

Nassauischer Verein für Naturkunde



Jahrbücher des Nassauischen Vereins für Naturkunde



Nassauischer Verein für Naturkunde



Jahrbücher des Nassauischen Vereins für Naturkunde

Band 146

Wiesbaden 2025

ISSN 0368-1254

Titelbild



Schweinsberger Moor im Amöneburger Becken (Foto: HLNUG)
zum Beitrag von DR. CHRISTIAN HELLER

© Nassauischer Verein für Naturkunde, Wiesbaden 2025
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
In eigener Sache als Schriftleiter	7
Wissenschaftliche Abhandlungen	
STEFAN REISENHOFER & ANTON NEUREITER	
Kryosphärenmonitoring im Gebiet des Hohen Sonnblcks	11
ANDREAS BRÖMSER	
Phänologie: Pflanzenentwicklung im Jahresverlauf und Veränderungen durch den Klimawandel	35
WOLFGANG EHMKE	
Die Waldwende im Kommunalwald am Beispiel des Taunussteiner Stadtwaldes	59
CHRISTIAN HELLER	
Moore und Moorböden in Hessen	89
ROLAND TOUSSAINT	
Einsatz von numerischen Modellen in der Schweiz zwecks Nutzung der Grundwasserwärme	117
ULRICH FROMMER & KARSTEN KLEMPKE	
Die historische und aktuelle Stechimmenfauna (Hymenoptera, Aculeata) im Lahntal bei Weilburg	147
OLIVER WEIRICH	
Auswirkungen von Feuerwerken auf Vögel. Literaturüberblick und Untersuchungen in Wiesbaden	179
MONIKA KORTE	
Das Erdmagnetfeld – Schutzschild unseres Planeten und Fenster tief ins Erdinnere	197
ANDREA ZEEB-LANZ, ANTJE LANGER & LHILYDD FRANK	
Herxheim bei Landau – ein einzigartiger jungsteinzeitlicher Ritualort	223

EBERHARD KÜMMERLE †

Zwischen Rheingau und Mittelrhein 255

FRANK HEESER

Das Feldflurprojekt Wiesbaden-Ost – Artenhilfskonzept für bedrohte
Tiere und Pflanzen 265

Publikationen des NVN aus dem Jahr 2024

Jahrbücher des NVN, Bd. 145 (2024) 277

Verein

TILLI REINHARDT

Bericht über den Nassauischen Verein für Naturkunde (NVN)
im Jahr 2024 279

GUDRUN RADTKE

Eberhard Kümmerle 1935–2025 285

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 Ausdruckweise 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.

Dieser Band beinhaltet ein sehr breites Themenspektrum, das sich in 11 interessanten Beiträgen widerspiegelt. Die ersten sechs Beiträge haben zwar sehr unterschiedliche Titel, haben aber trotz sich stark unterscheidender thematischer Schwerpunkte Bezüge zu den Folgen des Klimawandels auf. Am deutlichsten kommt das zum Ausdruck im ersten Beitrag, in dem österreichische Glaziologen und Meteorologen die Kryosphärenforschung im Gebiet des Hohen Sonnblcks in

den Hohen Tauern beschreiben. Auch der Wald leidet unter dem Klimawandel, daher stellt ein Botaniker seine Idee zur sog. Waldwende am Beispiel des Komunalwaldes der Stadt Taunusstein vor. Ein Agrarmeteorologe des Deutschen Wetterdienstes zeigt im nächsten Beitrag auf, wie der Klimawandel die Pflanzenentwicklung im Jahresverlauf verändert hat. Ein Geologe des Hess. Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie schreibt anschließend über Moore und Moorböden in Hessen und deren Rolle im Naturhaushalt, als Klimaarchive und CO₂-Senken. Die Schweiz ist als Alpenland vom Klimawandel besonders betroffen, Gletscher schmelzen und Naturkatastrophen häufen sich. Ein Hydrogeologe erläutert, wie das regenerative Wärmepotential des Grundwassers dort zunehmend speziell für die Gebäudeheizung genutzt wird und dabei numerische Modelle eine wertvolle Hilfe sind. Es schließt sich ein Beitrag über Stechimmen im Lahntal bei Weilburg an, in dem ein Biologe aufzeigt, wie sich u. a. die Lebensräume dieser Tiere in den letzten Jahrzehnten infolge der Erwärmung des Klimas verändert haben.

Die nachfolgenden Beiträge sind thematisch ebenfalls sehr unterschiedlich, haben aber keinen direkten Bezug zum Klimawandel. Zunächst folgt der Beitrag eines Ornithologen über die Auswirkungen von Feuerwerken auf Vögel; Untersuchungen wurden auch in Wiesbaden vorgenommen. Anschließend erläutert eine Geophysikerin des GFZ Potsdam das aktuelle und historische Magnetfeld der Erde, seine Entstehung, Umpolungen und seine Schutzschildfunktion für alles Leben. Des Weiteren berichten eine Archäologin und ihre Co-Autorinnen über einen jungsteinzeitlichen Ritualort in Herxheim bei Landau/Pfalz, dessen auffällig verstümmelte Tote immer noch Rätsel aufgeben. Ein zeit seines Lebens mit dem Rheingau und dem Oberen Mittelrheintal verbundener Geologe beschreibt in seinem 24. und gleichzeitig letzten Beitrag im Jahrbuch des Nassauischen Vereins für Naturkunde die geologische Vielfalt dieser Region (siehe Nachruf). Zuletzt stellt der Vorsitzende der Hegegemeinschaft Wiesbaden-Ost ein inzwischen realisiertes Konzept für die Schaffung von Lebenräumen für Tiere und Pflanzen in der Kulturlandschaft vor.

In der Rubrik „Neue Publikationen“ wird der im Jahr 2024 erschienene Band 145 des Jahrbuchs des Nassauischen Vereins für Naturkunde vorgestellt.

Abschließend folgen der Rechenschaftsbericht der Vereinsvorsitzenden Dr. Tilli Reinhard für das Jahr 2024 und ein Nachruf auf unser am 10. August im Alter von 90 Jahren verstorbene Ehrenmitglied Dr. Eberhard Kümmerle.

Der vorliegende Band 146 unseres Jahrbuchs umfasst insgesamt 291 Seiten, die es allesamt verdienen, mit Interesse gelesen zu werden.

Das Jahrbuchs kann von unserer Hompepage www.naturkunde-online.de heruntergeladen werden und ebenso von der ZOBODAT-Homepage www.zobodat.at

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

In eigener Sache als Schriftleiter

Sehr geehrte Leserinnen, sehr geehrte Leser des Jahrbuchs des Nassauischen Vereins für Naturkunde,

nach 25 Jahren ehrenamtlicher Tätigkeit als Schriftleiter und im Vorstand des Nassauischen Vereins für Naturkunde habe ich im Rahmen der Mitgliederversammlung des Vereins am 20. März 2025 mich nicht mehr zur Wahl gestellt. Ich denke, dass meine mittlerweile 85 Jahre eine richtungsweisende Zäsur sind und der Gang in die Schriftleiter-Rente wohl auch verdient ist. Ob meine Einschätzung „wohl verdient“ berechtigt ist, darüber mögen auch die Leserinnen und Leser des Jahrbuchs, von denen ich mich hiermit nicht ganz ohne Wehmut verabschieden möchte, befinden.



Benedikt Toussaint

Ich versuche anschließend, für mich und auch für die Leserinnen und Leser des Jahrbuchs zu rekapitulieren, wie ich als Schriftleiter des Nassauischen Vereins startete und wie sich das Jahrbuch in den vergangenen 25 Jahren entwickelte. Aus der Rückschau ist das so etwas wie ein Rechenschafts- und auch ein Erfahrungsbericht. Alles fing am 6.2.1998 an, der damalige Vorsitzende des Vereins, Diplom-Geologe Hans-Jürgen Anderle, ein anerkannter Experte der Geologie des Taunus, überreichte mir exakt an meinem 58. Geburtstag die Bestätigung meiner Mitgliedschaft im Verein. Da es um die Jahrtausendwende im Vorstand des Vereins rumorte und auch der damalige Schriftleiter und kurz danach auch die seinerzeitige Schriftleiterin bereits nach einem bzw. nach drei Jahren ihre Funktion niederlegten, war die Not groß. H.-J. Anderle bat mich Mitte des Jahres 2001, einzuspringen und den Band 122 des Jahrbuchs druckreif fertigzustellen. „Der Band 122 des Jahrbuchs konnte nicht rechtzeitig im Berichtszeitraum gedruckt werden. Ursache war die Absage mehrerer Autoren, wofür erst neue Beiträge gesammelt werden mussten“, so nachzulesen im Jb. nass. Ver. Naturkde., 123: 173. Gleichwohl umfasste dieser Band letztendlich 243 Seiten mit 23 Fachbeiträgen, davon 15 Beiträge über den Feldhamster. Am 31.1.2002 wurde ich offiziell zum Schriftleiter ernannt und wegen guter Gesundheit und wohl auch robuster Nerven sowie weiterer notwendiger Zutaten hielt ich 25 Jahre durch. Zum Dank dafür wurde ich am 20.3.2025 im Rahmen der Mitgliederversammlung zum Ehrenschriftleiter ernannt. Das ist eine extrem seltene Ehrung durch den Verein, in den nun 196 Jahren nach seiner Gründung am 31.8.1829 bin ich erst der Zweite so geehrte. Ehrenmitglied wegen meiner mutmaßlich besonderen Verdienste für den Verein wurde ich bereits am 17.9.2020. Parallel zu meiner Funktion als Schriftleiter war ich von

März 2012 bis März 2013 2. Vorsitzender des Vereins und wegen des Todes von H.-J. Anderle am 22.1.2012 zusätzlich auch komm. Vorsitzender bis März 2013.

Für die Bände 123 (2002) bis zum letzten von mir verantworteten Band 146 (2025) war ich immer auf der Suche nach interessanten Themen, die im Laufe der Zeit immer anspruchsvoller wurden, und den dazu passenden Autorinnen und Autoren. Hilfreich waren u. a. naturwissenschaftliche Dokumentationen im Fernsehen wie z. B. Terra X, die anschließende Kontaktaufnahme mit den jeweiligen Experten, oftmals aus hochwissenschaftlichen Institutionen, u. a. den Max-Planck-Instituten. Entgegen kam mir dabei, dass ich als habilitierter Geologe in der Regel einen leichteren Zugang zu Professoren-Kollegen hatte als ohne diesen akademischen Grad. An Band 125 (2004) mit der 372-seitigen Monographie „175 Jahre Nassauischer Verein für Naturkunde und Naturwissenschaftliche Sammlung des Museums Wiesbaden 1829 – 2004“ von Ehrenmitglied Walter Czysz war ich als Schriftleiter nur randlich beteiligt.

Dr. H. Poschwitz gestaltete als Schriftleiter der Jahrbücher der Jahre 1991–1997 den Einband des Jahrbuchs neu. Die beiden Rechtecke mit abgerundeten Ecken, dem Mammut-Logo und dem zweizeiligen Text „Nassauischer Verein für Naturkunde“ im oberen Feld und dem dreizeiligen Text „Jahrbücher des Nassauischen Vereins für Naturkunde“ sowie der Band-Nummer, der Jahreszahl und der Angabe ISSN 0368-1254 wurden bis heute beibehalten, ebenso das DIN A5-Format. Der Band 115 (1994) hatte noch kein Cover-Bild, das im nachfolgenden Band 116 (1995) ergänzt und erst ab Band 122 (2001) farbig wurde. Bis Band 123 (2002) und ausgerechnet im Jubiläumsband 125 (2004) waren alle Abbildungen in den Beiträgen schwarz/weiß. Die ersten farbigen Abbildungen erschienen im Band 124 (2003), aus Kostengründen allerdings nicht im Fließtext der zehn Fachbeiträge, sondern für sechs Beiträge mit 36 Abbildungen und vier Tafeln zusammengefasst auf den Seiten II bis XXXI am Ende des Bandes. Da sich der damalige Schatzmeister überzeugen ließ, dass wegen inzwischen fortgeschrittener Mehrfarben-Offsetdrucktechnik farbige Abbildungen im Text nur noch minimal teurer waren als schwarz/weiß-Abbildungen, sind ab Band 126 (2005) alle Abbildungen durchgehend farbig (wie auch seit Nr. 71 (2019) die im Jahr 1977 erstmalig für unsere Vereinsmitglieder herausgegebenen Mitteilungen, die beginnend mit Nr. 52 (2004) ebenso wie die Flyer der Programme für das Sommer- und Winterhalbjahr ebenfalls von mir als Schriftleiter bearbeitet wurden). Durchgehend farbig sind auch die großformatige Broschüre „Streifzüge durch die Natur von Wiesbaden und Umgebung“, 2. verb. u. erweiterte Auflage, Wiesbaden 2012, der Sonderband 3 (2016) des Jahrbuchs mit dem Titel „Zwischen Mittelrhein und Taunus. Naturschätze in Lorch am Rhein“ sowie der Sonderband 4 (2017) mit dem Titel „Steinreiches Weltkulturerbe. Geologie für Mittelrhein-Freunde“, alle herausgegeben vom Nassauischen Verein für Naturkunde und von mir als Schriftleiter betreut.

Die von den Autoren mittels der Büro-Software WORD erstellten Manuskripte wurden bis einschließlich Band 136 (2015) des Jahrbuchs nach ggf. erforderli-

cher, mit den Autoren abgestimmter Textüberarbeitung und die Grammatik betreffenden Korrekturen im Hinblick auf Satzspiegel, Schriftart und -größe und anderen Kriterien so gestaltet, wie sie später als Beiträge inkl. Abbildungen und Tabellen im Jahrbuch erscheinen sollten. Diese Word-Dateien wurden an Büros weitergegeben und dort mit der seit 1999 auf dem Markt befindlichen Adobe-Software InDesign, einem professionellen Layout- und Satzprogramm für das Desktop-Publishing, weiterverarbeitet. Das Ergebnis sind letztlich hochauflöste pdf-Druckvorlagen. Da beim Einlesen der jeweiligen Word-Dateien häufiger als vom Hersteller der Software angegeben Fehler passierten, z. B. Verschwinden ganzer Seiten, obwohl sie an anderer Stelle noch physikalisch existierten, und Wörter falsch getrennt wurden. Problematisch wurde es, wenn die Betreiber dieser Büros (meistens 1-Mann-Betriebe), die in der Regel über keinen naturkundlichen Background verfügten, die angesprochenen und noch weitere Fehler übersahen. Man kann sich vorstellen, dass das wiederholte Korrekturlesen weder für den Schriftleiter noch für die Autoren keine übergroße Freude verursachten. Ganz zu schweigen davon, dass die Fremdvergabe den Nassauischen Verein für Naturkunde in der Vergangenheit mehrere Tausend Euro gekostet hat. Und noch teurer wurde es, wenn in InDesign der Satz verändert werden musste, weil Autoren nachträglich auf einer Änderung ihres Textes bestanden.

Seit dem Band 137 (2016) ist die Fremdvergabe der Erstellung des Jahrbuchs Vergangenheit, die wie vorstehend beschrieben be-/überarbeiteten Word-Texte wurden jetzt von mir in InDesign eingelesen und die Abbildungen ggf. nach optimierender Überarbeitung mittels Adobe Photoshop als jpg- oder tif-Bilddateien in Grafikrahmen eingefügt. Notwendige Korrekturen konnten von mir ohne großen Zeitaufwand unmittelbar in InDesign durchgeführt, die Qualität der generierten pdf-Druckvorlagen konnte gezielt gesteuert werden. Und es gab noch einen wesentlichen Vorteil, nämlich die direkte Kontaktaufnahme mit der Druckerei, die vorher nicht möglich war. Seit 2016, also mit Band 137 des Jahrbuchs, ist die in Wiesbaden ansässige Druckerei Chmielorz GmbH, seit 2018 als ACmedienhaus firmierend, unser Auftragnehmer. Die Zusammenarbeit mit den zuständigen Mitarbeitern war vertrauensvoll, als Schriftleiter profitierte ich von deren drucktechnischen Tipps, und die Druckerei versuchte meistens mit Erfolg, von mir nicht mehr zu optimierende Abbildungen, meistens gescannte Dias, doch noch druckfähig zu machen.

Meine Funktion als Schriftleiter endete anlässlich der Mitgliederversammlung am 20. März 2025, trotzdem betreute ich das vorliegende Jahrbuch noch. Bis Dezember 2025 wurden von mir pro Band zwischen vier und 11 Beiträge, die in den ersten 15 Jahren mir überwiegend angeboten und später mehrheitlich von mir gezielt akquiriert wurden, bis zur Druckreife betreut. Insgesamt handelt es sich um 170 Beiträge, davon sechs eigene. Unter „Druckreife“ ist ein Paket zu verstehen, das nicht nur die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den Autoren, die redaktionelle Bearbeitung und fallweise auch komplettete Überarbeitung von Textpassagen

beinhaltet, sondern auch das Design des Jahrbuchs sowie die Text- und Bildgestaltung umfasst. Und nicht zuletzt ist auch das Einholen von Kostenvoranschlägen, die Auftragsvergabe an die ausgewählte Druckerei und schließlich das persönliche Verschicken der Belegbände und der analogen oder digitalen Sonderdrucke an die Autoren damit gemeint.

Da mein Abschied von der Funktion des Schriftleiters seit 2024 bekannt ist, bleibt dem Nassauischen Verein für Naturkunde somit ausreichend Zeit, für die Erstellung des Bandes 147 (2026) und weiterer Bände eine Nachfolgerin oder einen Nachfolger für mich zu finden, ich hoffe es und wünsche es mir sehr. Möglicherweise wird das nicht ganz nahtlos erfolgen, aber das Jahrbuch als solches wird es weiterhin geben, auch in gedruckter Form. Die digitale Fassung des Jahrbuchs kann im Internet unter <https://www.naturkunde-online.de> und www.zobodat.at heruntergeladen werden.

Wiesbaden, Dezember 2025

Benedikt Toussaint

Prof. Dr. rer. nat. habil. Benedikt Toussaint

Kryosphärenmonitoring im Gebiet des Hohen Sonnblicks

STEFAN REISENHOFER & ANTON NEUREITER

Gletscher, Permafrost, Hoher Sonnblick-Observatorium, Klimawandel, Risikobewertung

Kurzfassung: Die Veränderungen der alpinen Kryosphäre – also Schnee, Gletscher und Permafrost – sind nicht nur ein Schlüsselindikator für den Klimawandel, sondern sie wirken sich auch direkt auf verschiedene Aspekte der Umwelt und Gesellschaft aus, insbesondere in Gebirgsregionen, wie man sie in Österreich vorfindet. Das Kryosphärenmonitoring am Hohen Sonnblick erlaubt es, die Veränderungen direkt in Bezug zu den klimatischen Bedingungen zu analysieren und einzuordnen. Langzeitbeobachtungen wie diese sind entscheidend, um die Dynamik der Kryosphäre unter dem Einfluss der globalen Erwärmung besser zu verstehen. Sie ermöglichen es, gezielte Anpassungs- und Schutzmaßnahmen für gefährdete Regionen zu entwickeln und langfristige Trends sowie potenzielle Risiken frühzeitig zu erkennen.

Cryosphere monitoring at Hoher Sonnblick

glacier, permafrost, Hoher Sonnblick observatory, climate change, risk assessment

Abstract: Changes in the Alpine cryosphere - i. e. snow, glaciers and permafrost - are not only a key indicator of climate change, but also have a direct impact on various aspects of the environment and society, especially in mountain regions such as those found in Austria. The cryosphere monitoring at Hoher Sonnblick makes it possible to analyse and classify the changes directly in relation to the climatic conditions. Long-term observations such as these are crucial in order to better understand the dynamics of the cryosphere under the influence of global warming. Thus it is possible to develop targeted adaptation and protection measures for endangered regions and to recognise long-term trends and potential risks at an early stage.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
2	Klimatologische Einordnung	13
3	Untersuchungsgebiet	15
3.1	Glaziologisches Monitoring im Sonnblickgebiet	15
3.2	Permafrost-Monitoring-Netzwerk Hoher Sonnblick	16
4	Angewandte Methoden und Ergebnisse	17
4.1	Längenmessung	18
4.2	Massenbilanz	19
4.3	Geodätische Messungen	22
4.4	Permafrostrelevante Messgrößen BTS, GST und NST	24
4.5	Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivität	27

4.6	Kontinuierliche Kluftmessungen – Crackmetermessungen	30
5	Zusammenfassung	33
6	Literatur	33

1 Einleitung

Die World Meteorological Organization (WMO) hat einzelne Parameter aus dem Kryosphärenmonitoring als „Climate Essential Variables (CEVs)“ eingestuft. Diese Variablen sind entscheidend, um den Zustand des globalen Klimasystems zu verstehen, und sie helfen dabei, die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Ökosysteme und Gesellschaften zu überwachen. Für Gebirgsländer wie Österreich, wo die Erwärmung stärker ist als der globale Durchschnitt, ist die Überwachung der Kryosphäre von besonderer Bedeutung. Die Alpen gehören zu den am stärksten betroffenen Regionen durch die globale Erwärmung, was sich in verstärktem Gletscherschwund, Veränderungen der Schneedeckung und der Degradation des Permafrosts zeigt.

Rund 2,5 % der Gesamtfläche Österreichs sind von ganzjährig gefrorenem Untergrund betroffen, der eine saisonale Auftauschicht (active layer) aufweist. Zusätzlich unterliegen etwa 1,5 % der Fläche tiefgründigem saisonalem Bodenfrost, der ähnliche Verwitterungsprozesse bewirken kann. Dies bedeutet, dass etwa 3.150 km² der Österreichischen Alpen vom Permafrost beeinflusst sind (BOECKLI et al. 2012).

Im Vergleich dazu beträgt die vergletscherte Fläche in Österreich nur rund 328 km² (BUCKEL, OTTO, BAUDER et al. 2018). Diese Zahlen verdeutlichen die signifikante Rolle des Permafrosts in den österreichischen Alpen, nicht nur in Bezug auf die Geologie, sondern auch hinsichtlich der Auswirkungen auf das Klima, die Umwelt und die Infrastruktur in diesen hochalpinen Regionen. Permafrost ist entscheidend für die Stabilität von Böden und kann bei Veränderungen durch den Klimawandel, wie dem Auftauen, erhebliche Auswirkungen auf die Landschaft und die Ökosysteme haben.

Das globale Auftauen der Permafrostböden hat neben den zu erwartenden rückgekoppelten Auswirkungen auf das Klima auch zahlreiche Auswirkungen auf ökologische und wirtschaftliche Systeme. Die letzten zwei Jahrzehnte haben gezeigt, dass die wachsende Vulnerabilität gegenüber Mensch und Infrastruktur durch die Permafrostdegradation immer augenscheinlicher wird. Für Österreich bedeutet das Tauen des Permafrostes im Gebirge konkret eine Vertiefung aktiver Felsschichten und damit ein steigendes Gefahrenpotential durch Hanginstabilitäten und Steinschlägen bzw. Felsstürzen. Das klimabedingte sukzessive Auftauen und Verschwinden des Permafrostbodens und die damit einhergehende Landschaftstransformation müssen weiter intensiv beobachtet und dokumentiert werden, um damit verbundene alpine Naturgefahren richtig einschätzen zu können.

und um vorzeitige Maßnahmen zu setzen. Daher sind umfangreiche und langjährige Messprogramme wie das vorliegende notwendig und essentiell.

Im Gegensatz zum Permafrost ist der Rückgang der Gletscher einer der auffälligsten und direkt sichtbaren Indikatoren für die globale Klimaerwärmung. Während das Schmelzen von Permafrostböden oft weniger sichtbar ist und meist nur durch wissenschaftliche Messungen und langfristige Beobachtungen nachweisbar wird, können Veränderungen der Gletscher mit bloßem Auge über relativ kurze Zeiträume wahrgenommen werden. Fotografische Vergleiche und Messungen über Jahrzehnte hinweg dokumentieren die Veränderungen der Gletscher, insbesondere in alpinen und polaren Regionen. Diese sichtbaren Veränderungen machen Gletscher zu einem starken Symbol für den Klimawandel.

2 Klimatologische Einordnung

Die in Österreich um 1890 einsetzende, zunächst schwache Erwärmung verstärkte sich um 1980 und hält seither ungebrochen an. Österreichweit traten die wärmsten Jahre der 256-jährigen Messgeschichte fast nur in der jüngeren Vergangenheit auf, so zeigt sich das Ranking der zehn wärmsten Jahre wie folgt: 2023, 2018, 2014, 2022, 2019, 2015, 2020, 1994, 2007 und 2016 (Abbildung 1).

Beim über Österreich gemittelten Jahresniederschlag sind weder langfristige Änderungen erkennbar, noch liegen in den letzten Jahrzehnten extreme Ausreißer vor. Die auffälligsten Phasen finden sich im 19. Jahrhundert. Allerdings löst das Österreichmittel der Jahressumme regionale und jahreszeitliche Unterschiede nicht auf und folglich sind kleinräumige und kurzfristige Ereignisse daraus nicht abzulesen.

Ebenfalls um 1980 nahm eine Erhöhung der Sonnenscheindauer ihren Ausgang. Seit rund 20 Jahren verharrt die Jahressumme der Sonnenscheindauer in einem hohen Bereich, wie er nur aus Messungen des späten 19. Jahrhunderts bekannt ist.

Die aus der Temperatur abgeleiteten Kenngrößen Eistage (Tage mit einer Höchsttemperatur von unter 0 °C), Frosttage (Tage mit einer Tiefsttemperatur von unter 0 °C) und Frostwechselftage (Tage mit einer Tiefsttemperatur unter und einer Höchsttemperatur über 0 °C) dienen gewissermaßen dazu, die „Kälte“ im Hochgebirge eines ganzen Jahres zu ermitteln. Am Sonnblick werden im langjährigen Mittel 1981–2010 230 Eistage und 301 Frosttage gezählt und an 71 Tagen wird ein Frostwechsel verzeichnet. Seit dem hydrologischen Jahr 2000/01 ist nahezu in allen Jahren eine Abnahme der Eis- und Frosttage zu beobachten. Ausnahmen sind hier lediglich die hydrologischen Jahre 2000/01 und 2003/04.

Eine Zunahme der Frostwechselftage geht mit einer Abnahme der Eistage einher, wie es in den hydrologischen Jahren 2001/02, 2004/05, 2006/07, 2010/11, 2013/14, 2015/16, 2019/20 und auch 2022/23 zu beobachten ist. Eine Abnahme an

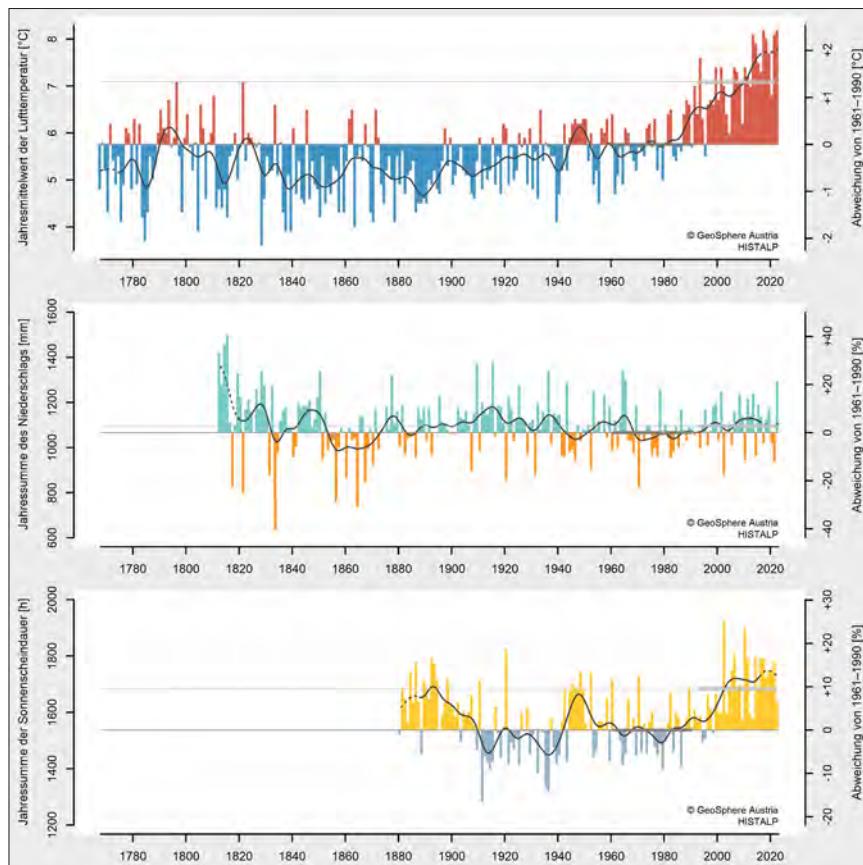


Abbildung 1: Jahresmittelwerte der Temperatur, Jahressumme des Niederschlags und mittlere Jahressumme der Sonnenscheindauer für ganz Österreich: Dargestellt sind die überdurchschnittlich warmen (rot) und kalten (blau) Jahre von 1768 bis 2023 im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1961–1990, die überdurchschnittlich feuchteren (türkis) und trockeneren (orange) Jahre von 1816 bis 2023 im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1961–1990 und die überdurchschnittlichen sonnenreicheren (gelb) und sonnenärmeren (grau) Jahre im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961–1990; Quelle: basierend auf dem Datensatz HISTALP GeoSphere Austria.

Figure 1: Annual mean temperature values, annual total precipitation and mean annual total sunshine duration for the whole of Austria: Shown are the warmer than average (red) and colder than average (blue) years from 1768 to 2023 compared to the climate reference period 1961–1990, the wetter than average (turquoise) and drier than average (orange) years from 1816 to 2023 compared to the long-term average of 1961–1990 and the sunnier than average (yellow) and less sunny than average (grey) years compared to the climate normal period 1961–1990; source: based on the HISTALP data set GeoSphere Austria.

Frostwechseltagen ist durch die generell höheren Lufttemperaturen am Hohen Sonnblick zurückzuführen, außer im hydrologischen Jahr 2003/04, das eine Zunahme an Eis- und Frosttagen aufweist.

3 Untersuchungsgebiet

Das Sonnblick-Observatorium, das sich auf dem Gipfel des Hohen Sonnblcks auf 3.106 m Seehöhe in der Gebirgsgruppe der Hohe Tauern der österreichischen Alpen befindet, hat eine reiche Geschichte, die bis zu seiner Gründung im Jahr 1886 durch Julius Ferdinand von Hann zurückreicht, der als Pionier der modernen Meteorologie gilt. Als eines der ersten Hochgebirgs-Observatorien der Welt wurde es eingerichtet, um Wetter, Klima und atmosphärische Bedingungen in großen Höhen zu untersuchen.

Im Laufe der Jahre wurde das Observatorium erweitert und modernisiert, um sich an technologische Fortschritte und die sich entwickelnden wissenschaftlichen Forschungsbedürfnisse anzupassen. Heute ist es Teil von GeoSphere Austria, früher bekannt als ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik). Die Einrichtung ist international anerkannt für ihre Beiträge zum Studium der Erdatmosphäre und des Klimas. Mit einer Höhe von 3.100 Metern über dem Meeresspiegel liefert das Sonnblick-Observatorium Forschern wichtige Daten zu meteorologischen Phänomenen und den Auswirkungen des Klimawandels in hochalpinen Umgebungen. Darüber hinaus spielt es eine entscheidende Rolle als Überwachungsstation für die Luftqualität und die atmosphärische Verschmutzung und trägt so zu einem besseren Verständnis der Umweltbedingungen in alpinen Regionen bei.

3.1 Glaziologisches Monitoring im Sonnblickgebiet

Im Fokus des glaziologischen Monitorings stehen die beiden Gletscher Goldbergkees und Kleinfleißkees (Abb. 2), die sich in unmittelbarer Nähe des Sonnblick-Observatoriums befinden.

Das Goldbergkees befindet sich nördlich des Alpenhauptkamms. Der Gletscher wird als alpiner Talgletscher klassifiziert, doch aufgrund der erheblichen Abschmelzung trifft diese Einordnung heute nur noch bedingt zu. Mittlerweile ist das Goldbergkees in drei Segmente zerfallen, die als „oberer“, „mittlerer“ und „unterer Boden“ bezeichnet werden. Die Verbindung zwischen oberem und mittlerem Boden brach bereits Ende der 1960er-Jahre ab, während die Trennung zwischen mittlerem und unterem Boden erst 2010/2011 erfolgte. Selbst während seines Höchststandes im Jahr 1850 erreichte der Gletscher eine Fläche von weniger als 4 km² und lag etwa zwischen 2.300 und 3.100 m ü. NN (BÖHM, SCHÖNER,

AUER et al. 2007). Heute umfasst das Goldbergkees eine Fläche von 0,81 km² und erstreckt sich über eine Länge von etwa 1,5 km zwischen 2.370 und 3.060 m ü. NN.



Abbildung 2: Links das Goldbergkees im August 2020 vom Fototstandort Herzog Ernst (Quelle A. Neureiter). Rechts das Kleinfleißkees im September 2023 vom Kamerastandort Felsgrat zwischen Goldbergspitze und Roten Mann; Quelle: foto-webcam.eu.

Figure 2: Left, the Goldbergkees in August 2020 from the Herzog Ernst photo location (source A. Neureiter). Right, the Kleinfleißkees in September 2023 from the camera location Felsgrat between Goldbergspitze and Roter Mann; source: foto-webcam.eu.

Das Kleinfleißkees ist über die Kleinfleißscharte mit dem Goldbergkees verbunden und liegt südlich des Alpenhauptkamms. Dieser Gletscher wird als typischer alpiner Kargletscher klassifiziert. Im Jahr 2023 betrug die Fläche des Kleinfleißkees 0,71 km², der Gletscher erstreckte sich über eine Länge von 1,2 km in Höhenlagen zwischen 2.715 und 3.050 m ü. NN.

3.2 Permafrost-Monitoring-Netzwerk Hoher Sonnblick

Das bestehende Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Sonnblickgebiet ist in Abbildung 3 dargestellt. Zur Erfassung der Bodenoberflächentemperatur (GST – Ground-Surface-Temperature) beziehungsweise der Temperatur im oberflächennahen Bereich (NST – Near-Surface-Temperature) sind Temperatursensoren an der Südflanke des Hohen Sonnblicks (siehe Abb. 3) sowie in der Nord- bis Nordwest exponierten Wintergasse installiert. Des Weiteren finden Messungen der Basistemperatur der Schneedecke (BTS – Bottom Temperature of Snow Cover) statt, bei der auch die Schneetiefe festgehalten wird.

Für die Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten in der Nordwand des Hohen Sonnblicks und Umgebung wird zum kontinuierlichen seismischen Monitoring (zeitliche Komponente) in Ergänzung drohnenbasierte Photogrammetrie (räumliche Komponente) durchgeführt. Zusätzlich wurden im Jahr 2021, in Anlehnung an das geotechnische Gutachten zur Beurteilung der Standsicherheit der Materialseilbahn und des Observatoriums, vier Standorte mit sogenannten Crackmetern ausgestattet. Ziel dieser Crackmeter ist es, die Öffnungsweite der Klüfte zu beobachten und den Zeitpunkt des Öffnens festzu-

stellen. Einen Überblick des Permafrost-Monitoring-Netzwerkes im Bereich des Sonnblckgipfels vermittelt Abbildung 4.

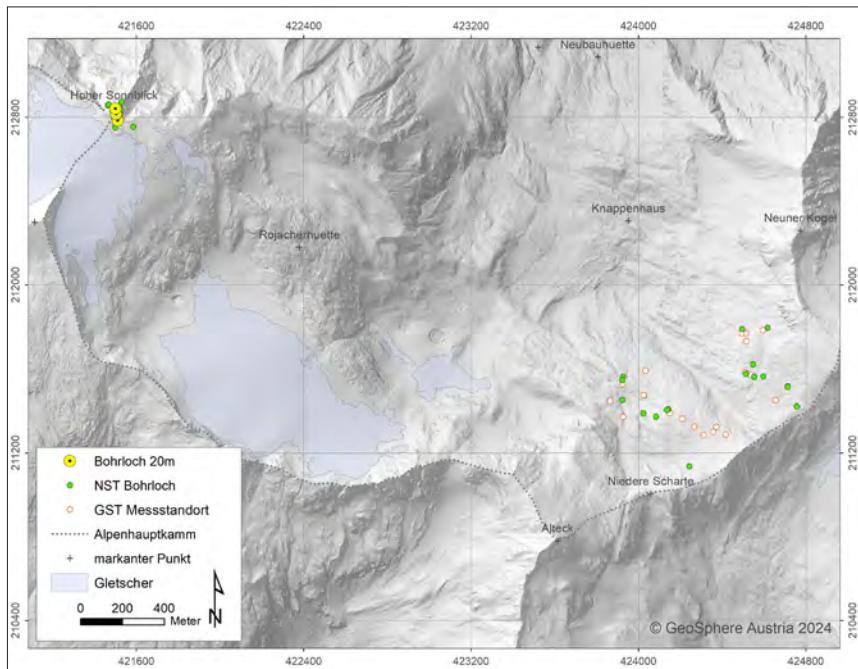


Abbildung 3: Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Gebiet des Hohen Sonnblcks.

Figure 3: Permafrost monitoring network in the Hohe Sonnblck area.

4 Angewandte Methoden und Ergebnisse

Das Kryosphärenmonitoringprogramm der GeoSphere Austria zeichnet sich durch eine breite Vielfalt an angewandten Methoden aus. Neben den Methoden in der Glaziologie wie Längenmessung und Massenbilanzmessung werden die permafrostrelevanten Messgrößen BTS, GST und NST sowie Methoden zur Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten näher erläutert und die Ergebnisse der gewonnenen Daten präsentiert.

Für weiterführende Informationen der angewandten Messmethoden sei an dieser Stelle auf die Website des Sonnblck-Observatoriums unter www.sonnblck.net verwiesen.

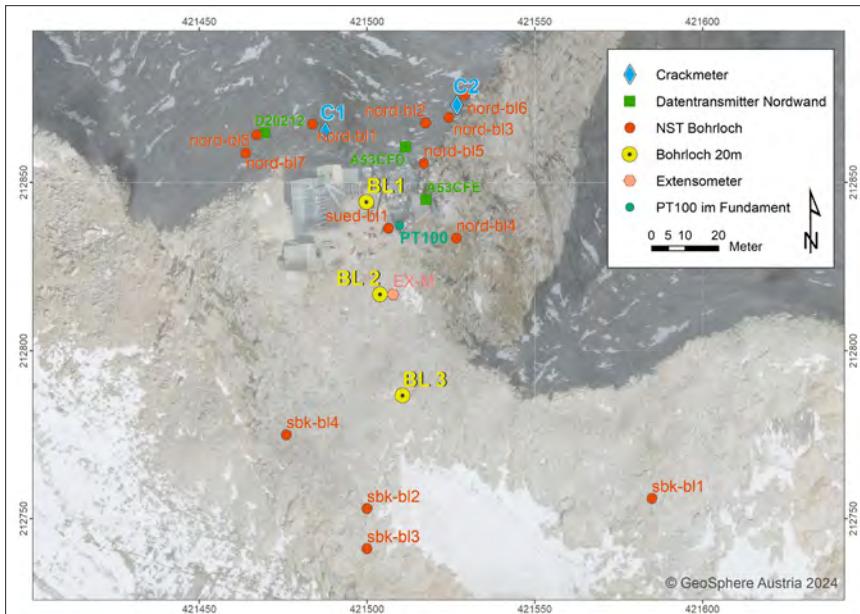


Abbildung 4: Lage der Temperaturmessstandorte im Gipfelbereich des Hohen Sonnblicks; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 4: Location of the temperature measurement sites in the summit area of Hoher Sonnblick; source: GeoSphere Austria.

4.1 Längenmessung

In Österreich erfolgt die Messung der Längenänderung von Gletschern bis heute überwiegend mittels Maßband. Diese Messungen werden gegen Ende der Ablationsperiode durchgeführt, wobei jedes Jahr festgelegte Fixpunkte im Gletschervorfeld als Referenzpunkte genutzt werden. Von diesen Punkten aus wird die Distanz zur Gletscherzunge präzise bestimmt, um jährliche Veränderungen zu dokumentieren. Im Jahr 2021 kam es zur Umstellung der Messmethodik. Anstelle der direkten Messung im Feld wurde die Auswertung für die Gletscher Kleinfleißkees und Goldbergkees umgestellt auf den Vergleich von hochgenauen Orthofotos. Dieser Ansatz hat den großen Vorteil, die Längenmessungen auch an physisch nur schwer zugänglichen Bereichen der sich zurückziehenden Gletscher vorzunehmen. Beispiele für diese Bereiche sind steinschlaggefährdete Steilstufen und proglaziale Seen. Durch die Effizienz dieser Methode können auch größere Teile der Gletscher observiert werden mit einer wesentlich dichtenen Abdeckung, was folglich zu einer genaueren mittleren Längenänderung des gesamten Gletschers führt.

Die Messungen zur Längenänderung der Gletscher in der Goldberggruppe begannen bereits im Jahr 1896. Die Auswertungen von Reinhard Böhm und Kollegen dokumentieren eine deutliche Verkürzung des Goldbergkees bis Anfang der 2000er-Jahre, wobei der Gletscher in diesem Zeitraum etwa 600 Meter an Länge verlor (BÖHM, SCHÖNER, AUER et al. 2007). Auch in den letzten Jahrzehnten setzte sich dieser Trend fort: Zwischen 1978 und 2023 (Abb. 5) schrumpfte das Goldbergkees um weitere 300 m. Parallel dazu verkürzte sich das Kleinfleißkees um 430 m. Am Kleinfleißkees kam es im September 2002 zu einem Abbruch der Gletscherzunge, was kurzfristig zu einem scheinbaren Vorstoß führte. Bis 2003 hatte sich das neue Gletscherende jedoch um 160 m weiter nach oben zurückgezogen.

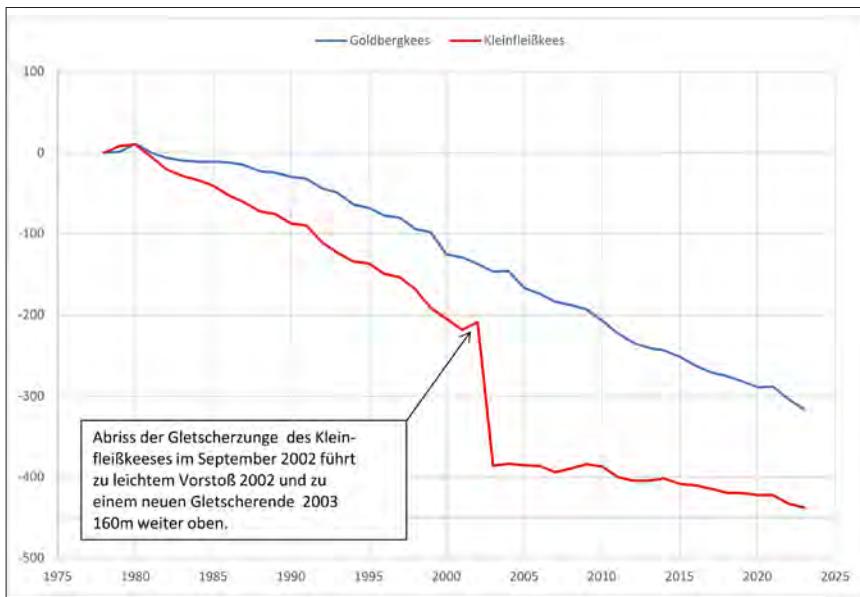


Abbildung 5: Messung der Längenänderung der Gletscher Goldbergkees und Kleinfleißkees zwischen 1978–2022; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 5: Measurement of change in length of Goldbergkees and Kleinfleißkees glaciers between 1978 and 2022; source: GeoSphere Austria.

4.2 Massenbilanz

Der Massenhaushalt eines Gletschers lässt sich direkt über ein möglichst dichtes Netz von Messpunkten ermitteln. Dabei werden Daten zu Akkumulation und Ablation erhoben und anschließend auf die gesamte Gletscherfläche übertragen. Heutzutage kommen hierfür Geoinformationssysteme oder andere spezialisierte Softwarelösungen zum Einsatz, die die Punktdaten durch Interpolation und

Extrapolation auf die gesamte Fläche berechnen. Dadurch erhält jeder Punkt auf dem Gletscher einen spezifischen Massenbilanzwert. Die Summe dieser Punkt-werte ergibt schließlich die Gesamtmaschenbilanz des Gletschers (SCHÖNER 2003). Die Ablation eines Gletschers wird mithilfe von Ablationspeglern gemessen. GeoSphere Austria verwendet dafür 1,5 m lange Kunststoffrohre, die an beiden Enden mit Löchern versehen sind. Diese Rohre werden mithilfe von Draht mit-einander verbunden und bis zu 10 m tief ins Eis eingebracht. Die Pegelstände, also wie weit der Pegel im Eis ist, werden zu Beginn und am Ende des Haushaltjahres abgelesen, um die Menge des abgetragenen Eises zuverlässig zu bestimmen. Für die Bohrungen kommen sowohl ein Dampfbohrer (HEUCKE 1999) als auch ein Eisbohrer (KOVACS ENTERPRISE 2023) zum Einsatz. Die eingesetzten Pegel wer-den anschließend mit einem differenziellen GNSS-Gerät präzise vermessen, um genaue Standortdaten zu gewährleisten.

Zur Ermittlung der Akkumulation werden Schneehöhensondierungen durch-geföhrt und Schneeprofile gegraben. Die Mächtigkeit der Schneedecke wird mit Lawinensonden ermittelt, indem die Sonde senkrecht in den Schnee eingestochen wird. Für eine präzise Messung ist Erfahrung erforderlich, um den Vorjahreshori-zont sicher von darunterliegenden Eisschichten oder stark verdichtetem Schnee zu unterscheiden. Da diese Methode sehr schnell durchgeföhrt werden kann, lassen sich auch größere Flächen in kurzer Zeit und mit hoher Messdichte son-dieren. Durch das Anlegen von Schneeprofilen wird die Schneedichte an einem bestimmten Punkt des Gletschers ermittelt. Dazu wird bis zum Vorjahreshorizont gegraben, der anhand von Ablagerungsverfärbungen identifiziert werden kann. Ein weiteres Indiz für den Vorjahreshorizont ist die zunehmende Härte und Ver-dichtung des Schnees. Besonders bei Schächten, die zur Bestimmung der Winter-bilanz gegraben werden, kann auch Eis als Vorjahreshorizont angetroffen werden. Für die Berechnung der Massenbilanz ist das Dichteprofil von großer Bedeutung. Dabei werden mit einem genormten Stechzylinder Schneeproben von der Ober-fläche bis zum Vorjahreshorizont entnommen und gewogen. Anhand der ermit-telten Schneehöhe, der Schachtiefe und der aus der Schneemasche berechneten Dichte kann die Massenbilanz für diesen Punkt präzise berechnet werden.

Am Ende der Ablationsperiode lässt sich der Unterschied zwischen Ablations- und Akkumulationsgebieten daran erkennen, dass in den Akkumulationsgebieten noch Altschnee vorhanden ist. In diesen Bereichen hat der Massenzuwachs über-wogen, was insbesondere für temperierte Gletscher in mittleren Breiten zutrifft (COGLEY, AREND, BAUDER et al. 2011). Eine gängige Methode zur Bestimmung dieser Grenze besteht darin, mit einem GNSS-Empfänger entlang dieser Linie zu schreiten, um die erforderlichen Punktdaten zu generieren, an denen die Massen-bilanz ausgeglichen ist. Die zwei untersuchten Gletscher werden zudem durch ein automatisches Kamerasystem überwacht. Mithilfe von Methoden der Orthorekti-fizierung werden die schrägen Aufnahmen in Orthofotos umgewandelt, die dann mit GIS-Software ausgewertet werden, um die Schneelinie zu bestimmen. Diese

Vorgehensweise bietet den entscheidenden Vorteil, dass die Schneelinie am Tag der geringsten Ausdehnung des Akkumulationsgebiets erfasst werden kann. Die Massenbilanz eines Gletschers wird meist als Wasseräquivalent (m w.e. Wasserwert) angegeben.

Seit Beginn der Messungen im Jahr 1989 (Abb. 7) hat das Goldbergkees insgesamt 28,6 m w.e. an Masse verloren. Eine Betrachtung des kumulierten spezifischen Massenverlusts pro Jahrzehnt zeigt, dass dieser in den letzten drei Dekaden jeweils um etwa 4 m w.e. angestiegen ist. In den 2010er-Jahren erreichte der summierte spezifische Massenverlust nahezu 12 m w.e. Im gesamten Untersuchungszeitraum ist der Massenverlust im Vergleich zu den 2010er-Jahren erneut um 22 % gestiegen. Seit Beginn der Messreihe verliert das Goldbergkees jährlich 0,8 m w.e. an Masse. In den letzten 10 Jahren stieg der jährliche Massenverlust auf 1,3 m w.e.

Das Kleinfleißkees hat seit 1999 (Abb. 7) insgesamt 19,6 m w.e. an Masse verloren. Der spezifische Massenverlust stieg in den 2010er-Jahren um 2,5 m w.e. auf 8,4 m w.e. an. Im Zeitraum 2019–2023 ist der Massenverlust nochmals um 49 % gestiegen. Der jährliche Massenverlust seit 1999 liegt bei 0,8 m w.e. Dieser Massenverlust ist in der Periode 2014–2023 auf 1,1 m w.e. gestiegen.

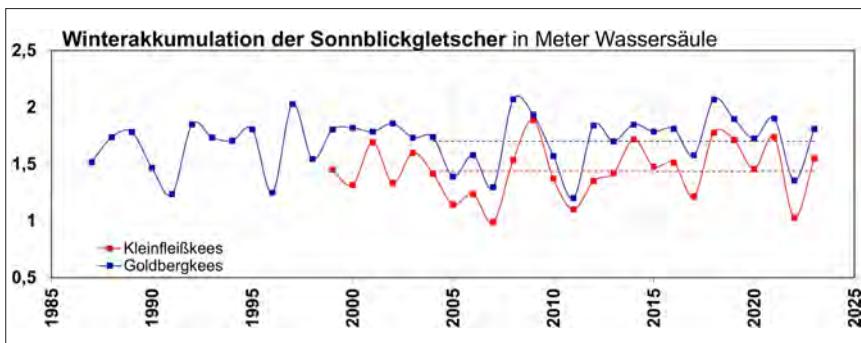


Abbildung 6: Winterakkumulation am Goldbergkees und Kleinfleißkees seit Beginn der jeweiligen Messreihe. Die strichlierte Linie zeigt die Durchschnittsakkumulation der letzten 20 Jahre; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 6: Winter accumulation at Goldbergkees and Kleinfleißkees since the beginning of the respective measurement series. The dotted line shows the average accumulation over the last 20 years; source: GeoSphere Austria.

Ein außergewöhnliches Massenhaushaltsjahr war 2022. Aus den gemessenen Schneehöhen und Schneedichten wurde ein Massenzuwachs im Winter (Abb. 6) von 1 m w.e. für das Goldbergkees ermittelt. Dieser Wert liegt 33 % unter dem 10-jährigen Durchschnitt. Für das Kleinfleißkees wurde ein Wintermassenzuwachs von 1,3 m w.e. ermittelt, was 25 % unter dem 10-jährigen Durchschnitt liegt. Die außergewöhnlich hohen Temperaturen zu Beginn der Ablationsperiode sowie der massive Eintrag von Saharastaub Mitte März 2022 beschleunigten das

Abschmelzen der Winterschneedecke erheblich. Aufgrund der hohen Temperaturen fiel in den Sommermonaten nur sehr wenig Niederschlag in Form von Schnee. Infolgedessen gab es kaum frischen Schnee, der durch seine hohe Albedo den Untergrund vor weiterer Schmelze hätte schützen können. Der Massenverlust lag mit 2,8 m w.e. für das Goldbergkees und 2,7 m w.e. für das Kleinfleißkees deutlich über dem langjährigen Mittel und zeigt den größten Massenverlust seit Beginn der Messungen.

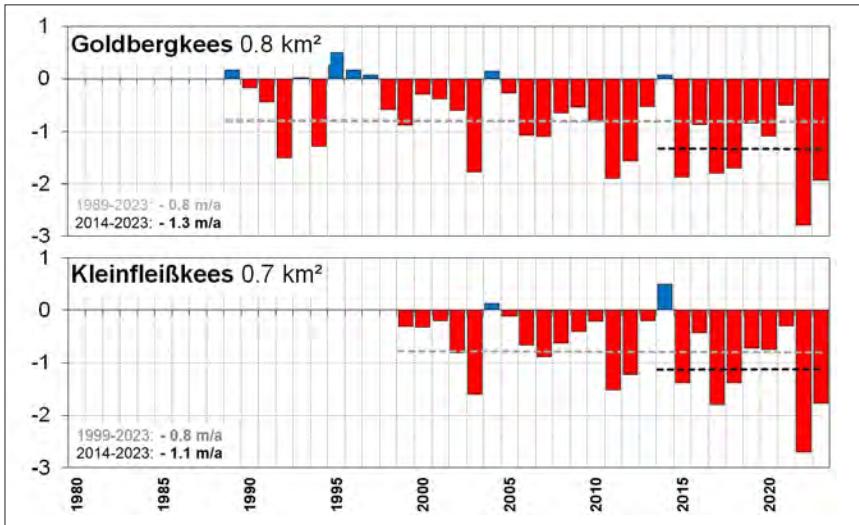


Abbildung 7: Zeitreihe der Massenbilanz. Die roten Balken zeigen die Jahre mit Massenverlust und die blauen Balken die Jahre mit Massengewinn in m w.e. Die hellgraue strichlierte Linie zeigt die durchschnittliche Massenbilanz über die Beobachtungszeitdauer. Die schwarze strichlierte Linie zeigt die durchschnittliche Massenbilanz der letzten 10 Jahre; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 7: Time series of the mass balance. The red bars show the years with mass loss and the blue bars the years with mass gain in m w.e. The light grey dashed line shows the average mass balance over the observation period. The black dashed line shows the average mass balance over the last 10 years; source: GeoSphere Austria.

4.3 Geodätische Messungen

In diesem Kapitel werden die Höhenänderungen, basierend auf den neuesten Vermessungen, dargestellt, die größtenteils durch Drohnenbefliegungen durchgeführt wurden. Dabei nimmt die Drohne mehrere hundert überlappende Bilder auf, die anschließend mithilfe eines „Structure-from-Motion“-Algorithmus in der Software Agisoft Metashape (AgiSoft LLC 2023) zu einem 3D-Modell verarbeitet werden. Um das Modell präzise zu verorten, ist die Drohne mit einem hochgenauen GPS-Sensor ausgestattet. Zusätzlich werden am Boden sichtbare Referenz-

punkte (Ground Control Points, GCPs) mit differenziellem GNSS bis auf wenige Zentimeter genau eingemessen. Diese Befliegungen finden jeweils im Frühjahr zum Ende der Akkumulationsperiode und im Herbst zum Ende der Ablationsperiode statt. Durch den Vergleich der Höhenmodelle, die am Ende der Akkumulationsperiode und nach der Ablationsperiode des Vorjahres erstellt wurden, lässt sich die Schneehöhe präzise berechnen. Eine Methode zur Korrektur von Störeinflüssen wie der vertikalen Gletscherbewegung und der Eisabschmelzung nach der „Herbstbefliegung“ wird derzeit bei GeoSphere Austria entwickelt. Bei der Befliegungsplanung wird zudem darauf geachtet, den Schattenwurf der umliegenden Felsen auf den Gletscher möglichst gering zu halten, was eine sorgfältige Abstimmung mit der Tageszeit erfordert.

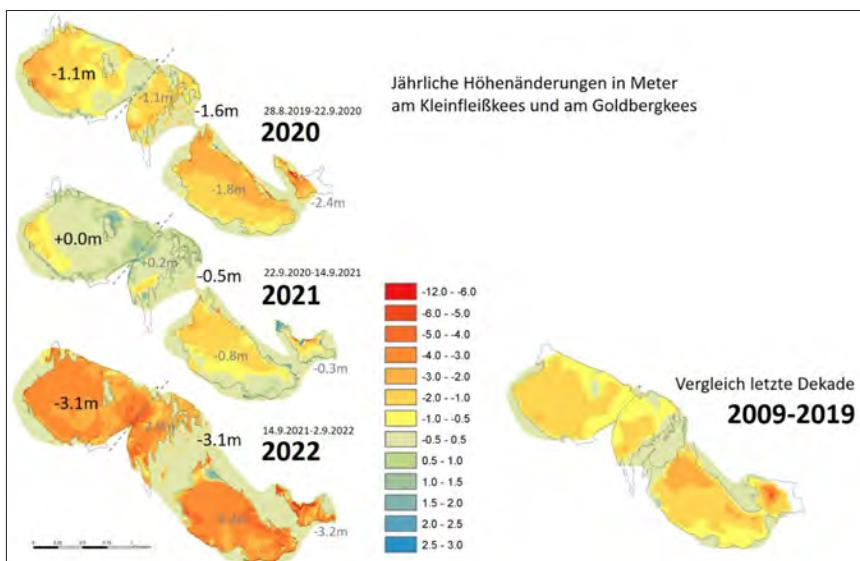


Abbildung 8: Jährliche Höhenänderung am Goldbergkees und Kleinfleißkees. Verglichen werden die Befliegungen vom 28.08.2019–22.09.2020, 22.09.2021–14.09.2021 und 14.09.2021–02.09.2022. Die Abbildung rechts zeigt die Höhenänderung vom Höhenmodell 2009 (Quelle: Land Salzburg) und der Befliegung vom 28.08.2019. Um einen Vergleich mit den linken jährlichen Befliegungen zu erhalten, wurde die durchschnittliche Höhenänderung pro Jahr ermittelt; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 8: Annual change in altitude at Goldbergkees and Kleinfleißkees. The aerial surveys from 28.08.2019–22.09.2020, 22.09.2021–14.09.2021 and 14.09.2021–02.09.2022 are compared. The figure on the right shows the elevation change from the 2009 elevation model (source: Land Salzburg) and the aerial survey from 28.08.2019. In order to obtain a comparison with the left-hand annual aerial surveys, the average elevation change per year was determined; source: GeoSphere Austria.

Die Befliegungsergebnisse zeigen die Höhenveränderungen zwischen den einzelnen Messzeitpunkten. Abbildung 8 stellt die Änderungen für die Jahre 2019–2020, 2020–2021 und 2021–2022 dar. Im Haushaltsjahr 2021 blieb die Höhe am Kleinfleißkees im Durchschnitt unverändert, während im oberen Bereich des Goldbergkees eine Zunahme von 0,2 m beobachtet wurde. In den mittleren und unteren Bereichen hingegen verringerte sich die Höhe um 0,8 m bzw. 0,3 m. Im Jahr 2020 ging die Gletscheroberfläche deutlich zurück. Der Rückgang am Kleinfleißkees und Goldbergkees betrug 1,1 m bzw. 1,6 m. Im Jahr 2022 wurde ein Verlust von 3,1 m auf der gesamten Fläche beider Gletscher verzeichnet.

4.4 Permafrostrelevante Messgrößen BTS, GST und NST

Die Bodenoberflächentemperatur (Ground Surface Temperatur – GST) ist definiert als die Oberflächen- bzw. oberflächennahe Temperatur des Untergrundes, gemessen in den obersten Zentimeter des Bodens. Die GST ist abhängig von der Energiebilanz der Oberfläche wie auch den standortspezifischen Charakteristika wie Vegetationsbedeckung, Oberflächenrauigkeit bzw. -farbe und Feuchtegehalt (KLENE, NELSON, SHIKLOMANOV et al. 2001). Das GST-Monitoring trägt zum Verständnis der standortspezifischen Energie- und Wärmetransporte bei. Für das Auftreten von Permafrost spielt die Schneedecke eine zentrale Rolle, da sie den Boden vom Einfluss der Atmosphäre isoliert und durch ihre hohe Albedo einen großen Teil der Sonnenenergie reflektiert. Diese Eigenschaften wirken sich zu unterschiedlichen Jahreszeiten verschieden aus. In einem schneereichen Winter wird der Boden durch die Schneedecke vor eindringender kalter Luft geschützt (wärmender Effekt). Im Frühjahr und Sommer wird der Boden, der noch immer unter Schnee liegt, vor warmer Luft und Strahlung abgeschirmt (kühlender Effekt). Beginnt ein Winter kalt und schneearm, sind das die besten Bedingungen für Permafrost, da der Boden stark auskühlen kann. Bildet sich im Verlauf des Winters eine dicke und sich lange in das Frühjahr haltende Schneedecke, sind die perfekten Bedingungen für Permafrost gegeben. Ist die Schneedecke mächtig genug (80–100 cm), um den Untergrund von atmosphärischen Einflüssen abzuschirmen, stellt sich eine konstante Temperatur an der Basis der Schneedecke ein. HAEBERLI (1975) hat eine empirische Faustregel für die Interpretation der Basistemperatur der Schneedecke (BTS) entwickelt. Liegt die BTS unter -3°C , verbirgt sich im Untergrund wahrscheinlich Permafrost. Zwischen -3°C und -2°C liegt der Unsicherheitsbereich in dem möglicherweise Permafrost auftritt. Bei Temperaturen größer -2°C ist der Boden wahrscheinlich nicht das ganze Jahr über gefroren.

Temperaturmessungen in unterschiedlichen Tiefen ermöglichen die Ermittlung des Temperaturgradienten zwischen Fels und Bodenoberfläche und eröffnet neue Ansätze bei der Quantifizierung des Kälteintrages in den Untergrund. In Kombination mit weiteren Methoden (terrestrische Laserscans, passive Seismik)

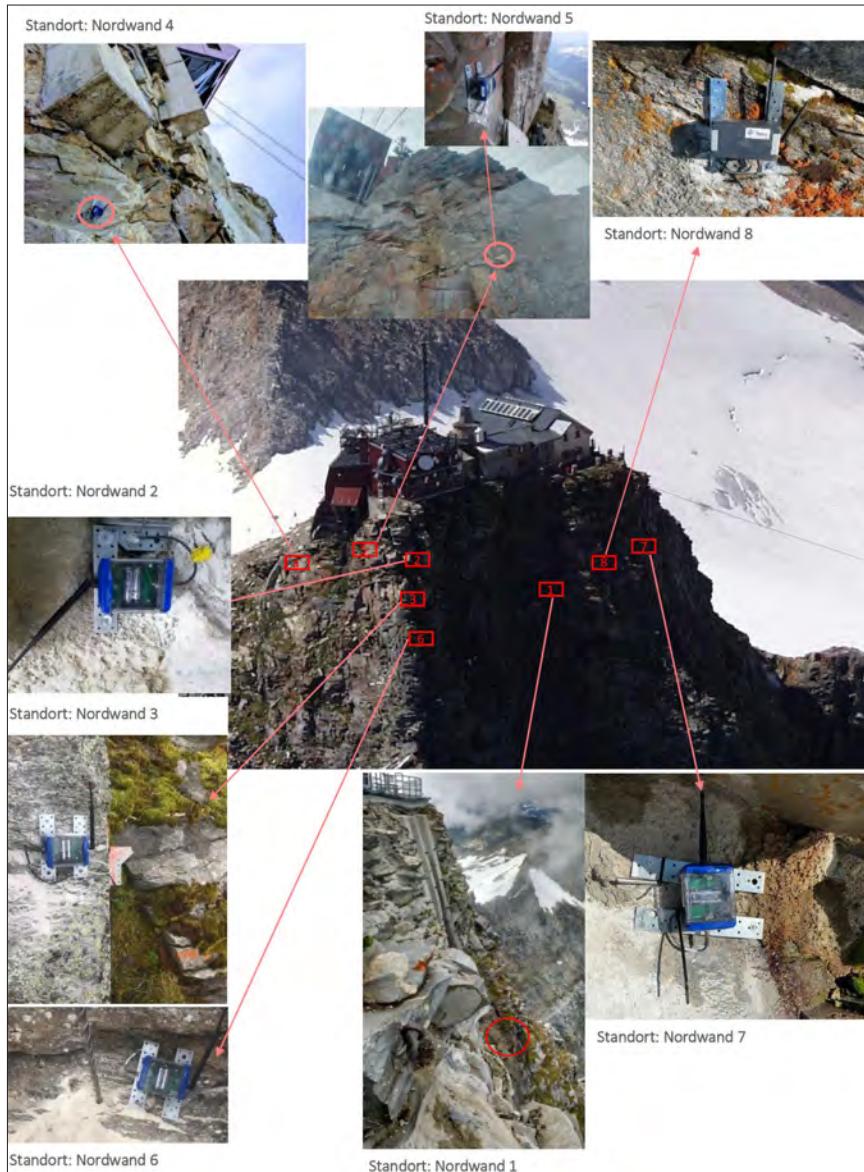


Abbildung 9: Lage der Temperaturmessstanorte an der Nordwand des Hohen Sonnblcks; Quelle: S. Reisenhofer.

Figure 9: Location of the temperature measuring stations on the north face of Hoher Sonnblick; source: S. Reisenhofer.

lassen sich Rückschlüsse auf das Ausmaß der physikalischen Verwitterung ableiten, ein wichtiger Faktor im Hinblick auf die Standortsicherheit des Sonnblick Observatoriums.

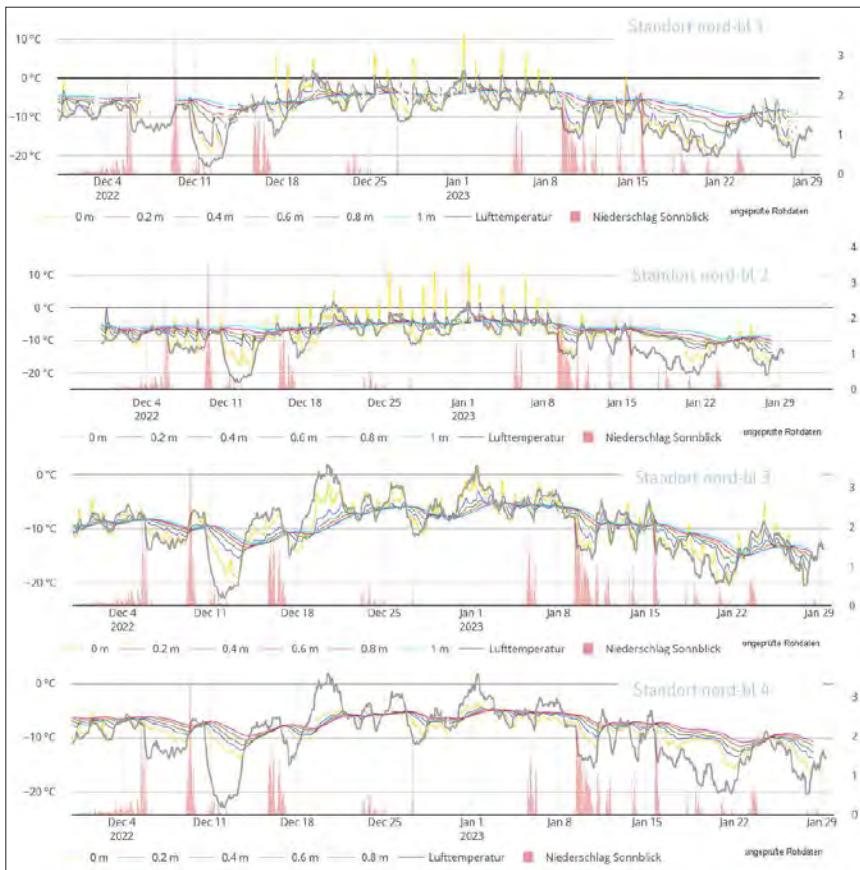


Abbildung 10: Webdarstellung des Temperaturverlaufs von vier Messstandorten in der Nordwand und Hoher Sonnblick; Lufttemperatur und Niederschlagssummen für Dezember 2022 und Jänner 2024; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 10: Web representation of the temperature profile of four measurement locations on the north face and Hoher Sonnblick; air temperature and precipitation totals for December 2022 and January 2024; source: GeoSphere Austria.

Die kontinuierliche Messung in sogenannten „seichten“ Bohrlöchern mit 1 m Tiefe (Near Surface Temperature, NST) erlaubt die Beobachtung des Temperaturgradienten zwischen Fels und Bodenoberfläche über das gesamte Jahr hinweg und ermöglicht Rückschlüsse auf die Mächtigkeit der Auftauschicht bzw. den Wärme- fluss in den Untergrund.

Im Zuge der Erweiterung der Messstandorte im Bereich der Nordwand am Hohen Sonnblck wurden seit 2016 in Summe acht 1 m tiefe Bohrlöcher (Abb. 9) mit jeweils sechs Temperatursensoren in einer Tiefe von 0 cm, -20 cm, -40 cm, -60 cm, -80 cm und -100 cm installiert (Abb. 10).

4.5 Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivität

Bei der gegenwärtigen Klimaerwärmung und dem damit einhergehenden verstärkten Auftauen des Permafrosteises kommt es zu einer zunehmenden Instabilität des anstehenden Gesteins. Durch die immer häufigeren Tau- und Gefrierprozesse wird das Gestein zunehmend gelockert und hat somit verstärkte Steinschlag- und Felssturzereignisse, und das vor allem aus steilen Felsflanken, zur Folge. Dies stellt auch ein noch nicht abschätzbares Risiko für Wanderwege, Kletterrouten und hochalpine Infrastrukturen dar.

Im Hinblick auf die Standortsicherheit des Gebäudekomplexes sowie zur Verknüpfung des Gefährdungspotentials für Mensch und Tier in dieser und in vergleichbaren Zonen Österreichs wird im Rahmen des Projektes das in den Vorläuferprojekten erfolgreich etablierte Steinschlag- und Felssturzablösebereichen in der Nordwand des Hohen Sonnblcks mittel drohnenbasierter Photogrammetrie weitergeführt.



Abbildung 11: Links der Felssturz vom 30.08.2020 (blau, 15.570 m^3) und Felssturz vom 05.10.2021 (rot, 23.510 m^3) aus dem westlichen Bereich der Nordwand. Geländedarstellung: Punktfolke der UAV-Befliegung vom 25.08.2022 (Quelle: GeoSphere Austria). Rechts die Ablagerungen des 23.510 m^3 großen Felssturzes vom 05.10.2021 mit einer horizontalen Auslaufweite von 600–700 m; Quelle: D. Binder, 25.08.2022.

Figure 11: Left, the rockfall from 30 August 2020 (blue, 15.570 m^3) and rockfall from 5 October 2021 (red, 23.510 m^3) from the western section of the north face. Terrain representation: Point cloud of the UAV flight from 25/08/2022 (source: GeoSphere Austria). Right, the deposits of the 23.510 m^3 rockfall from 5 October 2021 with a horizontal run-out width of 600–700 m; source: D. Binder, 25 August 2022.

Die mittels drohnenbasierter Photogrammetrie detektierten Ablösebereiche (räumliche Komponente) liefern, in Kombination mit den Ergebnissen des parallel laufenden, passiven seismischen Monitorings (zeitliche Komponente), ein

hochpräzises Steinschlaginventar, das eine entscheidende Grundlage für die Beurteilung der lokalen Entwicklung der Felsstabilität darstellt und gleichzeitig, gerade im Kontext von rezentem Klimawandel, gekoppelt an hochalpiner Permafrostdegradation, zu einem verbesserten Verständnis der hochalpinen Steinschlag- bzw. Felssturzdynamik beiträgt (Abb. 11).

Mittels Differenzanalyse zwischen den am 19.08.2021 und am 25.08.2022 erhobenen Photogrammetriedaten wurden 21 Ablösebereiche mit Versagenstiefen ≥ 1 m identifiziert – siehe Tabelle 1 und Abbildung 12. Die Versagenstiefe beschreibt dabei die maximale (euklidische) Distanz zwischen der Geländeoberfläche vor und nach dem Ereignis. Aus der Differenzanalyse sticht eine signifikante Felsablösung im westlichen Wandbereich hervor (ID 2021-2022_01 in Tab. 1). Augen- bzw. Ohrenzeugenberichte belegen ein großes Einzelereignis am 05.10.2021 (18:30 Uhr), welches sowohl am Sonnblick-Observatorium als auch am Ammererhof (Kolm-Saigurn) hör-, spür- bzw. sichtbar war. Die identifizierte Fläche repräsentiert somit aller Voraussicht nach einen als Einzelereignis abgegangenen Felssturz. Das große Volumen und die erhebliche Sturzhöhe begünstigten die Ausbildung einer langen Transportbahn, die bis in die unmittelbare Nähe des Pilatussees reichte. Die horizontale Auslaufweite des Ereignisses vom 05.10.2021 beträgt somit 600–700 m (siehe Abb. 13). Der Ablösebereich vom 05.10.2021 liegt unmittelbar neben dem Ablösebereich des Felssturzes vom 30.08.2020 bzw. zeigt eine geringfügige räumliche Überlappung mit diesem (obige Abbildung). Hinsichtlich seines Volumens übertrifft der Felssturz vom 05.10.2021 das Ereignis vom 30.08.2022 um rund 8.000 m³ und repräsentiert damit das mit Abstand größte Ereignis seit Beginn der Befliegungen im Jahr 2019 bzw. seit den ersten terrestrischen Laserscan-Messungen im Jahr 2015. Ein markantes, leicht nach Nordwesten abfallendes Felsband auf einer Seehöhe von rund 2700 m ü. NN bildete (wie schon beim Ereignis vom 30.08.2020) die Unterkante des Ablösebereichs vom 05.10.2021. Die Ablösung der 23.510 m³ großen Kubatur erfolgte zum größten Teil entlang derselben ausgeprägten, in etwa vertikal stehenden Kluftschar wie beim Felssturz vom 30.08.2020 und erklärt damit die fast identischen maximalen Versagenstiefen der beiden Ereignisse (7,9 m am 30.08.2020 bzw. 8,3 m am 05.10.2021).

Die als Einzelereignisse ausgewiesenen Ablösebereiche #2-8 (siehe Tab. 1 und Abb. 12) befinden sich in der Sturzbahn des Felssturzes vom 05.10.2021 und haben sich daher aller Voraussicht nach durch die direkte mechanische Einwirkung der herabstürzenden Felsschichten gelöst. Ablösebereich #20 (ID 2021–2022_20) stellt mit einem Volumen von 233 m³ das größte Ereignis außerhalb des direkten Einflussbereichs des großen 23.510 m³-Ereignisses dar. Der Felssturz löste sich in unmittelbarer Nachbarschaft der Wandvereisung aus einem Felsbereich, der erst in den letzten Jahren durch den Gletscherrückgang freigelegt wurde, und unterstreicht die hohe Massenbewegungsaktivität in kürzlich ausgeapertem Terrain. In der Umgebung des Observatoriums wurden keine größeren Ereignisse registriert.

Tabelle 1: Detektierte Einzelereignisse mit einer Versagenstiefe über 1 m im Zeitraum 19.08.2021–25.08.2022;
Quelle: GeoSphere Austria

Table 1: Detected individual events with a failure depth of more than 1 m in the period 19.08.2021–25.08.2022;
source: GeoSphere Austria

Ablösebereich-ID	Volumen [m ³]	Versagenstiefe [m]	Azimut [°]	Gradient [°]	Oberkante [m ü. NN]	Unterkante [m ü. NN]
2021–2022_01	23.509,90	8,3	54	71	2815,5	2699,0
2021–2022_02	40,8	2,0	62	75	2748,8	2743,9
2021–2022_03	1.041,80	6,1	60	67	2703,4	2673,6
2021–2022_04	114,9	1,9	54	63	2689,8	2682,4
2021–2022_05	127,5	3,0	64	62	2664,7	2653,6
2021–2022_06	33,0	1,8	51	83	2644,5	2639,9
2021–2022_07	18,4	1,8	60	79	2632,6	2628,4
2021–2022_08	133,3	2,1	42	66	2623,1	2609,9
2021–2022_09	7,6	1,1	335	76	3010,9	3007,6
2021–2022_10	10,9	2,2	16	83	3025,1	3018,2
2021–2022_11	16,0	1,1	16	78	2939,8	2933,8
2021–2022_12	9,5	1,3	10	66	2941,3	2937,6
2021–2022_13	6,6	1,1	30	90	3013,9	3010,9
2021–2022_14	2,7	1,0	0	53	2877,1	2875,0
2021–2022_15	5,6	1,2	51	98	3028,4	3026,1
2021–2022_16	10,2	1,2	13	75	2831,7	2827,7
2021–2022_17	5,4	1,2	36	84	3000,8	2995,9
2021–2022_18	3,1	1,1	64	66	2913,1	2910,6
2021–2022_19	4,4	1,1	329	74	2715,9	2713,0
2021–2022_20	233,3	3,3	316	54	2710,5	2695,5
2021–2022_21	1,7	1,0	19	59	2690,0	2686,0

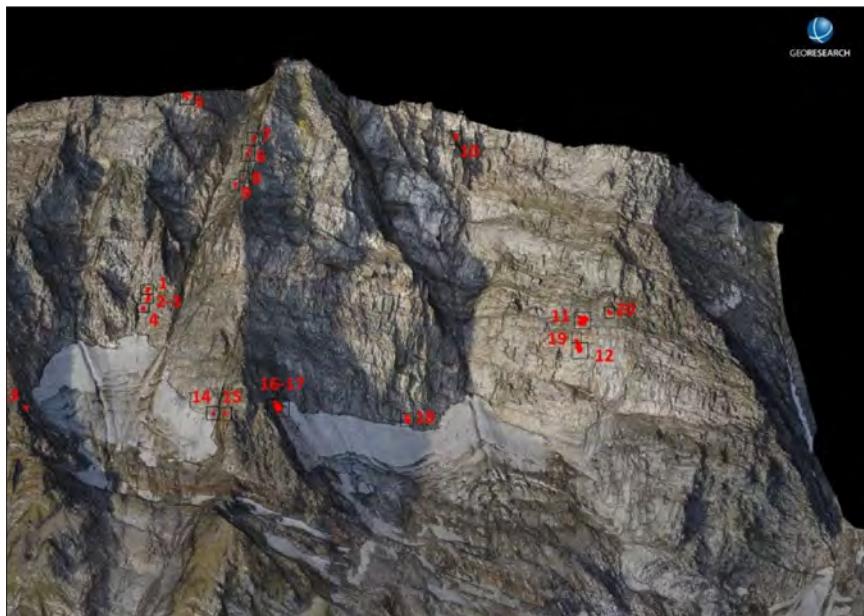


Abbildung 12: Im aktuellen Vergleichszeitraum (19.08.2021 bis 25.08.2022) wurden insgesamt 21 Steinschlag- bzw. Felssturz-Ablösebereiche detektiert (für Zuordnung und Volumina der Ereignisse siehe Tab. 1). Geländedarstellung: Punktfolke der UAV-Befliegung vom 25.08.2022; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 12: In the current comparison period (19.08.2021 to 25.08.2022), a total of 21 rockfall or rockfall release areas were detected (for assignment and volumes of the events see table 1). Terrain representation: Point cloud of the UAV flight of 25 August 2022; source: GeoSphere Austria.

4.6 Kontinuierliche Kluftmessungen – Crackmetermessungen

Im Rahmen der geologisch-geotechnischen Beurteilung des Hohen Sonnblcks im Hinblick auf die Standortsicherheit des Gebäudekomplexes wurden von Dr. Gert Furthmüller entlang von fünf Abseilstrecken (A-E) Klüfte nummeriert und Messungen der Kluftöffnungsweiten durchgeführt. Hierdurch wird eine quantitative Erfassung der Kluftweiten und bei Wiederholung deren Veränderung bestimmt und folglich eine Beurteilung der Standsicherheit der Seilbahn und des Observatoriums ermöglicht. Für die geologisch-geotechnische Befundaufnahme wurde im Zuge der Überprüfung das Areal des Sonnblck-Observatoriums bis zur Grundgrenze der Schutzhütte des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV), dem Zittelhaus, beurteilt und auf Basis der in Abbildung 13 dargestellten Wandabschnitte unterteilt.



Abbildung 13: Hoher Sonnblick – Sonnblick-Observatorium – Bereichsabgrenzung Ostwand – Nordwand und Nordostpfeiler; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 13: Hoher Sonnblick - Sonnblick Observatory – delimitation of the east face - north face and north-east pillar; source: GeoSphere Austria.

Basierend auf der Geländebegehung und der daraus resultierenden Dokumentation wurden im September 2021 in Kooperation mit Herrn Dr. Furthmüller erstmalig vier Kluftweitenmessgeber, sogenannte Crackmeter oder Rissdistanzgeber, entlang der Abseilstrecke A (Kluft 7) und E (Kluft 8) installiert (Abb. 14). Das Ziel dieser Crackmeter ist es, kontinuierliche Messungen der Öffnungsweiten der Klüfte zu beobachten und den exakten Zeitpunkt des Öffnens festzustellen (Abb. 15).



Abbildung 14: Crackmeterstandorte in der Sonnblick Nordwand; Quelle S. Reisenhofer.
Figure 14: Crack metre locations in the Sonnblick north face; source S. Reisenhofer.

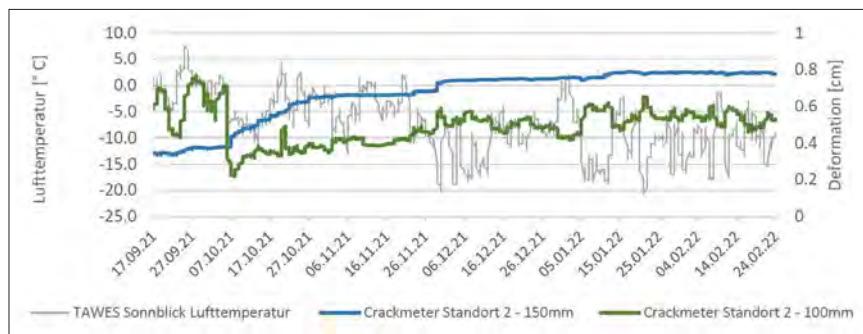


Abbildung 15: Deformationsmessungen am Crackmeter-Standort NORD-C2 und Verlauf der mittleren stündlichen Lufttemperatur; Quelle: GeoSphere Austria.

Figure 15: Deformation measurements at the NORD-C2 crack metre site and average hourly air temperature curve; source: GeoSphere Austria.

5 Zusammenfassung

Der Hohe Sonnblick in den österreichischen Alpen ist ein besonders wertvoller Standort für glaziologische Fragestellungen und Untersuchungen des Permafrosts. Aufgrund der Höhe und der dort etablierten umfassenden atmosphärischen Beobachtungsprogramme bietet der Sonnblick eine hervorragende Gelegenheit, die langfristigen Auswirkungen der Erwärmung auf die alpine Kryosphäre zu analysieren. Das Monitoring auf dem Sonnblick ermöglicht es, Veränderungen in direktem Zusammenhang mit den klimatischen Bedingungen zu setzen. Dabei geht es nicht nur um das Verständnis der lokalen Auswirkungen, sondern auch um das Erstellen von Modellen, die Rückschlüsse auf globale Entwicklungen im Klimasystem erlauben.

Über die letzten Jahrzehnte wurde die messtechnische Infrastruktur des Kryosphärenmonitorings am und um den Sonnblick kontinuierlich erweitert. Im Rahmen diverser Projekte wurden zahlreiche Messstationen und Technologien implementiert. Diese Entwicklungen haben dazu geführt, dass der Sonnblick im Global Cryosphere Watch Programm der WMO als internationale Referenzstation eingestuft wurde, was auf sein besonders umfangreiches und qualitativ hochwertiges Beobachtungsprogramm hinweist.

Durch die systematische Erfassung und Analyse dieser Daten aus Langzeitbeobachtungen können Forscher wertvolle Erkenntnisse über die Auswirkungen des Klimawandels auf alpine Ökosysteme gewinnen und mögliche zukünftige Entwicklungen besser vorhersagen. Dies ist besonders wichtig, um Strategien zur Anpassung und zum Schutz der Umwelt und der menschlichen Infrastruktur in Hochgebirgsregionen zu entwickeln.

6 Literatur

- Agisoft LLC (2023): Discover intelligent photogrammetry with Metashape. – Internet: <https://www.agisoft.com/> (15.10.2023).
- BOECKLI, L., A. BRENNING, A. GRUBER, S. & NOETZLI, J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. – *The Cryosphere*, **6** (4): 807-820.
- BÖHM, R., SCHÖNER, W., AUER, I., HYNEK, B., KROISLEITNER, C. & G. WEYSS, G. (2007): Gletscher im Klimawandel. Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. – 111 S.; Wien (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).
- BUCKEL, J., OTTO, J.C., PRASICEK, G. & KEUSCHNIG, M. (2018): Glacial lakes in Austria - Distribution and formation since the Little Ice Age. – *Global and Planetary Change*, **164**: 39-51.
- COGLEY, J.G., ARENDT, A.A., BAUDER, A., BRAITHWAITE, R.J., HOCK, R., JANSSON, P., KASER, G., MOLLER, M., NICHOLSON, L., RASMUSSEN, L.A. & ZEMP, M. (2011): Glossary of glacier mass balance and related terms. *IHP-VII Technical Documents in Hydrology*, **86** (2): 114 S.; Paris.
- HAEBERLI, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Fluelapass und Piz Grialetsch (GR). – *Mitteilungen der VAW/ETH Zürich*, **17**: 228 S.

- HEUCKE, E. (1999): A Light Portable Steam-driven Ice Drill Suitable for Drilling Holes in Ice and Firn. – *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, **81** (4): 603-609.
- KLENE, A.E., NELSON, F.E. & SHIKLOMANOV, N.I. (2001): The N-factor as a tool in geocryological mapping: Seasonal thaw in the Kuparuk River Basin, Alaska. – *Physical Geography*, **22** (6): 449-466.
- Kovacs Enterprise (2023): About Kovacs Ice Auger Drills. Kovacs Enterprise – Ice drilling and coring equipment. – Internet: <https://kovacsicedrillingequipment.com/about-ice-auger-drills/> (02.09.2023).
- SCHÖNER, W. (2003): Massenhaushaltsbestimmung alpiner Gletscher. Gletschermassenhaushaltsuntersuchung, 3. überarbeitete Ausgabe. – 36 S.; Wien (Arbeitsunterlagen für die Lehrveranstaltung „Gletschermassenhaushaltsuntersuchungen“ am Institut für Meteorologie und Physik der Universität für Bodenkultur Wien und am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien).

Mag. STEFAN REISENHOFER
MSc. ANTON NEUREITER

GeoSphere Austria
Hohe Warte 38
A-1190 Wien
stefan.reisenhofer@geosphere.at
anton.neureiter@geosphere.at

Manuskripteingang: 31. Oktober 2024

Phänologie: Pflanzenentwicklung im Jahresverlauf und Veränderungen durch den Klimawandel

ANDREAS BRÖMSER & BIANCA PLÜCKHAHN

Phänologie, Pflanzenentwicklung, phänologisches Netz, Klimawandel, Spätfrostgefahr

K u r z f a s s u n g : Die Eintrittszeiten bestimmter Pflanzenentwicklungsphasen im Jahresverlauf werden vereinzelt bereits seit mehreren Jahrhunderten erfasst, in Deutschland werden diese Beobachtungen an einer Vielzahl von Standorten seit 1951 standardisiert durchgeführt. Die nun seit fast 75 Jahren vorliegenden Beobachtungsreihen zeigen eine deutliche Verfrühung der Eintrittstermine vom Frühling bis in den Herbst hinein. Da diese Eintrittszeiten maßgeblich von der Temperaturrentwicklung im jeweiligen Jahr abhängen, ist hier der direkte Einfluss durch die im Rahmen des Klimawandels steigenden Temperaturen auf die Pflanzenwelt zu beobachten. Diese Veränderungen wirken sich auch auf die Häufigkeit von schädigenden Spätfrostereignissen aus. Zudem müssen die Pflanzen mit steigender Hitzelastung und mit vor allem in der Vegetationsperiode zeitweise stärker ausgetrockneten Böden als in der Vergangenheit zureckkommen.

Phenology: Development of plants in the course of the year and shiftings due to climate change

Phenology, plant development, phenological network, climate change, risk of late frost

A b s t r a c t : At a few locations the onset times of specific stages of plant development throughout the year have been recorded for several centuries. In Germany, these observations have been carried out in a standardised manner at a large number of locations since 1951. These long-term observations, which are available for almost 75 years now, show a significant shift towards earlier onset times from spring till the earlier autumn stages. As these dates depend mainly on temperature development in the particular year, the direct influence of rising temperatures on the flora due to climate change can be observed here. These changes also affect the frequency of damaging spring frost events. Besides, plants have to cope with increasing heat stress and, especially during the growing season, temporarily lower soil moisture than in the past.

Inhaltsverzeichnis

1	Begriffserklärung	36
	Geschichte der Phänologie	36
3	Phänologisches Stationsnetz und Phasen	38
4	Phänologische Produkte des DWD	39
5	Klimawandel und Phänologie	43
5.1	Erwärmung in Deutschland	43
5.2	Auswirkung auf die Phänologie	44
6	Veränderungen der Spätfrostgefahr	46

7	Zunehmender Hitzestress	51
8	Veränderung von Niederschlag und Bodenfeuchte	53
9	An den Klimawandel angepasste Pflanzenwahl	55
10	Literatur	56

1 Begriffsklärung

Die Phänologie (griechisch: „Lehre von den Erscheinungen“) befasst sich mit den im Jahresverlauf periodisch wiederkehrenden Entwicklungserscheinungen der Pflanzen- und Tierwelt und deren Eintrittszeitpunkten. Dabei werden die Eintrittsdaten auffälliger Entwicklungsstadien notiert. Bei Pflanzen sind dies zum Beispiel Daten der Blattentfaltung, Blüte oder Fruchtreife und bei Tieren Daten für periodische Wanderungen oder bestimmte Verhaltensweisen. Die Phänologie erforscht auch die Zusammenhänge zwischen der biologischen Rhythmisierung und den Umwelteinflüssen, insbesondere den Witterungs- und Klimaverhältnissen (DWD-Wetterlexikon 2025; MENZEL 2023).

2 Geschichte der Phänologie

Die mit über 1200 Jahren längste phänologische Zeitreihe stammt aus Japan, dort wird der Zeitpunkt der Kirsch-Vollblüte am kaiserlichen Hof in Kyoto seit dem Jahr 812 beobachtet (Abb. 1). Die frühesten, in Kyoto im jeweiligen Jahr beobachteten Zeitpunkte 26.03.2021 und 25.03.2023 stammen dabei aus der jüngsten Vergangenheit – das ist ein deutlicher Hinweis auf den globalen Klimawandel der jüngsten Vergangenheit; Informationen zum Klimawandel in Deutschland werden in Kap. 5 gegeben. In Japan hat das an die Blüte gekoppelte Kirschblütenfest (Hanami) im Frühling große Bedeutung.

In Europa begann die systematische Erfassung von phänologischen Daten im 18. Jh. Im Jahr 1736 begann Robert Marsham in Stratton, nahe Norwich, England, die phänologische Beobachtungsreihe „27 Frühlingszeichen“, die Blühbeginn und Blattaustrieb verschiedener Pflanzen sowie die Ankunft von Zugvögeln enthielt. Diese Reihe wurde durch nachfolgende Generationen der Familie bis 1958 fortgeführt. Im Jahr 1751 führte Carl von Linné in Schweden phänologische Beobachtungen an 18 Stationen ein und gründete damit das erste phänologische Beobachtungsnetz der Welt. Von 1781 bis 1792 wurde das erste internationale phänologische Netz durch die Mannheimer Meteorologische Gesellschaft („Societas Meteorologica Palatina“) betrieben. Der Durchbruch für standardisierte phänologische Beobachtungen erfolgte 1882, als der Universitätsprofessor Hermann Hoffmann einheitliche Beobachtungsrichtlinien einführte, damit wurde der Grundstein für ein europaweites Beobachtungsnetz gelegt (KASPAR 2014). In Geisenheim (Rhein-

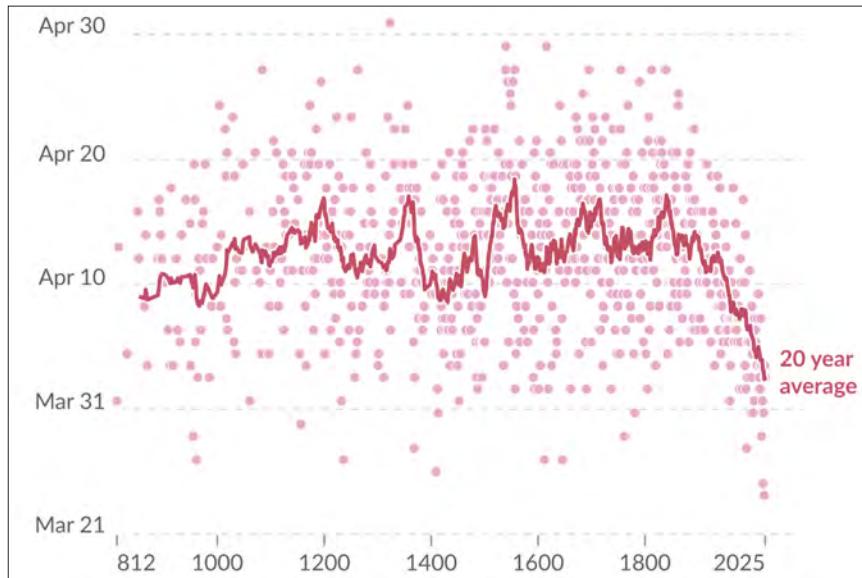


Abbildung 1: Tag des Eintritts der Kirsch-Vollblüte in Kyoto, Japan von 812 bis 2025; Quelle: Yasuyuki Aono, Our world in Data.

Figure 1: Day of peak cherry blossom in Kyoto, Japan from 812 to 2025; source: Yasuyuki Aono; Source, Our world in Data.

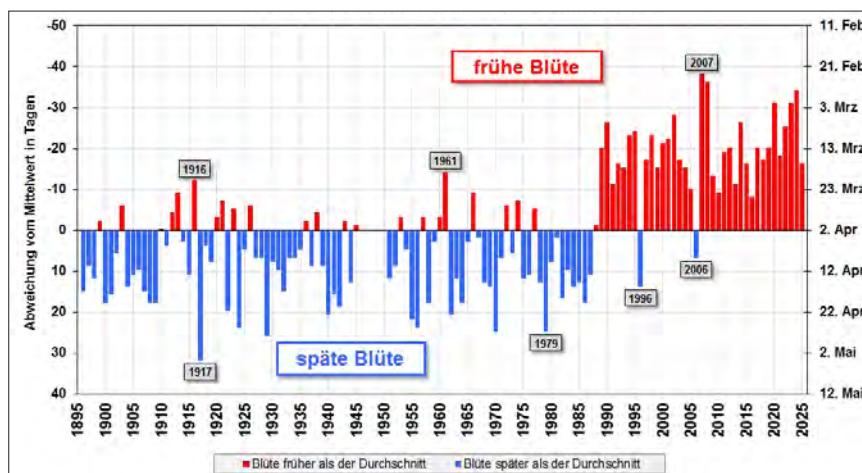


Abbildung 2: Beginn der Schlehenblüte in Geisenheim (Rheingau) von 1896 bis 2024; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 2: Beginning of cherry blossom in Geisenheim (Rheingau) from 1896 to 2024; source: Deutscher Wetterdienst.

gau) besteht von 1896 bis heute eine fast durchgehende Beobachtungsreihe von mehr als 100 Pflanzenentwicklungsphasen (Abb. 2).

3 Phänologisches Stationsnetz und Phasen

Der Deutsche Wetterdienst betreibt zwei unterschiedliche phänologische Netzwerke, wobei durch beide ausschließlich Pflanzenentwicklungsdaten gewonnen werden. Beobachterinnen und Beobachter des DWD können jedoch am österreichischen Tierbeobachtungsprogramm der GeoSphere Austria in Wien (ehemals ZAMG) teilnehmen.

Das DWD-Beobachtungsnetz der Jahresmelder existiert seit 1951. Derzeit melden rd. 1000 nahezu gleichmäßig über Deutschland verteilte ehrenamtliche phänologische Beobachter und Beobachterinnen über das Jahr hinweg bis zu 168 Pflanzenentwicklungsphasen. Diese beinhalten Phasen von 31 verschiedenen Wildpflanzen, Bäumen und Sträuchern, neun landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, sieben Obstarten und zwei Weinrebsorten. Die Pflanzen sind im Umkreis von maximal 5 km um den Beobachtungsort in gleicher Höhenlage (Abweichung in der Höhe höchstens 50 m vom Wohnort des Beobachters/der Beobachterin) zu beobachten. Bei mehrjährigen Pflanzen werden möglichst über viele Jahre hinweg dieselben Exemplare beobachtet. Die Meldungen werden von den Beobachtern/Beobachterinnen teilweise zeitnah im Programm PhänOnline eingetragen, teilweise erst nach Ende der Saison auf einem Papiermeldebogen per Post an den DWD geschickt. Die Daten werden für wissenschaftliche Studien genutzt – häufig bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenwelt. Außerdem können damit phänologische Satellitendaten verifiziert werden.

Seit 1992 gibt es zusätzlich das Sofortmelder-Beobachtungsnetzwerk mit derzeit rd. 300 Beobachtern, die meist zugleich auch Jahresmelder sind. Hierbei erfolgt die Meldung sofort nach der Beobachtung, in Einzelfällen bis heute per Telefon, meist aber über PhänOnline. Die Daten gehen bereits am Folgetag in phänologische Produkte ein. Das Sofortmeldeprogramm beinhaltet lediglich 83 Entwicklungsphasen, wobei jeweils die „frühesten“, also die am weitesten entwickelten Pflanzen im Umkreis des Beobachtungsorts gemeldet werden. Diese aktuellen Daten werden zur agrarmeteorologischen Berichterstattung und zur Prognose von Obstblüte oder Ernteterminen genutzt. Außerdem gehen sie in agrarmeteorologische Modelle, z. B. zur Abschätzung der Durchwurzelungstiefe landwirtschaftlicher Kulturen, für die Berechnung der Bodenfeuchte, zur Ermittlung des Auftretens von Schädlingen sowie in die Pollenvorhersage ein.

Da aus den Beobachternetzen vorwiegend aus Altersgründen immer wieder Beobachter/Beobachterinnen ausscheiden, gibt es unter www.dwd.de/pflanzenbeobachter eine Liste von Orten, für die der DWD neue Beobachter sucht, um die langen, für die Wissenschaft besonders wertvollen Beobachtungsreihen fortsetzen

zu können. Für diese ehrenamtliche Tätigkeit erhalten die Beobachter eine jährliche Aufwandsentschädigung von anfangs 250 €. Neue Beobachter/Beobachterinnen bekommen eine ausführliche, reich bebilderte Beobachtungsanleitung, das Phänologie-Journal, und werden von Mitarbeitenden der Abteilung Agrarmeteorologie telefonisch und schriftlich betreut (DWD-Phänologie 2025).

4 Phänologische Produkte des DWD

Der Deutsche Wetterdienst bietet unter www.dwd.de/phaenologie und „Produkte“ eine Reihe von verschiedenen Auswertungen und Grafiken zur Phänologie an. Dabei gehen unter „Produkte zur aktuellen Pflanzenentwicklung“ die täglich aktualisierten Daten des Sofortmeldenetzwerks ein, für die „Produkte zur langjährigen Pflanzenentwicklung“ werden hingegen Daten der Jahresmelder verwendet. Im Folgenden werden besonders anschauliche Produkte beschrieben.

Unter „Aktuelle Phänologie“ befinden sich Deutschlandkarten des Eintrittszeitpunkts aller 83 phänologischen Phasen der Sofortmelder, hierbei wird je nach Zeitpunkt im Jahr entweder die aktuell laufende Phase oder die im aktuellen Jahr oder im Vorjahr abgeschlossene Phase gezeigt (Abb. 3). Bei noch relativ wenigen Meldungen werden die Stationsstandorte und bereits erfolgte Meldedaten angezeigt, bei bereits hoher Meldequote wird die Karte auf Basis der Eintrittsdaten flächig eingefärbt. Bei Auswahl eines Bundeslands werden immer die einzelnen Meldungen angezeigt.

Die „Phänologische Jahresstatistik“ bietet Zeitreihen zum Vergleich des aktuellen Entwicklungsstands mit den Einzeljahren der vergangenen Jahrzehnte bei laufender (wenn von der Pflanzenentwicklung her derzeit relevant) und bei abgeschlossener Phase (Abb. 4). Für viele Phasen liegen Daten seit 1992 vor, in manchen Fällen reichen die Daten weniger weit zurück. Das mittlere Beobachtungsdatum wird aus den Jahren vom Beginn der Zeitreihe bis zum Vorjahr berechnet. Die phänologische Jahresstatistik lässt sich auch für einzelne Bundesländer anzeigen.

In der Phänologie wird zur besseren Beschreibung der Pflanzenentwicklung im Jahresverlauf der Frühling, Sommer und Herbst jeweils in drei Jahreszeiten feiner aufgeteilt, somit besteht das Jahr aus zehn phänologischen Jahreszeiten. Dabei beginnt eine Jahreszeit immer mit dem Eintritt einer Leitphase; so beginnt z. B. der phänologische Hochsommer mit dem Blühbeginn der Sommer-Linde. Das bedeutet auch, dass eine phänologische Jahreszeit in Regionen mit rascher Pflanzenentwicklung früher beginnt als in Gebieten mit einer verzögerten Entwicklung. Die phänologische Jahreszeit endet mit dem Beginn der Leitphase der folgenden Jahreszeit.

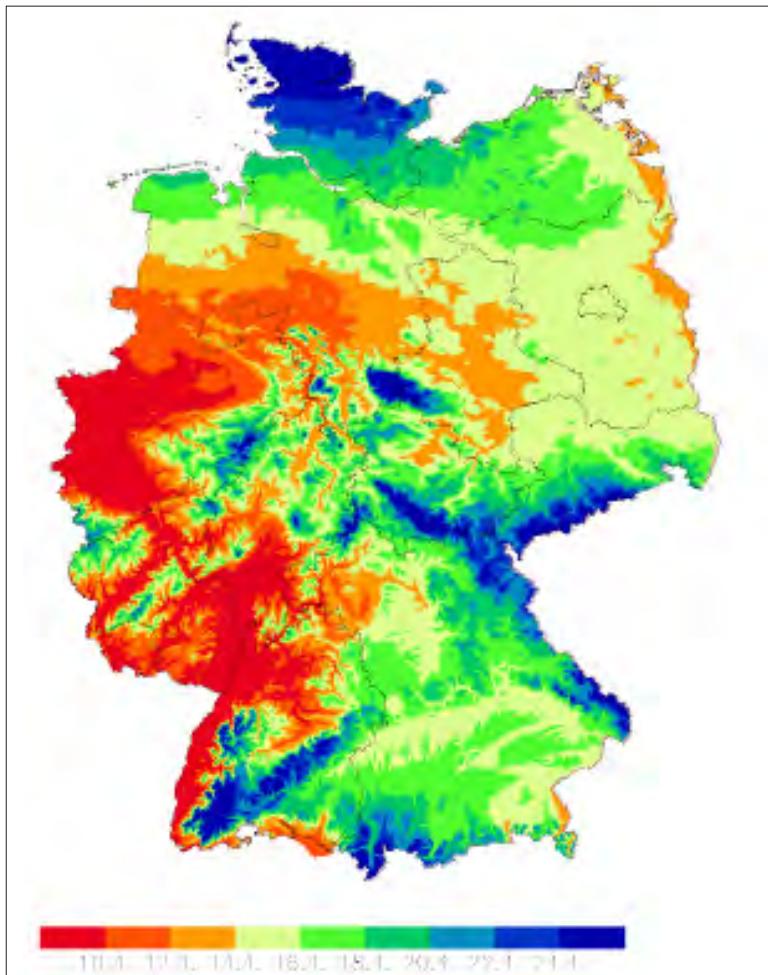


Abbildung 3: Blühbeginn des Apfels im Jahr 2025 (aus Beobachtungen interpolierte Deutschlandkarte); Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 3: Beginning of apple blossom in 2025 (map of Germany generated from interpolated observations); source: Deutscher Wetterdienst.

Eine besonders anschauliche Darstellung der Eintrittstermine der phänologischen Jahreszeiten ist die „phänologische Uhr“ (s. Abb. 5) – wahrscheinlich das bekannteste phänologische Produkt. Hierbei wird in einem farbigen Kreisdiagramm im äußereren Ring das vieljährige Mittel des Beginns der Jahreszeiten gezeigt. Für die Mehrzahl der phänologischen Jahreszeiten bezieht sich das Mittel auf den Zeitraum von 1992 bis zum Vorjahr, bei manchen Phasen sind jedoch nur

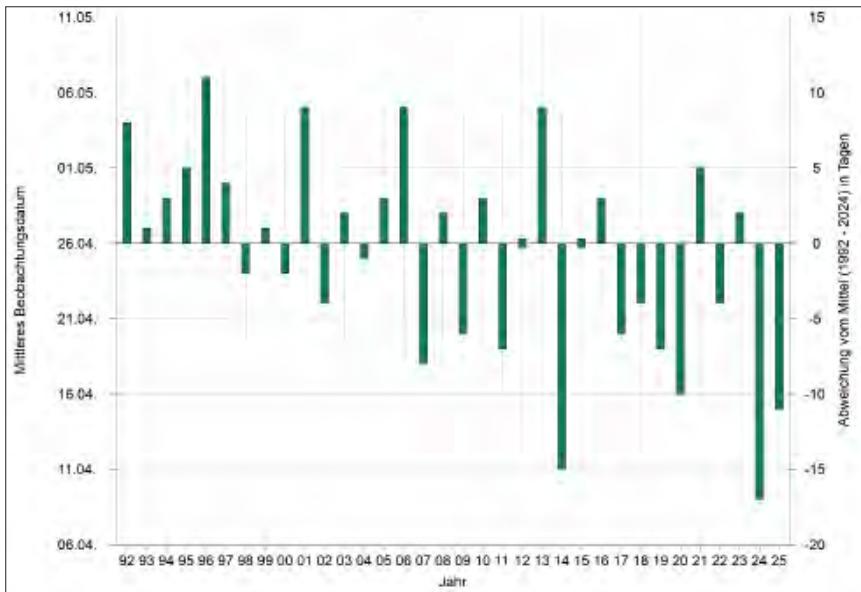


Abbildung 4: Zeitreihe des über Deutschland gemittelten Beginns der Apfelblüte von 1992 bis 2025; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 4: Time series of the beginning of apple blossom from 1992 to 2025, average of Germany; source: Deutscher Wetterdienst.

kürzere Zeiträume verfügbar. Auf dem inneren Ring wird entweder das aktuell laufende Jahr oder das Vorjahr dargestellt. Somit lässt sich auf einen Blick die Verfrühung oder Verspätung der Pflanzenentwicklung im Jahresverlauf erkennen. Die phänologische Uhr lässt sich auch für einzelne Bundesländer anzeigen. Die phänologische Uhr für Hessen für 2025 (Abb. 5) zeigt für die meisten bisherigen Jahreszeiten eine leichte, für den Vollfrühling und Frühsommer eine deutliche Verfrühung gegenüber dem vieljährigen Mittel.

