Beiträge

zum Geotopkaster des Geoparks Muskauer Faltenbogen, zur historischen Landnutzung im NW Berlins, zur Nutzung von Glasfaserkabeln als Geosensoren, zu hydrogeologischen Untersuchungen in Brandenburg, zur Landschaftsgenese eines Beckens in Mecklenburg und zur Visualisierung von Glaziallandschaften

	INHALT	CONTENTS	Seite
Căcilia Fiege & Margot Böse	Historische LandnutzungHistorical land use in northwestim Nordwesten Berlins –Berlin – The ridge-and-furrowDie Wölbäcker von Heiligenseesystem of Heiligensee		5–14
Charlotte Krawczyk	Wie Glasfaserkabel als Geosensoren zur Erkundung und Überwachung des Untergrunds genutzt werden können – Anwendung und Potenzial von ortsverteilten akustischen Dehnungsmessungen	How fibre optic cables can be used as geosensors to explore and monitor the subsurface – application and potential of distributed acoustic sensing	15–28
Antonia Erber, Stefan Broda, Silvio Janetz, Maximilian Nölscher, Achim Schulte	Vergleichende Analyse und Validierung flächenhafter Bewertungsmethoden der Grundwasservulnerabilität am Beispiel Nordost-Brandenburg	Comparative analysis and validation of groundwater vulnerability methods using the example of northeastern Brandenburg	29–44
Florian Jenn, Silvia Dinse, Anett Bremer, Dietmar Schäfer	Untersuchung zur Ursache des Chloridanstiegs im WW Kleinmachnow – geogen salinar oder anthropogen?	Investigations into the cause of rising chloride concentrations in the waterworks Kleinmachnow near Berlin – geogenic salinisation or anthropogenic sources?	45–55
Wolfram Heidenfelder, Jochen Rascher, Linda Richter, Jacek Koźma, Kersten Löwen, Matthias Rascher, Manfred Kupetz	Das Geotopkataster des UNESCO Global Geoparks Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa, Teil 1: Revision 2020	The Geotope Cadastre of the UNESCO Global Geopark Muskau Arch / Łuk Mużakowa, Part 1: Revision 2020	57–76
Manfred Kupetz, Nancy Sauer, Jacek Kożma, Ewa Brauer, Katazyna Jagiełło, Kersten Loewen, Detlef Nickel	Das Geotopkataster des UNESCO Global Geoparks Muskauer Faltenbogen/ Łuk Mużakowa, Teil 2: Seine Anwendung in der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)	The Geotope Cadastre of the UNESCO Global Geopark Muskau Arch/Łuk Mużakowa, Part 2: Its application in education for sustainable development (ESD)	77–96
Roberto Hensel, Wolfgang Janke, Stefan Meng, Sebastian Lorenz	Stratigraphie und Genese eines karbonatreichen Beckenprofils am Kliff von Meschendorf (Ostsee, Mecklenburg)	Stratigraphy and genesis of a carbonaterich basin profile at the cliff of Meschendorf (Baltic Sea, Mecklenburg)	97–124
Gerd W. Lutze & Joachim Kiesel	Die Glaziallandschaften im Nordosten Brandenburgs im Focus der Märkischen Eiszeitstraße (e.V.)	The glacial landscapes in the northeast of Brandenburg in the focus of the Märkische Eiszeitstraße (e.V.)	125–136

Cottbus

S. 5–14

Historische Landnutzung im Nordwesten Berlins – Die Wölbäcker von Heiligensee

Historical land use in northwest Berlin - The ridge-and-furrow system of Heiligensee

Căcilia Fiege & Margot Böse

Zusammenfassung

Spuren historischer Landnutzung und deren Auswirkung lassen sich bis heute im Gelände und im Boden zahlreicher Gebiete Norddeutschlands und anderer Regionen erkennen. Eines der markantesten Bodendenkmäler sind gewölbte Ackerparzellen, sogenannte Wölbäcker. Sie bilden eine wichtige Basis der historischen Erforschung von Siedlungsstrukturen, unterliegen jedoch durch moderne Landwirtschaft und Bebauungsmaßnahmen zunehmender Zerstörung. Dieser Beitrag widmet sich der Erfassung der mittelalterlichen Ackerflächen des Dorfes Heiligensee – heute ein Ortsteil Berlins – und deren Beziehung zu Relief und Boden. Darüber hinaus wird die Entwicklung des Ackerlandes im historischen Kontext betrachtet.

