60** (2): 42-49.
- MEYER, ST. (2015): Befahrungsbericht Erdbach-Tunnel und Nordwest-Passage (Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System) vom 9./10. August 2014. – Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft für Karstkunde Harz e.V., **2015** (1, 2): 31-39.
- MEYER, S. & PLAN, L. (2010): Pool-Fingers – eine kaum bekannte Sinterform biogenen Ursprungs. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **56** (4): 104-108.
- MISCHEL, S. (2010): Petrographische Untersuchungen, $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersdatierungen und Spurenelementanalysen an Speläothemen aus dem Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid-Erdbach, Hessen. – Unveröff. Diplomarbeit Universität Marburg.
- NIGGEMANN, S. (2003): Bewertungsstudie für die touristische Nutzung des Herbstlabyrinth-Adventhöhle-Systems in Breitscheid/Lahn-Dill-Kreis; unveröff. Manuskript.
- RICHTER, D.K., MEISSNER, P., IMMENHAUSER, A., SCHULTE, U. & DORSTEN, I. (2010): Cryogenic and non-cryogenic pool calcites indicating permafrost and non-permafrost periods: a case study from the Herbstlabyrinth-Advent cave system (Breitscheid-Erdbach Cave, Germany). – The Cryosphere, **4**: 501-509.
- RICHTER, D.K., MISCHEL, S., MANGINI, A., IMMENHAUSER, A., NEUSER, R.D. & DORSTEN, I. (2011): Zerbrochene Höhlensinter und Kryokalcite als Indikatoren für eiszeitlichen Permafrost im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid-Erdbach (N-Hessen). – Die Höhle, **62** (1-4): 31-45.
- Speläologische Arbeitsgemeinschaft Hessen e.V. (2016): Das Herbstlabyrinth und der Karst in der Gemeinde Breitscheid im Westerwald, 2. Ausgabe. – 49 S.; Breitscheid.
- STEIN, G. (1985): Die vorgeschichtlichen Funde aus den Steinkammern bei Erdbach. – Karst und Höhle, **1984/85**: 265-271.
- STENDEL-RUTKOWSKI, W. (1968): Karsterscheinungen im oberdevonischen Riffkalkstein (Iberger Kalk) von Erdbach und Breitscheid (Dillmulde, Rheinisches Schiefergebirge). – Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch., **14** (1): 75-84.
- ZAENKER, S., BOGON, K. & WEIGAND, A. (2020): Die Höhlentiere Deutschlands. – 448 S.; Wiebelsheim (Quelle & Meyer Verlag).

Ingo Dorsten
Dieter Kraus
Arndt Karger
Speläologische Arbeitsgemeinschaft Hessen e. V.
E-Mail: Vorstand@sah-breitscheid.de
E-Mail: dorsten-ingo@web.de
Tel.: 0175-7045180

Manuskripteingang: 16. September 2024

Unser Heimatstern, die Sonne – wie wir sie vermessen und verstehen können

LISA-MARIE ZESSNER & PATRICK ONDRATSCHEK

Sonnenforschung, Weltraumwetter, Instrumentierung, numerische Simulationen

K u r z f a s s u n g : Mit Hilfe von hochmodernen Instrumenten kann die Sonne heutzutage in nie dagewesener Präzision beobachtet werden. Dabei liegen Forschungsschwerpunkte unter anderem auf dem Magnetfeld der Sonne. Dieses ist die Grundlage für den Sonnenwind und steht somit in direktem Zusammenhang mit der Auswirkung der Sonne auf das sogenannte Weltraumwetter. Teleskope, die sich entweder auf der Erde oder im Weltraum befinden, dienen hierbei als Forschungsgrundlage. Auf der anderen Seite dienen numerische Simulationen dazu, um die Messdaten zu interpretieren. Es ist das Zusammenspiel aus Beobachtung und Theorie, das unser Verständnis über die komplexen Schichten der Sonnenatmosphäre erweitert.

Our host star – how to observe and understand the Sun

Solar research, space weather, instrumentation, numerical simulations

A b s t r a c t : With the help of modern instruments, we can observe the sun with unprecedented precision. One of the major research topics is the solar magnetic field. It plays an important role in the origin of the solar wind and is therefore connected to the Sun's impact on the so-called space weather. Ground- and space-based telescopes form the basis of current research. On the other hand, numerical simulations are a helpful tool to interpret the observational data. It is the interplay of observation and theory which helps us to understand the complex solar atmosphere.

Inhaltsverzeichnis

1	Unsere Sonne im Überblick	234
1.1	Die Sonne hat viele Erscheinungsformen	234
1.2	Die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre	235
1.3	Die magnetische Aktivität der Sonne und ihre Auswirkungen auf das Weltraumwetter	238
2	Die Sonne beobachten	242
2.1	Das Lichtspektrum	242
2.2	Das Licht der Sonne beobachten	243
2.3	Erdgebundene Sonnentelkope	244
2.4	Weltraumteleskope	244
2.5	Der Kompromiss: ein ballongetragenes Teleskop	245
3	Beobachtungen interpretieren mit Hilfe von Simulationen	247
4	Ausblick	249
5	Literatur	250

1 Unsere Sonne im Überblick

Ohne sie könnten weder wir noch das restliche Leben auf der Erde bestehen. Ohne sie gäbe es weder die Erde noch unser gesamtes Planetensystem. Dennoch ist ihre Existenz für uns im Alltag selbstverständlich – egal, ob sie für uns gerade sichtbar ist oder nicht.

Die Rede ist von unserem Heimatstern, der Sonne. Ihr Licht erreicht uns Tag für Tag, Jahr für Jahr. Nichts ist für uns selbstverständlicher, als dass der rote Feuerball an unserem Himmel morgens auf und abends wieder untergeht. Doch wieviel wissen wir tatsächlich über unseren Heimatstern? Wie können wir etwas untersuchen, das sich 150 Millionen Kilometer von uns entfernt befindet? Und wieso ist es überhaupt wichtig für uns, die Sonne zu verstehen?

Die Sonne ist einer von ungefähr hundert Milliarden Sternen in unserer Galaxie. Vor fünf Milliarden Jahren hat sie sich aus dem Kollaps einer molekularen Gaswolke gebildet, zusammen mit unserem gesamten Sonnensystem. Die Sonne ist, verglichen mit den anderen Sternen unserer Milchstraße, ein relativ durchschnittlicher Stern: nicht besonders groß, nicht besonders klein, nicht besonders hell. Ihr Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometern entspricht ungefähr dem 110-fachen Durchmesser unserer Erde. Sie besteht zum größten Teil aus Wasserstoff und Helium, mit einer Masse von 330.000 Erdmassen oder 100 Jupitermassen. Bis heute hat sie ungefähr die Hälfte ihrer Lebenszeit hinter sich gebracht. Über das Ende unserer Sonne müssen wir uns also in nächster Zeit zum Glück noch keine Gedanken machen. Doch wer denkt, dass wir deshalb keinen weiteren Gedanken an die Sonne verschwenden müssen, irrt sich: Sie hat nämlich andere, sehr wichtige Einflüsse auf uns, die uns dazu veranlassen, unsere Sonne im Detail verstehen zu wollen.

1.1 Die Sonne hat viele Erscheinungsformen

Das komplexe Verhalten unserer Sonne zeigt sich uns mit bloßem Auge selten. Wenn wir mit bloßem Auge gen Sonne blicken, dann sehen wir eine helle, homogene Kreisscheibe am Himmel (siehe Abb. 1a). Haben wir ein Teleskop mit Sonnenfilter, ohne das man niemals direkt in die Sonne blicken sollte, zur Hand, dann können wir manchmal sehen, dass die Oberfläche in Wahrheit nicht frei von Struktur ist, sondern sich Flecken darauf befinden, die sich Sonnenflecken nennen (siehe Abb. 1b). Wenn wir dann noch einen Rotfilter für unser Teleskop zur Verfügung haben, dann können wir noch andere Strukturen auf und am Rand der Scheibe erkennen (siehe Abb. 1c). Haben wir jetzt zusätzlich noch die Möglichkeit, diese Strukturen über längere Zeit zu beobachten, dann werden wir bemerken, dass sie sich bewegen, verändern oder verschwinden können.

Die Sonne ist also deutlich mehr als eine homogene Kugel. Sie zeigt prägnante Strukturen auf ihrer Oberfläche, die sich dynamisch verändern können. Und die-

se Strukturen, die wir im sichtbaren Licht erkennen können, sind noch lange nicht alles, was sich auf der Sonne abspielt. In Wahrheit sind sowohl die Oberfläche als auch die Atmosphäre der Sonne sehr aktive, turbulente Orte. Wer schon einmal das Glück hatte, eine totale Sonnenfinsternis mitzuerleben, der konnte vielleicht einen kurzen Blick auf die Sonnenkorona erhaschen, die normalerweise von der hellen Oberfläche der Sonne überstrahlt wird (siehe Abb. 1d). Die sichtbaren langgezogenen Strukturen der Korona geben einen ersten Hinweis darauf, dass der Einfluss der Sonnenaktivität über die eigentliche Atmosphäre hinausgeht: die Heliosphäre, in der die Einflüsse des Sonnenwinds gegenüber interstellaren Einflüssen dominieren, erstreckt sich bis weit über die Bahnen der Planeten hinaus – nämlich drei- bis viermal so weit wie der Abstand zwischen Sonne und Neptun, dem äußersten unserer Planeten.

1.2 Die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre

Wieso sieht die Sonne so unterschiedlich aus? Das Plasma auf der Oberfläche und in der Atmosphäre der Sonne kann sehr unterschiedliche Zustände annehmen. Die Temperatur in der Sonnenatmosphäre variiert stark: die Oberfläche, die Photosphäre, ist mit ungefähr 6000 Grad Celsius relativ kalt. Innerhalb der darüberliegenden Chromosphäre, die sich bis zu 6000 Kilometer über der Oberfläche erstreckt, nimmt die Temperatur etwas ab. Doch kurz darauf passiert etwas Unerwartetes: In der Korona, die direkt an die Chromosphäre anschließt und sich bis Millionen von Kilometern ins All erstreckt, steigt die Temperatur plötzlich auf mehrere Millionen Grad Celsius an. Eigentlich würde man erwarten, dass die Temperatur mit zunehmendem Abstand zur Energiequelle, dem Kern der Sonne, abnimmt. Warum die Sonnenkorona nach außen hin heißer, statt mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche kälter wird, ist eine wichtige Frage in der aktuellen Forschung. Unabhängig von der Frage, wie diese Temperaturen entstehen, wissen wir, dass sich die Zustände der Atome im Sonnenplasma durch die verschiedenen Temperaturen ändern – Elektronen besetzen bei verschiedenen Temperaturen und Gasdichten andere Schalen in ihrem Atom oder können ihr Atom sogar vollständig verlassen, wodurch sich der Ionisationsgrad des Plasmas verändert. Durch diese Unterschiede emittiert und absorbiert das Gas je nach Zustand unterschiedliche Strahlung. Zusätzlich wird die ausgesendete Strahlung durch den momentanen Bewegungszustand des Plasmas verändert. Ist die Atmosphäre sehr dynamisch, hat das Einfluss auf die Breite und die Wellenlänge der Spektrallinien. Genauso kann die Anwesenheit eines magnetischen Feldes die ausgesandte Strahlung beeinflussen. Auf diese Weise können Beobachter aus dem gemessenen Sonnenlicht in verschiedenen Wellenlängen Rückschlüsse auf die physikalischen Bedingungen in der Sonnenatmosphäre ziehen – doch dazu später mehr.

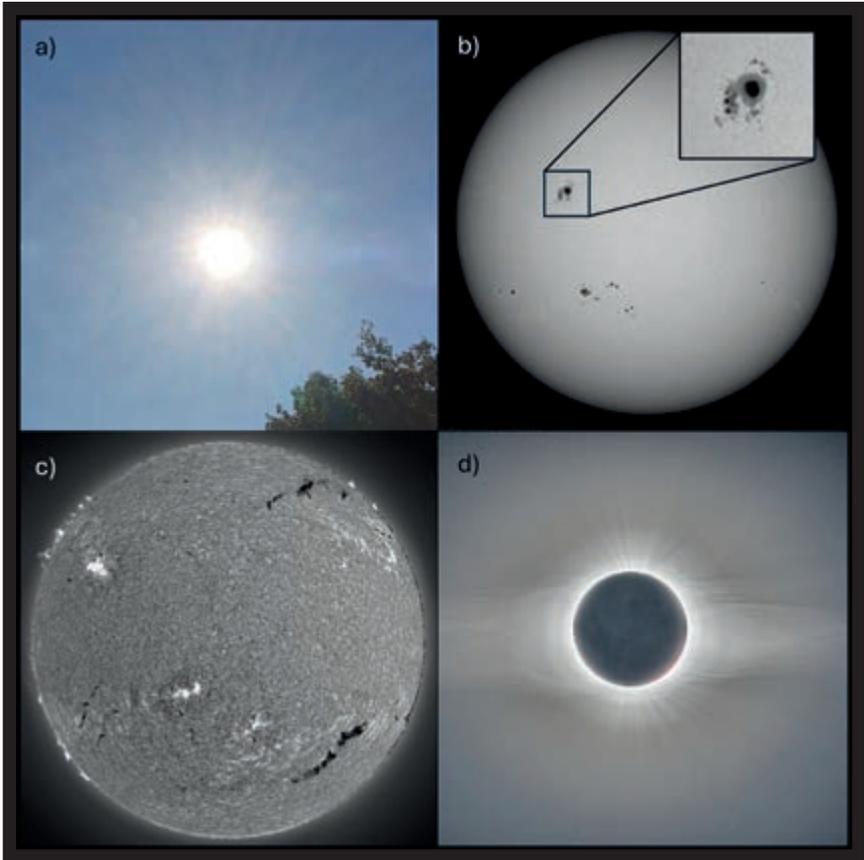


Abbildung 1: Die Sonne in verschiedenen Wellenlängen, aufgenommen mit verschiedenen Instrumenten. a) Mit bloßem Auge; Quelle: Lisa-Marie Zessner. b) Weißlicht-Aufnahme der Sonne mit einer Kamera des Solar Dynamics Observatory (SDO) im September 2014. Die Sonnenoberfläche erscheint weitestgehend als homogene Scheibe. Die dunklen Strukturen auf der Oberfläche sind Sonnenflecken; Quelle: Solar Dynamics Observatory/NASA (bearbeitet: die Nahaufnahme des Sonnenflecks wurde ergänzt.) c) H α -Aufnahme der Sonne mit dem Big Bear Solar Observatory in Kalifornien. Die H α -Strahlung entsteht durch einen Elektronenübergang im Wasserstoffatom und befindet sich im roten Bereich des sichtbaren Spektrums bei einer Wellenlänge von 656 Nanometern. Sie ist der Grund für die roten Strukturen, die man bei einer Sonnenfinsternis manchmal am Rand der Sonne ausmachen kann. Die Aufnahme zeigt deutlich, dass sich auf der Sonnenoberfläche vielfältige Strukturen befinden, die in Weißlichtaufnahmen (siehe Abb. 1b) nicht sichtbar sind. © BBSO/NJIT d) Aufnahme einer totalen Sonnenfinsternis im Jahr 2019. Der Mond schirmt das Licht der Sonnenscheibe ab, sodass Strukturen in der Sonnenkorona sichtbar werden, die durch das Magnetfeld der Sonne erzeugt werden; Quelle: ESA/CESAR/Observatorio Astrofisico di Torino.

Figure 1: The sun at different wavelengths, observed with different instruments. a) The sun as seen by eye; credit: Lisa-Marie Zessner. b) Observation in white light, made by a camera of the Solar Dynamics Observatory in September 2014. The surface of the sun mostly appears as a ho-

mogeneous disk. The dark structures on the surface are called sunspots; credit: adapted from Solar Dynamics Observatory/NASA (the zoom into the sunspot was added). c) H α -observation of the solar disk, taken by the Big Bear Solar Observatory in California. The H α -emission is created by an electron transition in the hydrogen atom which is located in the visible spectrum at 656 nanometers. This radiation is the reason for the red structures that are visible during a solar eclipse at the edge of the solar disk. The observation clearly shows that there is a variety of structures on the solar surface that are not visible in the white light observation (see fig. 1b). © BBSO/NJIT d) Observation of a total eclipse in 2019. The moon obscures the light of the solar disk. As a consequence, structures in the solar corona become visible. These structures are a result of the solar magnetic field; credit: ESA/CESAR/Observatorio Astrofisico di Torino.