Die phänologischen Sofortmelddaten des Blühbeginns und Blühendes von Pflanzen, deren Pollen allergische Reaktionen hervorrufen können, gehen auch in die Berechnung des Pollenflug-Gefahrenindex ein, siehe www.dwd.de/pollenflug.

Für langfristige Veränderungen der phänologischen Jahreszeiten bzw. des mittleren Eintrittszeitpunkts bestimmter Phasen werden die für viele Phasen seit 1951 verfügbaren Jahresmelderdaten verwendet. Daraus lässt sich z. B. ein Vergleich des Beginns der phänologischen Jahreszeiten im Mittel der Klimareferenzzeiträume 1961–1990 und 1991–2020 erstellen. Für die Leit- und Ersatzphasen der phänologischen Jahreszeiten sind auch lange Reihen mit linearen Trends seit 1951 verfügbar (Abb. 6).

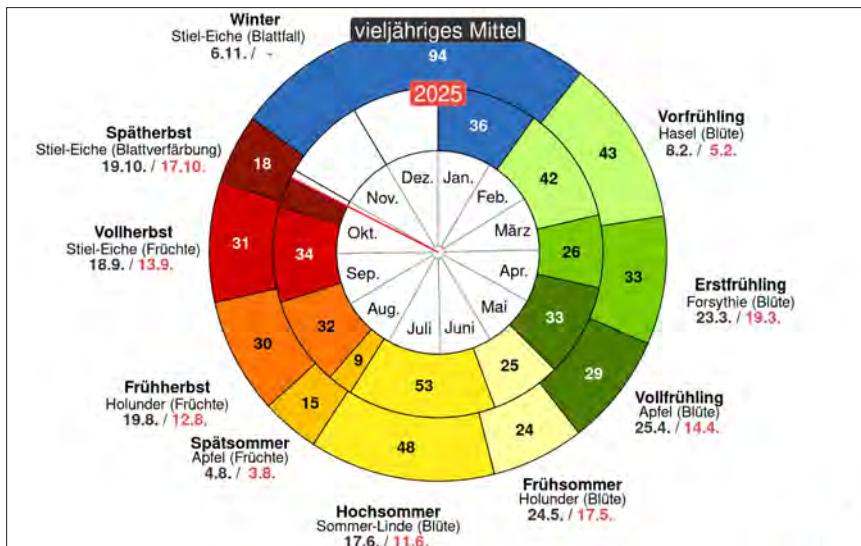


Abbildung 5: Phänologische Uhr für Hessen 2025 im Vergleich mit dem vieljährigen Mittel, Stand: 29.10.2025; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 5: Phenological clock for Hesse 2025 in comparison with the multi-year average (October 10th, 2025); source: Deutscher Wetterdienst.

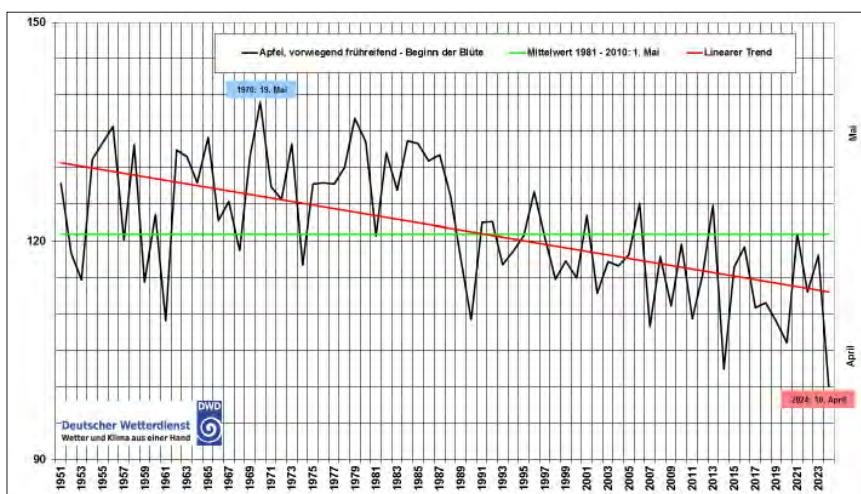


Abbildung 6: Über Deutschland gemittelter Beginn der Apfelblüte aus Daten der Jahresmelder in den einzelnen Jahren von 1951 bis 2024 und linearer Trend; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 6: Time series of the beginning of apple blossom from 1951 to 2024, data from the yearly observers' network, average of Germany; source: Deutscher Wetterdienst.

5 Klimawandel und Phänologie

Die Entwicklung der Pflanzen steht in weiten Teilen des Jahresverlaufs – besonders von der Blüte bzw. dem Austrieb bis zur Fruchtreife – in starkem Zusammenhang mit der Temperatur (KOLBE 2015). Für den Eintritt vieler Entwicklungsphasen ist vor allem das Erreichen bestimmter Temperatur- bzw. Wärmesummen nach einem winterlichen Kältereiz von Bedeutung. Zur Bildung solch einer Summe werden die Tagesmitteltemperaturen ab einem definierten Startdatum bis zum aktuellen Tag addiert. So zeigt z. B. die Grünlandwärmesumme, die ab Jahresbeginn mit einer speziellen Gewichtung der Tagesmittelwerte berechnet wird, mit Erreichen von 200 °C den nachhaltigen Wachstumsbeginn des Grünlands an. Daraus ergibt sich, dass mit in Folge des Klimawandels im Mittel steigenden Temperaturen bestimmte Entwicklungsstadien immer früher erreicht werden; die phänologischen Phasen und Jahreszeiten verschieben sich vom Vorfrühling bis in den Herbst hin zu früheren Terminen.

5.1 Erwärmung in Deutschland

Während sich die globale Mitteltemperatur seit der zweiten Hälfte des 19. Jh. bis heute um rd. 1,5 K (Grad Kelvin, 1 K Unterschied entspricht 1 °C) erhöht hat, fällt die Erwärmung in Deutschland seit Aufzeichnungsbeginn im Jahr 1881 mit

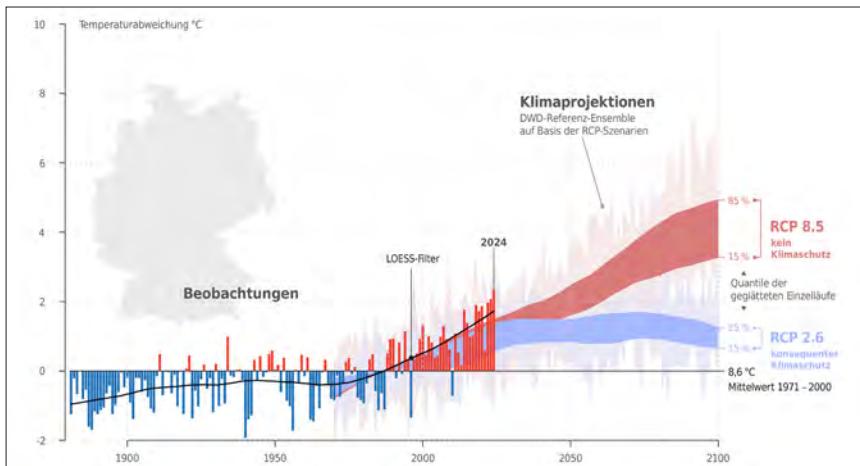


Abbildung 7: Abweichung der über Deutschland gemittelten Jahresmitteltemperatur der Einzeljahre 1881 bis 2024 vom Mittel 1971 bis 2000 und Klimaprojektionen bis 2100 nach den IPCC-Emissionsszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 7: Deviation of the mean yearly temperature (average of Germany) of all single years from 1881 to 2024 from the mean 1971 to 2000 and climate projections till 2100 according to the IPCC-scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5; source: Deutscher Wetterdienst.

rd. 2,5 K (Abb. 7) deutlich stärker aus (DWD-Fachtext 2025). Ein Großteil dieser Erwärmung erfolgte erst seit den 90er-Jahren des letzten Jh.; innerhalb von 30 Jahren ist die Jahresmitteltemperatur um mehr als 1 K angestiegen! Wie stark sich die Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten fortsetzt, hängt vom zukünftigen Verhalten der Menschheit ab, also von den zukünftigen Treibhausgasemissionen. Im Falle des „Weiter-wie-bisher-Szenarios“ ist bis Ende des 21. Jh. ein weiterer Anstieg der Jahresmitteltemperatur von 3 bis 4 K zu erwarten, der Bezugszeitraum ist hierbei 1971 bis 2000. Bei einem starken Klimaschutzszenario beträgt die weitere Erwärmung hingegen nur etwa 1,5 K. Die Entwicklung seit 1881 und die Klimaprojektionen bis zum Jahr 2100 findet man im Klimaatlas des DWD: www.dwd.de/klimaatlas.

5.2 Auswirkung auf die Phänologie

Besonders im Frühling und Sommer besteht ein starker Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit von pflanzenphysiologischen Vorgängen – höhere Temperaturen führen zu einer Verfrühung des Eintritts bestimmter Entwicklungsstadien (CHMIELEWSKI 2016). Die langen Beobachtungsreihen der Jahresmelder seit 1951 bieten die Möglichkeit, die Veränderung der phänologischen Mittelwerte in klimarelevanten Zeiträumen zu untersuchen. Unter klimatologischer Referenzperiode oder Klimanormalperiode versteht man einen 30-jährigen Zeitraum, mit dessen Mittelwerten ein Klimazustand – also der langfristige mittlere Zustand des Wetters – bestimmt wird. Dieser Zeitraum wurde von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) auf 30 Jahre festgelegt. Man geht davon aus, dass sich nach dieser Dauer die unterschiedlichen Witterungsverläufe der einzelnen Jahre herausgemittelt haben. Aktuell wird z. B. für den Vergleich eines Monats mit der jüngeren Vergangenheit die Referenzperiode 1991 bis 2020 verwendet. Für langfristige Klimatrends soll allerdings weiterhin der Klimareferenzzeitraum 1961 bis 1990 verwendet werden, um die sich mit der Zeit vergrößernden Unterschiede, vor allem die zunehmende Erwärmung, konsistent darzustellen.

Da die Jahresmelderdaten beide genannte Referenzzeiträume komplett abdecken, lässt sich die langfristige phänologische Entwicklung durch einen Vergleich der mittleren Eintrittstermine in den Zeiträumen 1961–1990 und 1991–2020 bestimmen. Die phänologische Uhr zeigt beim Vergleich dieser Zeiträume eine deutliche Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten vom Vorfrühling bis zum Beginn des Vollherbstes hin zu früheren Terminen (Abb. 8). Der Vorfrühling beginnt im jüngeren Zeitraum rd. 2,5 Wochen früher, die weiteren phänologischen Jahreszeiten bis zum Vollherbstbeginn haben sich um etwa zehn Tage verfrüht. Blattverfärbung und Blattfall der Stiel-Eiche haben sich hingegen geringfügig zu späteren Terminen hin verschoben. Dies liegt am im Mittel späteren Auftreten von ersten Frösten im Herbst. Damit wurde der phänologische Winter – die Zeit der Vegetationsruhe – um fast drei Wochen kürzer. Außerdem erfolgt

in immer längeren milden Witterungsabschnitten des Winters zunehmend häufig schwaches Wachstum von Gräsern, Winterraps und Wintergetreide – die Vegetationsruhe wird unterbrochen. Wenn man bedenkt, dass es sich bei den Daten der phänologischen Uhr um vieljährige Mittelwerte handelt und die beiden betrachteten Zeiträume nur um 30 Jahre gegeneinander versetzt sind, sind die Veränderungen gewaltig! Wird in eine Zeitreihe des gesamten von den Jahresmelderdaten abgedeckten Zeitraums 1951 bis 2024 ein linearer Trend eingefügt, ergeben sich noch deutlich größere Verschiebungen. Danach verfrühte sich die Haselblüte seit 1951 um einen ganzen Monat und die Apfelblüte um 16 Tage (s. Abb. 6)!

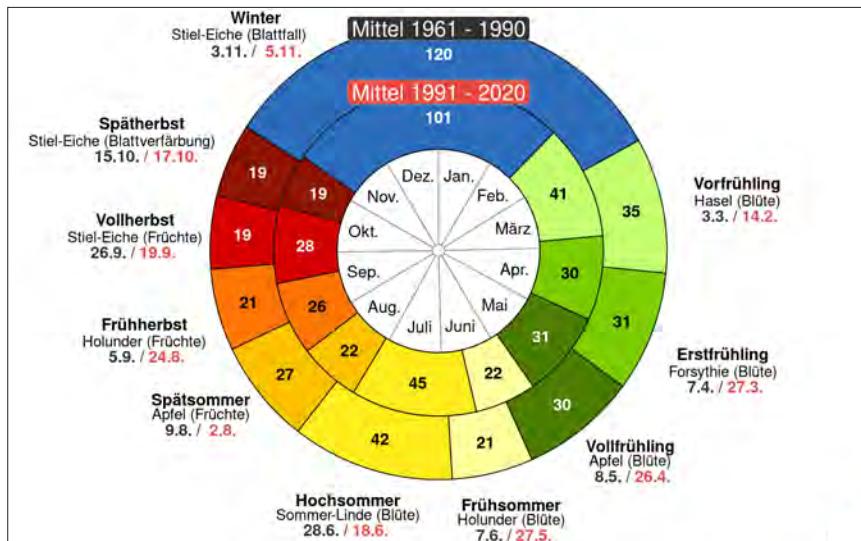


Abbildung 8: Phänologische Uhr, Vergleich der Mittelwerte der Klimareferenzzeiträume 1961–1990 und 1991–2020; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 8: Phenological clock, comparison of the multi-annual means (climate reference periods) 1961–1990 and 1991–2020; Source: Deutscher Wetterdienst.

Für den Vegetationsbeginn, der sich an phänologischen Jahresmelderdaten zum Blattaustrieb der Stachelbeere orientiert, sind nicht nur Daten seit 1961 verfügbar, sondern auch die Klimaprojektion bis zum Zeitraum 2071 bis 2100 (Abb. 9; Klimaatlas des DWD unter www.dwd.de/klimaatlas). Laut Klimaatlas wird bei einem mittleren Treibhausgas-Emissionsszenario (RCP 4.5), also deutlichem, aber nicht extremem Klimaschutz in der Zukunft, von der Gegenwart bis gegen Ende des 21. Jh. eine weitere Verfrühung des Vegetationsbeginns von etwa fünf Tagen erwartet. Die starken Schwankungen des Witterungsverlaufs von Jahr zu Jahr bleiben allerdings auch in einem wärmeren Klima bestehen. So kann der Vegetationsbeginn durchaus um drei bis vier Wochen schwanken, der sehr späte Beginn 2013 und der sehr frühe Start im Folgejahr 2014 sind ein gutes Beispiel dafür.

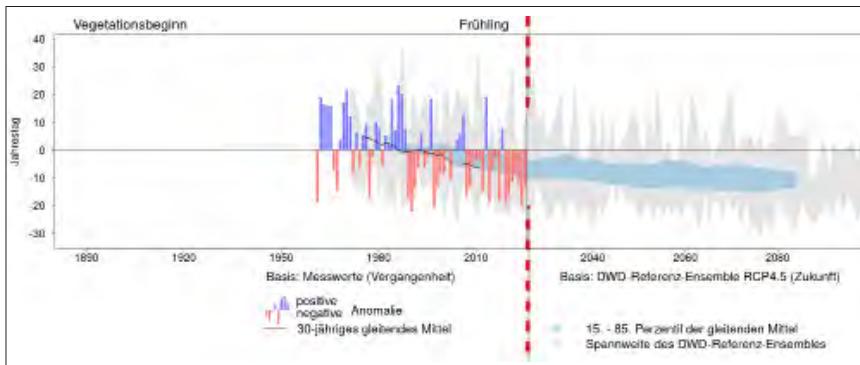


Abbildung 9: Zeitreihe des über Deutschland gemittelten Vegetationsbeginns von 1961 bis 2025 (Abweichung vom Mittelwert 1971 bis 2000) und Klimaprojektion bis 2100 (Zentraljahr 2085) nach dem Klimaszenario RCP 4.5; Quelle: DWD-Klimaatas.

Figure 9: Time series of the onset of the growing season from 1961 to 2025, average of Germany (deviation from the mean value 1971 to 2000) and climate projection up to 2100 according to the climate scenario RCP 4.5; source: DWD climate atlas.

6 Veränderungen der Spätfrostgefahr

Wenn Knospen, Blätter, Blüten oder Früchte Temperaturen unter dem Gefrierpunkt ausgesetzt sind, kann es je nach Stärke des Frostes, Pflanzenart und Entwicklungsstadium der Pflanze zum Absterben der betroffenen Pflanzenteile kommen. Bei solchen potentiell schädigenden Ereignissen im Frühjahr spricht man von Spätfrösten. Diese haben in der Landwirtschaft teils bei Feldfrüchten, in besonderem Maße jedoch im Obst- und Weinbau Bedeutung, da sie durch Erfrieren von Blüten, Blattaustrieb oder jungen Früchten Schäden bis hin zum Totalausfall verursachen können (Abb. 10).

Gerade in den vergangenen Jahren traten wiederholt zumindest regional signifikante Spätfrostschäden auf. In den Jahren 2017 und 2024 kam es durch die Kombination von weit fortgeschritten Pflanzenentwicklung infolge ungewöhnlich milder Witterung im zeitigen Frühjahr und Frösten in der zweiten Aprilhälfte zu starken Schäden im Apfelanbau bis hin zu regional annäherndem Totalausfall der Ernte.

Die langfristige Erwärmung in den vergangenen Jahrzehnten würde ein Sinken der Wahrscheinlichkeit von schädigenden Spätfrösten erwarten lassen, wenn nicht die oben beschriebene Verfrühung der Pflanzenentwicklung im Jahresverlauf dem entgegenwirken würde. Um die Veränderung des vieljährigen Risikos von Schadfrösten in der jüngeren Vergangenheit abzuschätzen, wurde die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der ab einem bestimmten Datum im Frühling in den 30-jährigen Klimareferenzzeiträumen 1961–1990 und 1991–2020 nochmal eine

Tiefsttemperatur von -2°C oder darunter (in 2 m Höhe über Grund) zu erwarten war. Der Grenzwert von -2°C entspricht etwa der Tiefsttemperatur, bei deren Unterschreitung mit deutlichen Schäden an Blüten und jungen Früchten zu rechnen ist. Für eine statistisch abgesicherte Aussage wurden die Daten aller im Zeitraum 1961 bis 2020 verfügbaren Wetterstationen unter 800 m Höhe verwendet und eine über Deutschland gemittelte Wahrscheinlichkeit berechnet.

Die Auswertung in Bezug auf langfristige Veränderungen der phänologischen Entwicklung war nur für Pflanzenentwicklungsphasen möglich, die im Jahresmelderprogramm seit mindestens 1961 vorhanden sind.

CRITICAL SPRING TEMPERATURES FOR TREE FRUIT BUD DEVELOPMENT STAGES									
Pome Fruit (Apples and Pears)									
Apples									
Apples	Silver tip	Green Tip	Half inch green	Tight Cluster	First Pink	Full Pink	First Bloom	Full Bloom	Post Bloom
Old temp	16	16	22	27	27	28	28	29	29
10% kill	15	18	23	27	28	28	28	28	28
90% kill	2	10	15	21	24	25	25	25	25
Pears									
Pears	Bud scales separating	Blossom buds exposed	No name	Tight cluster	First White	Full White	First Bloom	Full Bloom	Post Bloom
Old temp	18	23		24	28	29	29	29	30
10% kill	15	20		24	25	26	27	28	28
90% kill	0	6	No data	15	19	22	23	24	24

Abbildung 10: Grenztemperatur in Grad Fahrenheit bei verschiedenen Entwicklungsstadien von Apfel und Birne, bei deren Unterschreitung es zum Absterben von 10 % oder 90 % der Knospen/Blüten kommt; Quelle: University of Michigan.

Figure 10: Temperature (in $^{\circ}\text{F}$), below which 10 % oder 90 % of definite development stages of apple or pear buds/blossoms are killed; source: University of Michigan.

Für den Zeitraum von Anfang April bis Mitte Mai zeigte sich im jüngeren Zeitraum 1991–2020 eine deutlich niedrigere Spätfrostwahrscheinlichkeit als im Zeitraum 1961–1990. Als häufig von Spätfrost während der Blüte betroffene und phänologisch erfasste Obstart wurde die Süßkirsche herangezogen. Der Blühbeginn der Süßkirsche erfolgte über 1961 bis 1990 und über Deutschland gemittelt am 26. April. Die Wahrscheinlichkeit für Frost unter -2°C nach diesem Datum lag im älteren Zeitraum bei 19 %, im jüngeren Zeitraum bei 7 %. Aufgrund der Verfrühung der Süßkirschenblüte durch den Klimawandel liegt der mittlere Blühbeginn inzwischen jedoch am 17 April, wodurch die Wahrscheinlichkeit für Frost unter -2°C nach dem Blühbeginn auf 27 % gestiegen ist! (Abb. 11).

Um eine räumliche Verteilung der Wahrscheinlichkeiten zu erhalten, wurden die Stationsdaten über Deutschland interpoliert. Außerdem wurde ein orografisches Modell zugrunde gelegt, um die aus der Höhe über dem Meeresspiegel resul-

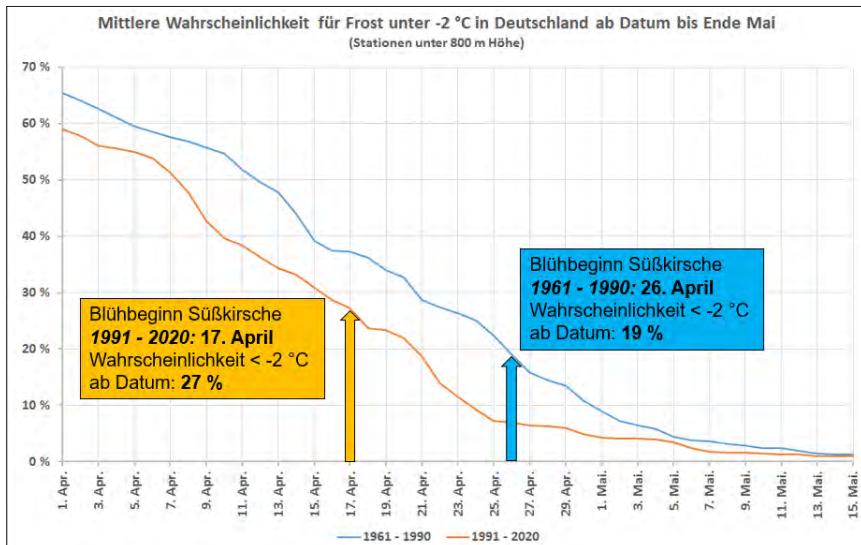


Abbildung 11: Wahrscheinlichkeit des Auftretens von weiterem Frost von mindestens -2°C im Frühling ab Datum bis Ende Mai und mittlerer Blühbeginn der Süßkirsche im Mittel 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 11: Probability for further freezing of at least -2°C during spring after the given date till the end of May and averages 1961 to 1990 and 1991 to 2020 of the beginning of sweet cherry blossom; source: Deutscher Wetterdienst.

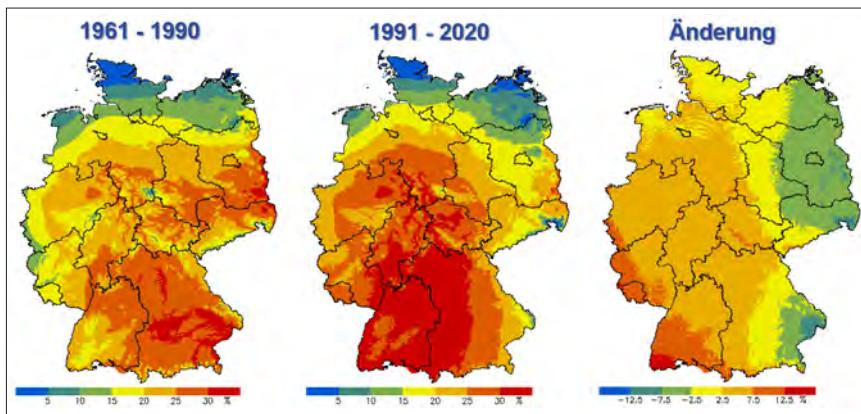


Abbildung 12: Wahrscheinlichkeit von Frost von mindestens -2°C ab Blühbeginn der Süßkirsche, Mittel 1961 bis 1990 (links), Mittel 1991 bis 2020 (Mitte) und Veränderung jüngeres gegenüber älterem Mittel (rechts); Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 12: Probability for freezing of at least -2°C after the beginning of sweet cherry blossom, average 1961 to 1990 (left), average 1991 to 2020 (center) and change in younger versus older average (right); source: Deutscher Wetterdienst.

tierenden Änderungen der Temperatur und der damit verbundenen unterschiedlichen phänologischen Entwicklung einfließen zu lassen. Als Ergebnis zeigten sich für beide untersuchten Zeiträume starke regionale Unterschiede. Am häufigsten treten schädigende Spätfröste in der Mitte und im Süden Deutschlands auf, während im Norden die temperatursausgleichende Wirkung von Nord- und Ostsee viele Spätfröste verhindert (Abb. 12). Werden die Wahrscheinlichkeiten beider Zeiträume miteinander verglichen, ergibt sich vom Westen und Südwesten Deutschlands bis in die Mitte und in den Nordwesten hinein eine Zunahme, am stärksten fällt diese im äußersten Westen und Südwesten aus. Von Mecklenburg-Vorpommern bis Sachsen und in Ostbayern wurde hingegen eine Abnahme festgestellt. Die teils wellenartigen in der Abbildung sichtbaren Strukturen sind Artefakte und entstehen durch die Subtraktion der beiden durch Interpolation von Stationsdaten erstellten Deutschlandkarten.

Als weitere Obstart waren phänologische Daten zum Blühbeginn des Apfels vorhanden (Abb. 13). Im Zeitraum 1961–1990 lag der mittlere über Deutschland gemittelte Beginn der Apfelblüte am 8. Mai, die Wahrscheinlichkeit für Minima unter -2°C nach diesem Datum betrug 3 %. Im jüngeren Zeitraum verschob sich der mittlere Eintritt der Apfelblüte auf den 26. April, die Spätfrostwahrscheinlichkeit stieg auf 7 %. Dabei zeigte in Süddeutschland die deutlichste Zunahme des Risikos, während es im äußersten Norden und im Nordosten kaum eine Veränderung gab.

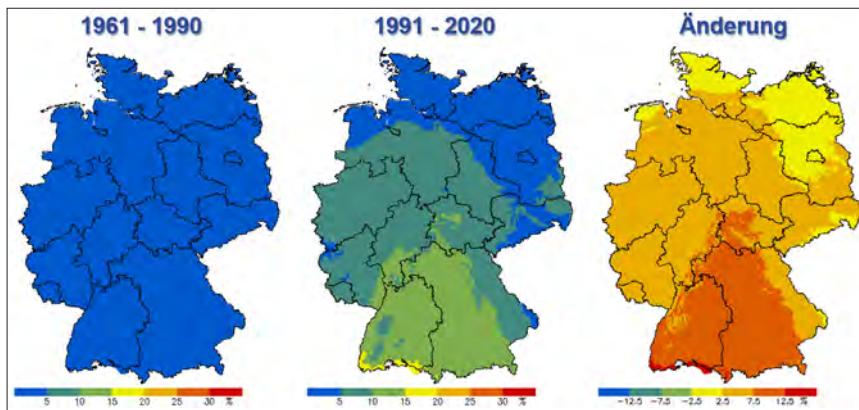


Abbildung 13: Wahrscheinlichkeit von Frost von mindestens -2°C ab Blühbeginn des Apfels, Mittel 1961 bis 1990 (links), Mittel 1991 bis 2020 (Mitte) und Veränderung jüngeres gegenüber älterem Mittel (rechts); Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 13: Probability for freezing of at least -2°C after the beginning of apple blossom, average 1961 to 1990 (left), average 1991 to 2020 (center) and change in younger versus older average (right); source: Deutscher Wetterdienst.

Bei den Feldfrüchten lagen Daten bezüglich der für Spätfrost relevanten Entwicklungsstadien „Beginn Rapsblüte“, „Auflaufen Rüben“ und „Auflaufen Mais“

vor. Für die Rapsblüte ergab sich beim Vergleich der beiden Zeiträume verbreitet eine Steigerung der Spätfrostgefahr im Bereich einstelliger Prozentpunkte. Im jüngeren Zeitraum lag die Gefahr ganz im Norden und Nordosten unter 5 %, ganz im Süden regional über 15 %. Bei der Zuckerrübe stieg die Wahrscheinlichkeit vor allem in mittleren Lagen an, nahm entlang des Rheins und ganz im Osten hingegen ab. Im jüngeren Zeitraum lag die Wahrscheinlichkeit vom äußersten Westen über den äußersten Norden bis in den Osten unter 5 %, vom Südschwarzwald bis zum Alpenrand hingegen verbreitet über 20 %. Beim Mais ließ sich kaum eine Veränderung feststellen, das Spätfrostrisiko bei dieser spät auflaufenden Kultur liegt deutschlandweit weiterhin unter 5 %.

Für die Bewertung der Spätfrostgefahr im Weinbau ist ein anderes Vorgehen erforderlich, denn einerseits wird Wein nur in vergleichsweise kleinen Teilen von Deutschland angebaut und phänologisch beobachtet, andererseits sind schon höhere Temperaturen kritisch. Die Lufttemperatur wird in 2 m Höhe und zusätzlich in 5 cm Höhe gemessen, dabei liegt das Minimum in 5 cm Höhe in klaren windstillen Nächten typischerweise mehrere Grad unter dem in 2 m Höhe. Für den Wein ist jedoch die Temperatur in Höhe der Bogrebe, rd. 70 cm über dem Boden, entscheidend, dort reichen bereits leichte Fröste aus, um die jungen Rebblätter gravierend zu schädigen. Zur Annäherung wurde als Grenztemperatur zur Einordnung als „Spätfrost“ das Kriterium herangezogen, ob die 2 m-Temperatur nach Rebaustrieb nochmal unter +1 °C gesunken ist.

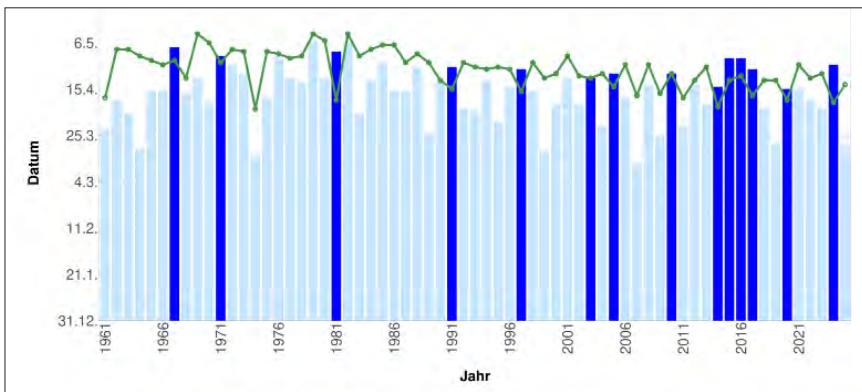


Abbildung 14: Zeitreihe des letzten „Spätfrosts“ (< 1 °C) und des Austriebs der Weinreben in Geisenheim (Rheingau) von 1961 bis 2024, dunkelblaue Säulen: Spätfrost nach Austrieb aufgetreten; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 14: Time series of the last spring frost event and the shoot of the grape-vine at Geisenheim (Rheingau) from 1961 to 2024, dark blue pillars: spring frost event after shoot of grapes; source: Deutscher Wetterdienst.

Zur Untersuchung für den Rheingau wurden die meteorologischen Daten für Geisenheim mit den Austriebssdaten des Riesling-Referenzweinberges am Wein-

baudezernat in Eltville verglichen. Im Zeitraum 1991–2020 hat sich der Rebaustrieb um acht Tage gegenüber 1961–1990 verfrüht. Die dunklen Balken in Abbildung 14 zeigen die Jahre, in denen nach Rebaustrieb nochmal Temperaturen unter +1 °C aufgetreten sind. In jüngerer Vergangenheit zeigte sich eine Häufung spätfrostgefährdeter Situationen, was der deutlich verfrühten Rebentwicklung geschuldet ist. Für die weiteren Weinbaugebiete liegen oft nicht so lange phänologische Zeitreihen vor oder die Lage der Wetterstation lässt sich nicht mit den oft südexponierten Hanglagen im Weinbau vergleichen. Tendenziell zeigt sich jedoch auch in anderen Weinbaugebieten eine Häufung der Spätfrostgefahr.

Für die Zukunft lässt sich keine klare Aussage hinsichtlich der weiteren Entwicklung des Spätfrostrisikos geben. Sicher ist, dass sich mit in den nächsten Jahrzehnten weiter steigenden Temperaturen auch die mittleren phänologischen Eintrittsdaten im Frühling weiter zu früheren Terminen hin verschieben werden. Da bezüglich des Auftretens der hier verwendeten Grenztemperaturen und der phänologischen Termine keine Klimaprojektionen vorliegen, ist zur Zeit noch nicht absehbar, welcher Effekt überwiegen wird. Jedenfalls müssen wir auch weiterhin davon ausgehen, dass trotz fortschreitender Klimaerwärmung Spätfrostschäden nicht zwangsläufig seltener werden (PLÜCKHAHN et. al. 2023).

7 Zunehmender Hitzestress

Mit im Zuge des Klimawandels steigender Mitteltemperatur nehmen auch Anzahl, Länge und Intensität von Hitzewellen zu. Das Temperaturoptimum der meisten in Mitteleuropa angebauten Ackerbaukulturen liegt bei 15 bis 25 °C (Wissensspeicher Digital). Bei diesen Temperaturen ist eine hohe Photosyntheserate und damit starkes Wachstum sowie optimale Ertragsbildung möglich. Oberhalb von rd. 30 °C Lufttemperatur schädigen die hohen Temperaturen und die Sonneninstrahlung die Blätter. Hängende oder zusammengefaltete Blätter zeigen bei ausreichender Wasserversorgung Hitzestress an. Bei den Ackerbaukulturen vertragen Kartoffeln Hitze schlechter als Getreide, Mais kommt mit Hitze hingegen besser zurecht.

In der Klimareferenzperiode 1961–1990 gab es im Rhein-Main-Gebiet – eine der wärmsten Regionen Deutschlands – durchschnittlich nur knapp zehn Heiße Tage pro Jahr, also Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C. Deutschlandweit existiert eine Auswertung der Heißen Tage seit 1951. Seitdem hat sich deren Anzahl (4,4 Tage im Mittel 1961 bis 1990) fast verdreifacht (Abb. 15)! Im Rhein-Main-Gebiet wurden seit Beginn des 21. Jh. wiederholt Jahre mit mehr als 30 Heißen Tagen beobachtet, wobei auch die Anzahl sehr heißer Tage mit mehr als 35 °C deutlich anstieg. Zugleich hat die mittlere Sonnenscheindauer zugenommen.

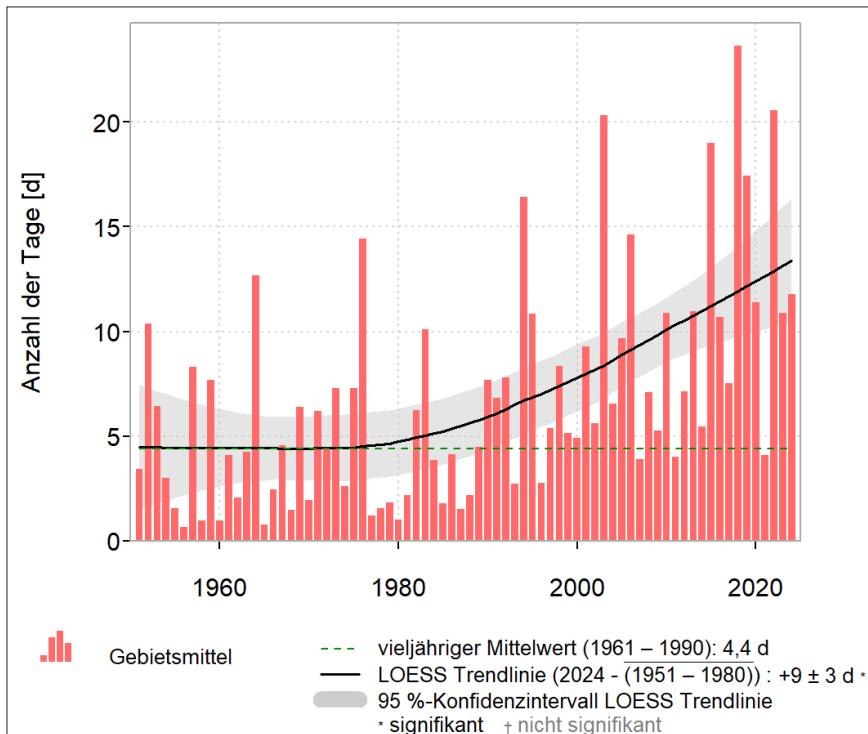


Abbildung 15: Zeitreihe der über Hessen gemittelten Anzahl an Tagen pro Jahr mit mindestens 30 °C Höchsttemperatur (Heiße Tage), 1951 bis 2024; Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 15: Time series of the number of days per year with a maximum temperature of at least 30 °C, average of Hesse, 1951 to 2024; source: Deutscher Wetterdienst.



Abbildung 16: Sonnenbrand an Früchten und Blättern; Quelle: Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurordnung, Brandenburg.

Figure 16: Sunburnt fruits and leaves; source: Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurordnung, Brandenburg.

Folglich stehen unsere Pflanzen häufiger und stärker unter Hitzestress als vor ein paar Jahrzehnten üblich. Besonders seit den 2000er-Jahren hat die Häufigkeit von Hitzeschäden deutlich zugenommen. Diese betreffen neben den Blättern auch

die Früchte. Gerade bei Obst führt die Kombination von Hitze, Sonnenschein und annähernder Windstille zu einer Überhitzung der sonnenzugewandten Fruchtteile. Die Zellen sterben dort ab, die Früchte verbräunen (Abb. 16). Beim meist von Anfang Mai bis Mitte Juni blühenden Getreide können zur Blüte schon Temperaturen unter 30 °C zu Schäden führen, indem pro Ähre weniger Getreidekörner angelegt werden. Auch bei der phänologischen Phase des Ährenschiebens (entspricht dem Blühbeginn) zeigt sich in den letzten Jahrzehnten eine Verfrühung. Die genauen Auswirkungen dieser Verschiebung wurden noch nicht untersucht.

8 Veränderung von Niederschlag und Bodenfeuchte

Auch wenn die beobachteten Veränderungen der Phänologie durch den Klimawandel hauptsächlich temperaturabhängig sind, hat die Wasserverfügbarkeit ebenfalls einen Einfluss auf die Pflanzenentwicklung. So kommt es bei Getreide unter starkem Trockenstress während der Kornfüllungsphase zu einer verfrühten Abreife, der sogenannten Notreife. Bei manchen Bäumen traten in den trockenen Sommern der vergangenen Jahre mitunter schon im Sommer frühzeitig Blattverfärbung und Blattfall auf. Somit haben auch ausbleibende Niederschläge einen Einfluss auf die phänologische Entwicklung (ENGELS 2018: 8).

Die über das ganze Jahr aufsummierten Niederschläge haben sich in den letzten Jahrzehnten nicht signifikant verändert. Ob sich ein schwacher Trend hin zu trockeneren Jahren seit etwa 2010 in den kommenden Jahren fortsetzt, ist fraglich, die längerfristigen Klimaprojektionen zeigen für die kommenden Jahrzehnte eher eine leichte Zunahme. Auch für die Vegetationsperiode, also Frühling und Sommer, gibt es besonders im Frühling seit rd. 15 Jahren zwar eine Häufung von unterdurchschnittlichen Niederschlägen, aber keinen eindeutigen Trend in den Klimaprojektionen (Abb. 17).

Bei der Bodenfeuchte und der Wasserversorgung der Pflanzen sorgt allerdings eine andere Größe für einen markanten Trend: die Verdunstung. Sowohl die Verdunstung direkt aus dem Boden als auch die Transpiration durch die Pflanzen (Wasserentnahme aus dem Boden über die Wurzeln und Verdunstung über die Spaltöffnungen der Blätter) hängen stark von der Temperatur ab. Bei einer Temperatursteigerung von 1 K nimmt die Verdunstung (bei ausreichender Feuchtigkeit im Boden) um rd. 7 % zu. Das bedeutet, dass es bei einer Erwärmung von 2,5 K seit Ende des 19. Jh. heutzutage etwa 18 % mehr regnen müsste als damals, um die Bodenfeuchte und Wasserversorgung auf dem damals üblichen Niveau zu halten. Dieses Plus an Regen wurde jedoch weder in der Vergangenheit beobachtet, noch wird es in Zukunft erwartet. Dies geht zulasten der Bodenfeuchte.

Außerdem verändert sich auch die Niederschlagsintensität. Eine wärmere Atmosphäre beinhaltet mehr Wasserdampf und mehr Energie, die Niederschlagsbildungsprozesse laufen damit schneller ab. Das hat zur Folge, dass es im Mit-

tel stärker regnet, was bei etwa gleicher Regenmenge eine kürzere Regendauer bedeutet. Damit trifft häufiger als früher Starkregen auf zumindest oberflächlich ausgetrocknete Böden. Diese können das Regenwasser in der Kürze der Zeit nur zu einem kleinen Teil aufnehmen, der Rest fließt ungenutzt ab und verursacht dabei schlimmstenfalls auch noch Bodenerosion. Fazit: Der für die Pflanzen nutzbare Anteil der Niederschlagsmenge sinkt.

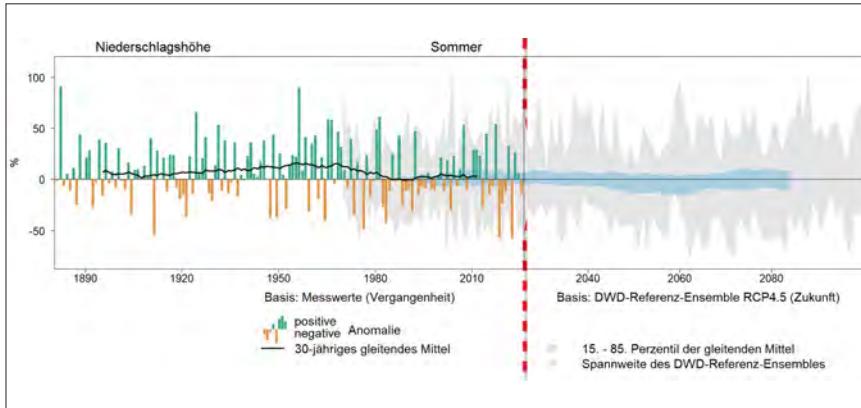


Abbildung 17: Zeitreihe der über Hessen gemittelten Niederschlagshöhe im Sommer (Juni bis August) von 1881 bis 2025 (Abweichung vom Mittelwert 1971 bis 2000) und Klimaprojektion bis 2100 (Zentraljahr 2085) nach dem Klimaszenario RCP 4.5; Quelle: DWD-Klimaatlas.

Figure 17: Time series of the precipitation amount in summer (June to August) from 1881 to 2025, average of Hesse (deviation of the mean 1971 to 2000) and climate projection till 2100 according to the climate scenario RCP 4.5; source: DWD climate atlas.

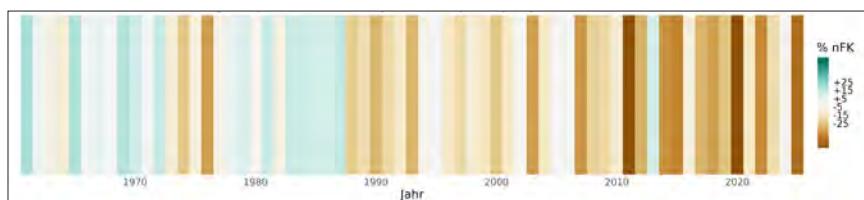


Abbildung 18: Abweichung der über Hessen gemittelten Bodenfeuchte in 0 bis 60 cm Tiefe unter Winterweizen vom Mittel 1961 bis 1990 (Mittel von April bis Juni für die Einzeljahre 1961 bis 2025); Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 18: Deviation of the soil moisture (average of Hesse) at a depth of 0 to 60 cm under winter wheat from the mean 1961 to 1990 (average from April to June for the years 1961 to 2025); source: Deutscher Wetterdienst.

Die rückwirkend seit 1961 vorliegenden Berechnungen der Bodenfeuchte zeigen, dass die Böden – wie zu erwarten – in den letzten Jahrzehnten tendenziell deutlich trockener geworden sind (siehe „Drying Stripes“ in Abb. 18). Außerdem

wurden über das Jahr hinweg die vieljährigen, über Hessen gemittelten Bodenfeuchtemittelwerte der Zeiträume 1961–1990 und 1991–2020 miteinander verglichen (Abb. 19). Dabei trat vor allem etwa von April bis September, also in der Vegetationsperiode, eine starke Abnahme der mittleren Bodenfeuchte zu Tage. Im jüngeren Zeitraum lag die mittlere Bodenfeuchte um 10 bis 15 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) niedriger als zuvor! Im späteren Herbst und im Winter bestanden hingegen nur geringe Unterschiede, meist war auch zu diesen Jahreszeiten die mittlere Bodenfeuchte in der jüngeren Vergleichsperiode etwas niedriger. Bei in Zukunft weiter steigenden Temperaturen ist im Mittel mit einer weiteren Verringerung des Wasserangebots zu rechnen.

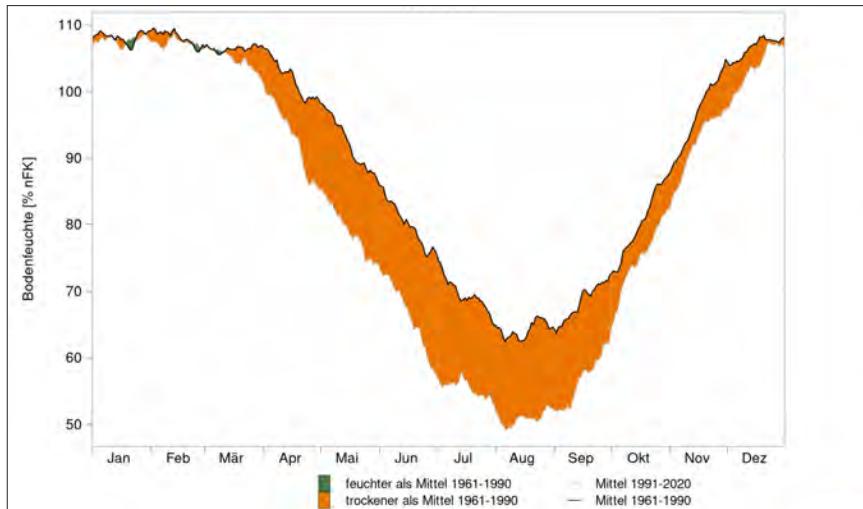


Abbildung 19: Vergleich der vieljährigen Mittelwerte 1961–1990 und 1991–2020 der Bodenfeuchte in 0 bis 60 cm Tiefe über das Jahr hinweg (über Hessen gemittelt); Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Figure 19: Comparison of the means 1961 to 1990 and 1991 to 2020 of the soil moisture at a depth of 0 to 60 cm over the course of the year (average of Hesse); source: Deutscher Wetterdienst.

9 An den Klimawandel angepasste Pflanzenwahl

Besonders für den Ackerbau läuft die Züchtung von hitze- und trockenheitstoleranteren Sorten unserer heutigen klassischen mitteleuropäischen Kulturen (Weizen, Gerste, etc.) auf Hochtouren. Gleichzeitig wird es auch deutliche Veränderungen beim Anbauspektrum der landwirtschaftlichen Kulturen in Deutschland geben. Bereits seit einigen Jahren ist besonders in Süddeutschland Soja auf dem Vormarsch – wenn auch mit derzeit noch geringen Flächenanteilen. Bevorzugt

im Süden und Osten wird örtlich bereits Hartweizen angebaut. Ackerkulturen der Zukunft könnten Sorghumhirse, regional auch Reis und Kichererbsen sein.

Auch im Obstbau und auf den Streuobstwiesen wird es Veränderungen im Artenspektrum geben. Mit spät blühenden und spät reifenden Apfel- und Birnensorten kann man der Spätfrostgefahr im Frühling ein Stück weit begegnen. Außerdem könnten in Zukunft vermehrt kleinfrüchtige Kiwi, Feige, Quitte, Mispel, Pfirsich, Walnuss und Esskastanie angebaut werden. Für Lagen mit geringer Spätfrostgefahr sind auch Aprikosen und Mandeln geeignet, für heiße und trockene Standorte die Maulbeere. In wintermilden Regionen wird der Olivenanbau eine Option. Wein kann hingegen von den klimatischen Bedingungen her schon heute in weiten Teilen Deutschlands angebaut werden.

Ebenso erfolgt in einigen Regionen bereits jetzt ein dem Klimawandel angepasster Waldumbau. Hierbei besteht die Herausforderung darin, dass neu angepflanzte Bäume aus wärmeren und trockeneren Regionen einerseits mit unserem derzeitigen Klima, andererseits mit dem nur schwer abschätzbaren Klima in 100 Jahren zurechtkommen müssen.

Für die Phänologie bedeutet das, dass einerseits mittelfristig in der Fläche ausreichend vorkommende neue Pflanzenarten in den Beobachtungskanon aufgenommen werden müssen und andererseits an manchen Standorten lange Beobachtungsreihen mancher Pflanzenarten enden werden, weil die Art mit den neuen klimatischen Bedingungen nicht mehr zurechtkommt.

10 Literatur

- CHMIELEWSKI, F.-M. (2016): Einfluss des Klimawandels auf die Phänologie von Pflanzen und Tieren. – In: LOZÁN, J. L., BRECKLE, S.-W.-R., MÜLLER, R. & RACHOR, E. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Biodiversität. – 158-163; https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/de/biodiversitaet/warnsignal_klima-die_biodiversitaet-kapitel-3_10.pdf
- DWD (2007): Phänologie. – promet, 33 (1/2); https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/pdf_promethefte/33_1_2_pdf
- DWD (2025): Der Deutsche Wetterdienst sucht ehrenamtliche phänologische Beobachterinnen und Beobachter; https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/daten_deutschland/beobachtersuche/phaenologische_beobachtungen.html
- DWD (2025): Die neuen RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht; <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien.html>
- DWD-Fachtext (2025): Intensivierung der Temperaturentwicklung in Deutschland als Folge des Klimawandels; https://www.dwd.de/DE/leistungen/faktenpapier_extremwetter/fachtext_04-2025.pdf
- DWD (2025): Phänologische Jahreszeiten; <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/produkte/jahresmittelwerte/jahreszeiten.html>
- DWD-Wetter- und Klimalexikon (2025); <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/functions/glossar.html>

- ENGELS, A. (2018): 2018 – ein extremes Jahr für die Pflanzen. – Phänologie-Journal, **51** (12): 8; https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaenjournal/phaeno_journal_nr51.pdf
- Hochschule Geisenheim: Phänologische Pflanzenentwicklung in Geisenheim (2025); <https://rebschutz.hs-geisenheim.de/klima/phaeno.php>
- KALI Akademie (o. J.): Stress durch Hitze und Sonne. – 7 S.; Kassel (Wissensspeicher Digital, K+S Minerals and Agriculture GmbH); <https://www.kpluss.com/.downloads/agriculture-wissensspeicher/de-stress-durch-hitze-und-sonne.pdf>
- KASPAR, F., IMBERY, F. & FRIEDRICH, K. (2021): Nutzung klimatologischer Referenzperioden ab 2021; https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/verschiedenes/20210119_neue_referenzperiode.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- KASPAR, F., ZIMMERMANN, K. & POLTE-RUDOLF, C.: An overview of the phenological observation network and the phenological database of Germany's national meteorological service (Deutscher Wetterdienst). – Adv. Sci. Res., **11**: 93–99; <https://doi.org/10.5194/asr-11-93-2014>, 2014
- KOLBE, C. & KAISER-WEISS, A. (2015): Pflanzenreaktionen in Bezug zum Klimawandel in Deutschland - Eine statistische Analyse phänologischer Daten. – Phänologie-Journal, **44**: 1-4; https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaenjournal/phaeno_journal_nr44.pdf
- MELO-ABREU DE, J.P. (2005): Frost damage: physiology and critical temperatures; In: SNYDER, R.L. & DE MELO-ABREU, J.P. (2005): Frost Protection: fundamentals, practice, and economics, Volume 1, chapter 4; Rome (FAO); <https://www.fao.org/4/y7223e/y7223e0a.htm>
- MENZEL, A., CHMIELEWSKI, F.-M., KOCH, E., AHAS, R. & DITTMANN, E. (Deutsche Meteorologische Gesellschaft, 2023); <https://www.dmg-ev.de/2023/09/19/phaenologie/>
- Nature's Calendar (2025): Important phenologists; <https://naturescalendar.woodlandtrust.org.uk/what-we-record-and-why/why-we-record/important-phenologists/>
- PLÜCKHAHN, B., BRÖMSER, A. & JANSEN, W. (2003): Bringt die globale Erwärmung ein höheres Risiko für Spätfrostschäden? – Deutsches Weinbaujahrbuch, **2024**: 136–143; <https://www.ulmer.de/usb-7499302/deutsches-weinbaujahrbuch-2024-.html>
- SNYDER, R.L. & MELO-ABREU DE, J.P. (2005): Frost Protection: fundamentals, practice, and economics, Volume 1. – 1-240; Rome (FAO).
- SPONER, F. (2025): Japan's cherry trees have been blossoming earlier due to warmer spring temperatures. Our world in data; <https://ourworldindata.org/data-insights/japans-cherry-trees-have-been-blossoming-earlier-due-to-warmer-spring-temperatures>
- Umweltbundesamt (2023): Wärmeliebende Ackerkulturen und Sortenspektrum im Weinbau; https://www.umweltbundesamt.de/monitoring-zur-das/handlungsfelder/landwirtschaft/lw-r-2_lw-r-3/indikator#lw-r-2-sorten-und-vermehrung-wärmeliebender-ackerkulturen

ANDREAS BRÖMSER
Dipl. Meteorologe
Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach
Tel.: 069 8062 2301
E-Mail: andreas.broemser@dwd.de

BIANCA PLÜCKHAHN
Tel.: 069 8062 2302)

Manuskripteingang: 31. Juli 2025

Waldwende im Kommunalwald am Beispiel des Taunussteiner Stadtwaldes

WOLFGANG EHMKE

Naturgemäße Waldwirtschaft, Waldfunktionen, Handlungsleitfaden, Stadtwald Taunusstein

K u r z f a s s u n g : Wegen umfangreicher, klimabedingter Waldschäden in Taunusstein haben die Kommunalpolitiker.innen 2023 beschlossen, den Stadtwald zukünftig naturgemäß als Dauerwald zu bewirtschaften und einige Waldstücke aus der Holznutzung zu nehmen. Es werden die ökosystemaren Leistungen des Waldes und seine Leistungen für die Gesellschaft dargestellt und ein Handlungsleitfaden für die langfristige Umwandlung in einen klimaresilienten Dauermischwald entwickelt. Die wichtige Rolle von ungenutzten Naturwaldzellen (-gebieten) inmitten des Wirtschaftswaldes wird erläutert. Es erfolgen Ratschläge für das weitere Vorgehen.

Management change in municipal forests using the example of the Taunusstein forest

Natural forest management, forest functions and capacities, guide for action, Taunusstein forest

A b s t r a c t : Due to massive damage in the forest of Taunusstein (Hesse, Germany) caused by climate change, the members of the town parliament decided in 2023 to manage the municipal forest in a natural way («Dauerwald») and to take some plots out of production. The ecosystem functions of the forest and the benefits for society are presented, and a guide for future management change to a resilient mixed forest is developed. The important role of unmanaged Natural Forest Reserves in the middle of the managed forest areas is explained, then followed by advice for future actions.

Inhaltsverzeichnis

1	Warum dieser Beitrag?	60
2	Der Waldzustand in Deutschland und in Taunusstein	61
3	Anstoß in der Kommunalpolitik von Taunusstein durch Waldschäden	63
4	Kurzer Abriss der Waldgeschichte und der früheren Waldnutzung ..	63
5	Leistungen des Waldes für Umwelt und Gesellschaft	65
6	Wie könnte ein klimaresistenter, naturgemäßer Wald aussehen?	68
7	Welche Baumarten sind für den Dauerwald geeignet?	70
8	Wie kann der Umbau zum Dauerwald gelingen?	73
9	Der Einfluss des Schalenwilds und des Jagdmanagements auf den Dauerwald	77
10	Arten- und Biotopschutz im Dauerwald als Wirtschaftswald	79
11	Die Bedeutung von Naturwäldern und Prozessschutzflächen	80
12	Vorschläge für das weitere Vorgehen	82

13	Resümee	85
14	Danksagungen	85
15	Literatur	86

1 Warum dieser Beitrag?

Man kann davon ausgehen, dass nicht nur in der Fachwelt die sich verschärfende, prekäre Situation unserer Wälder bekannt ist, die zu ersten Gegenmaßnahmen geführt hat. Dabei stehen wir vor dem Problem der Ungewissheit, wie sich die Wälder unter den – hauptsächlich durch den Klimawandel – veränderten Rahmenbedingungen weiter entwickeln werden und welche langfristigen Folgen die heute getroffenen Gegenmaßnahmen im Verlauf des Waldlebens haben werden. Niemand kann heute sagen, wie die Wälder in 100 bis 200 Jahren aussehen werden. Das ist das immerwährende Dilemma der Forstwirtschaft, dass heute gemachte Fehler in der Waldbehandlung sich erst nach ein bis zwei Generationen auswirken. Am Beispiel der nach dem 2. Weltkrieg massenhaft gepflanzten Fichten-Monokulturen haben wir dies leidvoll erfahren müssen, wobei die Gründe dafür oft nicht allein bei den damaligen Förstern zu suchen sind. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass es bezüglich der erforderlichen Gegenmaßnahmen zu einer großen Spannbreite von Vorschlägen gekommen ist, die als Extreme von einem „Weiter so“ mit dem Pramat der Holznutzung bis zu einer großflächigen Einstellung der Holznutzung reichen.

Schon in den 1970er- und 1980er-Jahren wurden massive Waldschäden in den deutschen Mittelgebirgen beobachtet („Waldsterben“), die insbesondere auf die ungefilterten Emissionen der Kohlekraftwerke und des Autoverkehrs zurückzuführen waren. Der Autor dieses Artikels hat damals als Abgeordneter und umweltpolitischer Sprecher der grünen Bundestagsfraktion dazu beigetragen, dass gegen erhebliche Widerstände der Industrie und der Politik die positiven Erfahrungen anderer Nationen (Japan, USA) mit Filteranlagen in Kraftwerken und Katalysatoren für PKW auch in der Bundesrepublik Deutschland umgesetzt und so allmählich die Immissionsschäden abgebaut wurden (EHMKE 1983). Aber bereits ab den 1990er-Jahren drohte eine weitere Gefahr für unsere Wälder, die der Autor auch durch eigene Wetterbeobachtungen erkennen konnte (EHMKE 2001): der Klimawandel. Leider hat die Politik auf die frühen Warnungen vor den Folgen des Klimawandels nicht reagiert, und bis heute wird verbreitet von einem unzureichenden Klimaschutz in Deutschland gesprochen. Es ist deshalb zu befürchten, dass es auch zukünftig zu klimabedingten Schäden in unseren Wäldern kommen wird, da derzeit laut IPCC die Ursachen für den Klimawandel nicht verminder werden, sondern z. B. die Kohlendioxid-Emissionen weltweit den höchsten Stand erreicht haben (IPCC 2024). Laut der jüngst erschienenen 4. Bundeswaldinventur ist sogar festzustellen, dass der Wald in Gesamtdeutschland infolge der Kala-

mitäten der letzten Jahre nicht mehr Kohlenstoff speichert, sondern sogar abgibt und somit das Klimaproblem verschärft (BMEL 2024). Hitzewellen werden der EU-Umweltagentur EEA zufolge im Zuge des Klimawandels häufiger, intensiver und länger anhaltend (Wiesbadener Kurier vom 28.9.2023). Und in Hessen war das Vegetationsjahr 2023/2024 schon 2,8 °C wärmer als das langjährige Mittel! (HMU 2024). Der Klimawandel schreitet ungebremst mit exponentiellem Anstieg voran.

Ein Beleg für das Versagen der Politik beim Waldschutz ist u. a. das Scheitern der Biodiversitätsstrategie der Bundesregierung (BMUNR 2007), die bis 2020 einen Prozessschutzanteil von 5 % der Gesamtwaldfläche und von 10 % der Waldflächen in öffentlichem Besitz – also auch der Kommunalwälder – erreichen wollte. Stand 2020 waren aber nur 3,1 % der Waldfläche dauerhaft und verbindlich gesichert aus der Nutzung genommen (STEINACKER et al. 2023). Ein größerer Anteil an ungenutzten Waldflächen ist unerlässlich für einen effektiven Klimaschutz (erhöhte Kohlenstoffspeicherung) und auch für verbesserten Arten- und Biotopschutz. Aber auch die Novellierung des veralteten Bundeswaldgesetzes in Richtung auf eine allgemeine naturgemäße Waldwirtschaft ist jüngst gescheitert. Umso wichtiger erscheint deshalb, dass die Bundesländer und Kommunen als Waldeigentümer jetzt von sich aus wirksame Maßnahmen ergreifen, um ihre Wälder soweit möglich vor den Auswirkungen des Klimawandels zu schützen. Dieser Beitrag soll also zeigen, wie auf unterster Ebene am Beispiel des Stadtwaldes Taunusstein ein kommunaler Beitrag zu effektiven Maßnahmen des Waldklimaschutzes möglich erscheint. Als Mitglied der früheren Waldkommission der Stadt und als Teilnehmer am neu eingerichteten Runden Tisch zur Waldwirtschaft hat der Autor bereits verschiedene Verfahrensvorschläge eingebracht, die hier ausführlich dargestellt werden. Die nachfolgenden, faktenbasierten Darstellungen und Vorschläge beruhen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und zielen mit konkreten Handlungsempfehlungen auf die bestgeeigneten Möglichkeiten zur Aufrechterhaltung und Verbesserung der Bereitstellung der Ökosystem-Dienstleistungen des Taunussteiner Kommunalwaldes im Klimawandel.

2 Der Waldzustand in Deutschland und in Taunusstein

Wie stark unsere Wälder leiden, ist in der letzten Bundeswaldinventur nachzulesen (BMEL 2024). Danach haben die vergangenen Kalamitätsjahre in den deutschen Wäldern deutliche Spuren hinterlassen. Dabei sind neben positiven Entwicklungen (u. a. leichte Zunahme des Laubbaumanteils und der Totholzmenge) vor allem tiefgreifende negative Veränderungen festzustellen. So ist z. B. der Fichtenanteil stark zurückgegangen, da die Fichte drastisch unter Trockenheit und nachgendem Borkenkäferbefall gelitten hat. Die Fichte, die in Mitteleuropa natürlicherweise eine Baumart der höheren Berglagen ist, wurde großflächig

auch im Tiefland angebaut, wo sie jetzt beginnt, sich zu verabschieden (Abb. 1). Aber auch andere Baumarten sind geschädigt, so dass insgesamt der Holzvorrat im Wald zurückgegangen ist. Dies hat dazu geführt, dass der Wald weniger Kohlenstoff speichert und sogar Kohlendioxid abgibt – ein Alarmsignal hinsichtlich unserer Kohlenstoffbilanz! Wenn der durchschnittliche gesamtdeutsche Holzvorrat weiter bis zur nächsten Bilanzierung (Kohlenstoffinventur 2027) absinkt, muss auch in vielen Wäldern eine Verminderung der Hiebssätze (Holzeinschlagmen- gen) zur Diskussion stehen.



Abbildung 1:Toter Fichtenbestand; Foto: W. Ehmke.

Figure 1: Stand of dead spruce; photo: W. Ehmke.

Auch der Stadtwald von Taunusstein befindet sich „in einer existentiellen Krise“ (BETHMANN 2020). Schon 2020 umfassten die Schadflächen 72 % der Gesamtfläche des Stadtwaldes, hauptsächlich Fichte und Buche (BETHMANN l. c.). Vom Holzvorrat waren damals bereits über 50 % verloren, weshalb der Gutachter Bachmann eine starke Reduzierung des Hiebssatzes empfahl (BACHMANN 2021). Um weitere Schäden zu vermindern und einen klimaresilienten Wald aufzubauen, ist deshalb ein anderes Waldmanagement erforderlich, das offen ist für Erfahrungen aus der weiteren Entwicklung und das daraus sinnvolle Anpassungen vornimmt. Dafür ist am besten das Konzept „Dauerwald“ geeignet (BACHMANN l. c.). Fakt ist: Der Waldwandel kommt auf jeden Fall – entweder „by design oder by disaster“!

Deswegen sollte die bisherige Art der Forstwirtschaft verlassen und der Umbau besser tatkräftig selbst in die Hand genommen werden (by design), um überhaupt eine Chance auf Schadensminderung im weiteren Verlauf des Klimawandels zu haben.

3 Anstoß in der Kommunalpolitik von Taunusstein durch Waldschäden

Auf der Grundlage der oben erwähnten und weiteren Forstgutachten (BACHMANN 2020, 2021; BETHMANN 2020, 2021; WOHLLEBEN 2020) beschloss der Taunussteiner Magistrat 2021 auf Vorschlag des damaligen Bürgermeisters Sandro Zehner unter dem Titel „Bürgerwald in kommunalpolitischer Verantwortung“ künftig in eigener Organisation „die Einführung der Dauerwaldwirtschaft sowie die Übernahme des Wildtiermanagements“ (Pressemitteilung vom 16.9.2021). Zur Begleitung und Umsetzung dieses Paradigmenwechsels wurde eine nichtöffentlich tagende Waldkommission mit Vertretern des Magistrats, der Fraktionen, des Naturschutzes, der Jägerschaft und des Forstes eingesetzt. Diese legte nach zwei Jahren Beratung im September 2023 der Stadtverordnetenversammlung ihre abgestimmten Vorschläge zum neuen Konzept vor, die allerdings dort am 23.11.2023 mehrheitlich abgelehnt wurden. Kritisiert wurde u. a. die mangelnde Transparenz, die Eingriffe in das Jagdpachtsystem, die fehlende Kooperation mit dem Landesbetrieb HessenForst, der vorgeschlagene Umfang der Waldflächen ohne Nutzung von 10 % und die angestrebte Waldzertifizierung beim Forest Stewardship Council (FSC). Immerhin war man sich einig, dass der Stadtwald als „Dauerwald unter Anwendung der Grundlagen der Naturgemäßen Waldwirtschaft entwickelt und bewirtschaftet“ werden soll. Zur Umsetzung wurde ein öffentlich tagender „Runder Tisch Bürgerwald“ eingerichtet, der mit je einem Vertreter der Fraktionen, der Jägerschaft und von HessenForst sowie dem Bürgermeister als Vorsitzendem besetzt ist. Wie wichtig eine klare Handlungsanleitung für die angestrebte Dauerwaldwirtschaft wird, zeigte sich kürzlich, als der Dienstleister HessenForst in mehreren Waldabteilungen mit flächenhaften, intensiven Durchforstungen begann, die nicht einer behutsamen Einzelbaumpflege entsprechen.

4 Kurzer Abriss der Waldgeschichte und der früheren Waldnutzung

Um den heutigen Zustand unseres Waldes richtig beurteilen zu können, ist ein Blick in seine Vergangenheit sehr hilfreich. Hier sei auf die ausführliche Schilderung der Landschaftsgeschichte des Taunus durch den Autor hingewiesen (EHMKE 1996). Danach war der Wald vielfachen Änderungen unterworfen, bedingt durch Klimawechsel und – zunehmend seit der Zeitenwende – durch den Menschen.

Erste Waldzustände entwickelten sich nach der Eiszeit mit ihrer Tundra-Vegetation in Form von großflächigen Haselgebüschen und lichten Birken- und Kiefernwäldern (SCHMENKEL 2001). Diese wurden ab ca. 6000 v. Chr. (Atlantikum; Jungsteinzeit; ab ca. 3000 v. Chr. Subboreal; Bronzezeit) von Eichenmischwäldern abgelöst, in die gegen Ende allmählich die Rotbuche einwanderte. Ab ca. 800 v. Chr. (Subatlantikum; Eisenzeit) kam die Buche zur Dominanz in den Mischwäldern, die sie bis heute auf den meisten Waldstandorten behauptet. Mit den eisenzeitlichen Kelten begann bei uns eine stärkere Inanspruchnahme des Waldes durch den Menschen, die sich vorwiegend in Waldweide und Holzeinschlag für den Eisenerzabbau äußerte. Die Römer nahmen den Taunus nur wenig in Anspruch; sie siedelten hauptsächlich in den warmen Tieflagen (Rheingau, Vortaunus, Wetterau), wo sie u. a. neue Baumarten wie Esskastanie, Walnuss und diverse Obstbäume einführten. Im höheren Taunus mit seinen flächendeckenden Urwäldern legten sie den Limes mitsamt Kastellen und Kastelldörfern und Verbindungsstraßen an. Erst im Hochmittelalter ab ca. 1000 n. Chr. wurde der Wald in größerem Umfang zurückgedrängt, indem die Rodungszeit einsetzte. Viele Taunusdörfer sind in dieser Zeit gegründet worden. Schon um 775 ist das Kloster Bleidenstadt urkundlich erwähnt worden, von dem aus das obere Aartal kultiviert wurde. Die starke Zunahme der Bevölkerung – die auch auf eine wärmere Klimaperiode zurückzuführen war – hatte natürlich deutliche Eingriffe in Natur und Umwelt zur Folge, insbesondere auch in die Wälder. Das Vieh wurde zur Weide in den Wald getrieben, die Laubstreu gesammelt als Einstreu in die Ställe und anschließend mit Mist zur Düngung auf die Äcker ausgebracht. Der Verbiss der Waldbäume und die



Abbildung 2: Ehem. Niederwald in Abt. 327A; Foto: W. Ehmke.

Figure 2: Former coppice woodland in district 327A; phot: W. Ehmke.

Streunutzung, die den Waldböden die Nährstoffe entzog, führte zur Degradation der Wälder, die sich bis in die Neuzeit hinein noch steigerte und zu lichten, offenen Heidelandschaften mit nur wenigen Hutebäumen führte (Kemeler Heide, Bleidenstadter Heide, Gebrannte Heide usw. sind Gewannnamen, die heute noch in den Landkarten zu finden sind). Nur wenige, meist sehr steile Landschaftsteile waren noch bewaldet und wurden zur Brennholzgewinnung als Nieder- und Mittelwälder oder als Eichenschälwälder zur Gewinnung von Eichenlohe für die Gerbung von Häuten genutzt (Abb. 2). Die letzten Reste des Waldes wurden dann noch bis ins 19. Jahrhundert durch Köhlerei, Glasschmelzen und Metallverhüttung abgeholt, so dass die Taunusberge weitgehend kahl lagen (STAHR & BENDER 2007). Diese dramatische Situation mit anwachsendem Holzmangel bei steigendem Holzbedarf veranlasste die Landesherren dazu, die Waldweide zu verbieten, den Wald vom Offenland durch Zäune klar zu trennen und die Waldflächen mit Fichten und Kiefern aufzuforsten. In Verbindung mit einer neuen Forstorganisation (z. B. Nassauer Forstedikt) war dies der Beginn der geordneten Forstwirtschaft, die sich in den Grundzügen so bis heute erhalten hat.

5 Leistungen des Waldes für Umwelt und Gesellschaft

Wälder sind die Lebensgrundlage für 80 % aller landlebenden Arten und die Quelle von 75 % des weltweiten Süßwassers. Sie stabilisieren mit Verdunstung und Wasserkreislauf Wetter, Klima und Atmosphäre und speichern etwa die Hälfte des Kohlenstoffs an Land in ihrer Vegetation. Hinzu kommen erhebliche Kohlenstoffmengen in den Waldböden. Außerdem ist die hohe Biodiversität von naturnahen Wäldern entscheidend für Ökosystemleistungen wie z. B. Klimaregulierung, Wasserspeicherung und Erosionsschutz, Schutz vor Überflutung, Reichtum an Arten und Biotopen. Durch die klimabedingten Waldschäden wird die Biodiversität jedoch massiv beeinträchtigt. Das Fehlen einer Bepreisung von Naturdienstleistungen führt zu geringer Wertschätzung und Schutz für Ökosystemleistungen – gerade auch in der Kommunalpolitik. Nachfolgend werden deshalb diese Leistungen unserer Wälder detailliert aufgeführt.

Direkte ökosystemare Leistungen des Waldes

a) Speicherung von Kohlenstoff

Bei der Photosynthese nehmen grüne Pflanzen Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft auf und produzieren daraus mit Wasser Glukose unter Abgabe von Sauerstoff. Die Glukose wird in verschiedener Form (bei Bäumen u. a. als Lignin im Holz) in den Pflanzenkörper eingebaut. Deshalb stellen die zahlreichen Waldbäume einen riesigen Kohlenstoffspeicher dar. Aber auch die Waldböden und Moorflächen enthalten erhebliche Kohlenstoffmengen. 1 kg Kohlenstoff enthält 3,67 kg CO_2 . Der Umfang der CO_2 -Speicherung ist eine

Funktion von Waldfläche, Holzvorrat und Zeit (Kohlenstoffinventur 2017; RIEDEL et al. 2017). 1 fm Holz kann $\sim 1,3$ t CO₂ speichern. 1 ha Wald mit 400 fm Holzvorrat hat somit ~ 500 t CO₂ gespeichert, zusätzlich befinden sich ~ 300 t CO₂ im Waldboden. Beispielsweise wurden im Arnsberger Wald (NRW, standörtlich vergleichbar mit dem Taunus) oberirdisch pro Hektar ca. 150 t Kohlenstoff gespeichert, unterirdisch ca. 100 t (Natur in NRW 2/24). Der Holzvorrat in Naturwäldern wächst durchschnittlich um 3–4 fm pro Jahr und Hektar. Also nimmt die CO₂-Speicherung in Naturwäldern bis zur Erreichung der Zerfallsphase jährlich um ca. 4–5 t/ha zu; in Wirtschaftswäldern weniger, da Holz entnommen wird.

Die Speicherleistung der gesamtdeutschen Wälder wird in die deutsche Klimabilanz eingepreist. 2021 waren dort insgesamt ca. 3,2 Mrd. t Kohlenstoff gespeichert, davon 1,7 Mrd. oberirdisch und 1,5 Mrd. in den Böden und Mooren (Statistisches BA 2023). Allerdings hat die Speicherleistung aufgrund der Kalamitäten ab 2018 abgenommen auf zuletzt nur noch 14 Mio. t Kohlenstoff-Zunahme im Jahr 2021. Diese Zahlen zeigen, wie wichtig eine Erholung des Waldes und eine Steigerung des Holzvorrats für die Verbesserung der Klimabilanz wären.

b) Wasserspeicherung und Erosionsschutz

In einem Mischwald im südlichen Schwarzwald (Nähe Freiburg/Br.) wurden bei ca. 750 mm Niederschlag eine jährliche Versickerung von 230 Liter/m² gemessen. Dies ergab eine jährliche Grundwassererneubildung von 2300 m³/ha (FVA-BW). Dies entspricht etwa den Verhältnissen in unserem Stadtwald. Im zerfallenden Totholz werden große Wassermengen gespeichert. Mit verschiedenen Maßnahmen (z. B. Anlage von Flutmulden, Aufstauen von Wasserrinnen) sollte das Regenwasser im Wald zurückgehalten werden. In hängigen Lagen verhindert die Baumschicht den Abtrag von Bodenmaterial bei Regen. Verschiedene Studien haben belegt, dass größere Waldgebiete die Regenwahrscheinlichkeit durch die Abgabe von Aerosolen erhöhen und so Trockenperioden vermindern.

c) Ausfilterung von Luftschadstoffen

Das betrifft z. B. Feinstäube und Schwermetalle, wie Untersuchungen vom Umlandverband Frankfurt/M. gezeigt haben (STOCK et al. 1993). In den höheren Lagen des Taunus ist der Schwermetallgehalt in den Böden höher als in den Tieflagen. Dies ist auf Föhnwinde und den Auskämmeffekt der Baumkronen zurückzuführen.

d) Klimafunktion

Erhaltung eines kühl-feuchten Waldinnenklimas; Bereitstellung kühler und feuchter Luftströme für naheliegende Siedlungen (ausgleichende Wirkung). Erhöhung der Regenwahrscheinlichkeit über größeren Waldgebieten (Aerosole).

e) Artenvielfalt

Je naturnäher und älter ein Wald ist, desto artenreicher ist er, vor allem in Bezug auf Flechten, Pilze, Insekten und Vogelarten (MEYER 2022). Die Vielfalt hängt v. a. vom Totholz und Mikrolebensräumen ab (Altbäume). Besonders relevant für die Artenvielfalt (bes. für Käfer, Fledermäuse, Spechte und Eulen) sind alte Eichen und lichte Wälder (frühere Hute-, Mittel- und Niederwälder).

f) Biotopvielfalt und Naturnähe der Wald-Pflanzengesellschaften

Diese ist in naturnahen Wirtschaftswäldern größer, wenn gezielt nur wenige standortfremde Baumarten gepflanzt oder gefördert und die Bäume nicht schon in der Jugendphase geerntet werden.

Indirekte kulturelle Ökosystemleistungen

g) Nutzungsfunktion

Die Bereitstellung von Holz war in den letzten 200 Jahren seit Beginn einer geregelten Forstwirtschaft die Hauptnutzung der Wälder. Nachdem sich in den letzten Jahren die Schwächen der bisherigen Altersklassenwirtschaft deutlich abzeichneten, tritt diese Form der Nutzung zunehmend in den Hintergrund. Wie zahlreiche Beispiele in Deutschland zeigen, ist der Dauerwald ökonomisch sogar rentabler und erzeugt durchschnittlich 20 % mehr Holzertrag – insbes. Wertholz – als die bisherige Forstwirtschaft. Der Einschlag von Holz ist im Zuge des Klimawandels aus verschiedenen Gründen zu vermindern. Einerseits ist zu erwarten, dass ohnehin weitere Mengen an Kalamitätsholz anfallen werden, die teilweise genutzt werden können. Andererseits wird weiterhin über ein Viertel des Holzes „thermisch verwertet“, also verbrannt (Kaminholz, Pellets, Holzkraftwerke usw.; IBISCH et al. 2020; MANTAU 2018). Dabei ist die Holzverbrennung wegen des geringeren Brennwertes sowie der Freisetzung klimarelevanter Gase und von Feinstäuben negativer zu beurteilen als das Verbrennen anderer fossiler Brennstoffe wie Öl, Gas und Kohle (IBISCH et al. 2020; UBA 2022). Sie sollte deshalb stark vermindert und nicht weiter beworben werden. Überdies ist Deutschland seit 2020 Holzexportland mit hohen Ausfuhrmengen, insbes. nach China (Statistisches Bundesamt 2025), statt dass das hier erzeugte Holz vermehrt in klimaschonenden, langlebigen Holzprodukten, z. B. im Hausbau, verwendet wird. Diese Holzwerkstoffe haben nur 11 % Anteil an der Verarbeitung (MANTAU 2018), nach anderen Quellen maximal 22 %. Ihr Anteil wird oft überschätzt. Auch um den Kohlenstoffspeicher Wald durch Erhöhung der Umtriebszeiten aufzustocken, sollte zukünftig weniger Holz eingeschlagen werden. Dieses Speicherpotential ist noch längst nicht ausgeschöpft. Eine andere Nutzungsfunktion ist die Gewinnung von Wildfleisch (Wildpret) durch die Jagd. Historische Nutzungsformen wie Waldweide, Schnei-

teln (Laubernte zur Viehfütterung), Laubstreurechen oder Eichenschälung für Gerberlohe kommen heute hier nicht mehr vor.

h) Erholungsfunktion

Die positiven Wirkungen eines Aufenthalts im Wald für die physische und psychische Erholung der Menschen sind hinlänglich bekannt. Die Waldluft enthält wenig Feinstaub, viel Sauerstoff und Geruchsstoffe (u. a. Terpene), die eine heilende und beruhigende Wirkung haben. Im Wald herrschen Ruhe und ein ausgeglichenes Bestandsklima (s. o.). Deshalb wird in letzter Zeit vermehrt das Waldbaden (japanisch Shirin Yoku) ausgeübt. Viele Menschen schätzen das Walderlebnis mit seinen grünen, beruhigenden Farben während der Vegetationszeit und die weiße Pracht des schnee- oder reifbedeckten Winterwaldes. So hat die Ästhetik des Waldes – ein naturnaher Mischwald eher als ein monotoner Altersklassenwald – eine positive Wirkung auf das Wohlbefinden der Menschen. Manche empfinden den Wald mit seinen besonderen Orten (alte Bäume, Felsen, Bäche) sogar als spirituellen Ort. Hinzu kommt an einigen Stellen, wo man dies noch erkennen kann oder wo das neu eingerichtet wurde, die Bedeutung des Waldes als Kulturerbe, nämlich dort, wo früher historische Nutzungen stattfanden wie Nieder-, Mittel- oder Hutewald oder die Köhlerplatten zur Herstellung von Holzkohle.

i) Bildungsfunktion

Der Vergleich verschiedener Waldbilder kann zum besseren Verständnis von Ökosystemen und ihren Gefährdungen führen. Wälder sind deshalb besonders geeignet für die Anlage von Naturlehrpfaden. Naturwälder sind wichtige Referenzflächen für Förster:innen, weil der Vergleich ihrer Leistungen mit Wirtschaftsforsten deren Bewirtschaftung und Wertigkeiten verbessert. Deswegen hat die Forstverwaltung in Hessen auch Naturwaldreservate mit ungenutzten Flächen und daneben liegenden, bewirtschafteten Vergleichsflächen eingerichtet. Um das Projekt der klimastabilen Umwandlung ihres Bürgerwaldes den Bürger:innen von Taunusstein näher zu bringen, sollte es durch eine intensive Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit begleitet werden; ein „Wildnispfad“ ist geplant. Vorschläge dazu werden in Kap. 12 aufgeführt.

6 Wie könnte ein klimaresistenter, naturgemäßer Wald aussehen?

Voraussetzung für die Erreichung eines nachhaltigen, naturgemäßen Waldzustandes ist das Verständnis vom Wald als eines komplexen Ökosystems. Der Wald ist nicht nur eine Ansammlung von Bäumen, die man wie eine Sparkasse behandelt und je nach Bedarf Geld in Form von Holz entnimmt. Vielmehr besteht er aus einer Vielzahl weiterer Elemente, die in ihrer Gesamtheit sein Weiterleben erst ermöglichen. Dazu gehören höhere Pflanzen, Moose, Pilze, Flechten, Algen, der

Waldboden mit seinen streuzersetzenen Bodentieren und seinen Pilzmycelen, die die Bäume mit Nährstoffen und Informationen versorgen („wood wide web“), das selbst gestaltete Bestandsklima und die vielen Waldtiere, die die Zusammensetzung der Vegetation beeinflussen. Ohne die Berücksichtigung dieser Glieder und ihres Zusammenwirkens arbeitet man langfristig gegen die Natur und wird weitere Probleme bekommen, wie die letzten Kalamitäten gezeigt haben.



Abbildung 3: Plenterähnlicher Mischwald in Abt. 212; Foto: W. Ehmke.

Figure 3: Mixed forest with different wood layers in district 212; photo: W. Ehmke.

Ein neues Waldkonzept muss folglich mit der Natur arbeiten. Deswegen ist der Naturschutz im Wald so wichtig – gerade auch im Wirtschaftswald. Dabei können wir den Stadtwald in zwei Bereiche einteilen: den Wirtschaftswald, in dem die Holznutzung gleichrangig neben den weiteren Funktionen Klimaschutz,

Erholung, Bildung, Wasser- und Erosionsschutz sowie Arten- und Biotopschutz steht, sowie den Naturwald, in dem die Holznutzung aufgegeben wurde und wo der Arten- und Biotopschutz Vorrang genießt. Insofern sprechen wir beim Wirtschaftswald vom integrativen Naturschutz und beim Naturwald vom segregativen Naturschutz. Nach dem Beschluss der Taunussteiner Stadtverordneten hätten wir somit 5 % Naturwald und 95 % Wirtschaftswald (Stadt Taunusstein 2023).

Das erklärte Ziel der Kommunalpolitik für das neue Waldkonzept ist die langfristige Erreichung eines „Dauerwaldes“, wie ihn Alfred Möller erstmalig beschrieben hat (MÖLLER 1922). Der Dauerwald als Wirtschaftswald wird geprägt durch einen stufigen Aufbau verschieden alter Bäume aus verschiedenen standortgerechten Baumarten, in dem kein Kahlschlag stattfindet, sondern nur hochwertige Einzelbäume entnommen werden, wenn sie hiebsreif sind. Das Ziel ist die Erzeugung von „Holz nach höchster Güte und bestmöglicher Masse“ (MÖLLER l. c.). Auch im hiesigen Stadtwald gibt es einige Abteilungen (z. B. 212 südlich Bleidenstadt, 628 westlich Orlen), die schon bisher wie ein Dauerwald bewirtschaftet wurden und auch während der jüngsten Trockenperioden nur wenige Schäden davongetragen haben (Abb. 3). In den Dauerwald eingemischt liegt der Naturwald in Form von diversen Naturwaldzellen (NWZ), in denen keine Holznutzung stattfindet. In ihnen soll sich der Wald ungestört bis zur Zerfallsphase entwickeln können. Sie dienen somit nicht nur dem Arten- und Biotopschutz, da sie einer Vielzahl von Arten als Lebensraum dienen, die im Wirtschaftswald mit seinem begrenzten Lebensalter nicht vorkommen können, und sie entsprechen mittelfristig der Potentiell Natürlichen Vegetation (PNV), also der standortangepassten Pflanzengesellschaft auf dem jeweiligen Standort. Diese PNV wird sich allerdings mit fortschreitendem Klimawandel verändern – wie und wohin, wissen wir heute noch nicht. Deshalb bieten die NWZ auch für den wirtschaftenden Förster und interessierte Waldbesucher eine gute Vergleichsmöglichkeit mit der zukünftigen natürlichen Waldentwicklung (NWZ als Referenzflächen).

7 Welche Baumarten sind für den Dauerwald geeignet?

Bäume sind als langlebige Pflanzen in besonderem Maße an ihren Wuchsstand gebunden. Die Gesamtheit der dort wirkenden Faktoren nennt man Standort. Dazu gehören abiotische Faktoren wie Boden, Wasser und Klima sowie biotische Faktoren wie die begleitende Pflanzenwelt, die Tiere und der den Wald behandelnde Mensch. Jede Baumart bevorzugt ihre spezifischen Standortsbedingungen, um optimal wachsen zu können.

Die Baumarten werden nach ihrer Einwanderungszeit und ihrer Herkunft in einheimische (indigene) und fremde (neophytische) Arten unterteilt. Zu den einheimischen Arten gehören im westlichen Taunus alle Baumarten, die nach der Eiszeit hier eingewandert sind, sowie die Arten (Neophyten), die nach der Ent-

deckung Amerikas einwanderten oder vom Menschen eingeführt wurden und sich seitdem selbstständig vermehrt haben. Zu ersteren zählen bei uns von den Laubbäumen die Stiel- und Traubeneiche, die Hainbuche, die Rotbuche, die Sommer- und Winterlinde, die Gemeine Esche, die Zitter- und Schwarzpappel, Berg-, Spitz- und Feld-Ahorn, die Bergulme, die Schwarzerle, die Hänge- und Moorbirke, die Weidenarten, die Esskastanie, die Walnuss, die Mehlbeere, Vogelbeere und Elsbeere; von den Nadelgehölzen lediglich die Waldkiefer, die sich seit der Eiszeit im Präboreal auf extremen Felsköpfen gehalten hat. Zu den fremden Arten, die im Taunus nicht standortheimisch sind, gehören von den Laubbäumen die Roteiche, die Hybrid-Pappel, die Feld- und Flatter-Ulme. Von den Nadelbäumen sind es die Fichte und die Weißtanne, die im Schwarzwald und im Thüringer Wald ihre nächsten natürlichen Wuchsorte haben, aber an mehreren Stellen im Taunus mit mehreren Generationen bereits eingebürgert sind, die Europäische und die Japanische Lärche, die Douglasie und die Küstentanne. Dies sind alles Arten, die hauptsächlich forstlich oder als Parkbäume angepflanzt wurden und sich auch verjüngen können, aber noch nicht fest eingebürgert sind. Daneben werden im Zuge des Klimawandels vermehrt fremde Baumarten versuchsweise forstlich eingebracht wie Baumhasel, die Zedernarten, Strobe, Blauglockenbaum, Tulpenbaum, Flaumeiche, Orientbuche und andere mehr. Ob diese Fremdländer auch bei uns im Dauerwald verwendbar sind, müssen die mehrjährigen Anbauversuche verschiedener Forstinstitute zeigen.

Welche Baumarten am besten geeignet sind, den zukünftigen ökosystemaren Veränderungen zu trotzen, ist also derzeit noch ungewiss. Die Rotbuche mit der größten Verbreitung und Häufigkeit scheint aufgrund ihres „genetischen Gedächtnisses“ aus der Wärmezeit im Hochmittelalter noch eine größere Standfestigkeit im Klimawandel aufzuweisen, obwohl es auch hier einige Bestände mit Vitalitätsschwäche gibt. Unter Erhöhung des Bestandesalters und geringer Öffnung des Kronendachs halten sich die Schäden in Grenzen (MEYER et al. 2024), so dass die Buche wohl auch zukünftig eine bestandstragende Rolle im Dauerwald spielen wird.

„Kalamitäten sind keine Katastrophen, sondern Ereignisse.“

(Achim Frede, Nationalpark Kellerwald-Edersee)

Ähnliches gilt für die an Wärme und Trockenheit stärker angepassten Eichen, wenngleich hier die jüngste Zunahme von Schädlingen wie dem Eichen-Prachtkäfer Sorgen macht. Die Esche kommt im Taunussteiner Stadtwald nur in Bachtälern vor, das anderenorts verbreitete Eschentriebsterben ist deshalb hier wenig relevant. Die Rußrindenerkrankung der Ahornarten spielt hier bisher keine Rolle; ohnehin treten die Ahorne nur an Wald- und Wegrändern auf und sollten auch zukünftig nicht flächig gepflanzt werden. Als Mischbaumart sind sie mit ihrer leicht zersetzbaren Blattstreu aber wichtig für die Verbesserung des Bodenhu-



Abbildung 4: Weißtannen-Buchen-Kiefern-Bestand in Abt. 607B; Foto: W. Ehmke.

Figure 4: Stand of Silver fir, beech and Scots pine in district 607B; photo: W. Ehmke.

mus. Dies trifft auch auf die – meist unsterändige – Hainbuche und die Zitterpappel zu. Von den nicht standortheimischen Baumarten sollten nur geringe Anteile im Dauerwald eingemischt werden; bei FSC-Zertifizierung sind maximal 20 % Fremdarten zulässig (FSC 2024), da ihre zukünftigen Wuchsleistungen und ihre Auswirkungen auf das Ökosystem nicht kalkulierbar sind. Von den fremden Nadelbäumen scheinen die Weißtanne und die Douglasie noch die besten Chancen auf Resilienz im Klimawandel zu haben (Abb. 4). Ein gewisser Nadelholzanteil bis 20 % ist auch im Dauerwald vertretbar und wichtig für die Sägeindustrie (der

Einschnitt in Sägewerken bestand 2024 zu 96,5 % aus Nadelholz (WESTERMANN 2025)).

8 Wie kann der Umbau zum Dauerwald gelingen?

In den Waldbauregeln des FSC sind die Maßnahmen festgelegt, die zur nachhaltigen und naturgemäßen Nutzung des Dauerwaldes gehören (FSC 2024). Allerdings hat die Taunussteiner Kommunalpolitik mehrheitlich entschieden, auf die Zertifizierung nach FSC zu verzichten (Stadt Taunusstein 2023). Es wird deshalb unerlässlich, für die zukünftige Bewirtschaftung des Stadtwaldes die wichtigsten Handlungsempfehlungen zu formulieren, um zu einem klimaresistenten und ertragreichen Dauerwald zu kommen. Diese Empfehlungen sollten auch Eingang in die nächste Forsteinrichtung finden. Sie orientieren sich außer an den FSC-Regeln an den ökologischen Grundsätzen naturgemäßer Waldwirtschaft, wie sie die Arbeitsgemeinschaft naturgemäße Waldwirtschaft (ANW) aufgestellt hat (ANW 2013). Dabei ist der Waldumbau nicht von heute auf morgen zu leisten, denn der naturgemäße Wald braucht viel Pflege und Durchforstung, um die gewünschte Baumartenvielfalt zu erreichen – gerade im Taunus, wo die Rotbuche als dominante Baumart auf geeigneten Standorten alle anderen Arten zu überwachsen droht. Es braucht also auch Förster:innen mit viel Wissen und Geduld, damit das Ziel Dauerwald in 100 bis 150 Jahren erlangt wird.

Grundsätze des neuen Waldkonzepts für den Stadtwald Taunusstein:

- 1) Der gegenwärtige Flächenumfang des Stadtwaldes soll erhalten bleiben. Alle naturnahen Waldökosysteme sind gegen Nutzungsänderungen, insbes. Rodungen, zu sichern. Der Wald ist als unersetzliches Naturkapital zu behandeln und nicht als Flächenreserve für weitere Inanspruchnahmen wie Siedlung, Verkehr usw. Dies gilt auch für kleine Flächen, die sich im Laufe der Jahre summieren können. Ersatzaufforstungen bilden kaum eine Alternative, da sie sich nur sehr langsam zu neuen Ökosystemen mit ihren vielfältigen Funktionen und Leistungen entwickeln. Der bisher schon sehr zerstückelte und durch viele verschiedene Nutzungsansprüche beeinträchtigte Stadtwald würde durch neue Zerschneidungen destabilisiert. Auch die Anlage neuer Rückegassen im Waldinnern sollte unterbleiben.
- 2) Wegen der Komplexität der Waldökosysteme mit diversen Strukturen und Dynamiken ist es schwierig, die Folgen von nutzenden Eingriffen umfassend und vollständig zu erkennen und – angesichts der langen Lebenszyklen – richtig vorherzusehen. Die Entwicklung der Bestände sollte in Ruhe beobachtet werden. „Stetigkeit ist das Gegenteil von Plötzlichkeit“ (ALFRED MÖLLER 1922). Als oberster Grundsatz ist deshalb festzulegen, dass das neue Bewirtschaftungskonzept von möglichst wenigen Nutzungseingriffen aus-

geht (Minimumprinzip), dass es sich an den natürlich ablaufenden Prozessen orientiert (Prozessschutzprinzip) und eine möglichst große Naturnähe anstrebt, um die Resilienz der Waldbestände zu erhöhen.

„Wir Förster sind für den Wald da, nicht fürs Geld!“

(Walter Trefz, früherer Revierförster in Freudenstadt)

- 3) Die Nutzung von Wäldern bedeutet Nutzung von bzw. Eingriffe in natürliche Entwicklungen in Ökosystemen. Deshalb muss das Bewirtschaftungskonzept vorrangig die ökologischen Bedingungen und Prozesse beachten. Ökonomisch positive Erträge (Holznutzung) können nur bei optimalen ökologischen Rahmenbedingungen erzielt werden. Der Ökologie und nicht der Holznutzung muss deshalb oberste Priorität eingeräumt werden.
- 4) In Anbetracht der zunehmenden Umweltgefahren (Abnahme der Biodiversität, weiter bestehende Luftbelastung, Klimawandel und damit verbundene Kalamitäten usw.) soll der Stadtwald Taunusstein einen Beitrag zur Daseinsvorsorge für Pflanzen, Tiere und Menschen leisten. Zur Minderung des CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre müssen die Holzvorräte in den Wäldern angehoben werden; die Kohlenstoffspeicherung ist eine einfache Funktion von Zeit, Waldfläche und Biomasse, d. h. je älter der Bestand, desto mehr CO₂ wird im Holz eingelagert und somit der Atmosphäre entzogen.
- 5) Wegen seiner umfassenden Bedeutung für alle Bürger:innen von Taunusstein wird deren Beteiligung an der Entwicklung, Durchführung und Kontrolle des neuen Bewirtschaftungskonzeptes erforderlich und unabdingbar. Es muss eine Kooperation zwischen Interessierten, Sachkundigen und den zuständigen Durchführenden entstehen – schon allein deshalb, weil die Wälder auch soziale (u. a. Erholungsfunktion) und kulturelle (u. a. Volksbildung) Anforderungen erfüllen sollen. Der Stadtwald ist „Bürgerwald“ und gehört allen!
- 6) Die wiederkehrende Forsteinrichtung soll so gestaltet werden, dass sie – statt wie bisher rein verbal – zukünftig mit zielführenden Planungen und praktischen Maßnahmen die naturgemäße Waldwirtschaft im Stadtwald festlegt. Zukünftig sollen in der Forsteinrichtung auch die Ökosystemleistungen des Stadtwaldes dargestellt werden. Als Grundlage hierfür ist eine flächendeckende Waldbiotopkartierung sowie eine Einordnung der Naturnähestufen der einzelnen Waldbestände für die Festlegung bestandsbezogener Bewirtschaftungsziele vorzunehmen.

Vorgaben und Einzelmaßnahmen:

- 1) Entscheidend ist die Förderung der in Taunusstein vorkommenden natürlichen Waldgesellschaften gemäß der Potentiell Natürlichen Vegetation (PNV) – die sich allerdings im Klimawandel verändern kann –, der existie-

renden Wald-Lebensraumtypen gemäß FFH-Richtlinie sowie die Steigerung des Holzvorrats und der Holzqualität der Erntebäume. Pflegemaßnahmen (u. a. Durchforstungen) erfolgen nur bei Jungbeständen vor dem Alter von 40 Jahren und danach nur, wenn qualitativ gute Bäume von schlechten Bäumen bedrängt werden.

- 2) Als standortheimische Hauptbaumarten der PNV im Taunus gelten Eichen, Rotbuche, Hainbuche, Schwarzerle, Esche, Ahornarten, Birken, Zitterpappel, Weidenarten und Waldkiefer. Standortfremde Baumarten wie Fichte, Lärchen, Douglasie, Strobe und Roteiche, Robinie u. ä. werden nicht gefördert, sondern mitgenommen, wenn sie sich von selbst vermehren. Durch den Klimawandel erweitert sich das Vegetationspotenzial um wärmeliebende heimische Baumarten wie Mehl- und Elsbeere, Esskastanie, Winter- und Sommerlinde. Die Naturverjüngung der klimaresistenten Weisstanne sollte gefördert werden.
- 3) Die Holzernte erfolgt als Einzelstammentnahme nach Erreichen der Erntereife. Kriterium hierfür ist der definierte Zieldurchmesser des Stammes. Er soll je nach Standort bei Rotbuche mind. 70 cm und bei Eiche mind. 80 cm betragen. Der Anteil von Starkbäumen und Totholz soll im Wirtschaftswald je mind. 10 % des Holzvorrats betragen.
- 4) Die Erneuerung der Wälder erfolgt überwiegend durch Naturverjüngung. Bei Kalamitätsflächen sollten mindestens zwei Drittel des anfallenden Schadholzes nicht geräumt werden. Nachpflanzungen auf maximal 20 % einer Schadfläche bilden die Ausnahme; dafür sind nur standortheimische Baumarten vorzusehen (z. B. Traubeneiche). Das Pflanzen von mannshohen Heistern, z. B. mit kleinen Raupenbaggern, erleichtert das Anwachsen und spart die Gatterung. Nach Offenstellung einer Fläche sollte ca. 10 Jahre gewartet werden, ob die Naturverjüngung gelingt. Wenn nicht, kann nachgepflanzt werden.
- 5) Horst- und Habitatbäume und deren Umgebung sind vor Beeinträchtigungen zu schützen und zu erhalten (Abb. 5).
- 6) Es soll ein möglichst hoher Holzvorrat durch Verlängerung des Bestandsalters angestrebt werden. Dadurch erhöht sich die Kohlenstoffspeicherung in den Bäumen und ist somit ein Beitrag zur Verbesserung der CO₂-Bilanz.
- 7) Auf mind. 10 % der Gesamtwaldfläche werden durch Gemeindesatzung und gesichert durch Grundbucheintrag Waldbereiche als Naturwaldzellen (NWZ) ausgewiesen, die die typischen Waldgesellschaften repräsentieren und die zur Dokumentation der Waldentwicklung und zur Förderung der Biodiversität dienen. Sie sind – mit Ausnahme der Jagd und der Verkehrssicherung – von allen Nutzungen und Eingriffen freizustellen. Die Einzelflächen sollen mind. 10 ha groß sein. Dazu können vorhandene Waldflächen außerhalb regelmäßigm Betrieb (WarB) um geeignete Flächen des Wirtschaftswaldes erweitert und mit den NWZ zu größeren Naturwaldgebieten



Abbildung 5: Habitatbaum; Foto: W. Ehmke.

Figure 5: Habitat tree; photo: W. Ehmke.

zusammengefasst werden. Entsprechende Gebietsvorschläge hat der Autor der Stadtverwaltung vorgelegt. Es ist zu prüfen, ob dafür im Rahmen der Eingriffsregelung ein Kompensationspool nach § 16 BNatSchG eingerichtet werden kann, um dort Ökopunkte einzustellen. Der Wirtschaftswald umfasst somit zwischen 90 und 95 % der Gesamtwaldfläche von Taunusstein.

- 8) Die Wasserrückhaltung und die Grundwassererneubildung im Wald müssen verbessert werden. Dazu sind neben Sickergruben auch die Totholzanteile zu erhöhen. Das zerfallende Totholz und die dadurch gebildete Humusschicht enthalten viel Wasser und binden mehr Kohlenstoff (Synergieeffekt!).

- 9) Die derzeit zu hohe Anzahl des Schalenwildes muss an die ökologische Tragfähigkeit der Waldbestände angepasst werden. Dazu sind effektivere Jagdmethoden als bisher zu entwickeln und unter Beteiligung möglichst vieler Jäger:innen einzuführen.
- 10) Die Holzernte soll möglichst naturverträglich unter Schonung der Waldböden und Forstwege verlaufen. Schwere Erntemaschinen wie z. B. Harvester sowie die Ernte in der Vegetationsperiode sind deshalb nicht zulässig. Bei der bodenschonenden Holzbringung haben sich neben Rückepferden als maschinelle Alternative auch sog. Kleinraupen mit funkgesteuerten Seilwinden bewährt.

Grundsätzlich verboten sind

- a. Kahlschläge sowie Schirmschläge,
- b. Monokulturen, ausgenommen aus Naturverjüngung,
- c. Aktive Ansiedlung von nichtheimischen Baumarten,
- d. Ausbringung von Pestiziden, sofern nicht zur Gefahrenabwehr für die Bevölkerung angeordnet (z. B. gegen den Eichenprozessionsspinner),
- e. Ausbringung von Kalk, Mineraldüngern, Gülle, Klärschlamm,
- f. Abtragen oder Verdichten des Mineralbodens,
- g. Entwässern von Feuchtstellen,
- h. Kirrungen und Füttern von Wildtieren.

Die wichtigsten fünf Grundregeln für die Bewirtschaftung des Dauerwaldes sind:

- a. Lichtökologie herstellen! Die zu fällenden Bäume gezielt auswählen und auszeichnen,
- b. Binnenklima fördern! Die Waldränder dicht halten; Einschlag mäßig, aber regelmäßig; nur Einzelbäume entnehmen, um das Kronendach dicht zu halten,
- c. Boden schützen! Kein Einsatz schwerer Maschinen, sondern Kleinraupen, Seilbringung und Rückepferde, kein Anlegen neuer Rückegassen,
- d. Baumarten mischen! Naturverjüngung fördern; in Zwangslöchern Anreicherungspflanzungen mit geeigneten Baumarten,
- e. Wildbestand limitieren! Weisergatter auswerten und Abschuss erhöhen.

9 Der Einfluss des Schalenwilds und des Jagdmanagements auf den Dauerwald

Umfang und Zusammensetzung der Wildbestände können beträchtliche Auswirkungen auf die Verjüngung und Baumartenmischung der Waldbäume haben. Es muss der Grundsatz gelten: „Wald vor Wild“, d. h. herausragendes Ziel der Jagd

muss es sein, eine Verjüngung und ein ungeschädigtes Heranwachsen der Gehölze und Kräuter in natürlicher Mischung ohne Schutzmaßnahmen zu ermöglichen, um klimagerechte, zukunftsfähige Waldökosysteme zu schaffen und zu erhalten. Im Stadtwald kommt flächendeckend das Rehwild und das Schwarzwild vor; das Rotwild lebt an den Hängen des Hochtaunus (Platte bis Eiserne Hand), außerdem gibt es im Bereich nördlich Wingsbach Durchzug von einzelnen Hirschen. Dort kann auch Damwild beobachtet werden. Zu den schädigenden Aktivitäten des Wildes gehören insbesondere der Verbiss von Knospen und Blättern, das Schälen der Rinden sowie das Fegen von jungen Bäumen (Abstreifen des Bastes am Gehörn bzw. Geweih) durch Rehbock oder Hirsch. Um das Ausmaß der Wildschäden zu dokumentieren, können verschiedene Methoden angewandt werden. Da die Wildtiere sehr versteckt leben, ist eine direkte Bestandszählung sehr ungenau und führt meistens zu völlig falschen Annahmen. Es kommen also im Wesentlichen nur indirekte Methoden zur Anwendung, die hauptsächlich die Beeinträchtigung der Forstpflanzen erfassen. Eine der häufigsten Methoden ist der Einsatz von Weiserflächen mit Gattern oder Zäunen (REIMOSER & SUCHANT 1992). Sie wird auch seit 2023 im Taunussteiner Stadtwald mit 44 Weisergattern durchgeführt.