Summary

Traces of historical land use and its impact can still be seen in the landscape and soils of numerous areas in northern Germany and other regions. One of the most characteristic remains are convex shaped arable farmlands, so-called ridge-and-furrow systems. They represent an important basis in the research of historical settlement patterns but are subject to increasing destruction due to modern land management and expanding settlement areas. This article focuses on the recording of the medieval farmlands of the village Heiligensee – today part of Berlin – and its relations to relief and soil. Additionally, the development of the arable land is discussed in a historical context.

1 Einführung und Untersuchungsgebiet

Wölbäcker stellen eine typische Form der mittelalterlichen Bodenbewirtschaftung innerhalb Europas dar (ALCANTARA et al. 2017). Unter Wald oder extensiv genutzten Weideflächen haben die Bodendenkmäler in ländlichen Regionen häufig überdauert. Vor allem in Brandenburg (Prignitz, Niederlausitz) und in Niedersachsen (um Wolfsburg, Braunschweig und Göttingen) sind diese anthropogenen Relikte unter Waldstandorten oft aufzufinden (RAAB et al. 2019, ALCANTARA et al. 2017, BERGMANN et al. 2011, KONOLD et al. 2010). Zwar sind Wölbäcker aufgrund der modernen Landwirtschaft und des voranschreitenden Flächennutzungswandels größtenteils zerstört, im Berliner Ortsteil Heiligensee (Abb. 1) sind jedoch Spuren des historischen Ackerbaus unter dem Tegeler Forst zum Teil erhalten geblieben. Erst Ende 2016 wurden von LUTZ ESSERS hier die im digitalen Geländemodell gut sichtbaren, parallelen streifenförmigen Ackerparzellen (Abb. 2) mit ihrer markanten Wölbung, der sog. Kuppe, nachgewiesen (Essers 2018). Seitlich der Wölbung bildet jeweils eine Fahre die Abgrenzung zum benachbarten Wölbacker. Ob die Struktur der Äcker absichtlich durch Materialanhäufung geschaffen oder durch die Pflugtechnik bedingt wurde (MLU HALLE 2017, KONOLD et al. 2010), konnte bis heute nicht abschließend geklärt werden.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Nordwesten Berlins im Warschau-Berliner Urstromtal nahe der Barnim-Hochfläche (Abb. 1). Fluvioglazial abgelagerte Sande und Kiese bilden den Untergrund, nachdem sich im Spätglazial unter periglazialen Klimabedingungen teilweise mächtige Dünenkomplexe aus Parabel- und Längsdünen aufgrund vorherrschender Südwestwinde geformt haben (PACHUR 1987, Böse 1991, Müller & Teschner-Steinhardt 1994) (Abb. 3 C). Eine erste planmäßige und dauerhafte Besiedlung der Region geht auf das 13. Jahrhundert zurück, als um 1230 im Zuge der deutschen Ostsiedlung das Dorf Heiligensee zwischen dem Heiligensee und dem Havelufer als Angerdorf gegründet wurde (vgl. von Müller & Seyer 1991). Die Feldmark des Dorfes, die aus Karten des 18. Jahrhunderts bekannt ist, umfasst heute die Berliner Ortsteile Heiligensee und Konradshöhe sowie Teile des Tegeler Forstes, in dem die Wölbäcker erhalten sind. Die Kombination geomorphologischer und bodenkundlicher Methoden sowie historischer Quellen und Ergebnisse palynologischer Untersuchungen soll im Folgenden eine räumliche und zeitliche Rekonstruktion der historischen Landnutzung in Heiligensee und der damit einhergehenden Veränderung von Relief, Vegetation und Boden aufzeigen.