Abbildung 2 zeigt, wie Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängen die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre sichtbar machen. Abbildung 2a) zeigt die Sonnenoberfläche, die Photosphäre. Die sichtbare Struktur nennt man Granulation und wird durch die Konvektion erzeugt, die in dem darunterliegenden Plasma stattfindet. Um dieses Phänomen zu verstehen, müssen wir auch die tieferliegenden Schichten der Sonne berücksichtigen. Im Innern der Sonne wird die durch Kernfusion erzeugte Energie durch unterschiedliche Prozesse nach außen geleitet: Während dies in der Nähe des Kerns durch Strahlungstransport geschieht, dominiert unter der Oberfläche die Konvektion. Wie in einem Kochtopf wird Plasma im Innern der Sonne erhitzt und steigt dann in Blasen an die Oberfläche. Dort kann die Wärme als Strahlung entweichen und kühlt das Plasma auf diese Weise ab. Das abgekühlte Plasma fließt dann wieder nach unten, wo es erneut erhitzt wird und der Prozess von Neuem beginnt. Die hellen Bereiche in Abbildung 2a) zeigen die heißen Zentren der Konvektionszellen. Die dunklen, netzwerkartigen Strukturen entsprechen dem kalten, absinkenden Gas. Die Oberfläche strahlt für uns sichtbares Licht aus: Die Abbildung wurde bei 789 Nanometern aufgenommen. Die Chromosphäre, die direkt über der Photosphäre liegt, ist in Abbildung 2b) zu sehen. Über dem Granulationsmuster in der Photosphäre schließt sich direkt die komplexe und sehr dynamische Feinstruktur der Chromosphäre an. Häufig beinhaltet diese feine, nadelförmige Strukturen, die die Oberfläche wie Haare bedecken. In diesen sogenannten Spikulen wird dichteres Gas der Chromosphäre nach oben geschossen. Die genaue Dynamik der Chromosphäre ist stark abhängig von der lokalen Konfiguration des magnetischen Feldes, da das Plasma permanent mit dem Magnetfeld interagiert. Um herauszufinden, warum die darüberliegende Korona so unerwartet heiß ist, ist es wichtig, die Prozesse in der Chromosphäre zu verstehen, durch die Energie und Masse von der Oberfläche in die Korona transportiert werden können.

Die Struktur der Korona ist in Abbildung 2c) zu sehen. Die gezeigte Strahlung mit einer Wellenlänge von 17,1 Nanometern wird von Gas mit einer Temperatur von ungefähr einer Million Grad Celsius emittiert. Zu sehen sind heiße Magnetbögen, die die komplette Korona durchziehen und die Bewegungsrichtung des Plasmas vorgeben. Da mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche das Sonnenplasma immer dünner wird, verändert sich der Einfluss des Magnetfeldes auf

das Plasma in den verschiedenen Schichten. In der Photosphäre ist das Gas noch dicht genug, um das Magnetfeld mit seiner Bewegung mitzuziehen. Mit sinkender Dichte lässt die Dominanz des Plasmas über das Magnetfeld nach, bis in der Korona das Magnetfeld die Bewegung des Plasmas vorgibt – dies führt zu den sehr unterschiedlich aussehenden Schichten der Sonne, die für uns in verschiedenen Wellenlängen des Sonnenlichts sichtbar werden.

1.3 Die magnetische Aktivität der Sonne und ihre Auswirkungen auf das Weltraumwetter

Das Magnetfeld der Sonne spielt für das Verhalten des Plasmas generell eine wichtige Rolle. Die magnetische Aktivität der Sonne folgt einem Zyklus von etwa

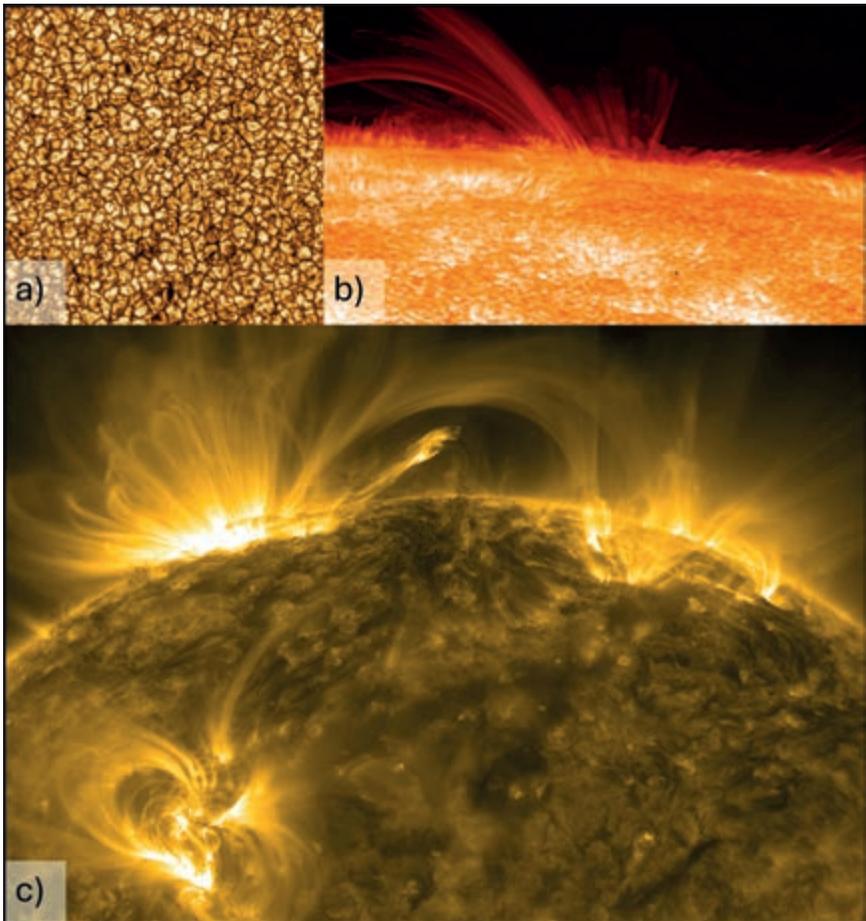


Abbildung 2: a) Ein Ausschnitt der Sonnenoberfläche, aufgenommen mit dem Daniel K. Inouye Solar Telescope in Hawaii. Die Strahlung mit einer Wellenlänge von 789 Nanometern zeigt die Granulationsmuster in der Photosphäre der Sonne, die durch Konvektion des darunterliegenden Gases zustande kommen; Quelle: NSO/NSF/AURA. b) Ein Bild der Chromosphäre, aufgenommen mit dem Hinode Solar Observatory. Es zeigt die Feinstrukturen, die sich über den Konvektionszellen in 2a) bilden. Diese Strukturen sind sehr dynamisch und entstehen durch Wechselwirkung des Plasmas mit dem magnetischen Feld; Quelle: Hinode JAXA/NASA/PPARC. c) Die Sonnenatmosphäre, aufgenommen in einer Wellenlänge von 17,1 Nanometern mit der Atmospheric Imaging Assembly (AIA) an Bord des Solar Dynamics Observatory der NASA. Zu sehen ist Millionen Grad heißes Plasma, das sich entlang der magnetischen Bögen in der Atmosphäre bewegt und so die Struktur des Magnetfelds teilweise sichtbar macht; Quelle: NASA/SDO/AIA.

Figure 2: a) Section of the solar surface taken by the Daniel K. Inouye Solar Telescope in Hawaii. The radiation at a wavelength of 789 nanometers shows the granulation pattern of the solar photosphere which is a result of the underlying convection; credit: NSO/NSF/AURA. b) Image of the chromosphere, taken by the Hinode Solar Observatory. It shows the structures that form above the convection cells in 2a). These structures are highly dynamic and are formed through interaction between the plasma and the magnetic field; credit: Hinode JAXA/NASA/PPARC. c) The solar atmosphere observed at a wavelength of 17.1 nanometers, imaged by the atmospheric imaging assembly (AIA) on board of the NASA Solar Dynamics Observatory. Visible is hot plasma with a temperature of a million degrees, which moves along the magnetic loops in the solar atmosphere and thereby partly resembles the structure of the magnetic field; credit: NASA/SDO/AIA.

elf Jahren. Innerhalb dieser Zeit verändert sich das Verhalten der Sonne drastisch, was Auswirkungen auf die Planeten in unserem Sonnensystem hat. In den aktiven Phasen der Sonne ist die Wahrscheinlichkeit, dass uns starke Sonnenstürme erreichen, wesentlich höher. Dass wir uns im Moment in einem Sonnenmaximum befinden, wurde zum Beispiel deutlich, als Polarlichter im Mai dieses Jahres auch in niedrigeren Breitengraden zu sehen waren – ein seltenes Ereignis, zumal sich die sogenannten Nordlichter (siehe Abb. 3a) ihrem Namen nach doch normalerweise auf höhere Breitengrade beschränken.

Wie entstehen diese Sonnenstürme, über die in letzter Zeit so viel berichtet wurde? Wenn magnetische Strukturen auf der Sonne sich dynamisch verändern, dann kann es passieren, dass diese instabil werden und ausbrechen. Dabei kann es zu starker Emission von Strahlung, sogenannten Flares, und koronalen Massenauswürfen kommen. Bei diesen Auswürfen werden geladene Teilchen des Sonnenplasmas und magnetische Felder ins All geschleudert. Ein Beispiel, wie diese Plasmaauswürfe aussehen können, ist in Abbildung 3b) und 3c) gezeigt. Wenn diese koronalen Massenauswürfe auf die Erde treffen, interagieren sie mit den Molekülen der Erdatmosphäre, wodurch es zum Beispiel zu buntleuchtenden Nordlichtern kommt. Diese sind allerdings nicht der einzige Effekt der Sonnenaktivität, den wir auf der Erde spüren. Normalerweise schützt uns das Magnetfeld der Erde vor dem Einfluss schädlicher Strahlung aus dem Weltall, da geladene Teilchen durch das Erdmagnetfeld an der Erde vorbeigeleitet werden. Wenn ein Sonnensturm aber stark genug ist, können geladene Teilchen tiefer in das Magnetfeld und die Atmosphäre der Erde eindringen. Dies kann gefährliche Einflüsse

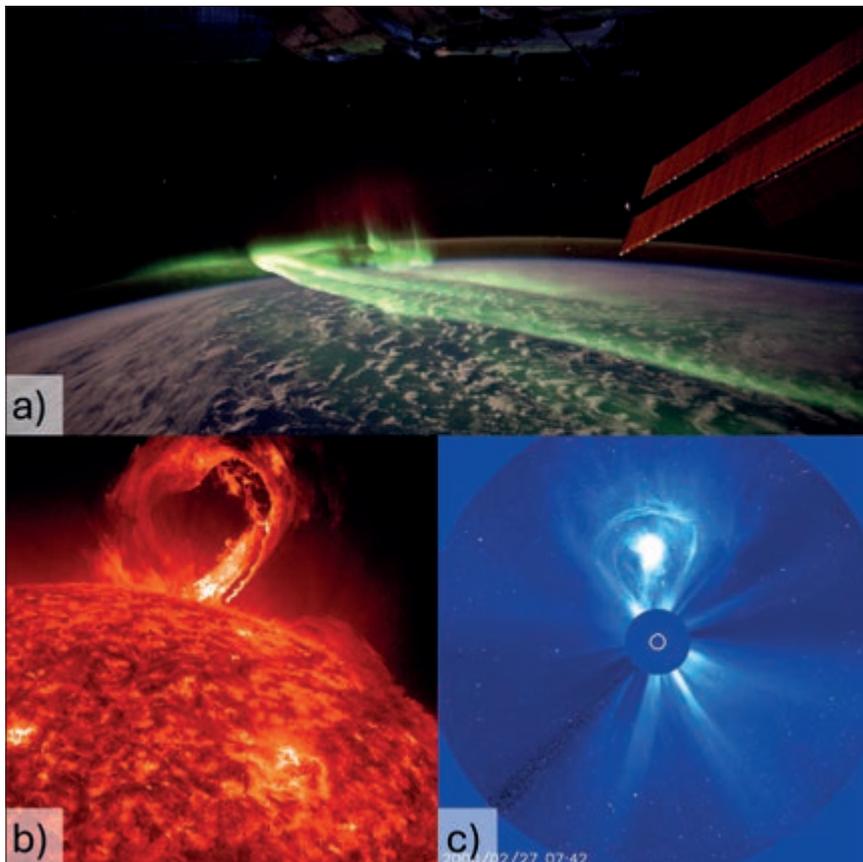


Abbildung 3: a) Polarlichter aus der Sicht der internationalen Raumstation ISS. Die bunten Lichter in der Erdatmosphäre sind nur einer von vielen Effekten, die auftreten können, wenn Sonnenstürme auf die Erde treffen; Quelle: ESA/NASA. b) Koronaler Massenauswurf, gemessen in einer Wellenlänge von 30,4 Nanometern mit AIA an Bord des Solar Dynamics Observatory. Diese Wellenlänge macht chromosphärisches Gas sichtbar, das bei der Eruption durch die Korona hindurch nach oben beschleunigt wird. Normalerweise wird ein Teil dieses Gases von der Sonne weg in die Heliosphäre geschleudert, während der restliche Teil auf die Sonnenoberfläche zurückfällt; Quelle: NASA/SDO/AIA. c) Koronaler Massenauswurf, aufgenommen mit dem LASCO Koronographen (BRUECKNER et al. 1995) an Bord des Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Bei einem Koronographen wird die Sonnenscheibe künstlich verdeckt, sodass das schwache Licht der Sonnenkorona aufgenommen werden kann. Der weiße Kreis in der Mitte des Bildes zeigt die Größe der Sonne unter der Verdeckung. Mit Koronographen kann die Bewegung koronaler Massenauswürfe nach dem Verlassen der Sonne untersucht werden. Der LASCO Koronograph kann Bereiche aufnehmen, die bis zu 32 Sonnenradien von der Sonnenoberfläche entfernt sind; Quelle: SOHO/LASCO (ESA & NASA).

Abbildung 3: a) Polar lights as seen from the International Space Station ISS. The colourful lights in the Earth's atmosphere are only one possible effect that can occur when a solar storm hits Earth; credit ESA/NASA. b) Coronal mass ejection observed at a wavelength of 30.4 nm, imaged by the AIA instrument onboard the Solar Dynamics Observatory. This wavelength visualizes

chromospheric gas that is accelerated upwards through the corona during the eruption. Typically, a fraction of this gas is ejected into the heliosphere while the rest falls back onto the solar surface; credit: NASA/SDO/AIA. C) A coronal mass ejection observed by the Lasco coronagraph (BRUECKNER et al. 1995) on board the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). A coronagraph artificially obscures the disk of the sun in order to observe the faint structures in the corona. The white circle in the center indicates the size of the sun below the cover. Coronagraphs are used to observe the motion of coronal mass ejections after they escape from the sun. The Lasco coronagraph can observe regions that are up to 32 solar radii away from the solar surface; credit: SOHO/LASCO (ESA & NASA).

auf unsere technische Infrastruktur haben. Die Instrumente und Solarpanels von Satelliten können beschädigt werden, was zu Störungen oder Ausfällen in Telekommunikation und GPS-Verbindungen führen kann. Eine starke Strahlungsbelastung während des Sturms erhöht außerdem die Gesundheitsrisiken für Astronautinnen und Astronauten auf der internale Raumstation ISS, vor allem wenn diese sich außerhalb der Raumstation befinden. In sehr starken Fällen kann auch unsere Stromversorgung gestört werden – einen großflächigen Stromausfall aufgrund eines Sonnensturms gab es zum Beispiel im März 1989 in Kanada. Auch Raketenstarts können gefährdet sein, da sich während des Sturms die Dichte der Atmosphäre verändert. Im Februar 2022 fielen 38 SpaceX Satelliten während des Raketenstarts aufgrund eines Sonnensturms zur Erde zurück (BERGER et. 2023).

Um uns vor diesen Auswirkungen zu schützen, ist es wichtig, so genau wie möglich vorherzusagen zu können, wann ein Sonnensturm die Erde trifft und wie stark dieser Sturm sein wird. Ein wichtiger Bestandteil dazu ist die genaue Analyse der auftretenden koronalen Massenauswürfe, sobald die Eruption auf der Sonne stattgefunden hat. Dafür sind Koronographen sehr hilfreich (siehe Abb. 3c). Normalerweise überstrahlt das Licht der hellen Sonnenscheibe die Strahlung, die von der Atmosphäre ausgesandt wird, sodass Strukturen innerhalb der Atmosphäre nur schwer zu sehen sind. Koronographen beinhalten dagegen eine künstliche Verdeckung der Sonnenscheibe innerhalb des Teleskops, sodass das Licht der Scheibe abgeblockt wird. Dadurch können ausbrechende Strukturen in der Atmosphäre besser sichtbar gemacht und ihre zeitliche Entwicklung aufgenommen werden, während sie sich von der Sonne entfernen. Dies ermöglicht Weltraumwettervorhersagen einige Tage bis Stunden vor dem Eintreffen des Sturms auf der Erde. Für eine langfristige Vorhersage ist dies aber nicht genug. Daher ist es ebenfalls notwendig zu untersuchen, wie aktive magnetischen Strukturen sich auf der Sonne bilden und entwickeln – und dazu ist es wichtig, die Zusammenhänge zwischen allen Schichten der Sonnenatmosphäre zu verstehen.