Das Jagdrecht ist an das Eigentum gebunden. Es ist hervorzuheben, dass die Jägerschaft in Taunusstein gegenwärtig auf fremdem Eigentum, nämlich dem der Stadt, jagt. Deswegen sollte die Stadt auch das Jagdmanagement aktiv gestalten. Die objektiv feststellbaren Waldschäden durch den bisherigen Jagdbetrieb belaufen sich laut Gutachter Bethmann auf mindestens 300.000 Euro jährlich (BETHMANN 2020). Dies ist ein für die Stadtfinanzen nicht unerheblicher Betrag! Um die oben genannten Ziele zu verwirklichen und die Waldschäden zu vermindern, muss die jagdrechtliche Position der Waldeigentümerin Stadt Taunusstein gestärkt werden. Dazu sind die Jagdpachtverträge bei erneuter Ausschreibung so zu flexibilisieren, dass die Vertragsfreiheit gemäß BGB gilt; d. h. die Vertragsfreiheit einschränkende Klauseln sind zu streichen. Ohnehin wäre es zur Erreichung eines angepassten Wildbestandes am sinnvollsten, wenn die Stadt Eigenjagdbezirke unter Beteiligung möglichst vieler ortsansässiger Jäger:innen mit Begehungsscheinen einrichten würde, wie das in vielen anderen Kommunen (z. B. Wiesbaden) bereits geschieht. Vor kurzem wurden im Stadtwald auf Vorschlag der Jägerschaft einige Sonderjagdzonen auf Zeit geschaffen, in denen die Abschussquoten in Abstimmung mit dem städtischen Jagdkoordinator festgelegt werden. Für alle Reviere soll zudem ein Bonus-Malus-System eingerichtet werden, das die Jäger:innen in Form der Selbstverpflichtung dazu motivieren soll, die vereinbarten Abschussquoten einzuhalten. Es bleibt abzuwarten, ob diese Neuregelungen die erhoffte Minderung der Waldschäden bringen und ggf. auf weitere Flächen ausgedehnt werden können oder ob die Umwandlung in Eigenjagdbezirke sich zwingend daraus ergibt.

Die jagdpraktische Umsetzung des erforderlichen neuen Jagdmanagements lehnt sich an die Empfehlungen des Deutschen Forstwirtschaftsrates (DFWR 2023) und des Gutachters Bethmann (BETHMANN 2020) an. Sie umfassen im Wesentlichen folgende Maßnahmen:

- a) Behördlichen Abschussplan für Rehwild abschaffen, da Rehwildbestände nicht quantifizierbar sind (s. o.). Grundlage für die Abschussquoten müssen die Schäden an der Vegetation und somit die amtlichen Ergebnisse der Weiserflächengutachten sein.
- b) Sofern die Waldschäden im amtlichen Gutachten als hoch bewertet werden, ist der vollzogene Abschuss mit beweiskräftigen Methoden zu dokumentieren.
- c) Kirrungen und Wildfütterungen sind zu verbieten, da sie Wildkonzentrationen mit vermehrten Wildschäden verursachen und angesichts sich mehrender milder Winter keine Notzeiten für das Wild mehr auftreten.
- d) Es sind effizientere Jagdmethoden einzuführen, etwa Bewegungsjagden an nur wenigen Tagen im Jahr, um den Jagddruck zu konzentrieren. Daran sollten möglichst viele ortsansässige Jäger:innen unter Anleitung des städtischen Jagdkoordinators beteiligt werden.
- e) In der Jägerschaft sollte der Kenntnisstand über waldökologische Zusammenhänge, über den Forstbetrieb und über die Bedeutung der Wildschäden für die zukünftige Struktur des Dauerwaldes erhöht werden. Dazu ist eine enge Kooperation zwischen Waldeigentümerin, Naturschutz und Jägerschaft erforderlich. Der kürzlich eingeführte Runde Tisch Stadtwald leistet dazu einen wichtigen Beitrag und sollte als Daueraufgabe verstanden werden.

10 Arten- und Biotopschutz im Dauerwald als Wirtschaftswald

Wie bereits erwähnt, ist der Wald – auch der Wirtschaftswald – ein komplexes Ökosystem. Der Komplexitätsgrad steigt mit zunehmender Naturnähe des Bestandes bzw. mit abnehmender Einwirkung forstlicher Tätigkeiten. Ein hervorragendes Merkmal dieser Komplexität ist die Fähigkeit eines Waldes zur mikroklimatischen Selbstregulation (Bestandsklima). So ist die Lufttemperatur unter einem dichten Laubdach bei Hitze deutlich geringer, bei Frost deutlich höher als im Freiland. Die forstliche Bewirtschaftung beeinflusst den Aufbau und die Struktur der Wälder und hat damit einen signifikanten Einfluss auf ihre Artenvielfalt und die Waldgesellschaften. Viele Arten sind – zumindest für einen Teil ihres Lebenszyklus – auf Sonderstrukturen wie Mikrohabitatem oder Totholz angewiesen (s. Abb. 6). Ihre Menge steigt mit zunehmendem Bestandsalter stark an. Insbesondere alte Bäume weisen besonders viele und vielfältige Mikrohabitatem auf. Im Wirtschaftswald sollte deshalb auf eine genügende Anzahl an Totholz und Habitatbäumen

geachtet werden. Es ist sinnvoll, auf Basis der Potentiell Natürlichen Vegetation (PNV) bewirtschaftete Wälder unterschiedlicher Baumartenzusammensetzung, Waldentwicklungsphasen und Nutzungsintensität zu entwickeln. Aus einer Alters-, Struktur- und Baumartenvielfalt in den Beständen resultiert eine größere Biodiversität. Heimische Baumarten wie die Stiel- und Traubeneiche wirken sich dabei besonders positiv auf die Artenvielfalt aus.

11 Die Bedeutung von Naturwäldern und Prozessschutzflächen

Bei der Vorbereitung des Dauerwald-Konzeptes in der Taunussteiner Waldkommission wurde von einem ehemaligen Forstamtsleiter der Sinn und Nutzen einer Flächenstilllegung in Frage gestellt. Sein Argument war, dass der Holzverbrauch aus dem Wirtschaftswald einen größeren Beitrag zum Klimaschutz leiste als ein Naturwald ohne Holznutzung. Unter anderem durch die Verwendung langlebiger Holzprodukte wie Möbel, Dachstühle, Baustoffe usw. würde der im Holz gespeicherte Kohlenstoff sehr langfristig festgelegt. Auch würden Wirtschaftswälder mehr Kohlenstoff speichern als Naturwälder. Deswegen sei der Holznutzung der Vorzug vor einer Flächenstilllegung zu geben.

Da diese und ähnliche Meinungen sehr häufig von Seiten der etablierten Forstwirtschaft sowie der Holz- und Sägeindustrie geäußert werden, obwohl sie nicht durch Fakten oder wissenschaftliche Studien belegt sind, soll hier in Kürze auf die Bedeutung von Naturwaldflächen und den Komplex Wald und Holz eingegangen werden.

„Wildnis ist eine Absage an die Arroganz des Menschen“
(Aldo Leopold, US-amerikanischer Forstwissenschaftler und Ökologe)

Zunächst zur Holzbilanz Deutschlands. Wurde bisher etwa die Hälfte des hiesigen Holzverbrauchs importiert, sind seit 2017 die Holzexporte stark angestiegen und haben die Importmengen überflügelt (WEIMAR 2025). Von einem Holzmann- gel durch bisherige Stilllegungen kann deshalb nicht gesprochen werden. Etwa 47 % des verbleibenden Holzaufkommens wird thermisch verwertet (verbrannt; s. o.). Ein Viertel wird überwiegend zu kurzlebigen Verpackungsprodukten und Papier verarbeitet. Nur etwa 13 % der Holzernte (nach HUSSENDÖRFER 2022 sogar nur 10 %!) werden als Holzwerkstoffe (Bauholz, Möbel und andere langlebige Produkte) genutzt (MANTAU 2022). Der Anteil langlebiger Produkte ist also viel geringer, als hier behauptet wurde; er sollte sinnvollerweise gesteigert werden, statt China und andere Staaten mit deutschem Holz zu versorgen.

Weiterhin ist zu prüfen, ob tatsächlich Wirtschaftswälder mehr Kohlenstoff speichern als Naturwälder. Auch hierbei ist die Faktenlage eindeutig. Naturwälder sind bis zum Erreichen der Zerfallsphase den Wirtschaftswäldern in Bezug auf



Abbildung 6: Naturwaldzelle in Abt. 607C; Foto: W. Ehmke.

Figure 6: Natural Forest Reserve in district 607C; photo: W. Ehmke.

die Kohlenstoffspeicherung weit überlegen, denn der Umfang der Speicherung ist abhängig von der Waldfläche, dem Holzvorrat und dem betrachteten Zeitraum. Nach Ergebnissen der Kohlenstoffinventur (RIEDEL et al. 2017) wachsen Wälder im Schnitt pro Jahr und Hektar um ca. 3 bis 4 Festmeter, wobei ein Festmeter Holz etwa 1,3 t CO₂ speichert. Dies ergibt eine jährliche Zunahme von ca. 4 bis 5 t CO₂ pro Hektar in Naturwäldern in einem Zeitraum von bis zu 400 Jahren. In Wirtschaftswäldern hingegen wird – auch bei Dauerwaldnutzung – laufend Holz entnommen und somit der Holzvorrat und die Kohlenstoffspeicherung vermindert. Hinzu kommt bei etabliertem Forstbetrieb (z. B. Großschirmschlag) die teils beträchtliche Öffnung des Kronendachs mit stärkerer Belichtung und Erwärmung des Bodens, wodurch Kohlenstoff aus dem Boden freigesetzt wird. Dies kann dazu führen, dass der Wald zur Kohlenstoffquelle wird, d. h. mehr Kohlenstoff abgibt als speichert.

In Naturwäldern entwickeln sich langfristig Lebensräume, in denen alle Waldentwicklungsphasen auf einer Fläche nebeneinander vorkommen. Junge Büsche stehen neben jahrhundertealten Bäumen, am Boden liegt viel Totholz von bereits abgestorbenen Bäumen (Abb. 6). Dies führt zu einer hohen Vielfalt und Anzahl von Habitaten für Arten mit unterschiedlichsten Ansprüchen, was Grundlage für

eine große und vor allem für alte Wälder typische Artenvielfalt ist. Deshalb ist auch der Artenreichtum in Naturwäldern – vor allem bei Pilzen und Käfern – wesentlich größer als in Wirtschaftswäldern (MEYER 2022). Dabei kommt besonders solchen Habitaten eine wichtige Rolle zu, die erst in der Alters- und Zerfallsphase von Naturwäldern entstehen und die es im Wirtschaftswald nur in geringem Umfang gibt, da die Bäume oft schon im Jugendalter geerntet werden. Es wäre deshalb wünschenswert, wenn die Naturwaldfläche im Kommunalwald Taunusstein auf 10 % erhöht würde.

Naturwälder sind an der Zielsetzung ausgerichtet, Beispiele gebietstypischer, authentischer Biodiversität zu erhalten durch ihre eigenständige Entwicklung ohne Holznutzung. Dieses Ziel ist u. a. deshalb bedeutsam, weil z. B. die gebietstypischen Buchenwälder in ihrer natürlichen Zusammensetzung mit überwiegender Rotbuche als herrschender Baumart im bewirtschafteten Dauerwald durch Einbringung von Mischbaumarten nicht mehr den lebensraumtypischen Buchenwäldern als Reinbeständen entsprechen (CORDES 2024). Beispielsweise sind Naturwaldreservate und Bannwälder (in Baden-Württemberg) auch als wissenschaftliche Dauerbeobachtungsflächen definiert mit dem Ziel ihrer zeitlich unbegrenzten Eigenentwicklung, um daraus für die Waldbewirtschaftung verwertbare Ergebnisse zu gewinnen, etwa für waldbauliche Fragen oder für die Standortskunde. Einer der frühesten Schöpfer, bei dem der Verfasser in die Lehre ging, nämlich Prof. Gerhard Schlenker in Stuttgart, erfand für diese Totalschutzgebiete den prägenden Begriff „Urwald von morgen“ Man könnte auch sagen: „Wildnis von morgen“.

12 Vorschläge für das weitere Vorgehen

Durch die Beschlüsse der Stadtverordnetenversammlung sind einige weitere Schritte bei der Umwandlung zum Dauerwald bereits festgelegt. So soll der Runde Tisch Bürgerwald die zu ergreifenden Maßnahmen in Zusammenarbeit mit der Jägerschaft und probeweise mit HessenForst vorbereiten und begleiten. Unverständlichweise sind die Naturschutzverbände am Runden Tisch nicht beteiligt, obwohl der Naturschutz im Dauerwald eine tragende Rolle spielt. Die für die Transformation erforderlichen Vorgaben und Maßnahmen sind oben bereits geschildert worden. Sie sind anhand der laufend gemachten Erfahrungen zu überprüfen, zu ergänzen und neu zu justieren. Auch im Personalbereich sind wichtige Ergänzungen schon erfolgt bzw. stehen in nächster Zukunft an. So hat die Verwaltung eine Forstwissenschaftlerin sowie einen Forstwirtschaftsmeister und zwei Auszubildende im Fachbereich 2 (Stadtwald) eingestellt. Noch zu besetzen ist beim Dienstleister HessenForst die Stelle eines/r Revierförster:in. Hier sollte die Stadt von ihrem Mitspracherecht Gebrauch machen und eine Person auswählen, die bereit ist, sich für die Idee des Dauerwaldes einzusetzen.

Das wichtigste Instrument für die mittelfristige Planung und Festlegung waldbaulicher Maßnahmen nach den Wünschen der Waldeigentümerin ist die alle zehn Jahre wiederkehrende Forsteinrichtung. Ihr nächster Abschluss in Taunusstein ist für 2027 vorgesehen. Um die Forsteinrichtung wirkungsvoll für die Umwandlung des Stadtwaldes in einen Dauerwald zu gestalten, müssen verschiedene Schritte umgesetzt werden:

1. Auswahl eines geeigneten forstlichen Einrichtungsbüros, das mit der Thematik des Dauerwaldes und der ökosystemaren Dimension von Wäldern vertraut ist. Das Büro sollte Referenzen mit bereits durchgeführten Forsteinrichtungen vorlegen. Da wegen der nötigen Bestandsaufnahme im Stadtwald ein längerer Vorlauf erforderlich ist, sollte die Auswahl des Büros Ende 2025/Anfang 2026 erfolgen.
2. Formulierung einer klaren Zielsetzung durch die Stadt als Eigentümerin. Hierzu kann der Runde Tisch Bürgerwald die Vorarbeit leisten.
3. Gründliche Begleitung des Forsteinrichtungsprozesses. Das Einrichtungsbüro soll Zwischenergebnisse vorlegen, damit der Runde Tisch und die Stadt nachjustieren können.
4. Abschließend eingehende Diskussion und Abstimmung der forstlichen Planung; Genehmigung durch die Obere Forstbehörde.

Der jährlich zu erstellende Forstwirtschaftsplan ist stringent auf der Grundlage der Forsteinrichtung zu erstellen, muss aber bei sich unvorhersehbar ändernden Rahmenbedingungen (z. B. Kalamitäten) an die neuen Verhältnisse angepasst werden.

Der Beitrag des Stadtwaldes zum Klimaschutz und zur Artenvielfalt könnte noch erhöht werden, wenn sich die Kommunalpolitik dazu entschließe, ein oder zwei weitere Naturwaldgebiete auszuweisen und so auf bis zu 10 % Prozessschutzfläche im Bürgerwald zu kommen. Dafür gibt es mehrere geeignete Flächen, z. B. die Eichen-Hainbuchenwälder westlich des Hähnchesfelsen bei Bleidenstadt (ca. 50 ha), der Waldmeister-Buchenwald südlich des Kastells Zugmantel (ca. 20 ha) oder die Moorwälder am Fürstenrod nördlich der Platte (ca. 30 ha). Dies sind meist über 100-jährige, manche sogar 200-jährige Bestände, die größtenteils ohnehin schon außer Bewirtschaftung waren. Damit wären weitere typische Waldgesellschaften des Taunus für ihre ungestörte Entwicklung gesichert.

Um die Naturwaldgebiete auch naturschutzrechtlich dauerhaft zu sichern, wäre die Ausweisung als Naturschutzgebiete sinnvoll. Mit ihrer Artenvielfalt, unter anderem auch mit Orchideen (Abb. 7), und mit ihren naturnahen, regionaltypischen Waldgesellschaften, die sich auch auf noch von Eingriffen und Schäden geprägten Standorten langfristig entwickeln, erfüllen sie die dafür erforderlichen Kriterien.

Wie bereits erwähnt, wäre eine intensive, begleitende Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit sinnvoll. Dazu gehört u. a. der geplante Wildnispfad um das Naturwaldgebiet bei Watzhahn, der mit Infotafeln und vertiefenden Erläuterungen über QR-Codes über die Bedeutung von Naturwäldern ohne Holznutzung informiert.



Abbildung 7: Orchideen im Naturwald (Schwertblättriges Waldvöglein/*Cephalanthera longifolia*; Foto: W. Ehmke.

Figure 7: Orchids in the Natural Forest (Sword-leaved Helleborine/*Cephalanthera longifolia*; photo: W. Ehmke.

Hilfreich wäre auch die Erstellung von Flyern und Imagefilmen über den Gesamtwald. Mit verschiedenen Informationsveranstaltungen, die der Runde Tisch organisiert, sollte die Öffentlichkeit in ihr Projekt des Bürgerwaldes eingebunden und ihr die wichtige Rolle des Waldes für Klimaschutz und biologische Vielfalt nahegebracht werden. Dabei können Themen wie die Auswirkungen des Klimawandels, Wild und Wald oder die Wahl klimageeigneter Baumarten behandelt werden. Wichtig ist auch die Einbindung der Schulen, sowohl der Grundschulen als auch der Gymnasien. Es könnten z. B. Unterrichtsmodule für Schüler:innen der 3. und 4. Klassen sowie der 8. bis 10. Klassen entwickelt oder von anderen Projekten übernommen werden (z. B. LINNEMANN 2018); für Waldexkursionen sollten Materialien und Waldspiele bereitgestellt werden. Denkbar wäre auch die

Beschäftigung von Waldpädagog:innen, etwa von HessenForst oder vom Naturpark für Aktivitätsblöcke an den Schulen als Programm „Mobiles Walderleben“ (MOWE). Dabei werden die Angebote so konfiguriert, dass sie in den Lehrplan passen. Weiterhin wäre ein jährlicher „Tag des Bürgerwaldes“ denkbar, an dem zu Fuß oder per Fahrrad Teile des Stadtwaldes erkundet werden. Nach gewisser Laufzeit des Projektes Bürgerwald, wenn einige Maßnahmen umgesetzt sind, wären eine oder mehrere Fachtagungen und Podiumsdiskussionen mit Expert:innen aus Forsten, Naturschutz und Wissenschaften zum Thema Waldumbau angebracht, um das Projekt bekannt zu machen und auch andere Kommunen zur naturgemäßen Waldwirtschaft anzuregen.

13 Resümee

Wir sehen, dass noch viel zu tun ist. Die Tatsache, dass die Beschlüsse der Taunussteiner Stadtverordneten vom 23.11.2023 zur klimafesten Umwandlung des Stadtwaldes nicht weitgehend genug waren, hat den Autor dazu bewogen, diesen Beitrag zu verfassen, der auch als Denkschrift gewertet werden kann. Wir haben im Prinzip alle das Wissen, wie wir unseren Wald im Zeichen des Klimawandels behandeln müssen. Aber es bestätigt sich wieder einmal, dass Wissen allein nicht zum nötigen Handeln führt. Der Autor hofft, den Weg zu einem wirklich nachhaltigen Bürgerwald aufgezeigt zu haben, um die Entscheidungsträger:innen ins Handeln zu bringen.

14 Danksagungen

Der Autor dankt allen, die an der Waldwende in Taunusstein und anderen Wäl dern mitwirken. Insbesondere dem Initiator des ganzen Vorhabens, dem damaligen Bürgermeister und jetzigen Landrat Sandro Zehner, der den Weitblick dafür hatte, dass es mit unserem Wald so nicht weitergehen konnte. Ein großes Dankeschön geht an die tatkräftigen Bediensteten in der Stadtverwaltung, Frau Forstwissenschaftlerin B.Sc. Melanie Anielski und Dipl. LsPfl. Albert Breitsch sowie an den früheren Revierförster Hartmut Schneider, der schon immer naturgemäß dachte und wirkte, an Volker Diefenbach, Bürgermeister von Heidenrod und früher hauptberuflicher Förster, der das Manuskript durchlas und den Autor als Nicht-Forstmann (mit Waldbau nur als Ergänzungsfach) vor einigen Blamagen bewahrte, an den Schriftleiter des Nassauischen Vereins für Naturkunde, Prof. Dr. Benedikt Toussaint, sowie an die Schwiegertochter des Autors, Gemma McGowan-Ehmke, die die englischen Teile übersetzte.

15 Literatur

- ANW (Arbeitsgemeinschaft Naturgemäße Waldwirtschaft) (2013): Grundsätze der ANW; www.anw-deutschland.de/eip/pages/grundsaezte-der-anw/php (Zugriff 31.7.2022).
- BACHMANN, P. (2021): Ergänzende Unterlage zur Forsteinrichtung aus 2017 im Stadtwald Taunusstein. – Büro für angewandte Ökologie und Forstplanung; Brosch. – 9 S.; Kassel.
- BETHMANN, C. VON (2020): Gutachterliche Stellungnahme Stadtwald Taunusstein zum 31.8.2020. – Bethmann Waldberatung, Schönstadt; Brosch. – 7 S., mit 8 S. Ergänzungsschreiben vom 14.7.2021.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2025): Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der 4. Bundeswaldinventur (BWI); Brosch. – 60 S.; Berlin.
- BMUNR (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2007): Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt. – 180 S., Bonn.
- CORDES, U. (2024): Quo Vadis Buchenwald- zwischen Klimawandel und Forstwirtschaft. – Ber. Reinh.-Tüxen-Ges., **32**: 85-102.
- DFWR (Deutscher Forstwirtschaftsrat) (2023): Positionspapier für eine Jagd in Zeiten von Klimawandel und notwendiger Klimaanpassung: Wald und Schalenwild in Einklang bringen!; Brosch. – 4 S.; Berlin.
- EHMKE, W. (1983): Redebeitrag im Deutschen Bundestag zum Waldsterben. – 10. Wahlperiode, 9. Sitzung am 20.5.1983; Protokoll. – S. 461-465.
- EHMKE, W. (1996): Pflanzen und Vegetation in Taunusstein. – Taunusstein, Bd. 1: Landschaft und Natur. – 215 S. (Heimat- und Geschichtsverein Taunusstein und Stadt Taunusstein).
- EHMKE, W. (2001): Ist der Klimawandel auch in Wiesbaden und dem Taunus feststellbar? – Jb. nass. Ver. Naturkde., **122**: 43-58.
- EHMKE, W. 2022: Naturwälder auch in Kommunalwäldern? Ihr Beitrag zu Klimaschutz und Artenvielfalt. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **143**: 5-31.
- FSC (Forest Stewardship Council) (2024): 3. Deutscher FSC-Standard, Version 3.1 – www.fsc-deutschland.de (Zugriff 23.1.2025).
- HMU (Hessisches Umweltministerium) (2024): Waldzustandsbericht 2024; Brosch. – 48 S.; Wiesbaden
- HUSSENDORFER, E. (2022): Vortrag bei der Waldkonferenz der Grünen im Hessischen Landtag.
- IPCC 2024: AR 6 Synthesis Report: Climate Change 2023. – www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/ (Zugriff 17.4.2025).
- IBISCH, P., WELLE, T., BLUMENRÖDER, J. & SOMMER, J. (2020): Wälder sind Kohlenstoffspeicher – Holzverbrennung ist nicht klimaneutral; ePaper. – 12 S.; www.zdf.de/politik/frontal-21/holzverbrennung-100.html (Zugriff 31.7.2022).
- KLEIN-RAUFHAKE, T., SCHAPER, J., FORNFEISER, M., HÖLZEL, N. & HAMER, U. (2024): Wirkung der Waldnutzung auf Bodenökologie und C-Speicherung. – Natur in NRW, **2/2024**: 14-18.
- LINNEMANN, B. (2018): Klimawandel und Wald; www.fit-fuer-den-klimawandel.de/waldpaedagogik/schulklassen (Zugriff 25.1.2025).
- LUYSSAERT, S., SCHULZE, E.D., BÖRNER, A., KNOHL, A., HESSENMÖLLER, D., LAW, B.E., CIAIS, P. & GRACE, J. (2008): Old-growth forests as global carbon sinks. – Nature, **455**: 213-215.
- MANTAU, U. (2018): Holzrohstoffbilanzen und Stoffströme des Holzes; Schlussbericht für die FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe). –326 S.; Gützow.
- MANTAU, U. (2022): Holzrohstoffbilanz 2020. – www.fnr.de/fileadmin/projekte/2024/media-thek/fnr_brosch_rohstoffmonitoring_holz_2024.pdf (Zugriff 17.4.2025).
- MEYER, P., MÖLDER, A., FELDMANN, E., DEMANT, L. & SCHMIDT, M. (2022): Neue Naturwälder in Deutschland. Hotspots für Forschung und biologische Vielfalt im Klimawandel. – Geograph. Rundschau, **1/2 2022**: 28-31.

- MEYER, P., MÖLDER, A. & NAGEL, R.-V. (2024): Trockenjahre und Buchenmortalität; Geschlossenes Kronendach mindert Schäden. – Waldzustandsbericht 2024. – S. 42-44; Wiesbaden (Hess. Ministerium f. Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat).
- MÖLLER, A. (1922): Der Dauerwaldgedanke. Sein Sinn und seine Bedeutung. – 92 S.; Berlin. Heidelberg (Springer-Verlag).
- NOTHDURFT, A. (2014): Prognose der Leistungsfähigkeit der Wälder Baden-Württembergs im Klimawandel. – Forschungsbericht KLIMAPASS, LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg). – 23 S.; Karlsruhe.
- REIMOSER, F. & SUCHANT, R. (1992): Systematische Kontrollzäune zur Feststellung des Wildeinflusses auf die Waldvegetation. – Allgem. Forst- u. Jagdzeitung, **163** (2): 27-31.
- RIEDEL, T., HENNIG, P., KROIHER, F., POLLEY, H., SCHMITZ, F. & SCHWITZGEBEL, F. (2017): Die dritte Bundeswaldinventur (BWI 2012). Inventur- und Auswertemethoden. – 124 S.; Eberswalde (Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Thünen-Institut für Waldökosysteme).
- SANDER, L. (2025): Erneuerbare auf Rekordhoch, Emissionen auch. – Tageszeitung vom 9.4.2025.
- SCHMENKEL, G. (2001): Pollenanalytische Untersuchungen im Taunus. – Ber. Komm. Arch. Landesforsch. Hessen, **6**: 225-232.
- Stadt Taunusstein (2021): Pressemitteilung vom 16.9.2021.
- Stadt Taunusstein (2023): Beschluss der Stadtverordnetenversammlung vom 23.11.2023 zum neuen Waldkonzept. – Drucksache 21/210-04.
- STAHR, A. & BENDER, B. (2007): Der Taunus. Eine Zeitreise. – 253 S.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Statistisches Bundesamt (2023): Kohlenstoffbilanz des Waldökosystems; www.statistisches-bundesamt.de (Zugriff 14.1.2025).
- Statistisches Bundesamt (2025): www.statistisches-bundesamt.de (Zugriff 15.4.2025).
- STEINACKER, C., ENGEL, F. & MEYER, P. (2023): Natürliche Waldentwicklung in Deutschland: auf dem Weg zum 5 %-Ziel der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. – Natur und Landschaft, **98** (12): 545-552.
- STOCK, P., FRIEDRICH, K., LEHMANN, L. & WERNER, W. (1993): Bodenkataster und Bodenschwermetallkarte des Umlandverbandes Frankfurt am Main. – Bodenschutz Band 2 des Umlandverbandes Frankfurt am Main. – 35 S.; Frankfurt a. M.
- UBA (Umweltbundesamt) (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie. – Studie Climate Change, **12/2022**: 236 S.; Dessau.
- WEIMAR, H. (2025): Gesamtholzbilanz von Deutschland bis 2022. – www.thuenen.de/de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzbilanzen/gesamtholzbilanz (Zugriff 17.6.2025).
- WESTERMANN, P. (2025): Schnittholzproduktion in Deutschland. – Schriftl. Mitteilung der Deutschen Säge- und Holzindustrie, Bundesverband e.V. vom 23.6.2025.

DR. WOLFGANG EHMKE
Lindenstr. 2
D-65232 Taunusstein
Tel. 06128-41938
E-Mail: wolfgangehmke@aol.com

Manuskripteingang: 26. Juni 2025

Moore und Moorböden in Hessen

CHRISTIAN HELLER

Hessen, Moore, Moorböden, Naturhaushalt, CO₂-Senken, Klimaarchive, Schutzmaßnahmen

K u r z f a s s u n g : Naturnahe Moore sind nasse und sehr vielfältige Lebensräume. Ihre Böden aus Torf erfüllen eine Reihe herausragender Funktionen im Naturhaushalt. Sie sind außerdem sehr bedeutend für das globale Klima und stellen einmalige Archive der Natur- und Kulturgeschichte dar. Werden Moorböden entwässert, verlieren sie diese wichtigen Funktionen und wandeln sich von Stoffsenken zu Stoffquellen. Um Moorböden besser schützen zu können, sind genaue Kenntnisse zu ihrer Verbreitung und ihrem Zustand notwendig. Für Hessen liegen derzeit allerdings nur relativ ungenaue flächendeckende Informationen im Maßstab 1:50.000 vor. Um die Datenlage zu verbessern, wurden verschiedene Auswertungen im Rahmen von Moorschutzmaßnahmen durchgeführt. Im Ergebnis stellt sich heraus, dass die Anzahl landwirtschaftlich genutzter Moore in Hessen vermutlich deutlich niedriger ist als ursprünglich angenommen. Dagegen konnten zahlreiche kleinere bewaldete Moorflächen gefunden werden, die bisher noch nicht kartiert waren. Gerade aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Flächenanteile stellen Moorböden in Hessen sehr seltene und auch im Hinblick auf ihre Lebensraum- und Archivfunktionen besonders schützenswerte Böden dar.

Mires and peatland soils in Hesse

Hesse, mires, peatlands, natural balance, CO₂ sinks, climate archives, protective measures

A b s t r a c t : Natural mires are wet and very diverse landscapes. Their peatland soils fulfill a number of essential ecosystem functions. They are also very important for the global climate and represent unique archives of natural and cultural history. When peatland soils are drained, they lose these important functions. In order to better protect peatland soils, precise knowledge of their distribution and condition is necessary. For Hesse, however, only relatively inaccurate comprehensive information on a scale of 1:50,000 is currently available. In order to improve the data situation, various evaluations were carried out as part of conservation measures. The results showed that the number of peatlands used for agriculture is probably lower than originally assumed. On the other hand, numerous smaller peatland soils under forest were found that had not yet been mapped. Due to their comparatively small area, peatland soils in Hesse are very rare and particularly worthy of protection, especially in view of their habitat and archive functions.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	90
2	Grundlegendes zu Moor und Torf	91
2.1	Moorbildung und Torfwachstum	91
2.2	Bodenbildung in entwässerten Mooren	94
2.3	Leistungen naturnaher Moorböden	95
3	Zur Verbreitung von Moorböden in Hessen	97
4	Bodenkundliche Detailkartierungen potenzieller Moorbodenstandorte in Hessen	102

4.1	Moore unter landwirtschaftlicher Nutzung	102
4.2	Moore unter forstwirtschaftlicher Nutzung	109
4.3	Kartierung von sauren Niedermooren im Offenland	112
5	Fazit	114
6	Literatur	114

1 Einführung

Naturnahe Moore sind nasse Lebensräume, die lange Zeit als unwirtlich, lebensfeindlich und wertlos galten. Um sie für land- und forstwirtschaftliche Zwecke und zum Abbau von Torf nutzen zu können, wurden Moore in Mitteleuropa bereits seit dem 16. Jh. entwässert, so dass ein Großteil der einst intakten Moorlandschaften nach und nach verschwand. Schätzungen gehen davon aus, dass in Deutschland derzeit nur noch etwa 5 % der ehemaligen Moorbödenfläche als naturnahe intakte Moore existieren (LABO 2017).

Das Bewusstsein um die Bedeutung der Moorböden für den Klima- und Arten- schutz ist seit mehreren Jahren auch Teil der medialen Berichterstattung. Politisch wird die Bedeutung dieser schützenswerten Böden aktuell in der Moorschutz- strategie der Bundesregierung (BMU 2021) sowie in der Bund-Länder-Zielver- einbarung zum Klimaschutz durch Moorböden hervorgehoben. Neben zahlreichen länderspezifischen Programmen ist der Schutz von Moorböden auf nationaler Ebene im „Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz“ verankert (BMUV 2023). In der gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP), die Standards zur Erhaltung von Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zu- stand (GLÖZ) definiert, ist ebenfalls ein Mindestschutz von Feuchtgebieten und Mooren vorgesehen (<https://www.gesetze-im-internet.de/gapkondv>).

Um Moorböden effektiv und zielgerichtet zu schützen, ist eine genaue Kennt- nis ihrer heutigen Verbreitung und ihres Zustands notwendig. Schätzungen zufol- ge waren einst über 5 % der Fläche in Deutschland von Mooren bedeckt. Auch in Hessen befinden sich verschiedene Moorflächen unterschiedlichster Ausprägung, wenngleich in deutlich geringerem Umfang als beispielsweise im norddeutschen Tiefland oder im Voralpenraum. Genaue Informationen zu ihrer Lage fehlen bis- her aber.

Im Folgenden werden zunächst wichtige grundlegende Prozesse zu Moor- und Torfbildung in wachsenden und entwässerten Mooren erläutert und auf die viel- fältigen Leistungen von Moorböden eingegangen. Anschließend folgt eine Be- standsaufnahme zur aktuellen Moorverbreitung in Hessen. Der Begriff „Moor“ beinhaltet hier sowohl naturnahe Moore mit feuchtgebietstypischer Vegetation als auch gestörte Moore, die z. B. unter landwirtschaftlicher Nutzung stehen.

2 Grundlegendes zu Moor und Torf

2.1 Moorbildung und Torfwachstum

Die heutigen Moorbildungen begannen in Mitteleuropa zum Beginn des Holozäns vor etwa 12.000 Jahren und waren geprägt durch das Abschmelzen des Eises und das Auftauen des Permafrostes. Vor allem in pleistozän geprägten Landschaften kam es in Hohlformen und Becken mit hoch anstehendem Grundwasser zu ersten Verlandungen und Moorbildungen. Hauptbestandteil von Moorböden sind Torfe unterschiedlichster Ausprägung. Diese organischen Ablagerungen bestehen aus teilweise zersetzen und humifiziertem Pflanzenmaterial und müssen nach bodenkundlicher Definition einen Mindestgehalt an organischer Substanz von 30 Masse-% aufweisen (AG Boden 2024). Neben den sedentär nach oben aufwachsenden Torfen können Moorböden auch mineralisch-organische Sedimente in unterschiedlichen Anteilen enthalten, sog. „Mudden“.

Naurnahe wachsende Moore mit Torfbildung besitzen in ihrem vertikalen Aufbau zwei Bereiche. Der obere Bereich ist durch oszillierende Moorwasserstände geprägt und wird als „Akrotelm“ bezeichnet. Hier findet die Torfbildung nach dem Absterben der jeweiligen feuchtgebietstypischen Vegetation statt. Darunter folgt der permanent wassergesättigte Bereich der Torferhaltung, das sog. „Katotelm“ mit konservierenden Bedingungen. Die dort herrschende Sauerstoffarmut verhindert eine weitere Zersetzung der Torfe, indem die Zerkleinerungstätigkeit der Bodenfauna nahezu unterbunden wird und mikrobielle Umsetzungs- und Abbauprozesse stark verändert und nur noch eingeschränkt ablaufen (KOPPISCH 2001; KLEBER 2010).

Die individuelle Ausprägung eines Moores wird durch dessen spezifische Lage in der Landschaft bestimmt und ist das Resultat eines komplexen Wechselspiels von Wasser, Vegetation und Torf. Klimatische und geomorphologische Faktoren beeinflussen die für die Moorbildung zur Verfügung stehende Wassermenge und -qualität. Daraus entwickelt sich eine standorttypische Moorvegetation als Ausgangsmaterial für die Bildung charakteristischer Torfe. Die Vegetation eines Moores und dessen Torfe beeinflussen wiederum die Moorhydrologie in erheblichem Maße, z. B. das Strömungsverhalten im Moorkörper, die Wasserspeicherung oder das Oszillationsvermögen der Mooroberfläche. Jedes Moor ist daher einzigartig und das Produkt seiner jeweiligen Bildungsbedingungen (SUCCOW & JESCHKE 2024).

Trotzdem lassen sich Moore nach verschiedenen Ansätzen klassifizieren. Zunächst unterteilt man Moore aufgrund ihres hydrologischen Regimes in allein durch Regenwasser gespeiste ombrogene Hoch- oder Regenmoore (englisch „bogs“) und minerogene Niedermoore (englisch „fens“), die zusätzlich durch Grund- und/oder Oberflächenwasser gespeist werden (Abb. 1).



Abbildung 1: Schematische Differenzierung zwischen Hoch- und Niedermooren (verändert aus: Mooratlas 2023; <https://www.boell.de/mooratlas>, CC-BY 4.0).

Figure 1: Schematic differentiation between bogs and fens (modified from: Mooratlas 2023; <https://www.boell.de/mooratlas>, CC-BY 4.0).

Diese relativ generalistische hydromorphologische Klassifizierung wird um das Konzept verschiedener „hydrogenetischer Moortypen“ mit jeweils ähnlichen Torfeigenschaften und -mächtigkeiten erweitert (z. B. SCHOPP-GUTH 1999; SUC-COW & JOOSTEN 2001):

- Die ausschließlich durch Regenwasser gespeisten nährstoffarmen und sauren **Hochmoore** bilden sich in Gebieten mit Jahresniederschlägen ab etwa 700–800 mm, geringer Verdunstung und kühleren Jahresmitteltemperaturen, vor allem im Küsten- oder Alpenraum sowie in den Kammlagen der Mittelgebirge. Haupttorfbildner sind verschiedene Torfmoose (*sphagnum sp.*), die oft über Niedermoortorfen aus dem Grundwassereinfluss herausgewachsen sind.
- **Verlandungsmoore** sind weit verbreitet und entstanden durch die Verlandung und das Überwachsen offener Wasserflächen von Stillgewässern (Seen, Teiche und Altarme). Am häufigsten sind sie im jungpleistozänen Raum anzutreffen. Ihre Torfe werden vielfach durch Seggen (*Carex*) und Schilf (*Phragmites*) bzw. deren Vergesellschaftungen gebildet und sind meist durch Mudden unterlagert.

- **Versumpfungsmoore** entstehen entweder durch Grundwassermanstieg (Grundwasser-Versumpfungsmoor) oder durch stauendes Wasser auf undurchlässigem Substrat (Stauwasser-Versumpfungsmoor). Sie sind gekennzeichnet durch einen ständigen Wechsel von nassen und trockeneren Phasen. Ihre Torfe weisen deshalb in der Regel höhere Zersetzunggrade und geringere Mächtigkeiten auf als z. B. Verlandungsmoore.
- **Kesselmoore** bilden sich in Hohlformen mit kleinen Wassereinzugsgebieten. Durch die Kessellage steigt der Wasserspiegel stetig und es kommt zur Bildung von relativ mächtigen Torflagen auf kleinem Raum.
- **Überflutungsmoore** bilden sich durch periodische Überschwemmungen am Rand von Gewässern. Die Torfe sind durch einen Wechsel von Überflutung und Austrocknung charakterisiert und in der Regel stark zersetzt. Außerdem enthalten sie viele mineralische Bestandteile, die während der Hochwasserereignisse aus dem Gewässer eingetragen werden.
- **Durchströmungsmoore** sind an ganzjährig hohe Wasserstände und fließendes Grundwasser gekoppelt, dass durch den Moorkörper strömt. Die Torfe sind deshalb vergleichsweise geringer zersetzt. Die Mooroberfläche ist geneigt.
- **Hangmoore und Quellmoore** sind Überrieselungsmoore, die vom oberflächennahem Bodenwasser bzw. von Quellwasser gespeist werden. Aufgrund des periodisch schwankenden Wasserspiegels sind die Torfe teilweise stark zersetzt, was zu einer geringeren Durchlässigkeit des Bodens führt. Der Moorkörper wird demzufolge nicht vom Wasser durchströmt, sondern nur überrieselt. Diese Moortypen sind häufig in Mittelgebirgslagen anzutreffen und haben dort ebenfalls geneigte Oberflächen.

Daneben lassen sich Moore auch aufgrund ihrer trophischen Eigenschaften (Stickstoffversorgung) und der Säure-Basen-Stufe (pH-Wert) in verschiedene Ökologische Moortypen mit charakteristischer torfbildender Vegetation gliedern (Tab. 1).

Tabelle 1: Ökologische Moortypen Mitteleuropas nach SUCCOW & JOOSTEN (2001)

Table 1: Ecological mire types of Central Europe according to SUCCOW & JOOSTEN (2001)

Moortyp	Trophie	pH	Torfbildende Offenvegetation
Reichmoor	eutroph	3,2–7,5 (sauer-alkalisch)	Röhriche, Großseggenriede, Erlenbrüche
Kalk-Zwischenmoor	mesotroph	6,4–8,5 (alkalisch)	Braunmoos-Kopfriedriede
Basen-Zwischenmoor	mesotroph	4,8–6,4 (schwach sauer)	Braunmoos-Seggenriede
Sauer-Zwischenmoor	mesotroph	< 4,8 (sauer)	Torfmoos-Seggenriede
(Sauer-)Armmoor	oligotroph	< 4,8 (sauer)	Zwergstrauch-Wollgras-Torfmoorasen

2.2 Bodenbildung in entwässerten Mooren

Werden wachsende Moore entwässert, stoppt die Torfbildung und es kommt zu tiefgreifenden Veränderungen im Wasser- und Stoffhaushalt. Zunächst bewirkt der nun fehlende Auftrieb des Wassers eine rasche Moorsackung und Verdichtung, die sich auch bis in tiefer e und nicht entwässerte Bereiche fortsetzt, so dass das Moor seine natürliche Oszillationsfähigkeit verliert. Solche Moorsackungen sind auch nach Wiedervernässungs- bzw. Renaturierungsmaßnahmen nur bedingt reversibel (ZEITZ & STEGMANN 2001). Daneben kommt es im entwässerten Bereich zur wiederholten witterungsbedingten Austrocknung und Wiederbefeuchtung der Torfe. Dies bewirkt Quellungs- und Schrumpfungsprozesse, durch die sich je nach Dauer und Intensität der Entwässerung ein spezifisches Gefüge aus Schrumpfrissen, Aggregaten und Polyedern im Torfkörper ausbildet. Außerdem erhöht sich die bodenbiologische Aktivität durch die verstärkte Belüftung und der davon betroffene Torf wird durch voranschreitende Humifizierung und Mineralisation – verbunden mit erheblicher Stofffreisetzung – zu einem hochzersetzten, „amorphen“ Torf ohne erkennbare Pflanzenstruktur umgewandelt. Im Gegensatz zur primären Zersetzung bei der Torfbildung im Akrotelm spricht man hier von einer sekundären aeroben Torfzersetzung. Die einsetzende Regenwurmaktivität führt schließlich zur Ausbildung eines charakteristischen Krümelgefüges. Dieser Vorgang ist typisch für entwässerte Moore und wird als „Vererdung“ bezeichnet.

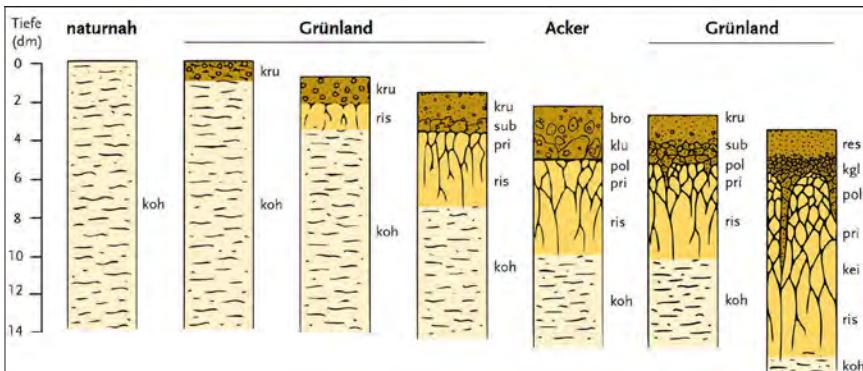


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Gefügeentwicklung von Moorböden infolge von Entwässerung und landwirtschaftlicher Nutzung (bro = Bröckelgefüge, kei = Keilgefüge, kgl = Konglomeratgefüge, klu = Klumpengefüge, koh = Kohärentgefüge, kru = Krümelgefüge, pol = Polyedergefüge, pri = Prismengefüge, res = Restgefüge, ris = Rissgefüge, sub = Subpolyedergefüge) (verändert nach CONSTANTIN et al. (2022) sowie ZEITZ & STEGMANN (2001)).

Figure 2: Schematic representation of the structural development of peat soils as a result of drainage and agricultural use (bro = crumbly structure, kei = wedgy structure, kgl = conglomerate structure, klu = lumpy structure, koh = coherent structure, kru = crumble structure, pol = polyedric structure, pri = prism structure, res = residual structure, ris = crack structure, sub = subpolyedric structure (modified after CONSTANTIN et al. (2022) and ZEITZ & STEGMANN (2001)).

Teilweise kann es auch zur sog. „Vermulmung“ kommen, bei der sich ein grusiges, feinkörnigeres Gefüge ausbildet, das in feuchtem Zustand schmierig wird (Abb. 2).

2.3 Leistungen naturnaher Moorböden

Naturnahe Moorböden mit flurnahen Wasserständen stellen vielfältige Leistungen zur Verfügung und erfüllen äußerst wichtige Bodenfunktionen, die größtenteils auch im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verankert sind und die es zu sichern oder wiederherzustellen gilt.

Zunächst bieten Moorböden durch das Zusammenspiel von Land und Wasser einen einzigartigen Lebensraum für feuchtgebietstypische und hochspezialisierte Pflanzen- und Tierarten und stellen „Hot-spots“ der Biodiversität dar (SCHOPP-GUTH & GUTH 2003).

Daneben fungieren wachsende Moore als Stoffsenken in der Landschaft, da sie dem Nährstoffkreislauf u. a. große Mengen Stickstoff und Phosphor entziehen und in ihren Torfen fixieren (TETZLAFF et al 2015).

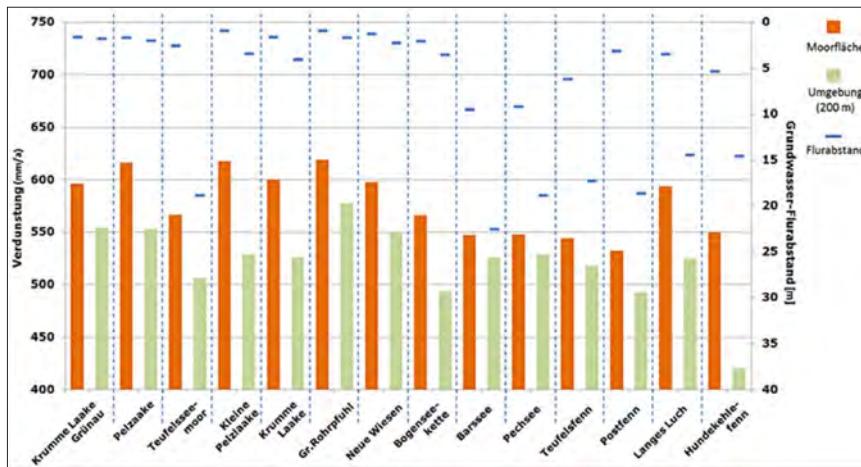


Abbildung 3: Abschätzung der Verdunstungsleistung von Berliner Waldmooren im Vergleich zu ihrer Umgebung (200 m-Radius) (Abbildung aus KLINGENFUSS et al. 2015).

Figure 3: Estimation of the evaporation capacity of Berlin forest mires compared to their surroundings (200 m radius) (figure from KLINGENFUSS et al. 2015).

Durch ihre Fähigkeit, bedeutende Anteile an Wasser aufzunehmen und zu speichern und diese in Trockenzeiten teilweise wieder abzugeben, wirken sich intakte Moorböden regulierend auf den Landschaftswasserhaushalt aus (EDOM 2001). Sie puffern Starkniederschläge, mindern Hochwasserereignisse ab und stabilisieren den Grundwasserspiegel. Außerdem wirkt die im Vergleich mit Mineralböden etwa 10–15 % höhere Verdunstungsleistung ausgleichend auf das Lokalklima wäh-

rend sommerlicher Hitzeperioden (Abb. 3). Im Zuge des Klimawandels mit prognostizierten Zunahmen der Häufigkeit von Extremwetterereignissen wie Starkregen, Überschwemmungen, längeren Trockenphasen und Hitzewellen wird die Bedeutung dieser Regelungsfunktionen naturnaher Moorböden weiter zunehmen.

Neben ihrer lokalklimatischen Bedeutung spielen Moorböden aber auch eine große Rolle im globalen Klimasystem. Trotz ihres relativ geringen weltweiten Flächenanteils von ungefähr 3 % ist in ihren Böden etwa ein Drittel des gesamten terrestrischen organischen Kohlenstoffs (C) gespeichert. Dies entspricht ungefähr der Hälfte der Menge an C, welche sich derzeit in der Atmosphäre in Form des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO_2) befindet (LIMPENS et al. 2008). Die Mehrzahl naturnaher Moore akkumuliert C seit Beginn des Holozäns und trägt somit erheblich zur Abkühlung des globalen Klimas bei. Die globale „Kühlungsleistung“ der Moore durch die Aufnahme und Speicherung von CO_2 -C in den letzten 10.000 Jahren wird auf etwa 1,5–2 °C geschätzt (HOLDEN 2005).

Neben den o. g. natürlichen Bodenfunktionen bilden Moore auch bedeutende Archive unserer Natur- und Kulturgeschichte (BAUEROCHSE & METZLER 2015). Konservierte organische Materialien wie Holz, Samen, Pollen, Leder oder tierische und menschliche Überreste geben Einblick in Jahrtausende alte Umwelt- und Lebensbedingungen. Mithilfe von Pollenanalysen lassen sich frühere Vegetationszusammensetzungen auch im Hinblick auf klimatische Veränderungen rekonstruieren. Atmosphärische Depositionen, z. B. Schwermetalleinträge, sind ebenfalls im Torf nachweisbar und können damit Rückschlüsse auf historische Belastungssituationen erlauben.

Tabelle 2: Mittlerer jährlicher Nährstoffaustausch [in kg/ha/a] aus unterschiedlich genutzten Hoch- und Niedermooren Norddeutschlands bei Gesamtabflusshöhen von 200 mm/a (TETZLAFF et al. 2015)

Table 2: Average annual nutrient output [in kg/ha/a] from differently used bogs and fens in Northern Germany at total discharge heights of 200 mm/a (TETZLAFF et al. 2015)

Moortyp und -nutzung	N	P	K	Ca
Hochmoor, unkultiviert	5	0,4–1,7	10–20	12–20
Hochmoor-Grünland	2–20	4–9	20–30	34–45
Hochmoor-Acker	10–40	8–17	k. A.	k. A.
Niedermoor-Grünland	5–20	0,1–2,0	10–50	20–150
Niedermoor-Acker	40–80	0,1–5,0	20–50	20–150

Werden Moorböden entwässert, nehmen die o. g. Funktionen und Leistungen deutlich ab, teilweise verschwinden diese auch vollständig oder kehren sich sogar um (JOOSTEN & CLARKE 2002). Durch den mikrobiellen Abbau der organischen Substanz wandeln sich Moore von Stoffsenken zu Stoffquellen. Der im Torf gespeicherte C wird wieder als CO_2 freigesetzt. Daneben kommt es vor allem in landwirtschaftlich genutzten Mooren zum Austrag von klimaschädlichem Lach-

gas (N_2O). In Deutschland sind etwa 95 % aller Moore entwässert und land- bzw. forstwirtschaftlich genutzt, so dass sie jährlich etwa 53 Millionen Tonnen Kohlen-dioxid-Äquivalente emittieren. Dies entspricht bis zu 7,5 % der gesamten deut-schen Treibhausgasemissionen (BMUV 2022).

Auch im Torf fixierte Nährstoffe, wie Phosphor, Stickstoff etc., können durch Mineralisation verstärkt freigesetzt werden und in umliegende Gewässer gelan-gen. Dabei übertreffen die Austräge entwässerter und landwirtschaftlich genutzter Moore die Austräge naturnaher Moore häufig um ein Vielfaches (Tab. 2).

3 Zur Verbreitung von Moorböden in Hessen

Die „Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland“ des Thünen-Insti-tuts umfasst neben „echten“ Moorböden, die Torfe mit mindestens 3 dm Mächtig-keit aufweisen müssen, auch andere kohlenstoffreiche, moorbegleitende Böden, die ebenfalls eine hohe Bedeutung für den Klimaschutz aufweisen (WITTNEBEL et al. 2023). Dazu gehören überdeckte oder umgebrochene Moore sowie Moorfol-geböden und Mineralböden mit geringmächtigeren Torfen. Moorfolgeböden zählen zu den Mineralböden und entwickeln sich aus ehemaligen Moorböden, z. B. durch den Verlust organischer Substanz in Folge von Entwässerung und Mi-neralisierung. Bodenkundlich spricht man in diesem Fall von „Abmoorgleyen“ (AG Boden 2024) bzw. „Anmoorgleyen“ (frühere Bezeichnung nach AG Boden 2005) mit Gehalten an organischer Substanz zwischen 15 und 30 Masse-%. Mi-neralböden mit geringmächtigeren Torfen (< 3 dm) werden als Moorgleye be-zeichnet. Laut aktualisierter Kulisse nehmen die kohlenstoffreichen Böden in Deutschland eine Gesamtfläche von 1,93 Mio. ha ein. Davon werden knapp 1,2 Mio. ha als „echte“ Hoch- und Niedermoorböden ausgewiesen. Dies entspricht einem Anteil von etwa 3,3 % an der Gesamtfläche Deutschlands. Da die Moor-bildungen überwiegend in pleistozän geprägten Landschaften Nord- und Süd-deutschlands stattfanden (Abb. 4), liegt der höchste Anteil an Moorböden auch in den Flächenländern Niedersachsen (374.000 ha), Mecklenburg-Vorpommern (271.000 ha), Brandenburg und Bayern (jeweils ca. 146.000 ha) sowie Schles-wig-Holstein (109.000 ha). Schlusslicht bildet das Saarland mit etwa 530 ha Moor-bodenfläche.

Für ganz Hessen weist die Kulisse knapp 10.000 ha organische Böden aus, die ungefähr 5.300 ha „echte“ Moorböden beinhalten. Dies entspricht nur 0,25 % der gesamten Landesfläche, und der Anteil hessischer Moorböden an der gesamten Moorfläche Deutschlands beträgt lediglich etwa 0,45 %. Somit ist Hessen eines der moorärmsten Bundesländer. Zum Vergleich: Die Landesfläche des moor-reichsten Bundeslandes Niedersachsen ist etwa zu 8 % von Moorböden bedeckt, was einem Anteil von über 38 % an der gesamtdeutschen Moorfläche entspricht.



Abbildung 4: Die aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland aus WITTNEBEL et al. (2023); Grafik: Thünen-Institut (2023).

Figure 4: The updated map of organic soils in Germany from WITTNEBEL et al. (2023); graphic: Thünen Institute (2023).

Die Daten für Hessen stammen aus der landesweit verfügbaren Bodenkarte 1:50.000 (BFD50) des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (<https://www.hlnug.de/themen/boden/information/boden-flaechenkataster-und-kartenwerke/bfd50>), die auch im Bodenviewer Hessen einsehbar ist (<https://www.bodenviewer.hessen.de>). Diese Karte stellt Bodengesellschaften dar, die aus wechselnden Anteilen von Moorböden und Mineralböden bestehen können. Dadurch sind Aussagen zur genauen Moorbödenverbreitung auf dieser Datengrundlage mit starken Unsicherheiten behaftet.

Laut BK50 nehmen Böden mit Hochmoorbildungen weniger als 5 % der gesamten hessischen Moorfläche ein. Diese befinden sich ausschließlich in niederschlagsreichen Mittelgebirgslagen wie Vogelsberg oder Rhön. Das wohl bekannteste und größte Hochmoor Hessens ist das 50 ha große „Rote Moor“ unweit der

Wasserkuppe an der Grenze zu Bayern und Thüringen. Unter periglazialen Bedingungen am Beginn des Holozäns begann hier zunächst die Bildung von Niedermoortorfen, über denen teilweise mehrere Meter mächtige Hochmoortorfe aus dem Grundwasserbereich aufwuchsen (GAUHL 1996; REIMANN et al 1997; Abb. 5).

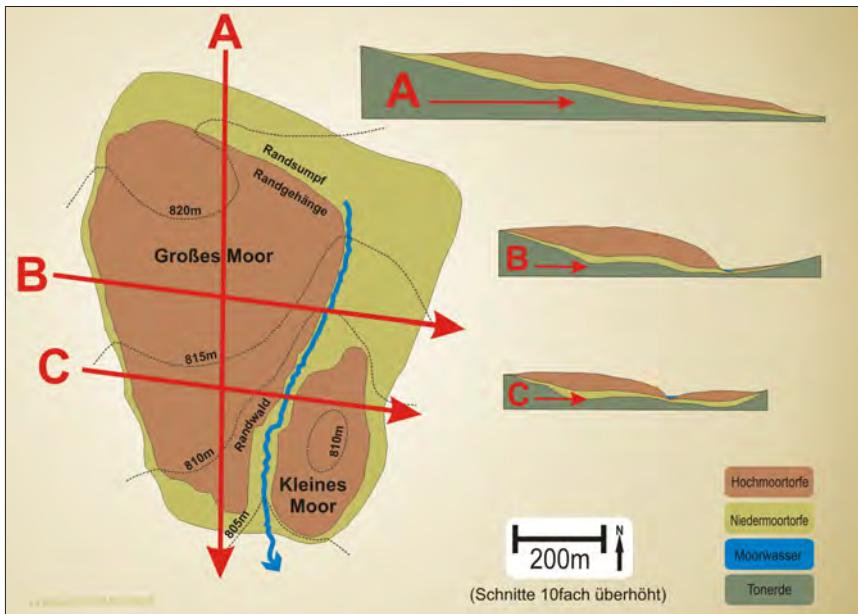


Abbildung 5: Schematische Längs- und Querschnitte durch das Rote Moor im ursprünglich naturnahen Zustand um 1800. Grafik verändert nach REIMANN et al. (1997).

Figure 5: Schematic longitudinal and cross-sectional views of the Red Moor in its original, near-natural state around 1800. Graphic modified from REIMANN et al. (1997).

Zu Anfang des 19. Jh. fand dort großflächiger und teils industrieller Torfabbau statt, der erst 1986 eingestellt wurde. Danach wurde das Moor mit hohem finanziellem und wissenschaftlichem Aufwand renaturiert und bildet heute die Kernzone des Biosphärenreservates Rhön. Der Torfschwund im Zentrum konnte dadurch gestoppt werden (Abb. 6), allerdings verhindern die nutzungsbedingt tiefgreifenden hydrologischen Veränderungen bis heute ein nachhaltiges Moorwachstum (SUCCOW & JESCHKE 2024). Das Rote Moor beherbergt seltene und bedrohte Arten und ist gleichzeitig ein ganzjährig beliebtes Naherholungsziel. Um Störungen der Kernzone möglichst zu vermeiden, wurden frühzeitig gezielte Maßnahmen zur Besucherlenkung getroffen (FORST et al. 2019).

Im Gegensatz dazu sind Böden aus Niedermoortorf deutlich häufiger in Hessen anzutreffen. Die bekanntesten und größten Niedermoorgebiete befinden sich im Bereich des Hessischen Rieds im nördlichen Oberrheingraben, in dem im Pleistozän mächtige Sedimente (teils > 100 m) über Schichten des Tertiärs abge-



Abbildung 6: Blick vom Aussichtsturm des Roten Moores auf die revitalisierte Fläche und den verbliebenen Torfkörper im Moorzentrum sowie den randlichen Karpatenbirkenwald; Foto: Jörg Braukmann; gemeinfrei, wikipedia.org.

Figure 6: View from the observation tower of the Red Moor over the revitalized area and the remaining peat mass in the bog center as well as the peripheral Carpathian birch forest; photo: Jörg Braukmann; public domain, wikipedia.org.

lagert wurden. In Auen und Altläufen von Rhein, Main und Neckar kam es durch Verlandungs-, Versumpfungs- und Überflutungsprozesse zur Sedimentation von Mudden und zum Aufwachsen von Torfen in einem kleinräumigen Mosaik aus grundwasserbeeinflussten Niedermooren und Mineralböden, wie sie z. B. von DAMBECK (2005) ausführlich beschrieben worden sind.

Die frühe und intensive anthropogene Nutzung des Hessischen Rieds als Siedlungs-, Agrar-, Verkehrs- und Wirtschaftsraum wirkte sich massiv auf den Landschaftswasser- und Naturhaushalt und die darin befindlichen Böden aus. Durch Entwässerung und intensive landwirtschaftliche Nutzung verschwand ein Großteil der ehemaligen Niedermoore.

Das vielleicht bekannteste Niedermoorgebiet im Hessischen Ried ist das „Pfungstädter Moor“, welches sich in einer Altnckarschlinge befindet und seit 1955 als Naturschutzgebiet ausgewiesen ist (Abb. 7).

Seine Bildung begann durch Verlandung und Sedimentation von organischen Mudden und dem Aufwachsen von Erlenbruchtorfen im Boreal (Frühholozän).

Im 19. Jh. wurde das Moor zur Torfgewinnung entwässert. Die Trinkwasserförderung durch das Wasserwerk Allmendfeld ab den 1960er-Jahren schnitt das Moor schließlich völlig vom Grundwassereinfluss ab. Zur Stützung des Wasser-

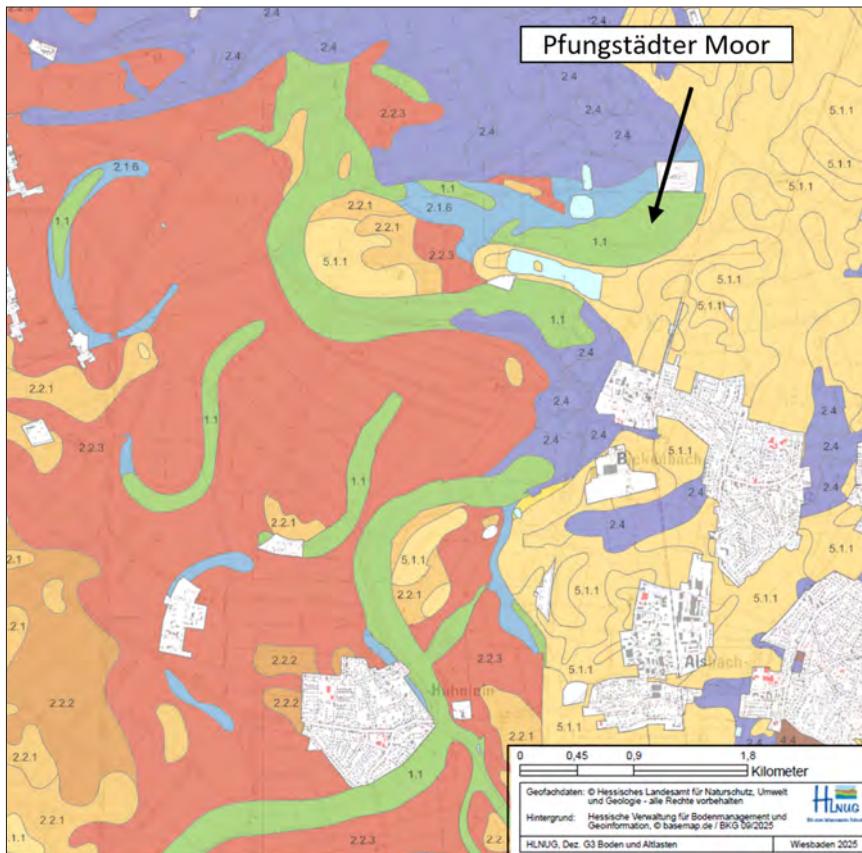


Abbildung 7: Ausschnitt aus der Bodenkarte 1:50.000 des HLNUG im Bereich des Pfungstädter Moores im Hessischen Ried. In den ehemaligen Schleifen des Neckars kam es zur Bildung von Niedermoortorfen (grüne Schraffur), die von Mineralböden umgeben sind.

Figure 7: Section of the 1:50,000 soil map of the HLNUG in the area of the peatland “Pfungstädter Moor” in the “Hessisches Ried”. Fen peats (green hatching) were formed in former loops of the Neckar River, surrounded by mineral soils.

haushaltes und zur Revitalisierung wurde bereits Anfang der 1980er-Jahre eine Wasserspeisung durch Zuleitung eines benachbarten Fließgewässers eingerichtet, allerdings ohne nachhaltigen Erfolg (TOUSSAINT et al. 2006). Zwischen 1999 und 2008 erfolgte eine zusätzliche Wasserspeisung durch Wasser aus dem Beregnungsnetz des Wasserverbandes Hessisches Ried. Aktuell fördert das Land Hessen die technische Instandsetzung bzw. den Ausbau der Bewässerungsanlagen und die Zuwässerung des Moores mit jährlich 208.000 Euro. Die Maßnahme wird durch ein hydrologisch-ökologisches Monitoring begleitet.

4 Bodenkundliche Detailkartierungen potenzieller Moorbödenstandorte in Hessen

Um das Wissen zur Verbreitung und zum Zustand der Moore in Hessen zu verbessern und um diese besser schützen zu können, wurden in den Jahren 2020 bis 2024 mehrere Auswertungen und Detailkartierungen durchgeführt, die aus der Maßnahme „Schutz von Moorböden“ des integrierten Klimaschutzplans 2025 der hessischen Landesregierung finanziert wurden (HMUJKLV 2017). Diese sollen im Folgenden vorgestellt werden.

4.1 Moore unter landwirtschaftlicher Nutzung

Hier lag der Fokus auf der Identifikation und Kartierung von Moorböden unter landwirtschaftlicher Nutzung, die derzeit nicht unter besonderem Schutz stehen (HLNUG 2022). Dazu wurden Daten der landwirtschaftlichen Bodenschätzung auf das Vorhandensein von Moorböden überprüft. Diese Daten werden seit 1934 in Deutschland von den Finanzbehörden nach einer eigens entwickelten Methodik erhoben. In Hessen stehen sie digital im Maßstab 1:5.000 (BFD5L) zur Verfügung (www.hlnug.de/themen/boden/information/bodenflaechenkataster-und-kartenwerke/bfd51). Im Gegensatz zur mittelmaßstäbigen BFD50 liefern die Daten der BFD5L höher aufgelöste und flurstücksbezogene Bodeninformationen für alle landwirtschaftlich genutzten Flächen unter Acker- bzw. Grünlandnutzung (HLNUG & LGB-RLP 2008). Im Ergebnis konnten über 1.000 Datensätze aus 408 Gemarkungen selektiert werden, die eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Moorböden anzeigen (Klassenzeichen „Mo“ der Bodenschätzung). Diese Daten wurden durch das HLNUG mit Daten der BFD50 (Böden mit Hoch- oder Niedermoortorfen und organischer Substanz > 30 Masse-%) verschneitten, um eine Kulisse potenzieller Moorbödenstandorte auszuweisen. Zur Auswertung wurden drei Kategorien von Suchräumen definiert, die jeweils unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für das tatsächliche Vorhandensein von Moorbödenflächen besitzen:

- **Kategorie 1:** Moorböden vorherrschend bis ausschließlich in den Suchräumen vermutet (Klassenzeichen „Mo“ der BFD5L und Böden mit Torfbildung der BFD50)
- **Kategorie 2:** Moorböden verbreitet in den Suchräumen vermutet (Klassenzeichen „Mo“ der BFD5L ohne Böden mit Torfbildung der BFD50)
- **Kategorie 3:** Moorböden selten bis gering verbreitet in den Suchräumen vermutet (Böden mit Torfbildung der BFD50 ohne Klassenzeichen „Mo“ der BFD5L)

Die hohe Qualität der Kategorien 1 und 2 als Suchräume ergibt sich durch die flächenscharfen Daten der BFD5L im Maßstab 1:5.000. Liegen dagegen nur Flächen aus der BFD50 vor (Kategorie 3), ist aufgrund des kleineren Maßstabs von einer allgemein geringeren Flächenschärfe auszugehen. Hier ist die Wahr-

scheinlichkeit höher, dass ebenso mineralische Böden in größeren Anteilen in den Suchräumen vorkommen können.

Im Ergebnis konnten insgesamt 6.275 ha potenzielle Moorbodenfläche für Hessen identifiziert werden (Tab. 3). Dabei fiel der größte Anteil mit 4.897 ha auf Flächen der unsichersten Kategorie 3. Von diesen werden etwa 75 % als Grünland bzw. Acker genutzt. Obwohl die BFD5L hier kein Klassenzeichen „Mo“ ausweist, wurden diese Flächen durch die Abgrenzung nach Landschaftsformen und die maßstabsbedingte „Überzeichnung“ in der BFD50 als Moorböden kartiert. Die restlichen 25 % der Flächen in dieser Kategorie entfallen auf potenzielle Moorbödenstandorte unter forstlicher Nutzung sowie auf Moorflächen, die nicht von der Bodenschätzung erfasst werden, wie etwa das o. g. Naturschutzgebiet „Pfungstädter Moor“.

In die Kategorie 1 mit der höchsten Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Moorböden fielen für ganz Hessen lediglich knapp 637 ha, also etwa 10 % der gesamten potenziellen Moorbodenflächen. Kategorie 2 umfasst die restlichen 741 ha und weist damit einen ähnlich geringen Flächenanteil wie Kategorie 1 auf.

Die Verteilung der Suchräume ist sehr heterogen über die gesamte Landesfläche verteilt. Die größten Anteile an potenziellen Moorbodenflächen befinden sich im Hessischen Ried in den Landkreisen Groß-Gerau (1.793 ha), Bergstraße (891 ha) und Darmstadt-Dieburg (837 ha). Ein weiterer Schwerpunkt befindet sich im Bereich der Mainaue und umfasst die Landkreise Offenbach (580 ha) und Main-Kinzig (495). Die größten Flächen der Kategorie 1 liegen in den Landkreisen Groß-Gerau (246 ha), Offenbach (114 ha) und Darmstadt-Dieburg (103 ha).

Tabelle 3: Flächenstatistik für die Verbreitung potenzieller Moorböden in Landkreisen und kreisfreien Städten in Hessen; Angaben in ha. Ergebnisse aus der Verschneidung von BFD50 und BFD5L, gegliedert nach drei Kategorien unterschiedlicher Wahrscheinlichkeiten für das tatsächliche Vorhandensein von Moorflächen (Daten aus HLNUG 2022)

Table 3: Area statistics for the distribution of potential peatlands in rural districts and independent cities in Hesse; information on areas in hectares. Results from the intersection of BFD50 and BFD5L, broken down into three categories of different probabilities for the actual presence of peatlands (data from HLNUG 2022)

Landkreise und kreisfreie Städte	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Gesamt
Bergstraße	35,26	26,47	829,75	891,49
Darmstadt-Dieburg	102,08	55,25	679,49	836,83
Fulda	1,90	32,41	100,40	134,72
Gießen	1,12	2,97	5,78	9,87
Groß-Gerau	245,65	104,62	1.442,09	1.792,36
Hersfeld-Rotenburg	0,42	15,65	8,68	24,76
Hochtaunus	1,23	9,45	6,31	17,00
Kassel	4,71	27,44	83,18	115,33
Kreisfreie Stadt Darmstadt	0,31	42,10	54,32	96,73

Tabelle 3: Fortsetzung
Table 3: continued

Landkreise und kreisfreie Städte	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Gesamt
Kreisfreie Stadt Frankfurt am Main	11,18	10,13	66,23	87,54
Kreisfreie Stadt Kassel	-	0,15	-	0,15
Kreisfreie Stadt Offenbach am Main	0,01	7,41	3,85	11,26
Lahn-Dill	0,50	4,31	6,84	11,66
Landeshauptstadt Wiesbaden	<0,01	0,47	3,83	4,30
Limburg-Weilburg	-	4,75	5,78	10,53
Main-Kinzig	18,63	45,73	430,96	495,32
Main-Taunus	0,43	2,33	2,98	5,74
Marburg-Biedenkopf	78,65	125,27	359,81	563,73
Odenwaldkreis	<0,01	1,30	16,94	18,24
Offenbach	114,28	41,66	424,25	580,18
Rheingau-Taunus	0,56	29,81	15,51	45,88
Schwalm-Eder	1,67	52,33	43,42	97,43
Vogelsberg	-	19,06	45,41	64,47
Waldeck-Frankenberg	17,21	68,00	109,01	194,22
Werra-Meißner	-	9,64	55,95	65,59
Wetterau	0,98	2,77	96,34	100,10
Fehlstellen	-	<0,01	0,01	0,01
Gesamt	636,78	741,49	4.897,14	6.275,41

Neben diesen Gebieten im südlichen Hessen bildet der Landkreis Marburg-Biedenkopf in Mittelhessen einen weiteren Schwerpunkt potenzieller Moorbodenflächen (564 ha) im Bereich des Amöneburger Beckens. Die höchsten Anteile der Kategorie 2 (126 ha) liegen ebenfalls dort. In dieser Landschaftseinheit des westhessischen Berg- und Senkenlandes befindet sich u. a. auch das überregional bekannte und als Naturschutzgebiet ausgewiesene „Schweinsberger Moor“ (Abb. 8). Es stellt das letzte naturnah erhaltene Niedermoor im nord- und mittelhessischen Raum dar und setzt sich aus teilweise mehrere Meter mächtigen Torfen zusammen (https://natureg.hessen.de/resources/recherche/Schutzgebiete/GI/NSB_ST/1534002.pdf).

Die geringsten Flächenanteile potenzieller Moorböden liegen – mit Ausnahme der kreisfreien Städte Kassel und Wiesbaden – in den Landkreisen Main-Taunus (6 ha), Gießen (10 ha) und Limburg-Weilburg (11 ha).

Im Anschluss an die o. g. Auswertung der Bodenflächendaten des HLNUG erfolgten stichprobenhafte Geländekartierungen an einigen potenziellen Moorbodenflächen, um einen Eindruck zu gewinnen, inwieweit die Flächeninformationen der BFD5L und der BFD50 für die ausgewählten Standorte zutreffen. Dazu wur-

den vier potenzielle Moorbodenstandorte der Kategorien 1 und 2 unter Grünlandnutzung ausgewählt und durch beauftragte Ingenieurbüros bodenkundlich kartiert (Tab. 4).

Tabelle 4: Übersicht der Untersuchungsgebiete und ihrer naturräumlichen Lage mit potenziellen Moorbodenflächen nach Bodenschätzung und im Gelände tatsächlich vorgefundene kartierte Moorbodenflächen unter landwirtschaftlicher Grünlandnutzung (Daten aus HLNUG 2022)

Table 4: Overview of the study areas within their natural location with potential peatland areas according to soil assessment and real mapped peatland areas actually found in the field under agricultural grassland use (data from HLNUG 2022)

Gebietsbezeichnung	Naturraum	Gebietsgröße	potenzielle Moorfläche nach Bodenschätzung	tatsächlich kartierte Moorbodenfläche*	Anteil an der potenziellen Moorbodenfläche
Fischborn	Unterer Vogelsberg	8,0 ha	5,0 ha	1,0 ha	20,0 %
Oberosphe	Burgwald	16,1 ha	5,4 ha	4,3 ha	79,6 %
Todenhausen	Burgwald	18,0 ha	4,8 ha	7,5 ha	156,3 %
Kirchhain	Amöneburger Becken	38,7 ha	27,0 ha	2,0 ha	7,4 %
	Gesamt	80,8 ha	42,2 ha	14,8 ha	35,1 %

* Moore und moorbegleitende Böden

Außerdem sollten die potenziellen Moorbodenstandorte auf ihre Eignung für klima- und naturschutzfachliche Entwicklungen untersucht werden, um daraus Vorschläge für eventuelle Maßnahmen abzuleiten.

Im Vorfeld wurde dazu ein spezielles Kartierverfahren für die Detailkartierung von Moorböden entwickelt. Folgende Informationen wurden dabei erhoben:

- ökologischer und hydrogenetischer Moortyp
- Flächengröße und Moormächtigkeit, Moorgrenzen
- Torf-/Substratarten mit Zersetzung-/Humositätsgraden und Horizontmächtigkeiten
- Merkmale zur (sekundären) Pedogenese und weitere Degradierungsmerkmale
- Eigenschaften unterlagernder Substrate
- Landnutzung und Vegetation
- hydrogeologische Situation, Wasserstände und Entwässerungstiefen
- Entwässerungswirksame Einrichtungen wie Gräben etc.
- Berechnung der Kohlenstoffvorräte und des durch Entwässerung gefährdeten Flächenanteils

Für die anschließenden Kartierungen wurden bodenkundliche Rastersondierungen eingebracht und Bodenprofile aufgegraben. Außerdem wurden Proben entnommen, um aus den Messwerten u. a. die jeweiligen Kohlenstoffvorräte berechnen zu können.

Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die im Gelände tatsächlich gefundenen Moorbodenflächen an drei von vier Standorten deutlich kleiner waren als die ursprünglich durch die Bodenschätzung ermittelten potenziellen Moorboden-

flächengrößen. Lediglich auf 35 % der potenziellen Moorflächen konnten Moore und moorbegleitende Böden gefunden werden (Tab. 4).

Besonders prägnant wird dies am Beispiel des Untersuchungsgebietes Kirchhain in einem Auenbereich innerhalb des Amöneburger Beckens (Abb. 9). Die laut BFD5L angegebene Fläche von 27 ha enthält aktuell nur 2 ha Moor- und moorbegleitende Böden (Abb. 10). Die restliche Fläche wird durch humose Auengleye gebildet.



Abbildung 8: Das Schweinsberger Moor im Amöneburger Becken; Foto: HLNUG.

Figure 8: The peatland „Schweinsberger Moor“ in the Amöneburg Basin; photo: HLNUG.

Einen Sonderfall bildet das Untersuchungsgebiet Todenhausen am südlichen Rand des Burgwaldes. Dort wurden größere Moorbödenanteile gefunden als ursprünglich durch die BFD5L kartiert. Es handelt sich dabei ausnahmslos um Flächen mit mineralischen Überdeckungen der Moorbödenhorizonte, die bereits vor etwa 200 Jahren zur Verbesserung der ackerbaulichen Nutzung aufgebracht wurden (Abb. 11). Aktuell findet extensive Grünlandnutzung statt.

Alle im Gelände gefundenen Moorböden wurden als „Erdniedermoore“ ange- sprochen, die durch Entwässerung pedogen stark veränderte Oberböden besitzen (s. Kap. 2.2) und im Profilaufbau durch häufigen Wechsel von Torfen und mineralischen Auensubstraten geprägt sind (Abb. 12).

Der einzige Bereich mit relativ naturnahen Moorböden konnte im Untersuchungsgebiet Fischborn im Unteren Vogelsberg kartiert werden. In diesem Hang-Quellmoorkomplex kam es in sehr kleinen Teilbereichen durch flurnahe Wasserstände und Überrieselung zu rezenter Torfbildung (Abb. 13).



Abbildung 9: Südwestlicher Bereich des Untersuchungsgebiets Kirchhain mit moortypischer Schilfvegetation (*Phragmites australis*) über entwässertem und vererdetem Niedermoor. Im Hintergrund ist die Ämoneburg zu sehen; Foto: HLNUG.

Figure 9: Southwestern part of the Kirchhain study area with typical peatland reed vegetation (*Phragmites australis*) over drained and earthified fen. The Ämoneburg Castle can be seen in the background; photo: HLNUG.



Abbildung 10: Kartierergebnisse für das Untersuchungsgebiet Kirchhain. Lediglich im südwestlichen Teil konnten „echte“ Moorböden nach bodenkundlicher Definition gefunden werden; Karte: HLNUG.

Figure 10: Mapping results for the Kirchhain study area. „True“ peat soils according to the pedological definition were found only in the southwestern part; map: HLNUG.



Abbildung 11: Bodenprofilgrube für die bodenkundliche Ansprache und die Beprobung eines ehemaligen Durchströmungs- und Auenüberflutungsmoores am Standort Todenhauen. Der etwa 35 cm mächtige mineralische Oberboden überdeckt die darunter anschließenden Torfe aus Braunmoosen, Schilf und Radizellen; Foto: HLNUG.

Figure 11: Soil profile pit for soil analysis and sampling of a former percolation and floodplain-mire at the Todenhauen site. The approximately 35 cm thick mineral topsoil covers the underlying peat consisting of brown mosses, reeds, and radicles; photo: HLNUG.



Abbildung 12: Profilbohrung mit der Moorklappsonde, beispielhaft für das Untersuchungsgebiet Oberrosphe. Die kartierten Moorböden waren meist gekennzeichnet von einem Wechsel aus organischen Torfen (dunkle Farbe) und mineralischen Auensubstraten (hellgraue Farbe); Foto: HLNUG.

Figure 12: Profile drilling with the peat core sampler, illustrating the Oberrosphe study area. The mapped peatland soils were mostly characterized by alternating layers of organic peat (dark color) and mineral floodplain substrates (light gray color); photo: HLNUG.



Abbildung 13: Naturnahe Moorbodenfläche mit flurnahen Wasserständen und rezenter Torfbildung durch Seggen- und Braunmoose in sehr kleinen Teilbereichen des Untersuchungsbereiches Fischborn; Foto: HLNUG.

Figure 13: Near-natural peatland area with near-surface water levels and recent peat formation by sedges and brown mosses in very small parts of the Fischborn study area; photo: HLNUG.

4.2 Moore unter forstwirtschaftlicher Nutzung

Neben der stichprobenhaften Bestandsaufnahme landwirtschaftlich genutzter Moorböden fand eine detaillierte Erfassung von Moorbodenstandorten unter forstlicher Nutzung im Projekt „Waldmoore in Hessen“ statt. Die Arbeiten wurden durch die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt im Zeitraum 2020–2022 durchgeführt und ebenfalls aus Mitteln des integrierten Klimaschutzplans finanziert (ALJES et al. 2024).

Im Gegensatz zu den Daten der Bodenschätzung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen existiert keine einheitliche großmaßstäbige und flurstücksbezogene Kulisse für Hessens Waldgebiete. Deshalb standen flächendeckend lediglich die Bodeninformationen der BFD50 zur Verfügung.

Um die Datenlage für Waldmoore trotzdem zu verbessern, wurden zusätzliche Informationen in Form von Literaturrecherchen, Altdaten, Biotopkartierungen und der forstlichen Standortkartierung verwendet. Außerdem erfolgten konkrete Abfragen bei den hessischen Forstämtern. Damit wurde eine Kulisse potenzieller Moorstandorte („Verdachtsflächen“) für verschiedene Waldmoorregionen Hessens erstellt. Die Kulisse enthält über 1.200 Verdachtsflächen für Waldmoore, die in drei Kategorien eingeteilt ist (V1: sicherer Hinweis, V2: Hinweis, V3: unsicherer Hinweis).

Im nächsten Schritt wurden 293 dieser Verdachtsflächen aufgesucht und feldbodenkundlich untersucht. Dabei konnten insgesamt 382 ha „vermoorte Flächen“

ausgewiesen werden, die zu 41 % (157 ha) aus „echten“ Mooren ab 30 cm Torfmächtigkeit und zu 59 % (225 ha) aus Anmoorgleyen oder Moorgleyen bestehen. Im Laufe der Kartierungen wurden mehr Moorflächen gefunden als zunächst angenommen.

Charakteristisch für die hessischen Waldmoore sind ihre relativ kleinen Flächen, die durchschnittlich nur etwa 1,5 ha je Moor umfassen (im Mittel 0,6 ha Moorböden und 0,9 ha weitere vermoorte Bereiche) und deshalb vielfach entweder gar nicht oder nur sehr überzeichnet in der BFD50 dargestellt werden. Typisch für die oft bergigen Wälder in Hessen sind die hydrogegenetischen Moortypen „Quellmoor“ und „Hangmoor“, wie z. B. im Kaufunger Wald, die oft miteinander vergesellschaftet sind (Abb. 14).

Quellmoore weisen Mächtigkeiten von bis zu 1,5 m, teilweise auch bis 3 m auf. Die weiter hangabwärts anschließenden, oft steilen Vermoorungen waren durchschnittlich bis zu 1 m mächtig. Die Verbreitung der Waldmoore in Hessen ist naturraumabhängig und deshalb auch ungleich auf die kartierten Moorregionen verteilt (Abb. 15).



Abbildung 14: Quell- und Hangmoorkomplexe, wie hier als wieder wachsender Moorbereich im Kaufunger Wald, sind die am weitesten verbreiteten Moore im Bergland; Foto: Philipp Küchler.
Figure 14: Spring and slope mires, such as the regrowing peatland area in the Kaufunger Forest, are the most widespread mire types in upland areas; photo: Philipp Küchler.

Der Verbreitungsschwerpunkt liegt in Sandsteingebieten und in Bereichen mit Ton-Sandstein-Wechsellsagen. Daneben können Moorbildungen auch auf eher kluftigen Basaltplateaus, die von abdichtenden periglazialen Sedimenten bedeckt sind, vorkommen.

In Tälern des Burgwalds und des Sandstein-Odenwalds konnten zusätzlich Durchströmungsmoore gefunden werden, welche auf den Hangmooren aufge-



Abbildung 15: Karte der Moorregionen innerhalb des Projektes „Waldmoore in Hessen“; Grafik: ALJES et al. (2024).

Figure 15: Mapped peatland regions within the project „Waldmoore in Hessen“ („Forest Moors in Hesse“); graphic: ALJES et al. (2024).

wachsen sind. Diese natürlich baumfreien Moore zeigen ein relativ starkes Moorwachstum mit guter Regenerationsfähigkeit.

Sowohl die Durchströmungsmoore als auch die Hangmoore im Bergland sind ökologisch fast ausnahmslos als saure und torfmoosgeprägte Moore beschrieben. An starken Quellschüttungen über Basalt können allerdings auch nährstoffreiche Quellmore auftreten. Im Bereich des Rothaargebirges dominieren dagegen anmoorige Quellsümpfe.

Innerhalb der Kategorie V1 wurden 91 % der untersuchten Flächen als vermoort ausgewiesen. In der Stufe V2 betrug der Anteil 67 %. Am geringsten war der Anteil vermoorter Flächen in Stufe V3 (35 %).

Die im Gelände gefundenen Anteile an den verschiedenen Kategorien wurden auf die restlichen Verdachtsflächen hochgerechnet. Demnach enthalten die Wälder in Hessen ca. 1.000 ha vermoorte Fläche, davon 432 ha „echte“ Moorböden (inkl. der hessischen Hochmoorflächen) sowie 618 ha Moorgleye bzw. An-/Abmoorgleye.

Um die Klimarelevanz der bewaldeten Moorstandorte abschätzen zu können, wurden zum einen die gespeicherten Kohlenstoffvorräte der kartierten Böden, zum anderen deren durch Entwässerung gefährdete und potenziell durch Torfmineralisation freisetzbare Anteile berechnet. Dazu wurde der „CARBSTORE“-Ansatz gewählt, der ein „Baukastensystem“ mit typischen Kohlenstoffspeicherungen bereitstellt (MÖLLER & HELLER 2009; KLINGENFUSS et al. 2015) und eine

individuelle Berechnung der Kohlenstoffvorräte für ein Moor ermöglicht, auch wenn dafür keine Laboranalysen vorliegen.

Ebenso wie bei der Ermittlung der gesamten Moorfläche wurden die ermittelten C-Speichermengen und deren gefährdete Anteile der im Gelände kartierten Flächen auf alle Waldmoorverdachtsflächen hochgerechnet. Demnach speichern die hessischen Waldmoore derzeit mindestens 300.000 t organischen Kohlenstoff, von denen aktuell etwa 200.000 t durch Entwässerung und Mineralisation gefährdet sind.

4.3 Kartierung von sauren Niedermooren im Offenland

Ein weiteres Projekt zur Erfassung und zum Schutz der Moore in Hessen ist das „Niedermoorprojekt“, das durch die NABU-Stiftung Hessisches Naturerbe zwi-

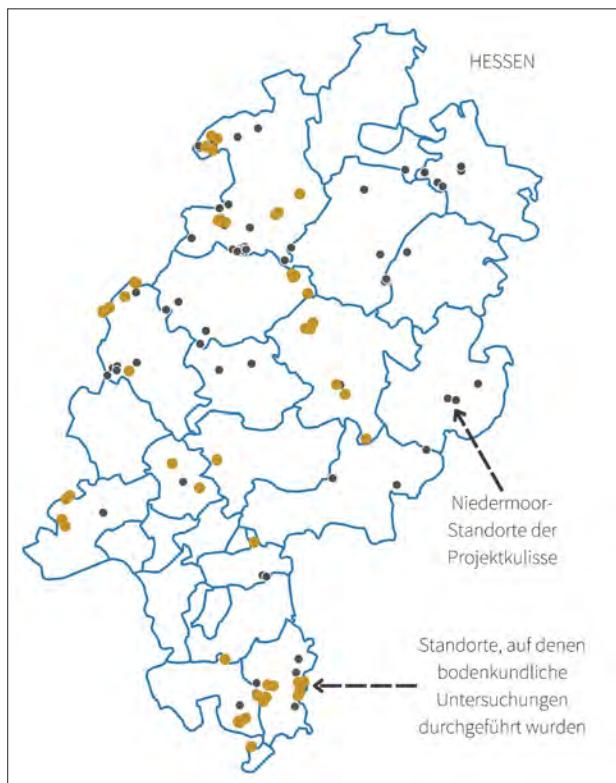


Abbildung 16: Projektkulisse des „Niedermoorprojektes“ mit Standorten saurer Niedermoore (Abbildung zur Verfügung gestellt von der NABU-Stiftung Hessisches Naturerbe).

Figure 16: Project map of the “Niedermoorprojekt” with locations of acidic fens (image provided by the NABU Hessian Nature Heritage Foundation).

schen 2020 und 2024 durchgeführt und durch den IKSP sowie die Hessische Biodiversitätsstrategie finanziert wurde (NABU 2024). Mit Hilfe vegetationskundlicher Vorarbeiten wurde eine Projektkulisse von insgesamt 168 Standorten auf über 100 ha ausgewiesen. Schwerpunkt der Kulisse lag auf dem naturschutzfachlich wertvollen und seltenem Biotoptyp „Kleinseggensümpfe saurer Standorte“.

Um diese Moorkulisse auch bodenkundlich bewerten zu können und dabei die im Boden gespeicherte Kohlenstoffmenge zu berechnen, wurden 52 ausgewählte Flächen im Zeitraum 2020 bis 2023 von einem beauftragten Ingenieurbüro untersucht. Dazu wurden auch Bodenproben entnommen und laboranalytisch untersucht (Abb. 16).

Im Ergebnis enthielten 41 der 52 Standorte Böden mit Torf auf einer Gesamtfläche von 19 ha. Darin sind rechnerisch über 3.000 Tonnen Kohlenstoff gespeichert. Etwa 50 % dieses gespeicherten Kohlenstoffs war durch Entwässerung gefährdet.

Durch nachfolgende Renaturierungsmaßnahmen innerhalb des Projektes, verbunden mit dem Aufkauf und der Pflege zahlreicher Flächen, konnte etwa ein Drittel des gefährdeten Kohlenstoffpools gesichert und die ursprüngliche Moorvegetation vielfach wieder etabliert werden (Abb. 17).



Abbildung 17: Das 1,8 ha große Niedermoor „Im Atzenrod“ (Gemeinde Lautertal (Odenwald) mit Vegetationsaspekten von Rohrkolben, Schlanksegge und Waldsimse ist Teil des „Niedermoorprojektes“ der Stiftung Hessisches Naturerbe; Foto: Ingenieurbüro Meier & Weise.

Figure 17: The 1.8 ha fen “Im Atzenrod” (municipality of Lautertal (Odenwald) with vegetation aspects of cattail, slender-tuffed-sedge and wood club-rush is part of the “lowland moor project” of the Hessian Natural Heritage Foundation; photo: Engineering office Meier & Weise.

5 Fazit

- Hessen ist eines der moorärmsten Bundesländer. Angaben zur Verbreitung und zum Zustand der Moorböden sind mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Die BFD50 kann dabei lediglich als allgemeine Übersichtskarte dienen, da sie kleinere Moorflächen nicht darstellen kann oder stark überzeichnet.
- Aktuelle Datenauswertungen und Detailkartierungen zeigen, dass der Anteil an Moorböden unter landwirtschaftlicher Nutzung noch weitaus geringer zu sein scheint als ursprünglich angenommen. Im Gegensatz dazu konnten zahlreiche kleine Moorbödenflächen unter forstlicher Nutzung gefunden werden, die bisher noch nicht kartiert waren.
- Der Großteil der hessischen Moorböden ist entwässert. Damit verbunden ist ein erheblicher Verlust ihrer ursprünglichen Steuerungs-, Lebensraum- und Archivfunktionen.
- Außerdem emittieren entwässerte Moore Treibhausgase und setzen große Mengen gespeicherter Nährstoffe frei.
- Ziel des MoorbödenSchutzes ist deshalb die Sicherung der Bodenfunktionen naturnaher Moore oder deren Wiederherstellung durch Renaturierungsmaßnahmen in entwässerten Mooren.
- Im nationalen Vergleich mit anderen Bundesländern spielen Treibhausgasemissionen aus hessischen Moorböden zwar eine eher geringe Rolle. Dennoch speichern hessische Moore trotz ihrer kleinen Flächen beachtliche Mengen an Kohlenstoff und der Klimaschutzaspekt muss bei Renaturierungsmaßnahmen ebenso berücksichtigt werden.
- Gerade aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Flächenanteile stellen Moorböden in Hessen sehr seltene und auch im Hinblick auf ihre Lebensraum- und Archivfunktionen besonders schützenswerte Böden dar.

6 Literatur

- AG Boden – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung; 5. Aufl. – 438 S.; Hannover.
- AG Boden – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (2024): Bodenkundliche Kartieranleitung, 6. Aufl. – Band 2: Geländeaufnahme und Systematik. – 354 S.; Hannover.
- ALJES, M., KÜCHLER, P. & SCHMIDT, M. (2024): Waldmoore in Hessen – Erfassung, Zustandsanalyse und Maßnahmenvorschläge – Abschlussbericht. – 50 S.; Hann. Münden (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.)).
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.) (2022): Nationale Moorschutzstrategie – Kabinettsbeschluss vom 9. November 2022. – 76 S.; Berlin.

- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2023): Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz. – 88 S.; Berlin.
- BAUEROCHSE, A. & METZLER, A. (2015): Moore als Archive der Natur- und Kulturgeschichte – das Arbeitsgebiet der Moorarchäologie. – TELMA-Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde, Beiheft, 5: 93-112.
- CONSTANTIN, G.L., GEHRT, E. & ZEITZ, J. (2022): Das WIKIMooS-Feldbuch zur Horizontansprache in Moorböden, 1. Aufl. – 174 S.; Berlin (Humboldt-Universität zu Berlin (Hrsg.)).
- DAMBECK, R. (2005): Beiträge zur spät- und postglazialen Fluss- und Landschaftsgeschichte im nördlichen Oberrheingraben. – PhD-Thesis., Fachbereich Geowiss./Geographie Universität Frankfurt/M. – 246 S.; Frankfurt am Main.
- EDOM, F. (2001): Moorlandschaften aus hydrologischer Sicht. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. Aufl. – 185-228; Stuttgart (Schweizerbart).
- FORST, R., PORZELT, M. & SCHERFSE, V. (Hrsg.) (2019): Konflikte durch Erholungsnutzung in Großschutzgebieten und deren Entschärfung durch innovatives Besuchermanagement. – BfN-Schriften, 520: 183 S.; Bonn (Bundesamt für Naturschutz).
- GAUHL, F. (1996): Die Entwicklung des Roten Moores in der Rhön. – TELMA, 26: 15-26, Hanover.
- NABU (2024): NABU-Stiftung Hessisches Naturerbe. Niedermoor-News; <https://hessen.nabu.de>
- HLNUG & LGB-RLP- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie & Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2008): Großmaßstäbige Bodeninformationen für Hessen und Rheinland-Pfalz – Auswertung von Bodenschätzungsdaten zur Ableitung von Bodenfunktionen und -eigenschaften. – 65 S.; Wiesbaden.
- HLNUG – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2022): Detailkartierungen landwirtschaftlich genutzter Moorböden in Hessen – Verbesserung der Datengrundlage zur Identifikation potenzieller Maßnahmenräume. – Boden und Altlasten – Nachrichten aus Hessen, Ausgabe 2022: 7-14; Wiesbaden.
- HMUKLV – Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2017): Integrierter Klimaschutzplan Hessen 2025. – 65 S.; Wiesbaden.
- HOLDEN, J. (2005): Peatland hydrology and carbon release: why small-scale process matters. – Philos. T. Roy. Soc. A., 363: 2891-2913; London.
- JOOSTEN, H. & SUCCOW, M., (2001): Hydrogenetische Moortypen. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde (2. Aufl.). – 234-239; Stuttgart (Schweizerbart).
- JOOSTEN H. & CLARKE D. (2002): Wise use of mires and peatlands: background and principles including a framework for decision-making. – 304 S.; Greifswald/Jyväskylä International Mire Conservation Group / International Peat Society).
- KLINGENFUSS, C., MÖLLER, D., HELLER, C., THRUM, T., KÖBERICH, K. & ZEITZ, J. (2015): Berliner Moorböden im Klimawandel – Entwicklung einer Anpassungsstrategie zur Sicherung ihrer Ökosystemleistungen. – UEPPII-Forschungsprojekt, Abschlussbericht. – 184 S.; Berlin; <https://www.berliner-moorboeden.hu-berlin.de/downloads/Abschlussbericht-Berliner-Moorboeden-UEPPII-HU-Berlin-2015.pdf>
- LABO – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (Hrsg.) (2011): Archivböden – Empfehlungen zur Bewertung und zum Schutz von Böden mit besonderer Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte. – 160 S.; Berlin.
- LABO – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (Hrsg.) (2017): Bedeutung und Schutz von Moorböden – Hintergrundpapier. – 6 S.; Berlin.
- LIMPENS, J., BERENDSE, F., BLODAU, C., CANADELL, J.G., FREEMAN C., HOLDEN, J., ROULET, N., RYDIN, H. & SCHAEPMAN-STRUB, G. (2008): Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis. – Biogeosciences, 5: 1475-1491.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005): Ecosystems and Human Well-Being: Current State & Trends. – 140 S.; Washington, DC (Island Press).

- MÖLLER, D. & HELLER, C. (2009): CARBSTORE – ein Verfahren zur Quantifizierung und Bewertung der C-Speicher und des C-Freisetzungspotentials von organischen Böden (Endbericht). – 100 S.; Berlin (Humboldt-Universität zu Berlin).
- REIMANN, S., GROSSE-BRAUCKMANN, G., BOHN, U. & MÜLLER, F. (1997): Naturschutzgebiet Rotes Moor im Biosphärenreservat Rhön. – 53 S.; Wiesbaden (Stiftung Hessischer Naturschutz (Hrsg.)).
- SCHOPP-GUTH, A. (1999): Renaturierung von Moorlandschaften. – Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz, 57: 219 S.; Bonn-Bad Godesberg (Bundesamt für Naturschutz).
- SCHOPP-GUTH, A. & GUTH, C. (2003): Moorrenaturierung – Grundlagen und Anforderungen. – In: Bayer. Akad. f. Naturschutz u. Landschaftspflege (Hrsg.): Moorrenaturierung – Praxis und Erfolgskontrolle. – Laufener Seminarbeiträge, 1/03: 7-22; Laufen/Salzach.
- STEGMANN, H. & ZEITZ, J. (2001): Bodenbildende Prozesse entwässerter Moore. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. Aufl. – 47-57; Stuttgart (Schweizerbart).
- SUCCOW, M. (2001): Ökologisch(-phytozoenologische) Moortypen. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. Aufl. – 229-234; Stuttgart (Schweizerbart).
- SUCCOW, M. & JESCHKE, L. (2024): Deutschlands Moore – Ihr Schicksal in unserer Kulturlandschaft. – 544 S.; Rangsdorf (Natur + Text).
- TETZLAFF, B., HOLSTEN, B. & TREPEL M. (2015): Bedeutung der Moore für den Gewässerschutz. – Telma Beiheft, 5: 113-132.
- TOUSSAINT, B., PAPE VON, W.-P., PÖSCHL, W., VOGEL, P. & KLUPP, W. (2006): Grundwasserförderung und Umweltprobleme im Hessischen Ried. – Exkursionsh. nass. Ver. Naturkde., 43: 13 S.; Wiesbaden.
- WITTNEBEL, M., FRANK, S. & TIEMEYER, B. (2023): Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland. – Thünen Working Paper, 212: 69 S.; Braunschweig.
- ZEITZ, J. & STEGMANN, H. (2001): Moorbodenhorizonte und Typen. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. Aufl. – 69-74; Stuttgart (Schweizerbart).

DR. CHRISTIAN HELLER
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
Tel.: 0611 6939-366
E-Mail: christian.heller@hlnug.hessen.de

Manuskripteingang: 12. September 2025

Einsatz von numerischen Modellen in der Schweiz zwecks Nutzung der Grundwasserwärme

ROLAND TOUSSAINT

Schweiz, Klimawandel, geothermisches Potential, Grundwasser, numerische Modellierung

Kurzfassung: Die Schweiz ist als Alpenland von den Folgen des Klimawandels stärker betroffen als benachbarte Länder. Es sind nicht nur die für die Tourismusbranche und die Wasserkirtschaft bedeutsamen Gletscher, die dramatisch schmelzen, sondern auch die wegen der Erwärmung des Permafrostes beängstigend zunehmenden Naturkatastrophen wie u. a. Bergstürze und Murgänge, die die Infrastruktur schädigen und Menschenleben fordern. Daher ist die Schweiz mittlerweile weltweit Vorreiter, die dafür verantwortlichen klimaschädlichen, aus der Verbrennung fossiler Energieträger resultierenden Emissionen drastisch zu reduzieren. Um spätestens im Jahr 2050 das herausfordernde sog. Null-Netto-Ziel zu erreichen, werden geothermische Technologien gefördert. Gemeint ist die Gewinnung von Erdwärme als klimafreundliche Energiequelle und zusehends auch die Nutzung der Wärme des Grundwassers. Der Einsatz der sog. Wasser-Wasser-Wärmepumpen dient gleichzeitig auch dem Grundwasserschutz, da das in urbanen Gebieten vielfach zu warm gewordene Grundwasser auf Normaltemperatur gebracht wird.

Das geologisch definierte Baarer Becken im Kanton Zug ist wegen seiner hydrogeologisch günstigen Verhältnisse eines der Zentren für die energetische Nutzung des Grundwassers. Daher ist mittlerweile die Gefahr einer thermischen Übernutzung durch den Betrieb zu vieler Wärmepumpen nicht auszuschließen, insbesondere eine gegenseitige hydraulische und thermische Beeinflussung dieser Anlagen, die somit nicht effektiv genug betrieben werden. Um dies und auch die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zu überprüfen, bietet sich der Einsatz von numerischen Grundwassерmodellen an. Der Verfasser, der als Hydrogeologe langjähriger Mitarbeiter eines renommierten Schweizer Geologiebüros ist, stellt in seinem Beitrag an einem typischen Beispiel aus seiner Berufspraxis das methodische Vorgehen beim Einsatz des auf Finiten Elementen beruhenden 3D-Modells FEFLOW vor und kommentiert die Rechenergebnisse.

Use of numerical models in Switzerland for the purpose of utilizing groundwater heat

Switzerland, climate change, geothermal potential, groundwater, numerical modeling

Abstract: As an Alpine country, Switzerland is more severely affected by the consequences of climate change than its neighbors. It is not only the glaciers, which are important for the tourism industry and water management, that are melting dramatically, but also the alarming increase in natural disasters such as rockfalls and mudslides due to the warming of the permafrost, which damage infrastructure and claim human lives. Switzerland is therefore now a global pioneer in drastically reducing the climate-damaging emissions resulting from the burning of fossil fuels. Geothermal technologies are being promoted in order to achieve the challenging net-zero target by 2050 at the latest. This refers to the extraction of geothermal energy as a climate-friendly energy source and, increasingly, the use of groundwater heat. The use of the so-called water-to-water heat pumps also serves to protect groundwater, as the groundwater, which often becomes too warm in urban areas, is brought to normal temperature.