Abb. 1:Lage des Untersuchungsgebietes in Berlin und derzeitige FlächennutzungFig. 1:Location of the study area in Berlin and today's land use



Abb. 2: Die parallel angeordneten Wölbäcker im Digitalen Geländemodell (DGM) mit 1 m Rasterweite (links) und die Mikro-Topographie im Satellitenbild (GeoBasis-DE/BKG (©2009)) ohne erkennbare Wölbäcker (rechts). Ausschnitt aus Feld VI (vgl. Abb. 3 und 4).

Fig. 2: The parallel ridge-and-furrows visible in the Digital Elevation Model (DEM) with 1 m ground resolution (left) and the micro-topography by remote sensing (GeoBasis-DE/BKG (©2009)) not identifying those structures (right). Section of field VI (see fig. 3 and 4).



Abb. 3: Die Feldmark Heiligensee mit den Ackerflächen im 18. Jahrhundert (Felder A – D), ergänzt aus dem DGM (Felder I – XI). A: Geländehöhen, B: Hangneigungen, C: Ausgangssubstrat, D: heutige Landnutzung. Kreuzschraffur: Feldabschnitte, die im Hoch- und Spätmittelalter jährlicher landwirtschaftlicher Nutzung unterlagen. Catena: s. Abb. 5.

Fig. 3: The Feldmark Heiligensee with its farmland of the 18th century (fields A - D) and today's relics, visible in the DEM (fields I - XI). A: terrain elevation, B: slope situation, C: parent substrate, D: today's land use. Cross-hatching: area of permanent annual use during High and Late Middle Ages. Catena: see fig. 5.

2 Material und Methodik

Auf Grundlage des digitalen LiDAR-Geländemodells (DGM) mit 1 m Bodenauflösung, bereitgestellt von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (Geoportal Berlin), wurden die 2016 aufgefundenen Standorte von Wölbäckern (Essers 2018) validiert und um weitere ergänzt. Aus geologischen und topographischen Karten (GEOLOGISCHER ATLAS BERLIN 2007, TK 25 3345 Hennigsdorf, TK 25 3445 Berlin-Spandau) und mittels DGM wurden Informationen über Höhenlagen, Hangneigungen, Ausgangsmaterial und Siedlungsstrukturen entnommen (Abb. 3). Die ältesten Karten mit einer detailliert abgebildeten Feldmark von SPALDEHOLTZ (1739) und SPARRE (1782) wurden digitalisiert und dienen als Referenz für die mittelalterliche Feldmark (Abb. 4). Bodenkundlich wurden drei benachbarte Wölbäcker bis in 60 cm Tiefe untersucht und in einer Catena dargestellt (Abb. 5). Historische Quellen und palynologische Untersuchungen aus und an dem Heiligensee sowie im Lingenpfuhl (BRANDE 1978/79, 1980, 1992) dienen als Indizien von Veränderungen des Reliefs, der Böden und der Vegetation aufgrund der landwirtschaftlichen Nutzung.