Die Wahrscheinlichkeit eines starken Sturms ist nicht immer so hoch wie im Moment. Am Anfang eines Sonnenzyklus befindet sich die Sonne in einem Zustand minimaler magnetischer Aktivität: Man sieht wenige bis keine Sonnenflecken auf der Oberfläche und es kommen nur vereinzelt Ausbrüche vor, die geladene Teilchen und magnetische Felder ins All schleudern. Dann nimmt die Aktivität zu, bis sie nach ungefähr fünf bis sechs Jahren das nächste Maximum erreicht.

Es werden magnetische Flussröhren im Inneren der Sonne generiert, die nach oben steigen, bis sie durch die Oberfläche brechen und als Sonnenflecken sichtbar werden. Während der Anstiegsphase sieht man mehr und mehr Sonnenflecken auf der Oberfläche auftauchen, die im Laufe des Zyklus immer näher am Äquator der Sonne auftauchen. Mit diesem Anstieg nimmt die Aktivität der Sonne zu: die Atmosphäre wird dynamischer und es kommt häufiger zu koronalen Massenauswürfen. Um den Aktivitätsverlauf verstehen und voraussagen zu können, ist es wichtig, die Entstehung und Entwicklung des Magnetfelds zu studieren. Es wird angenommen, dass ein Dynamoprozess das Magnetfeld im Innern der Sonne erzeugt, doch wie das genau passiert, wissen wir noch nicht. Auch dies ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschung. Insgesamt gibt es einiges, das wir über unsere Sonne noch nicht wissen. Daher beobachten wir sie rund um die Uhr mit erdgebundenen Teleskopen und Satelliten im All. Doch wie funktionieren diese Beobachtungen?

2 Die Sonne beobachten

Die Sonne als Forschungsobjekt steckt voller Herausforderungen. Anders als bei Laborexperimenten, ist jeder Zustand der Sonne und somit jede Beobachtung einzigartig und kann nicht beliebig oft reproduziert werden.

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Sonne und ihre Atmosphäre zu untersuchen. Mit Teilchendetektoren, die sich auf Raumsonden befinden, können direkt Größen wie Dichte, Temperatur, Geschwindigkeit und Zusammensetzung des Gases gemessen werden. Das erfordert, dass sich die Sonde zwischen den Partikeln, also zum Beispiel innerhalb des Sonnenwinds, befindet. Um einiges flexibler ist die indirekte Untersuchung des Plasmas durch das abgestrahlte Licht. Dies kann mit Teleskopen auf der Erde oder im All erfolgen. Im Folgenden werden drei Beobachtungsmöglichkeiten erläutert, die in der Sonnenforschung eingesetzt werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Messung des Lichtspektrums.

2.1 Das Lichtspektrum

Das Licht der Sonne ist voller Informationen. Mit sogenannten Spektrometern kann das Licht in seine Bestandteile aufgeteilt werden. Dabei enthält das Spektrum einen viel größeren Wellenlängenbereich als die Farben, die wir mit dem bloßen Auge wahrnehmen können. Der größte Teil des Sonnenlichts besteht aus Wärmestrahlung. Das ist die Strahlung, die von jedem Objekt ausgeht, abhängig von dessen Temperatur. Bei der Sonne reicht das Spektrum bis in den ultravioletten und Röntgenstrahlung-Bereich. Bestünde die Sonne nur aus Wasserstoff und Helium, sähe das beobachtbare Spektrum ganz anders aus. Es sind die Elemente in der Atmosphäre der Sonne, die uns eine genauere Erforschung unseres Heimatsterns

überhaupt erst ermöglichen. Der Schlüssel steckt in sogenannten Absorptionslinien. Das sind “Lücken” im Sonnenspektrum (siehe Abb. 4), bei denen zum Beispiel Magnesium- oder Kalziumatome in der Sonnenatmosphäre das Licht einer bestimmten Wellenlänge absorbieren. Dabei beinhaltet die exakte Position und Intensität dieser Absorptionslinien im Spektrum Informationen, die Rückschlüsse auf die Bedingungen in der Sonnenatmosphäre ermöglichen. So können manche Absorptionslinien benutzt werden, um die Temperatur oder Geschwindigkeit des Plasmas in der Sonnenatmosphäre zu bestimmen. Aber auch das Magnetfeld kann durch den sogenannten “Zeeman-Effekt” gemessen werden. Dabei führt das Magnetfeld zu einer Aufspaltung von Spektrallinien, sodass aus einer Linie zwei benachbarte Linien entstehen können. Die Stärke der Aufspaltung lässt auf die Stärke des Magnetfelds entlang der Sichtlinie schließen. Diese Informationen bieten bereits eine wichtige Grundlage für die Erforschung solarer und auch stellarer Phänomene.

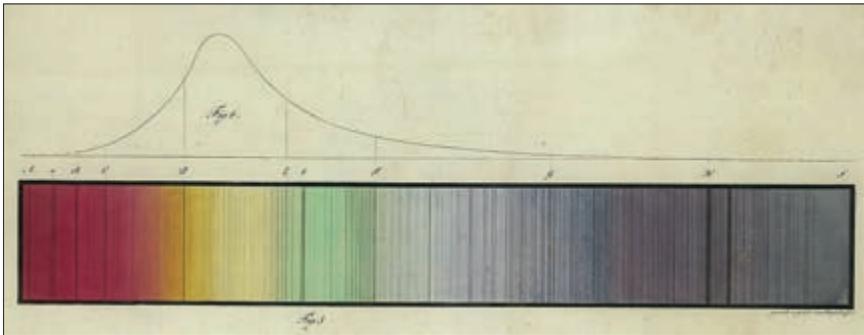


Abbildung 4: Fraunhofer-Linien. Gezeigt ist ein Ausschnitt des sichtbaren Spektrums mit den von Fraunhofer gemessenen Absorptionslinien der Sonne. Auf dieser Grundlage kann auf die chemische Zusammensetzung der Sonne und anderer Sterne geschlossen werden, was den Beginn der astronomischen Spektroskopie kennzeichnet. Die obere Kurve kennzeichnet die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Figure 4. Fraunhofer lines. Shown is a section of the visible spectrum containing the absorption lines measured by Fraunhofer. This allows to infer the chemical composition of the sun and other stars. This led to the begin of astronomic spectroscopy. The upper curve shows the light sensitivity of the human eye; credit: Joseph Fraunhofer - Deutsches Museum, Archiv, BN 43952 Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license.

2.2 Das Licht der Sonne beobachten

Die Absorptionslinien sind, abhängig von den Elementen und der Temperatur in der Atmosphäre, über einen großen Wellenlängenbereich verteilt. Das erschwert die Konstruktion der Messinstrumente erheblich. Auf der einen Seite kann ein Spektrometer immer nur einen bestimmten Wellenlängenbereich aufnehmen. Auf der anderen Seite blockiert die Erdatmosphäre einen Teil der Strahlung des

Spektrums. So wird insbesondere das ultraviolette Licht zum größten Teil durch die Atmosphäre auf dem Weg zur Erdoberfläche absorbiert. Von der Erde aus lassen sich am besten Wellenlängen bei etwa 500 Nanometern (grünes Licht) und Radiowellen mit einer Wellenlänge von Zentimetern bis Metern beobachten.

2.3 Erdgebundene Sonnentelkope

Teleskope auf der Erdoberfläche haben viele Vorteile. Die Teleskope können größer konzipiert werden, da sie nicht mit Hilfe einer Rakete ins Weltall befördert werden müssen. Zudem ist die Wartung einfacher und die Flexibilität bietet Raum für das Testen von Instrumenten. Ein prominentes Beispiel für ein solches Teleskop ist das Swedish Solar Telescope (SST) (siehe Abb. 5a) auf La Palma (SCHARMER et al. 2003), das sich auf einem ca. 2,4 Kilometer hohen Berg befindet. Neben der vielen Vorteile erdgebundener Teleskope ist neben dem limitierten Wellenlängenbereich ein weiterer Faktor nachteilig. Der Brechungsindex von Luft schwankt leicht mit der Dichte und der Temperatur. Da die Atmosphäre ständig in Bewegung ist, führt dies zu kontinuierlichen Verzerrungen in den Aufnahmen. Teleskope, die auf die Sonne ausgerichtet werden, müssen außerdem über Filter und Kühlungsmechanismen verfügen. Ohne diese Vorkehrungen würden die optischen Instrumente durch das gebündelte Sonnenlicht beschädigt werden.

2.4 Weltraumteleskope

Weltraumteleskope haben den Vorteil, dass sie nicht von der Erdatmosphäre und anderen Bedingungen wie Wetter oder Tageszeiten abhängig sind. Da sie in den Weltraum transportiert werden müssen, sind sie aber deutlich teurer. Ein Beispiel wäre der Interface-Region-Imaging-Spectrograph (IRIS) der NASA (DE PONTIEU et al. 2014). Dieser Satellit umkreist die Erde kontinuierlich und beobachtet die Sonne aus dem Orbit, wobei die gemessenen Daten in jedem Orbit an eine Downlink Station auf Spitzbergen gesendet werden. Der Fokus der Mission liegt auf der Erforschung der oberen Chromosphäre und der Übergangsregion zur Korona. Es gibt aber auch Sonden, die sich nicht in einer Erdumlaufbahn befinden. Dies ermöglicht es, die Sonne nicht nur aus kürzerer Distanz, sondern auch aus einem anderen Winkel zu beobachten. Ein Beispiel hierfür ist der 2020 gestartete Solar Orbiter der ESA (MARIRRODRIGA et al. 2021) (siehe Abb. 5b). Auf dem Weg zur Sonne verlässt die Sonde allmählich die Ebene, in der die Erde um die Sonne kreist. Dies ermöglicht die bis dahin ersten Beobachtungen der Sonnenpole. Das ist für die Erforschung der Magnetfelder und des damit verbundenen Sonnenzyklus von großer Bedeutung. Neben den vielen technischen Herausforderungen, die ein Sonnentelkop erfüllen muss, kommt bei Solar Orbiter noch eine weitere Komplikation hinzu. Auf ihrer Reise nähert sich die Sonde auf bis zu etwa 30 Millionen Kilometer an die Sonne an. Das entspricht einem Fünftel des Abstands zwischen

der Erde und der Sonne. Durch die Nähe zur Sonne ist die Sonde einer so großen Strahlung ausgesetzt, dass sie ohne weitere Vorkehrungen einfach verglühen würde. Um dem vorzubeugen, besitzt die Sonde einen Hitzeschild, der die Strahlung der Sonne absorbiert und die innenliegenden Instrumente schützt. Eine besondere Herausforderung an die Ingenieurinnen und Ingenieure waren hierbei die Luken im Hitzeschild, die während einer Messung geöffnet werden, um das Licht für die Messungen durchzulassen.

Die Daten von Solar Orbiter trugen bisher unter anderem wesentlich zum Verständnis der Entstehung von Sonnenwinden bei (CHITTA et al. 2024). Zudem konnten kleinere Strahlungsausbrüche (sogenannte „Lagerfeuer“) mit Solar Orbiter entdeckt werden (BERGHMANS et al. 2021), die ein möglicher Mechanismus zur Heizung der Sonnenkorona sein könnten.



Abbildung 5: a) Das Swedish-Solar-Teleskop auf La Palma, bearbeitet; Quelle: SST, Institute for Solar Physics in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias, Göran Scharmer. b) Künstlerische Darstellung von der Weltraumsonde Solar Orbiter auf dem Weg zur Sonne, bearbeitet; Quelle: Solar Orbiter: ESA/ATG medialab; Parker Solar Probe: NASA/Johns Hopkins APL.

Figure 5: a) The Swedish-Solar-Telescope on La Palma, edited; credit: SST, Institute for Solar Physics in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias, Göran Scharmer. b) Artist's impression of solar orbiter on its way towards the sun, edited; credit: Solar Orbiter: ESA/ATG medialab; Parker Solar Probe: NASA/Johns Hopkins APL.

2.5 Der Kompromiss: ein ballongetragenes Teleskop

Die oben genannten Teleskoparten haben Vor- und Nachteile. Wo die erdgebundenen Teleskope durch den eingeschränkten Wellenlängenbereich und Verzerrungen durch die Atmosphäre benachteiligt werden, sind es bei den Sonden im All oft die komplizierte Technik und die hohen Kosten. Ein Kompromiss liegt zwischen den beiden Extremen. Das Sonnenobservatorium Sunrise (SOLANKI et al. 2010; SOLANKI et al. 2017), ein Projekt des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung, wird von einem Heliumballon getragen, der bis zu 35 km über der Erdoberfläche in die Stratosphäre aufsteigt. Die Besonderheit liegt darin, dass der

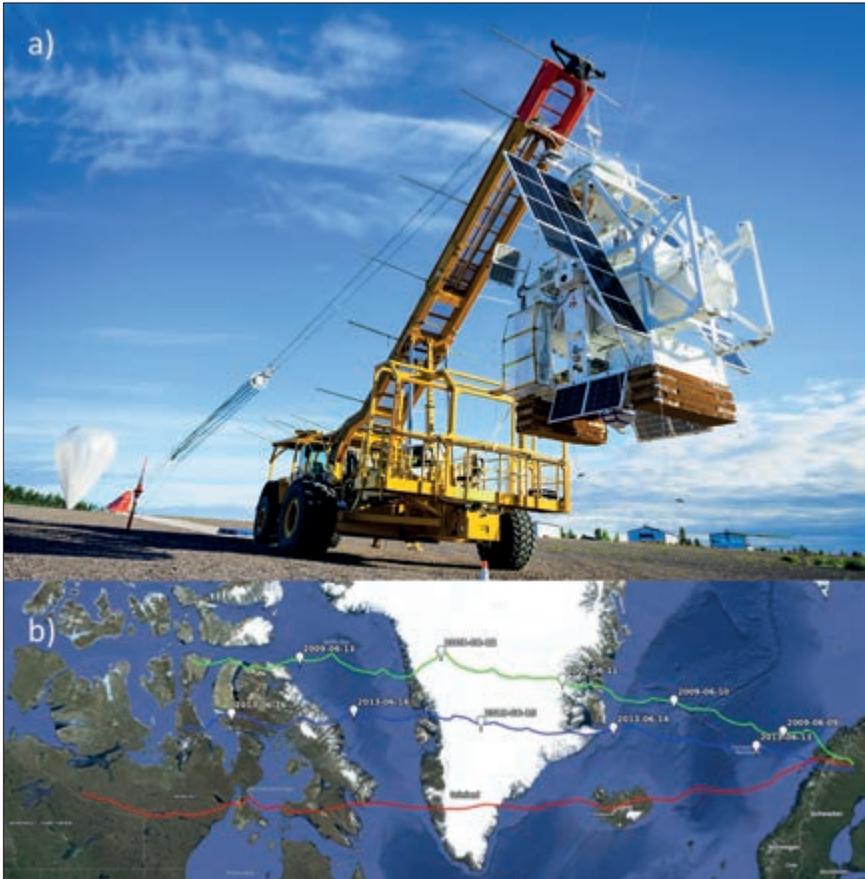


Abbildung 6: a) Das Sunrise III Teleskop. Zu sehen ist die Gondole mit der Teleskopaufhängung in der Mitte an einem Kran. Im Hintergrund ist der Ballon zu sehen, der gerade mit Helium befüllt wird. Bearbeitet. Quelle: SSC/Mattias Forsberg. b) Flugrouten von Sunrise I - III. Diese befinden sich in der Nähe der Polarregion, sodass das Teleskop während des Fluges im Sommer 24 Stunden am Tag mit Licht versorgt wird, bearbeitet; Quelle: MPS/Sunrise III (erstellt mit Google Maps).

Figure 6: a) Sunrise III Telescope. Shown is the gondola with the telescope mounting in the center. In the background, the balloon is visible which is being filled with helium; credit: SSC/Mattias Forsberg. b) flight trajectory of Sunrise I - III. The route of Sunrise III is close to the polar region to ensure that the instruments can observe the sun 24 hours per day; credit: MPS/Sunrise III (created with Google Maps).