The geologically defined Baar Basin in the Canton of Zug is one of the centers for the energetic use of groundwater due to its favorable hydrogeological conditions. Therefore, the risk of undesirable developments due to the operation of too many heat pumps cannot be ruled out, in particular mutual hydraulic and thermal interference between these systems, which would prevent them from operating effectively. Numerical groundwater models are a suitable tool to verify this and also to ensure compliance with legal requirements. The author, a hydrogeologist who works since many years at a renowned Swiss geology firm, uses a typical example from his professional experience to present the methodological approach for using the FEFLOW 3D model based on finite elements and comments the calculation results.

Inhaltsverzeichnis

1	Der Klimawandel in der Schweiz beschleunigt die Nutzung des geothermischen Potentials des Grundwassers	118
2	Energiequelle Grundwasser	121
3	Warum wird das Grundwasser speziell in Ballungsräumen immer wärmer?	124
4	Modellierung der Wärmeausbreitung in einem Porengrundwasserleiter, dargestellt an einem Fall aus der Praxis	126
4.1	Hydraulisches Grundwassерmodell	129
4.2	Thermisches Grundwassерmodell	136
4.2.1	Modellszenario 1: Nutzung mit konzessionierten Leistungen	139
4.2.2	Modellszenario 2: Nutzung basierend auf realistischen Leistungen	141
5	Diskussion	142
6	Dank	143
7	Literatur	144

1 Der Klimawandel in der Schweiz beschleunigt die Nutzung des geothermischen Potentials des Grundwassers

Die Schweiz ist als Alpenland vom Klimawandel besonders stark betroffen. Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist seit Messbeginn bereits um 2,5 °C angestiegen, das ist doppelt so viel wie der globale Durchschnitt (Huss 2025). Und die Folgen sind bereits heute spürbar: der Niederschlag fällt häufiger als Regen (oftmals als Starkregen, die z. T. Hochwässer mit hohem Zerstörungspotential auslösen) statt als Schnee, Hitzewellen und Dürreperioden treten immer öfter auf.

Besonders betroffen und somit besonders ins Auge fallend ist die Gletscherschmelze. Betrug das Volumen des Gletschereises in der Schweiz im Jahr 2000 noch 74,9 km³, ging es bis 2024 auf 46,5 km³ zurück, also ein Verlust von 38 %. Allein in den sonnenreichen Jahren 2022 und 2023 ging das Eisvolumen zusammengekommen um 10 % zurück (Huss 2025). Die Entwicklung der Gletscher in Zeit und Raum bestimmt das Landschaftsbild von Gebirgsregionen wie der Schweiz. Gletscher werden oft als Sinnbild für eine intakte Bergwelt wahrgenommen;

werden sie immer kümmerlicher, fallen sie ebenso wie Naturschnee als wichtige Ressource für die Tourismusbranche weitestgehend weg. Da die Gletscher den Wasserkreislauf regulieren („Wasserschloss Schweiz“), kann ihr Wegschmelzen wie in anderen Gebirgsländern auch in der Schweiz in absehbarer Zeit zu einer empfindlichen Wasserknappheit führen (LANZ 2021).

Auch der Permafrost, der in der Schweiz auf 3 bis 6 % der Landesfläche vorkommt, schmilzt sehr (NÖTZLI, PETER, NÄHLEN et al. 2025). Immerhin ist die Nullgradgrenze seit Beginn der Wetteraufzeichnungen vor über 150 Jahren um 200 bis 700 m angestiegen, speziell seit 1961 um 300 bis 400 m (MeteoSchweiz o. J.). Bei Messungen in den Europäischen Alpen im Zeitraum 2013–2022 wurde festgestellt, dass der Permafrost in 10 m Tiefe im Mittel um 0,6 °C wärmer geworden ist (NÖTZLI, PETER, NÄHLEN et al. 2025). Das hat Folgen, nämlich erhöhtes Risiko für Naturkatastrophen (u. a. Hangrutsche, Murgänge, Steinschläge und Bergstürze) und somit Schäden an der Infrastruktur wie Straßen, Bahnlinien oder Gebäuden bis hin zum Verlust von Menschenleben, Veränderung der Landschaft, Freisetzen von Treibhausgasen und Beeinträchtigung von Ökosystemen.

Die Schweiz hat somit ein ureigenes Interesse daran, sich stark für den Schutz des Klimas zu engagieren. Es erstaunt nicht, dass sie weltweit Vorreiter für die Reduzierung der Emissionen klimaschädlicher Gase wie insbesondere Kohlendioxid (CO_2) ist (Bundesrat 2025). Das Alpenland legte mit dem am 1. Januar 2025 in Kraft getretenen Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit, auch bekannt als Klimagesetz KIG, und der zeitgleich veröffentlichten entsprechenden Verordnung zu diesem Bundesgesetz (Schweizer Eidgenossenschaft 2022 b, 2024) die Klimaziele bis 2050 fest. Es soll den Übergang zu erneuerbaren Energien beschleunigen und die Energiesicherheit stärken. Dieses Gesetz bezweckt im Einklang mit dem Pariser Klimaübereinkommen vom 12. Dezember 2015 die Festlegung folgender Ziele:

- Verminderung der Treibhausgasemissionen und Anwendung von Negativemissionstechnologien,
- Anpassung an und Schutz vor den Auswirkungen des Klimawandels,
- Ausrichtung der Finanzmittelflüsse auf eine emissionsarme und gegenüber dem Klimawandel widerstandsfähige Entwicklung.

Die Ziele des Klimagesetzes sollen in erster Linie über das revidierte CO_2 -Gesetz umgesetzt werden, das ebenfalls am 1. Januar 2025 in Kraft trat und durch die am 2. April veröffentlichte CO_2 -Verordnung konkretisiert wird.

Den rechtlichen und administrativen Rahmen für diese Klimaziele gibt die Eidgenossenschaft vor, die praktische Umsetzung vor Ort wird kantonal geregelt.

Besonders herausfordernd ist das Ziel, die Schweiz bis zum Jahr 2050 im Hinblick auf das Klimagas CO_2 emissionsfrei zu machen. Um dieses sog. Netto-Null-Ziel zu erreichen, müssen insbesondere die im Gebäudebereich, im Verkehr und in der Industrie bei der Erzeugung von Wärme und Strom durch Verbrennung von Erdgas, Erdöl, Braun- und Steinkohle anfallenden Emissionen signifikant re-

duziert werden. Dafür stehen schon länger intelligente und erprobte Technologien zur Verfügung wie vor allem die Nutzung des geothermischen Potentials des Bodens („Erde“) und des Grundwassers mittels Wärmepumpen. Das geothermische Potential steht im Gegensatz zur Wind- oder Sonnenenergie permanent zur Verfügung. Dagegen ist der Aufwand für das Abfangen von klimaschädlichen Gasen direkt am Ort ihrer Entstehung (z. B. am Schornstein) sehr hoch und im Hinblick auf ihre Entfernung aus der Atmosphäre mit ggf. Speicherung im Untergrund liegen noch nicht ausreichend praxistaugliche Erfahrungen vor. Das Schweizer Klimagesetz sieht finanzielle Unterstützung für den Umstieg auf klimafreundliche Heizungen, energieeffiziente Gebäude und innovative Technologien für die Nutzung des geothermischen Potentials bis zum Jahr 2030 vor. Und kostensparend wirkt sich sicherlich aus, wenn die thermische Nutzung des Grundwassers (und auch der Erdwärme) möglichst frühzeitig in die kommunale Wärmeplanung integriert wird (BÖTTCHER, HALILOVIC, GÜNTHER et al. 2025).

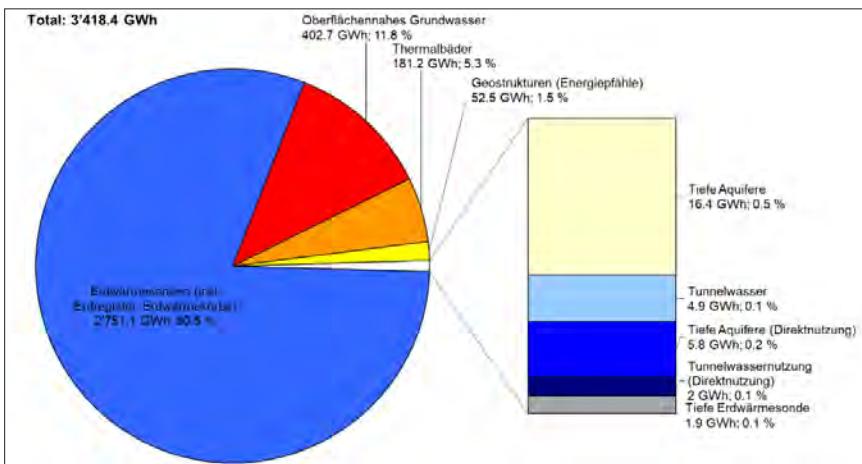


Abbildung 1: Diagramm mit Anteilen der geothermischen (erneuerbaren) Energie aller geothermischen Systeme in der Schweiz im Jahr 2023 (aus LINK 2024).

Figure 1: Diagram with shares of geothermal (renewable) energy of all geothermal systems in Switzerland in 2023 (from LINK 2024).

Die Gewinnung geothermischer Energie beträgt jetzt schon 3.418,4 GWh und basiert hauptsächlich auf dem Beitrag der Erd-Wärmesonden (2.751,6 GWh, 80,5 % aller geothermischen Systeme), an zweiter Stelle fungiert das oberflächennahe Grundwasser als Wärmequelle (402,7 GWh, 11,8 %), im Jahr 2023 waren 402 Wärmepumpen auf Grundwasserbasis (auch Wasser-Wasser-Wärmepumpe genannt) in Betrieb (LINK 2024). Auch das Wärmepotential tieferer Grundwasservorkommen wird genutzt (16,4 GWh, 0,5 %). Einen Überblick über die im Jahr 2023 genutzte geothermische Energie vermittelt das Diagramm in Abbildung 1.

Das an das Grundwasser gebundene Wärmepotential soll in Zukunft stärker genutzt werden, weil es einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiewende leistet. Ausgehend von einem mehr als 10 km^3 großen Grundwasservolumen in den wichtigsten Grundwasserleitern der Schweiz (Abb. 2), die SINREICH et al. (2012) errechnet haben, wurden im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie von der Firma Geotest AG in einer Studie das Wärmenutzungspotential speziell des Porengrundwassers auf 17 TWh geschätzt (BADOUX, HUBER & HÄNSLI 2024), allerdings unter der Voraussetzung, dass weder thermischer Ausgleich stattfindet, noch sich das Grundwasser regeneriert. Auf diesem Ergebnis beruht das politische Ziel, bis 2050 die Gewinnung geothermischer Energie von derzeit (2023) 4,7 TWh (5 %) auf diese Größenordnung, d. h. um 25 % zu steigern.

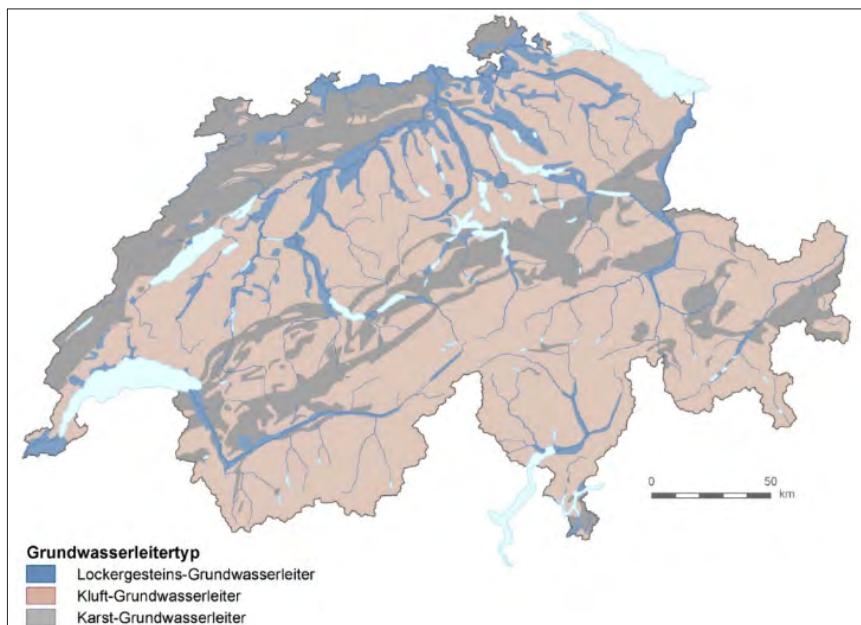


Abbildung 2: Grundwasserleitertypen in der Schweiz (nach BADOUX, HUBER & HÄNSLI 2024).
Figure 2: Aquifer types in Switzerland (from BADOUX, HUBER & HÄNSLI 2024).

2 Energiequelle Grundwasser

Anders als die Gewinnung von Wärme aus der Luft oder aus dem Erdreich mittels Wärmepumpen ist der Einsatz einer auf dem gleichen technischen Prinzip funktionierenden Wärmepumpe auf Grundwasserbasis (Abb. 3; co2online 2023; GebäudeKlima Schweiz 2014) wegen der über das Jahr immer zur Verfügung stehenden

Temperatur des Grundwassers als Wärmequelle mit in der Regel mehr als 10 °C wesentlich effektiver. Der Grund ist, dass die Differenz zwischen der Grundwassertemperatur und angestrebten niedrigen Vorlauf-/Heiztemperaturen viel geringer ist als bei der Luft- oder Erd-Wärmepumpe. Allerdings ist diese Technologie, die die Heizung im Winter oder ggf. auch für die Kühlung im Sommer eingesetzt werden kann, wesentlich teurer, die Kantone federn durch finanzielle Beihilfen bis zu 70 % die im oberen vierstelligen bis unteren fünfstelligen Bereich liegenden Anschaffungskosten ab.



Abbildung 3: Prinzip einer Wärmepumpe mit geschlossenem Kreislauf auf Grundwasserbasis; Quelle: co2online.

Figure 3: Principle of a closed-loop heat pump based on groundwater; source: co2online.

Für die hohen Kosten verantwortlich ist der vorlaufende große Aufwand insbesondere für die Abteufung von zwei Bohrungen und deren Ausbau zu einem Förderbrunnen und einem Brunnen für die Rückleitung des genutzten Wassers in den Grundwasserleiter, hohe Stromkosten für den Pumpbetrieb sowie die Erstellung eines hydrogeologischen Gutachtens durch ein qualifiziertes Büro. Die Expertise des Geologen wird benötigt zur Beantwortung der Frage, ob der Einsatz einer Grundwasserwärmepumpe vor Ort möglich ist oder nicht. Das betrifft zunächst die Abschätzung der Ergiebigkeit des genutzten Grundwasservorkommens. Liegt beispielsweise die zu heizende Immobilie im Alpenvorland mit einer jährlichen Durchschnittstemperatur der Luft von 9–10 °C und handelt es sich um ein freistehendes Einfamilienhaus ohne Dach- und Wanddämmung, aber mit Isolierverglasung der Fenster, geht man bezogen auf 120 m² Wohnfläche von einer Heizlast von etwa 8 kW aus, eine Wasserpumpe benötigt dafür eine Wassermenge von etwa 2 m³/h. Im gebirgigen und somit kälteren Teil der Schweiz wird eher von

einer Heizlast von 9 oder sogar 10 kW ausgegangen, um die benötigte Temperatur in Innenräumen zu erreichen und zu halten, dafür ist eine Wassermenge von ca. 2,5 m³/h erforderlich (Solarwatt o. J.). Der Schweizerische Verband für Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (GebäudeKlima Schweiz 2014) stellt über seine Spezialisten vor Ort Unterlagen zur Verfügung, die Architekten und Bauherren Hilfestellung geben. Mit weniger Grundwasser als Wärmequelle und somit auch geringeren Stromkosten für die Wärmepumpe selbst und die Pumpe im Förderbrunnen kommt man aus, wenn die Grundwassertemperatur möglichst hoch und die Vorlauftemperaturen möglichst gering sind. Geringe Vorlauftemperaturen von etwa 30 bis 40 °C sind typisch für moderne Flächenheizungen im Fußboden oder an der Wand in Kombination mit einer guten Dämmung des Gebäudes, welche die gesetzlichen Anforderungen erfüllt.

Was Positionierung der beiden Brunnen auf einem Grundwasserfließpfad und ihren Abstand voneinander angeht, benutzt der Geologe mittlerweile immer häufiger ein numerisches Wärmetransportmodell, um hydraulische oder thermische Kurzschlüsse mit größerer Sicherheit ausschließen zu können. Im Übrigen müssen Planung und Bau der betreffenden Anlage an einem konkreten Standort den Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA), beispielsweise der Norm SIA 384/7 (SIA 2015), sowie kantonalen Richtlinien (EnergieSchweiz (2017) entsprechen, z. B. des Kantons Zug (o. J.).

Darüber hinaus sind auch Behördengänge einzukalkulieren, da das Grundwasser, das in der Schweiz rund 80 % des Trinkwasserbedarfs deckt, flächendeckend geschützt und die Grundwasservorkommen in ihrer Gesamtheit zu erhalten sind (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft 2004; BiG 2025; Schweiz. Eidgenossenschaft 1955, 1991, 1998, 2021, 2022 a). Und jede Grundwasserentnahme ist in der Sprache der Juristen eine Nutzung, die konzessionspflichtig ist. Außerdem müssen Planer von Grundwasser-Wärmepumpen akzeptieren, dass deren Betrieb in Trinkwasserschutzgebieten sowie in Thermalwasserschutzgebieten nicht genehmigungsfähig ist. Darüber hinaus bestehen weitere Gründe, welche die Machbarkeit einer geplanten Nutzung einschränken, hierunter zählen Altlasten oder andere Schadstoffquellen im Nahbereich sowie die unzulässige Beeinflussung von schon bestehenden thermischen Grundwassernutzungen.

Die Nutzung des Grundwassers als Wärmequelle leistet aber nicht nur einen bedeutenden Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiewende, weil auf fossile Brennstoffe mit ihren klimaschädlichen Emissionen verzichtet werden kann, sondern weil auch auf intelligente Weise Klima- und Grundwasserschutz miteinander kombiniert werden können. Durch die Rückleitung des nach dem Wärmeentzug kühler gewordenen Grundwassers wird nämlich das im Bereich von Städten und Gewerbe-/Industriegebieten anthropogen beeinflusste Grundwasser (s. Kap. 3 und Abb. 3) abgekühlt, was u. a. der Grundwasserfauna (BECHER, ENGLISCH, GRIEBLER et al. 2020) zugutekommt. Allerdings darf gemäß Eidg. Gewässerschutzverordnung GSchV vom 28.10.1998 (1998, Anhang 2, Ziffer 21)

die „Temperatur des Grundwassers durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand um höchstens 3 °C verändert werden; vorbehalten sind örtlich eng begrenzte Temperaturveränderungen“. Die Wegleitung Grundwasserschutz des BAFU (2004) gibt vor, dass diese Bedingung der GSchV in 100 m Entfernung vom Rückleitebrunnen erfüllt sein muss, nicht aber in dessen unmittelbarer Umgebung.

3 Warum wird das Grundwasser speziell in Ballungsräumen immer wärmer?

Von Natur aus bestimmt die mittlere Jahrestemperatur der Luft in etwa die mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche. MeteoSchweiz gibt die Schweizer Durchschnittstemperatur der Periode 1991–2020 mit 5,8 °C an, für das Mittelland mit 9–10 °C (Akademie der Naturwissenschaften Schweiz 2021). Die Temperaturen sind im Zuge des Klimawandels seit den späten 1980er-Jahren sprunghaft gestiegen, man geht von etwa 2 °C aus (FIGURA, LIVINGSTONE, HOEHN et al. 2013). Der Wärmeaustausch von der Erdoberfläche in den Grundwasserleiter und der Prozess der Temperaturausbreitung im ungesättigten Sickerraum und anschließend im gesättigten Grundwasserraum hängt von vielen Faktoren ab, die in diesem Beitrag nicht näher beleuchtet werden können. Pauschal kann gesagt werden, dass in einer Tiefe von etwa 10–15 m ein Jahrestemperaturgang in der Regel nicht mehr feststellbar ist. Ab dieser indifferenten Zone mit einer über eine längere Strecke konstanten Temperatur von 10 bis 12 °C selbst an sehr kalten Wintertagen steigt die Temperatur mit wachsender Tiefe um etwa 3 °C/100 m an, wobei dieser Richtwert in Abhängigkeit von der Dichte des aus dem Erdinnern kommenden geothermischen Wärmestroms (bei der Erdentstehung freigewordene Energie und Zerfall radioaktiver Isotope), der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins sowie durch Vertikalströmung und Dispersion örtlich deutlich über- oder unterschritten werden kann.

Es ist seit langem bekannt, dass es in Städten wärmer ist als auf dem Land. Seit Ende der 1970er-/Anfang der 1980er-Jahre ist von Wissenschaftlern festgestellt worden, dass das nicht nur an oder oberhalb der Erdoberfläche der Fall ist, sondern auch das Grundwasser unter den Städten betrifft (HÖTZL & MAKURAT 1981; MENBERG, K., BAYER, P., ZOSSEDER, K. et al. 2013; HENNING & LIMBERG 2012). Messungen ergaben, dass die Temperaturen im Bereich dieser „urbanen Wärmeinseln“ im Untergrund im Mittel etwa 5 °C höher sind als im land- oder forstwirtschaftlich genutzten Umland, unter Industrieflächen noch beträchtlich mehr. Unterirdische Wärmeinseln unter Städten können eine Gefahr für Gebäude sein (JOHNER 2023). In Berlin wurde festgestellt, dass sich höhere Grundwassertemperaturen bis in Tiefen bis 100 m unter Terrain nachweisen lassen (HENNING & LIMBERG 2012).

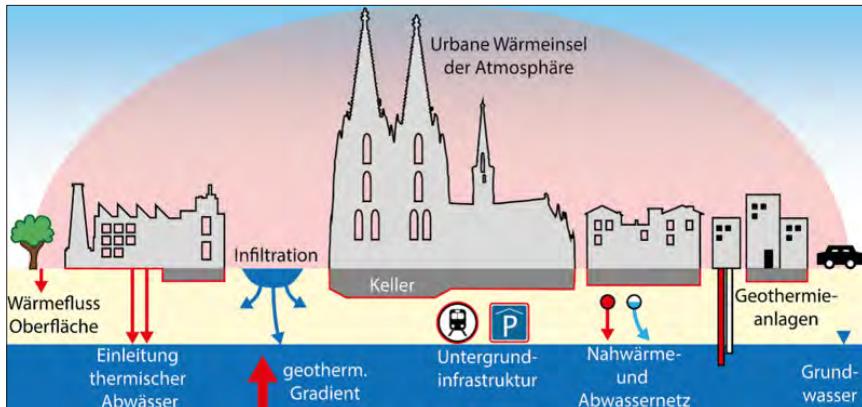


Abbildung 4: Potentielle natürliche und anthropogene Wärmequellen in urbanen Gebieten; Quelle: Uni Halle: www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermeinsel-staedtische.
 Figure 4: Potential natural and anthropogenic heat sources in urban areas; source: University of Halle: www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermeinsel-staedtische.

Als Ursachen für die höheren Grundwassertemperaturen in urbanen Zentren sind insbesondere zu nennen die dichte Besiedlung und demzufolge die Versiegelung der Erdoberfläche durch Beton und Asphalt, die einen Wärmeaustausch mit der Atmosphäre behindert oder sogar unterbindet, der Fahrzeugverkehr, schlecht wärmegedämmte Gebäude, großdimensionierte Heizungen speziell in tiefegründeten Kellern und die in Stadtzentren meist ausgedünnte oder fehlende Vegetation, die ansonsten durch Transpiration die Umgebungstemperatur reguliert. Hohe Gebäude behindern zudem die natürliche Luftzirkulation und erschweren die Wärmeabfuhr. Weitere Wärmequellen sind Industriegebiete und Klimaanlagen, die zusätzlich Wärme an die Umgebung abgeben, Kühlwassereinleitungen in den Untergrund, Abwasserkanäle, unterirdisch verlegte Nah-/Fernwärmennetze und Hochspannungskabel, U-Bahn-Schächte, Tunnelröhren, Tiefgaragen und Geothermieanlagen, welche in den Sommermonaten zur Kühlung genutzt werden, und vieles mehr (Abb. 4).

Es liegt nahe, ganz gezielt die höheren Grundwassertemperaturen im Untergrund von Siedlungszentren oder Industriegebieten verstärkt zu nutzen, um den Einsatz fossiler Energieträger drastisch zu verringern. Dabei gilt die Geothermie als Kerntechnologie der Wärmewende, weil sie das Potential hat, ganze Großstädte mit ihren Industrieflächen mit erneuerbarer Energie zu versorgen, die im Gegensatz zu mittels Windrädern, Sonnenkollektoren, Wasserkraftwerken und Biomasse erzeugter Energie dauerhaft zur Verfügung steht. Gleichzeitig wird durch die Rückleitung des für die Wärmegewinnung genutzten und dadurch abgekühlten Grundwassers in den Untergrund auf intelligente Weise auch Grundwasserschutz betrieben.

4 Modellierung der Wärmeausbreitung in einem Porengrundwasserleiter, dargestellt an einem Fall aus der Praxis

Das oberflächennahe Grundwasservorkommen im glazial-geologisch definierten Baarer-Becken im Kanton Zug wird nicht nur zur Trinkwassergewinnung genutzt, sondern mittlerweile auch von zahlreichen Anlagen zur thermischen Nutzung. Die konzessionierte, das heißt von den zuständigen kantonalen Behörden genehmigte Wärmeentzugsleistung aus dem Grundwasser reicht von Kleinanlagen mit minimal ca. 10 kW bis zu Anlagen mittlerer Größe mit maximal etwa 600 kW Entzugsleistung. Die total installierte Leistung beträgt aktuell ca. 8,8 MW.

In den vergangenen Jahren hat die energetische Grundwassernutzung zugenommen und in naher Zukunft ist mit einer wachsenden Zahl an Konzessionsgesuchen für diese umweltfreundliche Art der Energiegewinnung zu rechnen. Mit der steigenden Nutzungsdichte nimmt die Gefahr von gegenseitigen Beeinflusssungen sowie von lokalen thermischen Übernutzungen des vorhandenen Grundwasservorkommens zu. Es ist die Aufgabe der Bewilligungsbehörde resp. des Amtes für Umweltschutz (AfU) zu prüfen, ob die Vorgaben der GSChV zumindest bei neuen Konzessionen eingehalten werden. Diese gewässerschutzrechtliche Beurteilung wird wegen der hohen Anzahl an vorhandenen Nutzungen aber zunehmend schwieriger. Daher hat sich das Amt für Umwelt des Kantons Zug entschieden, als Grundlage für die weitere energetische Nutzung des oberflächennahen Grundwasservorkommens von Baar-Zug ein entsprechendes numerisches Modell erstellen zu lassen, der Auftrag dazu wurde 2013 an die Jäckli Geologie AG mit Filialen u. a. in Cham/Kanton Zug und Hauptfirmsitz in Zürich vergeben. Das Modell wurde seinerzeit angefordert, um abschätzen zu können, ob weitere Nutzungen noch zulässig sind und um zu überprüfen, ob eine gegenseitige Beeinflussung bestehender Nutzungen vorliegt. Zudem sollte die Einhaltung der Vorgaben der GSChV von 1998 geprüft werden, ob in 100 m Abstand vom Rückgabebrunnen die 3 °C-Beschränkung eingehalten wird. Das Modell wurde später auch zur Bilanzierung und Berechnung der Energiebilanz verwendet resp. wieviel Energie im Grundwasservorkommen des Baarer Beckens noch nutzbar ist. Zu Beginn des Projektes war dieses noch nicht die Fragestellung.

Das vom Amt für Umwelt des Kantons Zug gewünschte Grundwassermodell wurde 2013 vom Autor dieses Beitrages, langjähriger Mitarbeiter der Jäckli Geologie AG, selbst Hydrogeologe und Spezialist für numerische Grundwassermodelle, entwickelt, seither optimiert und jedes Jahr im Hinblick auf die dazugekommenen Nutzungen des Grundwassers als Wärmequelle aktualisiert. Am Beispiel des Baarer Beckens wird aufgezeigt, wie die gestellte Aufgabe mittels des 3D-Modells FEFLOW, das auf finiten Elementen beruht, bewältigt werden konnte.

Temperaturfahnen im Grundwasser können auch mit analytischen Modellen berechnet werden (OHMER, KLESTER, KISSINGER et al. 2022), mit Hilfe von gekoppelten numerischen Strömungs- und Wärmetransportmodellen lassen sich

die thermischen Auswirkungen von Grundwasser-Wärmennutzungen jedoch zuverlässiger abschätzen.

Nachfolgend wird allgemein über die hydrogeologischen Verhältnisse im Bearbeitungsgebiet und über die Nutzung des dortigen Grundwasservorkommens durch Trinkwasserbrunnen und Grundwasser-Wärmepumpen informiert. In den anschließenden Kapiteln 4.1 und 4.2 werden die Kriterien und hydrogeologischen Parameter, die für die Funktionalität des hydraulischen GrundwassermodeLLs/Strömungsmodells bzw. des thermischen GrundwassermodeLLs elementar wichtig sind, kurz erläutert.

Hydrogeologische Übersicht des Grundwasservorkommens von Baar-Zug

Das oberflächennahe Grundwasservorkommen des Baarer Beckens erstreckt sich vom Nordosten von Baar bis zur Stadt Zug bzw. dem Zugersee im Südwesten. Als Grundwasserleiter wirken die spät- und postglazial abgelagerten Lorze-Schotter, welche im zentralen Teil des Grundwassergebietes eine Mächtigkeit von bis zu 25 m erreichen. Über dem Schotter liegen feinkörnige, gering durchlässige Überschwemmungssedimente, welche örtlich z. T. in rinnenförmigen Vorkommen von kiesigem und sandigem Bachschutt der Lorze überlagert werden.

Der Grundwasserleiter nimmt im Tal der Lorze östlich von Baar eine Breite von ca. 200 m ein und verbreitert sich im Baarer Becken auf rd. 1,5 km. Der südliche Teil des Grundwasserleiters bei Zug ist zunehmend sandig ausgebildet und besitzt darüber hinaus eine geringere Mächtigkeit. Das eigentlich nutzbare Grundwasservorkommen endet daher bereits südlich von Baar.

Die unter dem Grundwasser führenden Schotter liegenden eiszeitlichen Seesedimente und Moränen der letzten Vergletscherung wirken als Grundwasserstauer. Die Obergrenze des Stauers weist ein ausgeprägtes Relief auf. In den Mulden erreichen die Schotterablagerungen die größten Mächtigkeiten. Demgemäß sind hier auch die größten grundwassererfüllten Mächtigkeiten von mehr als 20 m zu beobachten. Im Bereich von Baar liegen die Grundwassermächtigkeiten zwischen 10 und 20 m, südlich davon nimmt die Mächtigkeit in Richtung Zugersee deutlich auf unter 2 m ab.

Lage und Schwankungen des Grundwasserspiegels

Der Flurabstand des Grundwasserspiegels nimmt von über 10 m im Nordosten von Baar auf 1–3 m in Seenähe bei Zug ab. Das Spiegelgefälle der Grundwasseroberfläche beträgt im Bereich von Baar ca. 2,5 % und versteilt sich im Bereich des zunehmend sandig ausgebildeten Grundwasserleiters zwischen Baar und Zug auf rund 10 %. Hier wird das Grundwasser infolge auskeilender Kiesmächtigkeit zunehmend an die Oberfläche gedrängt und exfiltriert in die Lorze und die vorhandenen Bäche und Entwässerungsgräben.

Im Gebiet der Zuger Vorstadt wurde das oberflächennahe Grundwasser aufgrund der Gefahr von Seeuferrutschungen in Drainagen gefasst und in den Zu-

gersee abgeleitet. Als Folge dieser Maßnahme tritt heute nur noch sehr wenig Grundwasser direkt in den Zugersee über.

Randliche Hangwasserzuflüsse und Grundwasserneubildung

Das Baarer Becken grenzt im Nordwesten und gebietsweise im Südosten an randlich gelegene Grundwasser führende See- und Deltaablagerungen, welche jedoch durch einen geringdurchlässigen Moränenwall vom genutzten Grundwasserleiter hydraulisch weitgehend getrennt sind. Eine geringe Wassermenge dürfte jedoch die Moräne durchsickern und als unterirdischer Hangzufluss in den Grundwasserstrom überreten.

Die Speisung des Grundwassers erfolgt durch versickerndes Niederschlagswasser sowie durch die Infiltration von oberirdischen Gewässern. Einen nennenswerten Beitrag zur Grundwasserneubildung liefert die Lorze, welche nach ihrem Austritt in die Talebene von Baar eine starke Infiltrationstendenz aufweist.

Da im zentralen Beckenbereich durch die feinsandigen Überschwemmungsablagerungen gespannte Verhältnisse herrschen, breitet sich der Grundwasserspiegelanstieg schnell über den gesamten Grundwasserstrom aus.

Temperatur des Grundwassers

Die Boden- und Grundwassertemperaturen werden im oberflächennahen Bereich maßgeblich durch den konduktiven atmosphärischen Wärmeeintrag bestimmt. Die Temperaturverteilung in der Tiefe lässt sich vereinfachend als harmonische Schwingung der Oberflächentemperatur beschreiben. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Temperaturamplitude exponentiell ab, bei gleichzeitig linearer Zunahme der Phasenverschiebung. Es wurde in Kapitel 2 bereits angesprochen, dass ab einer Tiefe von ca. 10–15 m der saisonale Einfluss kaum mehr spürbar ist. Langjährige Messungen haben ergeben, dass die Temperatur des Grundwassers im Untersuchungsgebiet in dieser Tiefe knapp 12 °C beträgt und mit zunehmender Tiefe entsprechend dem geothermischen Gradienten mit ca. 0,03 °C/m weiter zunimmt.

Trinkwassernutzungen

Das Grundwasservorkommen wird in insgesamt sechs Grundwasserfassungen zur Trinkwassergewinnung genutzt. Die Brunnen verfügen über eine konzessionierte Förderrate von insgesamt 17.100 l/min. Die durchschnittlich geförderte Wassermenge beträgt – trotz der großen installierten Pumpleistung – lediglich ca. 1.600 l/min.

Energetische Grundwassernutzungen

Das oberflächennahe Grundwasservorkommen im Baarer Becken wird zurzeit bereits an 108 Standorten für thermische Zwecke mit anschließender Rückgabe in den Grundwasserleiter genutzt. In der „Konzession“ sind die maximale Ent-

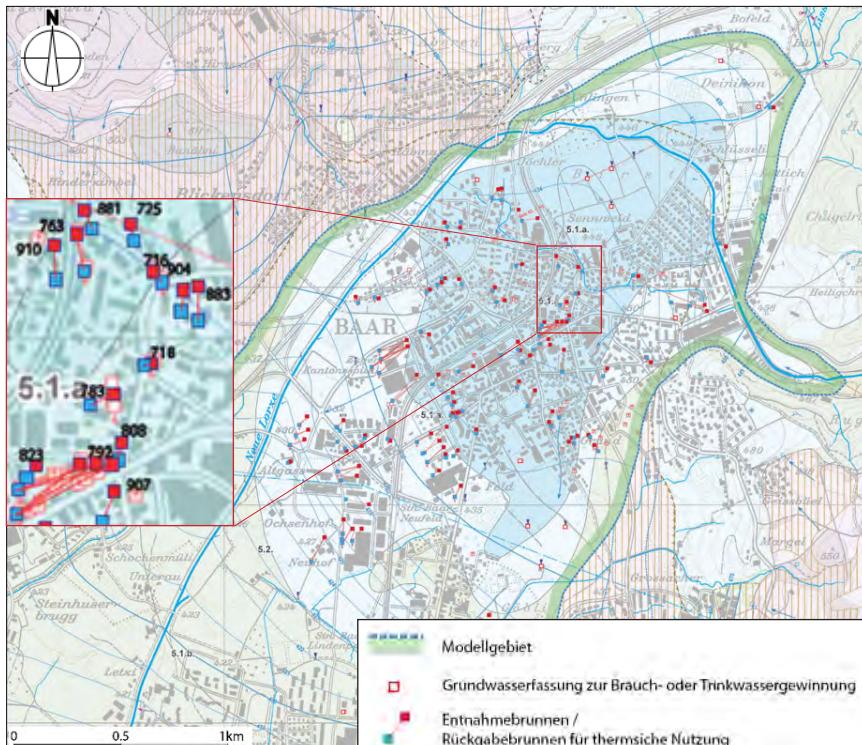


Abbildung 5: Karte mit Lage der Grundwasserfassungen für Brauch- und Trinkwassergewinnung sowie der Zwillingsbrunnen (Grundwasserentnahme und -rückgabe) für die thermische Nutzung des Grundwassers im Jahr 2013, im Ausschnitt Stand 2024; Quelle: Amt für Umwelt des Kantons Zug (o. J.)

Figure 5: Map showing the location of groundwater wells for industrial and drinking water uses and the twin wells (extraction and return wells) for thermal groundwater utilization in the year 2013, detail as of 2024; source: Office for the Environment of the Canton of Zug (no date).

nahme, die maximal zulässige Temperaturänderung sowie die daraus resultierende maximale Kälteleistung der Anlage festgeschrieben. Die gesamthaft konzessionierte Wärmeleistung betrug 2013 ca. 3,8 MW und ist bis 2024 um den Faktor 2,3 auf 8,8 MW gestiegen.

4.1 Hydraulische Grundwassermode

Nachfolgend werden zum besseren Verständnis die Kriterien und hydrogeologischen / geohydraulischen Parameter, die für die Funktionalität des hydraulischen Grundwassermode (Strömungsmodell) elementar wichtig sind, kurz erläutert. Für weitergehende Informationen wird auf die spezielle Fachliteratur verwiesen, u. a. auf DIERSCH (2014).

Modellwahl und Abmessungen

Als Rechenmodell wurde das Programm «FEFLOW» Version 6.1 der WASY GmbH gewählt (Näheres bei DIERSCH 2014). Bei diesem Grundwassерmodell wird die Strömungsgleichung iterativ nach dem Finiten Elemente (FE)-Verfahren gelöst. FEFLOW erlaubt eine flexible Vernetzung, daher kann das Gitternetz an natürliche Strukturen wie Flüsse und Brunnen für die Entnahme und Rückgabe von Grundwasser optimal angepasst werden. Das numerische Fliessmodell berücksichtigt das gesamte, rund 3,2 km lange und 1,5 km breite Grundwasservorkommen im Lorze-Schotter des Baarer Beckens. Das Modellgebiet wurde in Dreiecks-Elemente zerlegt und in den relevanten Bereichen lokal verfeinert. Insgesamt weist das FE-Modell rund 630.000 Zellen auf (Abb. 6). Im vorliegenden Fall wurde ein 3D-Grundwasserströmungsmodell mit instationärem Rechenansatz erstellt.

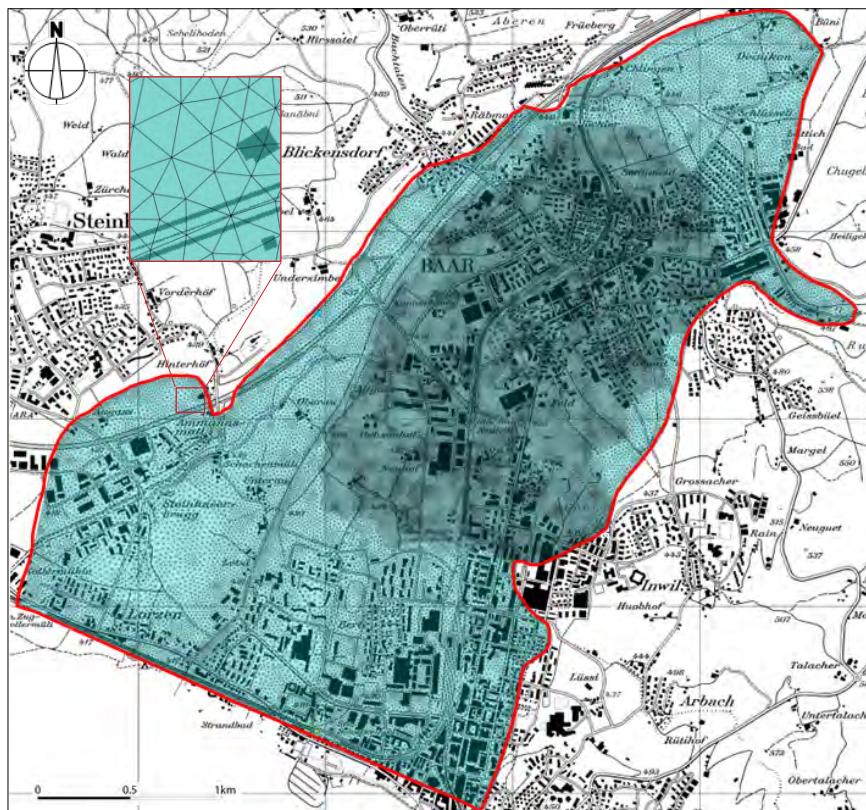


Abbildung 6: Modellgebiet mit Finite Elemente-Netz; vergrößerter Ausschnitt.

Figure 6: Model area with finite element mesh; magnified section.

Geometrie

Um die Modellgeometrie hinreichend genau wiedergeben zu können, wurde das Modell 3-dimensional aufgebaut und vertikal in fünf Schichten unterteilt. In der obersten Modellschicht wurde die Oberflächenmorphologie durch Zuweisung der Daten aus dem vorliegenden digitalen Höhenmodell dargestellt.

Die Sohle des Grundwasserleiters fällt von 429 m ü. NN im Nordosten auf 412 m ü. NN im Südwesten ab. Auffällig ist die Beckenstruktur im nördlichen Bereich von Baar, wo durch die große Schichtdicke des Schotters auch die größte Grundwassermächtigkeit erreicht wird.

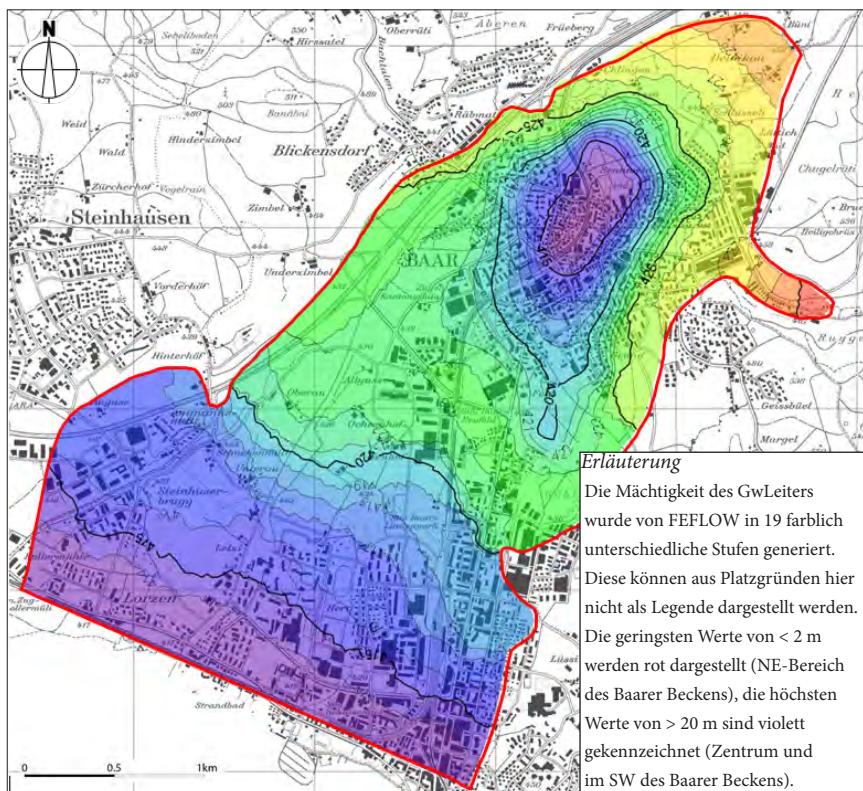


Abbildung 7: Basis Schotter-Grundwasserleiter (m ü. NN), gestützt auf Datenaufbereitung und Interpolation.

Figure 7: Basis of gravel aquifer (m a. s. l.), supported by data processing and interpolation.

Hydraulische Durchlässigkeit

Der Lorze-Schotter des Baarer Beckens weist eine mäßig gute bis gute Durchlässigkeit auf. Aus Pumpversuchen wurden Durchlässigkeitsbeiwerte K zwischen $8 \cdot 10^{-4}$ m/s und $4 \cdot 10^{-3}$ m/s ermittelt. Für die Modellrechnung wurden dem Schot-

ter-Grundwasserleiter die vorstehend genannten hydraulischen Durchlässigkeiten als orientierende Varianzbreite vorgegeben (Abb. 8).

Randbedingungen

Die Wahl bzw. die Vorgabe der hydraulischen Modell-Randbedingungen bestimmt ganz maßgeblich die Modellresultate. Um eine möglichst gute Übereinstimmung der Modellresultate mit den natürlichen Verhältnissen zu erzielen, müssen diese daher möglichst wirklichkeitsnah gewählt werden (siehe Abb. 9).

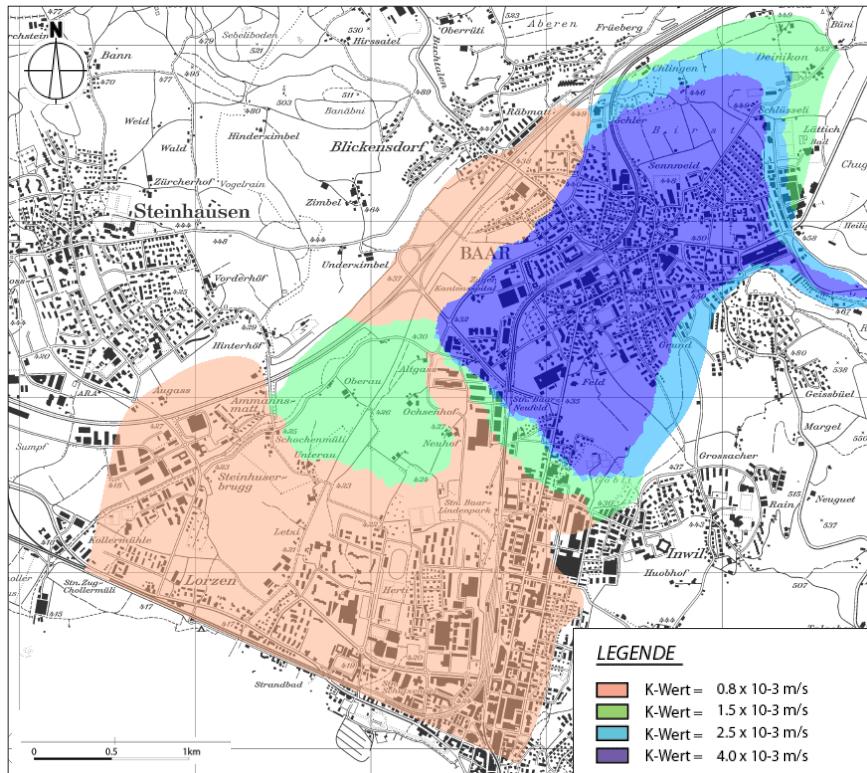


Abbildung 8: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit (K-Werte) im Modell.

Figure 8: Distribution of hydraulic permeability (K-values) in the model.

Festpotenzial

Der südlichen Modellrand wurde parallel der Isohypse von 415,5 m ü. NN als Festpotenzial festgelegt. Effektiv tritt das Grundwasser größtenteils in Drainagen über. Der nahe gelegene Zugersee wirkt nur untergeordnet als Vorfluter. Die Definition eines Festpotenzialrandes ist zulässig, da der südliche Teil des Grundwas-

servokommens nicht mehr nutzbar und daher für die thermischen Modellrechnungen nicht von Bedeutung ist.

Randzuflüsse

Randliche Hangwasserzuflüsse finden im Westen, Norden und Osten des Modellgebiets statt. Eine Abschätzung dieser Zuflüsse ist naturgemäß schwierig. In erster Näherung können diese über die Größe des randlichen Einzugsgebietes und eine Abschätzung des versickernden Niederschlagsanteils abgeschätzt werden.

Die entsprechenden Annahmen sind im Rahmen der Modellkalibrierung überprüft und angepasst worden. Die Kalibrierung führte schließlich zu einem Randzufluss zwischen minimal 0,3 und maximal 1,1 l/min pro laufendem Meter Modellrand (siehe Abb. 9). Der mengenmäßig relevanteste Grundwasserzufluss findet im Nordosten sowie im Norden in den Gebieten «Jöchlér» und «Lättich» statt.

Mit dem gewählten, vergleichsweise eher hoch angesetzten unterirdischen Zufluss war eine ausreichende Speisung des Grundwasservokommens im Modell möglich.

Flußrandbedingungen

Für die Berücksichtigung der wechselseitigen Beziehung zwischen Lorze und Grundwasser wird eine Leakage-Randbedingung gewählt. Die Infiltration des Flusswassers erfolgt dabei über eine Kolmationsschicht mit verminderter Durchlässigkeit. Das Produkt aus der Potenzialdifferenz zwischen dem oberirdischen Gewässer und dem Grundwasser sowie dem Kolmationsfaktor liefert die In- bzw. Exfiltrationsrate (Flusstransferrate).

Für die Lorze bestehen Vermessungsdaten mit Längs- und Querprofilen. Diese beschreiben den Pegelstand dieses Gewässers bei mittlerem Abfluss und fließen direkt in das numerische Modell ein. Der Kolmationsfaktor wird dagegen im Laufe der Kalibrierung iterativ angepasst, hier gibt lediglich der Verlauf der Isohypsen gemäß Grundwasserkarte einen Hinweis auf die In-/ Exfiltrationsverhältnisse in den verschiedenen Flussabschnitten. Aus der Modellkalibrierung resultiert in den Abschnitten mit Flusswasserinfiltration (Sohle im Schotter) eine mittlere Versickerungsleistung von rd. 10 l/min pro laufendem Meter. Dies entspricht einer vergleichsweise hohen Infiltrationsrate.

Im Süden des Modellgebiets wird das Grundwasser durch kleinere Bäche sowie künstlich angelegte Vorflutgräben entwässert. Im numerischen Modell sind die Bäche und Vorflutgräben berücksichtigt (Abb. 9).

Das Grundwasser exfiltriert in die Bäche sowie in die Vorflutgräben und wird darin weggeführt. Durch Zuweisung der Flussrandbedingung in Kombination mit realistischen K-Werten konnte der Isohypsenverlauf auch im südlichen Teil des Baarer Beckens recht genau nachgebildet werden.

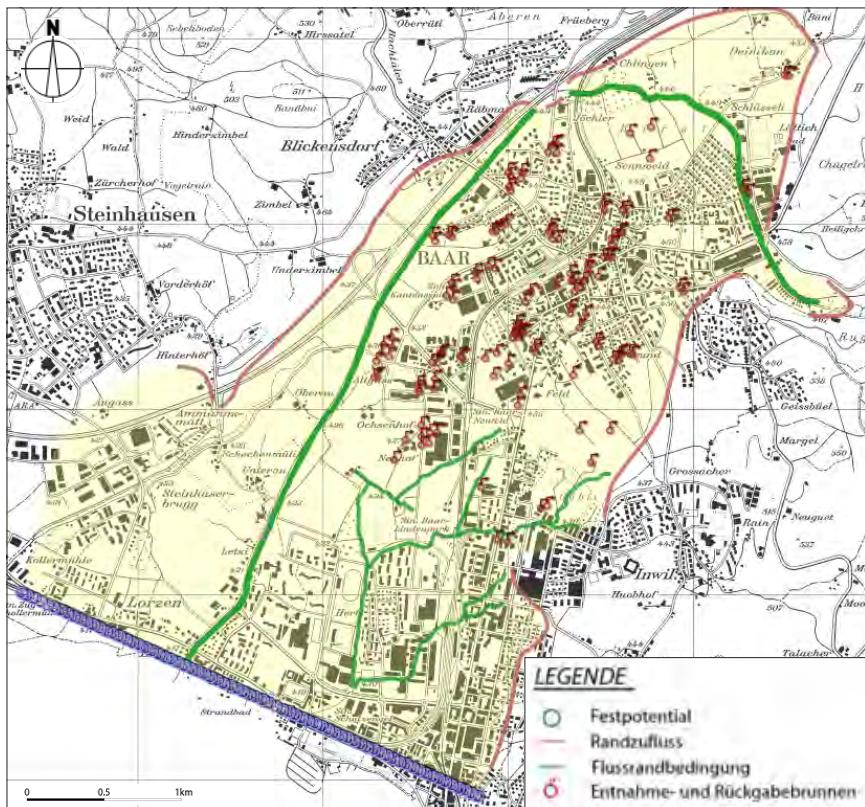


Abbildung 9: Modellrandbedingungen.

Figure 9: Model boundary conditions.

Grundwasserneubildung

Neben der Speisung des Grundwasservorkommens über Randzuflüsse erfolgt die Neubildung hauptsächlich durch die Versickerung des Niederschlagswassers. Ausgehend von einem mittleren Niederschlag von rd. 1100 mm/a dürften je nach Beschaffenheit der Geländeoberfläche im Mittel etwa 300–400 mm/a des Niederschlags versickern und zur Grundwasserneubildung beitragen.

In den überbauten Gebieten ist der Anteil des versickernden Niederschlags deutlich geringer. Im Siedlungsgebiet von Zug und Baar wird die niederschlagsbürtige Grundwasserneubildung im Modell daher lediglich mit 150 mm/a angesetzt.

Numerisches Strömungsmodell

Zur Kalibrierung des stationären Strömungsmodells stellte der Kanton Zug eine Karte der Grundwasserisohypsen bei mittleren Verhältnissen zur Verfügung. Zur

Prüfung der Modellergebnisse lagen außerdem mehrjährige Aufzeichnungen des Grundwasserstandes von 24 kantonalen Messstellen vor.

Der stationäre Modellaufbau erfolgte unter der Annahme eines konstanten Pumpbetriebes in den vorhandenen Grundwasserfassungen mit der durchschnittlichen Entnahmemenge. Ziel der Kalibrierung war eine möglichst gute Übereinstimmung der berechneten Grundwasserstände mit dem Verlauf der Grundwasserisohypsen gemäß Grundwasserkarte als Grundlage für das Wärme-transportmodell.

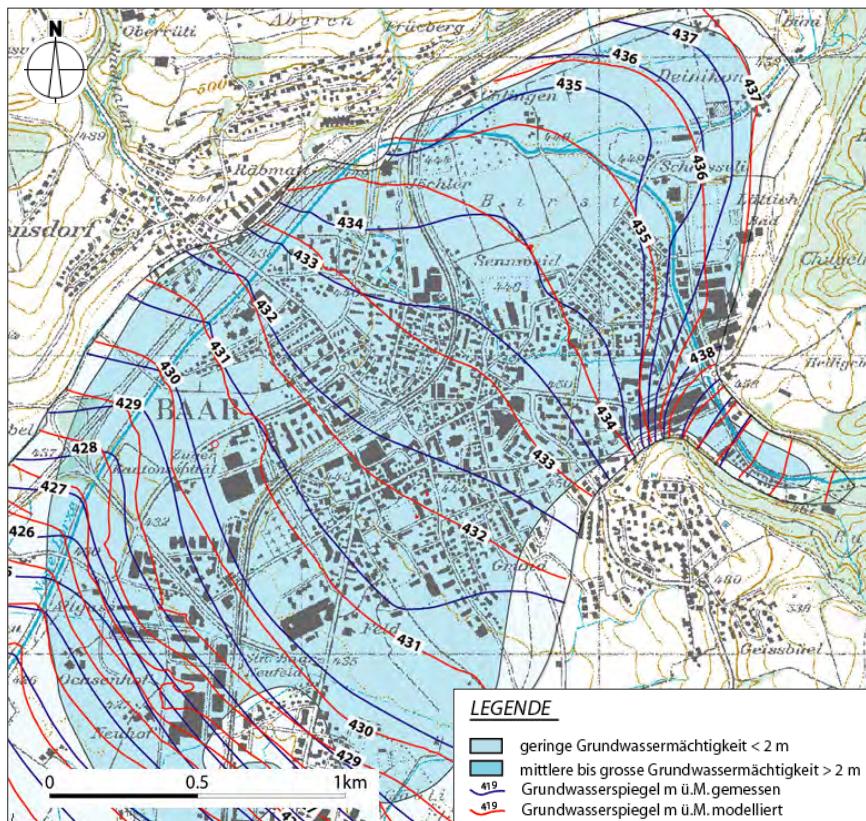


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen und der kalibrierten Isohypsen bei mittleren Grundwasserständen.

Figure 10: Comparison of the measured and modeled isohyps at mean water levels.

Der Kalibrierungsprozess erfolgte iterativ in mehreren Schritten:

- 1) Festlegung des Festrandpotenzials, der Neubildung durch Niederschlag und der Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten in einer ersten Annäherung,

- 2) In einem iterativen Prozess erfolgte die Feineinstellung der Randzuflüsse, der In- und Exfiltration der Lorze sowie der Drainagekanäle über die Leakage-Raten,
- 3) Durchführung einer Sensitivitätsanalyse,
- 4) Plausibilitätsprüfung der resultierenden Bilanzgrößen,
- 5) Nochmalige Anpassung sämtlicher Parameter.

Den aus dem Kalibrierungsprozess resultierenden Verlauf der Grundwasseroberfläche zeigt die Abbildung 10. Die im Modell berechneten Grundwasserspiegelhöhen und die generelle Fließrichtung nach Nordosten stimmen gut mit den Isohypsen auf der kantonalen Grundwasserkarte überein.

Bewertung der hydraulischen Modellkalibrierung

Mit der Modellkalibrierung konnte generell eine recht gute Übereinstimmung der berechneten Wasserspiegelhöhen mit den Isohypsen der Grundwasserkarte erzielt werden.

Die gewählten Durchlässigkeiten entsprechen etwa den aus Pumpversuchen ermittelten Werten. Im Vergleich zu bisherigen Durchflussabschätzungen wurden dem Modell aber tendenziell etwas höhere K-Werte zugrunde gelegt. Entsprechend resultiert auch ein höherer Grundwasserdurchfluss.

Zu den In- und Exfiltrationsmengen (Leakage) aus der Lorze bzw. des Grundwassers liegen keine Feldmessungen vor. Die im Modell gewählte Infiltrationsrate entspricht mit rd. 10 l/ min pro laufendem Meter einem typischen Wert für wenig kolmatierte Fließgewässer des schweizerischen Mittellandes.

Insgesamt liegen die aus der Modellkalibrierung resultierenden Modell-Zu- und Wegflüsse in einer plausiblen Größe.

4.2 Thermisches Grundwassermodell

Das für die Fragestellungen relevante Wärmetransportmodell basiert auf dem hydraulischen Modell und ermöglicht Aussagen zu den Auswirkungen der thermischen Grundwassernutzungen auf die Temperatur des oberflächennahen Grundwassers. Das Wärmetransportmodell kann darüber hinaus in Prognoszenarien die Zulässigkeit von weiteren Nutzungen simulieren und damit als Planungsgrundlage genutzt werden.

Grundlagen zum Wärmetransport

Der Wärmetransport im Untergrund wird durch Konvektion und Advektion dargestellt. Berücksichtigt werden die spezifische Wärmekapazität c und -leitfähigkeit λ des Grundwassers und der Gesteinsschichten im Untergrund sowie die thermische Dispersion. Analog zum Strömungsmodell wurden für das instationäre Wärmetransportmodell geeignete Anfangs- und Randbedingungen definiert.

Generell gilt, bei der Bilanzierung der Wärme über ein Grundwasserkontrollvolumen die Transportvorgänge und die Wärmespeicherung zu beachten. Die gesamte eingetragene Wärme hängt sowohl von den Bodenkennwerten (Wärmeleitfähigkeit und Dicke der Überdeckung) als auch der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des Bodens und dem Grundwasser ab. Eine Temperaturerniedrigung in einem Kontrollvolumen (Grundwasserleiter) bedeutet eine Abgabe von gespeicherter Wärmeenergie. Im Baarer Becken entstehen die Temperaturänderungen insbesondere durch die natürlichen Einträge aus der Neubildung, atmosphärischer Einstrahlung, Randzuflüsse und die Infiltration aus oberirdischen Gewässern. Zu den anthropogenen Einträgen gehören vor allem der Wärmefluss von beheizten Kellern, Wärmeeintrag aus der Kanalisation und Wärmeentnahme durch bestehende Wärmepumpen.

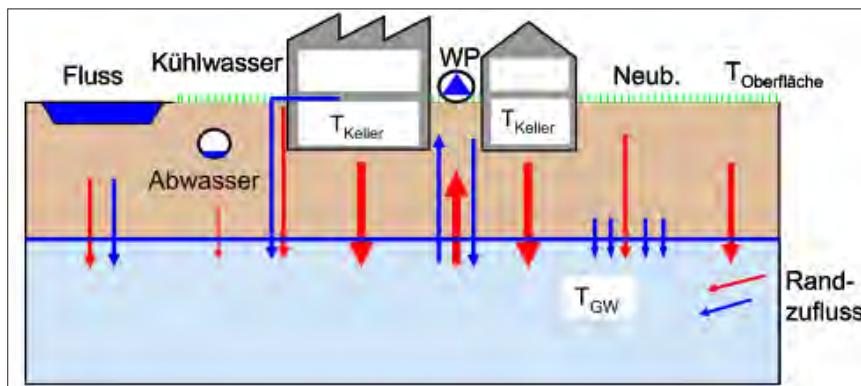


Abbildung 11: Schema einer Bilanz mit allen Energieflüssen (aus SUTER 2005).
Figure 11: Diagram of a balance sheet with all energy flows (from SUTER 2005).

Die Abbildung 11 zeigt eine schematische Darstellung aller Bilanzgrößen. Blau eingezeichnet sind die Massenflüsse. Hier erfolgt der Wärmeeintrag durch Konvektion. Wo kein Massenfluss vorhanden ist, erfolgt eine Wärmeleitung als Advektion durch die Matrix. Rot eingezeichnet sind die Wärmeflüsse.

Thermische Anfangs- und Randbedingungen

Den thermischen Modellrechnungen wurde eine Ausgangstemperatur des Grundwassers von 12 °C zugrundegelegt. Dieser Wert entspricht in etwa der mittleren Grundwassertemperatur in den vorhandenen Grundwassermessstellen.

Für die Berücksichtigung der atmosphärischen Wärmeeinstrahlung sowie des anthropogenen bedingten Wärmeeintrags wurde der obersten Modellschicht flächendeckend eine konstante Jahresmitteltemperatur zugewiesen. Der Temperaturwert wurde ebenfalls mit 12 °C vorgegeben. Über die Modellränder sowie durch Infiltration aus der Lorze erfolgen weitere Wärmeeinträge. Diesen Wasser-

zuflüssen wurde die mittlere jährliche Bodentemperatur, d. h. eine konstante Temperatur von 12 °C, mitgegeben.

Da mit dem thermischen Modell primär die zu erwartenden relativen Temperaturänderungen gegenüber den vorhandenen, natürlichen Grundwassertemperaturen prognostiziert werden sollen, ist die Wahl von einheitlichen Ausgangstemperaturen für die Modellrandbedingungen zulässig.

Neben den genannten Wärmeeinträgen wurde im Modell auch der geothermische Wärmestrom vom tieferen Untergrund in den Modellkörper hinein berücksichtigt. Dieser vertikale Zustrom über die unterste Schicht wurde mit 65 W/m² vorgegeben.

Thermische Materialparameter

Dispersivität

Durch Vermischungsvorgänge und Geschwindigkeitsunterschiede kommt es zur Aufweitung der Kältefahnen im Abstrombereich. Dieser Vorgang wird als Dispersion bezeichnet.

Dabei ist die Dispersion in Strömungsrichtung (longitudinal) immer größer als senkrecht (transversal) dazu. Die Dispersivität oder Vermischungslänge spiegelt dabei die Inhomogenitäten des Grundwasserleiters wider. Dem Modell wurden eine longitudinale Dispersivität von 5 m und eine transversale Dispersivität von 0,5 m zugrundegelegt.

Wärmeleitfähigkeit und -kapazität

Für die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ wurden folgende Werte im Modell verwendet, wie sie für Grundwasser bzw. für die sandig-kiesige Lockergesteinsmatrix im schweizerischen Mittelland charakteristisch sind:

Grundwasser	0,65	W m ⁻¹ K ⁻¹
Gesteinsmatrix	3,0	W m ⁻¹ K ⁻¹

Die spezifische Wärmekapazität c wurde mit den nachstehend aufgeführten Werten im Modell berücksichtigt:

Grundwasser	4,2	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Gesteinsmatrix	2,5	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹

Thermische Nutzungen

Für die Modellrechnungen müssen die vorhandenen thermischen Grundwassernutzungen möglichst realitätsnah berücksichtigt werden. Dabei sind weniger die installierten Kälteleistungen gemäß wasserrechtlicher Konzession als vielmehr die effektiv genutzten Wärmemengen von Interesse.

Die entsprechenden Angaben liegen allerdings nur in seltenen Fällen vor, so dass diese für die thermische Modellierung abgeschätzt werden müssen. Da es sich bei den thermischen Nutzungen im vorliegenden Fall fast ausschließlich um monovalente, d. h. für die Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser betriebene Anlagen handeln dürfte und die Mehrzahl bei Wohnbauten installiert

ist, wurden Energiezahlen von vergleichbaren Objekten herangezogen. In Abbildung 12 sind entsprechende «typische» monatliche Wärmebedarfszahlen für Heizen und Warmwasser dargestellt. Die Angaben basieren auf einer angenommenen resp. installierten Wärmeentzugsleistung aus dem Grundwasser (Kälteleistung) von 100 kW.

Es zeigt sich, dass zur Deckung des Wärmebedarfs für Heizen und Brauchwarmwasser im kältesten Monat (Januar) rd. zwei Drittel der installierten Leistung in Anspruch genommen werden. Im Sommer wird nur Warmwasser aufbereitet und der Heizbedarf sinkt auf ca. 15 % der Leistung. Im Jahresverlauf beträgt bei Neubauten mit entsprechend guter Wärmedämmung die durchschnittliche Entnahme knapp einem Drittel der installierten Leistung.

Ausgehend von den geschätzten Wärmebedarfzahlen wurden für die vorhandenen thermischen Grundwassernutzungen die effektiv entnommenen Wärmemengen abgeschätzt.

4.2.1 Modellszenario 1: Nutzung mit konzessionierten Leistungen

In einem ersten Schritt wurden mit Hilfe des numerischen Modells die thermischen Auswirkungen bei einem Dauerbetrieb der vorhandenen Anlagen mit der

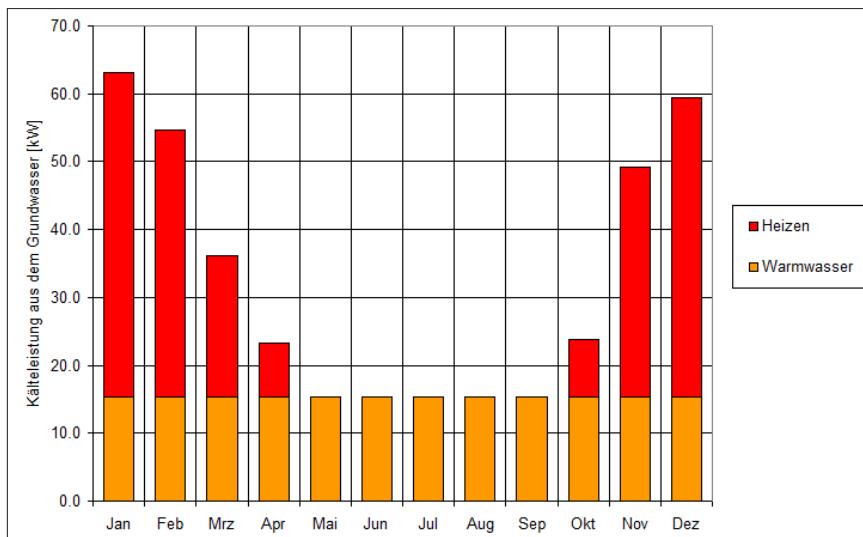


Abbildung 12: Typische monatliche Kälteleistungen für die Wärmeversorgung von Wohnbauten (basierend auf einer installierten maximalen Kälteleistung aus dem Grundwasser von 100 kW); Quelle: Kanton Zug, Amt für Umweltschutz 2013.

Figure 12: Typical monthly cooling capacities for the heat supply of residential buildings (based on a maximum installed cooling capacity from groundwater of 100 kW); source: Canton of Zug, Office for Environmental Protection 2013.

konzessionierten Leistung untersucht. Dieses Szenario entspricht einem „worst case“, welcher allerdings in Realität nie eintreten wird.

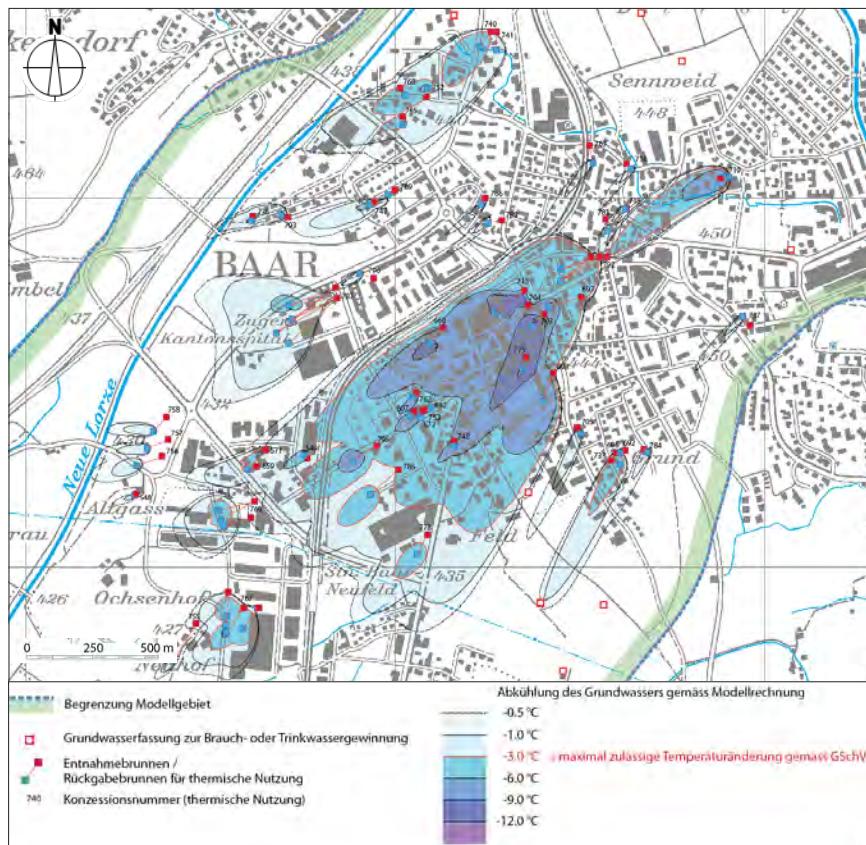


Abbildung 13: Resultierende Kälteanomalien bei Dauerbetrieb mit der konzessionierten Leistung im Gebiet Baar (Modellszenario 1).

Figure 13: Resulting cooling anomalies with continuous operation with the licensed capacity in the Baar area (model scenario 1).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für Szenario 1 sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Karte zeigt die resultierenden Kälteanomalien als Differenz gegenüber dem unbeeinflussten Ausgangszustand. Im Zentrum von Baar stellt sich gemäß Modell ein ausgedehnter Bereich mit einer Temperaturerniedrigung um mehr als 3 °C ein. Lokal resultieren hier Abkühlungen von > 6 °C, teils sogar von > 9 °C. Zwischen der Marktstraße/Rathausstraße im Nordosten und dem Quartier Unterdorf im Südwesten zeichnet sich bei diesem Szenario eine massive thermische Übernutzung des Grundwasservorkommens ab. Von dieser lokal starken Abkühlung, welche den Betrieb von Wärmepumpen-Anlagen beeinträchtigen würde,

wären verschiedene Nutzungen betroffen. Daneben sind auch bei verschiedenen Einzelanlagen gemäss Szenario 1 Abkühlungen von mehr als 3°C festzustellen. Die entsprechenden Kälteanomalien sind aber örtlich begrenzt und liegen zu meist noch innerhalb des nach GSchV zulässigen 100 m-Korridors.

Andererseits lassen die Resultate der Modellrechnungen für Szenario 1 im Baugebiet noch Flächen erkennen, in denen die Auswirkungen der thermischen Nutzungen nur gering oder überhaupt nicht spürbar sind. Hier bestehen für die Zukunft mit Sicherheit noch Kapazitäten für weitere Wärmenutzungen.

4.2.2 Modellszenario 2: Nutzung basierend auf realistischen Leistungen

Mit dem Szenario 2 sollten die Auswirkungen durch den Betrieb der heute vorhandenen Wärmenutzungen möglichst wirklichkeitsnah simuliert werden. Hierfür wurden bei den Modellierungen instationäre Verhältnisse bzw. die entspre-

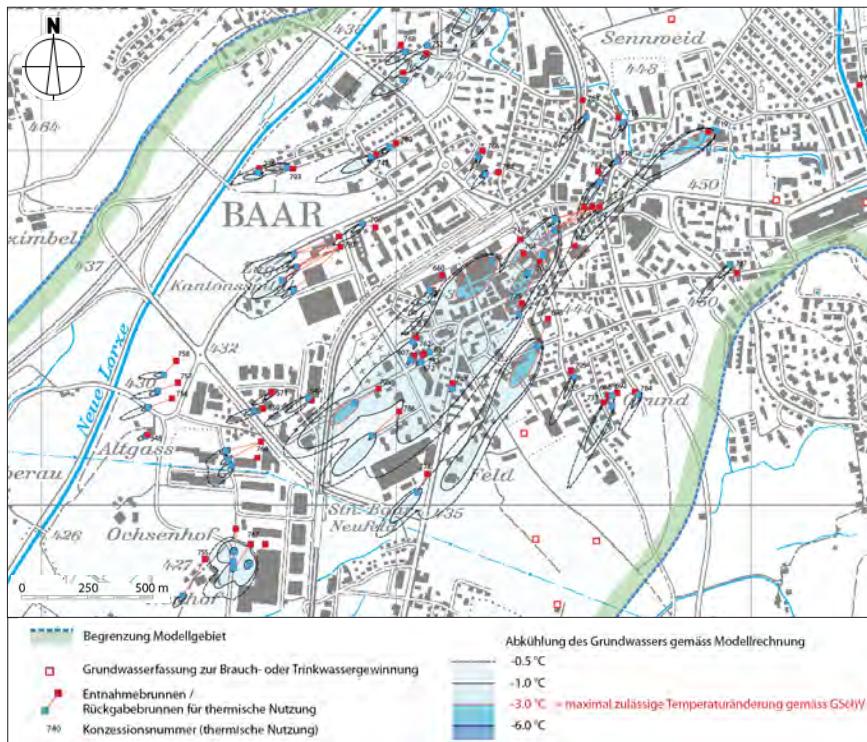


Abbildung 14: Resultierende Kälteanomalien unter «realistischen» Betriebsbedingungen im Gebiet Baar (Modellszenario 2).

Figure 14: Resulting cold anomalies under “realistic” operating conditions in the Baar area (model scenario 2).

chend dem Wärmebedarf jahreszeitlich variierenden Grundwasserentnahmern berücksichtigt. Die Annahmen hierzu wurden bereits in Abbildung 10 dargestellt. Die Eingaben basieren auf den geschätzten monatlichen Bedarfzahlen der einzelnen Anlagen.

Die Karte zeigt die maximale Abkühlung des Grundwassers im Monat März gegen Ende der Heizperiode. Zu diesem Zeitpunkt erreichen die Kältefahnen jeweils ihre grösste Aus-dehnung. Durch die geringere Wärmenutzung in den Sommermonaten baut sich die Wärmefahne in der warmen Jahreszeit teilweise wieder ab. Dieser zyklische Auf- und Abbau der Kälteanomalien führt auch dazu, dass in der Mehrzahl der Fälle keine sehr weit reichenden und ausgeprägten Kältefahnen entstehen. Dadurch kommt es auch nur zu vergleichsweise geringen thermischen Beeinflussungen zwischen den einzelnen Anlagen.

Im Modell sind viele kleine und räumlich mehr oder weniger getrennte Kältefahnen zu beobachten. Bei drei Anlagen im Zentrum von Baar führt die Nutzung zu einer Kältefahne, welche bei maximaler Ausdehnung am Ende der Heizperiode auch in etwas mehr als 100 m Entfernung noch eine Temperaturerniedrigung von mehr als 3°C zur Folge hat (Abb. 14). In diesem Bereich führt die heutige Nutzung somit bereits heute zu einer deutlichen Abkühlung, so dass weitere Anlagen genau geprüft resp. nur zurückhaltend bewilligt werden sollten.

5 Diskussion

Die Ergebnisse der numerischen Wärmemodellierung für das Grundwasservorkommen Baar-Zug sind in mehrfacher Hinsicht sehr interessant. Sie lassen einerseits eine Bewertung der derzeitigen Nutzung des geothermischen Potentials des oberflächennahen Grundwasser zu und erlauben andererseits eine Abschätzung, ob Spielraum besteht, auch zukünftig weiterhin die Wärme des Gundwassers als regenerative Energie speziell zur Heizung von Gebäuden nutzen zu können.

Heutige Grundwassernutzung zur Wärmegewinnung

Zurzeit (2024) wird das Grundwasservorkommen von Baar-Zug (Kantonales Grundwassergebiet 5.1.a) in 50 Anlagen zur Gewinnung von umweltfreundlicher Wärme aus dem Grundwasser genutzt. Die konzessionierte Entnahmemenge beträgt gegenwärtig total rd. 34.000 l/min. Das Grundwasser dieser Anlagen wird nach der thermischen Nutzung wieder vollumfänglich zur Versickerung gebracht. Die maximal zulässige Entzugs- resp. Kälteleistung aus dem Grundwasser liegt bei 8,6 MW. Die installierte Leistung dürfte im Jahresverlauf jeweils zu rund einem Drittel genutzt werden, d.h. die effektive Entzugsleistung aus dem Grundwasser beträgt etwa 2,9 MW. Dies entsprach im Jahr 2024 einer Wärmemenge von rd. 11.200 MW/Jahr oder einer Substituierung von rd. 2.100 to Heizöl pro Jahr.

Verbleibendes Nutzungspotenzial, Erteilung weiterer Konzessionen

Die numerischen Modellrechnungen haben gezeigt, dass im Zentrum von Baar heute bereits eine hohe Dichte an Grundwasserwärmennutzungen erreicht ist. Gemäß Modell dürfte im Quartier Dorf und teilweise auch im Quartier Unterdorf die Abkühlung des Grundwassers in weiten Bereichen 1–2 °C betragen, so dass das Potenzial für zusätzliche Wärmennutzungen deutlich eingeschränkt ist. In diesem Gebiet können noch kleinere bis allenfalls mittlere Anlagen bewilligt werden. Dabei sollten die Messungen der tatsächlichen Temperaturverhältnisse und ein sich allfällig abzeichnender Trend unbedingt mitberücksichtigt werden.

In den übrigen Bereichen sind nur lokal begrenzte Kältefahnen vorhanden, so dass dort in der Regel noch Nutzungspotenzial für größere energetische Grundwassernutzungen vorhanden ist. Eine unzulässige Beeinflussung bestehender Anlagen oder ein hydraulischer Kurzschluss bei größeren Anlagen sind aber unbedingt zu vermeiden. Dies gilt es im Einzelfall zu prüfen.

Das verbleibende Wärmennutzungspotenzial kann aufgrund der ausgeführten Modellrechnungen nicht exakt angegeben werden. Hierfür wären weitere Szenarien zu berechnen. Es darf aber davon ausgegangen werden, dass bei einer räumlich optimal verteilten Nutzung eine zusätzliche Entzugsleistung aus dem Grundwasser von noch ca. 1,0–1,5 MW realisierbar sein sollte (entspricht einer konzessionierten Entzugsleistung von rund 4,0–4,5 MW). Eine genauere Beurteilung des verbleibenden Potenzials sollte gestützt auf gezielte Beobachtungen der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Grundwassertemperaturen möglich sein.

Grundsätzlich sind in Gebieten mit hoher Wärmennutzungsdichte die Nutzung des Grundwassers zu Kühlzwecken zu begrüßen. Damit lässt sich eine zu starke

6 Dank

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem Arbeitsgeber Jäckli Geologie AG, natürlich Herrn Dr. Walter Labhart, sowie dem Amt für Umwelt des Kantons Zug (AfU Zug), speziell Herrn Dr. Volker Lützenkirchen. Beide stellten für die Erarbeitung des anspruchsvollen Themas umfangreiche Daten sowie Fachwissen zur Verfügung und ermöglichten so die Erstellung eines prognosefähigen Werkzeugs zur Planung und Bewertung von projektierten Grundwassernutzungen im Baarer Becken des Kantons Zug. Besonderer Dank auch dafür, dass ich das konkrete Beispiel aus meiner Projekttätigkeit für den Beitrag im Jahrbuch des Nassauischen Vereins für Naturkunde verwenden durfte. Nicht zuletzt danke ich auch dem Schriftleiter des Nassauischen Vereins für Naturkunde, Prof. Dr. Benedikt Toussaint, der auch mein Vater und selbst Hydrogeologe ist. Er hat mich dazu ermuntert, die Erfahrungen und Erkenntnisse aus meiner Modelliertätigkeit zu veröffentlichen und hat mich bei manchen Formulierungen unterstützt.

7 Literatur

- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) (2021): Klima-Normwerte 1991-2020 für die Schweiz; https://scnat.ch/de/uuid/i/d827445d-e844-5d84-ab92-4cdcf6e639a9-Klima-Normwerte_1991-2020_f%C3%BCr_die_Schweiz [Zugriff: 28.04.2025].
- BADOUX, V., HUBER, E. & HÄNSLI, F. (2024): Geodatensatz zum Wärmenutzungspotenzial in den Lockergesteins-Grundwasserleitern der Schweiz – Schlussbericht (26. April 2024), Auftraggeber Bundesamt für Energie, Bern. – 82 S.; Zollikofen (GEOTest AG).
- BECHER, J., ENGLISCH, C., GRIEBLER, C. & BAYER, P. (2022): Groundwater fauna downtown – drivers, impacts and implications for subsurface ecosystems in urban areas. – Journal of Contaminant Hydrology, **248** (4): doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104021.
- BÖTTCHER, F., HALILOVIC, S., GÜNTHER, M., HAMACHER, TH. & ZOSSEDER, K. (2025): Integration der thermischen Grundwassernutzung in die kommunale Wärmeplanung. – Grundwasser, **30** (1): 19–35.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. – 137 S.; Bern.
- Bundesrat (2025): Verordnung über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Verordnung). – Amtliche Sammlung 2024 705. – 81 S.; Bern.
- co2online (2023): Wasser-Wasser-Wärmepumpe: Funktion, Kosten, Vor- & Nachteile; <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/waermepumpe/wasser-wasser-waermepumpe> [Zugriff 22.06.2025].
- DIERSCH, H.-J.G. (2014): FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. – 996 S.; Berlin, Heidelberg (Springer).
- EnergieSchweiz (2017): Übersicht über die Bewilligungsverfahren für Grundwasserwärmennutzungen in den Kantonen. – 27 S.; Bern.
- FIGURA, S., LIVINGSTONE, D.M., HOEHN, E. & KIPPER, R. (2013): Klima und Grundwasser. – Aqua & Gas, **7/8**: 28-33; Zürich.
- GebäudeKlima Schweiz (2014): Wärmequellenutzung. Unterlagen für Planer | März 2014. – 8 S.; Olten (Schweizerischer Verband für Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik).
- HENNING, A. & LIMBERG, A. (2012): Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. – Brandenburgische geowiss. Beitr., **19**: 81–92.
- HÖTZL, H. & MAKURAT, A. (1981): Veränderung der Grundwassertemperatur unter dicht bebauten Flächen am Beispiel der Stadt Karlsruhe. – Z. dt. geol. Ges., **132**: 767-77; Hannover.
- HUSS, M. (2025): Gletscherschmelze in der Schweiz. – Akademie aktuell, **2025** (1): 14-21; München (Bayer. Akademie der Wissenschaften)
- JOHNER, CHR. (2023): Gefahr für Gebäude: Unterirdische Wärmeinseln sind für Städte ein Problem; <https://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/unterirdische-waermeinseln-sind-fuer-staede-ein-problem-33657016.html> [Zugriff: 01.05.2025].
- Kanton Zug – Amt für Umweltschutz (2013): Thermische 3D-Grundwassermodellierung von Baar/Zug. – Umwelt Zug, **2013** (2): 16 S.; Zug.
- Kanton Zug, Amt für Umwelt (o. J.): Energie aus Grundwasser; <https://zg.ch/de/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-aus-untergrund-und-wasser/energie-aus-grundwasser> [Zugriff 22.06.2025].
- LANZ, K. (2021) (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz, Kapitel 4: Thermische Nutzung. – Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, **43**: 111–143.
- LINK, F. (2024): Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz, Ausgabe 2023 (Schlussbericht 31. Juli 2024), Auftraggeber EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern. – 50 S.; Pfyn (Geo-Future GmbH).

- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (o. J.): Nullgradgrenze; <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/nullgradgrenze.html> [Zugriff 25.06.2025].
- Mitteilungen BiG (2025): Grundwasser: der verborgene Schatz der Schweiz. – 6 S.; Bern.
- MENBERG, K., BLUM, P., KURYLYK, B.L. & BAYE, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **18** (11): 4453-4466.
- MENBERG, K., BAYER, P., ZOSSEDER, K., RUMOHR, S. & BLUM, P. (2013): Subsurface urban heat island in German cities. – *Science of the Total Environment*, **442**: 123-133.
- NÖTZLI, J., PETER, A., NÄHLEN, N. & PHILLIPS, M. (2025): Verborgenes Eis in den Schweizer Alpen: Der Permafrost taut immer schneller. – *WSL Berichte*, **164**: 35-47; Davos Dorf (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL).
- OHMER, M., KLESTER, A., KISSINGER, A., MIRBACH, ST., CLASS, H., SCHNEIDER, M., LINDENLAUB, M., BAUER, M., LIESCH, T., MENBERG, K. & BLUM, P. (2022): Berechnung von Temperaturfahnen im Grundwasser mit analytischen und numerischen Modellen. – *Grundwasser*, **27**:113-129.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2015): Norm SIA 384/7 Grundwasserwärmemutzung. – 84 S.; Zürich.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (1955): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer gegen Verunreinigung vom März 1955. – 552-557; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (1991): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Bundesschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991, Stand 1. Februar 2012. – 34 S.; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (1998): Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998, Stand 1. Januar 2025. – 74 S.; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2021): Grundwasserschutz in der Schweiz. Bericht der Parlamentarischen Verwaltungskontrolle zuhanden der Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates. – *Bundesblatt* 022 1772. – 60 S.; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2022a): Grundwasserschutz in der Schweiz. Bericht der Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates vom 28. Juni 2022. – 30 S.; Bern.
- Eidgenossenschaft (2022b): Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KIG). – *Bundesblatt* Nr. 196 vom 11. Oktober 2022, Stand 1. Januar 2025. – 8 S. und sechs Faktenblätter; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2024): Verordnung zum Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (Klimaschutz-Verordnung, KIV) vom 27. November 2024, Stand 1. Januar 2025. – 30 S.; Bern.
- SINREICH M., KOZEL R., LÜTZENKIRCHEN V., MATOUSEK F., JEANNIN P.-Y., LÖW S. & STAUFFER F. (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. – *Aqua & Gas*, **9**: 16-28; Zürich.
- Solarwatt (o. J.): Wasser-Wasser-Wärmepumpen: Funktionsweise, Vor- und Nachteile. – <https://www.solarwatt.de/ratgeber/wasser-wasser-waermepumpe> [Zugriff 28.06.2025].
- SUTER, U. (2005): Thermische Nutzung des Grundwasserleiters Zürcher Limmattal. – Diplomarbeit, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich; Zürich.

DR. ROLAND TOUSSAINT
c/o Jäckli Geologie AG
CH-5400 Baden
Kronengasse 39
Tel.: +41 44 344 5599
E-Mail: toussaint@jaeckli.ch

Manuskripteingang: 12.August 2025

Die historische und aktuelle Stechimmenfauna (Hymenoptera, Aculeata) im Lahntal bei Weilburg

ULRICH FROMMER & KARSTEN KLENKE

Untersuchungskontinuum, Biotopverluste, Faunenveränderung, A. Schenck, locus typicus

Kurzfassung: In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse aller historischen und aktuellen Untersuchungen zur Stechimmenfauna des Lahntals bei Weilburg vorgestellt. Die historische Bearbeitung erfolgte seit 1845 durch den berühmten Hymenopterenforscher Adolph Schenck (1803–1878) und in der Mitte des 20. Jahrhunderts durch den Hymenopterologen Heinrich Wolf (1924–2020). Die aktuellen Untersuchungen fanden seit 2004 statt. Insgesamt wurden in einem Zeitraum von 178 Jahren 572 Arten bei Weilburg nachgewiesen: 316 Bienenarten und 256 aculeata Wespenarten. Ein großer Anteil (etwa 42 % dieser Arten) konnte aktuell nicht nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis weist auf das wirkliche Ausmaß des allgemein beobachteten Rückgangs der Artenvielfalt hin, da hier eine sehr spezifisch örtliche und keine naturräumliche oder landesweite Betrachtung erfolgt. Bei solchen Untersuchungen (wie beispielsweise bei der Erstellung von Roten Listen) werden die Artverluste in unterschiedlichen Lokalitäten im Resultat jeweils ausgeglichen und es ergibt sich ein noch eher erträgliches Ausmaß an registriertem Artenrückgang. Bei der Diskussion der Ergebnisse wird der Niedergang und der große Flächenverbrauch von Natur- und Kulturlandschaft bei Weilburg als Hauptursache des Rückgangs der Artenvielfalt beispielhaft und in konkreter Weise deutlich. Weilburg ist für 25 von Adolph Schenck beschriebene Stechimmenarten (22 Bienenarten) mit gültigem Namen der *locus typicus*.

The historical and current aculeate fauna (Hymenoptera, Aculeata) in the Lahn valley near Weilburg (Hesse)

continuum of investigation, biotope loss, faunal change, A. Schenck, locus typicus

Abstract: In this work, the results of all historical and current studies on the aculeate fauna of the Lahn Valley near Weilburg (Hesse) are presented. The historical work was carried out from 1845 by the famous Hymenoptera researcher Adolph Schenck (1803–1878) and in the middle of the 20th century by the hymenopterologist Heinrich Wolf (1924–2020). The current investigations have been taking place since 2004. A total of 572 species were recorded near Weilburg over a period of 178 years: 316 bee species and 256 aculeate wasp species. A large proportion (about 42 % of these species) could not currently be detected. This result indicates the real extent of the generally observed decline in species diversity, as this is a very specific local and not a natural or country-wide observation. In such studies (e. g. when compiling Red Lists), the loss of species in different localities is balanced out in each case, resulting in an even more tolerable extent of the recorded species decline. When discussing the results, the decline and large-scale land consumption of natural and cultural landscapes near Weilburg as the main cause of the decline in biodiversity becomes clear in an exemplary and concrete manner. Weilburg is the *locus typicus* for 25 species of aculeates (22 bee species) with valid name described by Adolph Schenck.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	148
2	Untersuchungsgebiete	148
3	Methoden und Darstellungshinweise	152
4	Ergebnisse	153
5	Bemerkenswerte Arten	166
6	Diskussion	171
7	Danksagung	175
8	Literatur	175

1 Einleitung

Das Lahntal bei Weilburg ist in Bezug auf Stechimmen in einem bemerkenswert langen Zeitraum untersucht worden. Der berühmte Hymenopterenforscher Adolph Schenck (1803–1878) lebte über 30 Jahre bis zu seinem Tod in Weilburg a. d. Lahn und veröffentlichte seine wesentlichen Schriften in den Jahrbüchern des Vereins für Naturkunde im Herzogthum Nassau, später Nassauischer Verein für Naturkunde (WOLF 1968; NIX 2021). Für eine Vielzahl der von ihm beschriebenen Stechimmen mit heute gültigen Namen ist Weilburg der *locus typicus* (vgl. auch EBMER 1975). Mitte des 20. Jahrhunderts war es der Hymenopterologe Heinrich Wolf (1924–2020), der die Gebiete um Weilburg intensiv untersuchte (WOLF 1956, 1959a, 1959b, EN). Seine Begehungen erfolgten im Wesentlichen 1949–1950, aber auch später noch mehrmals (Wolf EN; FROMMER 2021). Seit 1996 untersucht der Erstautor das Lahntal und seine Umgebung (FROMMER 2006, 2020) und seit 2004 auch das Lahntal bei Weilburg. Seit 2011 kam es durch den glücklichen Umstand des Wohnorts des Zweitautors in Weilburg zu einer intensiven Bearbeitung des Gebiets. Infolge dieses nur selten realisierbaren Untersuchungskontinuums mit hoher Erfassungsintensität im Lahntal bei Weilburg seit der Mitte des 19. Jahrhunderts sind wertvolle Schlüsse über Veränderungen der Stechimmenfauna in diesem Gebiet seit der ausgehenden „kleinen Eiszeit“ bis zum Beginn der rezenten anthropogenen Klimaerwärmung möglich. Dabei wird die Rolle des Lahntals in einem biogeographischen Gesamtzusammenhang als Teil der nördlichen Arealgrenze für wärmeliebende Stechimmen deutlich.

2 Untersuchungsgebiete

Besonderheiten der Weilburger Topographie

Die Landschaft der Stadt Weilburg und ihre unmittelbare Umgebung wird durch den Flusslauf der Lahn geprägt, der sich durch die geologischen Formationen des

Rheinischen Schiefergebirges windet. Er hat sich hier in den letzten Millionen Jahren durch Hebung des gesamten umliegenden Gebietes um etwa 200 m in die Landschaft eingefressen. Dabei hat der Fluss in verschiedenen zeitlichen Abständen je nach Beschaffenheit terrassenartige Geländeformen geschaffen mit kiesigen und sandigen Hochflächen, Felspartien, Steilhängen und Aufschüttungen durch Auenlehm. Die durch den Fluss freigelegten Felsen sind teilweise Eruptivgestein, Flaserkalk, „Lahnmarmor“ und Kalkknotenschiefer in vielfältiger und kleinräumiger Abwechslung. In den letzten 100 Jahren sind die Felspartien durch starken Bewuchs größtenteils verschwunden. Das Lahngebiet ist zwischen Limburg und Weilburg als FFH-Gebiet (Flora-Fauna-Habitat) „Lahntal und seine Hänge“ unter europäischem Schutz als Natura 2000 Gebiet ausgewiesen. Da die Lahn um Weilburg an vielen Stellen von Ost nach West fließt, existieren hier exponierte Stellen, die besonders xerotherm geprägt sind. Die Kernstadt von Weilburg selbst befindet sich auf einem von der Lahn umflossenen Felssattel aus hartem Eruptivgestein, auf dem sich die Schlossanlage und die Altstadt befinden. An exponierten, nach Süden ausgerichteten bis 60 m hohen Hängen wurde auf terrassenförmigen Bändern früher und heute Wein angebaut. Die Landschaft wurde damals zum Unterhalt und Versorgung des Schlosses und der Bürger der Stadt genutzt.

Historische Sammelorte von Adolph Schenck

Auf Bildern des 19. Jahrhunderts erkennt man, dass die Lahnhänge um Weilburg weitgehend noch ohne Verbuschung waren. Sie wurden terrassenförmig zum Weinanbau, Obstanbau und als Weidewiesen genutzt, soweit kein Fels anstand. Besonders die Hänge oberhalb des Odersbacher Wegs wurden so genutzt, weil sie den ganzen Tag in der Sonne lagen und durch das Tal mit dem Fluss ein besonderes xerothermes Klima boten. Weitere Gebiete mit ähnlichen Frei-Flächen existierten am Schellhofskopf, am Gänsberg (vgl. Abb. 1) und oberhalb des Ahäuser Wegs (Straße zwischen Weilburg und Ahausen). Diese vier Stellen waren für A. Schenck fußläufig erreichbar.

Sammelorte von Heinrich Wolf

WOLF (1956) schreibt, dass zu seiner Untersuchungszeit nur noch die Odersbacher Terrasse und die Trockentälchen am Schellhofskopf eine ergiebige Hymenopteren-Fauna aufwiesen. Auf historischen Landschafts-Bildern ist zu erkennen, dass bereits zu dieser Zeit eine starke Verbuschung der noch von Schenck erwähnten Stellen eingesetzt hatte.

Aktuelle Sammel- und Fundstellen bei Weilburg (vgl. Abb. 1)

Odersbacher Terrasse, Odersbacher Lahnhänge: Hanggebiet rechts der Lahn zwischen Weilburg und Odersbach ca. 3 Kilometer lang. Die Hangfläche im Weilburger Stadtteil Odersbach, mit den Geodaten 50.475502, 8.249692, ist der von den Autoren am längsten und intensivsten bearbeitete Bereich, im Jahr 2006 noch eine



Abbildung 1: Aktuelle Untersuchungsgebiete bei Weilburg (Google Earth).
Figure 1: Current study areas near Weilburg (Google Earth).

von Baum- und Strauchbewuchs freie kleine Fläche, auf der winzige blühende Restbestände von *Potentilla verna* vorkamen. In der Folgezeit konnte diese Fläche durch vielfache Entbuschungsarbeiten und Pflegemaßnahmen unter der Regie des Zweitautors erheblich erweitert werden (Abb. 2). Dabei wurden jährlich kleine Erweiterungsflächen in Angriff genommen, da die Stockausschläge auf der gesamten bisher gepflegten Fläche entfernt werden mussten. Es traten Flächen zutage, die auf einen ehemaligen Weinanbau schließen lassen (Abb. 3). Außerdem wurden Felspartien, die sich im mittleren Bereich der Gesamtfläche befinden, vom beschattenden Baumbestand freigestellt. Im Jahr 2020 erfolgte die Herstellung von zwei kleinen Steilflächen im Auenlehm (Abb. 2). Im Jahr 2024 verfügte die Obere Naturschutzbehörde die Durchführung eines Wertigkeitsgutachtens der im Eigentum der Stadt Weilburg befindlichen Odersbacher Terrasse mit dem Ziel, das Gebiet als Naturschutzgebiet auszuweisen.



Abbildung 2: Pflegemaßnahmen an den Odersbacher Lahnhängen. Das völlig zugewachsene und verbuschte Gelände wird seit mehreren Jahren wieder freigelegt; Foto: K. Klenke, März 2025.

Figure 2: Maintenance work on the Odersbach Lahn slopes. The completely overgrown and bushy terrain has been cleared for several years; photo: K. Klenke, March 2025.

Weinberg Kirschhofen: Neu angelegter Wingert in Weilburg OT Kirschhofen mit den Geodaten 50.470768, 8.243180, der sich als Terrasse unmittelbar im Nahbereich oberhalb links des Flusslaufs der Lahn befindet.

Waldhäuser Weg: Hausgarten des Zweitautors in der Kernstadt mit den Geodaten 50.29325, 8.15462. Der Garten zeichnet sich durch die Anlage von Lehmsteilwän-

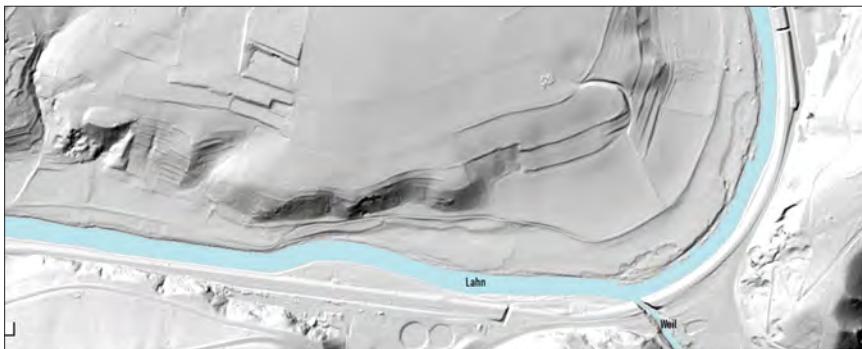


Abbildung 3: Bodenrelief der Odersbacher Lahnhänge. Deutlich erkennt man die Terrassen der ehemaligen Weinberge. Datenbereitstellung: HLNUG.

Figure 3: Soil relief of the Odersbach Lahn slopes. The terraces of the former vineyards are clearly visible. Data provided by: HLNUG.

den, diverse Nisthilfen, einen Trockenhang und die Bepflanzung mit speziellen Pollenpflanzen für Stechimmen aus. Die darin befindliche Wiese wird extensiv bewirtschaftet.

Stechimmenmonitoring Kernstadt Weilburg: *Bereich 1* mit den Geodaten 50.485775, 8.280585 liegt schwerpunktmäßig gegenüber der Stelle, die H. Wolf als ein Trockentälchen am Schellhofskopf beschrieben hat und eine ähnliche Landschafts- und Vegetationsstruktur aufweist. *Bereich 2* mit den Geodaten 50.480573, 8.278600 beinhaltet einen kleinen Erholungspark und nach Süden geneigte Hangflächen an einer angrenzenden Wohnstraße. *Bereich 3* mit den Geodaten 50.481181, 8.285595 besteht aus Freiflächen, die ebenfalls nach Süden geneigt sind und entlang einer Wohnstraße liegen. *Bereich 4* mit den Geodaten 50.485741, 8.283986 liegt östlich vom *Bereich 1* in unmittelbarer Nähe und beinhaltet Wiesen- und Straßenrandbereiche, die ebenfalls nach Süden leicht abfallen.

3 Methoden und Darstellungshinweise

Abkürzungen: EN = unpublizierte „Entomologische Notizen“ Heinrich Wolf, SC = Schenck, WO = Wolf, FR = Frommer, KL = Klenke, leg. = legit (lat.) = er/sie hat gesammelt, coll. = collectio (lat.) = Sammlung, vid. = vidit (lat.) = er/sie hat gesehen, confirm. = confirmavit (lat.) = er/ sie hat bestätigt, l. c. = locus citatus (lat.) = (schon) zitiert Orts, d. h. an anderen Orten (vorher) zitiert, s. l. = sensu lato (lat.) = im weiteren Sinne, s. str. = sensu stricto (lat.) = im engeren Sinne, RL = Rote Liste, D = Deutschland, He = Hessen, Hf = Handfang, Gs = Gelbschale, Ms = Malaisezelt, Zu = Zucht aus Trapnest/Rubus/Phragmites, nn = Vorkommen

unbekannt, OT = Ortsteil, FO = Fundort, OL = Odersbacher Lahnhänge, WW = Hausgarten am Waldhäuser Weg, KS = Kernstadt, KB1 – KB4 = Untersuchungsbereiche Kernstadt Stechimmenmonitoring, KH = Weinberg bei OT Kirschhofen, OÖLM = Oberösterreichische Landesmuseen, Linz, Biologiezentrum.

Untersuchungen: Odersbacher Lahnhänge: 2004–2010: Hf; 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2022: Hf, Gs, Ms, Zu; Weinberg Kirschhofen 2023: Hf, Gs, Ms; Waldhäuser Weg: ab 2011 Hf, Gs. Stechimmenmonitoring im Kernstädtebereich durch Noel Silló an fünf Begehungstagen 2022 (BURGER, DIESTELHORST & SILLÓ 2022).

Bearbeitung: Determinierung (sowie Taxonomie- und Nomenklaturanwendung) durch Erstautor hauptsächlich mit Literatur angegeben in RL Hessen (TISCHENDORF et al. 2009; TISCHENDORF, FROMMER & FLÜGEL 2011; TISCHENDORF et al. 2013; FROMMER, TISCHENDORF & FLÜGEL 2017; FROMMER & TISCHENDORF 2021; FROMMER & TISCHENDORF 2024). Synonymisierung der Gattungs- und Artnamen in den Schenck'schen Schriften: Bienen nach SCHWARZ et al. 1996, Grabwespen nach BLÖSCH 2001, Goldwespen nach LINSENMAIER 1997, Faltenwespen nach BLÜTHGEN 1961, Wegwespen hauptsächlich nach GBIF.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind komprimiert in Tabelle 1 für die Anthophila (Wildbienen) und in Tabelle 2 für die aculeaten Wespen zusammengefasst.