3 Die Wölbäcker in der Feldmark Heiligensee

Im DGM lassen sich unter dem Tegeler Forst insgesamt 11 Gewanne (I - XI) zwischen 2 und 53 ha Größe identifizieren, in denen die Wölbäcker parallel nebeneinander liegen (Abb. 3). Das flache Ackerland (0 – $< 11^{\circ}$) wird in Form und Ausdehnung vom umliegenden Relief bestimmt. Nach den Karten von SPALDEHOLTZ (1739) und SPARRE (1782) lagen die Gewanne im Bereich der "Königlichen Heide" (Abb. 4) und waren der mit Heiligensee belehnten Adelsfamilie von Bredow vorbehalten (SCHLICKEISER 2008). Mit dem Begriff "Heide" wurden größere Waldflächen bezeichnet, die dem Adel für Bewirtschaftung, Jagd und Abholzung zustanden und im heutigen Ortsteil Heiligensee die Vorläufer großer Teile des Berliner Tegeler Forstes waren. Die ortsnahen Wölbäcker der bäuerlichen Bevölkerung sind dagegen heute vollständig überbaut. Diese wurden in drei Gewanne, das Laacken-Feld (A), Mittel-Feld (B) und Bum-Feld (C), unweit der Wohnstätten zusammengefasst (Abb. 4). Im Südwesten erweiterte das Hinter-Feld (D) das Ackerland. Diese Feld- oder Hufengewannflur bildete zusammen mit Siedlungs- und Weideflächen die Gemarkung, die die Bauern von Heiligensee bewirtschafteten. Die ebene Fläche um den Dorfkern eignete sich für die Anlage weitläufiger Gewanne (A – D). Das Ackerland erstreckt sich hier vorwiegend auf fluvioglazialen Sanden, während es in der Königlichen Heide häufiger zu Bewirtschaftung von Böden aus äolischen Sanden (Hinter-Feld, IV, X, XI, I, VII, IIIa) kam (Abb. 3 C, 4). Auch Feuchtgebiete, die wahrscheinlich durch den Mühlenstau der Havel in Spandau um 1232 entstanden bzw. sich ausdehnten (KAISER et al. 2018), wurden landwirtschaftlich genutzt. In diesen Bereichen kann die Kuppe der Wölbäcker einer Vernässung des Bodens entgegengewirkt haben und trotz Tendenzen zur Torfbildung in den Fahren bewirtschaftet worden sein.

Eine Nord-Süd-Orientierung (bzw. NNO-SSW und NNW-SSO) der Parzellen ist auf dem Ackerland vorherrschend. Seltener treten Abweichungen von 90° auf, die eine Begrenzung einzelner Gewannstücke kennzeichnen (Eichholtz Stücke, Möllen-Gehren, Lehmkutten Stücke in Abb. 4). Bei den überwiegend Ost-West ausgedehnten Gewannen bedeutet eine Nord-Süd Ausrichtung, dass meist mehr, aber dafür kürzere Ackerstreifen angelegt wurden statt weniger und längere. Da das Wenden des Pfluges durchweg schwierig war, wurden kurze Parzellen möglichst vermieden (BERGMANN et al. 2011). Regionale Studien (z. B. BERGMANN et al. 2011, KÜSTER 1999, FRIES 1995, JÄGER 1951) geben eine Parzellenlänge von meist 100 bis 600 m an. Innerhalb der Königlichen Heide trifft dies für die meisten Wölbäcker zu. Gewanne mit Wölbäckern unter 100 m Länge wurden entweder überbaut (siehe Feld I, VIII, X in Abb. 3 D) oder waren ursprünglich Teil eines benachbarten Gewanns (siehe Feld VII als südliches Ende von Feld VI in Abb. 3). Vereinzelt wurden sehr kurze Ackerparzellen bis auf die Luv-Seite der Dünenhänge verlängert (siehe Feld II, III in Abb. 3 A, B). Eine Bewirtschaftung der infolge der periglazialen West- und Südwestwinde steiler konfigurierten nord- und nordostexponierten Lee-Seiten erfolgte nicht. Die von SPALDEHOLTZ (1739) kartierten Wölbäcker der Hufengewannflur erreichten dagegen oftmals längere Ausmaße (600–1500 m) als die der Königlichen Heide.