Großteil der Erdatmosphäre sich somit unterhalb des Observatoriums befindet. Gleichzeitig ist der Spiegel des Teleskops größer als bei jedem Sonnenteleskop im Weltraum. Somit werden die Vorteile kombiniert und die Kosten sind zusätzlich signifikant niedriger als bei einem Weltraumteleskop, da unter anderem kein

Raketenstart notwendig ist. Das Teleskop befindet sich in einer Gondel (Abb. 6a) die an einem Heliumballon befestigt in Schweden gestartet wird. Von da an wird das Teleskop von stratosphärischen Winden getragen und fliegt etwa fünf bis sieben Tage, bevor es im Norden Kanadas kontrolliert niedergeht (Abb. 6b). Während dieser Zeit kann das Teleskop 24 Stunden am Tag die Sonne beobachten. Danach wird der Ballon abgetrennt und die Gondel fliegt, abgesichert durch einen Fallschirm, zurück auf die Erdoberfläche. Nach einer glücklichen Landung können alle Bestandteile, insbesondere der Spiegel des Teleskopes, wiederverwendet werden, wodurch weitere Kosten gespart werden. Die ersten beiden Flüge von Sunrise (2009 und 2013) lieferten hochaufgelöste Aufnahmen der Sonnenatmosphäre, die wesentlich zum Verständnis der solaren Magnetfelder und die Aufheizung der Sonnenatmosphäre beigetragen haben. Im Juli 2024 fand ein dritter Flug von Sunrise statt, bei dem sehr vielversprechende Daten aufgenommen wurden, unter anderem von mehreren Sonnenflecken und einem Flare. Das Team stellte sogar einen Rekord für die längste durchgängige Beobachtung mit der bisher höchsten Auflösung auf, die mehr als vier Stunden dauerte.

3 Beobachtungen interpretieren mit Hilfe von Simulationen

Nach all diesen Details kann man vor allem eines sagen: Die vielfältigen Prozesse auf der Sonne zu beobachten ist schwierig; die gewonnenen Daten dann physikalisch genau zu interpretieren sogar noch schwieriger. Sehr viele verschiedene Mechanismen beeinflussen die Strahlung, die unsere Instrumente messen können. Oft kann man aus Beobachtungen nicht eindeutig ableiten, welche physikalischen Eigenschaften das vermessene Sonnenplasma genau hat. Eine weitere Hilfe, um genauere Aussagen treffen zu können, bieten theoretische Modelle und Simulationen. Diese Modelle enthalten Annahmen über die Physik, die als relevant für die Zustände in der Sonnenatmosphäre eingeschätzt werden. Dabei können Parameter variiert und die Ergebnisse verglichen werden – sehen wir bei einem Ergebnis Ähnlichkeiten mit den Beobachtungen auf der Sonne, können wir analysieren, welche physikalischen Mechanismen und Parameter in der Simulation zu diesem Ergebnis geführt haben. Anders als bei Beobachtungen liefern Simulationen direkt die grundlegenden physikalischen Größen, die den Zustand des Sonnenplasmas beschreiben. Um Simulationsergebnisse mit Beobachtungen zu vergleichen, können synthetische Beobachtungen berechnet werden. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 7 zu sehen. Sie zeigt eine Simulation, die einen Ausschnitt der Sonnenoberfläche zeigt. Abbildung 7a) und b) veranschaulichen das magnetische Feld in verschiedenen Höhen der Atmosphäre, wie es auch in Beobachtungen der Sonnenscheibe gemessen werden kann. Abbildung 7c) und d) zeigen die synthetisch berechnete Strahlung der H α -Linie des Wasserstoffatoms, die verwendet wird, um Strukturen in der Chromosphäre zu untersuchen, wie sie

in Abbildung 1c) zu sehen sind. Diese simulierte Strahlung kann mit Beobachtungen der Sonne verglichen werden, die eine ähnliche magnetische Struktur wie die Simulation aufweisen. Das erlaubt Rückschlüsse darauf, welche der theoretisch berücksichtigten physikalischen Mechanismen auf der Sonne eine Rolle spielen. Ein weiterer Vorteil von Simulationen ist, dass sie die Sonne auf Skalen modellieren können, die kleiner als die momentan mögliche Auflösung in Beobachtungen ist. Damit kann konzeptionell untersucht werden, welche physikalischen Mechanismen auch auf kleineren Skalen für die Dynamik und Struktur der Atmosphäre eine Rolle spielen.

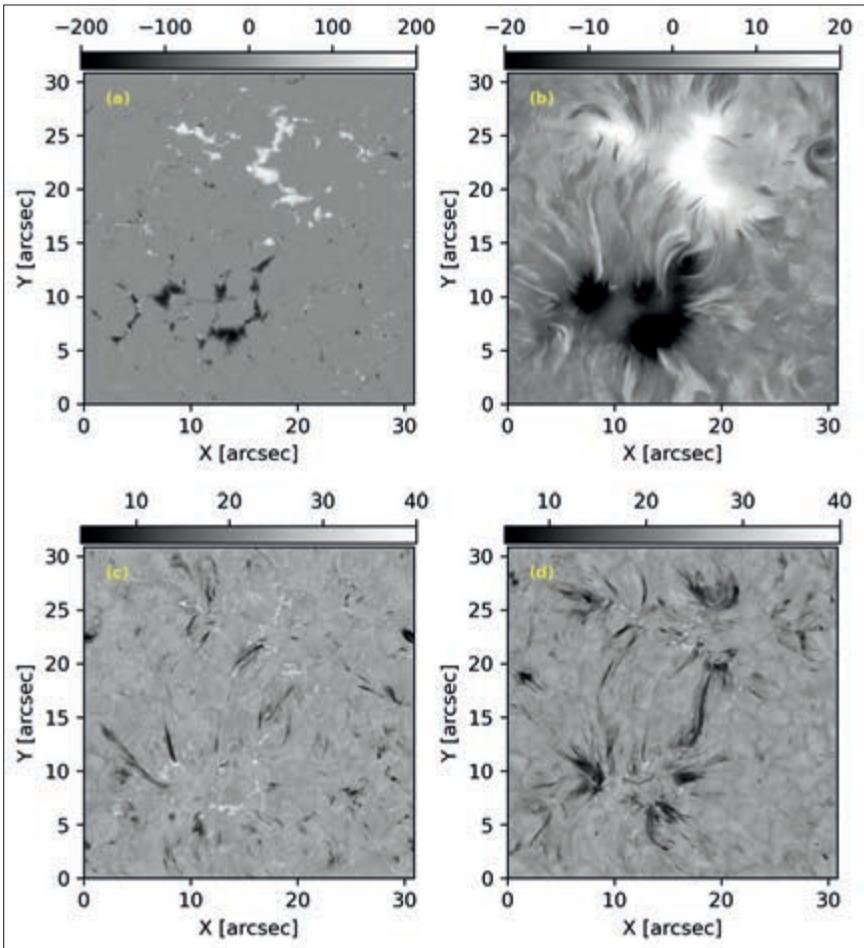


Abbildung 7: Ergebnisse einer Simulation der Sonnenatmosphäre mit dem Simulationscode MURaM (VÖGLER et al. 2005; REMPEL 2016; PRZYBYLSKI et al. 2022). Die Simulationsbox hat eine Breite und Länge von 24.000 km, was einem Siebzigstel des Sonnendurchmessers entspricht. Damit können kleinskalige Prozesse untersucht werden, die für die Dynamik der Atmosphäre essenziell sind. Der Blick ist hier direkt auf die Sonnenoberfläche gerichtet. Die Dimension der Achsen ist in Bogensekunden angegeben. Das ist eine gängige Einheit für den Öffnungswinkel der Kamera bei Weltraumbeobachtungen und entspricht einem 3600stel eines Grads. a) Struktur des magnetischen Feldes auf der Oberfläche der simulierten Sonne. b) Struktur des magnetischen Feldes bei einer Höhe von 1000 km über der Sonnenoberfläche. c) und d) simulierte Strahlung der H α -Linie des Wasserstoffs in zwei verschiedenen Wellenlängen, die Teil der Linie sind. Abbildung c) zeigt Strukturen, die sich in diesem Moment vom Beobachter wegbewegen, während Abbildung d) das Plasma zeigt, das sich auf den Beobachter zubewegt. Die schwarzen Strukturen zeigen Teile der Chromosphäre, die für den Energietransport von der Photosphäre in die Korona sehr bedeutsam ist. Unter diesen langgezogenen Strukturen ist das Granulationsmuster der Photosphäre, das in Abbildung 2a) zu sehen ist, noch teilweise sichtbar. Die sichtbaren Strukturen können mit Beobachtungen in der gleichen Wellenlänge verglichen und daraus Rückschlüsse auf den Zustand des Plasmas in Beobachtungen gezogen werden (eine Beobachtung der kompletten Sonnenscheibe im H α -Übergang ist zum Beispiel in Abbildung 1c) zu sehen); Quelle: MPS/Sanghita Chandra.

Figure 7: Results from a simulation of the solar atmosphere with the MURaM code (VÖGLER et al. 2005; REMPEL 2016; PRZYBYLSKI et al. 2022). The simulation box has a side length of 24,000 km in each direction, which corresponds to 1/70 of the solar radius. This allows to simulate small-scale processes that are essential for the dynamics of the solar atmosphere. The unit of the axes is measured in arcseconds. This is a common unit for the aperture angle of the camera in space observations. One arcsecond is equivalent to 1/3,600 of one degree. a) Structure of the magnetic field at the surface of the simulated sun. b) Structure of the magnetic field at an altitude of 1,000 km above the solar surface. c) and d) simulated H α -emission at two different wavelengths, that are part of the H α -line. Panel c) shows structures which move away from the observer, while panel d) shows structures moving towards the observer. The dark structures show parts of the chromosphere. This layer of the solar atmosphere is important for the energy transport from the photosphere into the corona. Below these elongated structures one can see the granulation pattern of the photosphere, which is also visible in Figure 2a). The visible structures can be compared with observations at the same wavelength to study physical conditions of the observation. An observation of the whole solar disk in H α -light can be seen in Figure 1c); credit: MPS/Sanghita Chandra.

4 Ausblick

In den letzten Jahrzehnten sind die Möglichkeiten, die Sonne zu erforschen, immer besser geworden. Stärkere Computerleistung erlaubt es uns nicht nur, mehr Messdaten aufzunehmen und zu verarbeiten. Durch sie können wir auch immer kompliziertere theoretische Simulationen durchführen, um die Physik der Sonne besser zu verstehen. Trotz immenser Fortschritte bleiben dennoch viele fundamentale Fragen unbeantwortet. Welche Mechanismen sorgen dafür, dass die Sonnenkorona so stark aufgeheizt wird? Es gibt verschiedene Theorien, die Antwortmöglichkeiten bieten, doch in vielen Fällen handelt es sich dabei um vergleichsweise kleinskalige Prozesse. Um ihre Plausibilität zu überprüfen, brauchen wir daher in Zukunft noch hochauflösendere Messungen. Diese könnten zum Beispiel von der gerade durchgeführten Sunrise III Mission kommen. Eine

weitere wichtige Frage dreht sich darum, wie das Magnetfeld der Sonne entsteht und aufrechterhalten wird. Dabei sind die Messungen von Solar Orbiter hilfreich – vor allem, sobald der Satellit nächstes Jahr anfangen wird, sich aus der Ekliptik herauszubewegen, um zum allerersten Mal die Pole der Sonne zu untersuchen. Die Ekliptik beschreibt dabei die Ebene, in der sich die Sonne und die Planeten bewegen. Generell ist unser Verständnis des solaren Dynamos auch sehr wichtig, um Eruptionen und Sonnenstürme vorherzusagen, die durch die magnetische Aktivität unserer Sonne erzeugt werden. Um die Vorhersage des Weltraumwetters zu verbessern, wird unter anderem die zurzeit in Planung befindliche ESA-Mission Vigil helfen: Dieser Satellit wird 2031 zum fünften Lagrange-Punkt fliegen – einem Punkt auf der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, der stets etwa 150 Millionen Kilometer hinter der Erde liegt. Dadurch wird es uns möglich sein, aktive magnetische Regionen auf der Sonne zu untersuchen, bevor sie von der Erde aus sichtbar werden.

Dies sind nur ein paar der Missionen, die uns in Zukunft andere und bessere Einblicke in die Vorgänge unserer Sonne gewähren werden. Wir können uns also auch weiterhin auf neue und faszinierende Erkenntnisse über unseren Heimatstern freuen.

5 Literatur

- BERGER, T.E., DOMINIQUE, M., LUCAS, G. et al. (2023): The Thermosphere Is a Drag: The 2022 Starlink Incident and the Threat of Geomagnetic Storms to Low Earth Orbit Space Operations. – *Space Weather*, **21** (3): e2022SW003330; doi: 10.1029/2022SW003330.
- BRUECKNER, G.E., HOWARD, R.A., KOOMEN, M.J. et al. (1995): The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). – *Solar Physics*, **162** (1): 357-402; doi: 10.1007/978-94-009-0191-9_10.
- SCHARMER, G.B., BJELKSJO, K., KORHONEN, T.K. et al. (2003): The 1-m Swedish solar telescope. – *Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*, **4853**: 341-350; doi: 10.1117/12.460377.
- DE PONTIEU, B., TITLE, A.M., LEMEN, J.R. et al. (2014): The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS). – *Solar Physics*, **289** (7): 2733–2779; doi: 10.1007/s11207-014-0485-y.
- MARIRRODRIGA, C.G., PACROS, A., STRANDMOE, S. et al. (2021): Solar Orbiter: Mission and spacecraft design. – *Astron. Astrophys.*, **646** / A121: 1-18; doi: 10.1051/0004-6361/202038519.
- CHITTA, L.P., ZHUKOV, A.N., BERGHMANS, D. et al. (2024): Picoflare jets power the solar wind emerging from a coronal hole on the Sun. – *Science*, **381** (6660): 867-872; doi: 10.1126/science.ade5801.
- BERGHMANS, D., AUCHÈRE, F., LONG D.M. et al. (2021): Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI. – *Astron. Astrophys.*, **656** / L4: 1-11; doi: 10.1051/0004-6361/202140380.
- SOLANKI, S.K., BARTHOL, P., DANILOVIC, S. (2010): Sunrise: Instrument, mission, data, and first results. – *Astrophys. J. Lett.*, **723** (2): L127-L133; doi: 10.1088/2041-8205/723/2/L127.
- SOLANKI, S.K., RIETHMÜLLER, T.L., BARTHOL, P. (2017): The Second Flight of the Sunrise Balloon-borne Solar Observatory: Overview of Instrument Updates, the Flight, the Data, and First Results. – *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **229** (1): 3-19; doi: 10.3847/1538-4365/229/1/2.

- VÖGLER, A., SHELYAG, S., SCHÜSSLER, M., CATTANEO, F., EMONET, T. & LINDE, T. (2005): Simulations of magneto-convection in the solar photosphere. Equations, methods, and results of the MURaM code. – *Astron. Astrophys.*, Bd. **429**, S. 335–351; doi: 10.1051/0004-6361:20041507.
- REMPEL, M. (2016): Extension of the MURaM radiative MHD code for coronal simulations. – *Astrophys. J.*, **834** (1): 10; doi: 10.3847/1538-4357/834/1/10.
- PRZYBYLSKI, D., CAMERON, R., SOLANKI, S.K. (2022): Chromospheric Extension of the MURaM code. – *Astron. Astrophys.*, **A91**: 1-23; doi.org/10.1051/0004-6361/202141230.

M. SC. LISA-MARIE ZESSNER
zessner@mps.mpg.de

M. SC. PATRICK ONDRATSCHEK
ondratschek@mps.mpg.de

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen
Justus-von-Liebig-Weg 3
37077 Göttingen
<https://www.mps.mpg.de>

Manuskripteingang: 21. August 2024

Bericht über den Nassauischen Verein für Naturkunde (NVN) im Jahr 2023

HELMUT ARNOLD

Unser Verein konnte auch 2023 mit überaus qualifizierte Vorträgen, Exkursionen und Publikationen bei leicht sinkender Mitgliederzahl und zufrieden stellender Kassenlage erneut beachtenswerte naturkundliche Beiträge leisten. Dafür danke ich allen Beteiligten sehr!

Mitglieder

Im Jahr 2023 sind leider verstorben:

Frau Maria Anna Lenaif
Herr Erich Kaiser
Herr Hans-Heinrich Schmidt
Herr Bernd Schmid
Herr Rainer Steppan
Ehrenmitglied Herr Erhard Zenker
bereits 2022 Herr Rudolf M. Sulzer

Wir werden ihnen ein ehrendes Andenken bewahren.