Tabelle 1: Anthophila, Wildbienen

Table 1: Anthophila, Wild bees

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Pollenpflanze/ Larvennahrung/Wirt
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	
Familie Andrenidae										
<i>Andrena agilissima</i> (Scopoli 1770)			3	3	X			X		Brassicaceae
<i>Andrena afkenella</i> Perkins 1914		*	V	X			X	N		polylektisch
<i>Andrena angustior</i> (Kirby 1802)		*	*					1853		polylektisch
<i>Andrena apicata</i> Smith 1847		*	G				X	X	X	Salicaceae, <i>Salix</i>
<i>Andrena barbilabris</i> (Kirby 1802)		G	V					1868		polylektisch
<i>Andrena bicolor</i> Fabricius 1775		*	*		X	X	X	X	X	polylektisch, 2. Gen. <i>Campan.</i>
<i>Andrena chrysopyga</i> Schenck 1853	0	2						1956		polylektisch
<i>Andrena chrysosceles</i> (Kirby 1802)		*	*		X		X	X	X	polylektisch
<i>Andrena cineraria</i> (Linnaeus 1758)		*	*	X	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena clarkella</i> (Kirby 1802)		*	*					X	1956	Salicaceae, <i>Salix</i>
<i>Andrena coitana</i> (Kirby 1802)		G	3				X	1956		polylektisch
<i>Andrena combinata</i> (Christ 1791)	3	3					X	1956		polylektisch
<i>Andrena curvungula</i> Thomson 1870	3	3	X				X	X		Campanulaceae

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Pollenpflanze/
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Larvennahrung/Wirt
<i>Andrena decipiens</i> Schenck 1861			0	2				X	1956	polylektisch
<i>Andrena denticulata</i> (Kirby 1802)			3	V				X	1956	Asteraceae
<i>Andrena distinguenda</i> Schenck 1871			G	G				1871		Brassicaceae
<i>Andrena dorsata</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena falsifica</i> Perkins 1915			*	*				N	1956	polylektisch
<i>Andrena ferox</i> Smith 1847			1	2				1868		<i>Quercus</i> , <i>Aceraceae</i>
<i>Andrena flavipes</i> Panzer 1799			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena flora</i> Fabricius 1793			*	*	X			X	X	<i>Bryonia dioica</i>
<i>Andrena floricola</i> Eversmann 1852			0	2				1874		Brassicaceae
<i>Andrena fucata</i> Smith 1847			*	*				X	1956	polylektisch
<i>Andrena fulva</i> (O.T. Müller 1766)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena fulvida</i> Schenck 1853			G	3				X	1956	polylektisch
<i>Andrena fucata</i> Smith 1847			*	*				1871		polylektisch
<i>Andrena fulvago</i> (Christ 1791)			3	3	X	X			X	Asteraceae
<i>Andrena gravida</i> Imhoff 1832			*	*	X	X				polylektisch
<i>Andrena haemorrhoa</i> (Fabricius 1781)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena hattorfiana</i> (Fabricius 1775)			V	3	X	X		X	X	Dipsacaceae, <i>Knautia arvensis</i>
<i>Andrena helvola</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Andrena humilis</i> Imhoff 1832			V	V	X	X	X	X	X	Asteraceae
<i>Andrena hypopila</i> Schmiedeknecht 1883			0	2				1871		eingeschränkt polylektisch
<i>Andrena labialis</i> (Kirby 1802)			V	V	X			X	X	Fabaceae
<i>Andrena labiata</i> Fabricius 1781			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena lagopus</i> (Latreille 1809)			*	*	X	X				Brassicaceae
<i>Andrena lapponica</i> Zetterstedt 1838			V	V				X	1956	Ericaceae
<i>Andrena lathyri</i> Alflen 1899			*	*	X			N	X	Fabaceae, <i>Vicia</i> , <i>Lathyrus</i>
<i>Andrena lepida</i> Schenck 1861			0	0				1861		polylektisch
<i>Andrena marginata</i> Fabricius 1776			1	2				1861		Dipsacaceae, <i>Scabiosa columb.</i>
<i>Andrena minutula</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena minutuloides</i> Perkins 1914			*	*	X	X	X	N	X	polylektisch
<i>Andrena nana</i> (Kirby 1802)			0	3				X	1956	polylektisch
<i>Andrena nigraeana</i> (Kirby 1802)			*	*		X		X	X	polylektisch
<i>Andrena nitida</i> (Müller 1776)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Andrena nitidiuscula</i> Schenck 1853			3	3				X	1956	Apiaceae, <i>Daucus carota</i>
<i>Andrena ovatula</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena pandellei</i> Pérez 1895			3	3		X	X	N		Campanulaceae
<i>Andrena pilipes</i> Fabricius 1781			*	3				X	1956	polylektisch
<i>Andrena potentillae</i> Panzer 1809			2	2					1950 ^a	Rosaceae, <i>Potentilla verna</i>
<i>Andrena praecox</i> (Scopoli 1763)			*	*	X	X	X	X	X	Salicaceae, <i>Salix</i>
<i>Andrena proxima</i> (Kirby 1802)			*	*			X	X	X	Apiaceae
<i>Andrena rosae</i> Panzer 1801			1	3			X	X	X	Apiaceae
<i>Andrena ruficrus</i> Nylander 1848			G	G					1956	Salicaceae, <i>Salix</i>
<i>Andrena schencki</i> Morawitz 1866			1	2				X	1956	polylektisch
<i>Andrena scotica</i> Perkins 1916			*	*		X	X	X	X	polylektisch
<i>Andrena semilaevia</i> Pérez 1903			*	G		X		N		polylektisch
<i>Andrena strohmella</i> Stoeckhert 1928			*	*	X	X	X	N		polylektisch
<i>Andrena subopaca</i> Nylander 1848			*	*	X	X	X		X	polylektisch
<i>Andrena thoracica</i> (Fabricius 1775)			♦	2				X	1956	polylektisch
<i>Andrena tibialis</i> (Kirby 1802)			*	*				X	1956	polylektisch

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Pollenpflanze/ Larvennahrung/Wirt
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	
<i>Andrena tscheki</i> Morawitz 1872			1	3						1956 Brassicaceae
<i>Andrena vaga</i> Panzer 1799			*	*		X		X	X	Salicaceae, <i>Salix</i>
<i>Andrena varians</i> (Kirby 1802)			*	*				X		polylektisch
<i>Andrena viridescens</i> Viereck 1916			V	V		X	X	X		<i>Veronica (chamaedris)</i>
<i>Andrena wilkella</i> (Kirby 1802)			*	*				X		Fabaceae
<i>Panurgus banksianus</i> (Kirby 1802)			V	*						1956 Asteraceae
<i>Panurgus calcaratus</i> (Scopoli 1763)			*	*				X		1956 Asteraceae
<i>Panurgus dentipes</i> Latreille 1811			3	3				X		1956 Asteraceae
Familie Apidae										
<i>Ammobates punctatus</i> (Fabricius 1804)			1	2				X	1956	P. bei <i>Anthophora bimaculata</i>
<i>Anthophora aestivalis</i> (Panzer 1801)			V	3	X			X	X	polylektisch
<i>Anthophora furcata</i> (Panzer 1798)			*	V		X		X	X	Lamiaceae (<i>Stachys</i> spp.)
<i>Anthophora plumipes</i> (Pallas 1772)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Anthophora quadrimaculata</i> (Panzer 1798)			3	V	X			X	X	polylektisch
<i>Anthophora retusa</i> (Linnaeus 1758)			*	V						1956 polylektisch
<i>Biastes emarginatus</i> (Schenck 1853)			0	2					1875	P. bei <i>Rophites algirus</i> u. a.
<i>Bombus confusus</i> Schenck 1861			0	0				X		1956 polylektisch
<i>Bombus distinguendus</i> Morawitz 1869			1	2				X		1956 polylektisch
<i>Bombus hortorum</i> (Linnaeus 1761)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Bombus humilis</i> Illiger 1806			3	3	X			X	X	polylektisch
<i>Bombus hypnorum</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X			X	X	polylektisch
<i>Bombus lapidarius</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Bombus lucorum</i> (Linnaeus 1761)			*	*		X		X	X	polylektisch
<i>Bombus muscorum</i> (Linnaeus 1758)			2	2				X		1956 polylektisch
<i>Bombus pascuorum</i> (Scopoli 1763)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Bombus pomorum</i> (Panzer 1805)			0	2				X		1956 polylektisch
<i>Bombus pratorum</i> (Linnaeus 1761)			*	*	X			X	X	polylektisch
<i>Bombus ruderarius</i> (Müller 1776)			2	3				X		1956 polylektisch
<i>Bombus ruderatus</i> (Fabricius 1775)			0	D				X		1956 polylektisch
<i>Bombus soroeensis</i> (Fabricius 1776)			*	V		X		X	X	polylektisch
<i>Bombus subterraneus</i> (Linnaeus 1758)			2	2					1874	polylektisch
<i>Bombus sylvarum</i> (Linnaeus 1761)			V	V	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Bombus terrestris</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Bombus veteranus</i> (Fabricius 1793)			1	3				X		1956 polylektisch
<i>Bombus wurflenii</i> Radoszkowski 1859			3	V				X		1956 polylektisch
<i>Bombus (Psithyrus) barbutellus</i> (Kirby 1802)			*	*		X		X	X	P. bei <i>Bombus hortorum</i>
<i>Bombus (Psithyrus) bohemicus</i> Seidl 1838			*	*				X		1956 P. bei <i>Bombus lucorum</i>
<i>Bombus (Psithyrus) campestris</i> (Panzer 1801)			*	*		X	X	X	X	P. bei <i>Bombus pascuorum</i>
<i>Bombus (Psithyrus) quadricolor</i> (Lepeletier 1832)			0	2					1851	P. bei <i>Bombus soroeensis</i>
<i>Bombus (Psithyrus) rupestris</i> (Fabricius 1793)			*	*				X		1956 P. bei <i>Bombus lapidarius</i>
<i>Bombus (Psithyrus) sylvestris</i> (Lepeletier 1832)			*	*			X	X	X	P. bei <i>Bombus pratorum</i>
<i>Bombus (Psithyrus) vestalis</i> (Geoffroy 1785)			*	*	X	X	X	X	X	P. bei <i>Bombus terrestris</i>
<i>Ceratina chalybea</i> Chevrier 1872			3	3	X	X		X		polylektisch
<i>Ceratina cucurbitina</i> (Rossi 1792)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Ceratina cyanea</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Epeoloides coecutiens</i> (Fabricius 1775)			G	*		X	X	X	X	P. bei <i>Macropis</i>
<i>Epeolus variegatus</i> (Linnaeus 1758)			*	V		X		X	X	P. bei <i>Colletes</i>
<i>Eucera longicornis</i> (Linnaeus 1758)			*	V						1956 Fabaceae (<i>Vicia</i> , u.a.)

Tabelle 1: Fortsetzung
Table 1: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Pollenpflanze/
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Larvennahrung/Wirt
<i>Eucera nigrescens</i> Pérez 1879			*	*	X	X	X	X	X	Fabaceae (<i>Vicia sepium</i> , u.a.)
<i>Melecta albifrons</i> (Forster 1771)			*	*	X			X	X	P. bei <i>Anthophora (plumipes)</i>
<i>Melecta luctuosa</i> (Scopoli 1770)			3	3				X	1956	P. bei <i>Anthophora (aestivalis)</i>
<i>Nomada armata</i> Herrich-Schäffer 1839			3	3				X	1956	P. bei <i>Andrena hattorfiana</i>
<i>Nomada atroscutellaris</i> Strand 1921			V	V				N	1959	P. bei <i>Andrena viridescens</i>
<i>Nomada bifasciata</i> Olivier 1811			*	*	X		X			P. bei <i>Andrena gravida</i>
<i>Nomada brauniana</i> Schmiedeknecht 1882			1	1	X					P. bei <i>A. pandellei/curvungula</i>
<i>Nomada marginata</i> Morawitz 1877			3	*				N	1956	P. bei <i>Melitta haemorrhoidalis</i>
<i>Nomada fabriciana</i> (Linnaeus 1767)			*	*		X		X	X	P. bei <i>Andrena bicolor</i> u. a.
<i>Nomada facilis</i> Schwarz 1967			2	G				N	1967	P. bei <i>Andrena fulvago</i>
<i>Nomada ferruginata</i> (Linnaeus 1767)			*	*		X		X	X	P. bei <i>Andrena praecox</i>
<i>Nomada flava</i> Panzer 1798			*	*	X	X		X	X	P. bei <i>Andrena nitida</i> u. a.
<i>Nomada flavoguttata</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	P. bei <i>Andrena minutula</i> u. a.
<i>Nomada flavopicta</i> (Kirby 1802)			V	*				X	1956	P. bei <i>Melitta leporina</i>
<i>Nomada fucata</i> Panzer 1798			*	*	X	X		X	X	P. bei <i>Andrena flavipes</i>
<i>Nomada fulvicornis</i> Fabricius 1793			*	*				X	1956	P. bei <i>Andrena pilipes</i> u. a.
<i>Nomada fuscicornis</i> Nylander 1848			*	*				X	1956	P. bei <i>Panurgus calcaratus</i>
<i>Nomada furva</i> Panzer 1798			2	D				X	1956	P. bei <i>Lasioglossum- Arten</i>
<i>Nomada goodeniana</i> (Kirby 1802) ⁸			*	*	X	X	X		X	P. bei <i>Andrena cineraria</i> u. a.
<i>Nomada guttulata</i> (Schenck 1861)			V	*				X	1956	P. bei <i>Andrena labiata</i>
<i>Nomada integrata</i> Brullé 1832			V	G				1868		P. bei <i>Andrena humilis</i>
<i>Nomada latiburiana</i> (Kirby 1802)			*	*	X			X	X	P. bei <i>Andrena cineraria</i> u. a.
<i>Nomada leucophtalma</i> (Kirby 1802)			*	*				X	1956	P. bei <i>Andrena clarkella</i>
<i>Nomada marshamella</i> (Kirby 1802)			*	*	X			X	X	P. bei <i>Andrena scotica</i>
<i>Nomada panzeri</i> Lepeletier 1841			*	*				1868		P. bei <i>Andrena varians- Gruppe</i>
<i>Nomada rhenana</i> Morawitz 1872			0	G				X	1956	P. bei <i>Andrena ovatula</i>
<i>Nomada roberjeotiana</i> Panzer 1799			0	G				X	1956	P. bei <i>Andrena denticulata</i>
<i>Nomada ruficornis</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X		X	X	X	P. bei <i>Andrena haemorrhoa</i>
<i>Nomada rufipes</i> Fabricius 1793			V	V				X	1956	P. bei <i>Andrena fuscipes</i>
<i>Nomada sexfasciata</i> Panzer 1799			*	*				X	1956	P. bei <i>Eucera nigrescens</i>
<i>Nomada sheppardana</i> (Kirby 1802)			*	*		X				P. bei <i>Lasioglossum Arten</i>
<i>Nomada signata</i> Jurine 1807			*	*	X			X	X	P. bei <i>Andrena fulva</i>
<i>Nomada stigma</i> Fabricius 1804			3	*				X	1956	P. bei <i>Andrena labialis</i>
<i>Nomada striata</i> Fabricius 1793			*	*				X	1956	P. bei <i>Andrena ovatula-Gruppe</i>
<i>Nomada succincta</i> Panzer 1798 ⁸			*	*				1868		P. bei <i>Andrena nitida</i>
<i>Nomada villosa</i> Thomson 1870			G	G				X	1956	P. bei <i>Andrena lathyri</i>
<i>Nomada zonata</i> Panzer 1798			*	V		X		X	X	P. bei <i>Andrena dorsata</i>
<i>Thyreus orbatus</i> (Lepeletier 1841)			1	2				X	1956	P. bei <i>Anthoph. quadrimaculata</i>
<i>Xylocopa violacea</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
Familie Colletidae										
<i>Colletes cunicularius</i> (Linnaeus 1761)			*	*	X	X		X	X	polylektisch (<i>Salix</i>)
<i>Colletes daviesanus</i> Smith 1846			*	*		X		X	X	Asteraceae (<i>Tanacetum</i>)
<i>Colletes fodiens</i> (Geoffroy 1785)			*	3				1853		Asteraceae (<i>Tanacetum</i>)
<i>Colletes hederae</i> Schmidt & Westrich 1993			*	*	X			N	N	Araliaceae (<i>Hedera helix</i>)
<i>Colletes similis</i> Schenck 1853			*	*	X	X		X	X	Asteraceae (<i>Tanacetum</i>)
<i>Colletes succinctus</i> (Linnaeus 1758)			3	V				1868		Ericaceae (<i>Calluna vulgaris</i>)
<i>Hylaeus angustatus</i> (Schenck 1861)			*	*				X	1956	polylektisch
<i>Hylaeus annularis</i> (Kirby 1802)			*	*				1868		polylektisch

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Gattung	Art	Autor	RL		WEL aktuell			historisch		Pollenpflanze/ Larvennahrung/Wirt
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	
<i>Hylaeus brevicornis</i> Nylander 1852			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Hylaeus clypearis</i> (Schenck 1853)			*	*				X	1956	polylektisch
<i>Hylaeus communis</i> Nylander 1852			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Hylaeus confusus</i> Nylander 1852			D	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Hylaeus difformis</i> (Eversmann 1852)			*	*	X	X	X			polylektisch
<i>Hylaeus dilatatus</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Hylaeus gibbus</i> Saunders 1850			D	*			X	X	X	polylektisch
<i>Hylaeus gredleri</i> Förster 1871			*	*	X	X		X		polylektisch
<i>Hylaeus hyalinatus</i> Smith 1842			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Hylaeus leptocephalus</i> (Morawitz 1870)			*	*		X			X	polylektisch
<i>Hylaeus nigritus</i> (Fabricius 1798)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Hylaeus paulus</i> Bridwell 1919			D	*		X		N		polylektisch
<i>Hylaeus pictipes</i> Nylander 1852			*	*				X	1956	polylektisch
<i>Hylaeus punctatus</i> (Brullé 1832)			*	*	X					polylektisch
<i>Hylaeus punctulatissimus</i> Smith 1842			G	G				X	1956	<i>Allium</i> spp.
<i>Hylaeus signatus</i> (Panzer 1798)			*	*	X			X	X	<i>Reseda</i> spp.
<i>Hylaeus sinuatus</i> (Schenck 1853)			*	*				X	1956	polylektisch
<i>Hylaeus styriacus</i> Förster 1871			*	*	X	X			X	polylektisch
<i>Hylaeus variegatus</i> (Fabricius 1798)			*	V		X		X	X	polylektisch
Familie Halictidae										
<i>Dufourea dentiventris</i> (Nylander 1848)			V	3				X	1956	Campanulaceae
<i>Dufourea inermis</i> (Nylander 1848)			2	V				X	1956	Campanulaceae
<i>Dufourea minuta</i> Lepetier 1841			2	3				X	1956	Asteraceae
<i>Halictus eurygnathus</i> Blüthgen 1931			G	*		X		X	X	polylektisch
<i>Halictus langobardicus</i> Blüthgen 1944			G	*	X	X		N		polylektisch
<i>Halictus maculatus</i> Smith 1848			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Halictus quadricinctus</i> (Fabricius 1776)			2	3	X			X	X	polylektisch
<i>Halictus rubicundus</i> (Christ 1791)			*	*		X	X	X	X	polylektisch
<i>Halictus scabiosae</i> (Rossi 1790)			*	*	X	X				polylektisch
<i>Halictus sexcinctus</i> (Fabricius 1775)			3	3				X	1956	polylektisch
<i>Halictus simplex</i> Blüthgen 1923			*	*	X	X	X	N		polylektisch
<i>Halictus subauratus</i> (Rossi 1792)			*	*	X			X		polylektisch
<i>Halictus tumulorum</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Lasioglossum albipes</i> (Fabricius 1781)			*	*	X			X	X	polylektisch
<i>Lasioglossum bluethgeni</i> Ebmer 1971			*	G		X		N	N	polylektisch
<i>Lasioglossum brevicorne</i> (Schenck 1868)			3	3					1956	Asteraceae
<i>Lasioglossum breviventre</i> Schenck 1853			0	0				X	1956	polylektisch
<i>Lasioglossum calceatum</i> (Scopoli 1763)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Lasioglossum clypeare</i> (Schenck 1853)			1	2					1875	polylektisch (Lamiaceae)
<i>Lasioglossum convexiusculum</i> Schenck 1853			1	2				X	1956	
<i>Lasioglossum costulatum</i> (Kriechbaumer 1873)			3	3	X				X	Campanulaceae
<i>Lasioglossum fratellum</i> (Pérez 1903)			*	*				N	1956	polylektisch
<i>Lasioglossum fulvicorne</i> (Kirby 1802)			*	*			X	X	X	polylektisch
<i>Lasioglossum interruptum</i> (Panzer 1798)			3	3					1861	polylektisch
<i>Lasioglossum laeve</i> (Kirby 1802)			0	1				X	1956	polylektisch
<i>Lasioglossum laevigatum</i> (Kirby 1802)			3	3	X			X	X	polylektisch
<i>Lasioglossum laticeps</i> (Schenck 1868)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Lasioglossum lativentre</i> (Schenck 1853)			*	V	X		X	X	X	polylektisch

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch	Pollenpflanze/		
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Larvennahrung/Wirt	
<i>Lasioglossum leucopuss</i> (Kirby 1802)			*	*				X	1956	polylektisch	
<i>Lasioglossum leucozonium</i> (Schrank 1781)			*	*	X	X		X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum lucidulum</i> (Schenck 1861)			*	*					1861	polylektisch	
<i>Lasioglossum malachurum</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum marginellum</i> (Schenck 1853)			0	2					1956	polylektisch	
<i>Lasioglossum minutissimum</i> (Kirby 1802)			*	*					1861	polylektisch	
<i>Lasioglossum minutulum</i> (Schenck 1853)			3	3	X		X	X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum morio</i> (Fabricius 1793)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum nitidiusculum</i> (Kirby 1802)			*	V				X	1956	polylektisch	
<i>Lasioglossum nitidulum</i> (s. l.) (Fabricius 1804)			*	*	X			X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum pallens</i> (Brullé 1832)			*	*	X					polylektisch	
<i>Lasioglossum parvulum</i> (Schenck 1853)			*	V				X	1956	polylektisch	
<i>Lasioglossum pauperatum</i> (Brullé 1832)			1	2			X		X	polylektisch (Asteraceae)	
<i>Lasioglossum pauxillum</i> (Schenck 1853)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum politum</i> (Schenck 1853)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum prasinum</i> (Smith 1848)			1	2					1874	polylektisch	
<i>Lasioglossum punctatissimum</i> (Schenck 1853)			*	*			X	X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum pygmaeum</i> (Schenck 1853)			G	G		X	X	X	X ¹	polylektisch	
<i>Lasioglossum quadrinotatum</i> (Kirby 1802)			1	3					X	1956	polylektisch
<i>Lasioglossum quadrisignatum</i> (Schenck 1853)			0	2					1875	polylektisch	
<i>Lasioglossum rufitarse</i> (Zetterstedt 1838)			*	*					1868	polylektisch	
<i>Lasioglossum sabulosum</i> (Warncke 1986)			D	D			X	N	N	polylektisch	
<i>Lasioglossum semilucens</i> (Alfken 1914)			*	*	X		X			polylektisch	
<i>Lasioglossum sexnotatum</i> (Kirby 1802)			3	3	X	X		X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum smethamellum</i> (Kirby 1802)			*	*				X	1949 ³	polylektisch	
<i>Lasioglossum subfasciatum</i> (Imhoff 1832)			0	1				X	1956	polylektisch	
<i>Lasioglossum tricinctum</i> (Schenck 1874)			0	3				X	1956	polylektisch	
<i>Lasioglossum villosum</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch	
<i>Lasioglossum xanthopus</i> (Kirby 1802)			V	*				X	X	polylektisch (<i>Salvia pratensis</i>)	
<i>Lasioglossum zonulum</i> (Smith 1848)			*	*		X	X	X	X	polylektisch	
<i>Rophites quinquepunctatus</i> Spinola 1808			0	3				X	1956	Lamiaceae	
<i>Rhophitoides canus</i> (Eversmann 1852)			3	V					1861	Fabaceae	
<i>Sphecodes albilabris</i> (Fabricius 1793)			*	*		X		X	X	P. bei <i>Colletes cunicularius</i>	
<i>Sphecodes crassus</i> Thomson 1870			*	*		X		X	X	P. bei <i>Lasioglossum pauxillum</i>	
<i>Sphecodes cristatus</i> von Hagens 1882			3	G			X	N		P. bei <i>Halictus subauratus</i>	
<i>Sphecodes ephippius</i> (Linnaeus 1767)			*	*	X	X	X	X	X	P. bei <i>Halictus tumulorum</i>	
<i>Sphecodes ferruginatus</i> von Hagens 1882			*	*	X	X		N	X	P. bei <i>L. morio</i> u. <i>L. leucopuss</i>	
<i>Sphecodes geoffrellus</i> (Kirby 1802)			*	*		X		X	X	P. bei <i>Lasiogl. pauxillum</i> u.a.	
<i>Sphecodes gibbus</i> (Linnaeus 1758)			*	*				X	1956	P. bei <i>Halictus-Arten</i>	
<i>Sphecodes hyalinatus</i> von Hagens 1882			*	*		X		N	X	P. bei <i>Lasioglossum fulvicorne</i>	
<i>Sphecodes longulus</i> von Hagens 1882			*	*			X	N	X	P. bei <i>Lasiogl. minutissimum</i>	
<i>Sphecodes miniatus</i> von Hagens 1882			*	*				N	1956	P. bei <i>Lasiogl. (nitidiusculum)</i>	
<i>Sphecodes monilicornis</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X		X	X	P. bei <i>Halictus</i> u. <i>Lasioglossum</i>	
<i>Sphecodes niger</i> von Hagens 1874			*	*		X			X	P. bei <i>Lasioglossum morio</i>	
<i>Sphecodes pellucidus</i> Smith 1845			G	V				X	1956	P. bei <i>Andrena barbilabris</i>	
<i>Sphecodes pseudofasciatus</i> Blüthgen 1925			♦	D		X		N	N	P. bei <i>L. glabriusc. /politum</i>	
<i>Sphecodes puncticeps</i> Thomson 1870			*	*		X			X	P. bei <i>Lasiogl. villosulum</i>	
<i>Sphecodes reticulatus</i> Thomson 1870			*	*				X	1956	P. bei <i>Andrena barbilabris</i>	

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Pollenpflanze/ Larvennahrung/Wirt
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	
<i>Sphecodes rubicundus</i> von Hagens 1875			G	3				X	1956	P. bei <i>Andrena labialis</i>
<i>Sphecodes rufiventris</i> (Panzer 1798)			*	*				X	1956	P. bei <i>Halictus maculatus</i>
Familie Megachilidae										
<i>Anthidium byssinum</i> (Panzer 1798)			3	3				X	1956	Fabaceae
<i>Anthidium manicatum</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X			X	X	polylektisch (z.B. Fabaceae)
<i>Anthidium nanum</i> Mocsáry 1881			3	3				X	1956	Asteraceae
<i>Anthidium oblongatum</i> (Illiger 1806)			V	V	X			X	1956	polylektisch
<i>Anthidium punctatum</i> (Latreille 1809)			V	V				X	1956	polylektisch
<i>Anthidium strigatum</i> (Panzer 1805)			*	V				X	1956	polylektisch (<i>Lotus</i>)
<i>Chelostoma campanularum</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X		X	X	<i>Campanula</i>
<i>Chelostoma distinctum</i> (Stoeckhert 1929)			*	*		X	X	N	X	<i>Campanula</i>
<i>Chelestoma florisonne</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X	X	X	X	<i>Ranunculus</i>
<i>Chelestoma rapunculi</i> (Lepeletier 1841)			*	*	X	X		X	X	<i>Campanula</i>
<i>Coelioxys afra</i> Lepeletier 1841			V	3			X		X ¹	P. bei <i>Megachile pilidens</i>
<i>Coelioxys alata</i> Förster 1853			0	1				1861		P. bei <i>Megachile ligniseca</i>
<i>Coelioxys aurolimbata</i> Förster 1853			G	V				X	1956	P. bei <i>Megachile ericetorum</i>
<i>Coelioxys conica</i> (Linnaeus 1758)			V	V				X	1956	P. bei <i>Anthophora</i> -Arten
<i>Coelioxys conoidea</i> (Illiger 1806)			2	3				X	1956	P. bei <i>M. maritima</i> / <i>lagopoda</i>
<i>Coelioxys echinata</i> Förster 1853			G	*	X					P. bei <i>Megachile rotundata</i>
<i>Coelioxys elongata</i> Lepeletier 1841			V	*	X			X	X	P. bei <i>Megachile willughbiella</i>
<i>Coelioxys inermis</i> (Kirby 1802)			*	*				X	1956	P. bei <i>Megachile centricularis</i>
<i>Coelioxys mandibularis</i> Nylander 1848			*	*		X	X	X	X	P. bei <i>Megachile versicolor</i>
<i>Coelioxys rufescens</i> Lepeletier & Serville 1825			G	V				X	1956	P. bei <i>Anthophora</i> -Arten
<i>Heriades truncorum</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X		X	X	Asteraceae
<i>Megachile alpicola</i> Alfken 1924			*	*		X		N	X	polylektisch
<i>Megachile centricularis</i> (Linnaeus 1758)			*	V	X	X		X	X	polylektisch
<i>Megachile circumcincta</i> (Kirby 1802)			*	V				X	1956	polylektisch
<i>Megachile ericetorum</i> Lepeletier 1841			V	*	X			X	X	Fabaceae (<i>Lathyrus</i>)
<i>Megachile lagopoda</i> (Linnaeus 1761)			1	2				X	1956	polylektisch (Asteraceae)
<i>Megachile leachella</i> Curtis 1828			0	3				X	1956	polylektisch (Fabaceae)
<i>Megachile ligniseca</i> (Kirby 1802)			3	2				X	1956	polylektisch
<i>Megachile maritima</i> (Kirby 1802)			2	3				X	1956	polylektisch
<i>Megachile nigritiventris</i> Schenck 1868			*	*		X				polylektisch (Fabaceae)
<i>Megachile pilidens</i> Alfken 1924			V	3	X		X	N		polylektisch (Fabaceae)
<i>Megachile rotundata</i> (Fabricius 1787)			*	*	X					polylektisch
<i>Megachile versicolor</i> Smith 1844			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Megachile willughbiella</i> (Kirby 1802)			*	*	X			X	X	polylektisch
<i>Osmia adunca</i> (Panzer 1798)			*	*	X	X		X	X	<i>Echium vulgare</i>
<i>Osmia anthocopoides</i> Schenck 1853			2	3				X	1956	<i>Echium vulgare</i>
<i>Osmia aurulenta</i> (Panzer 1799)			*	*	X			X	X	polylektisch
<i>Osmia bicolor</i> (Schrank 1781)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Osmia bicornis</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch
<i>Osmia caerulescens</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Osmia claviventris</i> Thomson 1872			*	*				1861		polylektisch
<i>Osmia cornuta</i> (Latreille 1805)			*	*	X	X		X	X	polylektisch
<i>Osmia leaiana</i> (Kirby 1802)			G	3		X				Asteraceae
<i>Osmia leucomelana</i> (Kirby 1802)			*	*	X	X	X	X	X	polylektisch (<i>Lotus</i>)
<i>Osmia niveata</i> (Fabricius 1804)			3	3	X			X		Asteraceae

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Pollenpflanze/
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Larvennahrung/Wirt
<i>Osmia papaveris</i> (Latreille 1799)			0	2				X	1956	polylektisch
<i>Osmia spinulosa</i> (Kirby 1802)			V	3				X	1956	Asteraceae
<i>Osmia uncinata</i> Gerstäcker 1869			*	G				X	1956	polylektisch
<i>Osmia villosa</i> (Schenck 1853)			2	2				1868		Asteraceae
<i>Osmia xanthomelana</i> (Kirby 1802)			2	2				1861		Fabaceae
<i>Stelis breviuscula</i> (Nylander 1848)			*	*		X		X	X	P. bei <i>Heriades truncorum</i>
<i>Stelis minima</i> (Schenck 1861)			*	*				X	1956	P. bei <i>Chelost. campanularum</i>
<i>Stelis minuta</i> Lepeletier & Serville 1825			*	*		X		X	X	P. bei <i>Osmia leucomelana</i>
<i>Stelis ornata</i> (Klug 1807)			*	*		X	X	X	X	P. bei <i>Osmia</i> -Arten
<i>Stelis phaeoptera</i> (Kirby 1802)			G	3				X	1956	P. bei <i>Osmia niveata/leaiana</i>
<i>Stelis punctulatissima</i> (Kirby 1802)			*	*	X			X	X	P. bei <i>Anthidium</i> -Arten.
<i>Stelis signata</i> (Latreille 1809)			V	3				X	1956	P. bei <i>Anthidium strigatum</i>
Familie Melittidae										
<i>Dasypoda hirtipes</i> (Fabricius 1793)			V	V				X	1956	Asteraceae
<i>Macropis europaea</i> Warncke 1973 ⁹			*	*		X	X	X		<i>Lysimachia</i> (Primulaceae)
<i>Macropis fulvipes</i> (Fabricius 1804)			*	*		X	X	X	X	<i>Lysimachia</i> (Primulaceae)
<i>Melitta haemorrhoidalis</i> (Fabricius 1775)			*	*	X			X	X	Campanulaceae
<i>Melitta leporina</i> (Panzer 1799)			V	*				X	1956	Fabaceae
<i>Melitta nigricans</i> Alfken 1905 ⁹			*	*				X	1956	<i>Lythraceae</i> (<i>Lythrum salicaria</i>)
<i>Melitta tricincta</i> (Kirby 1802)			V	V				1861		<i>Odontites</i> (Scrophulariaceae)

Legende zu den Tabellen 1 und 2**Legend to the tables 1 and 2**

Aktuelle und historische Nachweise von Stechimmen bei Weilburg

Current and historical evidence of aculeates near Weilburg

Nach 1878 beschriebene Arten wurden für SC (und teilweise nach 1956 für WO) mit dem Zeichen „N“ angegeben. Rote Jahreszahl = letzter publizierter Nachweis, roter Autorennname = locus typicus Weilburg, ¹ = EN, ² = confirm. Jacobs, ³ = EN, det. Blüthgen, ⁴ = s. l., ⁵ = OÖLM confirm. FR, ⁶ = 1977 leg. Dumpert in WOLF et al. (2009), ⁷ = coll. Fetzer (Mus. Wiesbaden), ⁸ = Arten, die in A. Schencks Lebenszeit noch nicht getrennt waren, ⁹ = von A. Schenck als distinkte oligolektische Art erkannt, **X** (oder blaue Jahreszahl = Vorkommen in Weilburg anzunehmen. Spalte «Rote Liste»: 0 = ausgestorben oder verschollen, 1 = vom Aussterben bedroht, 2 = stark gefährdet, 3 = gefährdet, G = Gefährdung unbekannten Ausmaßes, R = extrem selten, V = Vorwarnliste, D = Daten unzureichend, * = ungefährdet. Anmerkung: H. Wolf hat über Gold- und Faltenwespen im Lahntal nichts publiziert. Die wenigen Hinweise stammen aus seinen EN.

Tabelle 2: Aculeate Wespen

Table 2: Aculeate wasps

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch	Larvennahrung
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO
Chrysididae – Goldwespen									
<i>Chrysis analis</i> Spinola 1808			*	3				1861	
<i>Chrysis angustula</i> Schenck 1856			*	*		X		X	
<i>Chrysis corsica</i> Valkeila 1971			*	G	X			N	P. bei <i>Symmorphus bifasciatus</i>
<i>Chrysis fasciata</i> Olivier 1790			G	2	X				P. bei <i>Symmorphus gracilis</i>
<i>Chrysis fulgida</i> Linnaeus 1761			*	3		X		X	P. bei <i>Gymnom. laevipes</i>
<i>Chrysis germani</i> Wesmael 1839			2	3				1856	P. bei <i>Symm. crassicorn.</i>
<i>Chrysis gracillima</i> (Förster 1853)			*	V	X	X			P. bei <i>Tachysphex</i>
<i>Chrysis immaculata</i> Buysson 1898			G	G		X		N	P. bei <i>Microdynerus</i>
<i>Chrysis impressa</i> Schenck 1856			*	D				1856	P. bei <i>Allodynerus rossii</i>
<i>Chrysis inaequalis</i> Dahlbom 1845			*	3		X			P. bei <i>Ancistrocerus</i>
<i>Chrysis indigotea</i> Dufour & Perris 1840			G	2	X				P. bei <i>Eumenes coronatus</i>
<i>Chrysis iris</i> Christ 1791			G	2				1856	P. bei <i>Allodynerus rossii</i>
<i>Chrysis leachii</i> Shuckard 1837			nn	2				1861	P. bei <i>Symm. murarius</i>
<i>Chrysis longula</i> Abeille de Perrin 1879			*	3			X	N	P. bei <i>Miscophus</i>
<i>Chrysis mediata</i> Linsenmaier 1951			V	*		X		N	P. bei <i>Ancistroc. antilope</i>
<i>Chrysis radii</i> Shuckard 1836			V	*		X		X	P. bei <i>Odynerus spinipes</i>
<i>Chrysis schencki</i> Linsenmaier 1968			*	G	X			N	P. bei <i>Ancistroc. trifasciatus</i>
<i>Chrysis solida</i> Haupt 1956			*	D		X	X	N	P. bei <i>Ancistrocerus oviventris</i>
<i>Chrysis succincta</i> Linnaeus 1767			nn	G				1861	P. bei <i>Ancistrocerus trifasciatus</i>
<i>Chrysis terminata</i> Dahlbom 1854			*	♦	X	X	X		P. bei <i>unbekanntem Wirt</i>
<i>Chrysis viridula</i> Linnaeus 1761			V	*	X	X	X	X	P. bei <i>gricicornis</i>
<i>Chrysura austriaca</i> (Fabricius 1804)			V	*	X			X	P. bei <i>Osmia adunca</i>
<i>Chrysura trimaculata</i> (Förster 1853)			3	*				1856	P. bei <i>Osmia bicolor</i>
<i>Cleptes semiauratus</i> (Linnaeus 1761)			V	*				1856	P. bei Blattwespenlarven
<i>Hedychridium ardens</i> Coquebert 1801			*	*				X	P. bei <i>Tachysphex</i>
<i>Hedychridium coriaceum</i> (Dahlbom 1854)			*	*				1861	P. bei <i>Linden. albilabris</i>
<i>Hedychridium roseum</i> (Rossi 1790)			*	*		X		X	P. bei <i>Astata boobs</i>
<i>Hedychridium rossicum</i> Gussakovskij 1948			D	*		X		N	P. bei <i>Astata boobs</i>
<i>Hedychrum gerstaeckeri</i> Chevrier 1869			*	*	X	X			X ¹ P. bei <i>Cerceris rybyensis</i>
<i>Hedychrum niemelai</i> Linsenmaier 1959			*	*		X		N	P. bei <i>Cerceris quadrifasciata</i>
<i>Hedychrum nobile</i> (s. str.) (Scopoli 1763)			*	*		X			X ⁴ P. bei <i>Cerceris arenaria</i>
<i>Hedychrum rutilans</i> Dahlbom 1854			*	*				1861	P. bei <i>Philanthus triangulum</i>
<i>Holopyga generosa</i> (Förster 1853)			*	*		X			P. bei <i>Astata boobs</i> üb. Wanzen
<i>Philocetes bidentulus</i> (Lepeletier 1806)			G	*				1856	P. bei <i>Diodontus</i> (?) üb. Blattläuse
<i>Pseudochysis neglecta</i> (Shuckard 1837)			V	*		X		X	P. bei <i>Odynerus spinipes</i>
<i>Pseudomalus auratus</i> (s. str.) (Linnaeus 1758)			*	*		X	X	X ⁴	P. bei <i>Passaloecus</i> üb. Blattläuse
<i>Pseudomalus pusillus</i> (Fabricius 1804)			*	*				1949	P. bei <i>Passaloecus</i> üb. Blattläuse
<i>Pseudomalus triangulifer</i> (Abeille de Perrin 1877)			*	*			X	N	P. bei <i>Passaloecus</i> üb. Blattläuse
<i>Trichrysis cyanea</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X	X	X ¹	P. bei <i>Tropyxylon</i> u.a.
Mutillidae - Ameisenwespen									
<i>Physetopoda scutellaris</i> (Latreille 1792)			2	G		X		X	P. bei unbekannten Wirten
<i>Smicromyrme halensis</i> (Fabricius 1787)			0	2				1857	P. bei diversen Blattläuse
<i>Smicromyrme rufipes</i> (Fabricius 1787)			*	*		X		X	P. bei diversen Grabwespen
Myrmosidae - Trugameisen									
<i>Myrmosa atra</i> Panzer 1801			*	*		X		X	P. bei diversen Grabwespen
Pompilidae - Wegwespen									
<i>Agenioideus apicalis</i> (Vander Linden 1827)			G	2		X			Arten der Gatt. <i>Segestria</i>

Tabelle 2: Fortsetzung

Table 2: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Larvennahrung
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Wirt/Parasitoid
<i>Agenioideus cinctellus</i> (Spinola 1808)			*	*		X	X	X		diverse Springspinnenarten
<i>Agenioideus nubecula</i> (Costa 1874)	3	2						1857		diverse Springspinnenarten
<i>Agenioideus sericeus</i> (Vander Linden 1827)	*	*			X	X	X		X	diverse Spinnenarten
<i>Agenioideus usurarius</i> (Tournier 1899)	*	*			X					diverse Trichterspinnen
<i>Anoplius concinnus</i> (Dahlbom 1843)	3	*						1857		diverse Wolfsspinnenarten
<i>Anoplius infuscatus</i> (Vander Linden 1827)	*	*						1857		diverse Spinnengattungen
<i>Anoplius nigerrimus</i> (Scopoli 1763)	*	*			X	X	X		X	diverse Spinnengattungen
<i>Anoplius viaticus</i> (Linnaeus 1758)	*	*							1930 ⁷	diverse Spinnengattungen
<i>Aporus unicolor</i> Spinola 1808	*	*			X	X	X			Spinnen (<i>Atypus affinis</i>)
<i>Arachnospila anceps</i> (Wesmael 1851)	*	*			X	X	X		X	mehrere Spinnenfamilien
<i>Arachnospila minutula</i> (Dahlbom 1842)	*	*	X		X	X	X			diverse Spinnengattungen
<i>Arachnospila spissa</i> (Schiödte 1837)	*	*			X	X	X			Wolf- und Springspinnen
<i>Arachnospila trivialis</i> (Dahlbom 1843)	*	*			X			X	X	diverse Spinnengattungen
<i>Auplopus albifrons</i> (Dalman 1823)	G	3							1949 ⁹	diverse Spinnengattungen
<i>Auplopus carbonarius</i> (Scopoli 1763)	*	*			X	X	X			diverse Spinnengattungen
<i>Caliadurgus fasciellus</i> (Spinola 1808)	*	*			X		X			diverse Spinnengattungen
<i>Ceropales maculata</i> (Fabricius 1775)	*	*						1857		P. bei anderen Wegwespen
<i>Ceropales variegata</i> (Fabricius 1798)	2	1						1857		P. bei anderen Wegwespen
<i>Cryptocellus notatus</i> (Rossi 1792)	*	*						1857		diverse Spinnengattungen
<i>Cryptocellus versicolor</i> (Scopoli 1763)	*	V						1857		diverse Spinnengattungen
<i>Dipogon bifasciatus</i> (Geoffroy 1785)	*	*						1861		diverse Spinnengattungen
<i>Deuteragenia subintermedia</i> (Magretti 1886)	*	*			X					diverse Spinnengattungen
<i>Deuteragenia variegata</i> (Linnaeus 1758)	*	*			X	X	X			diverse Spinnengattungen
<i>Evagetas alamannicus</i> (Blüthgen 1944)	3	*			X			N		P. bei unbek. Wegwespenarten
<i>Evagetas crassicornis</i> (Shuckard 1845)	*	*			X		X	X		P. bei <i>Arachnospila anceps</i>
<i>Evagetas gibbulus</i> (Lepeletier 1845)	0	3						1861		P. bei <i>Arachnospila</i> , <i>Anoplius</i>
<i>Evagetas pectinipes</i> (Linnaeus 1758)	3	*						1857		P. bei <i>Episyron rufipes</i>
<i>Evagetas siculus</i> (Lepeletier 1845)	*	*						1857		P. bei <i>Aporus unicolor</i>
<i>Pompilus cinereus</i> (Fabricius 1775)	*	*							1977 ⁶	diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis agilis</i> (Shuckard 1837)	*	*						1857		diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis cordivalvata</i> Haupt 1927	*	*			X			N		Spinnen, Gatt. <i>Clubionia</i>
<i>Priocnemis coriacea</i> (Dahlbom 1843)	*	*			X			X		unbek. Beute-Spinnenarten
<i>Priocnemis exaltata</i> (Fabricius 1775)	3	*						1857		diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis fennica</i> Haupt 1927	*	*			X			N		diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis hyalinata</i> (Fabricius 1793)	*	*			X		X			diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis perturbator</i> (Harris 1780)	*	*			X			X		diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis pusilla</i> (Schiödte 1837)	*	*			X				X	diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis schoedtei</i> Haupt 1927	*	*			X			N		diverse Spinnengattungen
<i>Priocnemis vulgaris</i> (Dufour 1841)	3	*						1861		diverse Spinnengattungen
Sapygidae - Keulenwespen										
<i>Monosapyga clavicornis</i> (Linnaeus 1758)	*	*	X		X					P. bei <i>Osmia florisomne</i>
<i>Sapyga quinquepunctata</i> (Fabricius 1781)	3	*						1857		P. bei diversen <i>Osmia</i> Arten
<i>Sapygina decemguttata</i> (Jurine 1807)	*	*	X	X			X			P. bei <i>Osmia truncorum</i>
Sphecidae/Crabronidae/Ampulicidae - Grabwespen										
<i>Alysson tricolor</i> Lepeletier & Serville 1825	D	G					X	1959		Zikaden (Cicadellidae)
<i>Ammophila campestris</i> Latreille 1809	3	*							1959	Blattwespenlarven
<i>Ammophila sabulosa</i> (Linnaeus 1758)	*	*			X		X	X		Nachtfalterraupen
<i>Argogorytes fargei</i> (Shuckard 1837)	2	2							1959	Schaumzikaden

Tabelle 2: Fortsetzung

Table 2: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch	Larvennahrung		
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Wirt/Parasitoid	
<i>Argogorytes mystaceus</i> (Linnaeus 1761)			*	*		X		X	X	Schaumzikaden	
<i>Astata boops</i> (Schrank 1781)			*	*	X		X	X	X	Wanzen	
<i>Astata minor</i> Kohl 1885			V	3		X		N		Erd- und Bodenwanzen	
<i>Cerceris arenaria</i> (Linnaeus 1758)			*	*				X	1959	Rüsselkäfer	
<i>Cerceris interrupta</i> (Panzer 1799)			V	3					1857	Rüsselkäfer	
<i>Cerceris quinquefasciata</i> (Rossi 1792)			V	3		X	X	X	X	Rüsselkäfer	
<i>Cerceris ruficornis</i> (Fabricius 1793)			0	3				X	1959	Rüsselkäfer	
<i>Cerceris rybyensis</i> (Linnaeus 1771)			*	*	X	X	X	X	X	diverse Wildbienenarten	
<i>Crabro cribrarius</i> (Linnaeus 1758)			*	*					1857	mittelgroße Fliegen	
<i>Crossocerus annulipes</i> (Lepeletier & Brullé 1834)			*	*		X	X	X	X	Kleinzikaden, Blattflöhe	
<i>Crossocerus capitosus</i> (Shuckard 1837)			*	*		X		X	X	kleine Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus cetratus</i> (Shuckard 1837)			*	*	X	X		X	X	kleine Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus congener</i> (Dahlbom 1844)			*	*				X	X	kleine Diptera, Tanzfliegen	
<i>Crossocerus dimidiatus</i> (Fabricius 1781)			G	*					X	1959	Fliegen (Diptera)
<i>Crossocerus distinguendus</i> (Morawitz 1866)			*	*	X			X	X	Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus elongatus</i> (Vander Linden 1829)			*	*				X	1959	kleine Fliegen	
<i>Crossocerus exiguis</i> (Vander Linden 1829)			*	*		X			X	Blattläuse	
<i>Crossocerus leucostoma</i> (Linnaeus 1758)			*	*				X	1959	Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus megacephalus</i> (Rossi 1790)			*	*		X		X	X	Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus nigritus</i> (Lepeletier & Brullé 1835)			*	*	X		X			Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus ovalis</i> Lepelletier & Brullé 1835			*	*		X		X	X	kleine Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus podagrarius</i> (Vander Linden 1829)			*	*	X		X	X	X	kleine Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus quadrimaculatus</i> (Fabricius 1793)			*	*	X	X		X	X	Fliegen, Mücken (Diptera)	
<i>Crossocerus vagabundus</i> (Panzer 1798)			*	*	X	X	X	X	X	Fliegen (Diptera)	
<i>Crossocerus varus</i> (Lepeletier & Brullé 1835)			*	*		X		X	X	Fliegen, Mücken (Diptera)	
<i>Crossocerus walkeri</i> (Shuckard 1837)			G	3				X	1959	Eintagsfliegen	
<i>Didineis lunicornis</i> (Fabricius 1798)			V	*				X	1959	Kleinzikaden	
<i>Diodontus luperus</i> Shuckard 1837			*	*		X		X	X	Blattläuse (Aphidiidae)	
<i>Diodontus minutus</i> (Fabricius 1793)			*	*					1861	Maskenblattläuse	
<i>Diodontus tristis</i> (Vander Linden 1829)			*	*			X	X		Blattläuse (Aphidiidae)	
<i>Dolichurus corniculus</i> (Spinola 1808)			*	*		X		X	X	Waldschaben	
<i>Ectemnius borealis</i> (Zetterstedt 1838)			*	*		X		X	X	Fliegen (Diptera)	
<i>Ectemnius cavifrons</i> (Thomson 1870)			*	*				X	1959	Schweb- und Waffenfliegen	
<i>Ectemnius cephalotes</i> (Olivier 1791)			*	*					1857	Fliegen (Diptera)	
<i>Ectemnius continuus</i> (Fabricius 1804)			*	*			X	X	X	Fliegen (Diptera)	
<i>Ectemnius dives</i> (Lepeletier & Brullé 1834)			*	*	X	X		X	X	Fliegen (Diptera)	
<i>Ectemnius fossorius</i> (Linnaeus 1758)			0	1					1857	Fliegen z. B. Syrphidae	
<i>Ectemnius guttatus</i> (Vander Linden 1829)			G	*				X	1959	Fliegen (Muscidae, Syrphidae)	
<i>Ectemnius lapidarius</i> (Panzer 1804)			*	*		X		X	X	Fliegen (meist Syrphidae)	
<i>Ectemnius lituratus</i> (Panzer 1804)			*	*		X		X	X	Fliegen (diverse Diptera)	
<i>Ectemnius rubicola</i> (Dufour & Perris 1840)			*	*		X		X	X	Fliegen (Brachycera)	
<i>Ectemnius ruficornis</i> (Zetterstedt 1838)			*	*					1959	Fliegen (meist Syrphidae)	
<i>Ectemnius sexcinctus</i> (Fabricius 1775)			V	*				X	1959	Fliegen (Brachycera)	
<i>Entomognathus brevis</i> (Vander Linden 1829)			*	*		X		X	X	Blattkäfer (Chrysomelidae)	
<i>Gorytes laticinctus</i> (Lepeletier 1832)			*	*		X		X	X	Zikaden	
<i>Gorytes quadrifasciatus</i> (Fabricius 1793)			G	V				X	1959	Schaumzikaden	
<i>Gorytes quinquecinctus</i> (Fabricius 1804)			V	*				X	1959	Fliegen (Brachycera)	
<i>Harpactus laevis</i> (Latreille 1792)			V	3				X	1959	Kleinzikaden	

Tabelle 2: Fortsetzung

Table 2: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch	Larvennahrung	
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Wirt/Parasitoid
<i>Harpactus lunatus</i> (Dahlbom 1832)			3	*					1959 ³	Kleinziekaden
<i>Harpactus tumidus</i> (Panzer 1801)			2	*				X	1959	Kleinziekaden
<i>Isodontia mexicana</i> (Saussure 1867)			*	*	X					Heuschreckenarten
<i>Lestica clypeata</i> (Schreber 1759)			*	*	X	X	X	X	X	Kleinschmetterlinge
<i>Lestica subterranea</i> (Fabricius 1775)			V	V					1959	Kleinschmetterlinge
<i>Lindenius albilibris</i> (Fabricius 1793)			*	*	X		X	X	X	Blumen- & Weichwanzen
<i>Lindenius panzeri</i> (Vander Linden 1829)			*	*				X	1959	kleine Fliegen (Diptera)
<i>Mellinus arvensis</i> (Linnaeus 1758)			*	*					1857	diverse Fliegen (Diptera)
<i>Mellinus crabroneus</i> (Thunberg 1791)			2	*				X	1959	diverse Fliegen (Diptera)
<i>Mimesa bicolor</i> (Jurine 1807)			V	3				X	1959	Zikaden, auch (?) Blattflöhe
<i>Mimesa equestris</i> (Fabricius 1804)			*	*				X	1959	Kleinziekaden
<i>Mimumesa dahlbomii</i> (Wesmael 1852)			*	*	X	X	X	X	X	Kleinziekaden
<i>Mimumesa unicolor</i> (Vander Linden 1829)			*	*				X	1959	vermutl. Kleinziekaden
<i>Miscophus bicolor</i> Jurine 1807			*	3					1857	diverse Spinnenarten
<i>Miscophus concolor</i> Dahlbom 1844			3	3					1857	kleine Spinnenarten
<i>Nitela fallax</i> Kohl 1883			*	2		X		N		vermutl. Pflanzenläuse
<i>Nitela spinolae</i> Latreille 1809			*	*		X		X		Nymphen von Staubläusen
<i>Nysson dimidiatus</i> Jurine 1807			G	*				X	1959	P. bei <i>Harpactus laevis</i>
<i>Nysson interruptus</i> (Fabricius 1798)			2	1					1857	P. bei <i>Argogorytes sargeii</i>
<i>Nysson maculosus</i> (Gmelin 1790)			*	*				X	1959	P. bei <i>Gorytes quinquecinctus</i>
<i>Nysson niger</i> Chevrier 1868			*	*				X	1959	P. bei <i>Gorytes planifrons</i>
<i>Nysson spinosus</i> (Forster 1771)			*	*		X		X	X	P. bei <i>Argogorytes mystaceus</i>
<i>Nysson trimaculatus</i> (Rossi 1790)			*	*				X	1959	P. bei <i>Lestiphorus bicinctus</i>
<i>Oxybelus bipunctatus</i> Olivier 1812			*	*				X	1959	kleine Fliegen (Muscidae)
<i>Oxybelus trispinosus</i> (Fabricius 1787)			*	*		X		X	X	kleine Fliegen (Muscidae)
<i>Oxybelus uniglumis</i> (Linnaeus 1758)			*	*				X	1959	Fliegen (Muscidae)
<i>Passaloecus corniger</i> Shuckard 1837			*	*		X		X	X	Blattläuse
<i>Passaloecus eremita</i> Kohl 1893			*	*		X		N		Blattläuse (Lachnidae)
<i>Passaloecus gracilis</i> (Curtis 1834)			*	*				X	1959	Blattläuse
<i>Passaloecus monilicornis</i> Dahlbom 1842			D	*					1857	Blattläuse
<i>Passaloecus pictus</i> Ribaut 1952			*	*	X	X		N		Blattläuse
<i>Passaloecus singularis</i> Dahlbom 1844			*	*	X	X	X			Blattläuse
<i>Passaloecus turionum</i> Dahlbom 1845			*	*			X	X	X	vermutl. Blattläuse
<i>Pemphredon clypearis</i> Thomson 1870			*	*		X	X		X	Blattläuse
<i>Pemphredon fabricii</i> (M. Müller 1911)			*	V	X			N		Blattläuse
<i>Pemphredon inornata</i> Say 1824			*	*		X				Blattläuse
<i>Pemphredon lethifer</i> (s. str.) (Shuckard 1834)			*	*	X	X	X	X ⁴	X ⁴	Blattläuse
<i>Pemphredon littoralis</i> (Wagner 1918)			♦	♦		X	X	N		Blattläuse
<i>Pemphredon lugens</i> Dahlbom 1842			*	*		X				Blattläuse
<i>Pemphredon lugubris</i> (Fabricius 1793)			*	*	X	X	X	X	X	Blattläuse
<i>Pemphredon morio</i> (s. str.) Vander Linden 1829			*	*		X				Blattläuse
<i>Pemphredon rugifer</i> (s. l.) (Dahlbom 1844)			*	*				X ⁴	1959	Blattläuse
<i>Philanthus triangulum</i> (Fabricius 1775)			*	*	X		X	X	X	Bienen (<i>Apis mellifera</i>)
<i>Podalonia affinis</i> (Kirby 1798)			*	*					1959	Eulenfalter-Raupen
<i>Podalonia hirsuta</i> (Scopoli 1763)			2	*				X	1949 ³	Eulenfalter-Raupen
<i>Psen ater</i> (Olivier 1792)			1	3				X	1959	Zikaden
<i>Psenulus brevitarvis</i> Merisuo 1937			*	D		X		N		vermutlich Blattläuse
<i>Psenulus concolor</i> (Dahlbom 1843)			*	*			X	X	X	Nymphen v. Blattflöhen

Tabelle 2: Fortsetzung

Table 2: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell		historisch		Larvennahrung	
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Wirt/Parasitoid
<i>Psenulus fuscipennis</i> (Dahlbom 1843)			*	*		X	X	X		Blattläuse (Aphididae)
<i>Psenulus laevigatus</i> (Schenck 1857)			*	*		X	X	X	X	vermutl. Blattläuse
<i>Psenulus pallipes</i> (Panzer 1798)			*	*		X	X	X	X	Blattläuse (Aphididae)
<i>Psenulus schencki</i> (Tournier 1889)			*	*		X				adulte Blattfüße
<i>Rhopalum clavipes</i> (Linnaeus 1758)			*	*		X		X	X	u.a. Mücken
<i>Rhopalum coarctatum</i> (Scopoli 1763)			*	*		X	X	X	X	Mücken und Fliegen
<i>Sceliphron curvatum</i> F. Smith 1870			*	*	X					verschiedene Spinnenarten
<i>Spilomena beata</i> Blüthgen 1953			*	*		X		N		Blasenfüßer (<i>Thrips</i>)
<i>Spilomena troglodytes</i> (Van der Linden 1829)			*	*		X		X		Fransenflügler. (<i>Thysanoptera</i>)
<i>Stigmus pendulus</i> Panzer 1804			*	*		X		X	1959	Blattläuse (Aphididae)
<i>Stigmus solskyi</i> Morawitz 1864			*	*			X			Blattläuse (Aphididae)
<i>Tachysphex nitidus</i> (Spinola 1805)		2	*					X	1959	Nymphen v. Heuschrecken
<i>Tachysphex obscuripennis</i> (Schenck 1857)			3	*					1949 ^a	Schabenlarven (<i>Ectobius</i>)
<i>Tachysphex pomphiliformis</i> (Panzer 1805)			*	*		X		X	X	Nymphen v. Heuschrecken
<i>Tachysphex psammobius</i> (Kohl 1880)			V	V					1949 ^a	unbekannt
<i>Tachysphex unicolor</i> (Panzer 1809)			*	*		X		X	X	Nymphen v. Heuschrecken
<i>Trypoxylon attenuatum</i> (s.str.) F. Smith 1851			*	*		X	X			Spinnen
<i>Trypoxylon beaumonti</i> Antropov 1991			*	*		X	X	N	N	vermutl. Blattläuse
<i>Trypoxylon clavicerum</i> Lepeletier & Serville 1828		D	*			X	X	X ⁴	X ⁴	Spinnen
<i>Trypoxylon deceptorium</i> Antropov 1991			*	*		X ²		N	N	Spinnen
<i>Trypoxylon figulinus</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X	X	X	X	Spinnen
<i>Trypoxylon kostylevi</i> Antropov 1985		D	*		X ²			N		Spinnen
<i>Trypoxylon medium</i> de Beaumont 1945			*	*	X			X	X	Spinnen
<i>Trypoxylon minus</i> de Beaumont 1945			*	*	X	X	X	X	X	Spinnen
Tiphidae - Rollwespen										
<i>Methocha articulata</i> (Latreille 1792)			V	*				1861		P. bei Larven von Sandlaufkäfern
<i>Tiphia femorata</i> Fabricius 1775			*	*	X	X	X	X		P. bei Larven von Junikäfern
<i>Tiphia minuta</i> Vander Linden 1827			*	*		X	X			P. bei nicht bekannten Wirten
Vespidae - Eumeninae - Solitäre Faltenwespen										
<i>Allodynerus russii</i> (Lepeletier 1841)			*	*		X	X			Schmetterlingsraupen
<i>Ancistrocerus antilope</i> (Panzer 1798)			*	*		X		X		Schmetterlingsraupen
<i>Ancistrocerus claripennis</i> Thomson 1874			V	*		X				Kleinschmetterlingsraupen
<i>Ancistrocerus gazella</i> (Panzer 1798)			*	*	X		X	X		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Ancistrocerus oviventris</i> (Wesmael 1836)			*	*	X			X		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Ancistrocerus parietinus</i> (Linnaeus 1761)			*	*				1861		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Ancistrocerus trifasciatus</i> (Müller 1776)			*	*		X		X		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Discoelius dufourii</i> Lepeletier 1841	2	3						1861		Schmetterlingsraupen
<i>Eumenes coarctatus</i> (Linnaeus 1758)			*	*				1861		Spannerraupen
<i>Eumenes coronatus</i> (Panzer 1799)			*	*		X		X		Spannerraupen
<i>Eumenes papillarius</i> (Christ 1791)			*	*	X					Spannerraupen
<i>Euodynerus notatus</i> (Jurine 1807)			*	*				1861		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Euodynerus quadrifasciatus</i> (Fabricius 1793)			*	*				1861		Schmetterlingsraupen
<i>Gymnomerus laevipes</i> (Shuckard 1837)			*	*		X	X	X		Blattkäferlarven
<i>Leptochilus regulus</i> (Saussure 1855)			R	*	X					Kleinschmetterlingsraupen
<i>Microdynerus exilis</i> (Herrich-Schaeffer 1839)			*	*	X	X		X		Rüsselkäferlarven
<i>Microdynerus nudunensis</i> (Saussure 1856)			*	*	X	X				Rüsselkäferlarven
<i>Microdynerus parvulus</i> (Herrich-Schaeffer 1838)			*	*				1861		Rüsselkäferlarven
<i>Odynerus melanocephalus</i> (Gmelin 1790)			V	3				1853		Rüsselkäferlarven

Tabelle 2: Fortsetzung

Table 2: continued

Gattung	Art	Autor	RL	RL	WEL aktuell			historisch		Larvennahrung
			He	D	KS	OL	KH	SC	WO	Wirt/Parasitoid
<i>Odynerus reniformis</i> (Gmelin 1790)			2	3				1861		Rüsselkäferlarven
<i>Odynerus spinipes</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X			X		Rüsselkäferlarven
<i>Stenodynerus bluethgeni</i> Van der Vecht 1971			R	2				1861		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Stenodynerus chevrieranus</i> (Saussure 1856)			*	*				1861		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Stenodynerus xanthomelas</i> (Herrick-Schaeffer 1839)			*	*				1861		Kleinschmetterlingsraupen
<i>Symmorphus bifasciatus</i> (Linnaeus 1761)			*	*				1853		Blattkäferlarven
<i>Symmorphus connexus</i> (Curtis 1826)			*	*		X				Blattkäferlarven
<i>Symmorphus crassicornis</i> (Panzer 1798)			*	*				1861		Blattkäferlarven (<i>Melasoma</i>)
<i>Symmorphus debilitatus</i> (Saussure 1855)			*	*				1861		Miniermottenraupen
<i>Symmorphus gracilis</i> (Brullé 1832)			*	*		X				Rüsselkäferlarven
<i>Symmorphus murarius</i> (Linnaeus 1758)			V	2	X					Blattkäferlarven (<i>Chrysomela</i>)
Vespidae – Polistinae - Feldwespen										
<i>Polistes biglumis</i> (Linnaeus 1758)			*	*				1861		diverse Insekten
<i>Polistes dominula</i> (Christ 1791)			*	*	X	X	X	X	X ¹	diverse Insekten
<i>Polistes nimpha</i> (Christ 1791)			*	*					1950 ¹	diverse Insekten
Vespidae – Vespinae - Echte Wespen										
<i>Dolichovespula media</i> (Retzius 1783)			*	*		X		X		diverse Insekten
<i>Dolichovespula norwegica</i> (Fabricius 1781)			*	*				1861		diverse Insekten
<i>Dolichovespula saxonica</i> (Fabricius 1793)			*	*	X	X		X		diverse Insekten
<i>Dolichovespula sylvestris</i> (Scopoli 1763)			*	*	X	X		X		diverse Insekten
<i>Vespa crabro</i> Linnaeus 1758			*	*	X	X	X	X		diverse Insekten
<i>Vespa austriaca</i> (Panzer 1799)			*	*				1861		P. bei <i>Vespa rufa</i>
<i>Vespa germanica</i> (Fabricius 1793)			*	*	X	X	X	X		diverse Insekten
<i>Vespa rufa</i> (Linnaeus 1758)			*	*		X		X		diverse Insekten
<i>Vespa vulgaris</i> (Linnaeus 1758)			*	*	X	X		X		diverse Insekten

5 Bemerkenswerte Arten

***Andrena curvungula* (THOMSON 1870) – Andrenidae, Sandbienen** RL D: 3, He: 3

Nachweise: 2♂♂ 2022 Hf KB 2, 1♂ 1♀ 13.05. 2023 Gs, Hf WW

Bemerkungen: Lebensraum sind trockenwarme extensiv genutzte Wiesen, Trockenhänge und sonnige Waldränder, oligolektisch an Campanulaceae. Immer häufiger auch im Siedlungsraum (vgl. FROMMER 2024 mit Hinweisen zum aktuellen Vorkommen in Hessen).

***Andrena ferox* SMITH 1847 – Andrenidae, Sandbienen** RL D: 2, He: 1

Nachweise: SCHENCK (1866: 324 und 1870: 293), vgl. WOLF (1956)

Bemerkungen: Hinweise auf ein aktuelles Vorkommen im Lahntal ergeben sich aus dem Fund der spezifischen Kuckucksbiene *Nomada mutica* im nahe gelegenen NSG Wehrley bei Runkel (FROMMER 2020). Ähnliche Bedingungen existieren auch in den OL.

***Andrena hattorfiana* (FABRICIUS 1775) – Andrenidae, Sandbienen** RL D: 3, He: V

Nachweise: Mehrfach: 2022 Hf KB 1 und KB 3, 2005 Hf, 2022 Ms OL

Bemerkungen: Typischer Besiedler trockener, magerer Wiesen. Rückläufige Art, oligolektisch an Dipsacaceae. Risikofaktoren sind starke Düngung und häufige oder zu frühe Mahd. Regelmäßiges Vorkommen im Streuobstwiesenteil der OL.

***Andrena hypopolia* SCHMIEDEKNECHT 1883 – Andrenidae, Sandbienen** RL

D: 2, He: 0

Nachweise: Weilburg als *Andrena consobrina* SCHENCK 1861

Bemerkungen: Beschrieben in SCHENCK (1861b: 185) als *Andrena consobrina*. Locus typicus ist Weilburg (SCHENCK 1871: 407). Die Art ist in Hessen ausgestorben oder verschollen. In der Kommentierten Roten Liste der Bienen Hessens (TISCHENDORF et al. 2009) nicht aufgeführt (vgl. auch SCHEUCHL et al. 2023 mit der Angabe „Hessen“).

***Andrena pandellei* PÉREZ 1895 – Andrenidae, Sandbienen** RL D: 3, He: 3

Nachweise: 2022 Ms OL, 2023 Ms KH

Bemerkungen: Wärme liebende Art, besiedelt trockenwarme Magerwiesen, Waldränder und Weinbergbrachen. Rückläufig, oligolektisch an *Campanula* (Campanulaceae). Verbreitungsschwerpunkt im südlichen Landesteil Hessens. Im Lahntal sehr selten.

***Andrena potentillae* PANZER 1809 – Andrenidae, Sandbienen** RL D: 2, He: 2

Nachweise: WO EN 1950: „♀ in Menge auf *Potentilla verna*“

Bemerkungen: Besiedelt ausschließlich Magerrasen auf Sand, Kalk oder vulkanischem Gestein. Oligolektisch an *Potentilla* (Rosaceae), hauptsächlich an *Potentilla verna*. In Hessen nur sehr lokal. Wichtigstes Vorkommen bei Amöneburg, NSG Wenigenburg (FROMMER 2001) in sehr starkem Rückgang [2025]. In den Odersbacher Lahnhängen kam diese Art noch Mitte des letzten Jahrhunderts häufig vor. Eine Ansiedlung wäre dann möglich, wenn die Felspartien im oberen Teil des Trockenhangs freigestellt und freigehalten würden und im Frühjahr dort große Bestände von Frühlingsfingerkraut dauerhaft in Blüte wären.

***Andrena rosae* PANZER 1801 – Andrenidae, Sandbienen** RL D: 3, He: 1

Nachweise: SCHENCK 1853, WOLF 1956, 1♀ 2022 Hf KB 4

Bemerkungen: *A. rosae* wurde noch Mitte des letzten Jahrhunderts im Lahngebiet „häufig“ angetroffen (Wolf 1956) und war seitdem verschollen. In den letzten Jahren gelangen (Wieder-)Nachweise im Lahntal bei Gießen (FROMMER 2020; FROMMER & BAHMER 2023).

***Andrena tscheki* MORAWITZ 1872 – Andrenidae, Sandbienen** RL D: 3, He: 1

Nachweise: WOLF (1956): OL, häufig

Bemerkungen: Lebensraum in Frischwiesen, auf Magerrasen und in strukturreichen Weinbergen. Stark rückläufige Art, oligolektisch an Brassicaceae (z. B. *Cardamine pratensis*). Nachweise aus der Mitte des 20. Jahrhunderts aus dem Lahn- und Dilltal (WOLF 1956), auch in den Odersbacher Lahnhängen.

***Ceratina chalybea* (Rossi 1792) – Apidae, Keulhornbienen** RL D: 3, He: 3

Nachweise: 1♀ 2022 Hf KB 1, 1♀ 2022 Hf KB 4, 1♀ 09.06. 2022 Ms OL

Bemerkungen: Vorkommen in Deutschland nur aus dem Rheintal und seinen wärmebegünstigten Seitentälern. Schenck hat sie erst spät (SCHENCK 1877) für Weilburg gemeldet, wo er bereits 32 Jahre gesammelt hatte. WOLF (1956) konnte sie bei Weilburg nicht mehr bestätigen. Überraschende Wiederfunde nach fast 150 Jahren. *C. chalybea* hat hohe Wärmeansprüche. Nistet im Mark von trockenen Pflanzenstängeln, insbesondere Brombeere (*Rubus fruticosus*), und benötigt reich strukturierte trockenwarme Lebensräume, z. B. ehemalige Weinberge wie in den Odersbacher Lahnhängen.

***Epeoloides coecutiens* (FABRICIUS 1775) – Apidae, Schmuckbienen** RL D: 3, He: 3

Nachweise: Schenck 1871, Wolf 1956, ♀♀ 2011, 2013 Ms OL, ♂♂, ♀♀ 2023 Ms KH

Bemerkungen: Kuckucksbiene bei den Öl-sammelnden Schenkelbienen *Macroptis europaea* und *M. fulvipes*, die in den FO nachgewiesen wurden. Typisch sind feuchte Waldrandlagen in Flussauen mit Beständen des Gilbweiderichs *Lysimachia vulgaris*.

***Halictus langobardicus* BLÜTHGEN 1944 – Halictidae, Furchenbienen** RL D: *

He: G

Nachweise: 1♂ 03.08. 2015 Ms OL, 1♂ 04.07. 2023 Gs WW

Bemerkungen: Sehr wärmeliebende Art (vgl. Vorkommen im Oberen Mittelrheintal in TISCENDORF & FROMMER 2004). Die Funde bei Weilburg sind die nördlichsten Vorkommen der Art im Westen Deutschlands.

***Lasioglossum bluethgeni* EBMER 1971 – Halictidae, Schmalbienen** RL D: G, He: nn

Nachweise: 1♀ 29.04.2022, 1♀ 09.06.2022 Ms OL

Bemerkungen: Seit Erstellung der Roten Liste (TISCENDORF et al. 2009) neu in Hessen nachgewiesen (z. B. FROMMER 2020). Nach EBMER (mdl. 2023) „waldafine“ Art, die besonders in „offenen Eichenwäldern“ vorkommt. Nach seiner Ansicht sind die OL „typisches Biotop“.

***Lasioglossum pauperatum* (BRULLÉ 1832) – Halictidae, Schmalbienen** RL D: 2, He: 1

Nachweise: 1♀ 04.06.1949 OL (vid. & confirm. FR 2015 OÖLM), 1♀ 30.06.2023 Ms KH

Bemerkungen: Letzte Nachweise aus der Lahnregion (auch Weilburg) in WOLF

(1956). Zwischenzeitlich verschollen. Neuere Untersuchungen mit Neunachwesen dieser wärmeliebenden Art (WARZECHA, FROMMER & WOLTERS 2016; FROMMER 2024).

***Lasioglossum pygmaeum* (SCHENCK 1853) – Halictidae, Schmalbienen** RL D: G, He: G

Nachweise: Vielfach 2013, 2022 Ms OL, 2023 Ms KH

Bemerkungen: Wärme liebende Art, in Hessen besonders auf Magerrasen und in Weinbergen. Aktuelle Vorkommen besonders aus den Wärmegebieten im Süden und im Lahntal (TISCHENDORF et al. 2009). Lahntal bei Weilburg ist „locus typicus“. *L. pygmaeum* ist Charakterart der Südhänge an der Lahn (Runkel, Weilburg).

***Lasioglossum tricinctum* (SCHENCK 1874) – Halictidae, Schmalbienen** RL D: 3, He: 0

Nachweise: Weilburg (SCHENCK 1874: 161), 1♀ [EN: 3♀] 02.07.1949 OL, coll. Wolf OÖLM, det. Blüthgen, vid. & confirm. FR, vgl. WOLF 1956, 1982)

Bemerkungen: Lahngebiet bei Weilburg ist „locus typicus“. Sehr Wärme liebende Art besonders an steinigen oder felsigen Trockenhängen. 1949 letzter Nachweis für Hessen. In den OL sollten sonnige Felspartien dringend wieder freigestellt werden, um eine eventuelle Wiederbesiedlung zu ermöglichen (vgl. Hinweise bei *Andrena potentillae*).

***Megachile lagopoda* (LINNAEUS 1761) – Megachilidae, Blattschneiderbienen** RL D: 2, He: 1

Nachweise: SCHENCK (1853b), WOLF (1956)

Bemerkungen: Die wegen ihrer Größe nicht zu übersehende Art konnte bei Weilburg aktuell nicht gefunden werden, wurde jedoch im benachbarten Runkel [OT Steeden] nachgewiesen (FROMMER 2006), sodass eine Besiedlung des Lahntals bei Weilburg möglich erscheint.

***Nomada braunsiana* SCHMIDEKNECHT 1882 – Apidae, Wespenbienen** RL D: 1, He: 1

Nachweise: 1♀ 2022 Hf KB 2 zusammen mit 2♂♂ von *Andrena curvungula*

Bemerkungen: Die sehr seltene Kuckucksbiene wurde im Lahntal schon bei Gießen an zwei aktuellen FO wieder nachgewiesen, darunter auch im Siedlungsbereich (FROMMER & BAHMER 2023). Wirte sind *Andrena pandellei*, aber auch *A. curvungula* (l. c.).

***Panurgus dentipes* Latreille 1811 – Andrenidae, Zottelbienen** RL D: 3, He: 3

Nachweise: SCHENCK 1861b, WOLF (1956)

Bemerkungen: WOLF (1956) meldet die Art für Weilburg als „sehr selten, nur in Einzlexemplaren“. Aktuell wurde sie im Lahntal nur im benachbarten Runkel ge-

funden (ausführlich in FROMMER 2020). Es ist nicht auszuschließen, dass sie auch bei Weilburg vorkommen könnte.

***Rophites quinquespinosus* Spinola 1808 – Halictidae, Schlürfbienen** RL D: 2, He: 0

Nachweise: SCHENCK (1875: 332), WOLF (1956)

Bemerkungen: WOLF (1956) bezeichnet die Vorkommen bei Weilburg noch als „häufig“. Deutschlandweiter Rückgang dieser Art, die besonders an der Ruderalpflanze, dem Lippenblütler *Ballota nigra*, Pollen sammelt.

***Chrysis immaculata* DU BUYSSEN 1898 – Chrysididae, Goldwespen** RL D: G, He: G

Nachweise: 1♀ 30.07.2022 Ms OL

Bemerkungen: Lebensraum ist wegen der Seltenheit der Art kaum bekannt. Funde in Hessen hauptsächlich aus lichten Eichenbeständen an den Südhängen des Edersees im Nationalpark Kellerwald (FUHRMANN 2004). Ähnliche lichte alte Eichenbestände auch in den OL. Wahrscheinlicher Wirt ist die in pflanzlichen Hohlräumen nistende Solitäre Faltenwespe *Allodynerus rossii* (FROMMER & TISCHENDORF 2021), die auch in den OL vorkommt.

***Chrysis indigotea* DUFOUR & PERRIS 1840 – Chrysididae, Goldwespen** RL D: G, He: G

Nachweise: 1♀ 31.05.2011 Holzwand WW

Bemerkungen: *C. indigotea* ist in Hessen nur aus den Wärmeregionen des Südens, im Rheintal und bis ins Lahntal nachgewiesen. Im Siedlungsbereich selten gefunden.

***Physetopoda scutellaris* (LATREILLE 1792) – Mutillidae, Spinnenameisen** RL D: G, He: 2

Nachweise: „Weilburg“ (SCHENCK 1857), aktuell mehrfach 2013, 2015, 2022 Ms OL

Bemerkungen: Lebensweise und mögliche Wirte unbekannt. Vorkommen in Deutschland nur in den Wärmegebieten des Südwestens. Bevorzugt warme Lebensräume wie Magerrasen, (ehemalige) Weinberge oder großflächige xerotherme Trockenhänge. Weitere Vorkommen in Hessen nur noch im Mittelrheintal und bis in das Lahntal bei Runkel (FROMMER 2020).

***Agenioideus apicalis* (Vander Linden 1827) – Pompilidae, Wegwespen** RL D: G, He: G

Nachweise: 1♀ 03.08.2015 Ms OL

Bemerkungen: Lebensräume oft an Felswänden oder Trockenmauern mit sehr warmem Mikroklima. Zum Schutz dieser Art muss besonderer Wert auf den Er-

halt der historischen Weinberge und Trockenmauern ehemaliger Weinberge im Mittelrheintal und im Lahntal gelegt werden (FROMMER & TISCHENDORF 2024).

***Auplopus albifrons* (Dalman 1823) – Pompilidae, Wegwespen** RL D: G, He: G

Nachweise: 1♂ 04.06.1949 OL coll. Wolf OÖLM (A), vid. & confirm FR

Bemerkungen: Lebensräume infolge der Nistweise sind steinige Habitate in xerothermen Lagen (Felswände und Trockenhänge). In Hessen aktuell vor allem in den Wärmegebieten im SW (FROMMER & TISCHENDORF 2024). In den ehemaligen Fundorten im Dilltal und im Lahntal bei Marburg keine Wiederfunde. Die einzigen aktuellen Funde aus dem Lahntal stammen aus Runkel. Nach Freilegung der Felspartien in den OL ist die Art wieder zu erwarten (vgl. Hinweise bei *Andrena potentillae* und *Lasioglossum tricinctum*).

6 Diskussion

Nördliche Verbreitungsgrenze thermophiler Stechimmen im Lahntal

Über Wuchsklima-Gliederungen (ELLENBERG & ELLENBERG 1974) können lokal-klimatische Unterschiede dargestellt werden. Diese Methode ermittelt Wärme-summenstufen, die sich aufgrund pflanzenphänologischer Beobachtungen ergeben (Blühbeginn, Reife, Blattaustrieb etc.). Die Wärmesummen im Lahntal bei Weilburg von Odersbach bis zur Talausweitung Lahn aufwärts bei Löhnberg sind auffallend hoch, so dass in Gunstlagen bei Weilburg (z. B. Odersbacher Lahnhänge / Odersbacher Terrassen, Stadtgebiet Weilburg) der Weinbau erst Ende des 19. Jahrhunderts aufgegeben wurde. Aufgrund dieser Wärmegunst ist das Lahntal bei Weilburg bedeutend als Refugialraum und als biogeographische Grenzregion wärmeliebender Stechimmen, die hier ihre nördlichste Verbreitung haben. Dieser Aspekt wurde bereits in FROMMER (2006: 65, Tab. 3) und in FROMMER (2020: 162-166, Tab. 4) für das gesamte Lahngebiet dargestellt. Wärme liebende Arten, die im Lahntal ihre nördlichste Verbreitung im Westen Deutschlands haben und bei Weilburg gefunden wurden, sind z. B. *Ceratina chalybea*, *Halictus langobardicus*.

Artenrückgang

Im Lahntal bei Weilburg wurden innerhalb von 178 Jahren zwischen 1845 und 2023 insgesamt 572 Stechimmen-Arten (316 Bienenarten und 256 aculeate Wespenarten) nachgewiesen: Ein großer Anteil (etwa 42 % dieser Arten) konnte trotz der hohen Erfassungsintensität aktuell nicht gefunden werden (Tab. 1, 2). Allein seit der Mitte des 20. Jahrhunderts ist es die Anzahl von 109 (von insgesamt 140) Bienenarten und 46 (von insgesamt 101) aculeaten Wespenarten, die aktuell nicht nachgewiesen wurden. Dieses in der Größenordnung nicht erwartete Ergebnis verdeutlicht das eigentliche Ausmaß des Artenrückgangs. Bei dieser Untersuchung handelt es sich um eine spezifisch örtliche und keine naturräumliche oder

landesweite Betrachtung wie zum Beispiel bei der Erstellung von Roten Listen. Bei solchen Erfassungen werden Rückgänge in unterschiedlichen Lokalitäten im Gesamtergebnis jeweils ausgeglichen und ergeben scheinbar einen eher überschaubaren Rückgang an Arten. Die in dieser Arbeit dargestellte seltene Besonderheit eines durchgehenden Untersuchungskontinuums mit hoher Erfassungsintensität seit der Mitte des 19. Jahrhunderts in einem begrenzten Gebiet, im Lahngebiet bei Weilburg, zeigt daher am Beispiel der Stechimmenfauna den wirklichen Rückgang der Artenvielfalt, der sich vor allem seit der Mitte des 20. Jahrhunderts vollzogen hat (vgl. FROMMER 2021). Vielfach sind es Arten, die ohnehin auf der Gefährdungsliste oder auf der Vorwarnliste in den Roten Listen der Stechimmen Hessens bzw. Deutschlands stehen. Besonders betroffen sind Kuckucks-Arten wie z. B. der Gattungen *Nomada*, *Coelioxys*, *Nysson*, die vom Vorkommen ihrer Wirte abhängen, sowie Hummelarten. „Natürlich ist das Nicht-Finden einer Art nie absolut verifizierbar, sondern nur das positive Finden. Fundleere Stellen sind einmal nicht besammelte Gebiete, oder die Art kommt dort wirklich nicht vor. Nur wenn in einem Gebiet sehr gründlich gesammelt wurde, ist der Schluss zulässig, dass eine Art, insbesondere eine große und nicht zu übersehende, wirklich nicht vor kommt“ (EBMER in litt. 2004). So sind möglicherweise durch weitere intensive Erfassung noch einige Arten auffindbar, vor allem solche, die keinen Gefährdungsstatus besitzen (wie z. B. *Hylaeus angustatus*, *H. pictipes*, *Sphecodes gibbus*, *Ectemnius cavifrons*, *E. cephalotes*, *Entomognathus brevis*) oder seltene Arten, die in der Nähe zu Weilburg aktuell gefunden wurden (z. B. bei Runkel: *Megachile lagopoda*, *Panurgus dentipes*) (vgl. FROMMER 2006, 2020). Auch bestimmte oligolektische Arten könnten durch gezielte Suche an den spezifischen Pollenquellen, wenn vorhanden, gefunden werden (z. B. Arten der Gattung *Melitta* oder zusätzliche oligolektisch an *Salix* Pollen sammelnde Arten, die aktuell nicht gefunden wurden). Das Bild des hier dargestellten Gesamtbefundes eines enormen Artenrückgangs würde sich durch solche Nachweise allerdings nicht grundlegend ändern, zumal wenn man bedenkt, dass einige Arten seit der Zeit Schencks bis heute noch weiter in Schwesternarten aufgeteilt bzw. neu beschrieben wurden (vgl. auch Buchstabe N in Tab. 1 und 2) und so die aktuell nachweisbare Artenzahl etwas erhöht haben. Die Ursache des Rückgangs der Artenvielfalt ist vor allem mit ökologisch wirksamen Veränderungen der Landschaftsstruktur mit dem Ende der althergebrachten kleinflächigen Bewirtschaftung und der darauffolgenden Verbuschung und der sich ausweitenden Sukzession zu erklären. (vgl. auch Kap. 2). Dadurch kam es zum Rückgang von notwendigen Pollenpflanzen für oligolektisch Pollen sammelnde Bienen (z. B. *Andrena potentillae*, *A. tscheki*, *Hylaeus punctulatissimus*, *Rophites quinquespinosus*, *Rhophitoides canus*) oder zum Verschwinden wichtiger Beutetiere bei den aculeaten Wespen. Bei Kuckucksbienen und -wespen ist das Vorhandensein der Wirtsart entscheidend (z. B. bei *Nomada atroscutellaris*, *N. fulvicornis*, *Chrysis analis*, *Nysson trimaculatus*). Zugewachsene Felsstrukturen oder das Verschwinden der ehemaligen (Weinbergs-)Mauern führen zu fehlen-

den spezifischen Nistgelegenheiten mancher Arten (z. B. *Lasioglossum tricinctum*, *Auplopus albifrons*, *Agenioideus nubecula*) oder wiederum zu fehlenden Pollenpflanzen (z. B. Frühlings-Fingerkraut für die oligolektische Art *Andrena potentillae* in den OL). Der starke Rückgang von Sandstrukturen bei Weilburg betrifft Arten, die auf sandigen Böden und andere sandige Strukturen, Sandgruben oder Steinbrüche als Nistsubstrat angewiesen sind. Auf diese Weise sind besonders viele Arten bei Weilburg verschollen (z. B. *Ammobates punctatus*, *Andrena barbiflabris*, *Cerceris arenaria*, *Dasypoda hirtipes*, *Halictus sexcinctus*, *Lasioglossum prasinum*, *Lasioglossum sexnotatum*, *Methocha articulata*, *Podalonia affinis*, *P. hirsuta*, *Pompilus cinereus*, *Tachysphex obscuripennis*). Auch der landesweite allgemeine Artenrückgang durch stark veränderte Umweltbedingungen wie die allgemeine Degenerierung von wertvollen, ökologisch vielfältigen Landschaftsstrukturen (z. B. durch Mechanisierung oder Überdüngung) und durch den immensen Flächenverbrauch von Natur- und Kulturlandschaft bei der zunehmenden Industrialisierung, Verstädterung und Siedlungsausbreitung Weilburgs mit der Zunahme von schädigenden Abgasen und Pestiziden besonders seit Mitte des 20. Jahrhunderts spielt eine Rolle und wurde an anderer Stelle ausführlich erörtert (vgl. hierzu z. B. FROMMER 2021 und Rote Listen der Stechimmen Hessens).

Neuaufreten thermophiler Arten nach Arealexpansion infolge Klimaerwärmung
Unterschiedliche Auswirkungen des veränderten Sommer- und Winterklimas in Mitteleuropa (trockenwarme Sommer und milde kühlfeuchte Winter) auf kontinentale thermophile Stechimmen und Arten des atlanto-mediterranen Verbreitungstyps wurden bereits ausführlich für das gesamte Lahngebiet erörtert (FROMMER 2020): Stabile bzw. positive Populationsentwicklungen, Wiedernachweise thermophiler Arten, Auftreten von Arealoszillationen, Erstnachweise nach klimabedingter Arealexpansion teilweise mit folgender Weiterausbreitung. Mit Hilfe von aufgestellten Klimasensibilitätsanalysen konnten die sich ausbreitenden Stechimmenarten als Gewinner des Klimawandels dargestellt werden (l. c.). Im Rahmen dieser Arbeit wird das nicht erneut diskutiert. An dieser Stelle werden zusammenfassend einige wichtige Neunachweise von Arten nach (klimabedingter) Arealexpansion aufgelistet, die für Weilburg charakteristisch sind: *Andrena lagopus*, *Colletes hederae*, *Coelioxys echinata*, *Halictus scabiosae*, *Hylaeus punctatus*, *Lasioglossum bluethgeni*, *L. pallens*, *L. pauperatum*, *L. semilucens*, *Megachile rotundata*, *Isodontia mexicana* (Neozoon), *Sceliphron curvatum* (Neozoon), *Lepisiotinus regulus*, *Sphecodes pseudofasciatus*,

Lahngebiet bei Weilburg als „locus typicus“ der von Schenck beschriebenen Arten
In den Tabellen 1 und 2 wurden diejenigen Arten, die von Adolph Schenck von Tieren aus dem Lahngebiet bei Weilburg neu beschrieben wurden und deren Namen heute gültig sind, besonders markiert (rote Farbe). Für diese Arten ist das Lahngebiet bei Weilburg der „locus typicus“. EBMER schreibt in seiner Arbeit

über die von Schenck beschriebenen Halictiden (1975: 235): „Bei vielen Arten ist kein locus typicus genannt. Schenck sammelte diese Arten wohl in der Umgebung seines Wohnorts Weilburg an der Lahn“. Grund dieser Annahme „war die zu Schencks Zeiten bescheidene Mobilität zu Fuß oder mit einem einachsigen Pferdewagerl“ (EBMER in litt. 2025). Diese Annahme wird durch die bedauerliche Gehbehinderung Schencks seit seinem neunten Lebensjahr bestärkt (NIX 2021: 50). Diese Umstände waren EBMER bei Abfassung seiner Publikation, aber auch dem damaligen Kustos des Senckenbergmuseums in Frankfurt a. M. Dr. Dieter Stefan Peters nicht bekannt. EBMER setzte bei Artbeschreibungen ohne Fundortangabe als Typusfundort die Landesbezeichnung „Hessen“ ein, was „auf den Rat“ von Dr. Peters zurückging (EBMER in litt. 2025). In seiner ersten grundlegenden Arbeit berichtet SCHENCK (1851: 8): „Die hier beschriebenen Bienenarten habe ich fast alle bei Weilburg gefangen, namentlich alle, wo kein Fundort bemerkt ist.“ Das gilt auch für die Arbeit SCHENCK (1853b), einem auf SCHENCK (1851) bezogenen sehr ausführlichen Nachtrag mit derselben Art-Nummerierung. Auch in der „Monographie der geselligen Wespen“ (SCHENCK 1853a: 20) wird nochmals auf diese Vorgehensweise hingewiesen: „Wo kein Fundort angegeben ist, findet sich die Species bei Weilburg.“ Die Verf. dieser Arbeit gehen davon aus, dass auch nach 1853 beschriebene Arten, bei denen der Fundort nicht „bemerkt“ ist, wie von EBMER angenommen, aus den Schenck'schen Sammelgebieten des Lahngebiets bei Weilburg stammen, da Schenck offensichtlich bei seinem Angabe-Schema von 1851 und 1853 geblieben ist. Bei den älteren Arbeiten von SCHENCK (1859 und 1861) und in den jüngeren Arbeiten wird Weilburg explizit aufgeführt. Bei gelegentlicher Nichtangabe des Fundorts (besonders bei ubiquitären Arten) ist immer Weilburg gemeint (das geht aus einer Vielzahl von Anmerkungen hervor: „hier überall häufig“, „an alter Mauer gefangen“, „hier selten“, „an morschem Türpfosten“, nähere Ortsangaben wie „Weiltal“, „Odersbacher Weg“, „Schellhofskopf“, „Gänsberg“ oder Angaben von Blütenbesuch wie z. B. „im Frühjahr an Stachelbeerblüten“ etc.). Dillenburg wird jeweils gesondert als Fundort vermerkt. Auch bei Tieren, die Schenck von Prof. Kirschbaum (Wiesbaden) erhielt, wurde in allen seinen Arbeiten der Fundort angegeben z. B. Gonzenheim, Wiesbaden (Wsb.), Mombach (Mmb.). Schenck hat nach den grundlegenden Arbeiten (1851 und 1853) auch bei der Beschreibung von Arten, die außerhalb des damaligen „Herzogthums Nassau“ lagen, die Fundorte immer angegeben: z. B. Lippstadt (mehr-fach leg. Müller), Bonn, Elberfeld, Pommern, Wien, Österreich, Prov. Preußen, „Tyrol“ etc.). Weilburg ist für 25 von Adolph Schenck beschriebene Stechimmenarten (22 Bienenarten) mit gültigem Namen der locus typicus.

Anmerkungen zum Naturschutz

Betrachtet man die Lebensraumansprüche der bei Weilburg, besonders der in den Odersbacher Lahnhängen nachgewiesenen gefährdeten Stechimmen, so fällt auf, dass in diesem Bereich mosaikartig für unterschiedlichste Stechimmenar-

ten günstige und sehr unterschiedliche Lebensbereiche vorhanden sind, die als Nahrungsraum und Nistplatz für eine Besiedlung günstig sind: Extensiv bewirtschaftete Wiesenanteile in Waldnähe, Streuobstwiese mit Totholz, trockene Wiesenbereiche mit offenen Bodenstellen, magerrasenähnliche Stellen auf kalkhaltigem Boden, Frischwiesenbereiche, Waldsaum mit Altholz, (vegetationsarme) Böschungen, Gebüschtstrukturen mit Brombeersträuchern nach Auflassen von Weinbergen, offener Eichenhangwald, großflächiger im oberen Teil zum Teil felsiger xerothermer Trockenhang, lehmiges Flussufer. Diese besondere ökologische Vielfalt auf engem Raum mit dem großen hier aufgefundenen Arteninventar weist auf ein gutes Entwicklungspotential hin für die geplante Erhaltung dieses Landschaftsbereichs als Naturschutzgebiet (GRENZ, BÖNSEL & SCHMIDT 2024).

7 Danksagung

Wir danken Herrn Dipl. Biol. Stefan Tischendorf (Darmstadt) für die Überprüfung der Determination einiger Tiere und für Hinweise zum (ehemaligen) Vorkommen von Arten in Hessen, Herrn Pater Andreas W. Ebmer (Puchenau, Österreich) für Hinweise zu ökologischen Ansprüchen einiger *Lasioglossum*-Arten und Hinweisen zum locus typicus Weilburg, Herrn Prof. Dr. Oliver Niehuis (Universität Freiburg) für die Determinierung und Überprüfung einiger Goldwespenarten. Wir bedanken uns weiterhin bei Herrn Hans-Peter Schick, Weilburgs Bürgermeister a. D., seinem Nachfolger Herrn Dr. Johannes Hanisch und dem Bauamtsleiter Herrn Roger Schmidt, bei dem ehemaligen Leiter des Forstlichen Bildungszentrums Herrn Werner Wernecke und seinem Nachfolger Herrn Dr. Hendrik Horn, bei dem ehemaligen Betreuer von Naturschutzgebieten Herrn Michael Schales und seiner Nachfolgerin Frau Johanna-Maria Heep und ihrem Nachfolger Herrn Nils Birk mit ihren eingesetzten Forstschülern. Außerdem bei Frau Stefanie Specht, Regierungspräsidium Gießen, für ihr leidenschaftliches Engagement im Rahmen der Pflegemaßnahmen in den Odersbacher Lahnhängen, dem Bauunternehmer Herrn Hartmut Bördner für Baggerarbeiten, Herrn Ralf Eiffler für weitere Pflegemaßnahmen in den OL und Herrn Hartmut Orendi, Kirschhofen, für seine Unterstützung.

8 Literatur

- BLÖSCH, M. (2000): Die Grabwespen Deutschlands – Lebensweise, Verhalten, Verbreitung. – 480 S.; Keltern (Goecke & Evers (Hrsg.).
- BLÜTHGEN, P. (1961): Die Faltenwespen Mitteleuropas (Hymenoptera, Diptoptera). – Abhandlungen der deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Chemie, Geologie und Biologie, **1961** (2): 251 S.; Berlin.

- GRENZ, M., BÖNSEL, D. & SCHMIDT, P. (2024): Botanisch-Faunistisches Gutachten zur Bewertung der Schutzwürdigkeit im geplanten NSG „Odersbacher Hang“. – 49 S.; Gießen (Regierungspräsidium).
- BURGER, R., DISTELHORST, O. & SILLÓ, N. (2022): Stechimmenmonitoring in Siedlungen, Trockenheiden und Grünland in Hessen 2022. Wildbienen, Grabwespen, Goldwespen, Faltenwespen, Wegwespen, Rollwespen, Trugameisen, Keulenwespen: Hymenoptera, Aculeata (exkl. Formicidae). – 258 S.; Dirmstein (Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).
- EBMER, A.W. (1975): Von Schenck beschriebene Halictidae (Ins.: Hymenoptera: Apoidea). – Senckenbergiana Biol., **56**: 233-246, Frankfurt a. M.
- ELLENBERG, H. & ELLENBERG, C. (1974): Wuchsclimatalogie von Hessen 1:200000 auf pflanzenphänologischer Grundlage. – Hessischer Minister für Landwirtschaft und Umwelt, Abt. Landesentwicklung; Wiesbaden.
- FROMMER, U. (2001): Bestandsaufnahme der Bienenfauna im mittleren Hessen (Hymenoptera, Apidae). – Naturwissenschaftlicher Verein Darmstadt, Bericht N.F., **24**: 129-191; Darmstadt.
- FROMMER, U. (2006): Das Lahntal als Refugialraum und biogeographische Grenzregion wärme-liebender Stechimmen (Hymenoptera, Aculeata), mit Anmerkungen zur nördlichen Arealgrenze in Deutschland und 7 Verbreitungskarten. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **127**: 23-79; Wiesbaden.
- FROMMER, U. (2007): Ergänzungen zur Bienenfauna (Hymenoptera, Apidae) im mittleren Hessen mit Anmerkungen zur Ausbreitung der Sandbiene *Andrena lagopus* (LATR.). – Hessische Faunistische Briefe, **26** (2): 17-50; Darmstadt.
- FROMMER, U. (2009): Revision und Bestandsaufnahme der Wespenfauna im mittleren Hessen. Teil 1: Grabwespen (Hymenoptera: Ampulicidae, „Crabronidae“, Sphecidae s. str.). – Hessische Faunistische Briefe, **27** (2008: 2-4): 17-59; Darmstadt.
- FROMMER, U. (2020): Bestandsentwicklung und Veränderungen der Stechimmenfauna des Lahntals und seiner Umgebung (Hymenoptera, Aculeata). – Ein Vierteljahrhundert faunistische Forschung in Zeiten des Klimawandels. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **141**: 129-175; Wiesbaden.
- FROMMER, U. (2021): Der Zeuge des Artensterbens – Über die Bedeutung des Siegerländer Entomologen Heinrich Wolf für die Faunistik der Stechimmen in Hessen. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **142**: 85-111; Wiesbaden.
- FROMMER, U. (2024): Faunistische Aspekte der Stechimmen erfassung (Hymenoptera, Aculeata) auf großen Blühflächen in der Agrarlandschaft bei Bettenhausen (Wetterau, Hessen) mit Hinweisen zur klimabedingten Ausbreitung von Arten. – Hessische Faunistische Briefe, **42** (1): 17-47; Darmstadt.
- FROMMER, U., TISCHENDORF, S. & FLÜGEL, H.-J. (2017): Kommentierte Rote Liste der „Dolchwespenartigen“ Hessens (Hymenoptera, Aculeata, Mutillidae, Sapygidae, Scoliidae, Tiphidae). – 78 S.; Wiesbaden (Hrsg.: Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz).
- FROMMER, U. & TISCHENDORF, S. (2021): Kommentierte Rote Liste der Goldwespen Hessens (Hymenoptera, Aculeata, Chrysidae). – 248 S.; Wiesbaden. (Hrsg.: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).
- FROMMER, U. & BAHMER, H. (2023): Die Stechimmenfauna (Hymenoptera, Aculeata) des Botanischen Gartens der Universität Gießen im Vergleich mit einem innerstädtischen privaten Haugarten. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **144**: 183-223; Wiesbaden.
- FROMMER, U. & TISCHENDORF, S. (2024): Die Wegwespen Hessens – Vorkommen, Ökologie, Bestandssituation. – 168 S.; Harxheim (Verlag Goecke & Evers).
- FUHRMANN, M. (2004): Bemerkenswerte Funde von Goldwespen (Hymenoptera: Chrysidae) aus den Naturschutzgebieten „Kahle Haardt“ und „Hünselfburg“ im Kreis Waldeck-Frankenberg. – Phillipia, **11** (4): 253-257; Kassel.

- GBIF (2025): Global Biodiversity Information Facility. – <https://www.gbif.de/de/entomologie>; Zugriff 10.06.2025.
- LINSENMAIER, W. (1997): Die Goldwespen der Schweiz. – Veröffentlichungen aus dem Naturmuseum Luzern, **9**: 140 S.; Luzern.
- NIX, V. (2021): „Bienenvater“ und „Alter Granit“. Leben und Wirken des Adolph Philipp Schenck – des bemerkenswertesten Entomologen der nassauischen Länder. – Dillenburger Blätter, Mitteilungen des Geschichtsvereins Dillenburg, **31**(2018): 48-69; Dillenburg.
- SCHENCK, A. (1851): Beschreibung Nassauischer Bienenarten. – Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau, **7**: 1-106; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1853a): Beschreibung der nassauischen Arten der Familie der Faltenwespen (Vesparia, Diptroptera). – Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau, **9**: 1-87; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1853b): Nachtrag zu der Beschreibung nassauischer Bienenarten. (Heft VII., Abth. 2). – Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau, **9**: 88-307; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1855): Ueber einige schwierige Genera und Species aus der Familie der Bienen. – Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau, **10**: 137-149; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1857): Beschreibung der in Nassau aufgefundenen Grabwespen. – Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau, **12**: 1-341; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1861): Die nassauischen Bienenarten. Revision und Ergänzung der früheren Bearbeitungen. (Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau, Heft VII, IX und X), **14** (1859): 1-414; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1861a): Die deutschen Vesparien nebst einer Naturgeschichte dieser Familie überhaupt mit Berücksichtigung der exotischen Arten. – Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau, **16**: 1-136, Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1861b): Zusätze und Berichtigungen zu der Beschreibung der nassauischen Grabwespen (Heft XII), Goldwespen – Jb. Ver. Naturkde. Herzogthum Nassau (Heft XI), Bienen (Heft XIV) und Ameisen (Heft VIII und XI), **16**: 137-208; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1868): Beschreibungen der nassauischen Bienen. Zweiter Nachtrag. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **21**: 269-382; Wiesbaden.
- SCHENCK, A. (1871): Bemerkungen zu einigen der im Jahrgang XXX der Stettiner Entomologischen Zeitschrift beschriebenen Bienen und ueber einige schwierige Arten *Andrena*. – Stettiner Entomologische Zeitschrift, **31**: 104-107, 407-414; Stettin.
- SCHENCK, A. (1873): Ueber einige streitige und zweifelhafte Bienenarten. – Berliner Entomologische Zeitschrift, **17**: 243-259; Berlin.
- SCHENCK, A. (1874): Aus der Bienenfauna Nassaus I. – Berliner Entomologische Zeitschrift, **18**: 161-173, 337-347; Berlin.
- SCHENCK, A. (1875): Aus der Bienenfauna Nassaus II. – Deutsche Entomologische Zeitschrift, **19**: 321-332; Berlin.
- SCHENCK, A. (1877): Entomologische Beobachtungen. *Andrena varians* und verwandte Arten. *Ceratina*, *Anthophora nidulans* LEP. – Entomologische Nachrichten, **3**: 120-123; Berlin.
- SCHENCK, A. (1877): Entomologische Beobachtungen. *Andrena varians* und verwandte Arten. *Ceratina*, *Anthophora nidulans* LEP. – Entomologische Nachrichten, **3**: 120-123; Berlin.
- SCHEUCHL, E., SCHWENNINGER H. R., BÜRGER, R., DIESTELHORST, O., KUHLMANN, M., SAURE, C., SCHMID-EGGER, C. & SILLÓ, N. (2023): Die Wildbienenarten Deutschlands – Kritisches Verzeichnis und aktualisierte Checkliste der Wildbienen Deutschlands (Hymenoptera, Anthophila). – **1**: 25-138; Neustadt a. d. W. (Kompetenzzentrum Wildbienen).
- SCHMID-EGGER, C., RISCH, S. & NIEHUIS, O (1995): Die Wildbienen und Wespen in Rheinland-Pfalz (Hymenoptera, Aculeata). Verbreitung, Ökologie und Gefährdungssituation. – Fauna Flora Rheinland-Pfalz, Beiheft, **16**: 296 S.; Landau.
- SCHWARZ, M., GUSENLEITNER, F., WESTRICH, P. & DATHE, H.H. (1996): Katalog der Bienen Österreichs, Deutschlands und der Schweiz (Hymenoptera, Apidae). – Entomofauna, Supplement, **8**: 398 S; Ansfelden (A).

- SCHWARZ, M. (1967): Die Gruppe der *Nomada cinctiventris* FR. (= *stigma* auct. nec. F.) (Hymenoptera, Apoidea). – Polskie Pismo Entomologiczne, **37**: 263-339; Wrocław.
- TISCHENDORF, S. & FROMMER, U. (2004): Stechimmen (Hymenoptera: Aculeata) an xerothermen Hanglagen im Oberen Mittelrheintal bei Lorch unter Berücksichtigung ihrer Verbreitung im Naturraum und in Hessen. – Hessische Faunistische Briefe, **23** (2-4): 25-122; Darmstadt.
- TISCHENDORF, S., FROMMER, U., FLÜGEL, H.-J., SCHMALZ, K.-H. & DOROW, W.H.O (2009): Kommentierte Rote Liste der Bienen Hessens – Artenliste, Verbreitung, Gefährdung. – 151 S.; Wiesbaden (Hrsg.: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz).
- TISCHENDORF, S., FROMMER, U. & FLÜGEL, H.-J. (2011): Kommentierte Rote Liste der Grabwespen Hessens (Hymenoptera: Crabronidae, Ampulicidae, Sphecidae) – Artenliste, Verbreitung, Gefährdung. – 240 S.; Wiesbaden (Hrsg.: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz).
- WARZECZA, D., FROMMER, U. & WOLTERS, V. (2016): Nachweise der Furchenbiene *Lasioglossum pauperatum* (BRULLÉ, 1832) aus der Region Marburg-Biedenkopf in Hessen (Hymenoptera, Apidae). – Hessische Faunistische Briefe, **35** (1/3): 41-47; Darmstadt.
- WOLF, H. (1956): Nassauische Bienen (Hym. Apoidea). Beiträge zur Hymenopterenfauna des oberen Lahn-Dill-Sieg-Gebietes V. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **92**: 37-49; Wiesbaden.
- WOLF, H. (1959a): Nassauische Grabwespen (Hym. Sphecoidea). Beiträge zur Hymenopterenfauna des oberen Lahn-Dill-Sieggebietes VI. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **94**: 20-36; Wiesbaden.
- WOLF, H. (1959b): Über einige westdeutsche Bienen und Grabwespen (Hym. Apoidea, Sphecoidea). – Mitteilungen der deutschen Entomologischen Gesellschaft, **18**: 11-16; Berlin.
- WOLF, H. (1968): Adolph Schenck 1803-1878 zum Gedächtnis. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **99**: 12-17; Wiesbaden.
- WOLF, H. (1982): Ein Faunenprofil durch das Rothaargebirge. – Der Sauerländerische Naturbeobachter, **16**: 3-22; Lüdenscheid.
- WOLF, H., SORG, M., STENMANS, W. & SCHWAN, H. (2009): Wegwespen (Hymenoptera, Pompilidae) der westlichen Paläarktis bearbeitet von Heinrich Wolf 1948-2008. – Mitteilungen aus dem entomologischen Verein Krefeld, **3**: 1-395; Krefeld.