Eine gängige Methode der Bewirtschaftung des Ackerlands im Mittelalter war das Anbausystem der Dreifelderwirtschaft. Dabei wurde, jährlich rotierend, auf einem Gewann die Winterfrucht und auf einem anderen die Sommerfrucht bestellt, während ein weiteres Gewann brach lag (FRIES 1995). Doch kam es oftmals zu Abweichungen, z.B. Rotationen, die nur Teile der Feldflur erfassten oder Brachzeiten von mehr als einem Jahr. In diesen Kontext sind die von SPALDEHOLTZ (1739) kartierten intensiv genutzten Areale der Hufengewannflur einzuordnen, die sich von den peripheren Ackerbereichen durch ihre regelmäßige Bewirtschaftung unterschieden. Letztere wurden in der Regel nur alle 3, 6, 9 oder 12 Jahre kultiviert (AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG 1953), WObei schriftliche Quellen von kümmerlichen Erträgen und zwölfjährigem Roggenland berichten (Müller 1990). Das legt eine Bewirtschaftung nur alle 12 Jahre auch in Heiligensee nahe. In Bezug auf die sehr langen Ackerparzellen der Hufen-Stücke (A) und der Hufen (B) würden sich die Längen der jährlich bewirtschafteten Abschnitte auf max. 1000 m verringern.

Die Breite der einzelnen Ackerparzellen kann teilweise innerhalb eines Gewanns Unterschiede von mehreren Metern aufweisen. Abhängig von der Region liegt die seitliche Ausdehnung der Äcker oftmals zwischen 8 und 12 m,





Fig. 4: The Feldmark Heiligensee with peasants arable land (A - D) and drive ways, according to SPALDEHOLTZ (1739) and SPARRE (1782). The arable land within the Königliche Heide (I - XI), taken from the preserved patterns in DEM, is added.



- Abb. 5: Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchung von Wölbäckern im Tegeler Forst (Feld VI). Erläuterung in Kap. 4.
- Fig. 5: Results of soil type classification of ridge-and-furrows in the Tegel Forest (field VI) show a cambisol with relict gleyed horizons (rGo1, rGo2) and a relict plough horizon (rAp). Around the furrows substrate was removed below ground surface, completely destroying soil layers. After abandoning farmland an illuvial horizon (Bv) could develop again.

was FRIES (1995) mit der Wurfweite der Saat (Breitsaat) in Verbindung bringt. Innerhalb der Königlichen Heide Heiligensees pendelt sich der Mittelwert je Gewann zwischen 11 und 13 m ein. Am Rand des heutigen Ackerfeldes "Nordfeld" (Abb. 1), das damals Teil des Mittel-Feldes (B) war, können Fragmente der ansonsten zerstörten Wölbäcker der bäuerlichen Feldflur identifiziert werden. Hier kann nördlich des Flacken-Puhls eine Parzellenbreite von 11,5 m und östlich desselben von 11 m festgestellt werden.

Ein wichtiges Element der landwirtschaftlichen Tätigkeit bildete das weit verzweigte Wegenetz, über das alle Gewanne der Feldmark erreicht werden mussten (Abb. 4). Wenn möglich, wurden bei der Wegführung Dünenaufwehungen vermieden oder diese an schmalen Durchlässen passiert. Neben der Ackerflur waren auch weitere Orte von essenzieller Bedeutung für die Bewohner Heiligensees. Dort trafen oftmals mehrere Wege aufeinander. Der alte und neue Teerofen (PROTZ 1973, vgl. Abb. 4), wichtig für Pech, Teer, Terpentin und Holzessig, sei hier genannt. Zudem zählte die Mühle in Hermsdorf, später die Mühle in Tegel, beide am Tegeler Fließ gelegen, zu wichtigen Knotenpunkten aufgrund des im Mittelalter herrschenden Mühlenzwangs (SCHLICKEISER 2008). Die Wegnamen "Alter Müllenpfad", "Mühlenweg" und "Weg nach Hermsdorf" zeugen von diesen Perioden.