Neumitglieder

Diese Damen und Herren begrüßen wir herzlich als Neumitglieder:

Frau Birgit Banusch, Frau Nicole Bartenschläger, Frau Bettina Gies, Frau Sonn-
gard Hartmann, Herr Michael Kasper, Frau Dr. Ulrike Lux, Herr Jan Marx, Frau
Therese Eike Steinhoff, Herr Manfred Wagner

Mitgliederentwicklung bis 2023

31.12.2015	300 Mitglieder
31.12.2019	278
31.12.2020	272
31.12.2021	273
31.12.2022	263
31.12.2023	264

Die Mitgliederwerbung sollte deutlich verstärkt werden!

Jubilarinnen und Jubilare

Für ihre langjährige Zugehörigkeit zum NVN sei allen Mitgliedern gedankt. Besonderer Dank gilt den nachstehenden Jubilarinnen und Jubilaren:

25 Jahre Mitgliedschaft

Fr. Ruth Göbel (Agricola-Verein), Fr. Dr. Ursula Häußler, Fr. Eike Hintz, Hr. Helmut Kaltwasser-Reuß, Hr. Bernd Löhner, Hr. Manfred Lohrmann, Fr. Dr. Gudrun Radtke, Fr. Ursula Schäfer, Fr. Marianne Stengel-Rutkowski, Hr. Axel Zirkler

40 Jahre Mitgliedschaft

Hr. Michael Bress, Hr. Karl Ernst, Hr. Michael Sterrmann, Hr. Matthias Vollmer

60 Jahre Mitgliedschaft

Fr. Edda Krull, Fr. Hildegard Lemberg

70 (!) Jahre Mitgliedschaft

Ehrenmitglied Dr. Eberhard Kümmerle

Vorstand und Beirat

Den **Vorstand** bildeten im Jahr 2023: Dr. H. Arnold (1. Vors.), Dr. W. Ehmke (2. Vors.), Hr. H.-J. Freiling (Schriftführung; reduziert), Fr. S. Neugebauer (Presse), Fr. Dr. T. Reinhardt (Schatzmeisterin), Prof. Dr. B. Toussaint (Schriftleiter)

Im **Beirat** engagierten sich im Jahr 2023: Hr. F. Geller-Grimm, Fr. Dr. D. Heidelberger, Fr. S. Kridlo, Fr. Dr. E. Mietzsch, Fr. Dr. G. Radtke, Hr. W.-R. Wandke, Dr. M. Weidenfeller

Es fanden sieben **Vorstandssitzungen** statt, davon drei Sitzungen mit dem Beirat. Allen Mitwirkenden danke ich herzlich. Die Besprechungen fanden zunächst in der Alten Bibliothek statt, bis uns Herr Geller-Grimm einlud, die Treffen in seinem Arbeitsraum durzuführen. Ich danke ihm, das er diesen klassischen Ort für den Vereinsvorstand zur Verfügung stellt.

Publikationen

Die vielfältigen naturkundlichen Informationen des NVN werden mit den Jahrbüchern, den Mitteilungen und Homepage-Einträgen, den Programm-Flyern sowie vereinsinternen Rundschreiben und Pressemitteilungen publiziert.

Das Jahrbuch 2023, Band 144, gibt mit acht Beiträgen unser eigenes und ein bemerkenswertes wissenschaftliches Umfeld wieder, das unser Schriftleiter und Ehrenmitglied Prof. Dr. Toussaint seit vielen Jahren dankenswerterweise zu anregenden Beiträgen motivieren kann. Der Schriftleiter strebt zudem an, das Themenspektrum in den Jahrbüchern fachlich und auch räumlich noch zu erweitern.

Wie seither stehen die Jahrbücher via ZoBoDat (zobodat.at/index.php) einem internationalen Interessentenkreis zur Verfügung. Zudem erfolgt weiterhin ein internationaler Schriftentausch mit uns nahestehenden Institutionen, der von der Hochschul- und Landesbibliothek RheinMain (HSLB-RM) organisiert wird. Dieser Tausch mit bisher 160 Adressen soll erheblich geändert werden, auch aus Kostengründen. Nur die Institutionen, die uns ausdrücklich um ein print-Exemplar bitten, sollen weiterhin postalisch bedient werden. Alle Übrigen werden auf einen digitalen Informationsaustausch verwiesen. Diejenigen Publikationen der Partner, die von der HSLB-RM nicht mehr vorgehalten werden sollen, können von uns an die Bibliothek der Naturhistorischen Sammlungen des Museums abgegeben werden. Auf Wunsch werden Jahrbücher auch als pdf-Dokument an Interessenten abgegeben.

Die Mitteilungen 75 geben wieder einen bewährten Überblick über Vereinsmitglieder und -Aktivitäten, vor allem Exkursionen. Zudem stellen sie Informationen über Natur, Umwelt- und Klimaschutz aus naturkundlich orientierten Wissenschaften zusammen. Die Mitteilungen werden unmittelbar nach Erscheinen auf unserer Homepage www.naturkunde-online.de veröffentlicht.

Mitglieder, die noch keinen Internet-Zugang haben oder die Mitteilungen beim Lesen in der Hand halten möchten, erhalten diese weiterhin postalisch. Wir bitten jedoch die Mitglieder – auch aus Kostengründen – um eine entsprechende Prüfung ihres zwingenden Bedarfes und um eine entsprechende Mitteilung!

Alle Mitglieder sind sehr zu Beiträgen eingeladen; ein wissenschaftlicher Charakter ist ausdrücklich nicht erforderlich, wohl aber ein deutlicher naturkundlicher Bezug!

Finanzen

Erstmalig stellte die Schatzmeisterin nicht nur die aktuelle Finanzsituation, sondern auch den Wirtschaftsplan bei Fortschreibung der aktuellen Einnahmen und Ausgaben bis 2026 vor. Dank guter Rücklagen wurden 2023 noch alle Ausgaben finanziert. Doch bereits 2025 könnten die Rücklagen für einen Ausgleich nicht mehr ausreichen.

Mit unseren verfügbaren Mitteln finanzieren wir hauptsächlich unsere Druckwerke, d. h. Jahrbuch, Mitteilungen, aber auch Referenten und Flyer, förderten Projekte der Naturpädagogik sowie der Naturwissenschaftlichen Sammlungen und Ausstellungen.

Allen Spendern sei herzlich für Ihre, teilweise sehr großzügigen, Zuwendungen gedankt.

Gemeinsam mit den Freunden des Museums Wiesbaden unterstützen wir die Bienenhaltung auf dem Museumsdach.

Der Ausblick auf die Finanzlage zeigt, dass wir künftig besonders die Druckkosten und Unterstützungen der Naturkunde im Museum, aber auch alle anderen Ausgaben kritisch prüfen müssen.

Die Kasse wurde zeitnah von den Herren Revisoren B. Löhner und H. Heinz geprüft. Es wurde die tadellose und übersichtliche Kassenführung bestätigt, alle Ausgaben waren satzungsgemäß. Auf ihren Antrag hin erteilte die Versammlung der Schatzmeisterin – ihr sei herzlich gedankt – und dem Vorstand insgesamt Entlastung.

Veranstaltungen

Unsere Vorträge und Exkursionen konnten wie vorgesehen durchgeführt werden.

Exkursionen 2023

- 15.04 Dr. W. Ehmke
Frühjahrsblüher im Idsteiner Tiergarten
- 06.05 Dr. G. Radtke
Geologie im Steinbruch Dyckerhoff
- 13. 05. B. Hilgenhof
Vegetation und Landschaft im Bereich von Engweger Kopf und Scheibkopf bei Lorch
- 20. 05 B. Hilgenhof
Pflanzenwelt und Biotopstrukturen im Deponiegelände Dyckerhoffbruch
- 04. 06. P. Siersleben
Vogelwelt in Frauenstein
- 17. 06. A. König
Botanischer Garten Frankfurt
- 24. 06. Dr. W. Ehmke
Botanische Exkursion: Schutzacker in Schlangenbad-Hausen
- 01.07. Dr. H. Arnold
Naturkundetag: "Wasserwirtschaft im Hessisches Ried – Grundlagen und Herausforderungen"
- 17.07. Dr. R. Dambeck
Landschaftsökologie: Oberes Emsbachtal

- 16.08 Dr. G. Mittelbach
Thermalwasser in Wiesbaden
- 26.08 W. R. Wandke
Goldwaschen am Rhein
- 02.09. Dr. Ch. Redler und K. Bär
Geologie des Vogelsberges
mit RNG

Vorträge 2023

Im Jahr 2023 wurden zusammen mit den Naturhistorischen Sammlungen diese Vorträgen im Museum Wiesbaden angeboten.

- 10.01. Prof. Dr. Lutz Breuer, Chair of Landscape, Water and Biogeochemical Cycles
Wasser: eine Ressource der Natur
- 14.02 Dr. Andy Reymann, Museum Wiesbaden
Masken, Messer, Muschelkalk. Die kulturanthropologische Sammlung des Museums Wiesbaden.
- 14.03. Susann Steinmetzger und Felix Richter
Wie kommt der Tiger ins Museum? Präparation eines Bengal-Tigers
in Kooperaton mit den FdM
- 11.04. Andreas Brömser, DWD – Abt. Agrarmeteorologie
Phänologie – Die Pflanzenentwicklung in den vier Jahreszeiten und der Klimawandel
- 09.05. Prof. Dr. Thomas Schmitt, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie, Univ. Würzburg
Chemische Interaktionen bei Wespen – Kommunizieren, Erkennen und Konservieren
- 13.06. Jörg Schneider, Bürogemeinschaft für Fisch- und gewässerökologische Studien
Nicht alles im Fluss – Lachse und andere Wanderfische stehen unter Druck
- 11.07. Profin. Kathrin Theissingen, Uni. Koblenz-Landau
Ökonomie versus Ökologie: Das tragische Schicksal Europäischer Flusskrebse
- 12.09. Profin. Dr. Petra Döll, Institut für Physische Geographie, Goethe-Univ. Frankfurt
Wie wir Menschen die Wasserressourcen weltweit beeinflussen
- 10.10. Prof. Dr. Dr. Christoph Antweiler, Univ. Bonn
Anthropozän, das neue „Menschenzeitalter“ – Einflüsse des Menschen auf die Erdgeschichte

- 14.11. Jörg Burkard, Hessenforst
Bieber – die neuen Landschaftsgestalter in Hessen
- 12.12. Michael Denk, Hess. Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Abteilungsleiter Wasser und Boden
Zukunftsplan für hessische Wasserressourcen

Natur unter die Lupe genommen

W.-R. Wandke und W. Stroothenke leiten diesen an Sonntagen stattfindenden Workshop für Kinder von 8 bis 12 Jahren zu naturkundlichen Themen. Er wird in Zusammenarbeit mit den Naturhistorischen Sammlungen und der Museumspädagogik des Museums Wiesbaden seit 2015 erfolgreich durchgeführt. Im Jahr 2023 nahmen an den Kursen ca. 70 Kinder (Doppelnennungen möglich) teil.

- 26.03. Spielereien und Basteln mit Spiegeln
- 14.05. Blumenbestimmung im Rabengrund oder Goldsteintal mit Bestimmungsbuch und App
- 11.06. Rheingoldwaschen im Rhein in der Nähe von Oppenheim
- 02.07 Erkundung des Cyperus-Naturparks in Kastel
- 17.09. Bilder, die sich selber malen nach Runge
- 15.10. Bionik - von der Natur lernen
- 19.11. Schleifen von Anhängern aus Eierschalen, Muscheln Schnecken und bunten Steinen

Vereinstreffen

Am 15. Oktober 2023 trafen sich leider nur sehr wenige Mitglieder zum Vereinstreffen an der Nerobahn-Talstation. Nach einer Bergfahrt und Blick auf Wiesbaden ging es, am Dr. Koch-Denkmal vorbei, zur Einkehr im Restaurant Leichtweiß.

Treffen mit RNG und FdM

Zu unseren inzwischen traditionellen wechselseitigen Treffen mit der Rheinisch Naturforschenden Gesellschaft lud diese uns zu einer sehr informativen Führung über die Ausstellung "Bedeutung der Polymere" ein, die das Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz organisiert hat. Griechisch klang das sehr gelungene Treffen aus.

Am 26. September trafen sich NVN-Vorstandsmitglieder mit dem Vorstand der Freunde des Museums zum jährlichen allgemeinen Gedankenaustausch. Beide Seiten vereinbarten, sich gegenseitig Vorschläge für jeweilige Aktivitäten zu unterbreiten.

Öffentlichkeitsarbeit

Mitglieder und interessierte Öffentlichkeit informieren wir über unsere Publikationen und Veranstaltungen über die lokale und regionale Presse und unsere Homepage (www.naturkunde-online.de). Unsere Mitglieder erfahren auch direkt vorab mit elektronischer Post (E-Mail) aktuelle Aktivitäten. Somit ist eine rege Beteiligung unserer Vorträge und Exkursionen in der Regel gewährleistet.

Für Presse-Informationen zu unseren Exkursionen ist Frau Neugebauer verantwortlich, für unsere Vorträge Frau Kridlo. Sie hat am Vortragsprogramm insgesamt den allergrößten Anteil. Ihr sei herzlich dafür gedankt!

Unsere Veranstaltungen werden zudem vom Museum Wiesbaden, dem Umweltamt der Stadt Wiesbaden sowie von mit uns verbundenen Organisationen bekannt gemacht.

Eine gute Pflege und Aktualisierung unserer Homepage <http://www.naturkunde-online.de> stellt Frau Dr. Mietzsch zuverlässig sicher.

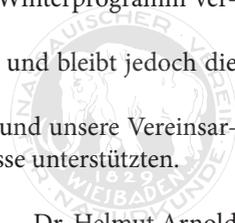
Unser Schriftleiter Prof. Dr. Toussaint zeichnet für unsere Schriften, Jahrbuch und Mitteilungen sowie unsere Flyer zum Sommer- und Winterprogramm verantwortlich.

Die wichtigste Werbung für unsere Veranstaltungen ist und bleibt jedoch die persönliche Ansprache.

Mein besonderer Dank gilt allen, die unser Programm und unsere Vereinsarbeit auch 2023 wieder mitgestaltet und mit ihrem Interesse unterstützten.

3. Juni 2024

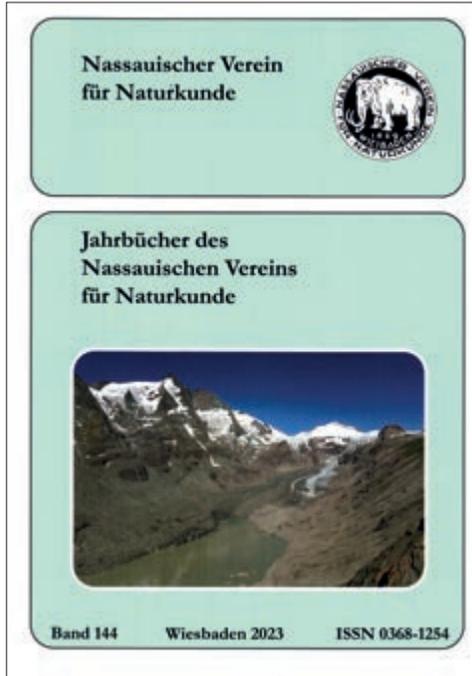
Dr. Helmut Arnold



Jahrbücher des NVN, Bd. 144 (2023)

Jb. nass. Ver. Naturkde., 144: 243 S., 83 Abb., 11 Tab., 6 Taf.; Wiesbaden 2023

ISSN 0368-1254, Softcover, 15 x 12 cm, Ladenpreis 12,00 €



Die acht Fachbeiträge dieses Jahrbuchs, das insgesamt 248 Seiten umfasst, beinhalten wiederum ein breites Themenspektrum. Im ersten Beitrag informieren Dr. Andreas Kellerer und Prof. Dr. Gerhard Karl Lieb über die klimagesteuerte Entwicklung von Gletschern und Permafrost in den österreichischen Alpen. Der zweite Beitrag von Dr. Thomas Vorderbrügge ist dem Thema Boden und Bodenschutz gewidmet und macht deutlich, dass Klimaschutz und Bodenschutz zusammen betrachtet werden müssen. Auch der dritte Beitrag hat den Klimawandel im Focus, die Autorin Marie-Louise Faber macht sich Sorgen über dessen Auswirkungen auf Bäume im historischen, dem Denkmalschutz unterliegenden Rudolf-Goethe-Park in Geisenheim. Der folgende Beitrag von Jessica Algenstaedt und Dr. Rainer Dambeck beleuchtet die Böden im Oberen Emstal bei Glashütten (Hochtaunuskreis), die Aussagen zur historischen Land- und Waldwirtschaft im Mittelalter zulassen. Der Taunus ist auch Gegenstand des fünften Beitrages, der Botaniker Prof. Dr. Rüdiger Wittig befasst sich mit Pflasterritzen als Standorte verwilderter Gartenpflanzen. Im sechsten Beitrag zeigt Prof. Dr. Kurt Kotschal

auf, wie aus dem Wolf der Hund wird und wie zwischen ihm und dem Menschen ein gutes Vertrauensverhältnis aufgebaut werden kann. Im siebten Beitrag berichtet Dr. Ulrich Flick von neu gefundenen Taxa einer Trilobitengattung im Greifensteiner-Kalk in der Nähe von Bad Endbach. Und schließlich kommen auch die Hymenopterologen Dr. Ulrich Frommer und Hans Bahmer zu Wort, sie dokumentieren die Stechimmenfauna in Gießen.