Dr. Ulrich Frommer
Tel.: 0641/35559
E-Mail: u-frommer@web.de

Karsten Klenke
Tel.: 06471/2614
E-Mail: karsten.klenke@web.de

Manuskripteingang: 26. Mai 2025

Auswirkungen von Feuerwerken auf Wildvögel

Literaturüberblick und Fallstudien in Wiesbaden

OLIVER WEIRICH, SONJA GÄRTNER & WITIKO HEUSER

Feuerwerk, Wildvögel, Reiherente, Zwerghommel

Kurzfassung: Der vorliegende Beitrag fasst den Kenntnisstand zu Auswirkungen von Feuerwerken auf Wildvögel zusammen. Zudem werden Beobachtungen zu Feuerwerken an zwei naturschutzfachlich besonders wertvollen Standorten in Wiesbaden ausgewertet.

Effects of fireworks on wild birds

Literature review and case studies in Wiesbaden

Fireworks, wild birds, Tufted Duck, Little Bittern

Abstract: This study summarizes the current state of knowledge on the effects of fireworks on wild birds. In addition, observations of fireworks at two particularly valuable nature conservation sites in Wiesbaden are evaluated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	180
2	Literaturüberblick	181
2.1	Methodik	181
2.2	Ergebnisse	181
2.3	Diskussion	184
3	Fallstudie Schiersteiner Hafenfest 2024	184
3.1	Einleitung	184
3.2	Methodik	185
3.3	Ergebnisse	186
3.3.1	Wichtige Beobachtungen vor und nach dem Feuerwerk	186
3.3.2	Beobachtungsbedingungen während des Feuerwerks	189
3.3.3	Beobachtungen während des Feuerwerks	189
3.4	Diskussion	190
4	Fallstudie Floßhafen Mainz-Kostheim Silvester 2024	191
4.1	Einleitung	191
4.2	Methodik	192
4.3	Ergebnisse	192
4.4	Diskussion	193

5	Schlussfolgerungen zum Schutz von Wildvögeln	194
6	Literatur	195

1 Einleitung

Feuerwerke werden wegen negativer Auswirkungen auf die Umwelt, Tiere und die Gesundheit von Menschen zunehmend kritisch gesehen (NEULING & BASTIAN 2023; PAYNE & O REGAN 2024). In den letzten fünfzehn Jahren wurden in den U.S.A., in Italien und Bulgarien Vorfälle bekannt, in denen am Silvesterabend jeweils hunderte Schwarmvögel tot vom Himmel fielen. Vermutlich wurden sie durch Silvesterfeuerwerke von ihren Schlafplätzen aufgeschreckt und sind in der Dunkelheit mit Gebäuden, Stromleitungen oder miteinander kollidiert (<https://www.avma.org/javma-news/2011-04-01/mass-bird-deaths-arkansas-explained>, <https://perma.cc/58LH-DS9P>; Столици птици станаха жертва на новогодишната „война по улиците“! - Зелени Балкани). Übersichten wissenschaftlicher Literatur zeigen, dass Feuerwerke erhebliche Auswirkungen auf Wildvögel haben und stellen ihre Vereinbarkeit mit dem Naturschutzrecht infrage (STICKROTH 2015; NEULING & BASTIAN 2023).

In Wiesbaden finden Feuerwerke in der Nähe naturschutzfachlich wertvoller Flächen statt. Das EU-Vogelschutzgebiet (i. F. VSG) „Inselrhein“ reicht von der Mainmündung bis nach Lorch. Es ist für 17 Arten der Vogelschutzrichtlinie (i. F. VSRL) eines der wichtigsten oder gar das wichtigste Brutgebiet in Hessen. Zudem ist es ein international bedeutendes Rastgebiet für Wasservögel (Ramsar-Gebiet) und für 24 Arten der VSRL eines der besten oder gar das beste Rastgebiet in Hessen. Es ist deshalb eines der wichtigsten Rastgebiete für Wasservögel und Watvögel in Hessen (SUDMANN 2009a). Stand 2022 wurden 14 der 33 maßgeblichen Brutvogelarten im schlechtesten Erhaltungszustand C eingestuft. Seit der Grunddatenerhebung kam es bei zwei dieser 33 Arten zu einer Verschlechterung des Erhaltungszustandes und bei acht weiteren zu einer Verschlechterung der Populationsgröße. Unter den 81 maßgeblichen Rastvogelarten wurden 23 im Erhaltungszustand C eingestuft. Hier kam es bei neun Arten zu einer Verschlechterung des Erhaltungszustandes und bei 13 weiteren Arten zu einer Verschlechterung der Populationsgröße (STÜBING 2022).

Südlich der Mainmündung beginnt das EU-VSG „Mainmündung und Ginsheimer Altrhein“. Es ist eines der besten Brutgebiete für fünf Arten der VSRL in Hessen und ein hessenweit bedeutendes Rastgebiet für Wasservögel (SUDMANN 2009b, S. 3). Stand 2019 wurden 11 der 18 maßgeblichen Brutvogelarten des Schutzgebiets im schlechtesten Erhaltungszustand C eingestuft. Bei fünf der 18 Arten wurde eine Verschlechterung des Erhaltungszustands festgestellt, bei fünf weiteren eine Verschlechterung der Populationsgröße. Die acht maßgeblichen Rastvogelarten des Schutzgebiets befinden sich alle im Erhaltungszustand C. Bei

drei der acht Arten kam es zu einer Verschlechterung des Erhaltungszustands und bei zwei weiteren zu einer Verschlechterung der Populationsgröße (KREUZIGER & WERNER 2018).

Der Erstautor hat in seiner Funktion als Kreisvogelschutzbeauftragter den Kenntnisstand zu den Auswirkungen von Feuerwerken auf Wildvögel zusammengefasst. Gemeinsam mit den Co-Autoren wurden ornithologische Untersuchungen zu Feuerwerken am Schiersteiner Teichgebiet und am Floßhafen Mainz-Kostheim durchgeführt. Das Schiersteiner Teichgebiet ist eine der bedeutendsten Flächen des VSG „Inselrhein“. Der Floßhafen Mainz-Kostheim grenzt nahe dem Übergangsbereich der beiden genannten VSG an das VSG „Inselrhein“ an.

2 Literaturüberblick

Im Folgenden wird der Kenntnisstand zu Auswirkungen von Feuerwerken auf Wildvögel neu zusammengefasst, aktualisiert und ergänzt.

2.1 Methodik

Deutsch- und englischsprachige wissenschaftliche Veröffentlichungen zu den Auswirkungen von Feuerwerken auf Wildvögel in Europa seit 2011 wurden vom Erstautor bis zum 16.07.2025 auf scholar.google.de gesucht.

2.2 Ergebnisse

SHAMOUN-BARANES et al. (2011) untersuchten in den Niederlanden das Auffliegen von Vögeln in den Silvesternächten dreier aufeinanderfolgender Jahre mit Hilfe eines Wetter-Radargeräts. In den Momenten des Jahreswechsels konnte in allen drei Jahren das Aufsteigen tausender Vögel im Untersuchungsgebiet (Natura 2000-Fläche Oostelijke Vechtplassen) nachgewiesen werden. Die massivste Störung dauerte etwa 45 Minuten. Auf ihrem Höhepunkt konnte die höchste Vogeldichte in einer Höhe von 500 Metern über dem Boden festgestellt werden. Besonders stark wurden Vögel auf Grasland und in Feuchtgebieten aufgescheucht, wo sich zu den untersuchten Zeitpunkten tausende Wasservögel befanden. Die Autoren warnten vor den Folgen für die Vögel (Energieverlust durch Flug, Unterbrechung von Schlaf, Ruhe oder Nahrungssuche, schwierigere Nahrungsbeschaffung nach Flucht in unbekannte Gebiete, Unfallgefahr durch Desorientierung).

STICKROTH (2015) fasste Beobachtungen zu 133 Feuerwerken zusammen (70 % in Deutschland). Diese führen bei Vögeln oft zu starken Reaktionen bis hin zu Paniken. Panische Reaktionen wurden vor allem bei Schwarmvögeln wie Gänzen und Kranichen *Grus grus* beobachtet, weil ein sensibleres Individuum die anderen mitreißt. Durch den Energieverbrauch infolge eines Feuerwerks kann es in Zeiten

erhöhten Energieverbrauchs und einer gleichzeitig schlechten Versorgungslage zu lebensbedrohlichen Notlagen kommen. Bei Populationen mit instabilem Erhaltungszustand, negativer Bestandsentwicklung oder geringen Individuenzahlen sowie sensiblen Artspezifika (Schwarmvögel, Koloniebrüter) kann sich dadurch der Erhaltungszustand verschlechtern.

WEGGLER (2015) stellte am Zürichsee an den Neujahrstagen 2014 und 2015 statistisch signifikant weniger Wasservögel fest als am Vortag (26 % bzw. 35 %). Das betraf besonders die Bereiche des Sees, die der Abschussstelle am nächsten lagen. Am stärksten reagierten Tafelente *Aythya ferina*, Reiherente *Aythya fuligula* und Blässhuhn *Fulica atra*.

BOSCH & LURZ (2019) untersuchten die Auswirkungen des Silvesterfeuerwerks auf in Nistkästen schlafende Singvögel zwischen 2009/10 und 2018/19 mit Hilfe von Kameras. Die Vögel verloren während der Silvesternacht etwa eine Stunde Schlaf. Sie gaben zudem ihre energiesparende Kugelform (Kälteschutz) auf. Die Autoren halten es für möglich, dass das in Nächten mit Temperaturen unter 0 °C zu einem lebensgefährlichen Energieverlust und zu Auswirkungen auf Populationsebene führen kann. Sie mahnen, dass derartige Störungen wildlebender Tiere nach dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) verboten sind.

BOSCH & LURZ (2021) fanden während des Covid-Lockdowns und des dadurch bedingt verringerten Silvesterfeuerwerks 2020, dass Kohlmeisen *Parus major* um fast zwei Drittel kürzer vom Schlaf abgehalten wurden als 2018. Sie empfehlen Mindestabstände von Feuerwerken zu sensiblen Lebensräumen von mindestens 100, besser 200 m. Als Beispiele nennen sie Lebensräume, in denen Singvögel in Höhlen oder in der Vegetation schlafen

BERNAT-PONCE et al. (2021) untersuchten die Auswirkungen von Festumzügen mit Böllerschüssen und Feuerwerken im Frühling auf den Fortpflanzungserfolg von Haussperlingen *Passer domesticus* in Spanien. Das Verhältnis Jungvögel/Adulte war 2019 an Orten mit Festumzügen signifikant geringer als auf den Vergleichsflächen. Als hingegen im Frühling 2020 die Festumzüge aufgrund der COVID-19-Pandemie ausfielen, war das Verhältnis Jungvögel/Adulte an den Orten, an denen ansonsten laute Festumzüge stattfanden, gleich hoch wie auf den Vergleichsflächen ohne Festumzüge.

KÖLZSCH et al. (2022) untersuchten die Auswirkung des Silvesterfeuerwerks auf in Westeuropa überwinternde besenderte Wildgänse zwischen 2014 und 2021. Diese flogen an Silvester durchschnittlich 5 bis 16 km weiter und 40 bis 150 m höher als an anderen Tagen und wechselten häufiger ihre Ruheplätze. In den folgenden mindestens elf Tagen flogen sie weniger und verbrachten mehr Zeit mit der Nahrungsaufnahme, vermutlich, um den erhöhten Energieverbrauch während der Silvesternacht zu kompensieren. In der Silvesternacht 2020 war das Feuerwerk in Westeuropa aufgrund der Covid-19-Pandemie reduziert (z. B. in den Niederlanden auf etwa 30 %). Bläsgänse *Anser albifrons* und Saatgänse *Anser fabalis* reagierten dennoch mit weiteren zurückgelegten Flugstrecken (+ 15 km

bzw. + 13 km) und größeren Flughöhen (+ 174 m bzw. + 237 m) als in anderen Nächten. Die Autoren mahnen, dass durch das Silvesterfeuerwerk Wildvögel auch in Schutzgebieten von ihren Ruheplätzen vertrieben werden und länger anhaltende Folgen erleiden, obwohl die EU-Vogelschutzrichtlinie dazu auffordert, solche Störungen zu vermeiden.

WASCHER et al (2022) zeigten, dass ein Silvesterfeuerwerk in Oberösterreich bei freilebenden Graugänsen *Anser anser* zu einer Erhöhung der Herzfrequenz und der Körpertemperatur führte. Sie schlossen daraus auf eine Stressreaktion, die zu einem erhöhten Energieverbrauch führt.

WAYMAN et al. (2023) untersuchten mit Hilfe eines Radargeräts die Reaktionen von Vögeln im städtischen Umfeld von Birmingham auf Feuerwerksnächte (Diwali, Bonfire Night, Silvester) im Jahr 2021. Auch diese an menschliche Störungen gewöhnten Vögel flogen in Feuerwerks-Nächten höher und in größerer Anzahl als in anderen Nächten. Auch für städtische Vögel nehmen die Autoren folglich negative Konsequenzen von Feuerwerken an (erhöhtes Kollisionsrisiko, Luftverschmutzung, Unterbrechung des natürlichen Verhaltens, Energieverlust).

HOEKSTRA et al. (2024) untersuchten in den Niederlanden mit Hilfe zweier Wetter-Radargeräte, wie stark Reaktionen von Vögeln auf Feuerwerke von ihren Lebensräumen, den entsprechenden Vogel-Lebensgemeinschaften und von der Entfernung zum nächsten Feuerwerk abhängen. In der Silvesternacht 2017 flogen etwa tausendmal so viele Vögel auf wie in anderen Nächten. Ihre Anzahl nahm erst ab einer Entfernung von etwa 1.500 m vom nächsten Feuerwerk ab und erreichte erst bei 5.000 m Entfernung ein erstes Minimum. Vogellebensgemeinschaften in offenen Landschaften (Grasland, Wasserflächen, Feuchtgebiete) wurden stärker gestört als solche in stärker von Vegetation bedeckten Lebensräumen. Die Vogellebensgemeinschaften der offenen Lebensräume bestanden überwiegend aus größeren Vogelarten (z. B. Gänse, Enten), während die der bedeckteren Lebensräume überwiegend aus kleineren Vogelarten (z. B. Meisen, Finken) bestanden. Die Autoren fordern dazu auf, die Auswirkungen von Feuerwerken auf Vögel und andere Wildtiere zu verringern. Dabei sollen vor allem die störungsanfälligen größeren Vogelarten geschützt werden.

Junge Uhus *Bubo bubo*, die in einem ehemaligen Steinbruch aufwuchsen, setzten hingegen ihre Kontakttrufe während eines Feuerwerks unverändert fort und ließen sich somit vom Feuerwerk offensichtlich nicht stören (HARMS 2024).

WASCHER & HENNIGH-Palermo (2025) beobachteten an Silvester 2023 in Berlin, dass Rabenvögel in großer Zahl aufstiegen. Sie warnen vor der hohen Kollisionsgefahr für diese tagaktiven Vögel durch die Dunkelheit und die durch den Lärm gestörte Kommunikation. Sie betonen, dass auch der Energieverlust und die verringerte Nachtruhe der Vögel signifikante Auswirkungen auf Fortpflanzung und Überleben haben kann.

2.3 Diskussion

Neueste Untersuchungen bestätigen frühere Zusammenfassungen, nach denen Feuerwerke erhebliche Auswirkungen auf Wildvögel haben. Untersuchungen mit Hilfe von Wetterradar-Anlagen und besonderten Vögeln zeigen, dass das Silvesterfeuerwerk Wildvögel in Massen zum Auffliegen in große Höhen zwingt (SHAMOUN-BARANES et al. 2011; KÖLZSCH et al. 2022; WAYMAN et al. 2023; HOEKSTRA et al. 2024). Die Scheuchwirkung von Feuerwerken auf Wildvögel beginnt erst ab einer Entfernung von 1.500 m zum Feuerwerksstandort abzunehmen und erreicht erst bei 5.000 m Abstand ein erstes Minimum (HOEKSTRA et al. 2024). Kameras in Nistkästen beweisen, dass auch in Höhlen verharrende Singvögel beeinträchtigt werden (BOSCH & LURZ 2019, 2021). Durch die Alarmsituation zur Unzeit (Nacht, Winter) kommt es zu Energiedefiziten (KÖLZSCH et al. 2022; WASCHER et al. 2022) und problematischen Gebietswechseln (WEGGLER 2015; KÖLZSCH et al. 2022), was bei ungünstigen Bedingungen (Kälte, Nahrungsmangel) lebensbedrohlich sein kann und sich so auch auf Populationsebene auswirken kann. Wissenschaftler mahnen, dass eine Desorientierung tagaktiver Vögel während der Flucht vor einem Feuerwerk in der Dunkelheit lebensgefährliche Kollisionen verursachen kann (SHAMOUN-BARANES et al. 2011; WAYMAN et al. 2023; WASCHER & HENNIGH-PALERMO 2025). Böllerschüsse und Feuerwerke zur Brutzeit können zudem den Fortpflanzungserfolg von städtischen Singvögeln signifikant beeinträchtigen (BERNAT-PONCE et al. 2021). Es sollte folglich überprüft werden, inwieweit Feuerwerke mit dem Naturschutzrecht in Einklang stehen und es sollten Maßnahmen ergriffen werden, um Beeinträchtigungen von Wildvögeln zu verhindern (s. Kap. 5.).

3 Fallstudie Schiersteiner Hafenfest 2024

3.1 Einleitung

Das Schiersteiner Teichgebiet ist eine der wertvollsten Flächen des EU-VSG „Inselrhein“. Für acht Vogelarten ist das Teichgebiet der einzige Brutplatz im VSG (Tab. 1). Für die Tafelente ist das Teichgebiet im Winter ein wichtiger Schlafplatz (bis 65 Individuen). Für die Rohrdommel *Botaurus stellaris* ist es der einzige Rastplatz im VSG. Mit zwei bis sechs Individuen gibt es hier das größte regelmäßige Vorkommen in ganz Hessen (STÜBING 2022).

Im Juli, und damit noch zur Brutzeit etlicher Vogelarten, findet in Schierstein alljährlich das Hafenfest statt, welches mit einem großen Traditionfeuerwerk beendet wird. Der Schiersteiner Hafen grenzt östlich an das Teichgebiet an.

Tabelle 1: Vogelarten, für die das Teichgebiet als bedeutendster Brutplatz im VSG Inselrhein eingestuft wurde (STÜBING 2022) mit Status nach der Roten Liste der Brutvögel Hessens (KREUZIGER et al. 2023; 1 = vom Aussterben bedroht, 2 = stark gefährdet, V = Vorwarnliste, * = ungefährdet) und Erhaltungszustand in Hessen (KREUZIGER et al. 2023; G = günstig, U = ungünstig-unzureichend, S = ungünstig-schlecht)

Table 1: Bird species for which the Teichgebiet area was classified as the most important breeding site in the VSG Inselrhein (STÜBING 2022) with status according to the Red List of breeding birds in Hesse (KREUZIGER et al. 2023; 1 = critically endangered, 2 = endangered, V = near threatened, * = least concern) and conservation status in Hesse (KREUZIGER et al. 2023; G = favourable, U = unfavourable-inadequate, S = unfavourable-bad)

Vogelart	Teichgebiet 2022 [Reviere]	Status Rote Liste Hessen (2023)	Erhaltungszustand Hessen (2023)
Drosselrohrsänger <i>Acrocephalus arundinaceus</i>	3	2	S
Haubentaucher <i>Podiceps cristatus</i>	1	*	G
Rohrammer <i>Emberiza schoeniclus</i>	2-5	2	S
Saatkrähe <i>Corvus frugilegus</i>	30	V	U
Schwarzkehlchen <i>Saxicola rubicola</i>	1-3	*	G
Teichrohrsänger <i>Acrocephalus scirpaceus</i>	15-30	2	S
Weißstorch <i>Ciconia ciconia</i>	32	*	G
Zwergdommel <i>Ixobrychus minutus</i>	0-1	1	S

3.2 Methodik

Am 15.07.2024 wurden die Reaktionen von Wildvögeln auf das Feuerwerk am Schiersteiner Hafen beobachtet. Sonja Gärtner beobachtete vom Nordrand des Hafenbeckens aus, Witiko Heuser beobachtete am Schiersteiner Teichgebiet das Beckensystem III und Oliver Weirich die Beckensysteme I und II. Vorgänge in der Umgebung des Teichgebiets in den Wochen um das Feuerwerk wurden mit Hilfe von Meldungen auf ornitho.de und Befragungen der betreffenden Ornithologen dargestellt.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Wichtige Beobachtungen vor und nach dem Feuerwerk

a) Zum Zeitpunkt des Feuerwerks (15.07.2024) gibt es im Teichgebiet ein Paar der Reiherente (Beispiel-Foto: Abb. 1). Nachdem das Paar zwischen dem 16.05. und 09.06. regelmäßig bei ornitho.de dokumentiert wird, ist zwischen dem 10.06. und dem Feuerwerk nur noch (und regelmäßig) das Männchen zu sehen (Tab. 2). Das deutet stark darauf hin, dass das Weibchen in der Zwischenzeit begonnen hat zu brüten. Zwei Tage nach dem Feuerwerk beobachtet Witiko Heuser das Weibchen, welches nicht (mehr) brütet und keine Küken führt.

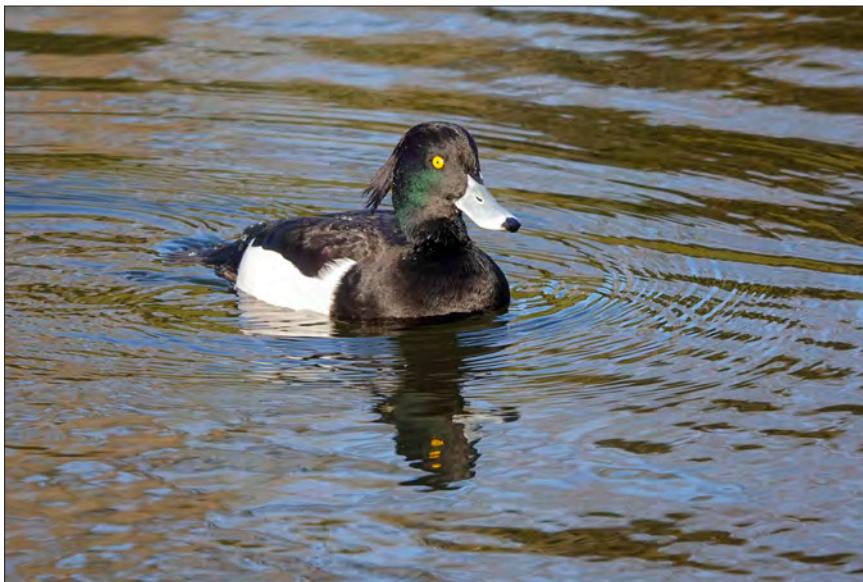


Abbildung 1: Männliche Reiherente in Wiesbaden am 26.10.2023; Foto: O. Weirich.
Figure 1: Male Tufted Duck in Wiesbaden on 26.10.2023; photo: O. Weirich.

Tabelle 2: Ornitho-Meldungen von Reiherenten im Teichgebiet von Mitte April bis Juli
Table 2: Ornitho reports of Tufted Ducks in the Teichgebiet area from mid-April to July

Datum	Anzahl	Männchen	Weibchen	Ort	Melder/Melderin
11.04.	3	1	2	Becken III	Fritz Sperling
12.04.	3	1	2	Becken III Süd	Witiko Heuser
13.04.	1	?	?	Becken III Süd	Oliver Weirich
17.04.	2	?	?	?	Ingo Hausch

Tabelle 2: Fortsetzung

Table 2: continued

Datum	Anzahl	Männchen	Weibchen	Ort	Melder/Melderin
16.05.	2	1	1	Becken III	Fritz Sperling
26.05.	2	?	?	Becken III Süd	Wilma Wehmeyer
27.05.	2	1	1	Becken III Lagune	Witiko Heuser
31.05.	2	1	1	Becken III Süd	Witiko Heuser
04.06.	2	?	?	Becken III Süd	Wilma Wehmeyer
05.06.	2	2	0	Becken III Süd, I Nord	Ingo Hausch
07.06.	2	1	1	Libellenteich	Witiko Heuser
09.06.	2	1	1	Becken III Lagune	Witiko Heuser
10.06.	1	1	0	Becken III Süd	Wilma Wehmeyer
18.06.	1	1	0	Becken III Süd	Ingo Hausch
21.06.	1	1	0	Becken III Süd und Lagune	Witiko Heuser
28.06.	1	1	0	Becken III Süd	Witiko Heuser
29.06.	1	1	0	Becken III Süd	Witiko Heuser
04.07.	1	?	?	Becken I	Fritz Sperling
05.07.	1	?	?	Becken I	Witiko Heuser
10.07.	5	?	?	Becken III*	Ingo Hausch
15.07.	2	1	1	Becken III Nord	Witiko Heuser
16.07.	1	1	0	Becken III Nord	Wilma Wehmeyer
17.07.	1	0	1	Becken III Nord	Witiko Heuser
18.07.	1	0	1	Becken III Süd	Wilma Wehmeyer
24.07.	1	?	?	?	Johannes Reufenheuser
29.07.	1	1	0	Becken III Nord	Witiko Heuser

*Ingo Hausch, 06.04.2025, briefl. Mitt.

b) An den Schiersteiner Teichen gibt es am Becken III eine Familie der Zwergdommel mit vier Jungen in einer Entfernung von etwa 1.800 Metern zum Feuerwerksstandort (Abb. 2). Bis zum Feuerwerk (15.07.2024) besteht der Verdacht auf eine zweite Brut in einer Entfernung von etwa 1.200 m zum Feuerwerksstandort am Ostufer von Becken II auf Höhe des Mitteldamms in einem Hartriegelstrauch. (Tab. 3). Nach dem Ende der Brutzeit findet Witiko Heuser hier ein typisches Zwergdommel-Nest.



Abbildung 2: Männchen der Zwergdommel-Familie im Schiersteiner Teichgebiet am 25.07.2024; Foto: O. Weirich.

Figure 2: Male of the Little Bittern family in the Schiersteiner Teichgebiet on 25.07.2024; photo: O. Weirich.

Tab. 3: Ornitho-Meldungen von Zwergdommeln am wahrscheinlichen zweiten Brutplatz
Table 3: Ornitho-records of Little Bitterns at the probable second breeding site

Datum	Beobachtung	Beobachter
05.07.	vier Flüge von ein bis zwei Individuen zwischen Libellenteich und den Becken I oder II, ein Flug entlang Becken II	Witiko Heuser
08.07.	rufendes Männchen am Libellenteich, zwei Flüge des Weibchens zum und vom Libellenteich, zwei Flüge des Weibchens an Becken II	Witiko Heuser
10.07.	adultes Männchen zwischen Becken I und Libellenteich	Ingo Hausch
16.07.	rufendes Männchen am Libellenteich	Wilma Wehmeyer
16.07.	keine Feststellungen an den Becken I und II trotz intensiver Beobachtung	Witiko Heuser
17.07.	keine Feststellungen an den Becken I und II trotz intensiver Beobachtung	Witiko Heuser
23.07.	keine Feststellungen an den Becken I und II trotz Suche zwischen 08:45 Uhr und 15:00 Uhr	Witiko Heuser
26.07.	rufendes Männchen zwischen Becken I und Libellenteich und eine Feststellung an Becken II	Witiko Heuser
27.07.	Zwergdommel am östlichen Nordrand von Becken II	Witiko Heuser

c) Witiko Heuser beobachtet vor dem Feuerwerk regelmäßig eine Schlafgemeinschaft von Rabenvögeln am Feuerwerksstandort. Am Abend des Feuerwerks zählt er vom Becken III aus 139 zum Schlafplatz einfliegende Individuen. Am Vortag schätzte er an diesem sehr unterschiedlich stark genutzten Schlafplatz 1000 anwesende Rabenvögel.

3.3.2 Beobachtungsbedingungen während des Feuerwerks

Aufgrund eines herannahenden Unwetters wird das Feuerwerk am 15.7.2025 auf 21:35 Uhr vorverlegt. Diese Situation bietet die seltene Gelegenheit, die Reaktionen der Vögel im Hellen zu beobachten.

3.3.3 Beobachtungen während des Feuerwerks

Schiersteiner Teichgebiet, Beckensystem III

- a) Ab 20:30 Uhr fliegen 181 Graugänse zum Schlafen in das Becken III ein (westliches Becken). Zu Beginn des Feuerwerkes um 21:35 Uhr fliegen immer mehr Gänse truppweise nach Westen ab. Zum Schluss drückt sich ein Rest von ca. 50 verbliebenen Gänsen am westlichsten Rand von Becken III ans Ufer. Sie sind hier etwa 1.800 m vom Feuerwerk entfernt.
- b) Zu Beginn des Feuerwerks (21:35 Uhr) fliegt das einzige Reiherenten-Paar des Teichgebiets in schnellem Flug nach Westen.
- c) Zwischen 20:00 Uhr und 20:42 Uhr fliegen etwa 300 Stare *Sturnus vulgaris* zu ihrem Schlafplatz im Schilf des Beckens III ein. Zu Beginn und während des Feuerwerkes geben die Stare ihren Schlafplatz auf und fliegen im Schilfbestand in ca. 2 m Höhe nach Westen. Sie bleiben dabei in der Deckung des Schilfs und harren letztlich in der größtmöglichen Entfernung zum Feuerwerk im Schilf aus (etwa 1.800 m).

Schiersteiner Teichgebiet, Beckensysteme I und II

- a) Auf den Strommasten im Schiersteiner Teichgebiet nisten etliche Weißstörche. Drei Störche schauen gelegentlich in Richtung des Feuerwerks. Die meisten Störche verharren in derselben Weise wie vor dem Feuerwerk, manche putzen sich oder ruhen mit dem Schnabel im Gefieder.
- b) Drei Minuten nach den ersten Böllern fliegen über 140 Rabenvögel (Rabenkrähen *Corvus corone*, Dohlen *Corvus monedula*, vielleicht auch Saatkrähen darunter) aus Richtung Hafen kommend nach Westen über das Teichgebiet und drehen dann hoch oben nach Norden ab. Es handelt sich um die bekannte Schlafgemeinschaft.

Schiersteiner Hafen

- a) Acht Höckerschwäne *Cygnus olor* schwimmen zügig an den östlichen Rand des Hafenbeckens.

- b) Mehrere dutzend Singvögel fliegen schnell und unkoordiniert aus der Baumreihe am nördlichen Hafenbeckenufer heraus in Richtung Osten (z. T. in dortiges Gebüsch); ein Singvogel fliegt während des Feuerwerks in sehr schnellem Flug zurück Richtung Baumreihe.
- c) Ein Graureiher *Ardea cinerea*, ein Kormoran *Phalacrocorax carbo* sowie im Zickzackkurs zwei bis drei weitere einzelne Vögel fliegen schnell über das Hafenbecken weg.

3.4 Diskussion

Höchstwahrscheinlich hat ein Reiherenten-Paar wegen des Feuerwerks am Schiersteiner Hafenfest am 15.07.2024 seine Brut aufgegeben. Nach den Methodenstandards zur Erfassung der Brutvögel Deutschlands (SÜDBECK et al. 2025) sind die Kriterien für einen Brutverdacht bei Weitem erfüllt (s. Tab. 2). Da das Verhalten der Vögel spätestens ab dem 18.06. brutverdächtig war und die Brutdauer 23–28 Tage beträgt (SÜDBECK et al. 2025), sollten die Küken zum Zeitpunkt des Feuerwerks am 15.07. kurz vor dem Schlupf gestanden haben. Die Reiherente ist in Hessen als Brutvogel vom Aussterben bedroht, der Landesbestand beträgt 50–100 Paare (KREUZIGER et al. 2023).

Eine erfolgreiche Zwergdommel-Brut am Beckensystem III in den Wochen vor dem Feuerwerk belegt erneut den herausragenden Wert des Schiersteiner Teichgebiets unter den Flächen des EU-VSG Inselrhein. Die Zwergdommel ist in Hessen als Brutvogel vom Aussterben bedroht, wobei der Landesbestand nur fünf bis zehn Paare beträgt (KREUZIGER et al. 2023). Anfang/Mitte Juli kam es zu einer Konzentration von Zwergdommel-Beobachtungen im Übergangsbereich der Beckensysteme I und II und nach Ende der Brutzeit wurde genau dort ein Nest gefunden. Ein zweiter Brutversuch zum Zeitpunkt des Feuerwerks ist somit wahrscheinlich. Da nie Jungvögel festgestellt wurden, ist dieser erfolglos verlaufen. In der Woche nach dem Feuerwerk konnte am wahrscheinlichen zweiten Brutplatz nur noch am Tag nach dem Feuerwerk einmal eine Zwergdommel festgestellt werden. Das Verhalten war nicht mehr brutverdächtig.

Schlafgemeinschaften von Graugänsen, Staren und Rabenvögeln wurden aufgescheucht. In einer Entfernung von etwa 1.800 m vom Feuerwerk flüchteten etwa 130 Graugänse, während sich die verbliebenen etwa 50 Graugänse und etwa 300 Stare so weit wie möglich vom Feuerwerk entfernt drängten. Das bestätigt aktuelle Erkenntnisse, nach denen die Scheuchwirkung über Kilometer anhält (HOEKSTRA et al. 2024).

4 Fallstudie Floßhafen Mainz-Kostheim Silvester 2024

4.1 Einleitung

Der Floßhafen ist einer der drei wichtigsten Winter-Rastplätze der Krickente *Anas crecca* (Abb. 3) am über 50 km langen Rheinabschnitt der EU-VSG „Mainmündung und Ginsheimer Altrhein“, „Inselrhein“ und „Rheinaue Bingen – Ingelheim“ (WEIRICH & REUFENHEUSER 2022). Dieser Rastplatz der Krickente wurde vom Hessischen Umweltministerium als „von landesweiter Bedeutung“ eingestuft (SIMON BRUHN, 05.08.2022, briefl. Mitt.). Scheue Wildvögel, die auf Seicht- und Stillwasserbereiche (Abb. 4) angewiesen sind, finden im Floßhafen einen Rückzugsraum vor, wenn solche aufgrund des Wasserstandes des Rheins selten sind (WEIRICH & REUFENHEUSER 2022).



Abbildung 3: Krickente an der Sandlache bei Ingelheim; Foto: O. Weirich.
Figure 3: Teal at the Sandlache near Ingelheim; photo: O. Weirich.

Die Krickente ist in Hessen als Brutvogel vom Aussterben bedroht (KREUZIGER et al. 2023). Ihre Rastbestände in den angrenzenden hessischen EU-VSG „Inselrhein“ und „Mainmündung und Ginsheimer Altrhein“ wurden bei den Grunddatenerhebungen im schlechtesten Erhaltungszustand C eingestuft (SUDMANN 2009a, b). Aktuell wurde die Krickente in beiden VSG erneut im Erhaltungszustand C eingestuft, wobei sich ihre Populationsgröße im Gebiet „Mainmündung und Ginsheimer Altrhein“ noch verschlechtert hat (STÜBING 2022 bzw. KREUZI-

GER & WERNER 2018). Größere Krickenten-Trupps sind am Inselrhein in der Regel von September bis März anwesend (WEIRICH & REUFENHEUSER 2022).

Der Floßhafen war viele Jahre lang durch das Betriebsgelände der Firma Linde vom Freizeitdruck der Menschen abgeschirmt. Mit dem aktuellen Bau von etwa 800 Wohnungen werden private Silvesterfeuerwerke künftig bis an den Floßhafen heranrücken.



Abbildung 4: Weite Schlickflächen im Floßhafen am 31.10.2021; Foto: O. Weirich.

Figure 4: Wide mudflats in the Floßhafen on 31.10.2021; photo: O. Weirich.

4.2 Methodik

Die Krickenten wurden am 31.12.2024 zwischen 13:17 Uhr und 14:38 Uhr von Sonja Gärtner und Oliver Weirich gezählt. Am 01.01.2025 wurden sie etwa zur selben Zeit von Sonja Gärtner erneut gezählt. Auf Untersuchungen um Mitternacht wurde wegen der schlechten Sichtbedingungen und der Störanfälligkeit der scheuen Krickenten durch Beobachter verzichtet.

4.3 Ergebnisse

Am Nachmittag des 31.12.2024 sind mindestens 20 Krickenten im Floßhafen vorhanden (Beispiel-Foto: Abb. 5). Sie halten sich im hinteren Bereich des Floßhafens auf. Am Nachmittag des 01.01.2025 werden mindestens 18 Krickenten gezählt, die sich ebenfalls im hinteren Bereich des Floßhafens aufhalten. Auf der nördlichen Seite des Floßhafens liegen nur zwei Stäbe von abgeschossenen Raketen. Auf der südlichen Seite liegen nur einige wenige Feuerwerkskörper an einer kleineren Stelle auf dem Parkplatz der Kleingärten sowie an einer sehr kleinen Stelle auf

der zu den Kleingärten führenden Asphaltstraße entlang des Floßhafens. Nach Angaben von zwei Kleingärtnern findet in den Kleingärten derzeit nahezu kein Feuerwerk statt.

4.4 Diskussion

Offenbar werden derzeit an Silvester im Umfeld des Floßhafens nur sehr wenige pyrotechnische Gegenstände abgebrannt. Der Rastbestand der Krickente nutzte den Floßhafen bereits am nächsten Tag wieder in etwa gleicher Zahl. Sowohl der Aufenthaltsort im hinteren Bereich des Floßhafens als auch die geringe Anzahl von etwa 20 Krickenten entsprechen dem, was aufgrund des Wasserstands im Floßhafen an diesen Tagen zu erwarten war (vgl. WEIRICH & REUFENHEUSER 2022). Es ist unbekannt, wie sich die Krickenten während des Feuerwerks verhalten haben. Die Scheuchwirkung von Feuerwerken auf Wildvögel beginnt erst ab einer Entfernung von 1.500 m abzunehmen (HOEKSTRA et al. 2024). Im Gegensatz zur Situation am Schiersteiner Hafenfest sind an Silvester im weiteren Umkreis aber überall Feuerwerke zu finden. Es erscheint plausibel, dass der versenkt gelegene, von Bäumen abgeschirmte und von Feuerwerken weiter entfernte Floßhafen bereits als sicherer empfunden wird als die Umgebung. Das neue Wohngebiet „Lindequartier“ mit 800 Wohnungen unmittelbar nördlich des Floßhafens war zum Zeitpunkt der Untersuchung nur vereinzelt bewohnt. Ohne behördliches Eingreifen wird es hier zukünftig zu einer erheblichen Belastung mit Silvesterfeuerwerk kommen. Auch die derzeit ruhige Lage auf der Maaraue könnte sich durch Besitzerwechsel der Kleingärten oder verstärktes Besucheraufkommen jederzeit ändern.



Abbildung 5: Ruhende Krickenten im Floßhafen am 11.12.2021; Foto: O. Weirich.

Figure 5: Resting teals in the Floßhafen on 11.12.2021; photo: O. Weirich.

5 Schlussfolgerungen zum Schutz von Wildvögeln

Zum Schutz von Wildvögeln vor erheblichen Störungen werden unter anderem feuerwerksfreie Zonen um Vogelschutzgebiete und um Rastplätze von Schwarmvögeln gefordert (STICKROTH 2015; NEULING & BASTIAN 2023). Neben dem besonderen Artenschutz nach § 44 (1) Bundesnaturschutzgesetz (i. F. BNatSchG) sowie Schutzgebietsbestimmungen können hierfür auch die Eingriffsregelung nach § 13 ff. BNatSchG (Veränderungen der Nutzung von Grundflächen, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts erheblich beeinträchtigen können) sowie der allgemeine Artenschutz nach § 39 (1) BNatSchG reduzierend oder untersagend herangezogen werden. Da für das Abbrennen von Feuerwerk nicht zwingend eine Notwendigkeit besteht, kann der Tatbestand der mutwilligen Beunruhigung wild lebender Tiere erfüllt sein (vgl. VG Würzburg 2010). Bei der Wahl des räumlichen Rahmens von feuerwerksfreien Zonen sollte berücksichtigt werden, dass die Scheuchwirkung auf Wildvögel erst ab einer Entfernung von 1.500 m abzunehmen beginnt (HOEKSTRA et al. 2024).

Die unmittelbar an Wiesbaden angrenzenden hessischen EU-Vogelschutzgebiete „Inselrhein“ und „Mainmündung und Ginsheimer Altrhein“ sind bedeutende Brut- und Rastplätze für zahlreiche Arten der Vogelschutzrichtlinie (SUDMANN 2009a, b; KREUZIGER & WERNER 2018; STÜBING 2022). Es handelt sich aufgrund der Wasserflächen um offene Lebensräume und Vogellebensgemeinschaften mit zahlreichen Enten und Gänsen, so dass hier eine besonders starke Störanfälligkeit bei Feuerwerken besteht (vgl. HOEKSTRA et al. 2024). Angesichts der herausragenden Bedeutung dieser Gebiete für den Vogelschutz in Hessen erscheinen ganzjährige feuerwerksfreie Zonen im Umkreis von 2.000 m wünschenswert.

Der Floßhafen Mainz-Kostheim ist ein Rastplatz der in Hessen als Brutvogel vom Aussterben bedrohten Krickente von landesweiter Bedeutung. Hier halten sich zwischen September und März regelmäßig bis zu 100 Krickenten auf (WEIRICH & REUFENHEUSER 2022). Während dieser Monate ist eine feuerwerksfreie Zone im Umkreis von 2.000 Metern um den Floßhafen wünschenswert. Nach den Beobachtungen der vorliegenden Untersuchung muss ein geringerer Umfang aber nicht zwingend nutzlos sein, falls 2.000 m nicht durchsetzbar sind.

Durch das Feuerwerk am Schiersteiner Hafenfest 2024 wurde höchstwahrscheinlich eine Brut der in Hessen vom Aussterben bedrohten Reiherente aufgegeben. Zu diesem Zeitpunkt gab es im Teichgebiet eine erfolgreiche und wahrscheinlich auch eine zweite erfolglose Brut der in Hessen vom Aussterben bedrohten Zwerdgummel. TRAUTNER & JOOSS (2008) empfehlen, für stark gefährdete Arten schon die störungsbedingte Beeinträchtigung eines einzigen Reviers oder von Revieranteilen als erhebliche Störung zu werten (zitiert in STICKROTH 2015). Aufgrund der herausragenden Bedeutung des Schiersteiner Teichgebiets als Brut- und Rastgebiet gefährdeter Vogelarten ist eine ganzjährige feuerwerksfreie Zone im Umkreis von 3.000 m dringend wünschenswert.

Aus Sicht der Unteren Naturschutzbehörde Wiesbaden ist ein traditionelles Feuerwerk am Schiersteiner Hafenfest aufgrund der hohen Störwirkung künftig nicht mehr genehmigungsfähig. Angesichts der ökologischen Bedeutung des Gebiets rund um den Schiersteiner Hafen, insbesondere für gefährdete und streng geschützte Arten der Avifauna, wurde für das Jahr 2025 in Abstimmung mit dem Veranstalter ein Pilotversuch mit einem geräuschreduzierten Feuerwerk vereinbart. Die Effekte dieses Versuchs wurden durch die Untere Naturschutzbehörde vor Ort dokumentiert und fachlich bewertet (DANIELLE BEER, 16.07.2025, briefl. Mitt.).

6 Literatur

- BERNAT-PONCE, E., GIL-DELGADO, J.A. & LOPEZ-IBORRA, G.M. (2021): Recreational noise pollution of traditional festivals reduces the juvenile productivity of an avian urban bioindicator. – *Environmental Pollution*, **286**: 117247.
- BOSCH, S. & LURZ, P. (2019): Reactions of cavity-roosting passerine birds to fireworks. – *Ornithologische Mitteilungen*, **71** (3): 79-88.
- BOSCH, S. & LURZ, P. (2021): COVID-19-Lockdown führt zu kürzerer und weniger intensiver Schlafstörung bei in Höhlen übernachtenden Singvögeln während des Silvester-Feuerwerks. – *Vogelwarte*, **59**: 144-148.
- HARMS, C: (2024): Wie reagieren Uhus *Bubo bubo* auf Lärm? – *Ornithologische Mitteilungen*, **75**: 25-38.
- HOEKSTRA, B., BOUTEN, W., DOKTER, A., VAN GASTEREN, H., VAN TURNHOUT, C., KRANSTAUER, B., VAN LOON, E., LEIJNSE, H. & SHAMOUN-BARANES, J. (2024): Fireworks disturbance across bird communities. – *Frontiers in Ecology and the Environment*, **22** (1): 8 S.
- KÖLZSCH, A., LAMERIS, T.K., MÜSKENS, G.J.D.M., SCHREVEN, K.H.T., BUITENDIJK, N.H., KRUCKENBERG, H., MOONEN, S., HEINICKE, T., CAO, L., MADSEN, J., WIKELSKI, M. & NOLET, B.A. (2022): Wild goose chase: Geese flee high and far, and with aftereffects from New Year's fireworks. – *Conservation Letters*, **16** (1): 11 S.
- KREUZIGER, J., KORN, M., STÜBING, S., EICHLER, L., GEORGIEV, K., WICHMANN, L. & THORN, S. (2023): Rote Liste der bestandsgefährdeten Brutvogelarten Hessens, 11. Fassung, Stand Dezember 2021. – 71 S.; Wiesbaden (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).
- KREUZIGER, J. & WERNER, M. (2018): SPA-Monitoring zum EU-Vogelschutzgebiet „Mainmündung und Ginsheimer Altrhein“ (6016-401), Stand: Januar 2019. Gutachten der Staatlichen Vogelschutzwarte für Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland. – 45 S.; Zwingenberg, Frankfurt a. M.
- PAYNE, D. & O REGAN, N. (2024): Out with the bang. Examining the case for alternatives to traditional fireworks. – 54 S.; London (The Social Market Foundation).
- NEULING, E. & BASTIAN, H.-V. (2023): Feuerwerke – Eine Belastung für Natur und Umwelt. NABU-Standpunkt zum Einsatz von Ganzjahres-/Sommer- und Silvesterfeuerwerken. – 11 S.; Berlin (Naturschutzbund Deutschland (NABU) e.V.).
- SHAMOUN-BARANES, J., DOKTER, A.M., VAN GASTEREN, H., VAN LOON, E.E., LEIJNSE, H. & BOUTENA, W. (2011): Birds flee en masse from New Year's Eve fireworks. – *Behavioral Ecology*, **22** (6): 1173-1177.
- STICKROTH, H. (2015): Auswirkungen von Feuerwerken auf Vögel – ein Überblick. – *Berichte zum Vogelschutz*, **52**: 115-149.

- STÜBING, S. (2022): SPA-Monitoring für das EU-Vogelschutzgebiet „Inselrhein“ (5914-450) im Jahr 2022, Stand: September 2022 (Bericht im Auftrag HLNUG). – 42 S.; Wiesbaden (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).
- SUDMANN, S.R. (2009a): Grunddatenerhebung für das EU-Vogelschutzgebiet „Inselrhein“ (5914-450). Versionsdatum: 29.06.2009. – 319 S.; Kranenburg (Planungsbüro STERNA).
- SUDMANN, S.R. (2009b): Grunddatenerhebung für das EU-Vogelschutzgebiet „Mainmündung und Ginsheimer Altrhein“ (6016-401). Versionsdatum: 02.03.2009. – 172 S.; Kranenburg (Planungsbüro STERNA).
- SÜDBECK, P., ANDRETSKE, H., FISCHER, S., GEDEON, K., PERTL, C., LINKE, T.J., GEORG, M., KÖNIG, C., SCHIKORE, T., SCHRÖDER, K., DRÖSCHMEISTER, R. & SUDFELDT, C. (2025): Methodenstandards zur Erfassung der Brutvögel Deutschlands, 1. überarb. Aufl. – 732 S.; Münster (Dachverband Deutscher Avifaunisten e.V. (DDA), Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten (LAG VSW), Bundesamt für Naturschutz (BfN) - Hrsg.).
- Verwaltungsgericht Würzburg (2010): Beschluss vom 24.06.2010 - W 5 S 10.566; Würzburg.
- WASCHER, C.A.F., ARNOLD, W. & KOTRSCHAL, K. (2022): Effects of severe anthropogenic disturbance on the heart rate and body temperature in free-living greylag geese (*Anser anser*). – *Conservation Physiology* **10** (1): 10 S.
- WASCHER, C.A.F. & HENNIGH-PALERMO, W. (2025): Responses of wintering corvids to New Year's Eve fireworks in Berlin. Preprint, version 2 (07.07.2025). – 18 S.; Cambridge/UK (Behavioural Ecology Research Group, School of Life Sciences, Anglia Ruskin University).
- WAYMAN, J.P., ATKINSON, G., JAHANGIR, M., WHITE, D., MATTHEWS, T.J., ANTONIOU, M., REYNOLDS, S.J. & SADLER, J.P. (2023): L-band radar quantifies major disturbance of birds by fireworks in an urban area. – *Scientific Reports*, **13**: 12085.
- WEGGLER, M. (2015): Effekt von Silvesterfeuerwerk auf überwinternde Wasservögel im unteren Zürichsee-Becken. – *Der Ornithologische Beobachter*, **112**: 211-218.
- WEIRICH, O. & REUFENHEUSER, J. (2022): Zur Bedeutung des Floßhafens Mainz-Kostheim für den Rastbestand der Krickente *Anas crecca* im Biotopverbund der angrenzenden Vogelschutzgebiete und seiner Gefährdung durch die Bebauung des Linde-Quartiers. – In: Hessische Gesellschaft für Ornithologie und Naturschutz e.V. Arbeitskreis Wiesbaden / Rheingau-Taunus-Kreis (Hrsg.). – *Jahresbericht 2020/2021*: 28-39.

OLIVER WEIRICH
Diplom-Biologe
E-Mail: oliver.weirich@gmx.net

Sonja Gärtner
Dipl.-Ing./Ass. Landespflege
E-Mail: sonja.gaertner@online.de

WITIKO HEUSER
E-Mail: witiko.heuser@t-online.de

Manuskripteingang: 16. August 2025

Das Erdmagnetfeld – Schutzschild unseres Planeten und Fenster ins tiefen Erdinnere

MONIKA KORTE

Erdmagnetfeld, Geomagnetismus, Magnetosphäre, Weltraumwetter

K u r z f a s s u n g : Das Erdmagnetfeld umgibt unseren Planeten und schützt unseren Lebensraum gegen den Sonnenwind und kosmische Strahlung. Es spielt damit eine wichtige Rolle für die sog. Weltraumwetterbedingungen. Es dient Menschen und Tieren zur Navigation, und Messungen des Magnetfelds und seiner Änderungen können verschiedene Informationen über das System Erde liefern, von geologischen Zuständen in der Erdkruste bis hin zur Dynamik des äußeren Erdkerns oder dynamischen Prozessen in der Atmosphäre und im erdnahen Weltraum. Der Beitrag gibt einen Überblick über Eigenschaften, Erforschung und Nutzung des Erdmagnetfelds. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem im tiefen Erdinnern erzeugten Hauptanteil des Erdmagnetfelds, das sich über geologische Zeiträume mehrfach komplett umgepolt hat und damit auch wichtige Informationen zur Erdgeschichte liefert.

The Earth's magnetic field – protective shield for our planet and window into the Earth's deep interior

Earth's magnetic field, geomagnetism, magnetosphere, space weather

A b s t r a c t : The Earth's magnetic field surrounds our planet and protects our habitat from solar wind and cosmic radiation. It therefore plays an important role in what is known as space weather conditions. It helps humans and animals navigate, and measurements of the magnetic field and its changes can provide various information about the Earth system, from geological conditions in the Earth's crust to the dynamics of the outer core or dynamic processes in the atmosphere and near-Earth space. This article provides an overview of the properties, research on and use of the Earth's magnetic field. The focus lies on the main part of the geomagnetic field, which is generated deep inside the Earth and has completely reversed its polarity several times over geological time, thus also providing important information about Earth's history.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	198
2	Quellen des Erdmagnetfelds und ihre Bedeutung	198
3	Magnetosphäre und Weltraumwetter	202
4	Beobachtung und Rekonstruktion des Erdmagnetfelds	207
5	Säkularvariation, Umpolungen und der Geodynamo	211
6	Offene Fragen und aktuelle Forschung	216
7	Daten des Erdmagnetfelds und Weltraumwetters	218
8	Danksagung	219
9	Literatur	219

1 Einleitung

Unsere Erde ist von einem unsichtbaren, von Menschen nicht bewusst wahrnehmbaren Schutzschild umgeben, dem Erdmagnetfeld. Es schützt uns vor Teilchenstrahlung von der Sonne und aus dem Weltraum. Mithilfe des Magnetkompasses dient es der Menschheit seit Jahrhunderten zur Navigation. Verschiedene Tierarten, z. B. Tauben und verschiedene Zugvögel, Fische und Insekten, besitzen sogar einen Magnetsinn und nutzen das Magnetfeld auch direkt zur Orientierung.

Dass die Erde ein Magnetfeld besitzt, ist schon lange bekannt. Zum Beispiel wurde der Magnetkompass schon vor über 2.000 Jahren in China erfunden. Im Jahr 1600 veröffentlichte William Gilbert ein umfassendes Buch mit dem Titel „De Magnete“ über seine Experimente zum Magnetismus, in dem er die Erde selbst als großen Magneten beschreibt (z. B. MERRILL, McELHINNY & MCFADDEN 1998). Auch dass das Erdmagnetfeld sich mit der Zeit ändert, wurde schon früh beobachtet. Im frühen 19. Jahrhundert legten Alexander von Humboldt und Carl Friedrich Gauß wichtige Grundlagen für die systematische, weltweite Beobachtung, Beschreibung und Untersuchung dieses Phänomens (z. B. KORTE & MANDEA 2019). Humboldt regte auf seinen Forschungsreisen die Einrichtung permanenter magnetischer Messstationen in verschiedenen Ländern an. Diese bilden die Vorläufer des noch heute bedeutsamen, weltweiten Netzwerks sogenannter geomagnetischer Observatorien. Gauß engagierte sich für einheitliche, koordinierte Messungen der Stationen aus verschiedenen Ländern und die Sammlung dieser Daten in einem magnetischen Verein. Auch heute noch spielt die freie und zeitnahe Verfügbarkeit der weltweiten Observatoriumsdaten eine wichtige Rolle zur wissenschaftlichen und praktischen Nutzung des Erdmagnetfelds. Gauß war es auch, der die erste Methode zur absoluten Messung der Intensität des Erdmagnetfelds erfand und eine noch heute weit verbreitete mathematische Methode zur weltweiten Kartierung von Stärke und Richtung des Erdmagnetfelds entwickelte.

Trotz der langjährigen Erforschung des Erdmagnetfelds ist es nicht bis ins Detail verstanden. Zum Beispiel können wir seine zukünftigen Änderungen nicht vorhersagen. Der Artikel gibt einen Überblick über unser heutiges Wissen über das Erdmagnetfeld, über seine Ursachen und Änderungen sowie über seine praktische und wissenschaftliche Bedeutung.

2 Quellen des Erdmagnetfelds und ihre Bedeutung

Als erstes muss der Begriff „Erdmagnetfeld“ geklärt werden, denn jede Messung des natürlichen Magnetfelds der Erde enthält Anteile aus verschiedenen Quellen. Zum Vergleich der Größenordnungen der verschiedenen Anteile werden im Folgenden ungefähre Werte für deren Feldstärken angegeben. Die dafür im Magnetismus verwendete Einheit ist das Tesla (T), genau genommen also die Einheit

der magnetischen Flussdichte. Da das natürliche Feld viel schwächer als 1 T ist, werden die Feldstärken in der Regel in nanoTesla (nT, 10^{-9}T) bzw. microT (μT , 10^{-6}T) angegeben. Magnetfelder sind Vektorfelder, zu deren vollständiger Beschreibung neben der Stärke auch die Richtung notwendig ist.

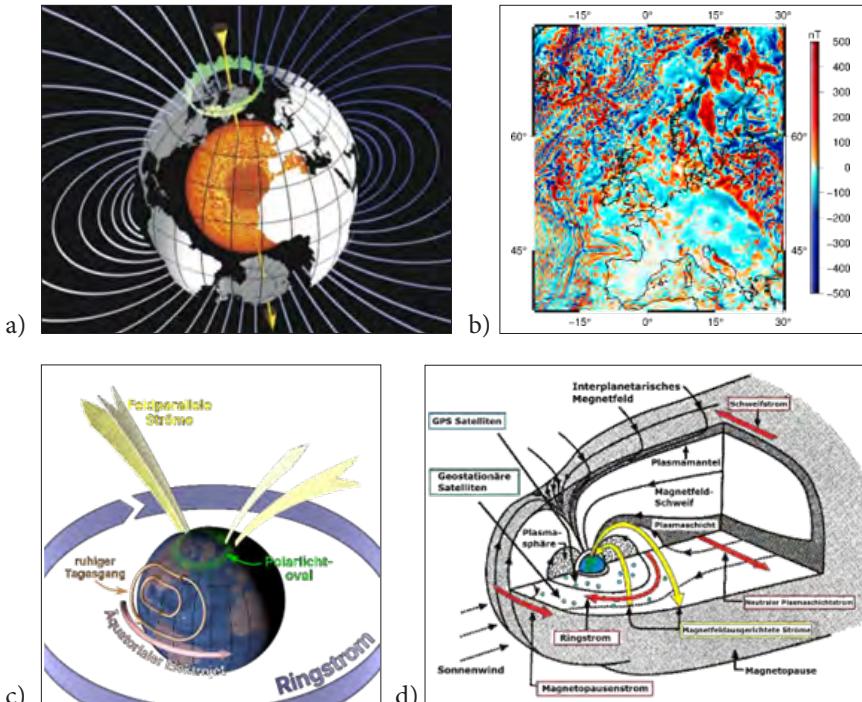


Abbildung 1: Die Quellen des Erdmagnetfelds. Das Hauptfeld entsteht im Erdkern und hat näherungsweise die Form eines gegenüber der Rotationachse geneigten Dipoles (a). Das oberflächennahe Lithosphärenfeld, hier dargestellt für 5 km Höhe über der Erdoberfläche, besteht aus lokalen bis regionalen Anomalien (b). Elektrische Stromsysteme in der Ionosphäre (c) und Magnetosphäre (d) erzeugen von außerhalb der Erde kommende Magnetfeldanteile (schematische und stark vereinfachte Darstellung); Bilder: a) GFZ; b) Generiert aus Daten der World Digital Magnetic Anomaly Map (wdmam.org); c) GFZ; d) modifiziert nach KIEVELSON & RUSSELL (1995).

Figure 1: The sources of the Earth's magnetic field. The main field originates in the Earth's core and is approximately shaped like a dipole that is tilted relative to the rotation axis (a). The lithospheric field near the surface, shown here at a height of 5 km above the Earth, consists of local to regional anomalies (b). Electric current systems in the ionosphere (c) and magnetosphere (d) generate magnetic field components originating outside the Earth (schematic and greatly simplified representation); images: a) GFZ; b) generated from data from the World Digital Magnetic Anomaly Map (wdmam.org); c) GFZ; d) modified according to KIEVELSON & RUSSELL (1995).

Den größten Anteil macht mit mehr als 90 % des an der Erdoberfläche gemessenen Felds das Haupt- oder Kernfeld aus. Es hat in erster Näherung die Form eines Dipolfelds wie das eines Stabmagneten. Die Richtung des Dipolfelds ist um

ca. 10° gegenüber der Rotationsachse der Erde geneigt (Abb. 1a). Nach der physikalischen Definition der Magnetfeldrichtung ist der magnetische Pol auf der Nordhalbkugel ein Südpol. Die Stärke des Hauptfelds beträgt in etwa zwischen 65.000 nT an den Polen und 30.000 nT am Äquator. Es wird durch den sog. Geodynamo im äußeren Erdkern erzeugt und ändert sich langsam, über Zeitskalen von Monaten bis zu Jahrtausenden (Abb. 2). Diese Änderung wird als Säkularvariation bezeichnet. Mehr zum Hauptfeld und seinen Änderungen findet sich in Kapitel 6. Dies ist z. B. der Magnetfeldanteil, der aufgrund seiner nur sehr langsam Änderung zur Navigation verwendet wird. Da er tief im Erdinnern erzeugt wird, können über die Beobachtung und Modellierung der Feldänderungen Rückschlüsse auf dynamische Vorgänge im äußeren Erdkern und auch mögliche Zusammenhänge mit Eigenschaften des Erdmantels gezogen werden. Das Erdmagnetfeld liefert damit Information über Regionen der Erde, die der direkten Beobachtung unzugänglich sind. Es spielt neben der Seismologie und dem Schwerkraftfeld der Erde eine wichtige Rolle zum Verständnis des tiefen Inneren unseres Planeten. Das Hauptfeld bildet um die Erde herum die Magnetosphäre, die in

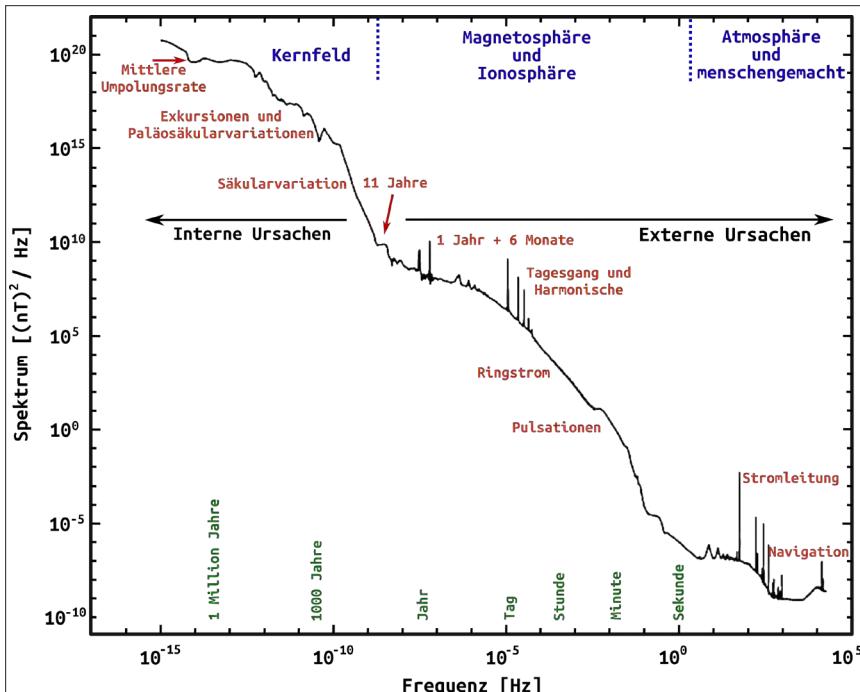


Abbildung 2: Spektrum der Variationen des Erdmagnetfelds mit seinen verschiedenen Anteilen. Vereinfacht nach CONSTABLE & CONSTABLE, 2023.

Figure 2: Spectrum of geomagnetic field variations with its various components. Simplified according to CONSTABLE & CONSTABLE, 2023.

Kapitel 3 weiter beschrieben wird. Diese ist der Schutzschild unseres Planeten gegen Sonnenwind und kosmische Strahlung. Auch wenn mit Erdmagnetfeld häufig nur das Hauptfeld gemeint ist, gibt es weitere Magnetfeldquellen innerhalb und außerhalb der Erde mit verschiedenen Charakteristiken und Bedeutungen.

Der Erdmantel ist nur sehr schwach elektrisch leitfähig und damit weitgehend frei von Magnetfeldquellen. In seinem obersten Teil und der Erdkruste, dem Bereich, der zusammen als Lithosphäre bezeichnet wird, können Gesteine und geologische und tektonische Strukturen jedoch Magnetfelder aufweisen. Dieses Lithosphären- oder Krustenfeld besteht aus lokalen bis regionalen Feldern, die sich dem Hauptfeld überlagern und als Anomalien bezeichnet werden (s. Abb. 1b). Die Anomalien können je nach Material der erzeugenden Gesteine und Strukturen durch remanente (permanente) Magnetisierung oder durch induzierte Magnetisierung durch das Hauptfeld (oder auch eine Kombination von beidem) erzeugt werden. Da sich aber auch induzierte Anomalien nur sehr langsam ändern, wird das Lithosphärenfeld in der Regel als zeitlich konstant angesehen. Die Größenordnung der Stärke der magnetischen Anomalien beträgt wenige nT bis hin zu einigen 1.000 nT, und bei einigen wenigen sehr starken Ursachen sogar bis in oder sogar über die gleiche Größenordnung wie das Hauptfeld. Dies trifft z. B. auf das Eisenerz-Flöz bei Kiruna in Nordschweden mit seinem sehr hohem Magnetit-Gehalt zu. Die Kartierung magnetischer Anomalien, nach sorgfältigem Abzug des Hauptfelds und aller weiteren Magnetfeldanteile, kann in vielfältiger Weise zur Interpretation geologischer und tektonischer Fragestellungen sowie der Lagerstättensuche beitragen (siehe z. B. PURUCKER & CLARK 2011).

Weitere Quellen natürlicher magnetischer Felder liegen außerhalb der Erde. Sie werden daher auch als externe Felder bezeichnet. In verschiedenen Regionen innerhalb der vom Hauptfeld gebildeten Magnetosphäre gibt es durch höhere Konzentrationen von Elektronen oder Ionen elektrisch leitfähige Regionen. Hier können sich Stromsysteme bilden, die Magnetfelder induzieren. Diese sind zeitlich stark variabel, mit Schwankungen von Sekundenbruchteilen bis zu Stunden und Tagen, und Feldstärken von weniger als 1 nT bis zu einigen 1.000 nT.

Besonders deutlich zeigt sich in Registrierungen des Magnetfelds am Erdboden ein regelmäßiger Tagesgang, der durch die Sonneneinstrahlung auf die Ionosphäre erzeugt wird. Als Ionosphäre wird ein Bereich der oberen Atmosphäre in Höhen von etwa 60 bis 1.000 km bezeichnet. Durch die Sonnenstrahlung wird sie auf der Tagseite deutlich stärker ionisiert und damit elektrisch leitfähiger als auf der Nachtseite. Dadurch bilden sich auf der sonnenzugewandten Seite zwei Stromwirbel aus, einer auf der Nord- und einer auf der Südhalbkugel (s. Abb. 1c, nur der nördliche Stromwirbel dargestellt). Die Drehung der Erde unter diesen relativ zur Sonne ortsfesten Stromwirbeln hinweg führt zu charakteristischen, breitenabhängigen Tagesschwankungen des Magnetfelds auf der Erde. Zwei weitere Stromsysteme in der Ionosphäre machen sich besonders in Äquatornähe bzw. hohen geographischen Breiten bemerkbar. Der äquatoriale Elektrojet ist ein star-

ker ostwärts gerichteter Strom, der die Erde entlang des magnetischen Äquators umkreist. In nördlichen und südlichen Breiten um die 75° treten außerdem polare Elektrojets auf (siehe für weitere Details zur Ionosphäre z. B. OLSEN & STOLLE 2017).

In größerer Entfernung von der Erde macht sich besonders der magnetosphärische Ringstrom bemerkbar. Dieser westwärts gerichtete Strom fließt in einigen Erdradien Entfernung um den Äquator und erzeugt großräumig ein dem Hauptfeld entgegengesetztes Dipolfeld. Auch am Rand der Magnetosphäre, der sog. Magnetopause, und im Magnetosphärenschweif bilden sich Stromsysteme (s. Abb. 1d). Aufgrund ihrer großen Entfernung haben diese jedoch weniger deutliche Einflüsse auf Messungen an der Erdoberfläche. Stromsysteme in verschiedenen Entfernungen von der Erde sind über magnetfeldparallele Ströme verbunden (s. Abb. 1c und d), z. B. der magnetosphärische Ringstrom und die polaren ionosphärischen Elektrojets. Diese sind in der Regel nur in Satellitenmessungen des Erdmagnetfelds, jedoch nicht am Erdboden nachweisbar (siehe für weitere Details zu Magnetosphärenströmen z. B. GANUSHKINA, LIEMOHN & DUBYAGIN 2018).

Die schwächsten Anteile des gesamten Erdmagnetfelds entstehen dadurch, dass die variierenden externen magnetischen Felder elektrische Ströme in leitfähigen Strukturen in Erdkruste und Erdmantel induzieren. Diese ebenfalls veränderlichen Ströme induzieren wiederum schwache Magnetfelder. Die induzierenden Eigenschaften der externen Magnetfelder werden mit der Methode der Magneto-tellurik genutzt, um Rückschlüsse auf die Leitfähigkeit des Untergrunds zu ziehen und Unterschiede in der Leitfähigkeit hinsichtlich geologischer und tektonischer Strukturen zu interpretieren, z. B. auch in der Lagerstättenerkundung (z. B. CHAVÉ & JONES 2012). Auch im Wasser der Ozeane werden schwache Magnetfelder induziert, die jedoch aufgrund ihrer geringen Amplitude von maximal wenigen nT auf Satellitenhöhe bisher nur schwer nutzbar sind (z. B. HORNSCHILD et al. 2022).

3 Magnetosphäre und Weltraumwetter

Kommen wir nun zunächst zurück zur Magnetosphäre und deren Schutzschildfunktion. Die Erde ist ständig dem Sonnenwind ausgesetzt. Dies ist ein Teilchenstrom, der überwiegend aus Protonen und einigen anderen, überwiegend geladenen, Partikeln besteht und von der Sonnenaktivität abhängt. Geladene Teilchen können sich nicht senkrecht zu den Feldlinien durch Magnetfelder bewegen. Das Erdmagnetfeld bildet in Wechselwirkung mit dem Sonnenwind die Magnetosphäre um die Erde. Sie wird begrenzt durch die Magnetopause, wo der Druck der Magnetfeldkraft und der Druck des Sonnenwinds gleich stark sind. Auf der sonnenzugewandten Seite der Erde wird die dipolförmige Magnetosphäre da-

her zusammengedrückt, während sie auf der Nachtseite weit in den Weltraum hinausgezogen wird (Abb. 3). Die Ausdehnung der Magnetosphäre beträgt auf der Tagseite etwa 10 Erdradien. Sowohl die Größe als auch die genaue Form und Ausrichtung des Schweifs variieren jedoch unter dem Einfluss des Sonnenwinds. Die geladenen Teilchen des Sonnenwinds, aber auch aus dem Weltraum, werden von der Magnetosphäre um die Erde herumgeleitet und dringen normalerweise entlang der Feldlinien nur in der Nähe der Pole bis in die Atmosphäre ein. Diese Regionen werden als Cusps bezeichnet (s. Abb. 1d).

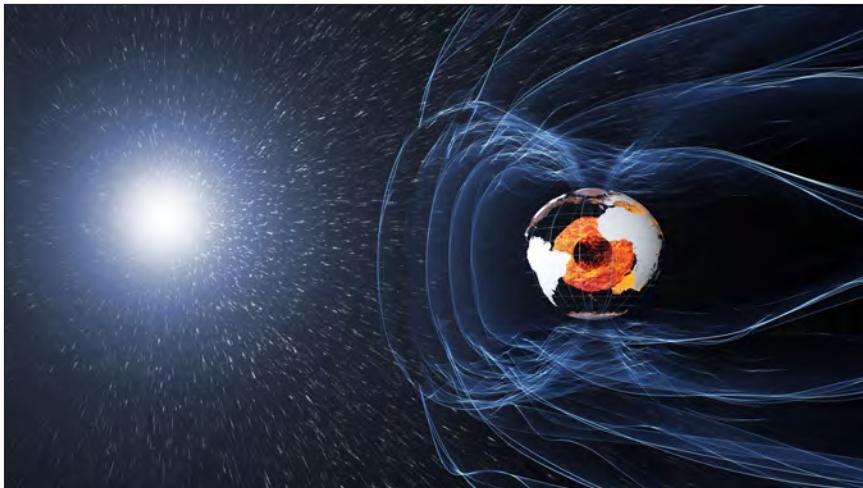


Abbildung 3: Die Magnetosphäre unter dem Einfluss des Sonnenwinds; Bild: ESA/ATG medialab.
Figure 3: The magnetosphere under the influence of the solar wind; image: ESA/ATG medialab.

Sonneneruptionen und koronale Massenauswürfe können zu enormen Verstärkungen des Sonnenwinds führen. Dann können wesentlich mehr Teilchen in die Magnetosphäre eindringen als normal. Der Sonnenwind transportiert das von der Sonne ausgehende interplanetare Magnetfeld mit sich. Aufgrund der Eigenarten des Sonnemagnetfelds und der Rotation der Sonne hat das interplanetare Magnetfeld beim Auftreffen auf die Magnetosphäre zu unterschiedlichen Zeiten verschiedene Ausrichtungen. Von der Ausrichtung hängt die Ankopplung an die Magnetosphäre ab. Wenn das interplanetare Magnetfeld nach Süden gerichtet ist, treten sogenannte Rekonnektionsprozesse mit dem Erdmagnetfeld auf, durch die besonders große Mengen von Sonnenwindpartikeln in die Magnetosphäre eindringen können. Diese führen zu starken Variationen der verschiedenen Stromsysteme und damit zu starken Schwankungen des externen Magnetfelds. Man spricht von einem magnetischen Sturm. Insgesamt werden in Analogie zum meteorologischen Wetter in der Atmosphäre die Bedingungen im erdnahen Welt- raum, insbesondere in der Magnetosphäre, unter dem Einfluss des Sonnenwinds

und der kosmischen Strahlung als Weltraumwetter oder englisch Space Weather bezeichnet.

Magnetische Stürme machen sich auf verschiedene Art bemerkbar. Sichtbar werden ihre Auswirkungen in Form verstärkter Polarlichtaktivität. Polarlichter treten normalerweise in hohen geographischen Breiten, in Regionen von etwa 3.000 bis 4.000 km Durchmesser um die magnetischen Pole auf (s. Abb. 1c). Sie entstehen durch Zusammenstöße von Sonnenwindpartikeln mit Teilchen in der Atmosphäre, wodurch Energie in Form von Licht freigesetzt wird. Die sehr dynamischen Leuchterscheinungen haben je nach Art der beteiligten Atmopshären- teilchen unterschiedliche Farben, am häufigsten sind grünliche und rötliche Polarlichter zu beobachten. Wenn bei magnetischen Stürmen verstärkt Sonnenwind in die Magnetosphäre gelangt, dehnen sich die Polarlichtregionen aus, so dass z. B. bis nach Mittel- oder sogar Südeuropa Polarlichter zu sehen sein können. Die Sonnenaktivität variiert mit einem etwa 11-jährigen Zyklus. Zur Zeit, um 2025 herum, befindet sie sich in einer sehr aktiven Phase, so dass z. B. im Jahr 2024 mehrmals Polarlichter in Deutschland auftraten. Abbildung 4 zeigt eine Polar- lichtbeobachtung am 10. Mai 2024 im Süden Deutschlands.



Abbildung 4: Polarlicht am 10. Mai 2024 gegen 23 Uhr über dem Ebinger See bei Bamberg. Das Foto zeigt intensivere Farben als mit bloßem Auge zu sehen; Foto: M. Korte.

Figure 4: Aurora borealis on 10 May 2024 at around 11 p.m. over Lake Ebinger near Bamberg. The photo shows more intense colors than seen by naked eye; photo: M. Korte.

Es gibt jedoch auch eine ganze Reihe nicht sichtbarer Auswirkungen magnetischer Stürme, die sich negativ auf unsere moderne Infrastruktur auswirken können und damit eine Naturgefahr darstellen (Abb. 5). Die direkte Erhöhung der Teilchenstrahlung stellt z. B. eine Gesundheitsgefahr für Astronauten auf der Internationalen Raumstation dar und kann zu Ausfällen oder sogar permanenten Beschädigungen von Satelliten führen. Die verstärkten elektrischen Ströme in der Ionosphäre führen zu einer Aufheizung und damit Ausdehnung der Atmosphäre, wodurch Satelliten stärker abgebremst werden können und im Extremfall sogar abstürzen. Die erhöhte Elektronendichte führt auch dazu, dass Funkwellen, die die Ionosphäre durchqueren, verändert werden, so dass der Funkverkehr oder auch das GPS-Signal gestört werden. Induzierte elektrische Ströme in Ölpielines führen zu verstärkter Korrosion. In langen Überlandleitungen können durch solche Ströme Spannungsspitzen induziert werden, die zu Instabilitäten im Netz und damit Stromausfällen führen oder sogar Transformatoren durch Überhitzung zerstören können.

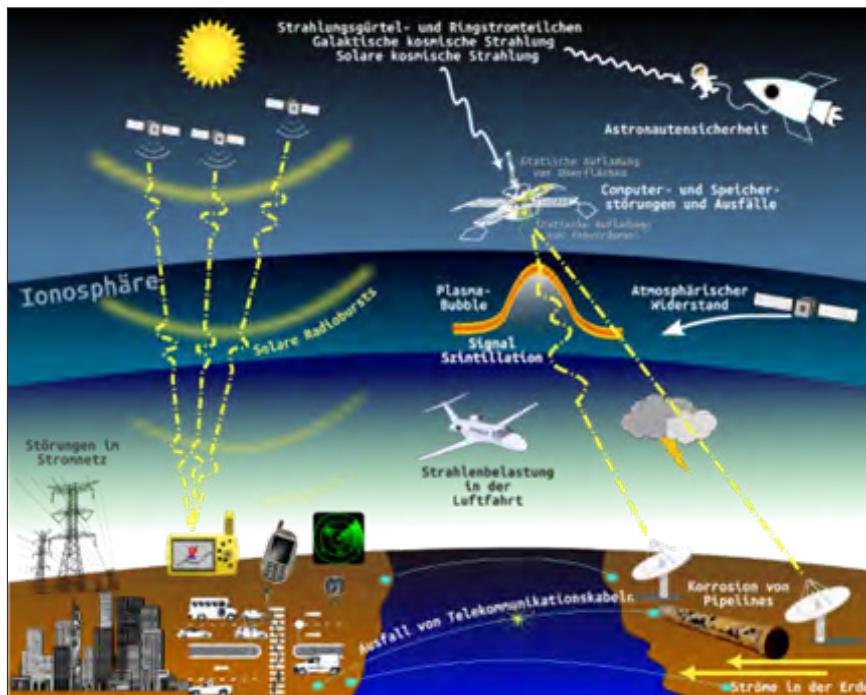


Abbildung 5: Die Abbildung zeigt schematisch verschiedene mögliche Auswirkungen magnetischer Stürme; Bild: GFZ.

Figure 5: The figure schematically shows various possible effects of magnetic storms; image: GFZ.

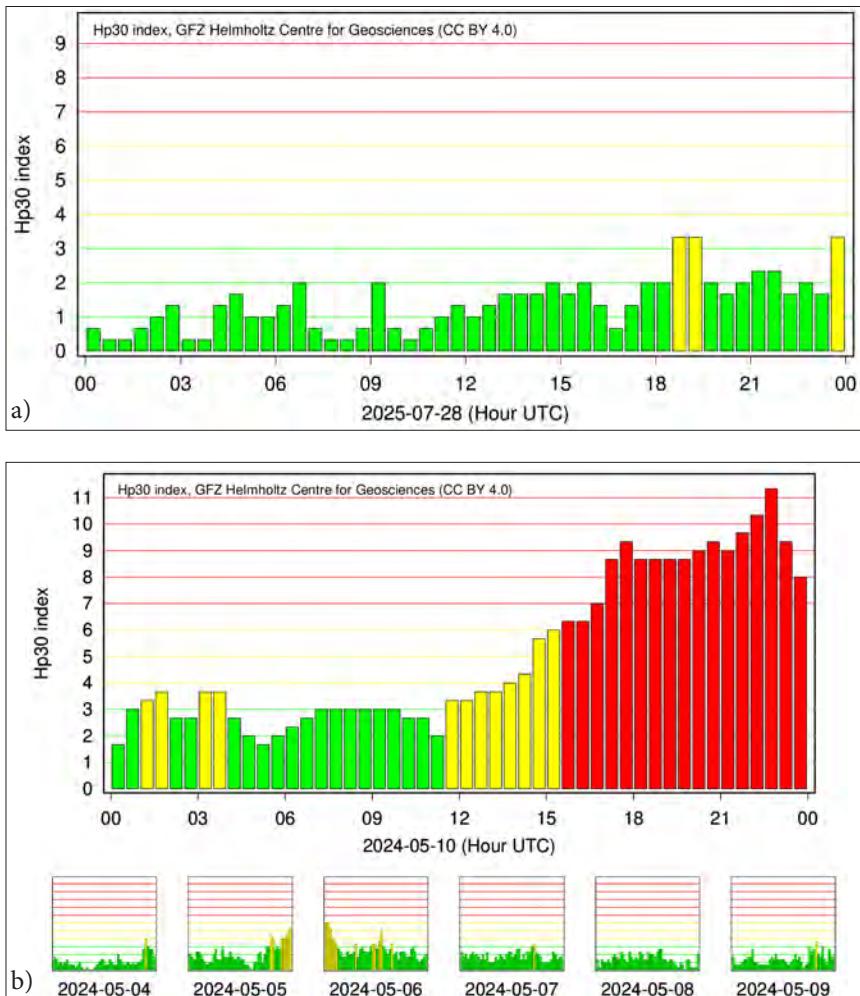


Abbildung 6: Der geomagnetische Hp30 Index zeigt die Stärke der durch den Sonnenwind erzeugten magnetischen Aktivität in 30-Minutenintervallen an. a) Quasi-Echtzeitanzeige an einem magnetisch ruhigen Tag, an dem der Index maximal den Wert 3+ erreicht. b) Der Index während des Beginns des magnetischen Sturms Anfang Mai 2024. Am späten Abend erreichte der Index Werte über 11 und ging damit über den auf 9 beschränkten offiziellen Kp Index hinaus. In der unteren Reihe sind die Vortage dargestellt, in denen überwiegend magnetisch ruhige Bedingungen herrschten; Bilder: GFZ.

Figure 6: The geomagnetic Hp30 index shows the strength of magnetic activity generated by the solar wind at 30-minute intervals. a) Quasi-real-time display on a magnetically quiet day when the index reaches a maximum value of 3+. b) The index during the onset of the magnetic storm in early May 2024. Late in the evening, the index reached values above 11, exceeding the official Kp index limit of 9. The bottom row shows the previous days, which were predominantly magnetically calm; images: GFZ.

Ein breit genutzter Indikator für die Weltraumwetteraktivität ist der geomagnetische Kp Index. Er wurde 1949 von Julius Bartels als planetare, also weltweite, Kennziffer für die magnetischen Effekte des Sonnenwinds entwickelt (siehe MATZKA et al. 2021). Der Kp Index beruht auf den magnetischen Registrierungen von 13 weltweit in mittleren Breiten verteilten Bodenstationen (geomagnetischen Observatorien, siehe Kapitel 4). Der Kp Index ist einer von sechs offiziell von der Internationalen Assoziation für Geomagnetismus und Aeronomie (IAGA) anerkannten geomagnetischen Aktivitätsindices und seine Zeitreihe reicht bis 1932 zurück. Der traditionelle Index wird in Dreistundenintervallen berechnet. Seine Stärke ist auf die Werte 1 – 9 (in 1/3-Abstufungen, -, 0, +) beschränkt. Wir wissen heute, dass magnetische Stürme deutlich stärker als der damals festgelegte Maximalwert werden können, und das Dreistundenintervall ist für moderne Weltraumwetterüberwachung und -vorhersage sehr grob. Daher haben wir am GFZ Versionen in 30- und 60-Minutenintervallen entwickelt, die außerdem keine Beschränkung nach oben haben (YAMAZAKI et al. 2022), die Hpo Indices. Die Quasi-Echtzeitversionen von Kp und Hpo geben einen schnellen Überblick über die aktuelle geomagnetische Aktivität (Abb. 6). Vorhersagen der Weltraumwetterbedingungen spielen zum Schutz von kritischer Infrastruktur, insbesondere Satelliten, eine wichtige Rolle. Obwohl Satelliten am sogenannten Lagrange-Punkt L1 in ca. 1,5 Millionen km Abstand von der Erde in Richtung zur Sonne den Sonnenwind messen, bleiben selbst kurzfristige Vorhersagen der sehr dynamischen und von vielen Faktoren abhängigen geomagnetischen Aktivität eine Herausforderung.

4 Beobachtung und Rekonstruktion des Erdmagnetfelds

Doch woher kommt eigentlich unser Wissen über das Erdmagnetfeld, da wir es doch mit unseren menschlichen Sinnen gar nicht wahrnehmen können? Kontinuierliche Messdaten von Stärke und Richtung des Erdmagnetfelds liefern uns heute ein globales Netz von geomagnetischen Observatorien am Erdboden sowie Satellitenmissionen, die alle entsprechende automatische Messgeräte verwenden. Das Observatoriumsnetz geht, mit manuellen Messungen der absoluten Werte und später auch photographischen Aufzeichnungen der Variationen, zurück bis ins 19. Jahrhundert. Es besteht heute aus ca. 200 Stationen, von denen viele ihre nun digitalen Daten zeitnah und frei für nichtkommerzielle Anwendungen über das globale INTERMAGNET Programm zur Verfügung stellen (z. B. RASSON et al. 2011). Regionale Magnetometernetzwerke, die im Gegensatz zu magnetischen Observatorien keine absoluten Werte, sondern nur relative Variationen des Erdmagnetfelds liefern, werden zusätzlich zur Erforschung der externen Felder eingesetzt.

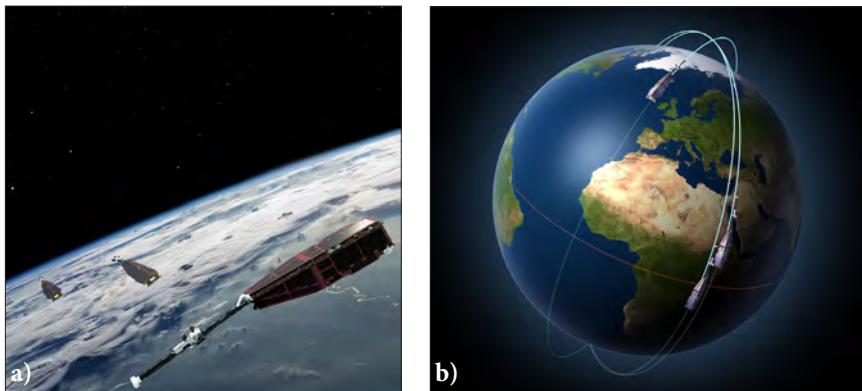


Abbildung 7: Die ESA Satellitenmission Swarm zur Messung des Erdmagnetfelds besteht aus drei baugleichen Satelliten (a), die die Erde auf zwei Höhen umkreisen (b); Bilder: a) ESA/AOES Medialab, b) ESA-P. Carril.

Figure 7: The ESA satellite mission Swarm for measuring the Earth's magnetic field consists of three identical satellites (a) orbiting the Earth at two altitudes (b); images: a) ESA/AOES Medialab, b) ESA-P. Carril.

Die wichtigste Satellitenmission zur Beobachtung des Erdmagnetfelds ist aktuell die Swarm Mission der europäischen Raumfahrtagentur ESA (FRIIS-CHRISTENSEN et al. 2008). Sie besteht aus drei baugleichen Satelliten, von denen zwei quasi parallele Umlaufbahnen in ca. 460 km Höhe haben und der dritte in ca. 500 km (Abb. 7). Diese Konstellation wurde im November 2013 gestartet und wird hoffentlich noch bis ca. 2031 Daten liefern. Erst Satellitendaten ermöglichen eine gute Trennung der verschiedenen Magnetfeldanteile, die im Detail auch heute noch eine Herausforderung darstellt. Vorgängermissionen, die den gesamten Feldvektor aus erdnahen Umlaufbahnen lieferten, waren nur die Satelliten Magsat (6 Monate 1979–1980; LANGEL et al. (1982)), ØRSTEDT (Daten von 1999–2004; NEUBERT et al. (2001)) und CHAMP (2000–2010; REIGBER et al. (2002)). Seit kurzem fliegen auch die chinesischen Magnetfeldmissionen CSES (SHEN et al. 2018) und Macau Science Satellite 1 (Zhang 2024), und bei der ESA ist eine Kleinsatellitenmission, NanoMagSat (HULOT et al. 2021), in Planung.

Das Lithosphärenfeld wird im Detail regional oder lokal von Flugzeugen, Schiffen oder kleineren Messungen vom Erdboden aus kartiert. Je näher am Erdboden die Messungen stattfinden, umso besser ist die räumliche Auflösung der resultierenden Karten.

Wie eingangs erwähnt, gibt es erst seit dem frühen 19. Jahrhundert absolute Messungen der Stärke des Erdmagnetfelds. Historische Beobachtungen von relativen Unterschieden der Feldstärke sowie des Inklinationswinkels reichen etwas weiter zurück. Die Inklination gibt den Winkel der Feldlinien gegenüber der Horizontalen an, sie beträgt also am magnetischen Pol 90° und am magnetischen

Äquator 0°. Einen umfangreichen Schatz historischer Magnetfelddaten stellen Beobachtungen des Deklinationswinkels dar. Die Deklination ist die Abweichung zwischen der lokalen magnetischen und der geographischen Nordrichtung. Diese muss bei der Navigation mit dem Magnetkompass berücksichtigt werden und spielte daher insbesondere in der historischen Seefahrt eine wichtige Rolle. Die Deklination wurde regelmäßig über astronomische Messungen bestimmt und in den Logbüchern der Schiffe dokumentiert. Eine große Anzahl dieser Daten aus den letzten vier Jahrhunderten wurde um 1990 herum zusammengetragen und digitalisiert (JACKSON, JONKERS & WALKER 2000; JONKERS 2003), so dass sie zur Erforschung des Magnetfelds der Vergangenheit zur Verfügung stehen.

Aber auch 400 Jahre sind viel zu kurz, um die gesamte Bandbreite möglicher Änderungen des magnetischen Hauptfelds zu untersuchen. Um Magnetfeldänderungen in der ferneren Vergangenheit zu rekonstruieren, dienen Informationen, die in Gesteinen oder anderen Materialien gespeichert sind. Diese zu entschlüsseln sind Themen des Archäo- und Paläomagnetismus. Es gibt zwei Mechanismen, wie solche Informationen in Form einer remanenten, also dauerhaften, Magnetisierung gespeichert werden. Dies sind einerseits thermische Remanenz (TRM) und andererseits Sedimentationsremanenz (DRM, vom englischen „depositional“). Die folgenden Beschreibungen sind stark vereinfacht und viele Details, insbesondere der DRM, sind noch nicht vollständig verstanden. Einen umfassenden, wenn auch stellenweise nicht mehr ganz aktuellen Überblick gibt SOFFEL (1991).

Eine TRM entsteht, wenn heißes, prinzipiell magnetisches, Material abkühlt. Jede permanente Magnetisierung geht oberhalb der sogenannten Curie-Temperatur verloren. Je nach Material liegt diese bei einigen hundert bis über tausend Grad Celsius. Durch starke Erhitzung lässt sich so auch ein Permanentmagnet entmagnetisieren. Das liegt daran, dass die magnetischen Momente auf atomarer Ebene, die durch ihre Ausrichtung für die Magnetisierung verantwortlich sind, durch die hohe Temperatur frei beweglich werden. In einem umgebenden Magnetfeld richten sie sich allerdings wie kleine Kompassnadeln entlang dieser Feldlinien aus. Kühlt das Material also in einem Feld unter die Curie-Temperatur ab, werden die magnetischen Momente in Richtung dieses Felds fixiert. Dieser Mechanismus wirkt in der Natur, wenn heiße Lava aus einem Vulkan oder im Zuge der Plattentektonik aus einem ozeanischen Rücken austritt und erkaltet. Die Magnetisierung wird dabei von magnetischen Mineralen, insbesondere Magnetit und ähnlichen, getragen. TRMs finden sich aber auch in archäologischen Funden. Aus Ton oder Lehm gebrannte Ziegelsteine und Gefäße, oder auch die Wände der Brennöfen, haben so ebenfalls Informationen über das Erdmagnetfeld der Vergangenheit gespeichert.

Eine DRM findet man vor allem in Sedimenten. Hier werden bei der Ablagerung des Materials am See- oder Meeresboden magnetisierte Partikel eingelagert, die sich vorher beim Absinken durch das Wasser bzw. während der Ablagerung wie Kompassnadeln am Magnetfeld ausgerichtet haben. Wenn sich weiteres Ma-

terial darüber ablagert, verfestigen sich die unteren Schichten und die magnetischen Partikel darin werden fixiert. Auch in Höhlen gebildete Tropfsteine können eine schwache DRM aufweisen.

Mit Hilfe von Laborexperimenten an Proben von Vulkangestein, Sedimentkernen oder archäologischen Fundstücken können die so gespeicherten Informationen des Erdmagnetfelds vor Jahrhunderten, Jahrtausenden oder sogar Millionen von Jahren gewonnen werden. Sedimentkerne liefern dabei Zeitreihen fester Orte, während Vulkanproben und archäologische Fundstücke in der Regel nur einzelne Datenpunkte in Raum und Zeit darstellen. In Bezug auf die Intensität lässt sich aus Material mit TRM die absolute Feldstärke rekonstruieren. Aus Material mit DRM können dagegen nur relative Variationen der Feldstärke bestimmt werden. Diese können außerdem durch unbekannte Umwelteinflüsse auf die Magnetisierung oder aufgrund von Änderungen in der Sedimentzusammensetzung über die Zeit verfälscht sein. Durch zusätzliche Experimente und Kalibrierungen wird versucht, die Unsicherheiten in den Ergebnissen der paläomagnetischen Messungen zu minimieren. Wenn die Orientierung der Proben zur Zeit der Magnetisierung bekannt ist, können aus beiden Remanenzarten auch die Richtungen des Erdmagnetfelds bestimmt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Rekonstruktion der Magnetfeldänderungen der Vergangenheit ist die Datierung der archäo- und paläomagnetischen Proben. Im Gegensatz zu modernen und historischen Daten, wo der Beobachtungszeitpunkt bekannt ist, muss das Alter der archäo- und paläomagnetischen Proben über Datierungsmethoden bestimmt werden. Hier kommen verschiedene Methoden zum Einsatz. Für die jüngere Zeit können zum Beispiel die zeitliche Einordnung durch Archäologen oder historische Dokumentationen von Vulkanausbrüchen verwendet werden. Für ältere Zeiten spielen insbesondere Altersbestimmungen über den Zerfall radioaktiver Isotope eine Rolle, z. B. Radiokohlenstoff-, Argon-Argon- oder Uran-Thorium-Datierung. In Sedimenten können auch Tephraschichten von Vulkanausbrüchen oder jahreszeitliche Schichten, sog. Warven, zur Datierung beitragen. Auch die Variationen des Magnetfelds können durch Vergleich des undatierten Materials mit einer datierten magnetischen Referenzkurve zur Altersbestimmung verwendet werden. Auf letztere Art datierte Materialien ohne eigenständige Datierung stellen jedoch keinen Mehrwert für die Rekonstruktion der Feldvariationen dar. Alle Datierungsmethoden weisen auch gewisse Unsicherheiten auf. Zusammen mit den Unsicherheiten in den Resultaten der magnetischen Experimente führt dies dazu, dass unser Bild von der Entwicklung des Magnetfelds der Vergangenheit mit zunehmendem Alter immer unschärfer wird und wir nur noch generelle, eher großräumige Eigenschaften des Hauptfelds untersuchen können.

5 Der Geodynamo, Säkularvariation und Umpolungen des Magnetfelds

Damit kommen wir zurück zum magnetischen Hauptfeld, seinen Eigenschaften und Änderungen. In diesem Kapitel ist mit dem Begriff Erdmagnetfeld nur noch das Hauptfeld gemeint. Dieses Feld wird durch magnetohydrodynamische Prozesse im äußeren Erdkern erzeugt, den sogenannten Geodynamoprozess. Der überwiegend aus Eisen bestehende Erdkern besteht aus einem zähflüssigen äußeren und einem festen inneren Teil. Das Material ist sehr gut elektrisch leitend. Die Flüssigkeit wird durch Konvektion in Bewegung gehalten. Diese ist entweder thermisch, d. h. warmes Material steigt auf, kühlt durch Abgabe von Wärme an und durch den Erdmantel ab, und das kühлere Material sinkt ab, oder chemisch, wenn leichtere Elemente aufsteigen, während sich nach und nach Material aus dem äußeren Kern am inneren Kern anlagert, oder auch eine Kombination beider Vorgänge. Die so bewegte Flüssigkeit wird dann zusätzlich durch die Erdrotation verwirbelt, wobei sich aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit im vorhandenen Erdmagnetfeld ein sich selbst aufrechterhaltender Dynamoeffekt ergibt, der das Feld durch elektromagnetische Induktion ständig erzeugt. Andererseits führen Diffusionsprozesse dazu, dass das Feld ohne diese ständige Erzeugung über Zeitskalen von einigen 10.000 Jahren schwächer werden und verschwinden würde. Diese beiden Prozesse bewirken Änderungen der Flüssigkeitsströmung im äußeren Erdkern, die zu ständigen, langsamen Änderungen des Erdmagnetfelds führen, der Säkularvariation. Die Kernflüssigkeit bewegt sich dabei mit Geschwindigkeiten von durchschnittlich ca. 20 km/Jahr und kann lokal bis zu 50 km/Jahr oder sogar mehr erreichen.

Wie eingangs beschrieben, hat das Erdmagnetfeld näherungsweise die Geometrie eines einfachen, gegenüber der Rotationsachse geneigten Dipolfelds. Bei näherer Betrachtung gibt es jedoch deutliche Abweichungen davon. In der Feldstärke beobachten wir z. B. eine Region, wo das Feld deutlich schwächer als auf vergleichbaren Breiten ist (Abb. 8a). Dies ist die sogenannten Südatlantische Anomalie. Sie stellt eine Schwächezone des Magnetfelds für das Weltraumwetter dar. In der Region werden z. B. während magnetischer Stürme besonders viele Beeinträchtigungen von Satelliten durch Sonnenwindteilchen beobachtet. Linien gleicher magnetischer Deklination ziehen sich nicht einfach direkt von Pol zu Pol, wie es bei einem Dipolfeld der Fall wäre, sondern weisen zahlreiche zusätzliche Bögen und Krümmungen auf (Abb. 8b). Daraus erkennt man, dass eine Kompassnadel nicht, wie häufig gesagt, zum magnetischen Pol weist, sondern sie richtet sich entlang der lokalen Feldlinien aus. So haben wir gegenwärtig in Europa relativ geringe Werte der Kompassmissweisung, während diese z. B. in Nordamerika oder Südafrika Werte zwischen 10° und 20° erreicht.

Karten wie die hier gezeigten werden aus globalen Magnetfeldmodellen gewonnen. Dazu werden über die Erde verteilte Messdaten des Magnetfelds mit

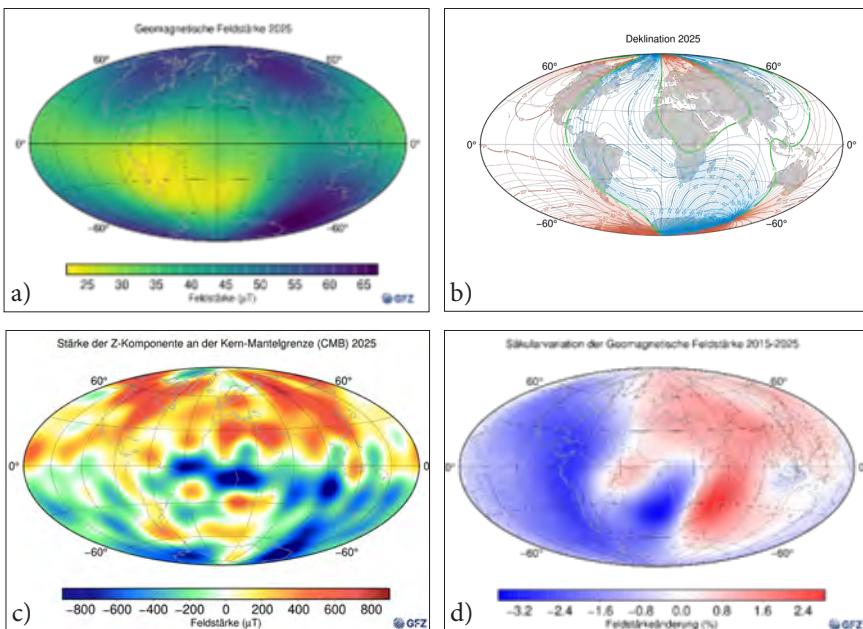


Abbildung 8: a) Intensität der Erdmagnetfelds an der Erdoberfläche in μT mit der Südatlantischen Anomalie. b) Linien gleicher magnetischer Deklination in Grad. c) Vertikale Magnetfeldkomponente an der Grenze zwischen Erdkern und Erdmantel in μT . Blau bedeutet in die Erde hineinweisende, rot hinausweisende Magnetfeldlinien. Unter Südamerika und dem Südatlantik sowie nahe des geographischen Nordpols sind Regionen zu erkennen, in denen die Magnetfeldrichtung der überwiegenden Dipolfeldrichtung entgegengesetzt ist. d) Prozentuale Änderung der Magnetfeldstärke zwischen 2015 und 2025; Bilder: GFZ, basierend auf Daten des IGRF-14.

Figure 8: a) Geomagnetic field intensity at the Earth's surface in μT with the South Atlantic Anomaly. b) Lines of equal magnetic declination in degrees. c) Vertical magnetic field component at the boundary between Earth's core and mantle in μT . Blue indicates magnetic field lines pointing into the Earth, red indicates lines pointing outwards. Regions where the magnetic field direction is opposite to the predominant dipole field direction can be seen under South America and the South Atlantic, as well as near the geographic North Pole. d) Percentage change in magnetic field strength between 2015 and 2025; images: GFZ, based on IGRF-14 data.

mathematischen Methoden interpoliert. Am verbreitetsten ist dafür die auf Gauß zurückgehende Methode der Kugelfunktionsentwicklung, bei dem das Magnetfeld durch Koeffizienten beschrieben wird, die es mathematisch in Anteile von Dipol und einer Reihe von Feldanteilen mit mehreren über die Erdoberfläche verteilten Polen (Quadrupol, Oktupol etc.) zerlegen. Diese Koeffizientenzerlegung erlaubt eine einfache Analyse z. B. von rotationssymmetrischen oder hemisphärisch asymmetrischen Anteilen des Magnetfelds. Unter der Annahme, dass das modellierte Hauptfeld keine Quellen im Erdmantel und oberhalb der Erde besitzt, lassen sich Kugelfunktionsmodelle auch auf beliebige Tiefen bis hinunter zur

Grenze zwischen Erdkern und Erdmantel und in beliebige Höhen oberhalb der Erde umrechnen. Damit stellen solche Modelle nützliche Werkzeuge zur Untersuchung der dem Magnetfeld und seinen Änderungen zugrunde liegenden Prozesse dar. Zum Beispiel zeigt die Kartierung der vertikalen Magnetfeldrichtung an der Kern-Mantel-Grenze, dass die Südatlantische Anomalie durch ein Gebiet umgekehrter Magnetfeldrichtung am äußeren Rand des Geodynamos erzeugt wird (Abb. 8c). Unter zusätzlichen Annahmen lassen sich auch die Strömungsmuster der Kernflüssigkeit aus zeitabhängigen Magnetfeldmodellen berechnen. Ein für Wissenschaft und praktische Anwendungen weit verbreitetes Magnetfeldmodell ist das Internationale Geomagnetische Referenzfeld (IGRF), welches alle fünf Jahre von einer Arbeitsgruppe der Internationalen Assoziation für Geomagnetismus und Aeronomie (IAGA) veröffentlicht wird (z. B. ALKEN et al. 2021). Über interaktive Internetseiten kann sich daraus jede Richtung und Stärke des Erdmagnetfelds seit 1900 und für bis zu fünf Jahre vorhergesagt (aktuell bis 2030) für jeden Ort der Erde berechnen lassen (siehe Kap. 7). Der Vergleich der globalen Verteilung der Feldstärke zwischen 2015 und 2025 zeigt deutlich, dass sich das Magnetfeld auch nicht einheitlich über die ganze Erde ändert, sondern dass die Säkularvariation regional deutliche Unterschiede aufweist (Abb. 8d). Während die Feldstärke zur Zeit in Europa leicht zunimmt, nimmt sie in anderen Gegenden, insbesondere auch der Südatlantischen Anomie, ab. Die Änderungen in der magnetischen Deklinationsrichtung führen dazu, dass auf topographischen Karten angegebene Kompassmissweisungen regelmäßig aktualisiert werden müssen.

Eine Analyse des IGRFs über die letzten 125 Jahre zeigt, dass das globale Dipolmoment, das ist der großräumige Anteil des Magnetfelds mit der einfachen Dipolgeometrie, in diesem Zeitraum um ca. 8 % abgenommen hat. Dies hat zu Spekulationen geführt, ob sich das Erdmagnetfeld am Anfang einer Polaritätsumkehr befindet. Tatsächlich hat sich das Feld im Lauf der Erdgeschichte vielfach komplett umgepolt, so dass der heutige magnetische Nordpol zum Südpol wurde und umgekehrt (Abb. 9d). Allerdings fanden die Umpolungen in sehr unterschiedlichen Zeitabständen statt, es ist keine Periodizität erkennbar. Während sich das Feld im Mittel zwei- bis viermal innerhalb einer Million Jahre umgepolt hat, gab es Zeiträume wie in der Kreidezeit, wo es über mehrere 10 Millionen Jahre stabil blieb. Warum die Umpolungsraten so variabel sind, ist bisher ungeklärt. Die langsame Konvektion des Erdmantels auf den Zeitskalen der Plattentektonik könnte hier über Änderungen des Wärmeflusses aus dem Erdkern einen Einfluss haben. Sicher erscheint inzwischen, dass Umpolungen mit einer deutlichen globalen Schwächung der Feldstärke, eben des Dipolmoments, einhergehen. Die Umpolung erfolgt nicht dadurch, dass der Dipol sich zunehmend neigt und rotiert. Stattdessen nimmt der großräumige Dipolanteil ab, inmitten der Umpolung wird das Feld nicht nur sehr schwach, sondern weist auch mehrere Magnetpole über die Erdoberfläche verteilt auf, bevor der Dipolanteil in umgekehrter Richtung wieder an Stärke gewinnt. Dies ist in Abbildung 9 anhand von globalen Feldlinien darge-

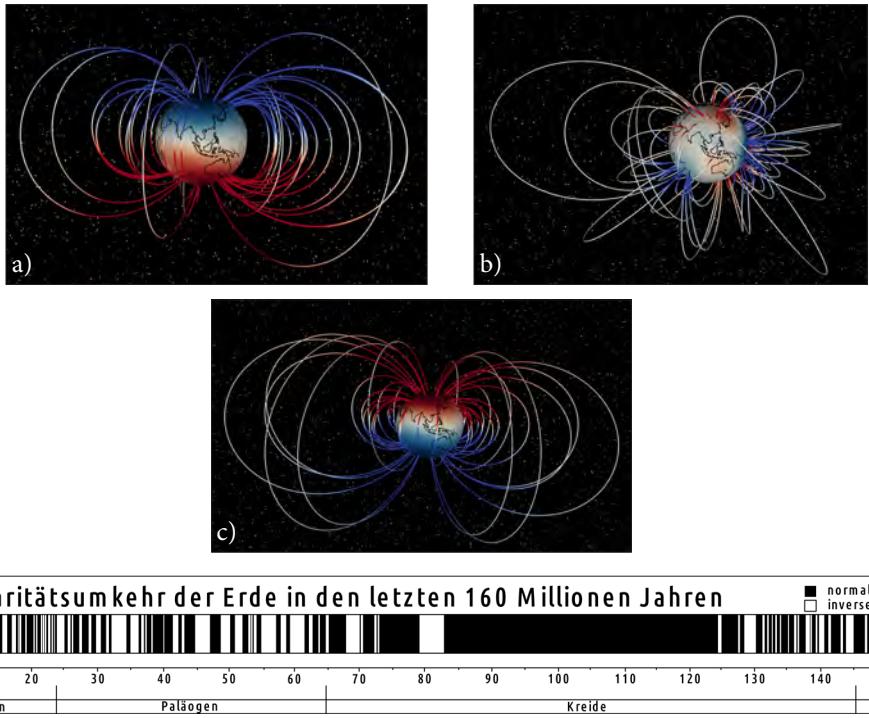


Abbildung 9: a) Feldliniendarstellung des heutigen Erdmagnetfelds. b) Feldlinien während der letzten Umpolung des Erdmagnetfelds vor 780.000 Jahren. Das Feld ist schwach und weist an der Erdoberfläche mehrere Pole auf. c) Feldlinien des Magnetfelds vor fast 900.000 Jahren. Das Feld weist die typische Dipolgeometrie auf, aber die Polarität ist der heutigen entgegengesetzt. d) Polaritätszeitskala des Erdmagnetfelds. Schwarz sind Zeiträume heutiger, weiß umgekehrter Polarität; Bilder: GFZ.

Figure 9: a) Field lines representing the Earth's magnetic field today. b) Field lines during the last reversal of the Earth's magnetic field 780,000 years ago. The field is weak and has several poles on the Earth's surface. c) Field lines of the magnetic field almost 900,000 years ago. The field has the typical dipole geometry, but the polarity is opposite to today. d) Geomagnetic polarity time scale. Black indicates periods present polarity, white indicates reversed polarity; images: GFZ.

stellt, wobei die chronologische Abfolge von der umgekehrten Feldrichtung in Abb. 9c zur heutigen Feldrichtung in Abbildung 9a geht. Der gesamte Prozess einer Magnetfeldumpolung dauert mindestens einige Jahrtausende. Für die letzte Umpolung vor 780.000 Jahren wird die Dauer auf 20.000 bis 30.000 Jahre geschätzt (z. B. SINGER et al. 2019; MAHGOUB et al. 2023). Die Zeiten stabilen Magnetfelds werden als Chron bezeichnet, die nach verschiedenen Wissenschaftlern benannt sind. Demnach befinden wir uns zur Zeit im Brunhes-Chron, während die vorangegangene Epoche umgekehrter Feldrichtung das Matuyama-Chron ist. Die letzte Umpolung wird demzufolge als Matuyama-Brunhes-Umpolung bezeichnet. Neben vollständigen Umpolungen gibt es auch noch kurzzeitige vollständige oder

teilweise Umpolungen des Felds, sogenannte magnetische Exkursionen. Auch hier nimmt die Dipolfeldstärke deutlich ab, baut sich dann aber in der bisherigen Richtung wieder auf. Exkursionen dauern nur mehrere Jahrhunderte bis wenige Jahrtausende und sind teilweise nur durch regional, aber nicht unbedingt global in stark von der Dipolrichtung abweichenden Deklinations- und Inklinationsrichtungen gekennzeichnet. Die letzte global nachgewiesene Exkursion fand vor 41.000 Jahren statt, mit einer gesamten Dauer von knapp 2.000 Jahren. Magnetische Exkursionen werden traditionell nach dem Ort benannt, von dem die paläomagnetischen Proben stammen, an denen sie entdeckt wurden. Die Exkursion vor 41.000 Jahren heißt nach dem französischen Vulkangebiet Puy de Laschamps die Laschamps-Exkursion.

Um die physikalischen Vorgänge, die das Erdmagnetfeld im äußeren Erdkern erzeugen, zu verstehen, werden seit den 1990er-Jahren numerische Simulationen auf Hochleistungscomputern berechnet. Die erste erfolgreiche Simulation entwickelten GLATZMAIER & ROBERTS (1995). Inzwischen arbeiten viele Gruppen weltweit an solchen numerischen Modellen. Die Simulationen sind jedoch immer noch durch die verfügbare Rechenleistung begrenzt, denn die für die Erde als realistisch angesehenen Parameter (z. B. Viskosität des Kernmaterials, elektrische und thermische Leitfähigkeiten etc.) erfordern extrem hohe räumliche Auflösungen und kleine Zeitschritte. Bisherige Simulationen arbeiten daher mit Skalierungen der Parameter oder anderen Vereinfachungen. Heutige Geodynamosimulationen können bereits viele der aus Daten und datenbasierten Modellen bekannten Magnetfeldeigenschaften widerspiegeln. Zum Teil führen aber unterschiedliche Annahmen oder Skalierungen zu ähnlichen Ergebnissen. Während der Geodynamoprozess also grundsätzlich verstanden ist, sind viele Details noch unklar.

Aber sind die Abnahme des Dipolmoments oder die deutliche Schwächung des Magnetfelds in der Südatlantischen Anomalie nun Vorzeichen für eine bevorstehende Magnetfeldumpolung oder Exkursion? Wir können es nicht mit Sicherheit sagen, doch gibt es einige Hinweise, dass das nicht der Fall ist. Zunächst ist das Magnetfeld zur Zeit immer noch stärker, als es im Mittel über die letzten Jahrtausende und Jahrtausende gewesen ist. Datenbasierte globale Kugelfunktionsmodelle, die die zeitliche Entwicklung des Magnetfelds kontinuierlich beschreiben, existieren inzwischen auch für historische Zeiträume (z. B. JACKSON, JONKERS & WALKER 2000; SCHANNER et al. 2023) und die letzten Jahrtausende (z. B. NILSSON et al. 2022) bis hin zu den letzten 100.000 Jahren (PANOVSKA, CONSTABLE & KORTE 2018; PANOVSKA, KORTE & CONSTABLE 2019). Zusätzlich haben wir globale Rekonstruktionen von einigen Umpolungen und Exkursionen, insbesondere der Matuyama-Brunhes Umpolung vor 780.000 Jahren (z. B. LEONHARDT & FABIAN 2007; MAHGOUB, KORTE & PANOVSKA 2024) und der Laschamps Exkursion vor 41.000 Jahren (LEONHARD et al. 2009; KORTE et al. 2021). Für längere Zeiträume gibt es Rekonstruktionen der Variationen des Dipolmoments, z. B. ein auf welt-

weit verteilten Daten über die letzten 2 Millionen Jahre basierendes Modell (ZIEGLER et al. 2011). Alle diese Modelle zeigen, dass das Dipolmoment ständig variiert, und längst nicht jede Abnahme lange genug andauert, dass das Feld so schwach wird, dass eine Umpolung oder Exkursion auftritt. Das Modell der letzten 100.000 Jahre deutet darüber hinaus darauf hin, dass Strukturen wie die Südatlantische Anomalie in dieser Region mehrfach aufgetreten sind, aber in keinem Fall der direkte Vorläufer einer Exkursion waren – der Beginn dieser Ereignisse scheint durch deutliche Intensitätsabnahmen in mehr als einer Region gekennzeichnet zu sein (PANOVSKA, KORTE & CONSTABLE 2019).

Auch ob und wie stark Magnetfeldumpolungen und Exkursionen unseren Lebensraum beeinflussen ist unklar. Bisherige Studien, die deutliche Auswirkungen dieser extremen Magnetfeldvariationen auf die Lebensbedingungen auf der Erde beschreiben (z. B. COOPER et al. 2021), sind umstritten. Sie enthalten in der Regel starke Vereinfachungen einiger der komplexen Zusammenhänge, und häufig werden hauptsächlich zeitliche Korrelationen beschrieben, ohne dass diese auf kausale Zusammenhänge hin untersucht wurden. Da aufgrund des schwachen Magnetfelds während einer Umpolung oder Exkursion die Abschirmung gegen den Sonnenwind vermindert ist, sind insbesondere verstärkte Weltraumwettereinflüsse zu erwarten. Ohne geeignete technische Schutzmaßnahmen würden diese sicher ein Problem für unsere moderne Zivilisation darstellen. Aufgrund der Zeitskalen stellt hier jedoch ein extremer Sonnensturm, der im Gegensatz zu den physikalisch bedingt nur langsamem Erdmagnetfeldänderungen jederzeit auftreten könnte, die größere Naturgefahr dar. Vor direkter erhöhter Strahlung schützt uns am Erdboden in jedem Fall die Atmosphäre. Prozesse in der Erdatmosphäre würden sicher durch die höhere Anzahl eindringender Sonnenwindteilchen während einer Magnetfeldumpolung beeinflusst. Was dabei genau geschieht und inwieweit dies Einflüsse z. B. auf die Klimaentwicklung hat, ist bisher nicht vollständig untersucht.

6 Offene Fragen und aktuelle Forschung

Die Erforschung des Erdmagnetfelds hat bereits eine lange Geschichte. Dank leistungsfähiger Computer sind grundlegende Mechanismen des Geodynamoprozesses inzwischen verstanden, doch viele Details sind noch unklar. Aus hochqualitativen direkten Messdaten kennen wir nur einen kurzen Ausschnitt aus dem breiten Spektrum an zeitlichen Magnetfeldvariationen. Rückschlüsse aus Messdaten auf die Prozesse, die das Magnetfeld im äußeren Erdkern erzeugen, leiden darunter, dass es nach wie vor eine Herausforderung ist, die Anteile der unterschiedlichen Magnetfeldquellen klar zu trennen, und dass der fast 3 km dicke Erdmantel sowie die Erdkruste alle gemessenen Signale aus dem Erdkern filtern. Sehr schnelle und auch sehr kleinräumige Strömungsänderungen im Erdkern lassen sich da-

her an oder über der Erdoberfläche gar nicht beobachten. Geodynamosimulationen, die die physikalischen Vorgänge im Erdkern theoretisch beschreiben, leiden darunter, dass die Eigenschaften des tiefen Erdinneren, wie z. B. die elektrische Leitfähigkeit des Kernmaterials, oder auch die Wärmeleitung aus dem Erdkern nicht genau bekannt sind, und dass selbst die leistungsfähigsten Computer bisher nicht in der Lage sind, im richtigen Parameterregime mit extrem kleinen und großen Werten zu rechnen. Wie alle Vorhersagen komplexer, nichtperiodischer Systeme bleibt die Vorhersage extremer Weltraumwetterereignisse auch nur über einige Tage eine Herausforderung. Ob das im Laufe der Erdgeschichte extrem unregelmäßige Auftreten von geomagnetischen Umpolungen und Exkursionen Ausdruck eines chaotischen Systems ist, oder ob es vorhersagbare Auslöser für diese Ereignisse und Gründe für die unterschiedlichen Umpolungsraten wie z. B. ein Einfluss von Änderungen im Erdmantel gibt, sind ebenfalls noch offene Fragen. Dies gilt auch für die Auswirkungen von Umpolungen und Exkursionen auf unseren Lebensraum.

An allen diesen Fragen wird von wissenschaftlichen Gruppen weltweit geforscht. In Deutschland sollen aktuell drei große Projekte wichtige Fragen zur Langzeitentwicklung des magnetischen Hauptfelds beantworten: Im Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) „DeepDyn – Rekonstruktion der Dynamik des tiefen Erdinneren über geologische Zeiträume“ arbeiten mehrere Gruppen deutscher Universitäten und Forschungseinrichtungen gemeinsam an der Frage, welchen Einfluss die Dynamik des Erdmantels auf den Geodynamo hat. Zwei vom European Research Council (ERC) geförderte Projekte befassen sich mit magnetischen Exkursionen und Umpolungen. Im ERC Projekt „EXCURSION – Geomagnetische Feldexkursionen: Erforschung der extremen Zustände des äußeren Erdkerns“ werden am GFZ über die nächsten fünf Jahre die Charakteristiken von Feldexkursionen und den ihnen zugrunde liegenden Mechanismen durch umfangreiche Studien an Daten, datenbasierten Modellen sowie numerischen Simulationen untersucht. Im ERC Projekt „GERACLE – Geomagnetische Umpolungen und Exkursionen – Bestimmung ihrer atmosphärischen und klimatischen Effekte“ werden über die nächsten sechs Jahre in Zusammenarbeit von Forschenden am GFZ, an den Universitäten Helsinki und Oulu in Finnland sowie der Universität für Bodenkultur in Wien die Auswirkungen von extremen Magnetfeldvariationen auf unseren Lebensraum untersucht werden.

Unverzichtbar sowohl für das bessere Verständnis der Änderungen des Erdmagnetfelds als auch für seine aktuelle Nutzung für Navigation, Forschung und Charakterisierung der Weltraumwetterbedingungen sind dabei Beobachtungsdaten. Theorien zu verschiedenen Aspekten des Geodynamoprozesses können nur durch aktuelle und paläomagnetische Messdaten verifiziert oder widerlegt werden. Die Qualität von Referenzfeldern wie dem Internationalen Geomagnetischen Referenzfeld (IGRF) würde extrem nachlassen, wenn wir keine hochgenauen Magnetfelddaten von spezialisierten Satellitenmissionen mehr hätten. Dies

würde deren Nutzen sowohl für praktische Anwendungen, wie z. B. im Bereich der Navigation, als auch für wissenschaftliche Anwendungen, z. B. zum besseren Verständnis der Weltraumwetterbedingungen, deutlich einschränken. Das weltweite Netz an geomagnetischen Bodenobservatorien stellt hier zwar eine wichtige Ergänzung, aber nur einen sehr lückenhaften Ersatz dar.

7 Daten des Erdmagnetfelds und Weltraumwetters

Zum Abschluss hier noch eine Sammlung von Links zu Webseiten, wo aktuelle Daten über das Erdmagnetfeld und die Weltraumwetterbedingungen frei verfügbar zu finden sind.

- Stärke und Richtung des Erdmagnetfelds für jeden Ort der Erde zwischen 1900 und vorhergesagt bis 2030 lassen sich aus dem Internationalen Geomagnetischen Referenzfeld bestimmen:
<https://isdc.gfz.de/igrf-declination-calculator/>
<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true>
https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html
- Nahezu aktuelle Messwerte des Erdmagnetfelds und seiner Variationen von dem weltweiten Netz geomagnetischer Observatorien findet man frei verfügbar bei den Netzwerken INTERMAGNET und SuperMag:
<https://intermagnet.org/>
<https://supermag.jhuapl.edu/>
- Zu aktuellen Weltraumwetterbedingungen (space weather) gibt es viele internationale Webseiten. Hier die Seite zum offiziellen Kp Index und eine Auswahl an Weltraumwetterseiten:
<https://kp.gfz.de/>
<https://spaceweather.gfz.de/>
<https://www.swpc.noaa.gov/>
https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/space_weather/home.html
<https://www.spaceweather.com/>
- Die digitale Weltkarte magnetischer Lithosphärenanomalien ist zu finden unter:
<https://wdmam.org/>
- Webseiten mit Informationen zu zwei aktuellen Großprojekten zum Erdmagnetfeld, dem Schwerpunktprogramm DeepDyn der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Synergieprojekt GERACLE des Europäischen Research Councils (ERC):
<https://www.geo.lmu.de/deepdyn/de/>
<https://www.geracle-ercsyg.eu/>

8 Danksagung

Ich danke Dr. Maximilian Schanner für kritische Durchsicht des Manuskripts und meinen Kollegen Alexander Jordan, Dr. Martin Rother und Dr. Maximilian Schanner für illustrative Abbildungen. Die Abbildungen 1a und 8 wurden erzeugt mit der freien Software „Generic Mapping Tools“ (WESSEL et al. 2019).

9 Literatur

- ALKEN, P., THÉBAULT, E., BEGGAN, C., AMIT, H., AUBERT, J., BAERENZUNG, J., BONDAR, T.N., BROWN, W., CALIFF, S., CHAMBODUT, A., CHULLIAT, A., COX, G., FINLAY, C.C., FOURNIER, A., GILLET, N., GRAYVER, A., HAMMER, M., HOLSCHEIDER, M., HUDER, L., HULOT, G., JAGER, T., KLOSS, C., KORTE, M., KUANG, W., KUVSHINOV, A., LANGLAIS, B., LÉGER, J.-M., LESUR, V., LIVERMORE, P.W., JONES, F.J., MACMILLAN, S., MAGNES, W., MANDEA, M., MARSAL, S., MATZKA, J., METMAN, M.C., MINAMI, T., MORSCHHAUSER, A., MOUND, J.E., NAIR, M., NAKANO, S., OLSEN, N., PAVÓN-CARRASCO, F.J., PETROV, V.G., ROPP, G., ROTHER, M., SABAKA, T.J., SANCHEZ, S., SATURNINO, D., SCHNEPF, N., SHEN, X., STOLLE, C., TANGBORN, A., TÖFFNER-CLAUSEN, L., TOH, H., TORTA, J.M., VARNER, J., VIGNERON, P., VERVELIDOU, F., WARDINSKI, I., WICHT, J., WOODS, A., YANG, Y., ZEREN, Z. & ZHOU, B. (2021): International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. – *Earth Planets and Space*, **73**: 49; <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- CHAVE, A. D. & JONES, A.G. (Eds.) (2012): The magnetotelluric method: Theory and practice. – 552 S.; Cambridge (Cambridge University Press).
- CHOI, Y., DYMENT, J., LESUR, V., GARCIA REYES, CATALAN, M., ISHIHARA, T., LITVINNOVA, T., HAMOUDI, M., the WDMAM Task Force & the WDMAM Data Providers (2023): World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.1. – XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG); Berlin; <https://doi.org/10.57757/IUGG23-2797>; map available at <http://www.wdmam.org>
- CONSTABLE, C. & CONSTABLE S. (2023): A grand spectrum of the geomagnetic field. – *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **344**, 107090; <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2023.107090>
- COOPER, A., TURNER, C.S., PALMER, J., HOGG, A., MCGLONE, M., WILMSHURST, J., LORREY, A.M., HEATON, T.J., RUSSELL, J.M., McCACKEN, K., ANET, J.G., ROZANOV, E., FRIEDEL, M., SUTER, I., PETER, T., MUSCHELER, R., ADOLPHI, F., DOSSETO, A., FAITH, J.T., FENWICK, P., FOGWILL, C.J., HUGHEN, K., LIPSON, M., LIU, J., NOWACZYK, N., RAINSLEY, E., BRONK RAMSEY, C., SEBASTIANELLI, P., SOUILMI, Y., STEVENSON, J., THOMAS, Z., TOBLER, R. & ZECH, R. (2021): A global environmental crisis 42,000 years ago. – *Science*, **371** (6531): 811-818; <https://doi.org/10.1126/science.abb8677>
- FRIIS-CHRISTENSEN, E., LÜHR, H., KNUDSEN, D. & HAAGMANS, R. (2008): Swarm – An Earth Observation Mission investigating Geospace. – *Advances in Space Research*, **41** (1): 210-216; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.10.008>
- GANUSHKINA, N.Y., LIEMOHN, M.W. & DUBYAGIN, S. (2018): Current systems in the Earth's magnetosphere. – *Reviews of Geophysics*, **56**: 309–332; <https://doi.org/10.1002/2017RG000590>
- GLATZMAIERS, G.A. & ROBERTS, P.H. (1995): A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. – *Nature*, **377** (6546): 203-209.
- HORNSCHILD, A., BAERENZUNG, J., SAYNISCH-WAGNER, J., IRRGANG, C. & THOMAS, M. (2022): On the detectability of the magnetic fields induced by ocean circulation in geomagnetic satellite observations. – *Earth Planets Space*, **74**: 182; <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01741-z>
- HULOT, G., LÉGER, J.-M., CLAUSEN, L.B.N., DECONINCK, F., COÏSSON, P., VIGNERON, P., ALKEN, P., CHULLIAT, A., FINLAY, C.C., GRAYVER, A., KUVSHINOV, A., OLSEN, N., THÉBAULT, E., JA-

- GER, T., BERTRAND, F. & HÄFNER, T. (2021): NanoMagSat, a 16U nanosatellite constellation high-precision magnetic project to initiate permanent low-cost monitoring of the Earth's magnetic field and ionospheric environment. – EGU General Assembly 2021, online, 19–30 April 2021, EGU21-14660; <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14660>
- JACKSON, A., JONKERS, A.R. & WALKER, M.R. (2000): Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. – Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, **358** (1768): 957–990.
- JONKERS, A.R.T. (2003): Earth's Magnetism in the Age of Sail. – 320 S.; Baltimore, London (The Johns Hopkins University Press).
- KORTE, M. & MANDEA, M. (2019): Geomagnetism: From Alexander von Humboldt to Current Challenges. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**: 3801–3820; <https://doi.org/10.1029/2019GC008324>
- KORTE, M., BROWN, M.C., PANOVSKA, S. & WARDINSKI, I. (2019): Robust characteristics of the Laschamp and Mono Lake geomagnetic excursions: results from global field models. – *Frontiers in Earth Sciences*, **7**: 86; <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00086>
- KIVELSON, M.G. & RUSSELL, C.T. (Eds.). (1995). Introduction to Space Physics. – 568 S.; Cambridge (Cambridge University Press).
- LANGEL, R., OUSLEY, G., BERBERT, J., MURPHY, J. & SETTLE, M. (1982): The MAGSAT mission. – *Geophys. Res. Lett.*, **9**: 243–245; <https://doi.org/10.1029/GL009i004p00243>
- LEONHARDT, R. & FABIAN, K. (2007): Paleomagnetic reconstruction of the global geomagnetic field evolution during the Matuyama/Brunhes transition: Iterative Bayesian inversion and independent verification. – *Earth and Planetary Science Letters*, **253** (1-2): 172–195; <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.025>
- LEONHARDT, R., FABIAN, K., WINKLHOFER, M., FERK, A., LAJ, C. & KISSEL, C. (2009): Geomagnetic field evolution during the Laschamp excursion. – *Earth and Planetary Science Letters*, **278** (1-2): 87–95; <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.028>
- MAHGOUB, A.N., KORTE, M & PANOVSKA, S. (2023): Global geomagnetic field evolution from 900 to 700 ka including the Matuyama-Brunhes reversal. – *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **128**: 20 S.; <https://doi.org/10.1029/2023JB026593>
- MATZKA, J., STOLLE, C., YAMAZAKI, Y., BRONKALLA, O. & MORSCHHAUSER, A. (2021): The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. – *Space Weather*, **19** (5): 21 S.; <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- MERRILL, R.T., McELHINNY, M. W. & MCFADDEN, P.L. (1998): The magnetic field of the Earth. – *International Geophysics Series*, **63**: 547 S.; San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto (Academic Press).
- NEUBERT, T., MANDEA, M., HULOT, G., VON FRESE, R., PRIMDAHL, F., JØRGENSEN, J.L., FRIIS-CHRISTENSEN, E., STAUNING, P., OLSEN N. & RISBO, T. (2001): Ørsted satellite captures high-precision geomagnetic field data. – *Eos Trans. AGU*, **82** (7): 81–88; <https://doi.org/10.1029/01EO00043>
- NILSSON, A., SUTTIE, N., STONER J.S. & MUSCHELER, R. (2022): Recurrent ancient geomagnetic field anomalies shed light on future evolution of the South Atlantic Anomaly. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119** (24): 7 S.; <https://doi.org/10.1073/pnas.2200749119>
- OLSEN, N. & STOLLE, C. (2017): Magnetic Signatures of Ionospheric and Magnetospheric Current Systems During Geomagnetic Quiet Conditions—An Overview. – *Space Science Review*, **206**: 5–25; <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0279-7>
- PANOVSKA, S., CONSTABLE, C.G. & KORTE, M. (2018): Extending global continuous geomagnetic field reconstructions on timescales beyond human civilization. – *Geochem. Geophys. Geosys.*, **19**: 4757–4772; <https://doi.org/10.1029/2018GC007966>
- PANOVSKA, S., KORTE, M. & CONSTABLE, C.G. (2019): One hundred thousand years of geomagnetic field evolution. *Reviews of Geophysics*, **57**, 1289–1337, <https://doi.org/10.1029/2019RG00656>

- PURUCKER, M. & CLARK, D.A. (2011): Mapping and interpretation of the lithospheric magnetic field. – In: MANDEA, M. & KORTE, M. (2011): Geomagnetic Observatories and Models. – IAGA Special Sopron Book Series, **5**: 311-337; Springer.
- RASSON, J., TOH, H. & YANG, D. (2011): The global geomagnetic observatory network. – In: MANDEA, M. & KORTE, M. (Hrsg.): Geomagnetic Observatories and Models. – IAGA Special Sopron Book Series **5**: 1-26; Springer.
- REIGBER, C., LÜHR, H. & SCHWINTZER, P. (2002): CHAMP mission status. – *Advances in Space Research*, **30** (2): 129-134; [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4)
- SCHANNER, M., BOHSUNG, L., FISCHER, C., KORTE, M. & HOLZSCHNEIDER, M. (2023): The global geomagnetic field over the historical era: what can we learn from ship-log declinations? – *Earth Planets Space*, **75**: 96; <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01852-1>
- SHEN, X., ZHANG, X., YUAN, S., WANG, L., CAO, J., HUANG, J., ZHU, X., PIERGIORGIO, P. & DAI, J. (2018): The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission. – *Sci. China Technol. Sci.*, **61**: 634-642; <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9242-0>
- SINGER, B.S., JICHA, B.R., MOCHIZUKI, N. & COE, R.S. (2019): Synchronizing volcanic, sedimentary, and ice core records of Earth's last magnetic polarity reversal. – *Science Advances*, **5** (8): 19 S.; <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw4621>
- SOFFEL, H. C. (1991): Paläomagnetismus und Archäomagnetismus. Eine Einführung für Geowissenschaftler – 276 S.; Berlin, Heidelberg (Springer).
- WESSEL, P., LUIS, J.F., UIEDA, L., SCHARROO, R., WOBBE, F., SMITH, W.H. F. & TIAN, D. (2019): The Generic Mapping Tools Version 6. Geochemistry. – *Geophysics, Geosystems*, **20** (11): 5556-5564; <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- YAMAZAKI, Y., MATZKA, J., STOLLE, C., KERVALISHVILI, G., RAUBERG, J., BRONKALLA, O., MORSCHHAUSER, A., BRUINSMA, S., SHPRITS, Y.Y. & JACKSON, D.R. (2022): Geomagnetic Activity Index Hpo. – *Geophysical Research Letters*, **49** (10): 9 S.; <https://doi.org/10.1029/2022GL098860>
- ZHANG, K. (2024): The MSS geomagnetic satellite constellation: Understanding the Earth's coupled magnetic system. – International Workshop on Gravity, Electrical & Magenetic Methods and their Applications, Shenzhen, China, May 19–22, 2024; SEG Global Meeting Abstracts. – 21-23; <https://doi.org/10.1190/GEM2024-005.1>
- ZIEGLER, L.B., CONSTABLE, C.G., JOHNSON C.L. & TAUXE, L. (2011): PADM2M: a penalized maximum likelihood model of the 0–2 Ma palaeomagnetic axial dipole moment. – *Geophysical Journal International*, **184** (3): 1069-1089; <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04905.x>

DR. MONIKA KORTE
GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung
Telegrafenberg
14473 Potsdam
monika.korte@gfz.de

Manuskripteingang: 20. August 2025

Herxheim bei Landau – ein einzigartiger jungsteinzeitlicher Ritualort

ANDREA ZEEB-LANZ, ANTJE LANGER & LHILYDD FRANK

Bandkeramik, Ritual, Menschenopfer, Bestattungen, Teilskelette, Kannibalismus

K u r z f a s s u n g : Mit den Trägern der frühneolithischen Kultur der Bandkeramik wandern von Südosteuropa um 5500 v. Chr. die ersten sesshaften Ackerbauern nach Mitteleuropa ein. In der erstaunlich kurzen Zeit von rund 500 Jahren besiedeln sie ein Gebiet von ca. 700.000 km², mit deutlicher Bevorzugung der Lössgebiete. Unter tausenden von Siedlungen sticht der einzigartige bandkeramische Ritualort Herxheim deutlich heraus. Hier wurden in weniger als 50 Jahren bei wiederholten Ritualen geschätzt 1.000 Menschen getötet und dann extrem manipuliert, so dass von über 95 % der Individuen nur klein zerschlagene Knochenfragmente übrigblieben. Den Schädeln kam eine besondere Behandlung zu, sie wurden zu Kalotten zugerichtet. Daneben gibt es eine kleine Anzahl an Hockerbestattungen und Skeletten in anderen Lagen sowie eine Reihe von Torsi unterschiedlicher Art. Die Interpretation desrätselhaften Ortes, für den weder der Grund für das Extremritual noch die Identität der Toten bekannt ist, oszilliert zwischen Sekundärbestattungen und Kannibalismus. Als Modellvorstellung wird eine besondere Form extremer Zerlegung im Zusammenhang mit rituellen Mahlzeiten (Feasting) vorgeschlagen.

Herxheim near Landau (Palatinate) – an unique Early Neolithic ritual site

Linear Pottery culture, ritual, human sacrifice, burials, partial skeletons, cannibalism

A b s t r a c t : Being members of the Early Neolithic Linear Pottery culture, around 5500 BC the first fully fledged farmers migrated from Southeastern to Central Europe. In the astonishingly short period of around 500 years, they colonised an area of approximately 700,000 km², with a clear preference for loess regions. Among thousands of settlements, the unique Linear Pottery culture ritual site of Herxheim stands out. In less than 50 years, an estimated 1,000 people were killed here in repeated rituals and then severely manipulated, so that only small, broken bone fragments remained of over 95 % of the individuals. The skulls were specially treated and hewn into calottes. In addition, there is a small number of crouched burials and skeletons in other positions, as well as a number of torsos of various types. The interpretation of this enigmatic site, for which neither the reason for the extreme ritual nor the identity of the deceased is known, oscillates between secondary burials and cannibalism. A particular form of extreme processing associated with ritual meals (feasting) has been proposed as a model.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung (A. Zeeb-Lanz)	224
2	Die frühneolithische Kultur der Bandkeramik (A. Zeeb-Lanz)	225
3	Forschungsgeschichte Herxheim (A. Zeeb-Lanz)	226
4	Befunde und Funde im Überblick (A. Zeeb-Lanz)	227
5	Die menschlichen Skelettreste (A. Zeeb-Lanz)	231

6	Die nicht vollständig zerschlagenen Individuen (A. Langer)	234
7	Die Keramik (A. Zeeb-Lanz)	241
8	Interpretationsansätze (A. Zeeb-Lanz)	243
9	Ausblick (A. Zeeb-Lanz)	246
10	Die Ausstellung im Museum Herxheim (L. Frank)	246
11	Literatur	247

1 Einleitung

Der für die gesamte Vorgeschichte Europas bis heute einzigartige frühneolithische Fundplatz von Herxheim ist mittlerweile weit über die Grenzen Deutschlands hinaus in der archäologischen Fachwelt bekannt. Er markiert zudem den Beginn der Besiedlung in festen Wohnstätten links des Rheins, wo ab ca. 5300 v. Chr. die frühesten dorfartigen Weiler entstanden.

Die ersten Ackerbauern Europas, die ab etwa 5600 v. Chr. in Schüben aus der ungarischen Tiefebene weiter nach Mittel- und Westeuropa einwanderten (BÁNFFY & OROSS 2010) und vielerorts ihre Siedlungen anlegten, verdrängten die letzten Jäger- und Sammlergemeinschaften der mittleren Steinzeit (Mesolithikum, ca. 9700–5600 v. Chr.) aus den fruchtbaren Lössebenen. Die spätmesolithischen Wildbeuter zogen sich großenteils in die Nord- und Ostseeküstengebiete sowie an den Atlantik zurück; allerdings zeigen neuere Forschungen, dass es auch wichtige Interaktionen zwischen den mesolithischen Ureinwohnern und den eingewanderten Bauern gab (HARTZ, LÜBKE & TERBERGER 2007).

Die nomadisch lebenden Jäger- und Sammlergemeinschaften hatten sich mit dem Ende der letzten Eiszeit, dem Pleistozän, und dem Beginn des Holozäns (Warmzeit innerhalb des Quartärs; Beginn vor rd. 11.700 Jahren) aufgrund der nun einsetzenden Wiederbewaldung des Kontinents neuen Lebensbedingungen gegenübergesehen: Die eiszeitliche Großfauna (z. B. Mammut, Wollnashorn, Säbelzahntiger, Höhlenlöwe) war den nacheiszeitlichen kleineren Säugetieren gewichen. Hirsche, Rehe, Auerochsen, Wölfe und Füchse (u. a.) lebten nun in den ausgedehnten Laubmischwäldern, die ganz Europa bedeckten. In diese, vom Menschen noch nicht spürbar beeinflusste natürliche Umwelt kamen die ersten siedelnden Bauerngruppen und begannen durch die Rodung von Waldflächen mit der nachhaltigen Veränderung der Natur, die letztlich in die Umweltsünden unserer modernen Welt mündete.

In nur ca. 500 Jahren hatte sich die frühneolithische Kultur der Bandkeramik (s. Kap. 2) im Osten bis an das Schwarze Meer und im Westen bis ins Pariser Becken ausgebreitet und die Grundlagen für unsere heutige Lebensform gelegt. Auf einer Fläche von ca. 700.000 km² (DUBOULOUZ 2008), bevorzugt auf Löss, befanden sich nun auf zahlreichen Rodungsinseln innerhalb der dichten Bewaldung die Dörfer und Felder der frühneolithischen Bauerngemeinschaften (Abb. 1). Die-

se Wälder hatten seit dem Beginn der Klimaphase Atlantikum, der wärmsten Phase des Holozäns (ca. 7000/6500–4000 v. Chr.), die späteiszeitliche Tundra-Steppenvegetation abgelöst. An den Rändern der Rodungsinseln der frühen Bauern konnte sich eine Heckenvegetation aus lichtliebenden Sträuchern wie z. B. Hasel und Schlehe etablieren (MEURERS-BALKE et al. 1999). Das Atlantikum, auch als „postglaziales Klimaoptimum“ bezeichnet, wies Temperaturen auf, die bis zu 2 °C höher lagen als heute, was durch stabil warme Sommer und eher milde Winter bedingt war (MEURERS-BALKE et al. 1999). Durch den Holzzuwachs in der Eichenbaumringchronologie ist belegt, dass zwischen ca. 5300 und 5050 v. Chr. eine klimatische Gunstphase lag, die den Aufschwung der ackerbäuerlichen Kultur der Bandkeramik massiv vorantrieb.

2 Die frühneolithische Kultur der Bandkeramik

Erstmalig entstanden ab ca. 5500 v. Chr. nun in Mitteleuropa – vornehmlich auf oder an Lössflächen in den Niederungen und in sanften Hanglagen – feste Siedlungen aus großen, bis zu 50 m langen und 6–8 m breiten Langhäusern; diese waren aus Holzpfosten erbaut, zwischen denen sich Weidengeflecht, bedeckt mit einem Lehmbewurf, befand (BIERMANN 2009). Über die Dachdeckung wissen wir aufgrund des hierzu verwendeten organischen Materials nichts Genaues, man kann aber vielleicht von einer Rindenabdeckung und darüber einer Wirkstroh-schicht ausgehen.



Abbildung 1: Idealrekonstruktion einer bandkeramischen Siedlung in der Pfalz mit der Bergkette des Pfälzer Waldes; 3D-Computerrekonstruktion: Roland Seidel.

Figure 1: Ideal reconstruction of a Linear Pottery culture settlement in the Palatinate with the mountains of the Palatinate Forest; 3D-computer reconstruction: Roland Seidel.

Die Menschen bewohnten dorfartige Weiler mit meist nicht mehr als 10–12 Häusern pro Generation, jedoch sind aus der ersten Ackerbauernkultur Mittel-europas auch größere Siedlungen mit bis zu 50 oder mehr gleichzeitigen Häusern bekannt (z. B. PECHTL 2012).

Jedes Haus hatte einen umgebenden Hofplatz (BOELICKE 1982; LÜNING 2005), der für diverse Arbeiten genutzt werden konnte. Die Häuser waren in Mitteleuropa grundsätzlich von Nordwest nach Südost ausgerichtet.

Die eingewanderten Pioniergruppen brachten neben der ortsfesten Siedlungsweise die Kenntnis von Nahrungspflanzenanbau (Getreide: Emmer und Einkorn; Leguminosen: Erbse, Linse und Lein) und die dazu gehörigen Saatgüter mit, aber auch ihre Nutztiere (Rind, Schwein, Schaf und Ziege) wurden aus dem Vorderen Orient eingeführt, wie etwa DNA-Analysen an neolithischen Nutztier-Schlacht- abfällen im Vergleich zu hiesigen Wildtieren beweisen (BOLLONGINO & BURGER 2007). Zum „Neolithischen Paket“ gehörte auch die Einführung gebrannter Ton- gefäße sowie geschliffener Steinbeile und neuartiger Silexbearbeitungsmethoden.

Nach den bandartigen Verzierungen auf ihrer Feinkeramik wird die früheste Ackerbauernkultur in Mitteleuropa Kultur der „Linearbandkeramik“ (LBK) oder kurz „Bandkeramik“ genannt (LÜNING & STEHLI 1989). Wir kennen auch Friedhöfe der Bandkeramiker, kleine, aber auch größere Grabgruppen, in denen die Bestatteten, meist in Einzelgräbern, in charakteristischer „Hockerstellung“, also mit angezogenen Beinen, die Arme vor der Brust, niedergelegt worden waren (NIESZERY 1995). Die Gräberfelder liegen meist in einiger Entfernung von den zugehörigen Siedlungen, so dass bei kleinflächigen Ausgrabungen meist nur entweder die Siedlung oder der Friedhof erfasst wird. Ein kleiner Teil der Dorfgemeinschaften wurde auch innerhalb des Siedlungsareals in Grabgruben zwischen den Häusern beerdigt (PESCHEL 1992). Wie auf den Friedhöfen sind bei den Siedlungsbestattungen Einzelgräber die Regel, doch es gibt vereinzelt auch Siedlungen, in denen Doppelbestattungen auftreten. Den Toten wurden in vielen Fällen Beigaben mit ins Grab gegeben; dies können beispielsweise Steinbeile (Männer), Schmuck (Frauen) oder Tongefäße (beide Geschlechter) sein. Aber ein nicht unerheblicher Teil der dokumentierten Bestattungen erhielt keinerlei Artefakte als Grabbeigaben. Und tatsächlich wurden mehr als 70 % der Verstorbenen in der Bandkeramik auf eine Weise bestattet, die archäologisch nicht fassbar ist: Auf tausende ausgegrabener Siedlungen kommen nur einige Hundert Gräberfelder. Da die bandkeramische Kultur zu den besterforschten Kulturen der gesamten Vorgeschichte gehört (z. B. LÜNING & STEHLI 1989; STRIEN & GRONENBORN 2005), kann dieses Missverhältnis von Siedlungen zu Gräbern nicht auf einer Forschungslücke oder ungenügender Quellenlage beruhen.

3 Forschungsgeschichte Herxheim

Das Gelände direkt östlich des Dorfes Herxheim besteht aus fruchtbarem Lössboden. Dies hatten offenbar bereits die frühesten Ackerbauern erkannt, die kurz nach 5300 v. Chr. hier eine kleine Siedlung anlegten. Das Dorf bestand durchgängig bis in die jüngste Phase der Bandkeramik (ca. 5080/70–5000 v. Chr.).

Die LBK-Siedlung lag in einer für die Bandkeramik durchaus typischen Lage, auf einem kleinen Sporn zwischen zwei Bächen. Seit den 1970er-Jahren war aufgrund von Lesefunden in dem gut begangenen Areal bekannt, dass sich hier früh-neolithische Siedlungsreste befinden mussten sowie auch zahlreiche Artefakte späterer Kulturen. So war es nur folgerichtig, dass die Archäologische Denkmalpflege in Speyer Grabungsauflagen erteilte, als die Gemeinde Herxheim hier Anfang der 1990er-Jahre ein zukünftiges Gewerbegebiet auswies. Die Rettungsgrabung dauerte von 1996 bis 1999 und belegte, dass sich hier eine bandkeramische Siedlung befunden hatte, die offenbar von einem Doppelgraben umgeben war. Während die Siedlungsreste innerhalb des Grabenwerkes nur sehr rudimentär erhalten und stark von Erosionsgeschehen in Mitleidenschaft gezogen worden waren, offenbarten die Gräben ganz außergewöhnliche Funde: Menschliche Knochen in großer Zahl, dazu sehr viele Scherben von Tongefäßen, Steingeräte und Silexwerkzeuge sowie Tierknochen und Geräte aus letzteren. Außerdem konnten – in geringerem Umfang – Schmuck- und Trachtbestandteile geborgen werden (ZEEB-LANZ et al. 2009). Nach dem Ende der Grabungen, die eine erhebliche Menge an menschlichen Überresten erbrachten, wurde es ruhig um Herxheim. Im Jahr 2003 initiierte die Erstautorin dann ein groß angelegtes Forschungsprojekt, dem zeitweise mehr als zwölf wissenschaftliche Mitarbeiter angehörten. Dieses Projekt zu „Siedlung mit Grubenanlage von Herxheim“ förderte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) von 2004 bis 2011 mit namhaften Mitteln. Es wurde jedoch bald deutlich, dass die Dokumentation der Rettungsgrabung für die besonderen Fundumstände in den Gräben der bandkeramischen Siedlung nicht ausreichend war, um die Befunde und Fundansammlungen in der gebührenden Form vorlegen und interpretieren zu können. Eine Forschungsgrabung in einem weiteren Siedlungsteil, die großzügig von der Gemeinde Herxheim finanziell unterstützt wurde, sollte hier Abhilfe schaffen. So wurde von 2005 bis 2008 ein Areal nördlich der Rettungsgrabung untersucht, das zwar nur ein Viertel der vorher ausgegrabenen Fläche ausmachte, aber dafür mit modernsten Techniken und den außergewöhnlichen Befunden genau angepassten Grabungsmethoden höchst sorgfältig untersucht und dokumentiert wurde.

Bereits seit Beginn der Forschungsgrabung und weiter ab Ende der Grabungen liefen die Auswertungsprojekte der einzelnen Fund- und Befundgattungen, die bislang in zwei umfängliche Publikationen zu Herxheim (ZEEB-LANZ 2016a; 2019a) mündeten (siehe auch unten, Kap. 9 „Ausblick“).

4 Befunde und Funde im Überblick

Die ca. 4,5 ha große Siedlungsfläche der bandkeramischen Siedlung von Herxheim (ZEEB-LANZ & HAACK 2016) wird etwa trapezförmig von zwei parallel verlaufenden Gräben umgeben. Allerdings zeigen zerstörungsfreie geomagnetische

Untersuchungen, dass sich an der Ostseite der Siedlung keine Gräben befinden, das Erdwerk also nicht geschlossen war (Abb. 2); untermauert wird dieser Befund durch mehrere Bohrreihen sowie zwei Sondagen im Osten der Siedlungsfläche (HAACK 2016).

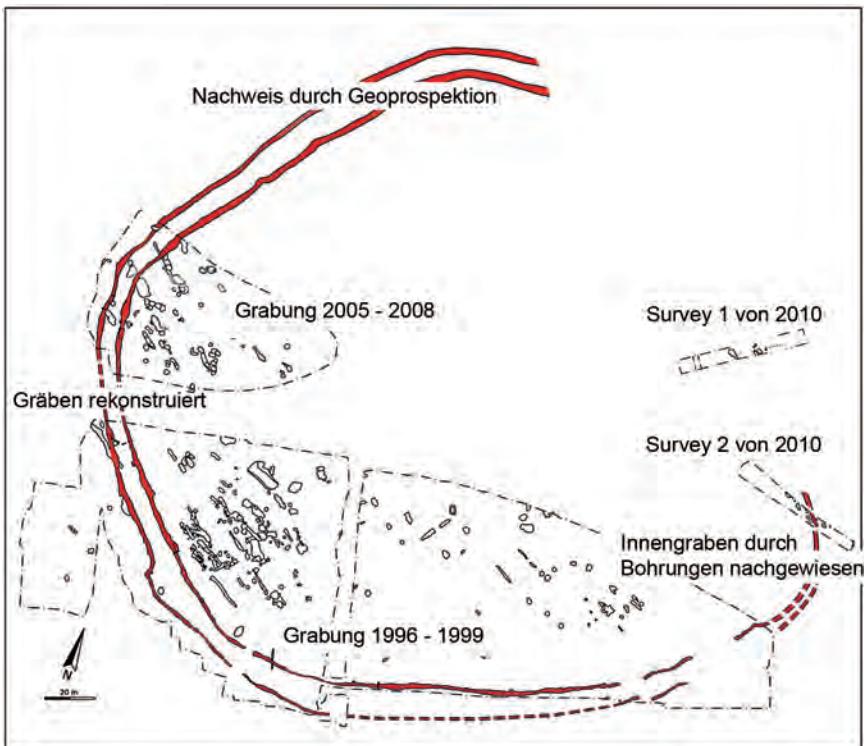


Abbildung 2: Herxheim. Gesamtplan der Ausgrabungen in der bandkeramischen Siedlung (Gräben in Rot); Plan: Fabian Haack.

Figure 2: Herxheim. General plan of the excavations in the Linear Pottery settlement (ditches in red); plan: Fabian Haack.

Die Gräben weisen an der Oberfläche keinen regelmäßigen Umriss auf, und im durchgehenden Längsprofil der Rettungsgrabung ist gut zu erkennen, dass sich im Sohlenbereich einzelne lange Gruben trennen lassen. Allerdings zeigen die Konzentrationen aus Fundmaterial, die oft über mehrere dieser Langgrubensohlprofile hinweg verlaufen, dass große Grabensegmente gleichzeitig offen gestanden haben müssen, als man die Funde hier deponierte (HAACK, 2014, 2016).

In den Gräben konnte eine große Zahl an Konzentrationen aus verschiedenen Fundgattungen dokumentiert werden (Abb. 3). Deutlich dominant sind dabei menschliche Skelettreste, von denen insgesamt etwa 80.000 Stücke geborgen wurden. Auffallend bei den menschlichen Resten ist die Tatsache, dass es sich bei

ca. 90 % davon nicht um ganze Knochen, sondern um Fragmente zerschlagener Langknochen, zerschmetterter Kiefer und anderer fragmentierter Skelettelemente handelt. Speziell die Langknochen sind extrem zerschlagen, es überwiegen auffallend kleine Fragmente (HÄUSSER, HAIDLE & ORSCHIEDT 2004; BOULESTIN & COUPEY 2015). Nur wenige Torsi unterschiedlicher Art sowie eine kleine Anzahl vollständiger Skelette ergänzen das Szenario (siehe Kap. 6).



Abbildung 3: Herxheim, Innengraben. Eine der charakteristischen Fundkonzentrationen mit zahlreichen Menschenknochen, Schädelkalotten, Scherben und Tierknochen; Foto: Andrea Zeeb-Lanz.

Figure 3: Herxheim, inner ditch. Characteristic example of a finds concentration with numerous human bones, calottes, pottery fragments and animal bones; photo: Andrea Zeeb-Lanz.

Bereits während der Forschungsgrabung wurde deutlich, dass sich in jeweils einer Konzentration nicht die vollständige Menge an zerschlagenen Knochen der dort repräsentierten Individuen befand, sondern dass die Reste der Toten auf verschiedene Konzentrationen verteilt wurden – oder dass man einen Teil davon überhaupt nicht in den Gräben deponiert hatte. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Konzentration 16: Hier lagen, dicht ineinander gepackt, die Schädelkalotten von 13 Individuen, doch es fanden sich erheblich weniger Langknochenfragmente, als für 13 Menschen zu erwarten wären (BOULESTIN & COUPEY 2015). Außerdem sind insgesamt bestimmte Skelettelemente, wie z. B. die Schädelkalotten, stark über-, andere dagegen deutlich unterrepräsentiert (BOULESTIN et al. 2009; BOULESTIN & COUPEY 2015).

Neben den so überaus zahlreichen menschlichen Resten stellt Keramik die zweitgrößte Fundgruppe in den Konzentrationen dar. Die Scherben hunderter

verzierte Gefäße ließen sich in vielen Fällen wieder teilweise zusammensetzen, was darauf hinweist, dass die Keramik vor Ort intentionell zerschlagen und dann in den Gräben deponiert wurde (ZEEB-LANZ 2014). Bei den verzierten Gefäßen handelt es sich um eine ganz besondere Ware, die sehr sorgfältig hergestellt wurde und außerordentlich qualitätvoll verziert ist; viele Gefäße weisen eine hochpolierte Oberfläche auf (ZEEB-LANZ 2018a).

Das Spektrum der Fundkonzentrationen wird weiterhin ergänzt durch Felssteinbeile, die in der Bandkeramik typischerweise quergeschäftet sind (sog. Dechsel; vgl. WEINER 1997); auch diese sind teilweise intentionell zerstört. Zu den absichtlich zerschmetterten Gesteinsartefakten sind auch die zahlreich vertretenen Fragmente großer Reibsteinplatten zu zählen, die ursprünglich die Unterlieger von Getreideschiebemühlen darstellten. Die Reibsteinfragmente zeigen großen- teils Hitzeeinwirkungen. Man hatte sie offenbar ins Feuer gelegt, um sie mürbe zu machen, was die Zerschlagung in Fragmente erheblich vereinfachte.

Im Feuersteinspektrum liegt sowohl lokales Rohmaterial als auch aus überregionalen Gegenden importierter Feuerstein vor (SCHIMMELPFENNIG 2001). Bei den Silexklingen fällt auf, dass hier nur die besonders wertvollen Varietäten zerstört wurden. Das insgesamt hohe Vorkommen von Silexrohmaterialien, deren nächste Quellen mehr als 200 km von Herxheim entfernt liegen, ist bemerkenswert. Die Klingen wurden zu ausgesplitterten Stücken zugerichtet und damit unbrauchbar gemacht (SCHIMMELPFENNIG 2019).

Die einzigen Artefaktgruppen, die in den spätbandkeramischen Fundkonzentrationen nicht intentionell zerstört auftreten, sind Werkzeuge aus Tierknochen und Geweih, Schmuck sowie Trachtbestandteile. Bemerkenswert sind fünf außergewöhnlich feine und lange nadelartige Geräte sowie Dreiecke und spatelartige, sorgfältig geglättete Artefakte, die Symbolcharakter besitzen dürften (HAACK 2002, 2013).

Schlachtabfall ist in einer bandkeramischen Siedlung immer zu erwarten und findet sich auch in Gruben und Gräben von Herxheim. Auffallend sind aber besondere Funde wie Flügel- und andere Knochen von großen Watvögeln, eine isolierte Ansammlung von ca. 20 Kiefern kleiner Carnivoren (u. a. Wildkatze, Marder und Iltis) (ARBOGAST 2002, 2019) sowie Bukranien und Aigikranien (jeweils beide Hörner von Rind oder Ziege an einem absichtlich so präparierten Schädelteil). Besonders Bukranien gelten üblicherweise in vorgeschichtlichen Befunden als stark symbolisch aufgeladen und besitzen vielerorts rituelle Bedeutung (z. B. SEIDEL 2013). Unter den Tierknochen stechen speziell die im Vergleich zu anderen LBK-Fundplätzen überaus zahlreichen Hundeknochen hervor, die zu mindestens 13 Individuen gehören (JANNSSENS, ARBOGAST & ZEEB-LANZ 2019).

Die Behandlung der Menschen und Artefakte zeigt insgesamt stark normierte, wiederkehrende und bestimmten Regeln unterliegende Züge, die unzweifelhaft rituellen Charakter besitzen (BURKERT 1972). Daher wird in Herxheim der Zeitraum, in dem diese speziellen Rituale durchgeführt werden, als „Ritualphase“ be-

zeichnet (ZEEB-LANZ 2011, 2019b; HAACK 2016). Die stark manipulierten Toten könnten menschliche Opfer gewesen sein, die im Rahmen wiederholter Rituale den Göttern geopfert wurden (ZEEB-LANZ 2014a, 2019b); dies ist aber natürlich nur eine Hypothese.

5 Die menschlichen Skelettreste

Eine derart überwältigende Anzahl extrem manipulierter menschlicher Überreste wie in Herxheim gibt es in keinem anderen Fundort der Bandkeramik, ja selbst für die gesamte Vorgeschichte ist dieser Befund einzigartig. Die Analyse der fragmentierten Knochen erhellt die akribische Behandlung der Menschen nach ihrem Tod (BOULESTIN & COUPEY 2015): An den Knochenfragmenten sind in Bereichen, die Muskel- und Sehnenansatzstellen an den Gelenken markieren, häufiger feine Schnittspuren zu erkennen (Abb. 4). Aber auch in anderen Knochenarealen finden sich gehäuft Schnittspuren, die auf das Abschaben von Weichteilen hinweisen. Alle Spuren und Bruchmuster an den Knochen sind typisch für den frischen Knochen vor kurzem Verstorbener (ORSCHIEDT & HAIDLE 2009). Insgesamt lässt sich eine ganz außerordentliche Manipulation der toten Körper von Herxheim feststellen: Nach dem Tod (dessen Ursache nicht mehr identifizierbar ist) wur-



Abbildung 4: Herxheim. Schnittspuren an Muskel- und Sehnenansatzstellen von Langknochen menschlicher Individuen; Foto: Bruno Boulestin.

Figure 4: Herxheim. cut marks at muscle and tendon attachment points of long bones of human individuals; photo: Bruno Boulestin.

den die Menschen offenbar erst einmal in Teile zerlegt, indem die Extremitäten abgetrennt und die Wirbelsäulen aus den Rücken gelöst wurden (BOULESTIN & COUPEY 2015). Danach entfernten die Akteure dieser sonderbaren Handlungen das gesamte Fleisch und die sonstigen Weichteile von den Knochen. Als letztes wurden die Knochen sorgfältig in Fragmente zerschlagen, wobei die Fragmentierung besonders bei den großen Langknochen der Arme und Beine ein extremes Maß erreichte. Aber auch Kiefer wurden zerteilt, Becken zerschlagen und Rippen zerschmettert.

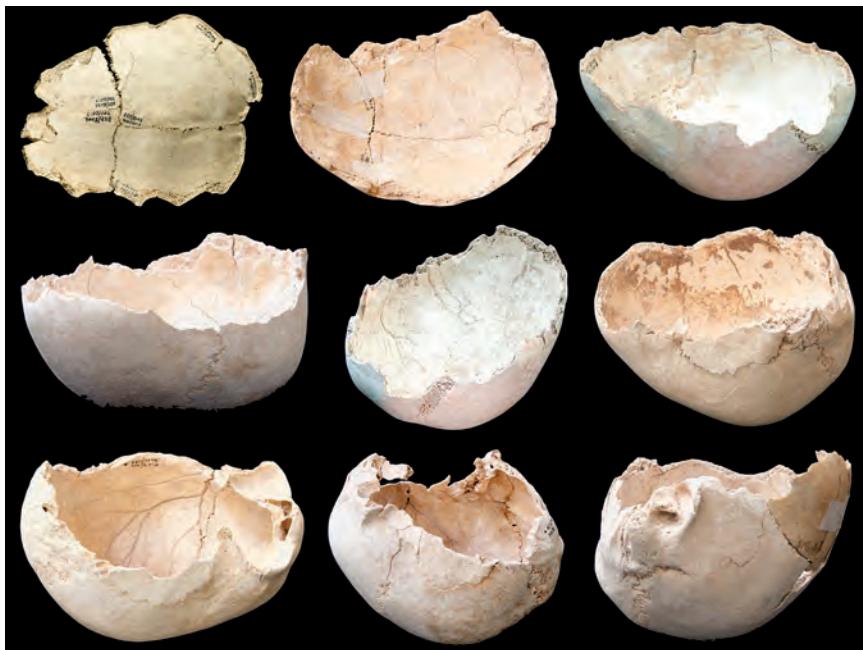


Abbildung 5: Herxheim. Variationen von Schädelkalotten; diese wurden sorgfältig mit gezielten Steinbeilschlägen zugerichtet; Foto: Bruno Boulestin.

Figure 5: Herxheim. Variations of skull calottes; these were carefully prepared with targeted stone adze blows; photo: Bruno Boulestin.

Eine besondere Behandlung erfuhren die Köpfe der Toten: Nach der Entfernung von Kopfhaut und sämtlichen Weichteilen, erkennbar an zahlreichen Schnitt- und Schabespuren auf den Schädeln (HAIDLE & ORSCHIEDT 2001), schlug man mit gezielten Steinbeilhieben den Gesichtsschädel und die Schädelbasis ab, so dass nur das Schäeldach, die sog. Kalotte, übrigblieb (Abb. 5). Diese ähnelt einer ovalen Schale und trägt keinerlei menschliche Züge mehr. Die Zahl von fast 500 derartiger Kalotten in Herxheim stellt einen einmaligen Befund in der gesamten Vor- und Frühgeschichte dar (ZEEB-LANZ 2011). Da es zusätzlich zahlreiche Frag-

mente vom Oberschädel gibt, die zu weiteren Individuen gehören, kann davon ausgegangen werden, dass die Überreste von ca. 600 Menschen ausgegraben wurden. Ein Drittel des Erdwerkes liegt aber noch unberührt im Boden, so dass man diese Zahl berechtigt auf ca. 1.000 getötete Individuen hochrechnen darf.

Wenngleich es aufgrund der massiven Zerschlagung der Knochen nicht möglich ist, genaue Zahlen anzugeben, so ist doch klar, dass in Herxheim Männer und Frauen, Kleinkinder, Jugendliche, Erwachsene und Greise getötet und danach zerlegt, entfleischt und zerschlagen wurden (BOULESTIN & COUPEY 2015; ZEEB-LANZ 2019b).

Angesichts der Tatsache, dass alle in Herxheim ausgegrabenen Artefakte sich als bandkeramisch erwiesen, musste man anfänglich davon ausgehen, dass es sich bei den Toten um Mitglieder der bandkeramischen Gemeinschaft handelte. Aber was für Mitglieder konnten das sein, die sich entweder freiwillig als Opfer zur Verfügung stellten oder aber gegen ihren Willen gewaltsam zu Tode gebracht wurden? Analysen des Strontiumgehalts der Zähne einer ausgewählten Stichprobe sollten möglichst Aufschluss darüber geben, in welcher Gegend die Toten geboren und aufgewachsen waren. Strontium, ein Mineral, das sich in unterschiedlicher Konzentration im Boden findet, wird aus der Nahrung und dem konsumierten Wasser aufgenommen und tauscht in Knochen und Zähnen die Kalziumphase aus. Im Zahnschmelz, dem dichtesten Gewebe des Körpers, wird das Strontium lediglich einmal eingelagert und bleibt dann dort versiegelt, auch wenn der Mensch sich im Laufe seines Lebens in ganz unterschiedlichen geologischen Landschaften aufhält (KNIPPER 2005).

Proben von fast 100 Individuen erbrachten höchst erstaunliche Ergebnisse: 90 % der Beprobteten waren „Fremde“, also nicht in Herxheim oder Umgebung aufgewachsen. Ein Großteil dieser Fremden war in höheren Lagen von Mittelgebirgen mit Granit-Untergrund geboren worden, wie die für die Bandkeramik teils einzigartig hohen Strontiumwerte unzweifelhaft belegen (TURCK et al. 2014; TURCK 2019). Dieses Ergebnis war völlig überraschend, kennt man doch bis heute überhaupt keine regulären Siedlungen der Bandkeramiker in höheren Mittelgebirgslagen im gesamten Verbreitungsgebiet der Kultur (VALDE-NOWAK 2002).

Von denselben Zähnen, deren Schmelz für die Strontium-Isotopie genutzt worden waren, wurden später die Wurzeln für genetische Untersuchungen verwendet. 26 Proben konnten analysiert werden, wobei alle beprobten Individuen zur Gruppe der Mittelgebirgsbewohner gehörten. Im Ergebnis war keines dieser Individuen ein Angehöriger der indigenen Wildbeutergemeinschaften: Alle Proben ergaben dieselben DNA-Marker, die für die bandkeramischen Einwanderer charakteristisch sind (BLÖCHER, FIGARSKA & BURGER 2019). Es kann also kein Zweifel bestehen, dass die in Herxheim geopferten Toten dieselben Vorfahren hatten wie die in den Ebenen lebenden frühen Ackerbauern der LBK. Damit wird die brennende Frage aufgeworfen: Wer waren die Toten von Herxheim?

6 Die nicht vollständig zerschlagenen Individuen

Unter den vielen Toten sticht eine kleine Anzahl an Teilskeletten und vollständigen, nicht manipulierten Individuen hervor. Dazu kommen einige wenige vollständige Skelette, die jedoch nicht mehr im anatomischen Verband vorliegen, und eine zurzeit noch unbestimmte geringe Anzahl an Föten, Neugeborenen und Kleinkindern. Bei den vollständigen Skeletten sind zwei Gruppen zu unterscheiden: Bestattungen in der für die LBK typischen Hockerlage und Skelette in anderer Lage. Diese Skelette und Torsi werden seit 2022 anthropologisch auf am Knochen erkennbare Krankheiten, körperliches Aussehen und Anzeiger für körperliche Belastungen und Bewegungsmuster untersucht.

Tabelle 1: Übersicht über die vollständigen Skelette und Torsi von Herxheim (nur Grabung 1996–1999, ohne Säuglinge) und die an ihnen beobachteten Pathologien; Fotos: GDKE, Landesarchäologie-Speyer; Annemarie Häußer

Table 1: Overview of the complete skeletons and torsos from Herxheim (excavation 1996–1999 only, without nurslings) and the pathologies observed about them; photos: GDKE, Landesarchäologie-Speyer; Annemarie Häußer

Individ.	Grabungsfoto	Geschlecht, Alter	Pathologien	Totenlage
Siedlung				
498-1		A unbestimmt, ca. 20–59 Jahre	Cribra Orbitalia; Parodontopathien; Karies; Arthrose	Bestattung in linker Hockerlage
1080-2		B feminin, ca. 11–13 Jahre	Cribra Orbitalia	Bestattung in linker Hockerlage

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Individ.	Grabungsfoto	Geschlecht, Alter	Pathologien	Toten- lage
Siedlung				
1237-2		C feminin ca. 30–50 Jahre	Trauma proximale Ulna; Karies; Parodontopathien; Arthrose; Spondylyse	Bestattung in linker Hockerlage
Grube an Graben				
1350-11		D unbestimmt, ca. 30–50 Jahre	Cribra Orbitalia	Bestattung in linker Hockerlage
281-150-5		E unbestimmt, ca. 8–10 Jahre		Bestattung in rechter Hockerlage
Innengraben 282				
282-12-17		F maskulin, ca. 25–30 Jahre		Bestattung in extremer linker Hockerlage
282-19-1		G maskulin, um 20 Jahre	Tibiae: Periostitis	fast vollständiges Skelett in linker Hockerlage

Tabelle 1: Fortsetzung

Table 1: continued

Individ.	Grabungsfoto	Geschlecht, Alter	Pathologien	Toten- lage
Innengraben 282				
282-101-6		H feminin, ca. 11–13 Jahre		fast vollständiges Skelett in Bauchlage
282-109-5		I maskulin, ca. 18–25 Jahre	Spondylyse; Humerus; Osteochondrosis disseccans	Bestattung in extremer rechter Hockerlage
282-125-2		J maskulin, ca. 60 Jahre oder älter	Cribrum Orbitalia; intravitale Hiebverletzung am Schädel; Arthrose an div. Gelenken	fast vollständiges Skelett in Rückenlage
282-126-3		K maskulin, ca. 25–40 Jahre	Karies; Innenbandverknöcherung am linken Sprunggelenk an Calcaneus und Talus	Bestattung in extremer linker Hockerlage
282-130-6		L feminin, ca. 35–50 Jahre	Spondylosis deformans	fast vollständiges, disloziertes Skelett

Tabelle 1: Fortsetzung
Table 1: continued

Individ.	Grabungsfoto	Geschlecht, Alter	Pathologien	Toten- lage
Innengraben 282				
977-12		M feminin, ca. 20–35 Jahre	Karies	Skelett in Rückenlage
Außengraben				
281-151-3		N Tendenz feminin, ca. 18–20 Jahre	asymmetrische Maxilla; Zahnt- fehlstellungen	Bestattung in rechter Hockerlage
Teilskelette im Innengraben				
282-6-8		O maskulin, ca. 25–35 Jahre	drei intravitale Schädeltrauma- ta; intravitale Fraktur des 2./3. Brustwirbels mit sekundärer Spondylarthrose	Torso in rechter Seitenlage
282-61-2		P maskulin, ca. 25–35 Jahre	Coxarthrose	Torso in Bauchlage
282-109-12		Q maskulin, ca. 25 Jahre oder älter		Torso in Rückenlage

In vorliegendem Beitrag werden erste Ergebnisse präsentiert. An den bislang untersuchten 12 vollständigen oder nahezu vollständigen Körpern und drei Teilskeletten aus der Rettungsgrabung (Tab. 1) wurden die Untersuchungen mit den in der prähistorischen Anthropologie üblichen Methoden zur Altersschätzung, biologisch-morphologischen Geschlechtsbestimmung sowie zu Skeletterkrankungen und Manipulationsspuren durchgeführt (z. B. HERRMANN et al. 1990; ORTNER 2003; WHITE 1992). Bei den Toten handelt es sich insgesamt um morphologische Männer (n = 8), Frauen (n = 6) und Kinder bzw. Heranwachsende (n = 4); bei Letzteren lässt sich anthropologisch keine sichere Geschlechtszuweisung durchführen. Das jüngste Individuum (Nr. 281-150-5; Tab. 1, E) wurde ca. 8–10 Jahre alt. Das älteste Individuum (Nr. 282-125-2; Tab. 1, J) erreichte ein für die Bandkeramik ungewöhnlich hohes Alter von über 60 Jahren. Dieser Mann litt dementsprechend unter altersbedingten Verschleißerscheinungen an den großen Gelenken, aber auch an einer fortgeschrittenen Arthrose in der Halswirbelsäule.

Insgesamt ist aber der Gesundheitszustand der untersuchten Individuen als verhältnismäßig gut zu bezeichnen. Nur vier (ca. 27 %) von 15 Individuen mit Schädel zeigen als allgemeine Stressmarker in den knöchernen Augenhöhlen „schwammartige“ Veränderungen, die *Cibra Orbitalia* genannt werden. Die Ursachen für diese Veränderungen können vielfältig sein, meist wird *Cibra Orbitalia* jedoch auf eine unspezifische Anämie zurückgeführt (ORTNER 2003). Die Individuen zeigen allgemein nur geringe Gelenkverschleißerscheinungen und Wirbelsäulenveränderungen. Bei zwei Individuen (Nr. 1237-2; Tab. 1, C; Nr. 282-105-9; Tab. 1, I) liegen allerdings an den fünften Lendenwirbeln beidseitige Fusionsdefekte am Wirbelbogen, sogenannte *Spondylysen*, vor. Dabei könnte es sich um angeborene Defekte oder durch wiederholte Mikroverletzungen zugezogene Veränderungen handeln. Da die Wirbelkörper und Wirbelbögen von mehreren Bändern und von Bindegewebe umgeben sind und normalerweise in Position gehalten werden, lässt sich nicht seriös feststellen, ob die betroffenen Personen Schmerzen zu erleiden hatten (vgl. (WEBER 2022).

Drei Individuen (Nrn. 1237-2, 282-6-8 und 282-105-9) hatten zu Lebzeiten Verletzungen am Knochen erlitten, die jedoch gut und ohne schwerwiegende Folgeschäden für die Betroffenen verheilten. So hatte Individuum Nr. 1237-2 (Tab. 1, C) eine Schulterverletzung mit einer unvollständigen Fraktur des Ellenknochens im Ellenbogengelenk. Die Fraktur verheilte in einer leichten Fehlstellung. Bei Individuum Nr. 282-6-8 (Tab. 1, O) waren durch eine kleinflächige Krafteinwirkung von hinten zwei Brustwirbel-Querfortsätze gebrochen. Nach der Heilung dieser Frakturen blieben arthrotische Veränderungen der betroffenen Wirbelgelenke zurück. Das Individuum Nr. 282-105-9 (Tab. 1, I) litt im rechten Ellenbogengelenk an *Osteochondrosis dissecans*, einer Knorpelverletzung, bei der ein an dem Knorpel anhaftendes Knochenfragment durch eine Überbelastung herausreißt. Dieses Knochenfragment wird entweder vom Körper aufgelöst oder bleibt als freies Knochenfragment im Ellenbogengelenk erhalten. Dort kann es die Gelenkfunk-

tion stören, Schmerzen verursachen und zu einem vorzeitigen Verschleiß führen (ORTNER 2003).

Es gibt einige wenige Ausnahmen der vollständigen Zerlegung – die Teilskelette. Diese wurden nicht gänzlich zerlegt, und bestimmte Körperpartien säuberte man nicht komplett von Weichteilen. Schnitt- oder Schabespuren fehlen deshalb an den nicht manipulierten Skelettelementen. In geschätzt einem Dutzend Fälle finden sich im anthropologischen Fundmaterial Teile von Wirbelsäulen, Wirbelsäulen-Becken-Verbindungen und Armskelette im anatomischen Verband. Die hochinteressante Frage, warum bei diesen Individuen die Zerlegung vorzeitig abgebrochen wurde, lässt sich archäologisch allerdings leider nicht beantworten.

In der Siedlungsfläche wurden drei Hockerbestattungen (Nrn. 1080-2, 1237-2 und 498-1) dokumentiert. Leider können sie nur ganz allgemein in die Zeit der Bandkeramik datiert werden. Ein sicherer zeitlicher Zusammenhang mit der „Ritualphase“ in Herxheim lässt sich nicht herstellen.

Bemerkenswert ist die Bestattung Nr. 1080-2 (Tab.1, B). Ein ca. 11–13-jähriges Mädchen wurde in der für die Bandkeramik typischen Seitenlage mit angezogenen Beinen und Armen in einer Grabgrube im Siedlungsareal beerdigt. Ungewöhnlich ist jedoch, dass später zentral über dem Grab ein Feuer angezündet wurde, wie die Knochen des jungen Mädchens erkennen lassen. Die Skelettelemente des Rumpfes wurden besonders im Bereich des Bauches durch die Feuereinwirkung zerstört, wohingegen die Rückenpartie kaum Hitzeeinwirkung zeigt. Auch Arme, Beine und Kopf haben fast keine Hitzeveränderungen ausgebildet. Eine solche Verteilung von Hitzeschäden ist sehr ungewöhnlich (SYMES et al. 2008). Daher muss hier wohl tatsächlich von einem gezielten, abgegrenzten Feuer direkt im Rumpfbereich der Toten ausgegangen werden.

Zwei Individuen wurden in Gruben bestattet. Es handelt es sich um einen ca. 30–50-jährigen Erwachsenen (Nr. 1350-11; Tab. 1, D) und das oben bereits erwähnte 8–10-jährige Kind (Nr. 281-150-5; Tab. 1, E). Nur wenige Meter von diesem Kind entfernt wurde im Außengraben eine weibliche Jugendliche oder junge Erwachsene (Nr. 281-151-3; Tab. 1, N) in Hockerstellung freigelegt. Auffällig an dieser Frau sind mehrere Zahnfehlstellungen und eine Asymmetrie des Kieferbogens. Diese Anomalien könnten zu Muskelverspannungen im Hals- und Schulterbereich sowie zu Kopfschmerzen geführt haben.

Das mit über sechzig Jahren älteste vollständige Individuum ist ein morphologischer Mann, der in gestreckter Rückenlage und überkreuz liegenden Beinen zwischen Ritualresten deponiert worden war (Nr. 282-125-2; Tab. 1, J). Neben den schon erwähnten arthrotischen Veränderungen in der Halswirbelsäule sowie den Schulter- und Kniegelenken fällt am Schädel eine gut verheilte, schon viele Jahre vor dem Tod des Individuums zugefügte, langovale Hiebverletzung auf.

Ein Teilskelett, Nr. 282-6-8 (Tab. 1, O) im anatomischen Verband, bestehend aus dem Schädel, der Wirbelsäule, einzelnen linken Rippen, dem Beckengürtel und dem rechten Oberschenkel, weist am Schädel intravitale Verletzungen mit

teilweise ungewöhnlicher Form auf. Ein Hieb wurde jedoch sicher mit einem Dechsel ausgeführt. Auf dem rechten Scheitelbein befindet sich zusätzlich eine unregelmäßige, relativ oberflächliche Schädelläsion, bei der die Knochenoberfläche vernarbt ist. Der Mann hatte hier sicherlich sichtbare Narben und haarfreie Stellen. Zwei seiner Brustwirbel weisen überdies lange zurückliegende und gut verheilte Frakturen auf. Besonders auffällig sind die perimortalen Manipulationen des Teilskelettes. So hatte man am Schädel bereits mit der gezielten Zurichtung bzw. Manipulation zu einer Schädelkalotte begonnen und den Gesichtsschädel teilweise abgeschlagen, als der Schädel noch fest mit der Wirbelsäule verbunden war (Abb. 6). Der rechte Oberschenkelknochen war ungefähr mittig zerschlagen



Abbildung 6: Schädel von Individuum Nr. 282-6-8 in Frontalansicht. Um den Todeszeitpunkt herum wurden Teile des Gesichtsschädelns abgeschlagen und es wurde mit der Zurichtung zu einer Schädelkalotte begonnen; Foto: Antje Langer.

Figure 6: Skull of individual No. 282-6-8, frontal view. Around the time of death some parts of the facial skull were slashed off to produce a skull calotte; photo: Antje Langer.

worden. Zudem konnten an diesem Oberschenkelknochen und einem Brustwirbelbogen Schnittspuren dokumentiert werden.

Mindestens zwei weitere Individuen im Alter um die 25–35 Jahre (Nrn. 282-61-2 und 282-109-12) wurden nur teilzerlegt und dann im von der Wirbelsäule bis zu den Oberschenkelknochen durchgehenden anatomischen Verband im inneren Graben deponiert. Bei Individuum Nr. 282-61-2 (Tab. 1, P) lag in direkter Nachbarschaft der ebenfalls im anatomischen Verband befindliche Arm eines jugendlichen Individuums.

Da im noch nicht untersuchten Knochenspektrum der Altgrabung noch weitere disartikulierte Skelette und Teilskelette sowie Säuglinge und Kleinkinder vorhanden sein könnten, wären durch zukünftige anthropologische Untersuchungen womöglich noch weitere neue Aspekte der Totenbehandlung in Herxheim aufzudecken.

7 Die Keramik

Die Keramik zeigt eine ganze Reihe an Besonderheiten, die sie für die Interpretation des Platzes und seiner Funktion sehr wichtig macht (ZEEB-LANZ 2019b). Die ganz überwiegende Menge von verzierten Gefäßscherben in den Fundkonzentrationen datiert in die jüngere/jüngste Phase der Bandkeramik, die an das Ende des 6. Jt. heranreicht; für die besonderen Handlungen in Herxheim wurden, damit übereinstimmend, ¹⁴C-Daten für einen Zeitraum von ca. 5060/50–5030 v. Chr. ermittelt (RIEDHAMMER 2019). Siedlungsgruben früherer Zeitstellung belegen deutlich, dass das Herxheimer Bandkeramikdorf von ca. 5300–ca. 5030 v. Chr. durchgängig besiedelt war (JEUNESSE, LEFRANC & VAN WILLIGEN 2009). In diesem Kapitel soll uns allerdings ausschließlich das mit den besonderen Behandlungen von Menschen und der Deponierung verbundene Keramikmaterial der jüngeren/jüngsten Phase der Kultur interessieren.

Es ist auffallend, dass sich trotz der Menge an Fragmenten kein Gefäß zur Gänze zusammensetzen lässt; es fehlt immer eine gewisse Anzahl an Fragmenten, was darauf hinweist, dass nicht das gesamte zerschlagene Keramikmaterial in die Konzentrationen gelangte (ZEEB-LANZ et al. 2007); dies findet eine klare Parallele bei den menschlichen Überresten (HAACK 2021).

Die verzierte Keramik besticht durch ihre außergewöhnliche Formenvielfalt und die Qualität in Herstellung und Verzierungstechniken (Abb. 7). Sie ist insgesamt weitaus prunkvoller ausgeführt als alle sonstigen bekannten Keramikkomplexe der Bandkeramik.

Obwohl die endgültige Vorlage und Interpretation der Herxheimer Keramik noch nicht abgeschlossen ist (s. Kap. 9), wurden bereits zahlreiche Vorarbeiten durchgeführt (ZEEB-LANZ et al. 2007; HOUltre 2008; JEUNESSE, LEFRANC & VAN WILLIGEN 2009; ZEEB-LANZ 2019b), die wichtige Erkenntnisse zur Bedeutung



Abbildung 7: Herxheim. Auswahl an prunkvoll verzierter Keramik aus den Fundkonzentrationen; a=Pfälzer Zierstil der jüngsten Bandkeramik; b=Rhein-Main-Schraffurstil; c=Elster-Saale-Zierstil; d=Zierstil Mosel-Mündungsgebiet (sog. Plaiddter Stil); Fotos: a: Jutta Winkelmann; b-d: Juraj Liptak.

Figure 7: Herxheim. Selection of lavishly decorated pottery from the finds concentrations; a=decoration style of the youngest LBK in the Palatinate; b=Rhine-Main-hatching style; c=Elster-Saale-decoration style; d=decoration style of the Moselle estuary region (so called style of Plaiddt); photos: a: Jutta Winkelmann; b-d: Juraj Liptak.

der Gefäße für die Gesamtinterpretation der Anlage von Herxheim ermöglichen. Früh wurde deutlich, dass sich im jüngstbandkeramischen Materialbestand viel mehr verbarg als ausschließlich Gefäße mit Ornamenten im Stil der „Pfälzer Gruppe“ der jungen LBK (ZEEB-LANZ et al. 2007; HOU BRE 2007; JEUNESSE, LEFRANC & VAN WILLIGEN 2009). Mehr als 25 % der mit spätbandkeramischen Mustern versehenen Keramik ist in ortsfremden Zierstilen verziert, die auf andere Regionen der Bandkeramik verweisen (HÄUSSLER 2025 mdl.). Insgesamt mindestens neun verschiedene Regionalstile, die teilweise bis zu 400 km Luftlinie entfernt beheimatet sind, konnten bis dato in Herxheim identifiziert werden (ZEEB-LANZ & HAACK 2020). Bei einer Kartierung der in Herxheim vertretenen regionalen Zierstile (z. B. ZEEB-LANZ 2022) ist im Vergleich mit den Ursprungsgegenden der Silices (SCHIMMELPFENNIG 2019) klar zu erkennen, dass hier zwei gänzlich unterschiedliche Kommunikationsnetze vorliegen: Während über die Keramik zahlrei-

che Kontakte nach Nordosten, Osten und Südosten festzustellen sind, orientiert sich das Sileximportnetz von Herxheim stark nach Nordwesten und Norden.

Um die Frage der Herkunft der Keramik näher zu beleuchten, wurden von einer Auswahl an Gefäßresten verschiedener „fremder“ Zierstile chemische Analysen der Rohtonzzusammensetzungen durchgeführt; als Referenzgruppe dienten 65 Scherben im Pfälzer Stil verzielter Keramik (MECKING 2019). Die Ergebnisse sind leider nicht sehr eindeutig; die Frage „Import oder Nachahmung?“ muss daher vorerst als noch nicht beantwortet angesehen werden.

Ein ausführliches Anpassungsprojekt führte zu einer großen Zahl an Zusammensetzungen von Scherben zu größeren Gefäßeinheiten (DENAIRE 2019). Diese anpassenden Scherben fanden sich sowohl in ein und derselben Fundkonzentration, in Schichten darüber und darunter, in benachbarten Konzentrationen, aber auch über größere Distanzen hinweg; die längste Strecke, 245 m, verbindet zwei Scherben eines verzierten Kumpfes.

Neben der qualitätvollen Feinkeramik ist auch unverzierte Gebrauchskeramik in erheblicher Menge vorhanden. Die intentionelle Zerstörung betrifft die gesamte Keramik (HAACK 2021). In der Regel lässt sich unverzierte Grobkeramik nicht einer der bandkeramischen Zeitphasen zuordnen. In Herxheim kann man allerdings in den Fundkonzentrationen die unverzierte Ware dann in die jüngste Phase der Bandkeramik datieren, wenn sie mit verzielter Keramik dieser Zeit vergesellschaftet ist.

8 Interpretationsansätze

Da es für die Befunde und Funde von Herxheim in der gesamten Vorgeschichte keinen Vergleich gibt, man also nicht mit Analogien arbeiten kann, ist es wenig verwunderlich, dass es im Laufe der Erforschung des Platzes zu immer neuen, sich teilweise diametral widersprechenden Interpretationsansätzen kam; nicht umsonst wurde im ersten Band zu Herxheim die Forschungsgeschichte als „interpretative thriller“ bezeichnet (ZEEB-LANZ & HAACK 2016: 1).

Die Interpretationsansätze zum Gesamtbefund zeigen ein buntes Bild. In der Frühphase der Ausgrabungen war man sich nicht sicher, ob die menschlichen Überreste Zeugnisse besonderer Bestattungssitten oder kriegerischer Auseinandersetzungen darstellen (HÄSSER 1998): auch Kannibalismus wurde nicht gänzlich ausgeschlossen (SPATZ 1998). Nach Auffassung der beiden Osteoarchäologen J. Orschiedt und M. N. Haidle handelt es sich bei den Überresten eindeutig um besondere Sekundär- oder mehrstufige Bestattungen (HAIDLE & ORSCHIEDT 2001; ORSCHIEDT & HAIDLE 2012).

Einen ganz anderen Ansatz verfolgte der Bearbeiter der Menschenknochen der Forschungsgrabung (2005–2008): B. Boulestin's Gegenmodell beschreibt Aktivitäten, die definitiv der umfassenden Ausbeutung der menschlichen Körper zwecks

Nahrungsgewinnung dienen. Dabei hält er es für faktisch bewiesen, dass es sich in Herxheim um Kannibalismus gehandelt haben muss (BOULESTIN et al. 2009; BOULESTIN & COUPEY 2015). Boulestin erklärt beispielsweise den Fehlbestand an Epiphysen der großen Langknochen dergestalt, dass diese für eine Suppe ausgekocht und dann weggeworfen wurden, und verbrannte Vorderzähne sieht er als Beleg: „...the bodies were roasted“ (BOULESTIN & COUPEY 2015: 115). Es würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen, hier alle Argumente aufzuführen, die der Kannibalismusthese widersprechen (siehe dazu ZEEB-LANZ 2019b), jedoch sei hier als ein Punkt exemplarisch angeführt, dass z. B. das Herstellen der Schädelkalotten kein Bestandteil kannibalistischer Praktiken ist, sondern in eine rituelle Sphäre gehört (BOULESTIN 2012); den Kalotten muss mit Sicherheit ein hoher Symbolwert zugesprochen werden, was auch ethnographisch vielfach belegt ist (WIECZOREK & ROSENDAHL 2011).

Die These des „faktisch bewiesenen“ Kannibalismus in Herxheim blieb nicht lange unwidersprochen (z. B. Zeeb-Lanz 2010; ZEEB-LANZ 2018b).

Die Erstautorin, langjährige Leiterin des DFG-Forschungsprojektes Herxheim, gibt einer anderen Hypothese den Vorzug: *extreme processing* im Zusammenhang mit festlichen/rituellen Mahlzeiten („feasting“; vgl. GRAMSCH 2005, 2012). Der Begriff *extreme processing* (außergewöhnlich starke Zerlegung) wurde für die zahlreichen Ansammlungen zerschlagener und manipulierter Menschenknochen in Siedlungen der Anasazi des 13./14. Jh. im amerikanischen Südwesten geprägt (KUCKELMAN, LIGHTFOOT & MARTIN 2000). Die Vertreter des *extreme processing* sehen die gegen Tote ausgeübte Gewalt als eine bedeutsame soziokulturelle Komponente (siehe z. B. MARTIN & HERROD 2015; OSTERHOLTZ 2018). Und tatsächlich lässt sich das Konzept von *extreme processing* in Herxheim bestens belegen: Neben Menschen wurden auch Artefakte wie Keramik und Steingeräte sowie Mahlsteine extrem zerstört. Diese deutliche Gewaltkomponente beim Ritual in Herxheim ist sehr facettenreich und geht über die extreme Zerlegung von menschlichen Körpern weit hinaus: Die Herstellung von Kalotten, die Teilmanipulationen einzelner Individuen (s. Kap. 5) sowie die Deponierung vollständiger Skelette in bzw. direkt auf Fundkonzentrationen zerstörten Materials verweisen auf ein komplexes, formatives Ritualgeschehen, das von besonderer sozio-kultureller Bedeutung zeugt.

Darüber hinaus belegen die verschiedenen Zierstile der Tongefäße, dass sich hier Gruppen aus verschiedenen Regionen zu außergewöhnlichen Ritualzeremonien zusammenfanden. Man kann davon ausgehen, dass bei der Ausbreitung der Bandkeramik die nach Westen migrierenden Pioniergruppen immer noch Kontakte zu ihren weiter östlich liegenden Herkunftsgemeinden besaßen. Die Beobachtung, dass die Kontakte der Herxheimer nicht nach Westen, sondern deutlich nach Nordosten und Osten weisen, gilt auch für andere Siedlungen der Bandkeramik. So tragen etwa Importe oder Nachahmungen anderer Zierstile in der jüngstbandkeramischen Phase der Siedlung von Asparn-Schletz (Niederösterreich) ähnliche Züge wie in Herxheim beobachtet: Keramik der slowakischen

Želiezovce-Gruppe, der Keszthely-Gruppe des Balaton sowie in geringerem Maße böhmische Šárka-Keramik stellen hier ebenfalls Importe aus östlich von Asparn gelegenen Gegenden dar (FEHLMANN, LÄNGAUER & PIELER 2022). Das kann ebenso wie in Herxheim und anderen bandkeramischen Siedlungen als Anzeichen für die lebendig gehaltenen Kontakte zu den Clans und Siedlungen gewertet werden, aus denen die Menschen einst nach Westen aufgebrochen waren, um neues Siedlungsland zu kultivieren.

Der von der Erstautorin postulierte Zusammenhang zwischen *extreme processing* und festlichen/rituellen Mahlzeiten beruht auf der unbestrittenen Tatsache, dass wir es in Herxheim mit hochzeremoniellen, normierten Ritualhandlungen zu tun haben. Rituale binden in den allermeisten Fällen Essen und Trinken als wichtige integrative Bestandteile des Ritualablaufes ein (BENZ & GRAMSCH 2006; DIETLER 2006). Eine der Gelegenheiten, zu denen dieses herxheimspezifische Ritual durchgeführt wurde, könnte sich als folgendes Narrativ darstellen:

Aus einer Reihe von Siedlungen, die durch alte Lineages noch mit den Bewohnern von Herxheim verbunden sind, kommen Delegationen dorthin, um gemeinsam ein besonderes Ritual zu begehen. Dafür bringen sie Gefangene mit, die dort geopfert werden sollen. Angekommen in Herxheim, werden zuerst von Arbeitsgruppen aus jeder Delegation auf einer bereits bekannten Trasse längere Grabensegmente ausgehoben. Dann wird ein großes Festmahl vorbereitet, für das man prunkvolle Keramik verwendet. Für das Festmahl wird besonders ausgesuchtes Getreide auf Schiebemühlen zu Mehl zermahlen, werden Rinder, Schweine und Ziegen geschlachtet und bratfertig zubereitet. Weitere Speisen kocht man in größeren Kochtöpfen. Für zahlreiche Herdfeuer muss mit Dechseln Holz geschlagen werden, mit Silexmessern wird dann das gegarte Fleisch zerschnitten. Nach dem Festmahl, sozusagen als Höhepunkt der rituellen Feier, werden die Gefangenen getötet, entfleischt und ihre Knochen zerschlagen; parallel wird von einer Spezialistengruppe mit der Zurichtung der Kalotten begonnen. Alle beim Festmahl und zur Manipulation der Toten verwendeten Gerätschaften, vom Mahlstein über die Prunk- und Gebrauchsgeräte bis hin zu den Steinwerkzeugen, werden eingesammelt – sie sind jetzt „rituell aufgeladen“ und müssen einer potentiellen zukünftigen Verwendung im profanen Alltag entzogen werden. Daher wird das gesamte Material zerstört. Als letzte Sequenz im rituellen Handlungsablauf werden die zu großen Haufen aufgetürmten Knochenfragmente und Reste der zerschlagenen Gerätschaften mit Erdmaterial aus dem Grabenaushub vermengt und im inneren und äußeren Graben deponiert. Danach wird der mit Fundkonzentrationen versehene Grabenbereich wieder zugeschüttet.

So oder so ähnlich könnte eines der Ritualszenarien ausgesehen haben. Was wir nicht ergründen können, ist der Grund für diese spektakulären Rituale. Auch wer eigentlich die Toten sind, ist bis jetzt noch völlig unklar. Und zuletzt muss man sich fragen, warum diese Rituale in dem nicht sehr großen und topografisch völlig unauffällig gelegenen Herxheim stattfanden.

9 Ausblick

Herxheim bietet also weiterhin eine ganze Reihe ungelöster Rätsel. In einem DFG-Projekt wird seit 2022 das keramische Material aufgenommen und analysiert. In einem Kooperationsprojekt mit der Universität Rennes (Frankreich) werden petrographische Analysen der Tonminerale durchgeführt, welche die archäologischen Keramikuntersuchungen ergänzen.

Ebenfalls seit 2022 untersucht Antje Langer die vollständigen Skelette sowie die Torsi und erfasst vor allem pathologische Besonderheiten an deren Knochen.

Die oben genannten Untersuchungen werden in den nächsten Jahren in zwei weiteren Bänden zu Herxheim veröffentlicht werden (Herxheim Volume 3 und Volume 4).

In einem weiteren Kooperationsprojekt wird gegenwärtig eine große Serie von ca. 500 Individuen aus Herxheim genetisch analysiert; hier steht die Frage nach Verwandtschaften unter den Toten im Vordergrund.

Der Frage, wie und wovon sich Menschen vergangener Zeiten ernährt haben, kann man mit Analysen der in den Knochen abgelagerten stabilen Isotopen Kohlenstoff und Stickstoff nachgehen. Zu diesem Zweck wurden von einer spanischen Kollegin kürzlich etwa 130 Proben von Kiefern der Individuen von Herxheim genommen, die in Barcelona analysiert werden und uns Auskunft über mögliche Ernährungsunterschiede zwischen den Bandkeramikern und den in Herxheim festgestellten Gebirgsbewohnern geben sollen.

So bleibt der Fundort Herxheim auch zukünftig ein Forschungsfokus, der sicherlich noch viele Überraschungen bereithält.

10 Die Ausstellung im Museum Herxheim

Während die Ausgrabungen im späteren Gewerbegebiet „West“ noch liefen, engagierte sich der Herxheimer Heimatverein bereits für ein Museum, das die Ortsgeschichte Herxheims präsentieren sollte. Die Ortsgemeinde Herxheim erwarb zu diesem Zweck 1994 eine alte fränkische Hofanlage, die in mehreren Abschnitten saniert und zu einem Museum umgebaut wurde. Eine durch den Heimatverein an anderer Stelle abgetragene und hier wieder errichtete Scheune sollte als Herzstück des Museums eine große Dauerausstellung zu den spektakulären Funden der Jungsteinzeit beherbergen.

Um die gänzlich außergewöhnlichen Funde aus den Grabungen für ein breites Publikum verständlich zu machen, wurden sie in einen allgemeinen bandkeramischen Kontext eingebettet. So beinhaltet die Ausstellung im Erdgeschoss zahlreiche Exponate, die das Alltagsleben der bandkeramischen Menschen illustrieren. Die Exponate und Informationen werden anschaulich ergänzt durch Modelle und Rekonstruktionen. Denn erst durch die Veranschaulichung des „normalen“ Le-

bens in der Bandkeramik wird auch Nichtfachleuten klar, was für eine Besonderheit die in Herxheim vollzogenen Rituale darstellen. Die Ritualfunde selbst werden im Scheunenkeller präsentiert. Zuletzt wurden die begleitenden Informationen 2018 um neue wissenschaftliche Erkenntnisse erweitert. Derzeit werden weitere Ergänzungen geplant, da sich das Museum in der außergewöhnlichen und glücklichen Lage befindet, am Puls der aktuellen Forschung bleiben zu können.

Neben den einzigartigen Funden aus der jungsteinzeitlichen Ritualanlage und der Ausstellung zur jüngeren Ortsgeschichte bietet das Museum Herxheim wechselnde Sonderausstellungen zu verschiedenen archäologischen und kulturhistorischen Themen.

Regelmäßige Aktionstage, Führungen und ein museumspädagogisches Angebot für Schulklassen, Kindergeburtstage und sonstige Gruppen vervollständigen das Museumserlebnis.

11 Literatur

- ARBOGAST, R.-M. (2002): Vorläufige Ergebnisse zur Fauna des bandkeramischen Fundplatzes von Herxheim. – In: BERNHARD, H. (Hrsg.): Archäologie in der Pfalz. – Jahresbericht 2001: 271-272; Speyer.
- ARBOGAST, R.-M. (2019): Analysis of the faunal assemblages of the LBK site of Herxheim: the larger mammals. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, 8 (2): 139-232; Speyer.
- BÁNFFY, E. & OROSS, K. (2010): The earliest and earlier phase of the LBK in Transdanubia. – In: GRONENBORN, D. & PETRASCH, J. (Hrsg.): Die Neolithisierung Mitteleuropas. Internationale Tagung, Mainz 24. bis 26. Juni 2005. – RGZM-Tagungen, 4: 255-272; Mainz.
- BENZ, M. & GRAMSCH, A. (2006): Zur soziopolitischen Bedeutung von Festen. Eine Einführung anhand von Beispielen aus dem Alten Orient und Europa. – Ethnographisch-Archäologische Zeitschrift, 47: 417-437.
- BIERMANN, E. (2009): Bandkeramische Langhäuser: Die ersten Großbauten Mitteleuropas. Überlegungen zu Bewohnerzahl und Nutzung. – In: CLASSEN, E., DOPPLER, T. & RAMMINGER, B. (Hrsg.): Varia neolithica VI – Neolithische Monuments und neolithische Gesellschaften. – Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mitteleuropas, 56: 29-41; Weißbach.
- BLÖCHER, J., FIGARSKA, S.M. & BURGER, J. (2019): Genomic analysis of Early Neolithic humans from Herxheim, Germany. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, 8 (2): 305-312; Speyer.
- BOELICKE, U. (1982): Gruben und Häuser: Untersuchungen zur Struktur bandkeramischer Hofplätze. – In: PAVÚK, J. & CHROPOVSKÝ, B. (Hrsg.): Siedlungen der Kultur mit Linearkeramik in Europa. – Internationales Kolloquium Nové Vozokany, 17.-20. November 1981: 17-28; Nitra.
- BOLLONGINO, R. & BURGER, J. (2007): Neolithic cattle domestication as seen from ancient DNA. – Proceedings of the British Academy, 144: 165-187.
- BOULESTIN, B. (2012): Aperçu des pratiques autour de la tête du Néolithique au premier âge du fer. – In: BOULESTIN, B. & GAMBIER, D.H. (eds.): Crânes trophées, crânes d'ancêtres et autres pratiques autour de la tête: problèmes d'interprétation en archéologie. Actes de la table ronde pluridisciplinaire, musée national de Préhistoire, Les Eyzies-de-Tayac (Dordogne, France), 14-16 octobre 2010. – BAR International Series, 2415: 89-98; Oxford.

- BOULESTIN, B. & COUPEY, A.-S. (2015): Cannibalism in the Linear Pottery Culture: The Human Remains from Herxheim. – 156 S.; Oxford (Archaeopress).
- BOULESTIN, B., ZEEB-LANZ, A., JEUNESSE, C., HAACK, F., ARBOGAST, R.-M. & DENAIRE, A. (2009): Cannibalism in the Linear Pottery culture at Herxheim (Palatinate, Germany). – *Antiquity*, **83**: 968–982.
- BURKERT, W. (1997): *Homo Necans: Interpretationen Altgriechischer Opferriten und Mythen*, 2. Aufl. – Religionsgeschichtliche Versuche und Vorarbeiten, **32**: 378 S.; Berlin, New York (Walter de Gruyter).
- CAPASSO, L., KENNEDY, K.A.R. & WILCAK, C.A. (1998): *Atlas of Occupational Markers on Human Remains*. – *Journal of Paleontology – Monographic Publication*, **3**; 165 S.; Teramo.
- DENAIRE, A. (2019): Pottery refits and connections from Herxheim. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): *Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany)*, Vol. 2. – *Forschungen zur Pfälzischen Archäologie*, **8** (2): 25–40; Speyer.
- DIETLER, M. (2006): Feasting und kommensale Politik in der Eisenzeit Europas. Theoretische Reflexionen und empirische Fallstudien. – *Ethnographisch-Archäologische Zeitschrift*, **47**: 541–568.
- DUBOULOUZ, J. (2008): Impacts of the Neolithic Demographic Transition on Linear Pottery Culture Settlement. – In: BOCQET-APPEL, J.-P. & BAR-YOSEF, O. (Hrsg.): *The Neolithic Demographic Transition and its Consequences*. – 207–234; Berlin (Springer).
- FETSCH, S. (2008): Linienbandkeramische Fundplätze der Gemarkung Herxheim, Kr. Südliche Weinstraße, Mainz, Universität, Fachbereich Vor- und Frühgeschichte, Magisterarbeit. – 248 S.; Mainz.
- FEHLMANN, D., LÄNGAUER, J. & PIELER, F. (2022): Themenbereich I „Scherbe, Stein, kein Paier – die „Mobilen Dinge“ der linearbandkeramischen Siedlung von Asparn/Schletz“. – In: HÖDL, S. & KEIL, M. (Hrsg.): *Mobile Dinge, Menschen und Ideen. Eine bewegte Geschichte Niederösterreichs*. Abschlussbericht. – 8–23; https://www.mobiledinge.at/_files/ugd/6d41ab_2f5598637da84751b68aefc9864e7268.pdf
- GRAMSCH, A. (2005): Mehr als das Mahl selbst. Zur sozialen Bedeutung von Speisen im Bestattungskontext. – *Archäologische Informationen*, **28** (1, 2): 47–60.
- GRAMSCH, A. (2012): Prestige durch rituelle Handlungen – cui bono? – In: CHRISTIANSEN, B. & THALER, U. (Hrsg.): *Ansehenssache. Formen von Prestige in Kulturen des Altertums*. – Münchner Studien zur Alten Welt, **9**: 355–384.
- GRUPE, G., HARBECK, M. & MCGLYNN, G. C. (2015): *Prähistorische Anthropologie*. – 544 S.; Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum (Verlag)).
- HAACK, F. (2002): Knochenstäbchen – Zur Terminologie bandkeramischer Knochengeräte. – In: BERNHARD, H. (Hrsg.): *Archäologie in der Pfalz. Jahresbericht 2001*: 266–270; Speyer.
- HAACK, F. (2013): Ein Beutel voller Knochenadeln. Produktion und Deponierung von außergewöhnlichen Knochenspitzen aus der linienbandkeramischen Siedlung von Herxheim. – In: ZEEB-LANZ, A. & STUPPERICH, R. (2013): *Palatinatus Illustrandus. Festschrift für Helmut Bernhard zum 65. Geburtstag*. – Mentor, **5**: 47–51; Ruhpolding.
- HAACK, F. (2014): Limits of different backfills or boundaries of overlapping pits? Reconstructing the architecture and filling processes of the pit enclosure of Herxheim (Palatinate, Germany). – In: BEIER, H.-J., EINICKE, R. & BIERMANN, E. (Hrsg.): *Varia Neolithica VIII. „Material – Werkzeug: Werkzeug – Material“ & „Klinge, Messer, Schwert & Co – Neues aus der Schneidenwelt“*. Aktuelles aus der Neolithforschung. Beiträge der Tagungen der Arbeitsgemeinschaft – Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mitteleuropas, **75**: 59–70; Langenweißbach.
- HAACK, F. (2016): The Early Neolithic ditched enclosure of Herxheim – Architecture, Fill Formation Processes and Service Life. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.) (2016): *Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany)*, Vol. 1. – *Forschungen zur Pfälzischen Archäologie*, **8** (1): 19–154; Speyer.

- HAACK, F. (2021): Erdwerke und ritualisierte Gewalt: Herxheim und das Ende der Bandkeramik. – TÜVA Mitteilungen, **18**: 27-43.
- HÄUSSER, A. (1998) (Hrsg.): Krieg oder Frieden? Herxheim vor 7000 Jahren. Katalog zur Sonderausstellung, Villa Wieser 1998. – 80 S.; Speyer.
- HÄUSSER, A., HAIDLE, M.N. & ORSCHIEDT, J. (2004): Die menschlichen Skelettreste des jüngst-bandkeramischen Erdwerkes von Herxheim. Zeugen eines Massakers oder einer neuen Bestattungssitte? – In: ALT, K.W., ARBOGAST, R.-M., JEUNESSE, C. & VAN WILLIGEN, S. (Hrsg.): Archéologie funéraire du Néolithique danubien/Grab- und Bestattungssitten des donauländischen Neolithikums. Actes du table ronde de Fribourg-en-Brisgau 17,18 octobre 1998. – Cahiers de l’Association pour la Promotion de la Recherche Archéologique en Alsace, **20**: 107-120.
- HÄUSSLER, E. (2025): mündliche Mitteilung; Speyer.
- HAGLUND, W.D. & SORG, M. (2002): Advances in Forensic Taphonomy – Method, Theory and Archaeological Perspective. – 507 S.; Boca Raton (CRC Press).
- HAIDLE, M.N. & ORSCHIEDT, J. (2001): Das jüngstbandkeramische Grabenwerk von Herxheim, Kreis Südliche Landstraße: Schauplatz einer Schlacht oder Bestattungsplatz? Anthropologische Ansätze. – In: BERNHARD, H. (Hrsg.): Archäologie in der Pfalz. – Jahresbericht **2000**: 147-153; Speyer.
- HARTZ, S., LÜBKE, H. & TERBERGER, T. (2007): From fish and seal to sheep and cattle: new research into the process of neolithisation in northern Germany. – Proceedings of the British Academy, **144**: 567-594.
- HERRMANN, B., GRUPE, G., PIEBENBRINK, H. & SCHUTKOWSKI, H. (1990): Prähistorische Anthropologie, Leitfaden der Feld- und Labormethoden. – 445 S.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- HOUBRE, A. (2008): La Céramique Rubanée de Herxheim, Masterarbeit. – 314 S.; Strasbourg (Université des sciences humaines).
- JANNSSENS, L.A.A., ARBOGAST, R.-M. & ZEEB-LANZ, A. (2019): Dogs of the final Bandkeramik at Herxheim: refitting and pathology. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (2): 233-245; Speyer.
- JEUNESSE, C., LEFRANC, P. & VAN WILLIGEN, S. (2009): Die pfälzische Bandkeramik: Definition und Periodisierung. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Krisen, Kulturwandel, Kontinuitäten. Zum Ende der Bandkeramik in Mitteleuropa. Beiträge der Internationalen Tagung in Herxheim bei Landau (Pfalz) vom 14.-17.06.2007. – Internationale Archäologie. Arbeitsgemeinschaft, Symposium, Tagung, Kongress, **10**: 61-78; Rahden/Westf.
- KNIPPER, C. (2005): Die Strontiumisotopenanalyse: Eine naturwissenschaftliche Methode zur Erfassung von Mobilität in der Ur- und Frühgeschichte. – Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums, **51**: 589-685.
- KNÜSEL, C.R. & ROBB, J. (2016): Funerary taphonomy: An overview of goals and methods. – Journal of Archaeological Science. – Reports, **10**: 655-673.
- KUCKELMAN, K.A., LIGHTFOOT, R.R. & MARTIN, D.L. (2000): Changing Patterns of Violence in the Northern San Juan Region. – KIVA, **66** (1): – 147-165.
- LÜNING, J. (1997): Wohin mit der Bandkeramik? – Programmatische Bemerkungen zu einem allgemeinen Problem am Beispiel Hessens. – In: BECKER, C., DUNKELMANN, M.-L., METZNER-NEBELSICK, C., PETER-RÖCHER, H., ROEDER, M. & TERŽAN, B. (Hrsg.). – CHRONOS. Beiträge zur Prähistorischen Archäologie zwischen Nord- und Südosteuropa. Festschrift für Bernhard Hänsel. – Internationale Archäologie. Studia Honoraria, **1**: 23-57; Espelkamp.
- LÜNING, J. (2005): Bandkeramische Hofplätze und die absolute Chronologie der Bandkeramik. – In: LÜNING, J., FRIRDICH, C. & ZIMMERMANN, A. (Hrsg.): Die Bandkeramik im 21. Jahrhundert. – Symposium in der Abtei Brauweiler bei Köln vom 16.9.-19.9.2002. – Internationale Archäologie. Arbeitsgemeinschaft, Symposium, Tagung, Kongress, **7**: 49-74; Rahden/Westf.