Auf diese Fachbeiträge folgt der Rechenschaftsbericht des Vereinsvorsitzenden Dr. Helmut Arnold für das Jahr 2022.

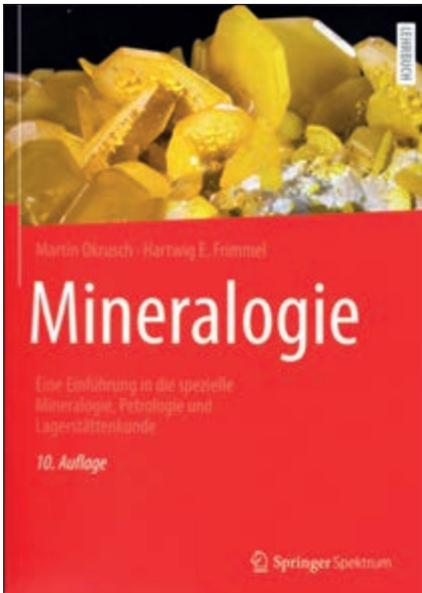
In der Rubrik „Neue Publikationen“ wird der im Jahr 2022 erschienene Band 143 des Jahrbuchs des Nassauischen Vereins für Naturkunde vorgestellt.

Der Band endet mit den Rezensionen von sieben Fachbüchern. Deren Titel sind „Die Sprache der Bienen“, „Wildnis in Frankfurt“, „Eiszeit– Mensch, Natur, Klima“, „Fische. Anatomie, Physiologie, Lebensweise“, „ Geologie rund um das Siebengebirge“, „Einführung in die Sedimentologie“ und „Kochbuch der Erde“, eine etwas andere Darstellung der geologischen Verhältnisse im Mainzer Becken.

Wer Genaueres über die genannten Beiträge und auch über die Beiträge in früheren Bänden des Jahrbuchs erfahren möchte, kann sich diese neben anderen Publikationen des Vereins auf der Homepage des Nassauischen Vereins für Naturkunde (www.naturkunde-online.de) kostenlos herunterladen. Außerdem werden seit 2019 unsere Publikationen auch bei ZoBoDat publiziert, einer international ausgerichteten digital organisierten biogeographischen Datenbank mit Sitz am Biologiezentrum des Oberösterreichischen Landesmuseums in Linz (<https://www.zobodat.at>). Schließlich sind die im Laufe der Vereinsgeschichte seit 1842 (Jahrbuch ab 1844) bis heute herausgegebenen Publikationen als PDF-Dateien als Gesamtausgabe auf einer DVD enthalten, die beim Verein kostenpflichtig bestellt werden kann. Bei Versand betragen die Kosten für Vereinsmitglieder derzeit € 11,50, für Nichtmitglieder €16,50 pro DVD, zuzüglich € 3,50 Versandkosten.

**MARTIN OKRUSCH & HARTWIG E. FRIMMEL (2022):
Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie,
Petrologie und Lagerstättenkunde, 10. Aufl.**

XI, 843 S., 108 s/w u. 410 farb. Abb., 64 Tab.; Berlin (Springer Spektrum)
ISBN 978-3-662-64063-0, Hardcover, 21,0 x 27,9 cm, Ladenpreis 59,99 €



Das von Siegfried Matthes ursprünglich konzipierte und erstmals 1983 herausgegebene, später von Martin Okrusch fortgeführte Buch „Mineralogie“ liegt jetzt als 10. Auflage vor. Obwohl die aktuelle Fassung stark von Hartwig Frimmel, Martin Okruschs Nachfolger und ebenfalls Würzburger Mineralogie-Professor, geprägt ist, sich von den früheren Ausgaben durch eine komplette Überarbeitung des Textes und der Abbildungen sowie Neugestaltung ganzer Kapitel unterscheidet, blieben die Autoren der Grundidee eines Lehrbuchs treu.

Das Buch gliedert sich in die vier großen Blöcke I bis IV mit insgesamt 33 Kapiteln. Jedes Kapitel endet mit einer Liste ausgewählter Literatur und ebenso einheitlich sind die Einleitung in das

jeweilige Kapitel sowie Infoboxen, Tabellen und mathematische oder chemische Gleichungen farblich unterlegt. Diese konsequente Strukturierung im Layout des Buches spiegelt sich auch im gelungenen systematischen Textaufbau wider.

Im Block I werden grundlegende Begriffe aus den Bereichen Kristallographie, (u. a. Kristallmorphologie und -struktur, Chemie, Physik und Optik der Kristalle), Mineralogie (u. a. Mineralbestimmung, Vorkommen und Ausbildung der Minerale) und Petrologie (u. a. Mineralgehalt der Gesteine in Abhängigkeit von der Gesteinschemie, geologischer Verband, gesteinsbildende Prozesse sowie Mineral- und Erzlagerstätten) erläutert.

Block II ist der Systematischen Mineralogie gewidmet. Dabei liegt der Fokus auf der Genese von Gesteinen und Lagerstätten. Ausführlich beschrieben werden die Strukturen der Kristalle und ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften, Stabilitätsbedingungen im Hinblick auf endogene und exogene Wirkkräfte und Einflüsse, Vorkommen, Bedeutung und Verwendung. Vorgestellt werden die Mineralgruppen: Elemente – Sulfide, Arsenide und komplexe Sulfide – Halogenide – Oxide und Hydroxide – Karbonate, Nitrate und Borate – Chromate, Mo-

lybdate und Wolframate – Phosphate, Arsenate und Vanadate – Silikate. Letzteren kommt eine besondere Bedeutung zu, weil sie mit mehr als 50 Vol% die am weitesten verbreitete Mineralgruppe der Erdkruste sind. Charakteristische Vertreter speziell dieser Gruppe werden mit ihren Eigenschaften vorgestellt.

Der mit 422 Seiten umfangreichste Block III macht die Hälfte des Buches aus und befasst sich mit der Petrologie sowie den Mineral- und Erzlagerstätten und kommt damit dem wieder erstarkten gesellschaftlichen Interesse an der Versorgung mit mineralischen Rohstoffen entgegen.

Sein erster, mit 200 Seiten umfangreichster Teil (Kap. 13–24) ist den magmatischen Gesteinen gewidmet, nämlich den sich durch Chemismus und Mineralbestand doch erheblich voneinander unterscheidenden Plutoniten, Vulkaniten und subvulkanischen Intrusivkörpern. Die Gesteine werden nach ihrer Erscheinungsform und den sie bildenden Mineralen klassifiziert. Wichtige Vertreter werden im Detail beschrieben, wobei besonders auf die Genese von Basalt und Granit eingegangen wird. Der Fokus dieses Teils von Block III liegt auf der chemischen Zusammensetzung und weiteren Eigenschaften von Magmen, wobei die Differentiation von Magmen und die in magmatischen Modellsystemen angestellten Experimente im Vordergrund stehen. Abschließend werden die sehr unterschiedlichen Mineral- und Erzlagerstätten vorgestellt und ihre Entstehung an ausgesuchten Beispielen näher erläutert.

Mit nur 44 Seiten Umfang werden im zweiten Abschnitt (Kap. 25) die klastischen, chemischen, biochemischen Sedimente und Sedimentgesteine ausgesprochen stiefmütterlich behandelt, wie in früheren Auflagen auch schon. Aber Matthes war Mineraloge, Okrusch und Frimmel (eigentlich studierter Geologe, aber Lehrstuhlinhaber für Mineralogie), sind es ebenso, für sie ist Sedimentologie bei den Kollegen aus dem Bereich Geologie verortet. Angesprochen werden u. a. Transport, Gefüge sowie Korngrößenverteilung der Sedimente und deren Verfestigung durch Diagenese und niedergradige Metamorphose, Bildung von Seifenlagerstätten, Anreicherung von Eisen- und Manganverbindungen in Sedimenten und Sedimentgesteinen sowie die Entstehung von Phosphatgesteinen und Evaporiten.

Der letzte Teil von Block III (Kap. 26–28) befasst sich auf 178 Seiten mit den metamorphen Gesteinen. Zunächst werden die durch Metamorphose veränderten Ausgangsgesteine und die Art der Metamorphose beschrieben und erläutert, welche geologischen Prozesse wie und wo eine Metamorphose auslösen. Weiterhin wird die Nomenklatur der Metamorphite diskutiert und darüber informiert, welches Gefüge und welche Minerale für die sehr unterschiedlichen metamorphen Gesteine wie Gneis oder Hornfels typisch sind, wie es zur Bildung von Migmatiten kommt und was unter Metasomatose zu verstehen ist. Das Hauptinteresse der Autoren gilt der ausführlichen Darstellung der Phasengleichgewichte und Mineralreaktionen in metamorphen Gesteinen sowie den metamorphen Faziesserien, die beispielhaft inkl. Mineralparagenesen dargestellt werden.

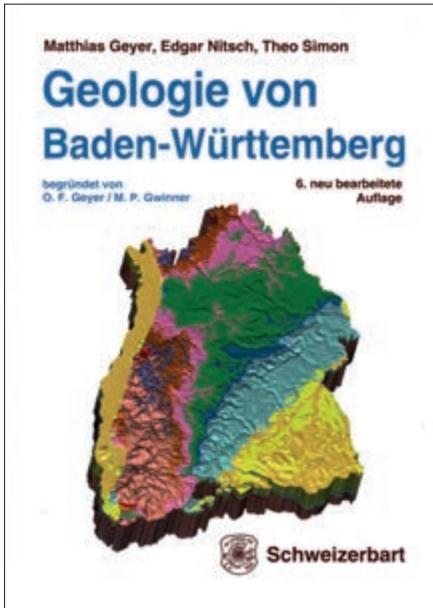
Der letzte Block IV trägt neuen Erkenntnissen der die Erde, ihren Mond, die anderen Planeten unseres Sonnensystems mit ihren Satelliten, die kleineren planetoiden Körper und Meteoriten betreffenden Astrochemie und -physik Rechnung, wobei die Erde im Vordergrund steht. Für den Leser von großem Interesse dürfte sein zu erfahren, wie die chemischen Elemente in unserem Sonnensystem entstanden sind. Abschließend werden die Prozesse erläutert, die zu dessen Entstehung geführt haben.

Das auf hohem wissenschaftlichen Niveau fachlich breit angelegte und neuen Erkenntnissen Rechnung tragende Buch ist auf den universitären geowissenschaftlichen Lehrbetrieb und auch etwas darüber hinaus zugeschnitten. Es ist aber auch ein Gewinn für Fachleute in Behörden, in Forschungsinstitutionen und für geowissenschaftliche Freiberufler, allerdings sind Grundkenntnisse in Geologie, Experimentalphysik, anorganischer und möglichst auch physikalischer Chemie wünschenswert. Wegen seiner umfangreichen Bebilderung ist dieses Buch aber auch wertvolles Handwerkszeug für interessierte Mineraliensammler.

Benedikt Toussaint

MATTHIAS GEYER, EDGAR NITSCH & THEO SIMON (2023): Geologie von Baden-Württemberg, 6. neu bearb. Aufl.

XII, 638 S., 198 Abb. 4 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart)
ISBN 978-3-510-65526-7, Hardcover, 18,2 x 24,7 cm, Ladenpreis 89,90 €



Die in 2023 erschienene 6. Auflage der inzwischen als Standardwerk etablierten „Geologie von Baden-Württemberg“ ist im Vergleich zur 2011 erschienenen Vorgängerauflage in Teilen erheblich überarbeitet worden, unter anderem auch im Hinblick auf eine Anpassung an den fortschreitenden Kenntnisstand und Berücksichtigung neuer Forschungsergebnisse vor allem zu regionalen Sonderentwicklungen. Ebenso musste die stratigraphische Nomenklatur an die überregionale/internationale Vereinheitlichung angepasst und die regionalen Bezeichnungen aktualisiert werden.

Das einleitende Kapitel 1 von fünf großen Themenblöcken beleuchtet die mehr als zwei Jahrhunderte überspannende Erforschungsgeschichte der geo-

logischen Verhältnisse in Baden-Württemberg. Unter Hinweis auf die vielen herausragenden Wissenschaftler in der Vergangenheit wird darauf aufmerksam gemacht, dass die heutigen Geologen fast noch mehr sich herausfordernden Aufgaben stellen müssen, so z. B. Sicherung der Rohstoffversorgung oder Schutz des Grundwassers.

In Kapitel 2 wird eine kurz gefasste Übersicht über die Naturräume des Landes, den allgemeinen geologischen Bau zwischen Oberem Mantel und Kruste und die erdgeschichtliche Entwicklung gegeben. Die ältesten relativ gut dokumentierten Gesteine gehören der Cadomischen Epoche (ca. 700–ca. 470 Mio. J. vor heute) an, den Abschluss bildet die Neotektonische Epoche, die die Heraushebung des südwestdeutschen Raums seit dem Pliozän abbildet.

Die Darstellung der Gesteinsfolge und ihrer regionalen Sonderentwicklungen bildet den Hauptteil dieses Buches; dieses Kapitel 3 umfasst 396 von 638 Seiten, verteilt auf stark gegliederte fünf Textblöcke.

Das Unterkapitel 3.1 befasst sich zunächst mit dem Gesteinsbestand des zeitlich und petrologisch sehr unterschiedlich untergliederten Grundgebirges, dessen Entstehung im Zeitraum Jüngerer Proterozoikum–Unterkarbon (> 539– 320 Mio. Jahre vor heute) und der paläogeographischen, durch tektonische Großereignisse gekennzeichneten Entwicklung. Der Fokus liegt auf der Beschreibung der petrographischen Ausbildung, geochemischen Charakteristik und Mineralienführung u. a. m. der Gesteine sowie deren Alterseinstufung.

Die folgenden Unterkapitel 3.2 bis 3.5 sind dem Deckgebirge aus dem Zeitraum Oberkarbon bis Quartär zugeordnet. Allen gemeinsam ist zunächst ein kurzer Überblick über das räumliche und zeitliche Vorkommen der Gesteine, deren Entstehung, die Gliederung der Gesteinsabfolgen in Systeme, Serien und Stufen sowie über die wissenschaftliche Erforschung. Es folgen ausführlichere Erläuterungen zum paläogeographisch-tektonischen Rahmen und zur Klimaentwicklung in den jeweiligen geologischen Einheiten. Über die Gesteinsfolgen des Landes mit ihrer regionalen Faziesentwicklung, speziell über die im Gelände leicht identifizierbaren Formationen als Grundeinheiten der Lithostratigraphie, wurde umfassend informiert, auch über kleinere geologische Einheiten unter Angabe der Mächtigkeit, Bildungsbedingungen, Art der Lagerung, Fossilführung u. a. m.

Das Unterkapitel 3.2 befasst sich mit den nur gering verbreiteten jungpaläozoischen Formationen Oberkarbon, Rotliegend und Zechstein. Im Unterkapitel 3.3 werden die Formationen Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper der Germanischen Trias vorgestellt, deren Schichtglieder in Baden-Württemberg großflächig austreichen. Unterkapitel 3.4 hat die in Schwarz-, Braun- und Weißjura gegliederte Jura-Formation zum Gegenstand, deren Ablagerungen die höchstgelegenen Schichtstufen des Landes in der Schwäbischen Alb und ihres Vorlandes bilden und im Wesentlichen zwischen Klettgau und Nördlinger Ries zu Tage treten. Das Unterkapitel 3.5, mit 139 Seiten das umfangreichste, befasst sich mit dem Zeitraum Kreide bis Quartär. Da im Tertiär und insbesondere im Quartär abgelagerte Gesteinsfolgen und vulkanische Aktivitäten in Verbindung mit tektonischen Ereignissen und Klimaschwankungen ihre Spuren in der heutigen Landschaft hinterlassen haben, gehen die Autoren ausführlich auf das Werden der Landschaft und die dafür maßgebenden Prozesse ein (Unterunterkapitel 3.5.1). In der Folge wird dieser Überblick präzisiert, es werden die in der Landschaft auffallenden Vulkanite aus der Kreidezeit und hauptsächlich aus dem Tertiär beschrieben (3.5.2), ausführlich eingegangen wird auch auf die aus tertiären und quartären Sedimenten bestehende bis zu 4700 m mächtige Füllung des Oberrheingrabens (3.5.3) und ebenso auf die durch tertiäre und quartäre Sedimente geprägte Geologie des nördlichen Alpenvorlandes (3.5.4). Der Fokus liegt auf den oligozänen und miozänen Sedimenten des Molassebeckens, auch die jüngeren pliozänen und im Wesentlichen quartären Ablagerungen sowie geologischen Prozesse während des Pleistozäns und Holozäns werden angesprochen und ebenso der glaziale und periglaziale Formenschatz. Thematisiert werden weiterhin das Steinheimer Becken

und das Nördlinger Ries (3.5.5), vor rd. 14,9 Mio. Jahren durch einen Meteoriteneinschlag entstandene Impaktkrater, und ebenso die geologische Geschichte des Schwarzwaldes und des Schichtstufenlandes im Kanäozoikum (3.5.6).