- LÜNING, J. & STEHLI, P. (1989): Die Bandkeramik in Mitteleuropa: Von der Natur- zur Kulturlandschaft. – Spektrum der Wissenschaft, **11** (4): 78-88; Heidelberg (Springer Nature).
- MARTIN, D.L. & HARROD, R.P. (2015): Bioarchaeological Contributions to the Study of Violence. – Yearbook of Physical Anthropology, **156**: 116-145.
- MCKINLEY, J. (2008): In the head of the pyre: Efficiency of oxidation in Roman-British cremations – did it really matter? – In: SCHMIDT, C.W. & SYMES, S.A. (Hrsg.): The Analysis of Buried Human Remains. – 163-183; London (Academic Press).
- MECKING, O. (2019): Clay analysis of the pottery from Herxheim. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.) (2019): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (2): 41-54; Speyer.
- MEURERS-BALKE, J., KALIS, A.J., GERLACH, R. & JÜRGENS, A. (1999): Landschafts- und Siedlungsgeschichte des Rheinlands. – In: KNÖRZER, K.-H., GERLACH, R., MEURERS-BALKE, J., KALIS, A. J., TEGTMEIER, U., BECKER W.D. & JÜRGEN, A. (Hrsg.): PflanzenSpuren. Archäobotanik im Rheinland: Agrarlandschaft und Nutzpflanzen im Wandel der Zeiten. – Materialien zur Bodendenkmalpflege im Rheinland, **10**: 11-66; Bonn.
- NIESZERY, N. (1995): Linearbandkeramische Gräberfelder in Bayern. – Internationale Archäologie, **16**: 334 S.; Rahden/Westf.
- ORSCHIEDT, J. & HAIDLE, M.N. (2009): Hinweise auf eine Krise? Die menschlichen Skelettreste von Herxheim. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Krisen, Kulturwandel, Kontinuitäten. Zum Ende der Bandkeramik in Mitteleuropa. Beiträge der Internationalen Tagung in Herxheim bei Landau (Pfalz) vom 14.-17.06.2007. – Internationale Archäologie. Arbeitsgemeinschaft, Symposium, Tagung, Kongress, **10**: 41-52; Rahden/Westf.
- ORSCHIEDT, J. & HAIDLE, M.N. (2012): Violence against the living, violence against the dead on the human remains from Herxheim, Germany. Evidence of a crisis and mass cannibalism? – In: SCHULTING, R. & FIBIGER, L. (eds.): Sticks, Stones and Broken Bones: Neolithic Violence in a European Perspective. – 121-137; Oxford (Oxford University Press).
- ORTNER, D.J. (2003): Identification of pathological conditions in human skeletal remains. – 664 S.; London (Academic Press).
- OSTERHOLTZ, A.J. (2018): Interpreting and Reinterpreting Sacred Ridge: Placing Extreme Processing in a Larger Context. – KIVA, **84** (4): 461-479.
- PECHTL, J. (2012): Stephanposching, Lkr. Deggendorf, und die Linienbandkeramik des Isarmündungsgebietes. Überlegungen zu Siedlungsstrukturen und zur Bevölkerungsabschätzung. – In: SMOLNIK, R. (Hrsg.): Siedlungsstruktur und Kulturwandel in der Bandkeramik. Beiträge der Internationalen Tagung „Neue Fragen zur Bandkeramik oder alles beim Alten?“ in Leipzig, 23. bis 24. September 2010. – Arbeits- und Forschungsberichte zur sächsischen Bodendenkmalpflege, Beiheft **25**: 130-140; Dresden.
- PESCHEL, C. (1992): Regel und Ausnahme. Linearbandkeramische Bestattungssitten in Deutschland und angrenzenden Gebieten, unter besonderer Berücksichtigung der Sonderbestattungen. – Internationale Archäologie, **9**; Buch am Erlbach.
- RIEDHAMMER, K. (2019): The radiocarbon dates from Herxheim and their archaeological interpretation. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.) (2019): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (2): 285-303; Speyer.
- SCHIER, W., ORSCHIEDT, J., STÄUBLE, H. & LIEBERMANN, C. (Hrsg.) (2021): Mesolithikum oder Neolithikum? Auf den Spuren später Wildbeuter. – Berlin Studies of the Ancient World, **72**: 366 S.; Berlin.
- SCHIMMELPFENNIG, D. (2001): Das Steinmaterial. – In: BERNHARD, H. (Hrsg.): Archäologie in der Pfalz. Jahresbericht **2000**: 193-196; Speyer.
- SCHIMMELPFENNIG, D. (2019): The lithic material from Herxheim with special emphasis on the 2005–2008 excavations and the latest LBK phase (the “ritual phase” at Herxheim). – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (2): 285-303; Speyer.

- heim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – *Forschungen zur Pfälzischen Archäologie*, **8** (2): 81-138; Speyer.
- SEIDEL, U. (2013): Das „Michelsberger Erdwerk“ von Bruchsal „Aue – ein Platz vielfältiger Aktivitäten“. – In: MELLER, H. (Hrsg.): 3300 BC. Mysteriöse Steinzeittote und ihre Welt. Begleitheft zur Sonderausstellung vom 14. November 2013 bis 18. Mai 2014 im Landesmuseum für Vorgeschichte Halle. – 207-213; Halle (Saale).
- SPATZ, H. (1998): Krisen, Gewalt, Tod – zum Ende der ersten Ackerbauernkultur Mitteleuropas. – In: HÄUSSER, A. (Hrsg.): Krieg oder Frieden? Herxheim vor 7000 Jahren. – Katalog zur Sonderausstellung, Villa Wieser 1998. – 10-18; Speyer (Landesamt für Denkmalpflege, Archäologische Denkmalpflege).
- SYMES, S.A., RAINWATER, C.W., CHAPMAN, E.N., GIPSON, D.R. & PIPER, A. L. (2008): Patterned Thermal Destruction of Human Remains in a Forensic Setting. – In: SCHMIDT, C.W. & SYMES, S.A. (Hrsg.): The Analysis of Burned Human Remains. – 15-54; London (Academic Press).
- STRIEN, C. & GRONENBORN, D. (2005): Klima- und Kulturwandel während des mitteleuropäischen Altneolithikums (58./57.-51./50. Jahrhundert v. Chr.). – In: GRONENBORN, D. (Hrsg.): Klimaveränderung und Kulturwandel in neolithischen Gesellschaften Mitteleuropas, 6700-2200 v. Chr. – RGZM-Tagungen, **1**: 131-149; Mainz.
- TURCK, R. (2019): Where did the dead from Herxheim originate? Isotopic analyses. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – *Forschungen zur Pfälzischen Archäologie*, **8** (2): 305-421; Speyer.
- TURCK, R., KOBER, B., KONTNY, J., HAACK, F. & ZEEB-LANZ, A. (2014): “Widely travelled people” in Herxheim? Sr-isotopes as indicators of mobility. – In: KAISER, E., BURGER, J. & SCHIER, W. (Hrsg.): Population Dynamics in Prehistory and Early History. – Topoi. Berlin Studies of the Ancient World, **5**: 149-164.
- VALDE-NOWAK, P. (2002): Siedlungsarchäologische Untersuchungen zur neolithischen Nutzung der mitteleuropäischen Gebirgslandschaften. – *Internationale Archäologie*, **69**: 251 S.; Ruhden/Westf.
- WAHL, J. (2016): mündliche Mitteilung; Konstanz.
- WAHL, J. & König, H. G. (1987): Anthropologisch-traumatologische Untersuchung der menschlichen Skelettreste aus dem bandkeramischen Massengrab von Talheim, Kreis Heilbronn. – Fundberichte aus Baden-Württemberg, **12**: 65-186.
- WEBER, J. (2022): 2.4 Wirbelsäule. – In: WEBER, J., WAHL, J. & ZINK, A. (Hrsg.): Osteologische Paläopathologie – Ein Handbuch für Anthropologen, Mediziner und Archäologen. – 241-286; Berlin (Lehmanns Media).
- WEINER, J. (1997): Zur Technologie bandkeramischer Dechselklingen aus Felsgestein und Knochen – Ein Beitrag zur Forschungsgeschichte. – *Archaeologia Austriaca*, **80**: 115-156.
- WHITE, T.D. (1992): Prehistoric cannibalism at Mancos 5MTUMR-2346. – 492 S.; Princeton (University Press).
- WIECZOREK, A. & ROSENDAHL, W. (Hrsg.) (2011): Schädelkult. Kopf und Schädel in der Kulturgeschichte des Menschen. Begleitband zur Sonderausstellung „Schädelkult – Kopf und Schädel in der Kulturgeschichte des Menschen“. – Publikation der Reiss-Engelhorn-Museen, **41**: 388 S.; Regensburg.
- ZEEB-LANZ, A. (2010): Kannibalismus in Herxheim – Ja oder Nein? – *Archäologie in Deutschland*, **2010** (2): 40.
- ZEEB-LANZ, A. (2011): Besondere Schädel und mehr. Der rätselhafte bandkeramische Ritualplatz von Herxheim (Pfalz). – In: WIECZOREK, A. & ROSENDAHL, W. (Hrsg.): Schädelkult. Kopf und Schädel in der Kulturgeschichte des Menschen. Begleitband zur Sonderausstellung „Schädelkult – Kopf und Schädel in der Kulturgeschichte des Menschen“. – Publikation der Reiss-Engelhorn-Museen, **41**: 46-51; Regensburg.
- ZEEB-LANZ, A. (2014): Gewalt im Ritual – Gewalt an Toten. Die Krise am Ende der Bandkeramik im Spiegel außergewöhnlicher Befunde. – In: LINK, T. & PETER-RÖCHER, H. (Hrsg.):

- Gewalt und Gesellschaft. Dimensionen der Gewalt in ur- und frühgeschichtlicher Zeit / Violence and Society. Dimensions of violence in pre- and protohistoric times. Internationale Tagung an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg 14.–16. März 2013. – Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie, **259**: 257–270; Bonn.
- ZEEB-LANZ, A. (2014a): Ritualmorde mit Menschenverspeisung? Der einzigartige jungsteinzeitliche Fundplatz von Herxheim bei Landau. – Historischer Verein Pirmasens, Jahrbuch **2014**: 148–174; Pirmasens.
- ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.) (2016a): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 1. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (1): 152 S.; Speyer.
- ZEEB-LANZ, A. (2016b): The contents of the find concentrations – selected examples in comparison. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 1. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (1): 119–152; Speyer.
- ZEEB-LANZ, A. (2018a): Herxheim – Ort eines außergewöhnlichen Rituals mit weitgereisten Teilnehmern. – In: Bewegte Zeiten. Archäologie in Deutschland. Begleitband zur gleichnamigen Sonderausstellung im Martin-Gropius-Bau in Berlin vom 21.09.2018–06.01.2019. – 82–91; Berlin.
- ZEEB-LANZ, A. (2018b): Kannibalismus in Herxheim? Kontroverse Betrachtungen zu einem faszinierenden Fundort der Jungsteinzeit. – Bayerische Archäologie, **2018** (2): 27–38.
- ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.) (2019a): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (2): 482 S.; Speyer.
- ZEEB-LANZ, A. (2019b): The Herxheim ritual enclosure. A synthesis of results and interpretative approaches. – In: ZEEB-LANZ, A. (Hrsg.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 2. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (2): 423–482; Speyer.
- ZEEB-LANZ, A. (2022): Konfliktarchäologie im Ritualkontext. Rätsel um den außergewöhnlichen jungsteinzeitlichen Fundplatz von Herxheim (Südpfalz). – In: LUDWIG, R. & SCHESCHKEWITZ, J. (Hrsg.): Krieg und Frieden. Konfliktarchäologie an Rhein und Neckar. Begleitbuch zur Ausstellung „Krieg und Frieden – Konfliktarchäologie an Rhein und Neckar“ im Kurpfälzischen Museum Heidelberg, 18. September 2022 bis 29. Januar 2023. – Arch. Informationen aus Baden-Württemberg, **87**: 44–50; Esslingen.
- ZEEB-LANZ, A. & HAACK, F. (2016): History of research at Herxheim – an „interpretative thriller“. – In: ZEEB-LANZ, A. (ed.): Ritualised Destruction in the Early Neolithic – The Exceptional Site of Herxheim (Palatinate, Germany), Vol. 1. – Forschungen zur Pfälzischen Archäologie, **8** (1): 1–13; Speyer.
- ZEEB-LANZ, A. & HAACK, F. (2020): Ritual und Gewalt in Herxheim. – In: MELLER, H., RISCH, R., ALT, K. W., BERTEMES, F. & MICÓ, R. (Hrsg.): Rituelle Gewalt – Rituale der Gewalt. 12. Mitteldeutscher Archäologentag vom 10.–12. Oktober 2019 in Halle (Saale). – Tagungen des Landesmuseums Halle **22** (I): 181–196; Halle (Saale).
- ZEEB-LANZ, A., BOULESTIN, B., HAACK, F. & JEUNESSE, C. (2009): Außergewöhnliche Totenbehandlung – Überraschendes aus der bandkeramischen Anlage von Herxheim bei Landau (Südpfalz). – Mitteilungen der Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte, **30**: 115–126.
- ZEEB-LANZ, A., HAACK, F., ARBOGAST, R.-M., HAIDLE, M.N., JEUNESSE, C., ORSCHIEDT, J. & SCHIMMELPFENNIG, D. (2007): Außergewöhnliche Deponierungen der Bandkeramik – die Grubenanlage von Herxheim. – Germania, **85**: 199–274.

DR. ANDREA ZEEB-LANZ
Generaldirektion Kulturelles Erbe Rheinland-Pfalz
Direktion Landesarchäologie
zeebelan@outlook.de
Tel. +49 176 410 38606

ANTJE LANGER
Eberhard Karls Universität Tübingen
Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters
Abteilung für Jüngere Urgeschichte und Frühgeschichte
Langer_Antje@gmx.de

LHILYDD FRANK M.A.
Museum Herxheim
frank@museum-herxheim.de

Manuskripteingang: 9. August 2025

Zwischen Rheingau und Mittelrhein

EBERHARD KÜMMERLE †

Taunus, Unterdevon, Tertiär, Mittelrhein, Rheinbett, Binger Loch, Auen

K u r z f a s s u n g : Der Rheingau ist geologisch zweigeteilt. Ein Teil ist geprägt durch seine Zugehörigkeit zum ehemaligen Mainzer Becken mit seinen tertärzeitlichen Ablagerungen. Ein Teil gehört dem Rheinischen Schiefergebirge an. Die Abgrenzung beider ist unscharf, weil Sedimente des Mainzer Meeres auf das Gebirge übergreifen. Dies wird auch im Rheinbett sichtbar.

Between the Rheingau and Middle Rhine

Taunus, Lower Devonian, Tertiary, Middle Rhine, Rhine bed, Binger Loch, floodplains

A b s t r a c t : The Rheingau is geologically divided into two parts. One part is characterized by its affiliation to the former Mainz Basin with its Tertiary deposits. One part belongs to the Renish Slate Mountains. The boundary between the two is blurred because sediments from the Mainz Sea overlap the mountains. This is also visible in the bed of the Rhine.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	255
2	Der Rheingau als Teil des Mainzer Beckens	255
3	Der Rheingau als Teil des Rheinischen Schiefergebirges	259
4	Dank	262
5	Literatur	262

1 Einleitung

Die Vielgestalt der Rheingauer Landschaft mit dem Taunus als „Rückgrat“ und den weiten Hängen zum Rhein hin beruht im Wesentlichen auf zwei geologischen Prozessen: Auf der sehr unterschiedlichen Heraushebung von Gebietsteilen einerseits und der sehr unterschiedlichen Abtragung in Abhängigkeit von der Festigkeit bzw. Härte der Gesteine.

2 Der Rheingau als Teil des Mainzer Beckens

Die relative Absenkung des Oberrheingrabens mit dem Mainzer Becken steht im Gegensatz zur Heraushebung des Rheinischen Schiefergebirges. Auf seinem Weg

von Schierstein bis Rüdesheim trifft der Rhein auf immer ältere Tertiär-Schichtglieder: Sie steigen nach Westen hin an (Abb. 1).

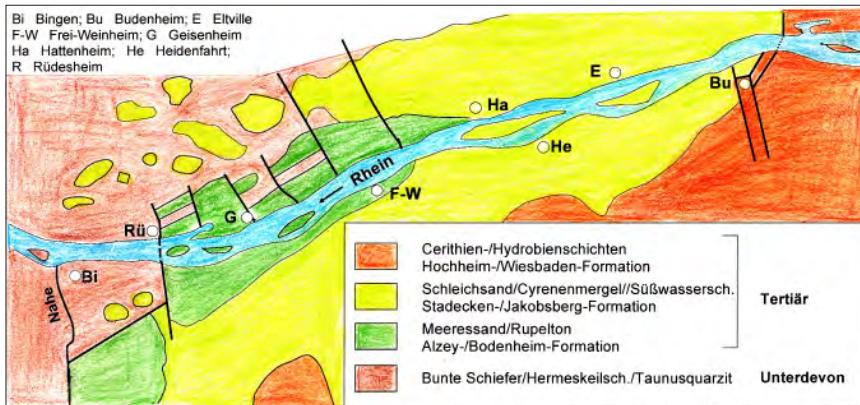


Abbildung 1: Schichtenfolge im tieferen Rheinbett; Skizze: E. Kümmerle.

Figure 1: Sequence of layers in the deeper Rhine bed; sketch: E. Kümmerle.

Diese Schichten sind im Rheinbett nur dort unter junger Rheinfracht freigelegt, wo besondere Strömung herrscht, wo gebaggert wurde oder wo der Schraubenstrahl der Motorschiffe wirkte (KÜMMERLE 2021, 2022, 2023; Abb. 2).

Dazu gehören auch die Kalksteine der Hydrobienschichten (Wiesbaden-Formation), die bei Niedrigwasser vor Biebrich erscheinen (KÜMMERLE 2004). Sie wurden bei Budenheim, Heidesheim und Ingelheim abgebaut. Warum aber gibt es im Rheingau nirgends Kalkstein? Verwerfungen in Nord-Süd- und Südwest-Nordost-Richtung ziehen unterhalb Schierstein durch das Rheintal (Abb. 1). Die westliche Gebirgsscholle ist so weit herausgehoben, dass westlich alles ehemals abgelagerte Kalkgestein abgetragen ist. Die Liegengrenze des „Kalktertiärs“ liegt bei Budenheim bei 45, am Rabenkopf bei Heidesheim bei 165 und am Jakobsberg bei Ockenheim bei 210 m ü. NN; ein weiterer Beleg für den Anstieg der Schichten nach Westen (WAGNER 1933; WAGNER & MICHELS 1930).

Zwischen Walluf und Hattenheim stehen im Rheinbett Cyrenenmergel an (Sulzheim-Formation), von da bis Rüdesheim Rupelton (Bodenheim-Formation, Abb. 1 u. 2, KÜMMERLE 1982, 2017, 2003), darunter Meeressand (Alzey-Formation). In Ingelheim wurde ein Braunkohleflöz des Cyrenenmergels in Schächten und einem Tagebau abgebaut. Zwischen Erbach und Hattenheim finden sich steinharte Verfestigungen in diesen Schichten. In der Großen Gieß links der Mariannenau ließ der Rhein in der letzten Kaltzeit grobes Geröll und Konglomerat liegen (KÜMMERLE 2005, 2008, 2022, Abb. 3).

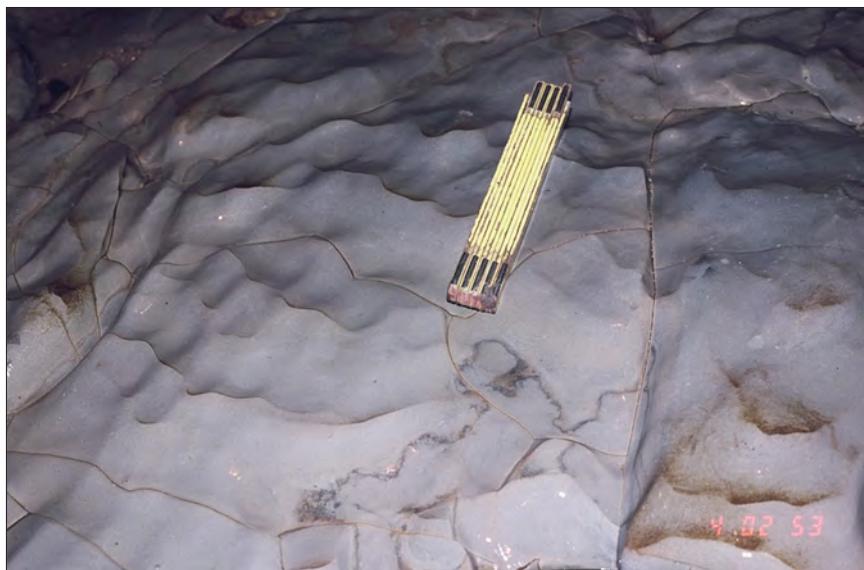


Abbildung 2: Freigeplüter Rupelton an der Rheinsohle im Rheingau; Foto: E. Kümmerle.
Figure 2: Exposed Rupel clay at the bottom of the Rhine in the Rheingau; photo: E. Kümmerle.



Abbildung 3: Grobes Geröll der Rheinsohle. Material der Niederterrasse; Foto: E. Kümmerle.
Figure 3: Coarse debris of the Rhine bed. Material of the lower terrace; photo: E. Kümmerle.

Ein großes Problem der Schifffahrt sind die Sand-„Dünen“, die der Rhein von Ost nach West über die Kiese der Niederterrasse treibt. Und zwar in mehreren Metern pro Tag (GÖLZ 1979, 1986, 1987; Abb. 4).



Abbildung 4: Sand-“Dünen“ über grobem Rheingeröll. Diese „Transportkörper“ mit flacher Luv- und steiler Leeseite sind bis 1 m hoch und bis 100 m breit. Zwischen Mainz und Bingen akkumuliert der Rhein jährlich rund 80.000 Kubikmeter Sand und Geröll; Foto: E. Kümmerle.

Figure 4: Sand “dunes” over coarse Rhine gravel. These “transport bodies” with flat windward and steep leeward sides are up to 1 m high and up to 100 m wide. Between Mainz and Bingen, the Rhine accumulates around 80,000 cubic meters of sand and debris every year; photo: E. Kümmerle.

Vor Rüdesheim, bei Rhein-km 526, überlagern Meeressand und Rupelton die alten Gesteine des Schiefergebirges, die von hier an stromabwärts das Rheinbett gestalten (Abb. 5).

In diesem Bereich kreuzen sich streichende (Südwest-Nordost) und Querverwerfungen. Wegen der stauenden Wirkung der Talverengung ab Rüdesheim bleibt die Erosion der Tertiärunterlage im Rheingau moderat. Die leicht ausräumbaren Schichten ermöglichen aber dem Fluss eine große Ausdehnung in der Breite. Auf Widerstand traf der Rhein beim Ausbreiten etwa in der Gegend der heutigen Burg Crass bei Eltville. Er musste sich in seine alte Mittelterrasse einschneiden, die hier an den Fluss heranreicht. Es entstand ein abschüssiger Steilhang bei dem „Galgengrund“, der später mit massivem Mauerwerk abgefangen wurde. Der ursprüngliche Zustand ist freilich auf vielen Abbildungen festgehalten.

Vor dem Eingriff des Menschen war die Breite des Flusses auch viel größer. Auf natürliche Art wurde er durch Absatz von Auenlehm verschmälert. Viele Auen

umfloss er (KÜMMERLE 2005, 2022). Die meisten wurden an die Ufer angeschlossen, ehemalige Rheinarme wurden trockengelegt („Anbau“). Im 19. Jahrhundert, aber auch noch zwischen 1967 und 1976 wurden Buhnen und Längswerke angelegt in der Absicht, größere Fahrwassertiefe zu schaffen, die Strömung zu bündeln und die Ausräumung der Rheinfracht zu fördern. Die Winkeler Au, der Winkeler Wörth und die Zankau waren im Weg und wurden abgebaggert. In Höhe Rüdesheim war der Rhein über 1.300 m breit. Nach Anlandung der Insel „Lach“ wurde er auf rund 750 m verschmälert. Noch um 1828 war die „Lach-Au“ Insel. Ein Steindamm führte vom Adlerturm (Pulverturm) zur Westspitze der Au. Vielerorts wurde an den Ufern abgelagert, so vor Kaub Schieferabraum. Vor Bingerbrück gab es um 1960 gar eine Mülldeponie auf der Anlandung zwischen zwei Buhnen.

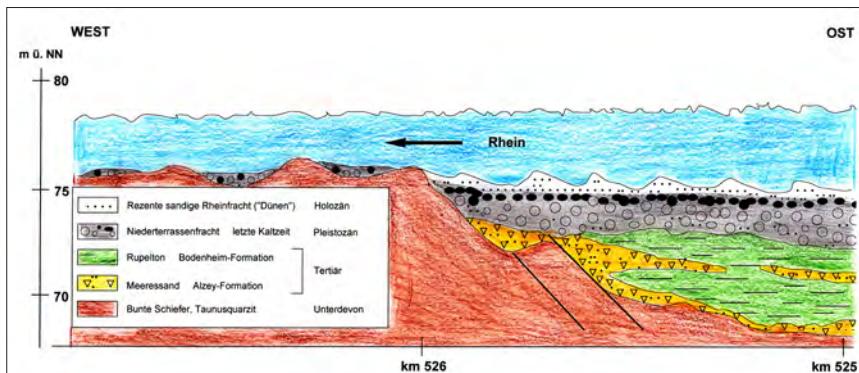


Abbildung 5: Anlagerung der Tertiärschichten an das Unterdevon vor Rüdesheim; geologische Skizze: E. Kümmerle.

Figure 5: Attachment of the Tertiary layers to the Lower Devonian off Rüdesheim; geological sketch: E. Kümmerle.

3 Der Rheingau als Teil des Rheinischen Schiefergebirges

Die o. g. Rheinfracht, die im Rheingau die Tertiärschichten überlagert, findet sich im Engtal nur an strömungsgeschützten Stellen auf dem alten Gebirge (MEYER & STETS 1996, 2000). Hier im Rheingauer Abschnitt stehen die ältesten Gesteine des Mittelrheins an. Die „Bunten Schiefer“, einzige nichtmarine Abfolge, bilden ab Rhein-km 529 die Rheinsohle. Es sind nicht nur Schiefer. Doch deren hoher Anteil erleichterte dem Fluss die Ausräumung; das Tal ist noch nicht ganz so eng wie unterhalb. Dem Schiefer sind Quarzite eingeschaltet, sie hatte der Fluss nicht abtragen können. So im Kemptener Fahrwasser. Sie trugen Namen wie „Mühlwerk“, „Weiberstein“, „Bettler“, „Marialey“ und „Ilmenstein“ (KÜMMERLE 2021). Die Felsen verschwanden in Uferschüttungen, so beim Binger Hafenbau 1890–1900 oder

wurden gesprengt. Der von Felsrippen durchzogene Schuttkegel der Nahe, der Nahegrund, ist von Geröll von Nahe und Rhein bedeckt und bei Niedrigwasser freigelegt wie auch die künstliche Überlaufschwelle unterhalb (Abb. 6). Am rechten Ufer standen der „Dicke Stein“ und der „Fahrstein“ („Farrenstein“) im Wasser (KÜMMERLE 1995, 2021).



Abbildung 6: Für mehr Fahrwassertiefe in der Fahrrinne erweiterter Nahegrund vor Bingerbrück, davor die „Binger Mauer“ (KÜMMERLE 2022); Foto: E. Kümmerle.

Figure 6: Bottom of the river Nahe widened for more fairway depth in the navigation channel off Bingerbrück, in front of the “Binger Wall” (KÜMMERLE 2022); photo: E. Kümmerle.

Eingeschaltet in die Bunten Schiefer ist ein Streifen des uralten Vulkangesteins Keratophyr mit einem Alter von rund 434 Mio. Jahren (SOMMERMANN et al. 1994; KÜMMERLE 2009). Es bildet die Inselgruppe „Kraus-Au“ bei km 528, ist im Rhein vor Bingen erbohrt (GÖLZ 1979) und wurde in einer Bohrung zum Tunnelprojekt 440 m westlich Bahnhof Rüdesheim angetroffen. Die Vorkommen liegen in Südwest-Nordostrichtung und sind begrenzt durch steile Verwerfungen, denn das Neubengestein, Bunte Schiefer, ist jünger! Damit bleibt unbekannt, in welches Gestein der Vulkanit einst eingedrungen sein kann. Eine Ahnung vom tiefen Untergrund geben vielleicht jene Gesteinsreste, die ein Basaltschlot im Wispertal aus großer Tiefe hochbrachte: Olivengabbro und Granatgneis (EHRENBURG et al. 1968).

Ab dem stehen gebliebenen „Mühlstein“ wird das Tal erst richtig eng: Es beginnt der Abschnitt mit dem Taunusquarzit, bekannt von den großen Steinbrüchen am Rochusberg und bei Trechtingshausen. Die Härte des Gesteins bewirkt

Widerstand gegen Erosion und Formung des Geländereliefs (TOUSSAINT 2016). Diese Härte beruht auf der metamorphen Umgestaltung des Sandsteins. Die Quarzkörner sind derart miteinander verwachsen, dass sie beim Zerschlagen einzeln durchtrennt werden. In dem vom Taunusquarzit gestalteten Engtal hat der Fluss nicht nur mit einzelnen Felsköpfen zu kämpfen, sondern mit durchziehenden, kaum unterbrochenen Riffen. Ein solches zog von der Mäuseturminsel über die „Hohe Broh“, die „Rote Mauer“, den „Scharfenstein“ zur „Fiddel“. Es war dies eine Art Strombremse vor dem Binger Riff, das vom „Hohen Lochstein“ im Südwesten an das rechte Ufer bei dem „Großen Lochstein“ reichte. Die Barriere strich 56–60 ° Nordost und fiel steil nach Nordwest. Der 80 cm hohe Wasserfall spülte ein tiefes natürliches Tosbecken aus. „Der Rhein stürzt in Wirbeln über Stein-klippen mit grauenhaftem Gebraus hinweg“ beschrieb es der Dessauer Dichter Wilhelm Müller (1794–1827).

Die Binger-Loch-Strecke wurde besonders von 1966–1974 ausgebaut. Über eine Million Quadratmeter felsige Sohle wurden bearbeitet. Dabei fand man Spreng- und Brandbomben, Schusswaffen, Säbel und Bajonette. 1995 wurde die „Binger Mauer“ und eine Überlaufschwelle zwischen ihr und dem Nahegrund angelegt (siehe Abb. 6).

Das Höllenbachtal zwischen Assmannshausen und Aulhausen folgt einer streichenden Verwerfung. An ihr ist die Nordscholle so herausgehoben, dass die liegenden Bunten Schiefer bis zum Thomas-Morus-Haus freigelegt sind. Weinkeller in Assmannshausen sind in die Schiefer gehauen. Flussabwärts stehen, durch Verwerfungen bedingt, streckenweise Bunte Schiefer / Taunusquarzit an.

Kurz hinter Burg Sooneck weitet sich das Tal merklich: Der Fluss tritt in das Gebiet des Hunsrückschiefers ein (MITTMAYER 1996). Er war leichter auszuräumen als der Quarzit. Das besagt jedoch nicht, dass in der Schieferfolge keine Quarzite eingeschaltet sind. Sie bildeten zahlreiche, ehemals mit Namen genannte Felsköpfe im Fluss wie „Grünley“, „Lorcher Kirchley“, „Rauscheley“ und „Atzmann“ (GÖTTERT 2009). Die „Galgenleyen“ am Ausgang des Niedertals erhoben sich im Wasser vor dem Hang, auf dem der dreibeinige Kurmainzer Galgen stand. Er war größer, höher und „reichlicher bevölkert“ als der gegenüber errichtete zweibeinige Kurpfälzer Galgen. Auch die „Pfalz“ ist auf Quarzitfelsen der Hunsrückschieferfolge errichtet: „Katzenstein“, „Pfalzstein“, „Ridderstein“. 1840 wurde der Trenndamm zum Kauber Werth angelegt. Das Kauber Wasser rechts war Fahrweg, der Arm links der Pfalz, der „Sandweg“, war felsig und darüber stark versandet, doch schaffte man Baumaterial für den Pfalzbau auf ihm herbei. Nach Bearbeitung spülte der Fluss Sand und Geröll hinweg, der Sandweg wurde Schiffahrtsrinne.

Doch zurück zum Bacharacher, dem „Heilesen-Werth“. An dessen Ostflanke erhob sich der vielsagende „Flossrisser“. Oberhalb drohten der „Frechstein“ sowie die „Wirbelley“ am rechten Ufer. Der „Altarstein“, auch „Elterstein“ oder „Elsenstein“, ist in einem Stich von MERIAN von 1646 dargestellt (Abb. 7).



Abbildung 7: Kupferstich „Bacharach“ von MERIAN 1646 mit dem „Elterstein“ im Vordergrund.
 Figure 7: Copperplate engraving „Bacharach“ by MERIAN 1646 with the „Elterstein“ in the foreground.

Womöglich ist dies der Stein, dessen Erscheinen über Wasser einen guten Weinjahrgang verhieß, in den man die Jahreszahl einmeißelte und der den Anlass gab, einen Ochsen zu braten.

4 Dank

Der Verfasser dankt Herrn Heinz Blaschke (†), vormals Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest, für viele nützliche Gespräche.

5 Literatur

- EHRENBERG, K.-H., KUPFAHL, H.-G. & KÜMMERLE, E. (1968): Geologische Karte von Hessen 1:25000 Bl. Nr. 5913 Presberg m. Erl. – 201 S.; Wiesbaden.
- GÖLZ, E. (1979): Geologische Untersuchung der Rheinsohle zwischen Oppenheim und Bingen (Strom-km 480,0–528,8). – 10 S.; Koblenz (Bundesanst. Gewässerkde.).
- GÖLZ, E. (1986): Das rezente Rheingeschiebe. Herkunft, Transport und Ablagerung. – Z. dt. geol. Ges., 137: 587–611; Hannover.
- GÖLZ, E. (1987): Untersuchung der Abfluss- und Geschiebeverhältnisse des Rheins; Schlussbericht Bundesmin. für Verkehr. – 111 S.; Bonn.

- GÖTTERT, R. (2005): Auen und Felsen im Mittelrhein. – Rheingau-Forum, **2/2005**: 8-16; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (1982): Beobachtungen zur Tektonik im Rheingau. – Geol. Jb. Hessen, **110**: 101-115; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1995): Vom „Altarstein“ zum „Zuckerhut“. – Heimatb. Rhg.-Ts.-Kreis, **46**: 97-99; Bad Schwalbach.
- KÜMMERLE, E. (2003): Geologische Kartierung unter Wasser. – Geol. Jb. Hessen, **131**: 5-10; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2005): „Auen, die den Fluss bespiegeln“. Der Inselrhein, geologisch betrachtet. – Rheingau-Forum, **2/2005**: 2-7; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2008): Geologie auf Schritt und Tritt am Rheinsteig im Rheingau und am Mittelrhein. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **130**: 105-115; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2017): Steinreiches Weltkulturerbe. Geologie für Mittelrhein-Freunde. – Jb. nass. Ver. Naturkde., Sonderbd. **4**: 115 S.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2021): Der Rhein – in seinem Bett besehen. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **142**: 161-164; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2022): Mit dem Rhein durchs Welterbe. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **143**: 157-179; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2022): Geologie der Rheinauen. – In: WINTER, W. (Hrsg.) (2023): Mainzer Schifffahrt 13 v. Chr. – 12-21; Heusenstamm (Winter Publishing Company).
- KÜMMERLE, E. (2023): Von der „Au“ zum „Werth“. Wie mit zwei Begriffen auch die Landschaft wechselt. – Rheingau-Forum, **2022/2023**: 17-20; Rüdesheim a. Rh.
- MEYER, W. & STETS, J. (1996): Das Rheintal zwischen Bingen und Bonn. – Slg. geol. Führer, **89**: XII u. 386 S.; Berlin/Stuttgart (Bornt.).
- MEYER, W. & STETS, J. (2000): Geologische Übersichtskarte und Profil des Mittelrheintales 1: 100 000. – 49 S., 1 Kt.; Mainz.
- MITTMAYER, H.-G. (1996): Geologie des Unterdevons im Südhunsrück sowie am Mittelrhein. – Jber. Mitt. Oberrhein. geol. Ver. N.F., **78**: 135-154; Stuttgart.
- SOMMERMANN, A.-E., ANDERLE, H.-J. & TODT, W. (1994): Das Alter des Quarzkeratophrys der Krausau bei Rüdesheim am Rhein. (Bl. 6013 Bingen, Rheinisches Schiefergebirge). – Geol. Jb. Hessen, **122**: 143-157; Wiesbaden.
- TOUSSAINT, B. (2016): Geologische Verhältnisse im Raum Lorch a. Rh. – In: Zwischen Mittelrhein und Taunus. Naturschätze in Lorch a. Rh. – Jb. nass. Ver Naturkde., **Sb. 3**: 31-47; Wiesbaden.
- WAGNER, W. (1933): Die Schollentektonik des nordwestlichen Rheinhessens. – Notizbl. Ver. Erdkde. Geol. L.-A. Darmstadt, **14**: 31-45; Darmstadt.
- WAGNER, W. & MICHELS, F. (1930): Geologische Karte von Hessen 1:25000 Bl. 6013 Bingen – Rüdesheim m. Erl. – 167 S.; Darmstadt.

DR. EBERHARD KÜMMERLE †

Manuskripteingang: 13. September 2024

Das Feldflurprojekt Wiesbaden-Ost – Artenhilfskonzept für bedrohte Tiere und Pflanzen

FRANK HEESER

Tiere, Pflanzen, Bedrohung, Artenhilfe, Feldflurprojekt, Wiesbaden-Ost

Kurzfassung: Die Agrarlandschaft östlich von Wiesbaden ist infolge Monokulturanbau sowie Applikation von Agrochemikalien und großer Düngergaben an Strukturelementen, Lebensraum für Tiere und Pflanzen und generell biologischer Vielfalt verarmt. Das hat zur Folge, dass in den letzten Jahrzehnten die Jagdstrecke von Feldhasen, Fasanen und Rebhühnern pro Revier erheblich zurückgegangen ist. Das veranlasste die organisierte Jägerschaft der Hegegemeinschaft Wiesbaden-Ost, im Jahr 2017 ein Artenhilfskonzept für bedrohte Tiere und Pflanzen vorzulegen und seit 2018 zusammen mit Projektpartnern unter Beteiligung der Landwirte umzusetzen. Im Beitrag werden die Ziele dieses innovativen Projektes, das ein inspirierendes Beispiel für erfolgreiche Naturschutzarbeit ist, die erforderlichen Maßnahmen, die auch ein Monitoring beinhalten, und die inzwischen nachweisbaren Erfolge thematisiert. Es ist gelungen, neue Lebensräume für Bodenbrüter wie z. B. Rebhühner, Feldhasen und Insekten zu schaffen.

The Wiesbaden-Ost field project – Species support concept for endangered animals and plants

Animals, plants, threat, species aid, field project, Wiesbaden-East

Abstract: The agricultural landscape in the east of Wiesbaden has been depleted of structural elements, habitats for animals and plants and biodiversity in general as a result of monoculture cultivation, the application of agrochemicals and large amounts of fertilizer. As a result, the number of hares, pheasants and partridges hunted per district has fallen considerably in recent decades. This prompted the organized hunters of the Wiesbaden-East hunting community to present a species aid concept for endangered animals and plants in 2017 and to implement it since 2018 together with project partners with the participation of farmers. The article discusses the objectives of this innovative project, which is an inspiring example of successful nature conservation work, the necessary measures, which also include monitoring, and the successes that can now be proven. The project has succeeded in creating new habitats for ground-nesting birds such as partridges, hares and insects.

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Zielsetzung	266
2	Projektregion	267
3	Projektziele	268
4	Maßnahmen	269
5	Zielartenmonitoring	273
6	Ausblick	275
7	Danksagung	275
8	Literatur	276

1 Problemstellung und Zielsetzung

Seit den 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts führte die Technisierung der Landwirtschaft zusammen mit dem Einsatz immer effizienterer Agrochemikalien zu deutlichen Produktivitätssteigerungen.

Die Nutzung dieser Produktivitätssteigerungsmöglichkeiten machte die Schaffung großer Anbauflächen notwendig, die durch das Flurbereinigungsgesetz von 1953 ermöglicht wurde.

Die Intensivierung moderner Landnutzungsmethoden mit Monokulturanbau auf immer größeren Flächen und unter Verwendung von Düngern und Agrochemikalien ist maßgeblich verantwortlich für die seit Mitte des 20. Jahrhunderts zu beobachtende rasante Verarmung der modernen Agrarlandschaft an Strukturelementen, Lebensräumen und biologischer Vielfalt. Dem dramatischen Rückgang der Ackerwildkrautflora folgte der Schwund an Tierarten, die auf Ackerhabitaten angewiesen sind. Die Veränderung der biologischen Vielfalt in der Hegegemeinschaft Wiesbaden-Ost (HGO) erschließt sich aus den Berichten der Jagdausbürgerberechtigten in den Revieren der HGO. Über einen Zeitraum von 40–50 Jahren sind die Jagdstrecken von Feldhasen, Fasanen und Rebhühnern von mehreren Hundert Tieren p. a. und pro Revier auf null oder einige wenige zurückgegangen.



Abbildung 1: Ausgeräumte Landschaft im östlichen Außenbereich von Wiesbaden; Foto: C. Deußer.

Figure 1: Cleared landscape in the eastern outskirts of Wiesbaden; photo: C. Deußer.

Indiz für den Rückgang der biologischen Vielfalt ist das völlige oder teilweise Verschwinden von zum Beispiel Feldlerchen, Rebhühnern, Feldhasen und Feldhamstern. Grund dafür ist der Wegfall der zum Überleben der Tiere notwendigen

gen Deckungs- und Äsungsflächen sowie der massive Rückgang von Insekten als Hauptnahrungsmittel für Wildhühner. Diese Entwicklung trifft auch die Landeshauptstadt Wiesbaden, wo insbesondere im östlichen Außenbereich der Ackerbau nach wie vor weite Teile der Gemarkung einnimmt (Abb. 1).

Mit der Strukturverarmung geht ein massiver Rückgang an Arten und Individuenzahlen der Feldarten einher (KUPRIAN et al. 2018). Dies veranlasste die organisierte Jägerschaft, sich des Themas anzunehmen und gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensräume für freilebende Tier- und Pflanzenarten durchzuführen, insbesondere durch die Anlage von geeigneten Blühstreifen bzw. Blühflächen als Schutzraum und Nahrungsquelle.

Den Ausgangspunkt bildete ein Niederwildprojekt, das ab 2013 durch die Landschaftspflegegruppe der Jagdgemeinschaft Delkenheim umgesetzt und durch das Umweltamt gefördert wurde. Aus einer im Jahr 2015 von der Hegegemeinschaft Wiesbaden Ost (HGO) ergriffenen Initiative entstand ein Gebiets-Lebensraum-Konzept, welches 2017 durch die HGO vorgelegt wurde und das wiederum in das seit 2018 durch die Projektpartner HGO und Umweltamt betriebene Feldflurprojekt Wiesbaden-Ost überging (Hegegemeinschaft Wiesbaden/Ost 2017). Dieses Projekt wird seitdem im Sonderprogramm „Förderung der Leitarten der Feldflur“ durch das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) finanziell gefördert.

2 Projektregion

Die Reviere der HGO umfassen insgesamt ca. 11.000 Hektar und damit den kompletten Osten der Wiesbadener Gemarkung (Abb. 2). Naturräumlich erstreckt sich das Gebiet von den Ufern von Rhein und Main (90 m ü. NN) über das Main-Taunusvorland und den Vortaunus bis hinauf zum Taunuskamm auf 540 m ü. NN. Neben ausgedehnten Waldflächen im Norden sowie Siedlungs- und Verkehrsflächen nehmen ca. 4.800 ha Offenlandfläche weite Teile der Reviere ein, wobei Ackerland deutlich dominiert und Grünlandnutzung vor allem in den südlichen Teilen nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt. Insbesondere die komplett waldfreien Reviere sind geprägt durch eine intensive ackerbauliche Nutzung auf Lößböden. Die verkehrsinfrastrukturelle Erschließung durch mehrere Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen sowie Bahntrassen und die Siedlungsflächen der östlichen Vorortbezirke Wiesbadens führen zu einer teilweise ausgeprägten Fragmentierung der Lebensräume, und weite Teile der Ackerlandschaft sind arm an Strukturelementen. Zusammenfassend zeigt sich eine sehr heterogene Struktur der Projektregion, die große Unterschiede hinsichtlich der natürlichen Lebensraumkapazität für Offenlandarten wie den Feldhasen oder das Rebhuhn bietet. Dies ist auch bei der Bewertung von Angaben zu mittleren Besatzdichten zu berücksichtigen.

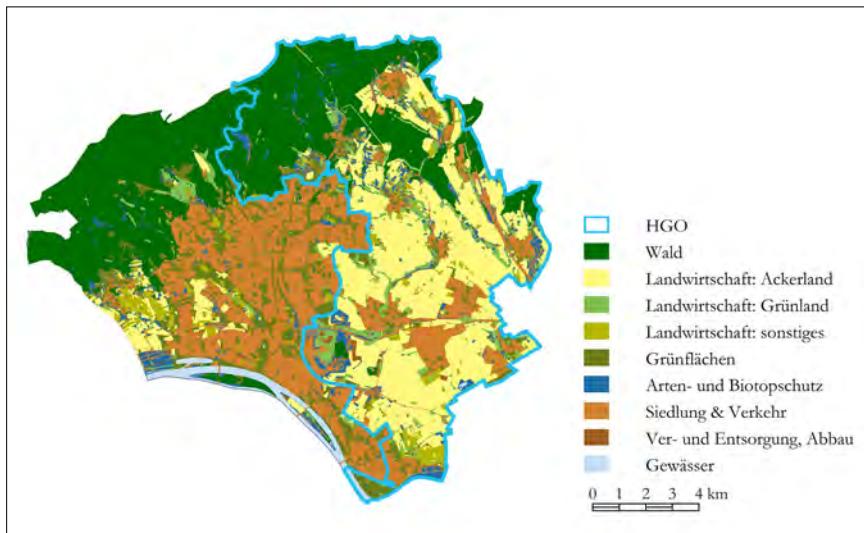


Abbildung 2: Hegegemeinschaft Wiesbaden/Ost (HGO): Fläche und Realnutzung (Realnutzungskartierung des Umweltamtes Wiesbaden, 2006).

Figure 2: Hegegemeinschaft Wiesbaden/Ost (HGO): Area and real use (real use mapping by the Wiesbaden Environmental Agency, 2006).

3 Projektziele

Die Zielarten des Feldflurprojektes sind insbesondere Rebhuhn und Feldhase sowie darüber hinaus verschiedene Vogelarten wie Feldlerche, Neuntöter und Grauammer. Die ergriffenen Maßnahmen dienen vor allem der Stabilisierung und Stärkung der Bestände dieser Arten, sollen allerdings auch positive Effekte auf die Lebensraumsituation weiterer Tierarten wie beispielsweise verschiedener Insekten haben (KUPRIAN et al. 2018).

Die neu geschaffenen Blühflächen, mit einer Blühzeit von etwa April bis in den Oktober hinein, bieten den Zielarten Nahrung und Deckung. Sie dienen vielen Insekten über einen längeren Zeitraum als Nahrungsquelle, die selbst als zusätzliches Nahrungsangebot für andere Tierarten, wie zum Beispiel Schwalben, zur Verfügung stehen. Von besonderer Bedeutung ist das Vorhandensein von Insekten während der ersten 14 Tage nach dem Schlüpfen von Rebhuhn- und Feldlerchenküken als Hauptnahrungsquelle.

4 Maßnahmen

Die im Rahmen des Projektes umgesetzten Maßnahmen dienen der Verbesserung von Lebensräumen und des Nahrungsangebotes für die Zielarten. In erster Linie werden hierzu auf Äckern Blühflächen angelegt. Landwirte, die diese Flächen zur Verfügung stellen und anlegen, erhalten aus dem Projekt das nötige Saatgut gestellt. Darüber hinaus erfolgt eine Vergütung der resultierenden Bearbeitungskosten sowie des Verdienstausfalls. Seit 2021 konnten viele Blühflächen in das Hessische Programm für Agrarumwelt- und Landschaftspflege-Maßnahmen (HALM), konkret in das Verfahren H.2 (Arten- und Biotopschutz im Offenland) überführt werden. Neben den durch Landwirte eingebrachten Flächen stellen auch Mitglieder der HGO einen nicht unwesentlichen Teil der Flächen zur Verfügung. Sie erhalten jedoch hierfür keine Vergütung, sondern ihnen wird lediglich das benötigte Saatgut gestellt.

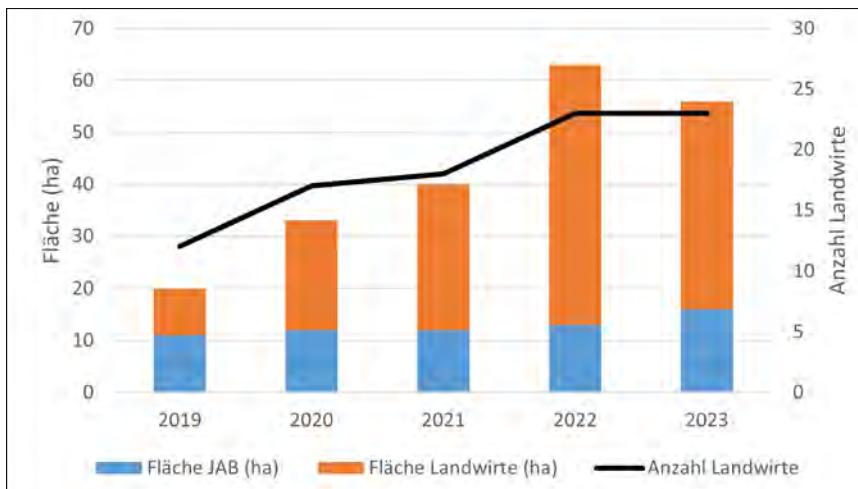


Abbildung 3: Feldflurprojekt Wiesbaden-Ost: Größe der Projektflächen (ha) und Anzahl der teilnehmenden Landwirte.

Figure 3: Wiesbaden-Ost field project: size of project areas (ha) and number of participating farmers.

Die Flächenakquise im Feldflurprojekt geschieht durch die HGO und folgt der Zielsetzung, eine möglichst effektive Flächenvernetzung zu erreichen, um neben der Stärkung der existierenden Bestände eine weitere Ausbreitung bedrohter Arten in der Projektregion zu ermöglichen. Dies wiederum setzt die Kenntnis der lokalen Verbreitung der Arten sowie eine vertrauensvolle Kooperation zwischen Landwirtschaft und HGO voraus. 12 Landwirte beteiligten sich in der Startphase des Projektes. Bis 2022 konnte eine Reihe weiterer Landwirte zur Mitarbeit ge-

wonnen werden, was die Zahl der beteiligten Betriebe auf 22 und die Gesamtgröße der Blühflächen auf 62 ha steigen ließ. Der Anteil der durch Landwirte zur Verfügung gestellten Flächen beträgt inzwischen 74 % (Abb. 3).

Die Größe der einzelnen Flächen soll idealerweise ausreichen, um neben der Funktion als Nahrungsquelle auch den Habitatansprüchen des Rebhuhns an einen Brutraum zu genügen. Insbesondere sehr kleine oder sehr schmale Flächen bieten kaum Schutz vor Prädatoren. Aus diesem Grund bemüht sich das Projekt darum, Flächen von ausreichender Größe und mit einer Breite von möglichst mindestens 30 Metern zu akquirieren. In der Tat konnte auch die Größe der Blühflächen in den letzten Jahren deutlich gesteigert werden: Im Jahr 2019 waren die damaligen 82 Projektflächen im Durchschnitt 0,24 ha groß, im Jahr 2022 kamen die 90 Flächen auf eine durchschnittliche Größe von 0,69 ha.



Abbildung 4: Blühfläche im Winter; Foto: C. Deußer.

Figure 4: Flowering area in winter; photo: C. Deußer.

Nachdem anfangs ein Teil der Flächen als einjährige Einsaaten angelegt wurde, sind inzwischen alle Projektflächen mehrjährig. Zur Einsaat kommen Mischungen wie die Göttinger Mischung oder Lebensraum 1. Angereichert werden diese Mischungen, soweit möglich, mit weiteren Arten wie Luzerne und Markstammkohl. Beide Pflanzen haben sich in den vergangenen Jahren im Projekt bewährt, weil sie einerseits dem Niederwild sehr gute Brutdeckung bieten und andererseits auch bei trockeneren Bedingungen gedeihen. Diese positiven Eigenschaften werden auf einer Reihe von Flächen in der Form genutzt, dass dort mittig auf der Blühfläche ein etwa fünf Meter breiter Luzernestreifen angelegt wird. Die Mehr-

jährigkeit der Flächen hat zudem den für den Schutz des Niederwildes notwendigen Effekt, dass sie auch im Winter für Nahrung und Deckung sorgen (Abb. 4).



Abbildung 5: Tagpfauenauge, Erdhummel, Steinhummel, Hainschwebfliege auf nickender Distel; Foto: C. Deußer.

Figure 5: Peacock butterfly, earth bumblebee, stone bumblebee, grove hoverfly on nodding thistle; photo: C. Deußer.

Neben den reinen Blühflächen finden auch Nacherntestreifen mit Sommerweizen, Teilstücken mit Schwarzbrache sowie Lerchenfenster Anwendung (Abb. 5). Um ein stabileres Auflaufen der Saat unter Ausnutzung der Feuchtigkeit des Frühjahrs zu fördern, wird in Teilen verstärkt auf eine Herbsteinsaat übergegangen. Diese hat auch den Vorteil, bereits zu Beginn der Brutzeit im Mai eine gute Brutdeckung zu ermöglichen. Da die außerhalb der Projektflächen weitgehend ausgeräumte Agrarlandschaft nur sehr wenig Nahrungsangebot bereithält und auch die angelegten Flächen im Jahresverlauf dies nicht jederzeit ausgleichen können, erfolgt zur Stabilisierung der vorhandenen Besätze punktuell eine ergänzende Zufütterung mittels Futtereimern (Landesjagdverband Hessen 2021). Diese werden von den in den Revieren lebenden Rehbühnern rege genutzt (Abb. 6).

Um die Überlebenschancen der Zielarten und anderer Bodenbrüter zu verbessern, erfolgt zusätzlich zu den lebensraumverbessernden Maßnahmen eine Verringerung des Prädationsdrucks durch Bejagung von Prädatoren (GOTTSCHALK & BEEKE 2014). Hier sind neben Fuchs und Dachs auch Rabenkrähen und Elstern zu nennen. Darüber hinaus wird auch der steigende Zahl an Waschbären mit gezielter Bejagung begegnet. Ihre wachsende Bedeutung lässt sich auch an der Entwicklung der Waschbären-Jagdstrecke ablesen: Diese wuchs von 28 (Jagdjahr 2017/18) auf 98 (Jagdjahr 2022/23) und hat sich damit mehr als verdreifacht.



Abbildung 6: Rebhühner; Foto: J. Brennberger.

Figure 6: Partridges; photo: J. Brennberger.



Abbildung 7: Hinweisschild; Foto: C. Deußer.

Figure 7: Information sign; photo: C. Deußer.

Als erfolgreich hat sich die biotopbezogene Kombination aus den Maßnahmen Biotopverbesserung (Äsungs- und Deckungsflächen), konsequente Reduzierung von Prädatoren sowie temporäre Zufütterungen erwiesen, die einen deutlichen Zuwachs in der Population der Zielarten ermöglicht hat.

Um die Akzeptanz für die durchgeführten Maßnahmen zu erhöhen, werden insbesondere auf Flächen an Wegen mit hoher Passantenfrequenz Hinweisschilder aufgestellt (Abb. 7). Diese dienen der Information über den Zweck der angelegten Flächen. Zudem sollen sie gezielt Hundebesitzer sensibilisieren, ihre Hunde nicht frei laufen zu lassen, da diese eine vermeidbare erhebliche Bedrohung für Feldarten darstellen.

5 Zielartenmonitoring

Seit dem Frühjahr 2019 werden die Rebhuhn-Besätze im Bereich der HGO zweimal im Jahr durch die Jäger dokumentiert. Im Frühjahr wird die Revierpaardichte durch die Verhörmethode ermittelt. Mit einer Klangattrappe wird Ende Februar/ Anfang März der Ruf des Rebhahns simuliert. Eine halbe Stunde nach Sonnenuntergang verlassen die Hühner ihre Deckung und stehen zuverlässig auf den Ruf zu. Damit lässt sich sehr genau die Anzahl der Revierpaare bestimmen. Der Herbstbesatz wird durch Zählung der vorhandenen Ketten (i. e. Altvögel und Jungtiere) festgestellt.

Seit Beginn der Zählungen kam es sowohl hinsichtlich der Anzahl an Ketten als auch der Gesamtzahl an Individuen zu deutlichen Steigerungen. Die Anzahl der Ketten stieg um 81 % von 26 auf 47, die Rebhuhnanzahl lag 2022 sogar um mehr als das Doppelte über dem Wert von 2019 (Tab. 1). Obwohl es zwischen den Erfassungsjahren mitunter erhebliche klimatische Unterschiede gab, hat auch dies bislang nicht zu zwischenzeitlichen Rückgängen der Besätze geführt. Die Besatzdichte lag 2022 bei 7,7 Rebhühnern je 100 ha Offenland. Die sommerliche Stärke der Ketten variiert stark. 2022 konnten sowohl schwache Ketten mit vier bis fünf Rebhühnern beobachtet werden als auch einzelne starke Ketten mit bis zu 18 Rebhühnern. Einzelne Revierpaare hatten keinen Nachwuchs. Die Frühjahrszählung 2023 ergab insgesamt 69 Revierpaare, was auf eine Fortsetzung des positiven Trends hindeutet.

Tabelle 1: Feldflurprojekt Wiesbaden-Ost: Rebhuhn-Monitoring Herbstzählung

Table 1: Wiesbaden-Ost field project: Partridge monitoring fall census

Jahr	Anzahl Ketten	Gesamtzahl Rebhühner	Rebhühner je 100 ha
2019	26	182	3,8
2020	31	224	4,7
2021	46	326	6,8
2022	47	370	7,7
2023	58	459	9,9

Auch für eine zweite Zielart, den Feldhasen, liegen Monitoringdaten einer mehrjährigen Zeitreihe vor. Der Besatz wird von der HGO jeweils zweimal im Frühjahr und Herbst mittels Scheinwerfertaxation gezählt. Seit 2016 wird in der HGO zweimal pro Jahr mit je zwei Zählungen eine definierte Fläche in den beteiligten Revieren taxiert. Auf immer gleichen Fahrtrouten wird in den Revieren eine festgelegte Strecke abgefahren und mit gleichen Scheinwerfern werden die an der Strecke liegenden Felder (Taxationsflächen) abgeleuchtet. Die dabei im Scheinwerferlicht gesichteten Hasen werden erfasst und durch den Sachkundigen der HGO für die Taxationsreviere zusammengetragen. Durch diese Zählungen konnte fast eine Verdreifachung des Besatzes seit 2018 bestätigt werden. Die mittlere Populationsdichte, die 2018 noch 12,5 Hasen pro 100 ha Taxationsfläche betrug, lag im Herbst 2023 bei 42,2. Damit liegt der Durchschnittsbesatz in der doch sehr heterogen strukturierten Projektkulisse der HGO deutlich über dem deutschlandweiten Vergleichswert von 15 Hasen pro 100 ha Taxationsfläche (im Jahr 2020).

Für weitere Arten, für die kein regelmäßiges und systematisches Monitoring stattfindet, werden Sichtungen durch Mitglieder der HGO gemeldet, die regelmäßig in ihren jeweiligen Revieren präsent sind und über eine gute Artenkenntnis verfügen. Im Jahr 2021 erfolgte zudem in 13 Revieren eine Aufnahme dort vorhandener Vogelarten. Auch wenn hierzu keine quantitativen Erhebungen vorliegen, so scheinen sich doch auch weitere Arten im Projektgebiet positiv zu entwickeln. Zu nennen wären hier etwa Schafstelze, Wiedehopf, Rohrammer, Goldammer, Dorngrasmücke und Uhu. Eine deutliche Zunahme war insbesondere bei der Feldlerche durch Sichtungen in den Revieren festzustellen.

6 Ausblick

Die Erfahrungen im Feldflurprojekt Wiesbaden-Ost zeigen, dass die Anstrengungen zur Förderung von Feldarten bereits binnen relativ kurzer Zeit deutliche Erfolge erzielen können. In den Beständen einiger Zielarten konnten erhebliche Zuwächse festgestellt werden. Da die Ausgangslage vor allem beim Rebhuhn sehr schlecht war, bleibt eine weitere Stärkung der Bestände und insbesondere auch deren Wiederausbreitung im Projektgebiet eines der prioritären Ziele für die nächsten Jahre. Hierzu wird es nötig sein, weitere Flächen hinzuzugewinnen, um eine dichtere und vollständigere Vernetzung aller für die Art potenziell geeigneten Teilräume zu erreichen. Bislang gibt es leider noch einige größere Lücken, die es perspektivisch zu schließen gilt (HILGENDORF 2019). Gelingen kann dies nur in enger Kooperation zwischen den Projektbeteiligten in der Jägerschaft und der Verwaltung sowie den örtlichen Landwirten. Dabei schränken der wachsende Nutzungsdruck auf die Flächen im Ballungsraum Rhein-Main sowie Unsicherheiten aufgrund sich ändernder Rahmenbedingungen die Möglichkeiten und die Bereitschaft der Landwirte zur Bereitstellung von Flächen ein. Gerade vor diesem Hintergrund ist die seit Jahren gewachsene Kooperation und das Vertrauensverhältnis aller Beteiligten eine wichtige Voraussetzung, um weitere Verbesserungen zu erreichen. Hierbei sind ausdrücklich auch das Regierungspräsidium Darmstadt und das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zu nennen, deren Unterstützung für das Feldflurprojekt essentiell ist.

Als eines von insgesamt neun im Sonderprogramm „Förderung von Leitarten der Feldflur“ geförderten Feldflurprojekten profitiert das vorgestellte Projekt nicht nur finanziell, sondern auch über den Austausch mit anderen Akteuren und Regionen (HMUKLV 2022). Deren Erfahrungen können ebenso wie die eigenen dazu genutzt werden, Möglichkeiten zur Ausweitung der Projektkulisse zu erreichen und die einzelnen Maßnahmen weiter zu verbessern. Als konkrete Weiterentwicklungen werden aktuell die verstärkte Einbindung von Schwarzbrachen in die Blühflächen sowie Gespräche mit weiteren, bislang noch nicht beteiligten Flächeneignern und Betrieben angegangen.

7 Danksagung

Im Namen der Hegegemeinschaft Wiesbaden – Ost wird der Bürgergemeinschaft Unser Land! Rheingau und Taunus und besonders Herrn Dr. Wolfgang Ehmke für die Verleihung des Wolfgang-Ehmke-Preises 2023 in Höhe von 2.000 Euro an Claus Deußer und Frank Heeser und die damit verbundene Würdigung des Feldflurprojektes im Wiesbadener Osten gedankt.

Unser Dank gilt auch Herrn Thomas Christ vom Umweltamt der Landeshauptstadt Wiesbaden für die Projektunterstützung und den Beitrag zu dieser Abhandlung, Herrn Claus Deußer für die unermüdliche Arbeit für das Feldflurprojekt und der Unterstützung zu diesem Artikel sowie Herrn Prof. Dr. Benedikt Tous-saint als Schriftleiter des Nassauischen Vereins für Naturkunde für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die wertvollen Hinweise.

8 Literatur

- ALBERT, M. & REINERS, T. E. (2016): Machbarkeitsstudie zur Wiederansiedlung des Feldhamsters (*Cricetus cricetus*) in Wiesbaden; unveröff. – 58 S.; Wiesbaden.
- DEUSSER, C. & CHRIST, TH. (2023): Kooperation zugunsten von Rebhuhn und Co.: das Feldflurprojekt Wiesbaden-Ost. – Jahrbuch Naturschutz in Hessen, **22**: 111-114; Kassel (Nordhessische Gesellschaft für Naturkunde und Naturwissenschaften e. V.).
- GOTTSCHALK, E. & BEEKE, W. (2014): Wie ist der drastische Rückgang des Rebhuhns (*Perdix perdix*) aufzuhalten? Erfahrungen aus zehn Jahren mit dem Rebhuhnschutzprojekt im Landkreis Göttingen. – Berichte zum Vogelschutz, **51**: 95-116.
- Hegegemeinschaft Wiesbaden/Ost (Hrsg.) (2017): Gebiets-Lebensraum-Konzept. – 56 S.; Wiesbaden (Selbstverlag).
- HILGENDORF, B. (2019): Umsetzung der Hessischen Biodiversitätsstrategie. Feldflurprojekte in Hessen. Sonderprogramm „Förderung der Leitarten der Feldflur“. Projekt 2 „Wiesbaden-Ost“. Durchführungsbericht 2019. – 24 S.; Eppstein (Selbstverlag).
- HMUKLV (Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (Hrsg.) (2022): Sonderbericht: Landwirtschaft & Naturschutz, Biodiversitätsmaßnahmen im Offenland. Hessischer Biodiversitätsbericht 2021. – 76 S.; Wiesbaden HMUKLV).
- KUPRIAN, M., KERN, F., HORMANN, M., SELZER, D., BARZ, J. & WINKEL, S. (2018): Feldflurprojekte in Hessen – Ein neuer Ansatz zum Schutz von Feldhamster, Rebhuhn, Frauenspiegel & Co. – Z. Vogelk. Natursch. Hessen. Vogel und Umwelt, **23**: 27-42; Wiesbaden (HMUKLV).
- KUPRIAN, M., STÜHLINGER, P. & DÖRICH, R. (2018): Feldflurprojekte für bedrohte Acker-Arten in Hessen; Konzeptpapier; Wiesbaden (HMUKLV).
- Landesjagdverband Hessen (2021): Gemeinsam für mehr Artenvielfalt im Offenland. Praxis-Leitfaden Rebhuhnhege des Landesjagdverbandes Hessen; Broschüre. – 63 S.; Bad Nauheim (Selbstverlag).

Jahrbücher des NVN, Bd. 145 (2024)

Jb. nass. Ver. Naturkde., 145: 279 S., 103 Abb., 3 Tab.; Wiesbaden 2024

ISSN 0368-1254, Softcover, 15 x 12 cm, Ladenpreis 12,00 €



Band 145 des 279 Seiten umfassenden Jahrbuchs des Nassauischen Vereins für Naturkunde enthält neun Fachbeiträge mit einem breiten Themenspektrum.

Im ersten Beitrag berichten die Professoren W. Gnatzy und J. Tautz über die inzwischen stark gefährdeten Insekten, die anhand interessanter Beispiele als Erfolgsmodelle der Evolution dargestellt werden. Im zweiten Beitrag informiert die Diplombiologin S. Steib über die jetzt auch in Hessen nachgewiesene Wildkatze, die begünstigt durch Schutzmaßnahmen sich u. a. im Taunus ausbreitet. Der dritte Aufsatz von Prof. W. Rosendahl und seiner Kollegin Dr. D. Döppes ist der im nördlichen Teil des Oberrheingrabens gefundenen Großsäugerfauna des Jungpleistozäns gewidmet. Ausgewählte Funde mit ¹⁴C-Datierung werden vorgestellt.

Im vierten Beitrag begründen die Geologen Prof. H. Flick und Dr. H.-D. Nesbø, warum in Hessen im Lahn-Dill-Gebiet und im Kellerwald als Teile des Rheinischen Schiefergebirges entgegen bisherigen Vorstellungen zur Entwicklung der variszischen Orogenese auch ein alpinotypischer Deckenbau anzunehmen ist. Dabei handelt es sich um drei Deckensysteme unterschiedlicher Herkunft und Über-

schiebungsweite. Im folgenden fünften Beitrag stellen Dr. S. Schmidt und Dr. B. Homuth Georisiken wie Erdbeben oder Hangrutsche vor, die durch den Geologischen Landesdienst des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) erfasst und bewertet werden. Im letzten Aufsatz des zweiten Themenblocks stellt der Mineralogieprofessor H. E. Frimmel die Bedeutung des südlichen Afrikas als bedeutender mineralischer Rohstofflieferant für die EU und somit auch für Deutschland vor. Es wird nicht nur die geologische Entstehung der wichtigsten Lagerstätten und ausgewählte Mineralien beschrieben, sondern auch deutlich gemacht, dass geopolitisch begründet die Abhängigkeit von einem BRICS-Staat wie Südafrika nicht unproblematisch ist.

Im siebten Beitrag, der den letzten thematisch sehr breiten Themenblock einleitet, plädiert Prof. Chr. Antweiler für die Abgrenzung der letzten 150 Jahre des knapp 12.000 Jahre umfassenden Holozäns, der jüngsten Erdepoche, unter der Bezeichnung ‚Anthropozän‘. Die große Mehrheit der Geologen lehnt es ab, dass das Anthropozän in die Internationale Stratigraphische Tabelle aufgenommen wird. Der achte Beitrag befasst sich mit der Speläologie im Breitscheider Karstgebiet. I. Dorsten und seine beiden Co-Autoren legen den Focus auf die Erforschung des riesigen Herbstlabyrinth-Adventhöhlen-Systems im hessischen Teil des Westerwaldes und berichten von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen wie u. a. Lebensräume in den Höhlen und paläontologischen Funden. Der letzte und neunte Fachbeitrag hat die Sonne als unseren Heimatstern zum Gegenstand. Die beiden Astrophysiker L.-M. Zessner und P. Ondratschek vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung Göttingen erläutern an einigen Beispielen, wie die Sonne vermessen wird und die gewonnenen Daten zu verstehen sind.

Auf diese Fachbeiträge folgt der letzte Rechenschaftsbericht des damaligen Vereinsvorsitzenden Dr. Helmut Arnold, der im März 2024 nach elf Jahren nicht mehr kandidierte, für das Jahr 2023.

In der Rubrik „Neue Publikationen“ wird der im Jahr 2024 erschienene Band 145 des Jahrbuchs des Nassauischen Vereins für Naturkunde vorgestellt.

Der Band endet mit den Rezensionen von sieben Fachbüchern.

Wer mehr über die genannten Beiträge und auch über die Beiträge in früheren Bänden des Jahrbuchs erfahren möchte, kann sich diese auf der Homepage des Nassauischen Vereins für Naturkunde (www.naturkunde-online.de) 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 2008 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.

Bericht über den Nassauischen Verein für Naturkunde (NVN) im Jahr 2024

TILLI CHARLOTTE REINHARDT

Auch 2024 hat der Nassauische Verein für Naturkunde e.V. (NVN) mit Vorträgen, Exkursionen und Publikationen, bei leicht sinkender Mitgliederzahl, in Wiesbaden und Region für die Mitglieder und naturkundlich Interessierte seine Rolle ausgefüllt.

Dr. Helmut Arnold beendete im März nach 12 Jahren seine Arbeit als Vorsitzender. Durch seine gute Vorbereitung und die weiterhin vertrauensvolle Zusammenarbeit, aber auch durch den engagierten Einstieg von Anette Schmidt als Schatzmeisterin ist der Wechsel gut gelungen.

1 Mitglieder

Im Jahr 2024 sind leider verstorben: Frau Jutta von Dziegielewski, Herr Peter Werner, Herr Hans Bergmann, Herr Dr. Harald Schütz und Herr Klaus Bolte; bereits 2023 Frau Margot Arenz, Frau Ursula Schäfer und Herr Uwe Dörmann.

Viele neue Mitglieder konnten erfreulicherweise begrüßt werden: Frau Klara Beißwenger, Herr Dr. Josef Eberhardt, Herr Nikita Filippov, Herr Gerd Hardt, Herr Jan Reinhardt, Herr Georg Rick, Frau Anette Schmidt, Herr Roland Schmidt, Herr Volker Schmidt, Frau Dagmar Tangermann und Herr Thomas Volk.

Im Jahr 2024 sank die Mitgliederzahl dennoch – auch bedingt durch einige Kündigungen – von 255 auf 250.

2 Vorstand und Beirat

Vorstand: Dr. H. Arnold (1. Vs. bis 21.3.24), Dr. W. Ehmke (2. Vs.), S. Neugebauer (Presse), Dr. T. Reinhardt (Schatzmeisterin bis 21.3.24, 1. Vs. ab 21.3.24), A. Schmidt (Schatzmeisterin ab 21.3.24), Prof. Dr. B. Toussaint (Schriftleitung) und H.-J. Freiling (Schriftführung; reduziert).

Beirat: R. Göbel (ab 21.3.24), F. Geller-Grimm, Dr. D. Heidelberger, S. Kridlo, Dr. E. Mietzsch, Dr. G. Radtke, Dr. M. Weidenfeller und R. Wandke.

Es fanden sechs Vorstandssitzungen statt, davon drei zusammen mit dem Beirat.

3 Publikationen

Die naturkundlichen Informationen des NVN werden mit den Jahrbüchern, den Mitteilungen, Homepage-Einträgen, vereinsinternen Rundschreiben sowie Pressemitteilungen publiziert. 2024 erschienen die Mitteilungen 76, das Jahrbuch 145 und als Faltblätter das Sommerprogramm 2024 und das Winterprogramm 2024/2025.

Im Jahrbuch 2024, Band 145, hat Prof. Dr. Toussaint neun interessante Beiträge versammelt, die u. a. auch Themen von Vorträgen und Exkursionen vertiefen. Hinzu kommen sechs wertvolle Rezensionen zu Neuerscheinungen durch den Schriftleiter.

Das Jahrbuch steht via ZoBoDat einem internationalen Interessentenkreis zur Verfügung. Weiterhin besteht ein internationaler Schriftentausch mit uns nahestehenden Institutionen, der u. a. von der Hochschul- und Landesbibliothek RheinMain (HSLB-RM) für uns organisiert wird.

Die Mitteilungen 76 informierten in Text und Bild über verschiedenste Vereinsaktivitäten des Jahres 2024, aber auch allgemeine Informationen über Natur-, Umwelt- und Klimaschutz.

Alle Druckwerke stehen auf unserer Homepage www.naturkunde-online.de zur Verfügung.

4 Finanzen

Die aktuelle Finanzsituation war aufgrund der Rücklagen 2024 noch entspannt. Mit den verfügbaren Mitteln finanzierten wir Jahrbuch, Mitteilungen, Referenten, Flyer sowie den Umweltpreis. Weiterhin unterstützen wir die Bienenhaltung auf dem Museumsdach. Druckkosten und Porto sind die größten Ausgabeposten.

Ein Plus für 2024 kommt allerdings nur dadurch zustande, weil die Rechnung für das Jahrbuch 2024 erst 2025 einginge.

Die Kasse wurde von den Revisoren Hr. Löhner und Hr. Heinz geprüft; es wurde eine korrekte Kassenführung bestätigt.

Wir bedanken uns für alle Mitgliedsbeiträge, Spenden, Barspenden bei Vorträgen und Exkursionen und weitere Einzelspenden.

5 Veranstaltungen

2024 konnten sieben von acht geplanten **Exkursionen** durchgeführt werden:

- 07.04. Peter Siersleben, NABU
Vogelkundliche Wanderung von Frauenstein nach Martinsthal
- 27.04. Dr. Gudrun Radtke, NVN
Geologie im Dyckerhoff-Steinbruch in Wiesbaden
- 04.05. Annette Zitzmann, AGAR
Herpetofauna der Lahnhänge im NSG "Wehrley von Runkel"
- 11.05. Bernhard Hilgendorf, Eppstein
Die Zusammensetzung von Grünland und Streuobst am südlichen Breckenheimer Hang in Abhängigkeit von Nutzungsentwicklung und Standort
- 08.06. Hans-Jürgen Dechent, Alexander Streb, Bastian Grimm, RNG
Die Wiesen am Hirtenborn bei Oberdiebach – mit der RNG
- 27.07. Bernhard Hilgendorf, Eppstein
Der Einfluss früherer Flurbereinigungen auf die heutige Landschaft, die früheren und heutigen Nutzungen sowie die aktuelle Vegetation am Beispiel Riedelbach
- 07.08. Dr. Georg Mittelbach, HLNUG
Thermalquellenführung Wiesbaden

2024 fanden von 11 geplanten neun **Vorträge** statt:

- 09.01. Dr. Birgit Scheps-Bretschneider, Leipzig
Die Heimkehr der Ahnen – Geschichten von Restitution und Repatriierung
- 12.03. Inge Boesken Kanold, Frankreich und Susanne Kridlo, Museum Wiesbaden
Purpur: Geschichte und Neuentdeckung
- 09.04. Dr. Gabriele Franke, Frankfurt
Geschichten aus der Steinzeit. Felsbildforschung in Namibia
- 14.05. Prof. Dr. Hartwig Frimmel, Würzburg
Die Big Five unter den Minerallagerstätten im südlichen Afrika
- 11.06. Carola Krebs, Leipzig
Die Vielfalt Indigener Kulturen in Südostasien
- 09.07. Prof. Dr. Michael Bollig, Köln
Von Elefanten, Menschen und Naturschutz im Norden Namibias
- 10.09. Dr. Gertrud Boden, Frankfurt
„We are happy to see these things“ – Khwe aus Namibia und das Archiv des Afrikanisten Oswin Köhler

- 12.11. Dr. Eric Walliser, Wiesbaden
Früher war das Wetter besser – Fossilien als Klimaarchive
- 10.12. Dr. Stephan Getzin, Göttingen
Die Feenkreise – Überlebensstrategien von Pflanzen in der Namib Wüste

Alle Vorträge fanden großes Interesse und nicht selten folgten lebhafte Diskussionen.

Wiederum gut besucht waren die von Hr. Wandke und Fr. Stroothenke veranstalteten naturpädagogischen Workshops **“Natur unter die Lupe genommen”** für Kinder von 8–12 Jahren. Bis Sommer 2024 fanden drei Kurse statt. Seit Sommer 2024 wird die Reihe mit dem Titel **“Natur unter die Lupe”** durch die Abteilung Bildung und Vermittlung des Museum Wiesbaden organisiert, weiterhin unter Beteiligung der bisherigen Veranstalter.

Der **Naturkundetag** 2024 in Breitscheid mit 25 Teilnehmerinnen und Teilnehmern hatte **“Oberirdische Karstformen und Höhlen im Westerwald”** zum Thema, welches vom Vorsitzenden der Speläologischen Arbeitsgemeinschaft Hessen und Vereinsmitglied Ingo Dorsten packend vermittelt wurde. Ingo Dorsten führte die Gruppe zudem in die bekannte Höhle **“Herbstlabyrinth”** (siehe auch Dorsten u. a., Jahrbuch 2024, S. 201–231).

Das **Vereinstreffen** 2024 fand am Jagdschloss Platte statt mit einer Waldführung von Dr. Wolfgang Ehmke und anschließender Einkehr.

Im Juni 2024 gab es wieder Pflegemaßnahmen am Koch-Denkmal (Reinigung und Rückschnitt des Aufwuchs).

Zum zweiten Mal beteiligte sich der NVN mit 1.500 € an der Verleihung des Wiesbadener Umweltpreises. Preisträger des NVN war der Verein SoLaWie e. V.

Bei einem **Treffen mit der RNG** im Nov. 2024 führte Dr. Lerp durch die Afrika-Ausstellung; anschl. erfolgte ein Austausch mit Vorstand und Beirat.

Am 30.11. beteiligten sich Dr. Reinhardt und Hr. Wandke an der RNG-Pflegeaktion am Geotop **“Zeilstück”** in der Weinheimer Bucht am Küstenweg Rheinhessen.

Einen NVN-Stand betreute Hr. Wandke über ein ganzes Wochenende auf der Mineralien- und Fossilienbörse in Ober-Olm.

Der vertrauensvolle Austausch mit dem Museum Wiesbaden und den Freunden des Museums wurde fortgesetzt.

6 Öffentlichkeitsarbeit

Wir informierten Mitglieder und interessierte **Öffentlichkeit** über unsere verschiedenen Veranstaltungen mit Programmflyern und Pressemitteilungen, Rund-mails und die Homepage. Für Presse-Informationen über unsere Exkursionen war Frau Neugebauer verantwortlich. Über unsere Vortagsveranstaltungen informierte Frau Kridlo.

Frau Dr. Mietzsch stelle die Pflege und ständige Aktualisierung unserer Homepage www.naturkunde-online.de sicher.

Mein besonderer Dank als Vorsitzende gilt den vielen Menschen in und außerhalb des Vereins, die durch ihren engagierten Einsatz die Aktivitäten des Nassauischen Vereins für Naturkunde 2024 mitgestalteten und unterstützten.

August 2025

Dr. Tilli Charlotte Reinhardt, 1. Vorsitzende

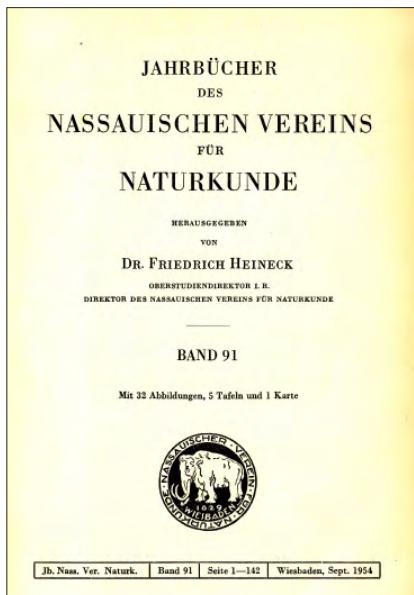
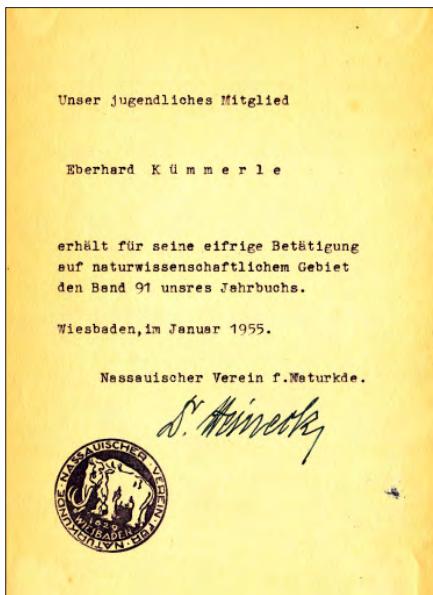
Dr. Eberhard Kümmerle 1935–2025



Am 18. Juni gratulierten wir noch herzlichst zu seinem 90. Geburtstag – am 10. August 2025 ist Dr. Eberhard Kümmerle (Abb. 1) nach kurzer schwerer Krankheit verstorben. Der Nassauische Verein für Naturkunde (NVN) trauert um sein langjährigstes Mitglied (71 Jahre) und Ehrenmitglied (2014).

Sein reiches Wissenschaftlerleben zeichnete sich besonders durch eine lange, enge Verbindung mit dem Nassauischen Verein für Naturkunde aus.

Eberhard, geboren 1935 in Mainz, besuchte Schulen in Martinsthal, Eltville und Geisenheim; studierte Geologie vor allem in Mainz, auch Tübingen und Pisa. Er war anschließend 34 Jahre (1963–1997) im Geologischen Landesdienst Hessens am Hessischen Landesamt für Bodenforschung (HLfB, jetzt HLNUG). 1965 heiratete er seine große Liebe Hiltrud, Realschullehrerin. Seine Söhne wurden 1966 und 1972 (Zwillinge) geboren.



Mitglied des NVN wurde Eberhard noch als Gymnasiast am 1. April 1954. Der Weg dorthin war ihm nicht zu weit: er nahm den Bus aus Eltville, um die interes-

santen naturkundlichen Vorträge anzuhören, damals noch im Untergeschoss des Museums inmitten der Sammlungen. Vortragende waren Dr. Friedrich Heineck, 1924–1960 Direktor des NVN, der Zoologe Dr. Fritz Neubaur, Direktor des Naturhistorischen Museums, der Geologe Prof. Franz Michels, 1946 Gründer und langjähriger Amtsleiter des Hessischen Landesamts für Bodenforschung und – bis zu seinem Tod – auch 1. Vorsitzender des NVN, sowie Konrektor Paul Fiedler.

1954 erhielt er als jugendliches Mitglied vom Vereinsvorstand eine Ehrenurkunde „wegen eifriger Betätigung auf naturwissenschaftlichem Gebiet“ und den Band 91 (1954) des Nassauischen Jahrbuchs für Naturkunde mit einer persönlichen Widmung (s. Abb. 2+3).

Die frühe Leidenschaft für Naturkunde hatte ihn vermutlich auch zum Geologie-Studium bewegt, das er in Mainz und nach dem Vordiplom ein Semester in Tübingen – vermutlich wegen der dortigen sehr guten Paläontologie – absolvierte; eingeschlossen ein Auslandssemester in Pisa. Sein Studium finanzierte er durch Arbeit während der Semesterferien auf Baustellen und in den Weinbergen der näheren Umgebung. Reiselust, gepaart mit verschiedensten geologischen Interessen und Aspekten, hatte sich nicht nur durch seinen Italienaufenthalt gezeigt: während des Studiums absolvierte er Praktika im Bauxit-Bergbau in Griechenland und im Staatlichen Wasserbauamt in der Türkei in Ankara.

Sein Diplom machte er bei Prof. Horst Falke mit einer Spezialkartierung bei Alzey, die u. a. von dem Rheinhessenspezialisten Dr. Wilhelm Wagner abgenommen wurde (KÜMMERLE 1961).

In seiner Doktorarbeit untersuchte er die stratigraphisch relevante Foraminiferen-Fauna des Kasseler Meeressandes (Oberoligozän) im Ahnetal bei Kassel (KÜMMERLE 1963). In Ermangelung passender Fototechnik zeichnete er die Fossilien in Pünkteltechnik (11 Tafeln). Dies gelang ihm so gut, dass sich die Foraminiferen bis heute damit bestimmen lassen. Nach seiner Promotion über die Foraminiferen des Kasseler Meeressandes trat er 1963 ins Hessische Landesamt für Bodenforschung in Wiesbaden ein, wo er bis zu seiner Pensionierung 1997 tätig war und als Geologie-Direktor ausschied.

Es fügte sich glücklich, dass das Landesamt seinerzeit gute Kartierer für das Tertiär suchte. Seine Vorliebe für das Kartieren und dreidimensionale geologische Interpretationen hatte sich übrigens schon frühzeitig während des Pisa-Aufenthalts abgezeichnet, wo er im Siena-Tal (Toskana) eine Karte erstellte und aktualisierte.

1972/1973 nahm er die Gelegenheit wahr, in Marokko an einem UNO-Entwicklungshilfeprojekt mitzuarbeiten und in Rabat und dem Anti-Atlas im Siroua-Gebirge nach Bodenschätzten zu suchen.

Im Landesamt in Wiesbaden brachte er sein Wissen und seine Erfahrung in die Veröffentlichung von sieben Geol. Karten 1:25 000 samt Erläuterungen ein! Die Erstellung von sieben Erläuterungen plus Karten unterstreichen seinen Fleiß und seine außergewöhnliche Expertise auf dem Gebiet des Tertiärs – geologisch wie

paläontologisch. Umfangreiche Planungen und Tiefbauarbeiten im Rahmen des U- und S-Bahnbaus in Frankfurt ermöglichen zudem die Veröffentlichung der Stadtkarte Frankfurt (KÜMMERLE 1987).

In seiner langjährigen Laufbahn als Geologe schrieb Eberhard 86 wissenschaftliche Veröffentlichungen. Die meisten erschienen in den **Jahrbüchern des Nassauischen Vereins für Naturkunde** (24) und den Geologischen Jahrbüchern Hessens (11) bzw. den Vorläufer-Bänden: Notizblatt hess. LA Bodenforschung (6). Seine enge Verbundenheit mit der Region zeigte sich auch in etlichen Veröffentlichungen im mehr lokal verbreiteten Rheingau-Forum (15).

Seine Bereitschaft, sein umfangreiches (geologisches) Wissen auch an Nicht-Fachleute weiterzugeben, schlug sich in seinem großen Engagement für eine allgemeinverständliche Wissensvermittlung im Rahmen von Vorträgen, Exkursionen und Beiträgen in Lokalzeitungen zu Themen wie Heimatkunde, Geschichte, Werden der Landschaft, Baukunst und vielem mehr nieder – Beiträge, die sich mit Genuss lesen lassen. Seine lebendigen Exkursionen – etwa nach Lorch, Schlangenbad, Geisenheim oder Wiesbaden – begeisterten Generationen von Naturfreunden.

Dass das menschliche Miteinander ihm nicht gleichgültig war, zeigte sich in seinem nebenberuflichen Engagement als Schiedsmann in den Gemeinden Mertinsthal und Rauenthal (1974–2001), wofür er 1998 mit dem Ehrenbrief des Landes Hessen ausgezeichnet wurde. Zudem war er aktiv in der Entwicklungshilfe und im Naturschutz.

Seine Familie – allen voran seine geliebte Frau Hiltrud – unterstützten ihn dabei stets.

Seine zielgerichtete und konstruktive Neugierde wird uns wie seine typisch nachdenkliche, aber verschmitzt humorvolle Art unvergessen bleiben – und uns fehlen.

Mit Dr. Eberhard Kümmerle verliert der Nassauische Verein für Naturkunde eine herausragende, freundliche, hilfreiche und kompetente Persönlichkeit, die über Jahrzehnte das naturkundliche Leben der Region und im NVN geprägt hat. Seine, im Landesmuseum angebotene, Publikation „Steinreiches Weltkulturerbe – Geologie für Mittelrheinfreunde“ würdigt sein Wissen längerfristig auf besondere Weise. Wir werden ihm ein ehrendes Andenken bewahren.

Literatur

- ANDERLE, H.-J. & KÜMMERLE, E. (2009): Postvariscische Tektonik. – In: Kümmerle, E. & SEIDENSCHEID, G.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5817 Frankfurt a.M. West. – 3. Aufl.: 86–88; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Umwelt Geol.).
- ANDERLE, H.-J., KIRNBAUER, T. & KÜMMERLE, E. (1997): Geologische Stadtwanderung Wiesbaden. – Exkursions-H. nass. Ver. Naturkde., 2: 1–3, 1 Abb.; Wiesbaden.
- BIBUS, E. & KÜMMERLE, E. (1971): Alter und Ausbildung der „Nauheimer Kantkiese“ und „Södeler Rundschotter“ der Wetterau. – Jb. nass. Ver. Naturkde., 101: 62–74, 4 Abb.; Wiesbaden.

- EHRENBERG, K.-H., KUPFAHL, H.-G. & KÜMMERLE, E. (1968): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Bl. 5913 Presberg. – 201 S., 22 Abb., 9 Tab., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- FRIEDRICH, K. & KÜMMERLE, E. (1969): Ein geologisches Profil vom Frankfurter Hauptbahnhof zum Opernplatz. – Natur u. Mus., **99** (8): 369–375, 2 Abb.; Frankfurt a. M.
- HORN, M. & RÖSING, F. mit Beiträgen von KARSCHNY, A., KÜMMERLE, E. & MEISL, S. (1971): C. Tertiär. – Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 4721 Naumburg: 75–89, 1 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- KOWALCZYK, G., KÜMMERLE, E. & SEMMEL, A. (1999): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Bl. 5918 Neu-Isenburg. – 3. Aufl., 208 S., 21 Abb., 9 Tab., 2 Beibl.; Wiesbaden.
- KUPFAHL, H.-G., MEISL, S. & KÜMMERLE, E. (1972): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Bl. 6217 Zwingenberg a.d. Bergstraße. – 2. Aufl., 276 S., 67 Abb., 48 Tab.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1958): Relazione Geologica della Regione di Radicondoli (Prov. di Siena). – 13 S. (Masch.-schr.), 6 Abb., 1 Taf. m. Profilen, 2 Kt.; Pisa (Instituto Geologico).
- KÜMMERLE, E. (1961): Ein Beitrag zur geologischen Spezialkartierung des Blattes Alzey (Rheinhessen). – Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Mainz, 47 S., 1 Kt., 3 Prof.; Mainz.
- KÜMMERLE, E. (1963): Die Foraminiferenfauna des Kasseler Meeressandes (Oberoligozän) im Ahnetal bei Kassel (Bl. 4622 Kassel-West). – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **45**: 1–72, 1 Abb., 2 Tab., 11 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1964): Das Profil der Bohrung Großkarben 2. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **92**: 265–266; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1966): Zur alttertiären Meeresküste im Rheingau. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **94**: 379–382; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1967): Zeugnisse des alttertiären Meeres im Rheingau. – Rheingauische Heimatbl., 1967: ix–xii; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (1971): Zur Geologie der nordwestlichen Stadtgebiete von Frankfurt a. M. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **99**: 214–231, 5 Abb., 16 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1973): Bericht über einen Einsatz im Entwicklungsprogramm der UN in Marokko an den Hess. Minister f. Wirtschaft u. Verkehr, 5 S. (Masch.-schr.), 12 Abb.; Rabat/Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1974): Geologische Ergebnisse neuerer Bohrungen in Frankfurt am Main. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **102**: 143–158, 1 Abb., Taf. 10; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1976): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5618 Friedberg. – 88–96, 3 Abb., 1 Taf.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- KÜMMERLE, E. (1976): Zur Geologie und Geschichte der Bad Nauheimer Sprudel. – Geol. Jb. Hessen, **104**: 253–270, 1 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1978): Die Tertiärschichten im Stadtgebiet von Frankfurt am Main. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **60**: 207–212, 1 Tab.; Stuttgart.
- KÜMMERLE, E. (1978): Unterer Meeressand und Kaolin am Rotenberg bei Geisenheim am Rhein. – Geol. Jb. Hessen, **106**: 147–158, 1 Abb., 1 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1981): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Bl. 5518 Butzbach. – 214 S., 30 Abb., 13 Tab., 3 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1982): Beobachtungen zur Tektonik im Rheingau. – Geol. Jb. Hessen, **110**: 101–115, 1 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1983): Der „Meereskalk“ (Mitteloligozän) von Frankfurt am Main - Offenbach - Bad Vilbel. – Geol. Jb. Hessen, **111**: 203–217, 1 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1986): Bemerkungen zur Geologie der „Großen Hub“ bei Eltville am Rhein. – Geol. Jb. Hessen, **114**: 95–109, 2 Abb.; Wiesbaden.

- KÜMMERLE, E. (1987): Frankfurt am Main 1:30 000. – 3 Kt., 1 Profilbl.; Frankfurt a. M. (Referat Umweltschutz, Stadtvermessungsamt).
- KÜMMERLE, E. (1987): Kurmainzischer Bergbau im Raum Rüdesheim a. Rhein - Pressberg. – Geol. Jb. Hessen, **115**: 365–380, 7 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1988): Pariser Unterwelt - beim Wort genommen. – Tours de France, Paris Grand Est: 27–28, 1 Abb.; Frankfurt a. M. (Maison de la France).
- KÜMMERLE, E. (1990): Schleichsand (Oligozän) bei Niederwalluf (Rheingau, Hessen). – Geol. Jb. Hessen, **118**: 149–153, 2 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1993): **Hildegard von Bingen (1098–1179) und die Geologie. 1. Biographie, Klöster und Landschaft.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **114**: 19–40, 9 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1994): **Hildegard von Bingen (1098–1179) und die Geologie. 2. Die Heilkraft der Edelsteine.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **115**: 5–30, 5 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1994–1996): Stratigraphische Einstufung von Bohrungen der ICE-Neubaustrecke Köln – Rhein-Main, Planungsschnitt 33. – Unveröff. Berichte an die Bauleitung der Deutschen Bahn AG; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- KÜMMERLE, E. (1995): **Ein geologisches Profil vom Taunus zum Main.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **116**: 73–80, 1 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1996): „Milchquarzkies“, „Randfazies“ und Unteroligozän bei Wallau, Main-Taunus-Kreis. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **117**: 65–68, 1 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (1996): Vom Ursprung des „Hildegardisquells“ im alten Kloster Eibingen. – Rheingau-Forum, **2/1996**: 24–25, 1 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (1998): Labsal aus der Tiefe. Sauerquellen im westlichen Taunus. – Jb. Rheingau-Taunus-Kreis, **1999**: 97–100, 6 Abb.; Bad Schwalbach.
- KÜMMERLE, E. (1999): Stadt der Bäche, Lehmgruben und Ave-Steine. Vom Affenstein zum Ziegelefeld. – Frankf. Rundschau, **282** (3.12.1999): 23, 3 Abb.; Frankfurt a. M.
- KÜMMERLE, E. (2001): Geologische Aspekte der Rheingauer Landwehr. – Rheingau-Forum, **4/2001**: 2–11, 8 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2002): Bergbau und Salzquellen im Kiedrichatal. – Rheingau-Forum, **4/2002**: 10–19, 7 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2003): **Rheingold – Mythos und geologische Wirklichkeit.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **124**: 131–144, 10 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2004): **Ablagerungen der Tertiärzeit: Wo findet man was in Wiesbaden?** – In: Streifzüge durch die Natur von Wiesbaden und Umgebung, Hrsg. (175 Jahre NVN). – Jb. nass. Ver. Naturkde., **Sb 2**: 31–39, 6 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2004): Geologische Kartierung unter Wasser. – Geol. Jb. Hessen, **131**: 5–10, 6 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2005): „Auen, die den Fluss bespiegeln“ – Der Inselrhein, geologisch betrachtet. – Rheingau-Forum, **2/2005**: 2–7, 5 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2006): Erdgeschichte auf Rheingauer Weinetiketten. – Rheingau-Forum, **1/2006**: 12–20, 10 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2007): **Geologie auf Schritt und Tritt – am Wiesbadener „Rheinsteig“.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **128**: 119–136, 13 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2007): Gediegen Gold und Silber im Rheingau? – Rheingau-Forum, **2/2007**: 23–27, 5 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2008): **Geologie auf Schritt und Tritt am Rheinsteig im Rheingau und am Mittelrhein.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **129**: 73–101, 20 Abb., 3 Tab.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2008): Blick übers Wasser - Rheinhessen vom Rheingau aus gesehen. – Rheingau-Forum, **3/2008**: 11–20, 15 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2009): **Rüdesheim am Rhein - ein geologischer Streifzug.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **130**: 105–115, 10 Abb.; Wiesbaden.

- KÜMMERLE, E. (2009): Rheinschifffahrt besonderer Art. – Rheingau-Forum, **1/2009**: 8–9, 3 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2010): **Magie der Fossilien.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **131**: 37–51, 15 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2011): **Manganknollen aus dem Taunus.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **132**: 133–142, 7 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2011): Fossilien und Mineralien aus dem Rheingauer Boden. – Rheingau-Forum, **2/2011**: 10–12, 7 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2012): **Geologische Naturdenkmäler – Zeugen der Erdgeschichte.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **133**: 69–88, 18 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2012): **Ablagerungen des Tertiärmeeres. Ehemalige Küste zeitweise im Raum des heutigen Wiesbaden.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **Sb. 2**: 33–41, 6 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2013): Naturstein in Rheingauer Bauwerken. – Rheingau-Forum, **1/2013**: 27–29, 5 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2013): **Erdgeschichte in unseren Bauten und Denkmälern.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **134**: 81–96, 13 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2014): Windräder auf dem Taunuskamm aus geologischer Sicht. – Rheingau-Forum, **2/2014**: 14–15, 2 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2014): **Baugruben in Wiesbaden – Fenster in die Erdgeschichte.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **135**: 57–62, 3 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2015): **Geologie auf Schritt und Tritt. Mit dem Wallufbach durchs Tal der Mühlen.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **136**: 7–26, 16 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2016): Vom Naturstein zum Denkmal. – Rheingau-Forum, **2/2016**: 22–26, 8 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2017): **Steinreiches Weltkulturerbe – Geologie für Mittelrhein-Freunde.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **Sb 4**: 115 S., 107 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2018): Die Steine der heiligen Hildegard. – Rheingau-Forum, **1/2018**: 13–18, 5 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2019): **Von der „Aulenkaut“ zur „Zieglerstraße“. Was uns Straßennamen über Geologie verraten.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **140**: 69–82, 8 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2020): Goethe, der Wein und der Geisenheimer Rothenberg. – Rheingau-Forum, **2/2020**: 10–14, 4 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2021): **Der Rhein – in seinem Bett.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **142**: 161–164, 2 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2022): **Mit dem Rhein durchs Welterbe.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **143**: 157–179, 12 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. (2022): Geologie der Rheinauen. – In: WINTER, W. (Hrsg.): Mainzer Schifffahrt 13 v. Chr. – 2023: 12–21, 9 Abb.; Heusenstamm.
- KÜMMERLE, E. (2023): Von der „Au“ zum „Werth“. Wie mit zwei Begriffen auch die Landschaft wechselt. – Rheingau-Forum, **2022/23**: 17–20, 4 Abb.; Rüdesheim a. Rh.
- KÜMMERLE, E. (2025): **Zwischen Rheingau und Mittelrhein.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **146**: 7–15, 7 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & ANDERLE, H.-J. (2006): Geologischer Rundgang durch Frauenstein. – Exkursions-H. nass. Ver. Naturkde., **44**: 1–6, 3 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & HÜHNER, G. (1994): Geologie des Stadtgebietes von Offenbach am Main. Abgedeckte geologische Karte. – Hess. L.-Amt Bodenforsch.: 5 S., 1 Kt.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & RADTKE, G. (2001): **Mit dem Main durch Frankfurt – ein geologischer Stadtspaziergang.** – Jb. nass. Ver. Naturkde., **122**: 5–21, 12 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & RADTKE, G. (2007): Die Geologie in der Umgebung von Wallau (nordöstliches Mainzer Becken). – In: RADTKE, G. & MARTINI, E. (Hrsg.): Die Bohrungen Wallau im nord-

- östlichen Mainzer Becken (Rotliegend, Pechelbronn-Gruppe, Bodenheim-Formation). – Geol. Abh. Hessen, **116**: 73–88, 8 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & RADTKE, G. (2012): Die Fossilien des Tertiärmeeres im Hanauer Becken. – Jber. Wett. Ges. ges. Naturkunde, **162**: 59–77, 21 Abb., 1 Tab.; Hanau.
- KÜMMERLE, E., RADTKE, G., TOUSSAINT, B. & ARNOLD, H. (2014): **Geologischer Rundweg im Rabengrund. – Jb. nass. Ver. Naturkde.**, **135**: 63–84, 12 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & SCHEER, H.-D. (1979): Die geologischen Verhältnisse längs der U-Bahn-Strecke Leipziger Straße in Frankfurt am Main. – Geol. Jb. Hessen, **107**: 145–161; 1 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (1993): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5818 Frankfurt a.M. Ost. – 3. Aufl., 308 S., 31 Abb., 36 Tab., 3 Beibl.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (2009): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5817 Frankfurt a.M. West. – 3. Aufl., 308 S., 43 Abb., 33 Tab., 3 Beibl.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & SEMMEL, A. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Bl. 5916 Hochheim a. Main. – 209 S.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & THEWS, J.-D. (1975): Zur Geologie des Stadtgebietes von Hofheim am Taunus. – Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforsch., **103**: 265–277, 1 Abb.; Wiesbaden.
- KUTSCHER, F. & KÜMMERLE, E. (1964): Die Conularien-Arten des Hunsrückschiefers. – Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforsch., **92**: 52–59, 1 Abb., 2 Taf.; Wiesbaden.
- RADTKE, G., GRIESEMER, T.W., GRIMM, K.I., HOTTENROTT, M., JANSSEN, R., LIPPMANN, R., KÜMMERLE, E., MARTINI, E., REICHENBACHER, B., SCHOLZ, J., SPIEGLER, D. & VAVRA, N. (2003): Erster Meereseinbruch im Oberrheingraben - Entwicklung, Biodiversität, Paläogeographie (Pechelbronn-Schichten, Obereozän-Unteroligozän) - Ausgewählte Fossilgruppen. – *Terra Nostra*, **2003/5**: 125; Mainz.
- RADTKE, G. & KÜMMERLE, E. (2004): Neudefinition von fünf stratigraphischen Einheiten im Tertiär (Miozän) des Hanauer Beckens und des Oberrheingrabens (Deutschland): Niederrad- bis Bockenheim-Formation. – Geol. Jb. Hessen, **131**: 27–44, 4 Abb.; Wiesbaden.
- RADTKE, G. & KÜMMERLE, E. (2010): Geologische Karte Stadt Frankfurt a.M. – Jahresbericht 2009 des HLUG: 115–121, 7 Abb.; Wiesbaden.
- RADTKE, G., KÜMMERLE, E. & MAY, T. (2018): Quarzitische Sandsteine am Wiesbadener Kureck – küstennahe tertiäre Meeresablagerungen auf paläozoischen Taunusgesteinen. – Geol. Jb. Hessen, **139**: 219–230, 9 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E., PIPPERR, M., MARX, J. & RADTKE, G. (in Vorber.): Mikrofossilien aus einer alten Lagerstätte bei Geisenheim am Rhein (unteroligozäne Meeressande). – Geol. Jb. Hessen; Wiesbaden.