In Kapitel 4 stehen der tektonische Bau und die Lagerung der Gesteine im Vordergrund. Es werden fünf Regionen beschrieben, die durch großräumige Störungen oder Flexurzonen abgegrenzt werden können und sich im Baustil deutlich unterscheiden. Es wird das Alter und die Entwicklung dieser in sich wieder differenzierten tektonischen Großstrukturen beschrieben, die das Ergebnis einer langen erdgeschichtlichen Entwicklung sind, in deren Verlauf sie unterschiedlichen, mehrfach in ihrer Orientierung und Intensität wechselnden Beanspruchungen ausgesetzt waren. Die besten Kenntnisse liegen vom tertiären und quartären Spannungsfeld vor, das im engen Zusammenhang mit der alpinen Kollisionstektonik steht. Entsprechend sind der interne Bau des Oberrheingrabens und die Auswirkungen der Heraushebung der Alpen im Bereich des Molassebeckens am besten erkundet. Abschließend informieren die Autoren über die ebenfalls gut dokumentierte Impakttektonik im Umfeld von Steinheim und Nördlingen.

Das abschließende Kapitel 5 befasst sich kritisch mit dem Menschen als geologischem Faktor. Das Buch nennt viele Beispiele, u. a. Abgrabungen zwecks Schaffung von Verkehrswegen, Auffüllungen aus Bauschutt oder in Form von Deponien, Schaffung von landwirtschaftlichen Flächen mit der Konsequenz verstärkter flächenhafter Bodenerosion, Generierung von Siedlungsflächen mit der Folge von Bodenversiegelung, Gewinnung von Steinen und Erden in Steinbrüchen, die bis in die jüngste Vergangenheit z. T. mit schadstoffhaltigen Abfällen verfüllt wurden, u. a. m. Ein Eingriff in die geologischen Verhältnisse stellt auch die Gewinnung von Industriemineralien und Metallerzen sowie die Förderung von Erdöl und Erdgas dar. Eingegangen wird auf die hydrogeologischen Verhältnisse in Baden-Württemberg, die Mineral- und Thermalwasservorkommen und die Möglichkeit, regenerative Energie durch Geothermie zu gewinnen. Das Kapitel 5 endet mit der Darstellung von Georisiken, z. B. durch Erdbeben, Hochwasser, Hangrutschung, Bergstürze oder Muren, und dem Hinweis auf wasserlösliche Gesteine im Untergrund, die Verkarstung oder Erdfälle zur Folge haben können.

Das Buch endet mit einer 128! Seiten umfassenden Literaturliste.

Das auf hohem wissenschaftlichem Niveau und trotzdem auch für Nichtfachleute gut verständlich geschriebene Buch „Geologie von Baden-Württemberg“ mit seinen zahlreichen aussagekräftigen meist farbigen Abbildungen und Karten, die alle graphisch hervorragend gestaltet sind, bietet einen guten Überblick über die Vielfalt der Gesteine in Baden-Württemberg, deren Alter und Entstehung sowie über ihren Fossilinhalt. Es richtet sich nicht nur an Geowissenschaftler an Hochschulen, in Beratungsbüros oder Fachbehörden, sondern liefert auch wertvolle Information für Geologiestudenten und im Geographieunterricht an Schulen. Nicht zuletzt wird es auch allen an der Erdgeschichte Interessierten empfohlen.

Benedikt Toussaint

WERNER GNATZY & JÜRGEN TAUTZ (2023): Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution. Faszinierend und bedroht

XVI, 256 S., 141 Abb.; Berlin, Heidelberg (Springer)

ISBN 978-3-510-662-66137-6, Softcover, 15,5 x 23,5 cm, Ladenpreis 24,99 €



Im Laufe der Evolution, die laut Fossilienfunden vor etwa 400 Mio. Jahren begann, haben die damaligen Ur-Insekten eine schier unglaubliche Formenvielfalt sowie funktionelle Raffinesse entwickelt und wurden zu entscheidenden Bindegliedern in den komplexen Netzwerken der Natur. In der Welt von heute steht es nicht gut für die Insekten, die anthropogene Umweltzerstörung greift empfindlich in die Ökosysteme unseres Planeten ein und gefährdet ihr Überleben, mit dramatischen Auswirkungen auch für uns Menschen. Auch vor diesem Hintergrund, aber nicht nur, haben die beiden Autoren dieses Buch geschrieben. Ihre Intention ist es, ihre Begeisterung für die Welt der Insekten an die breite Öffentlichkeit weiterzugeben.

Die neun Kapitel dieses Buches sind kurz, verständlich und unterhaltsam geschrieben und so konzipiert, dass sie der Leserin und dem Leser anhand zahlreicher Beispiele einen Einblick in die unglaublichen Leistungen der Insekten erschließen, der Einsatz modernster Techniken wie der Rasterelektronenmikroskopie (REM) ermöglicht einen Blick auf die in fantastischen Fotos dargestellten Klein- und Kleinststrukturen.

Das einleitende Kapitel 1 gibt einen knappen Überblick über die Tiergruppe der Insekten, ihre Formenvielfalt, ihren Bauplan, ihre Evolutionsgeschichte und ihre vielfältigen Spezialisierungen sowie auch über ihre Abhängigkeit von der Vegetation, die ihrerseits z. T. auch von den Insekten abhängig ist. Während das folgende Kapitel 2 noch eher allgemein z. B. über die Formenvielfalt der Insekten-
eier eingeht und Beispiele nennt, die Cuticula als ein weiteres Kennzeichen der Insekten vorstellt, Häutung und Ablauf der Metamorphose der Insekten sowie den Bauplan ihrer Flügel und deren Funktion erläutert, widmen sich die folgenden Kapitel 3 bis 8 eher Themen, die einige sehr auffallende Spezialisierungen zum Gegenstand haben, auf die detailliert eingegangen wird.

Gegenstand von Kapitel 3 ist die Färbung von Insekten und wie diverse Farbmuster entstehen. Kapitel 4 erklärt, warum Wasserläufer auf dem Wasser nicht untergehen, wie die Saugfüße der Gelbrandkäfer-Männchen die Paarung begünstigen, wie sich Wanzen gegen ihr eigenes Gift schützen, wie Facettenaugen mit Antireflexbelag auch bei Dämmerung gutes Sehen ermöglichen oder warum die Grundwanze auch unter Wasser leben kann. Kapitel 5 macht auf die Körperpflege der Gelbrandkäfer mittels eines Bakterien und Pilze tötenden Drüsensekrets aufmerksam. In Kapitel 6 wird erläutert, wie z. B. Blattschneiderameisen zu hohe CO_2 -Konzentration erkennen und was sie dagegen tun können, wie die Antennen der Kieferprachtkäfer als Rauchgasmelder fungieren, wie Grillen auf Änderung der Schwerkraft reagieren, wie die zu Schwingkölbchen zurückgebildeten Hinterflügel der Fliegen den Flug stabilisieren oder wie IR-sensible Sinnesorgane der Kieferprachtkäfer die Ursache dafür sind, dass diese durch Waldbrände magisch angezogen werden. In Kapitel 7 werden Beispiele für Feindabwehr und Befreiungsstrategien der Insekten vorgestellt. Zu nennen sind u. a. die Stinkdrüsen der Wanzen, die in den Prothoraxdrüsen der adulten Gelbrandkäfer bei Fischattacken quasi als k.o.-Tropfen produzierten Steroide, der Kopf des Totenkopfschwärmers, der als einziger Schmetterling Piepstöne erzeugt, oder wie der Bombardierkäfer gepulste heiße Gasgemische abgibt und sich so Angreifer vom Leibe hält. In Kapitel 8 wird auf die Strategien der Insekten auf Partnersuche eingegangen und beantwortet, welche Funktion diesbezüglich die bei Männchen und Weibchen unterschiedlichen Stielaugen der nach diesen benannten Stielaugenfliegen haben, wie die Männchen der Nachtigall-Grashüpfer mit akustischen Signalen die Weibchen locken, wie Leuchtkäfer versuchen, mit Lichtsignalen eine Partnerin zu finden, welches Gesangsrepertoire Grillenmännchen haben oder wie Prachtbienenmännchen Duftstoffe bei der Partnersuche einsetzen. In Kapitel 9 werden im Hinblick auf Nahrungserwerb und Beutefang beispielhaft erläutert u. a. die vibrierende Säge der Blattschneiderameise, der tödliche Fangschlag der Gottesanbeterinnen, der Saugrüssel der Stechmückenweibchen, mit dem das Blut der Opfer angezapft wird, oder die Symbiose von Ameisen und Raupen des Bläulingfalters.

Der letzte Beitrag, überschrieben mit „Nachwort, fast schon ein Nachruf“, ist letztlich auch ein Kapitel, in dem auf das dramatische Insektensterben und ihre Ursachen aufmerksam gemacht wird. Ganz klar werden die massiven Auswirkungen des Eingriffs des Menschen in natürliche Abläufe benannt und die fatalen Folgen aufgezeigt, da die Politiker zu wenig handeln.

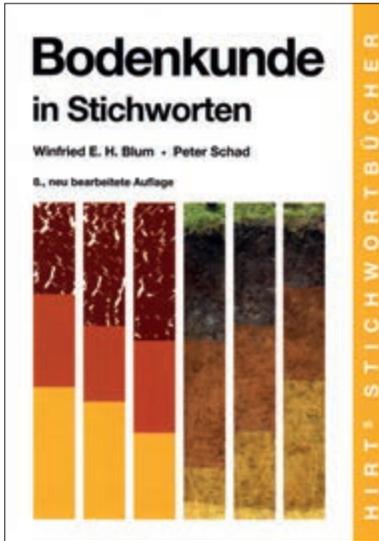
Die Lektüre dieses empfehlenswerten Buches, das mit einem auf die Kapitel bezogenen Literaturverzeichnis endet, ist ein nicht hoch genug einzuschätzender Gewinn nicht nur für interessierte Laien, sondern ist auch für Biologielehrer und -studenten, weil mittels spannender Texte und begleitender fantastischer Abbildungen aufgezeigt wird, warum Insekten Erfolgsmodelle der Evolution sind, die menschengemachte Umweltzerstörung aber ihr Überleben stark gefährdet.

Benedikt Toussaint

WINFRIED E. H. BLUM & PETER SCHAD (2024): **Bodenkunde in Stichworten**, 8. neu bearb. Aufl.

238 S., 100 Abb., 33 Tab.; Stuttgart (Borntraeger)

ISBN 978-3-443-03122-0, Softcover, 18 x 12,5 cm, Ladenpreis 24,90 €



Die im 2024 herausgekommene 8. Auflage dieses Kompaktlehrbuchs basiert nur teilweise auf der von Prof. em. Winfried Blum von der Universität für Bodenkultur, Wien, verantworteten 7. Auflage. Der seit 2012 schnelle Wissenszuwachs in der Bodenkunde machte eine umfassende Aktualisierung durch Prof. Peter Schad von der TU München erforderlich. Die Kapitel über die Bodenlebewesen und über die organische Bodensubstanz wurden neu geschrieben, außerdem wurde der Deutschen Bodensystematik und der Internationalen Bodenklassifikation in den jeweiligen Neuauflagen von 2024 bzw. 2022 Rechnung getragen.

Das 12 Kapitel umfassende Buch zeichnet sich durch eine kompakte und dennoch insgesamt umfassende Einführung in die Boden-

kunde aus. Kennzeichnend ist, dass wesentliche Informationen in Form von Stichworten vermittelt werden, die den Blick der Leser auf das Wesentliche lenken.

Kapitel 1 führt in die Bodenkunde ein, der Begriff Boden wird definiert, seine Funktionen werden erläutert.

Kapitel 2 ist den mineralischen Bodenbestandteilen gewidmet. Angesprochen werden die Gesteine und die sie bildenden Minerale, die verschiedenen Arten der Verwitterung, die Prozesse der Neubildung der Minerale und deren vom Mineralbestand des Ausgangsgesteins und vom Verwitterungsgrad des Bodens abhängigen Gehalte.

Kapitel 3 befasst sich mit den Bodenlebewesen, ihrem Anspruch an die Nahrung, den Wassergehalt und den pH-Wert des Bodens, ihre Verteilung im Boden und ihre Bedeutung für die Bodeneigenschaften.

Kapitel 4 informiert über die organischen Verbindungen im Boden. Angesprochen werden insbesondere die Ausgangssubstanzen, die Prozesse der Umwandlung, insbesondere die enzymatische Oxidation als letzte Stufe der Zersetzung, bei der alle organischen Moleküle unter Freisetzung von Energie zu CO₂ und H₂O umgewandelt werden. Näher eingegangen wird auch auf die Vorräte an organischem Kohlenstoff im Boden und die Rolle der Böden im globalen Kohlenstoff-

haushalt, versehen mit einem Hinweis auf die im Jahr 2015 ausgegebenen Ziele der Pariser UN-Klimakonferenz.

Die Kapitel 5 und 6 beziehen sich auf die physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften des Bodens und den hier ablaufenden Prozessen. Angesprochen werden u. a. Körnung, Bodenart und Verhalten des flüssigen und gasförmigen Wassers und der Bodenluft im Sickerraum in Abhängigkeit von Art und Größe der Hohlräume des Bodens. Im Hinblick auf seine chemischen Eigenschaften wird vor allem über Ionenaustausch, pH-Wert und Redoxeigenschaften informiert.

Kapitel 7 befasst sich mit der Entwicklung der Böden. Zunächst werden die Faktoren der Bodengenese wie u. a. Gestein, Relief, Klima, Wasser, Pflanzen, Tiere sowie der Mensch und ihr Zusammenwirken über die Zeit thematisiert. Weiterhin werden Prozesse ohne Stoffverlagerung im Boden angesprochen, z. B. Mineralneubildung oder Ionenaustausch, und Prozesse mit Stoffverlagerung, Beispiele sind der Transport von Aluminium in gelöster oder kolloidaler Form, von Eisen und Mangan als Ionen und ebenso Durchmischungsvorgänge durch wühlende Bodentiere oder durch Kryoturbation. Faktoren und Prozesse der Pedogenese erzeugen Bodenmerkmale, die in den Bodenhorizonten und in den Horizont-Kombinationen der Bodenprofile in Erscheinung treten.

Schwerpunkt des Kapitels 8, mit 65 Seiten (S. 117–181) das umfangreichste der 12 Kapitel, ist die Klassifikation der Böden. Ausführlich in Text und Fotos vorgestellt werden die aktuelle deutsche Bodensystematik mit Erläuterung der Haupt- und Zusatzsymbole der Bodenhorizonte und die seit 2022 geltende World Reference Base for Soil Resources (WRB).

Kapitel 9 ist dem Boden in der Umwelt gewidmet. Zunächst werden wichtige Bodenfunktionen vorgestellt, die durch Bodenverlust, z. B. durch Siedlungen, und Bodenbelastungen, u. a. durch Lagerung von Abfällen oder landwirtschaftliche Flächennutzung, gefährdet sind. Diese Schäden müssen durch intelligente Bodenschutzstrategien möglichst präventiv verhindert werden. Kapitel 10 wiederum macht deutlich, dass dem Boden eine wichtige Funktion als Pflanzenstandort zukommt und somit für die Ernährung des Menschen eine große Bedeutung hat. Informiert wird u. a. über den Nährstoffgehalt des Bodens und dessen Verfügbarkeit, alles maßgebend für die Bewertung der Bodenfruchtbarkeit.

Die nur wenige Seiten umfassenden Kapitel 11 und 12 sprechen Bodeninformationssysteme an bzw. resümieren die Geschichte der Bodenkunde. Den Abschluss bilden ein Literaturverzeichnis mit 118 Quellen und ein Sachregister.

Das vorliegende Buch führt kompakt und übersichtlich in die Grundlagen der Bodenkunde ein, ein in den Geo-, Agrar-, Forst- und nicht zuletzt Umweltwissenschaften wesentlicher Baustein. Seine Lektüre empfiehlt sich für Fachbehörden und nicht zuletzt für Studenten der genannten Fachrichtungen an Hochschulen und Universitäten, da es sich im Selbststudium für ein leichtes Nachschlagen zur Information anbietet.

Benedikt Toussaint

ULRICH FROMMER & STEFAN TISCHENDORF (2024): Die Wegwespen Hessens. Vorkommen – Ökologie – Bestandssituation

168 S., 65 Farbfotos, 68 farb. Verbreitungskten., 14 Tab.; Harxheim (Goecke & Evers)
ISBN 978-3-948603-46-5-0, Hartcover, 17,5 x 25,7 cm, Ladenpreis 29,00 €



Das vorliegende Buch über die Wegwespen Hessens fasst erstmalig die Kenntnisse zum Vorkommen, zur Ökologie und zur Bestandssituation dieser ausschließlich auf Spinnen als Beutetiere spezialisierten Insektenfamilie der Pompilidae landesspezifisch zusammen. Es ist das Resultat einer vor 30 Jahren begonnenen ehrenamtlichen Beschäftigung der beiden Autoren mit dieser Artengruppe. Mehrere 100 Exkursionen in allen Landesteilen Hessens haben den Grundstein für die daran anschließende Auswertung gelegt. Diese beruht auf etwa 8000 Belegen, die zu 60 % aus den privaten Sammlungen der Autoren stammen und ab dem Jahr 1840 gesammelt wurden, zudem wurden Literaturdaten ausgewertet. Bei schwer zu bestimmenden

Arten haben externe Spezialisten Überprüfungen und Bestimmungen vorgenommen. Von den in Deutschland nachgewiesenen 96 Wegwespen-Arten sind 68 für Hessen relevant und werden näher beschrieben. Neun davon sind ausgestorben oder verschollen, einige gelten in ihrem Bestand als gefährdet.

Das erste von neun Kapiteln behandelt den Aufwand der beiden Autoren bei der Datenbeschaffung und Wissensaneignung sowie der Auswertung der resultierenden Datensätze. Es wird auf die herausragende Arbeit des im Jahr 2020 verstorbenen Sammlers Heinrich Wolf hingewiesen, dessen wertvolle faunistische Untersuchungen den allergrößten Teil der ausgewerteten Daten vor 1990 abbilden und somit wichtige Informationen über die frühere Wegwespen-Fauna liefern.

Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen dieser Insektenfamilie, ihrer Lebens- und Nistweise, Jagdverhalten und Beutespinnen, Systematik, Determination und Bestimmungsliteratur sowie mit den naturräumlichen Rahmenbedingungen wie insbesondere Klima und Vegetation.

Das dritte Kapitel geht auf die Sammelaktivitäten bis 1990 ein und befasst sich mit herausragenden Erforschern der Wegwespen-Fauna, würdigt in diesem Zusammenhang besonders Heinrich Wolf, listet die Sammelaktivitäten ab 1990 auf

und vermittelt abschließend eine Übersicht über die verfügbaren Sammlungen und Aufbewahrungsorte.

Im vierten Kapitel wird über Material und Methoden informiert. Die Autoren haben bei ihrer Arbeit für dieses Buch nicht auf mittels DNA-Analyse erhobene Daten zurückgegriffen, sondern auf Belege, die am Binokular „klassisch“ mittels Spezialliteratur determiniert und von den Autoren aufwändig in privaten Sammlungen und öffentlichen Museen recherchiert wurden. Ebenso wurden Daten von Kollegen ausgewertet und kritisch auf Plausibilität hin überprüft. Für alle Fundorte wird auf der Zeitachse unterschieden zwischen dem Zeitraum 1840–1989 und dem Zeitfenster von 1990–2022, um Bestandstrends zu analysieren mit dem Ziel, durch Kombination von Ort und Zeit ein raumzeitliches Muster der Vorkommen von Arten darzustellen. Außerdem wurde ein Schema für die Einschätzung der Gefährdung der Arten nach Trendkriterien gemäß Vorgaben des Bundesamtes für Naturschutz entwickelt und angewendet.

Der Fokus des Buches liegt auf den im fünften Kapitel dargestellten Ergebnissen, die für Nichtfachleute von größerem Interesse sein dürften als die eher Spezialisten ansprechenden Ausführungen in den vorausgegangenen kurzen Kapiteln. Auf 108 Seiten (S. 29–136) wird in alphabetischer Reihenfolge eine kommentierte Artenliste der 68 Wegwespen Hessens vorgestellt und ihre Verbreitung, ihre Lebensweise, die aktuellen Nachweise und die spezielle Situation in Hessen wie z. B. Bestandstrend kommentiert. Ihre Verbreitung bis 1989 und ab 1990 wird jeweils in Lagekärtchen dokumentiert. Von 27 Arten können sich die Leser anhand eines Farbfotos ein Bild machen, außerdem vermitteln 20 Farbfotos einen Eindruck von den Lebensräumen der Wegwespen. Beschrieben werden auch zehn in Hessen nicht oder nicht zweifelsfrei nachgewiesene Arten, abschließend wird kurz auf die Bestandsentwicklung der nachgewiesenen Wegwespen eingegangen und eine Gefährdungsanalyse vorgestellt.

Im sechsten Kapitel werden die Lebensräume der Wegwespen wie Trockenmauern, Felswände, Trockenrasen, Feuchtgebiete und Wälder sowie in diesen Bereichen erforderliche Schutzmaßnahmen thematisiert. Außerdem wird auf die Ursachen des Artenrückgangs wie Flächenverbrauch, Wandel der Kulturlandschaft, Umweltgifte, land- und forstwirtschaftliche Flächennutzung und Ausbreitung invasiver Neophyten eingegangen. Vertiefend angesprochen wird der Einfluss des Klimas generell und des Klimawandels speziell auf die Wegwespen.

Die das Buch abschließenden Kapitel sieben bis neun beinhalten ein Resümee mit einem nicht allzu optimistischen Ausblick auf den Bestand der Wegwespen, eine Danksagung und eine 182 Quellen umfassende Literaturliste.

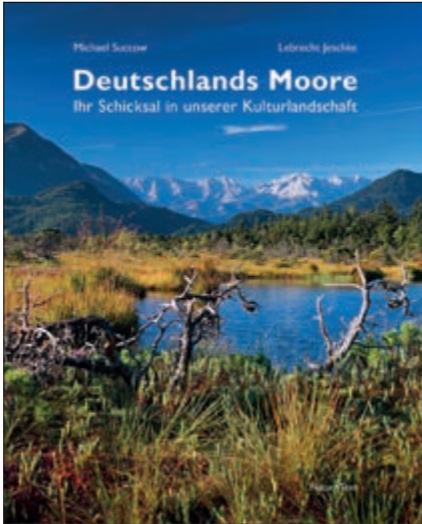
Die Monographie über die Wegwespen Hessens ist sehr informativ und eine wahre Fundgrube für Liebhaber der Insektenfamilie der Pompilidae. Spezialisten, die sich mit den Wegwespen eingehender beschäftigen, werden die profunde Arbeit der beiden Autoren zu schätzen wissen.

Benedikt Toussaint

MICHAEL SUCCOW & LEBRECHT JESCHKE (2024): Deutschlands Moore. Ihr Schicksal in unserer Kulturlandschaft, 2. aktual. Aufl.

544 S.; Rangsdorf (Natur+Text)

ISBN 978-3-942062-60-2, Hardcover, 24 x 29,5 cm, Ladenpreis 69,- €



Das vorliegende Buch beschreibt auf 544 Seiten die bedeutendsten 155 Moore Deutschlands und stellt sie auf knapp 910 Farbfotos dar. Die Autoren Prof. em. Dr. Succow und Dr. Jeschke begannen schon früh in der ehemaligen DDR und in Ländern des früheren Warschauer Pakts mit der Erforschung der Vegetation von Moorlandschaften und deren wichtigen Leistungen als meist letzte natürliche Ökosysteme. Nach der Wende haben sie auch im Westen ganz wesentlich dazu beigetragen, das große ökologische Potential der Moore besser zu verstehen. Mitautorinnen sind Dr. Gauding und Dr. Tanneberger vom Greifswald Moor Centrum.

Nach einem Vorwort, in dem die Autoren die lange Entstehungsgeschichte und Zielsetzung dieses Buches erläutern, wird in vier Kapiteln aus unterschiedlichem Blickwinkel eine Fülle von Informationen gegeben, die Naturfreunde für eine wunderschöne, z. T. auch geheimnisvolle Naturlandschaft begeistern werden. Die übergeordnete Absicht ist jedoch, auch Fachleuten aus den Bereichen Natur- und Umweltschutz und ganz wichtig auch politischen Entscheidungsträgern die Moore vorzustellen, die vom Menschen über viele Jahrhunderte schlecht behandelt wurden und dadurch ihre ökologische Vielfalt und wertvolle Biotope für Pflanzen und Tiere verloren gingen. In diesem Kontext stellen die Autoren im Falle nicht extrem geschädigter Moore deren natürliches Regenerationspotential heraus und würdigen ihre Rolle im Hinblick auf den Schutz des Klimas, die wegen der Speicherung enormer Mengen von organischem Kohlenstoff noch bedeutender ist als die der Wälder.

In Kapitel 1, überschrieben mit „Mensch und Moor“, wird zunächst die wechselvolle Geschichte der Moore nach dem Rückzug der Gletscher in Mitteleuropa vor rd. 12.000 Jahren vorgestellt. Ab dem 17. Jh. beginnt man, in den Mooren zwecks Gewinnung von Brennstoff Torf zu stechen, ab Mitte des 20. Jh. bis Beginn des 21. Jh. führten der industrielle Torfabbau und die großflächige Trockenlegung zur Zerstörung der Moore. Da man mittlerweile weiß, dass intakte Moore u. a. Le-

bensraum für bedrohte Tier- und Pflanzenarten bieten und das Klima stabilisieren können, finden seit dem Beginn des 21. Jh. ein Umdenken und Reparaturversuche statt, Moore werden wieder vernässt und in Form der Paludikultur genutzt. Weitere Themen sind die Moore als mystische Plätze, Opferstätten und Bestattungsorte, frühe Siedlungen und Balkenwege in Mooren, Moore als frühe Rohstoffquellen wie insbesondere Torf als Brennstoff, die über einer Moorlandschaft liegende spezielle Stimmung, die Dichter, Maler oder auch Fotografen dazu inspiriert, sich mit Mooren künstlerisch auseinanderzusetzen, Moore als Orte der Naturerfahrung und Naturbewunderung oder Moore als Orte wissenschaftlicher Erkenntnis. In diesem Zusammenhang werden zunächst ausgewählte Experten kurz vorgestellt und abschließend wird darüber informiert, dass heute Moorforschung überregional und z. T. im internationalen Kontext in Form von Netzwerken stattfindet.

Im mit „Vom Wesen und der Vielfalt unserer Moore – eine kleine Moorkunde“, überschriebenem Kapitel 2 wird zunächst in die Rolle der Moore, die ohne Einfluss des Menschen weitgehend nährstoffarm sind, im Naturhaushalt eingeführt und die Funktionen der intakten, d. h. ungestört wachsenden und somit torfspeichernden Moore im Hinblick auf die Festlegung von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor sowie auf die Stabilisierung und Wasserhaushalt der Landschaft erläutert. Diese Produktivität natürlicher Moorlandschaften ist bei entwässerten Mooren nicht mehr gegeben. Die negativen Folgen des Moorschwunds durch Grundwasserabsenkung oder Umleitung von Fließgewässern wie insbesondere Freisetzung von Stickstoff infolge der Mineralisierung des Torfs, verstärkte Erosion, Brandgefahr, Wegfall der Kühlung durch Verdunstung sowie Ausfallen der Moore als sich positiv auf das Klima auswirkende Kohlenstoffsinken werden ausführlich dargestellt. Außerdem lernt der Leser, dass zwischen ökologischen, aus der Pflanzendecke und der Torfzusammensetzung abgeleiteten Moortypen und hydrologisch-genetischen Moortypen, die sich aus der Wasserspeisung aus der umgebenden Landschaft (Regen, Grundwasser, oberirdische Gewässer) definieren, unterschieden wird.

Das mit 320 Seiten (S. 151–472) umfänglichste, mit „Deutsche Moorlandschaften – ausgewählte Schicksale“ überschriebene Kapitel 3 ist das Kernstück dieses Buches, schon aus den ca. 610 sich auf die vorgestellten Moore oder Moorlandschaften mit ihrer reichen Tier- und Pflanzenwelt beziehenden eindrucksvollen Farbfotos zu ersehen. Die Beschreibung der insgesamt 115 ausgewählten Moore in vier Teilkapiteln beginnt in der norddeutschen Tiefebene mit den Nordsee-Anrainern Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie dem nördlichen Nordrhein-Westfalen einerseits und dem an die Ostsee angrenzenden östlichen Teil von Schleswig-Holstein sowie Mecklenburg-Vorpommern, außerdem Brandenburg und Sachsen-Anhalt andererseits. In den westlichen Bundesländern werden ausschließlich 17 Regenmoore vorgestellt, dagegen werden die 44 im südlichen Ostseeraum angesprochenen Moore zehn unterschiedlichen Typen zugeordnet. Abschließend werden 34 Moore in Mittelgebirgslandschaften wie u. a. Hohes Venn,

Rhön, Harz, Schwarzwald oder Erzgebirge dargestellt und abschließend 20 Moore im Vorland und am Rand der Alpen. Die Einzeldarstellung der Moore beginnt mit frühen Beschreibungen und auch Fotos und kommt dann zum heutigen Erscheinungsbild. Dies Vorgehen erlaubt das Fazit, dass es keine völlig unbeeinflussten Moore mehr gibt, aber auch Moorlandschaften existieren, die immer noch fast intakt sind. Insbesondere in Bayern konnten viele Moore ihre Ursprünglichkeit bewahren, weil einerseits die Reliefverhältnisse eine radikale Entwässerung und Trockenlegung der Moore erschwerten und andererseits das niederschlagsreiche und relativ kühle Klima im Umfeld der Alpen die Entstehung von Mooren bzw. deren Erhaltung begünstigt. Festzustellen ist aber auch, dass generell in den breiten Flusstälern Moorlandschaften weitgehend verloren gegangen sind.

Das von den beiden Wissenschaftlerinnen Dr. Gaudig und Dr. Tanneberger verfasste letzte Kapitel 4 verweist mit seiner Überschrift „Nasse Moore braucht das Land“ auf ihr umfangreiches Arbeitsfeld beim Greifswald Moor Centrum, also kurzgefasst Schutz bestehender weitgehend intakter Moore einerseits und Regeneration entwässerter Moore andererseits. Wurden zunächst Naturschutzziele verfolgt, sind es seit Anfang des 20. Jh. auch Klimaschutzziele. Die Autorinnen beginnen mit einer Bestandsaufnahme des Zustandes der Moore in Deutschland und deren Ursachen. Anhand von 41 Farbfotos werden zunächst stark geschädigte Moore vorgestellt und anschließend, wie ihre Renaturierung durch Wiedervernässung gelingen kann. Außerdem wurden die CO₂-Emissionen von nicht intakten Mooren denen von noch wachsenden Mooren gegenübergestellt und auch die ökonomische Seite einer entwässerungsbasierten Nutzung der Moore analysiert (u. a. hohe Kosten für Personal und Technik). Eine Kosten-/Nutzen-Analyse kommt zum Schluss, dass eine dem Schutz des Klimas zugutekommende Revitalisierung der durch Entwässerung genutzten Moore durch Wiedervernässung unumgänglich ist. Für weiter zu nutzende Moore müssen produktive Nutzungsformen wie insbesondere die Paludikultur gefunden werden. Anhand von sechs in der Praxis erprobten Varianten wird gezeigt, welche Möglichkeiten es gibt.

Das vorliegende Buch, mit seinen fast 3 kg nicht nur auf der Waage ein Schwergewicht, sondern auch inhaltlich wegen seiner auf 544 Seiten und 963 Abbildungen gespiegelten Informationsdichte, schließt mit einem ausführlichen Literaturverzeichnis, einem Glossar, einem Pflanzen- und Tierartenregister sowie einer Vita der beiden Autoren. Es ist erstaunlich, dass dieses empfehlenswerte, didaktisch hervorragend aufgebaute, auch für Laien verständlich geschriebene und reich bebilderte Buch lediglich 69 € kostet. Naturfreunde kommen voll auf ihre Kosten, da anhand vieler Farbfotos die geheimnisvolle Schönheit der Moore gezeigt wird. Und die Botschaft der Verfasser ist auch, dass es sich lohnt, funktionsfähige Ökosysteme wie Moore zu erhalten oder geschädigte wieder herzustellen, und wir alle (auf)gefordert sind, uns für den Schutz der Moore zu engagieren.

Benedikt Toussaint