4 Auswirkungen des Ackerbaus auf Relief und Boden

Erosions- und Denudationsprozesse können Folge landwirtschaftlicher Tätigkeit sein, vor allem auf vegetationslosen oder -armen Flächen. Im Untersuchungsgebiet sind anthropogen induzierte Denudationsprozesse seit dem Mittelalter im Bohrkern aus dem Heiligensee nachgewiesen: Aus dem über Jahre hinweg zunehmenden Sandgehalt der Kalkmudde ist ein verstärkter Abtrag von Bodensubstrat infolge der Landwirtschaft abzuleiten (BRANDE 1978/79). Der Anteil an dem äolisch oder fluvial eingetragenen Sediment ist jedoch trotz des hohen Sandvorkommens in der Umgebung niedrig. Dieses kann auf die geringe Reliefenergie der entwaldeten Flächen und eine schnelle Verbuschung nach Aufgabe des Ackerlandes zurückgeführt werden. Nach der Aufgabe der Wölbäcker ist bis zum Einsetzen der Vegetationssukzession mit einer fluvialen und äolischen Bodenerosion entlang der Kuppen zu rechnen, sodass deren Form im Mittelalter wahrscheinlich deutlich ausgeprägter war als heute. Nach MEIBEYER (1969) beträgt die Höhe eines Wölbackers meist 50-70 cm, wohingegen sie im Tegeler Forst häufig nur noch 20-35 cm erreicht. Infolge der Rodung von angrenzenden Flächen kann es insbesondere auf den Gewannen nahe der Dünen zur Reaktivierung der Flugsande und demzufolge zu Überwehungen von Ackerland gekommen sein. Oftmals setzen sich die Wölbäcker über die bis zu einem Meter hohen Erhebungen innerhalb eines Gewanns fort (Abb. 3A, Feld II, IV, V). Dagegen deuten unterbrochene oder stellenweise schlecht differenzierte Parzellen vor allem am Rand der Gewanne auf eine Überdeckung der Ackerstruktur durch Flugsande hin (Abb. 3A, Feld II, IV).

Die Ergebnisse eines bodenkundlichen Transekts (Catena im Feld VI) zeigt Abb. 5. Bisher gab es bei den bodenkundlichen Kartierungen in Berlin, die bis in die 1960er Jahre zurückreichen, keinerlei Hinweise auf Wölbäcker, auch nicht in den seinerzeit intensiv untersuchten Flächen im Raum Heiligensee und dem Tegeler Forst (z. B. FRIEDRICH 1971).

Nach der Berliner Bodenkarte (SENSTADTWOHN 2015) ist auf den Standorten der Flugsandfelder im Bereich der Königlichen Heide vorwiegend Podsol-Braunerde anzutreffen, während auf den mittel- und feinsandigen Talsandflächen im Bereich der hier untersuchten Wölbäcker vergleyte Rostbraunerde vorherrscht. Dem entspricht der Profilaufbau in Abb. 5 mit der Horizontabfolge Ah/rAp/Bv/rGol/ rGo2. Dabei liegt der Gr-Horizont unterhalb von 60 cm (vgl. GRENZIUS 1987, S. 286). Zwischen 30 und 60 cm tritt in allen Profilen ein dünnes Tonband infolge von Lessivierung auf (GRENZIUS 1987, S. 69, BÖCKER & GRENZIUS 1998, S. 92). Für die oberen Bodenhorizonte ergibt sich die Feststellung, dass spätestens seit der Landnahme im Hochmittelalter die Böden stark durch anthropogenen Einfluss geprägt wurden. Dafür spricht auch ein fossiler, sandüberwehter Oberboden im Binnendünengebiet der angrenzenden Baumberge südlich der Hufen C (Abb. 3 und 4) mit einem ¹⁴C-Alter von 760 +/- 60 B.P. (FRIEDRICH 1971), kalibriert auf 1155-1316 n. Chr. Zudem zeigte ein Experiment von BERGMANN et al. (2011), dass der mittelalterliche Beetpflug jeweils die obersten 16 cm durchpflügte. Bodenmaterial wurde abgetragen, vermischt und aufgrund der starren Pflugscharre zur Ackermitte verlagert, wo sich eine Wölbung ausbildete. Dementsprechend weist in Abb. 5 der graue reliktische Ackerhorizont (rAp) auf den Kuppen eine höhere Mächtigkeit auf als in den Fahren. Eine überdeckte ursprüngliche Geländeoberfläche, wie sie in den Kuppen unterhalb des Pflughorizontes zu erwarten wäre, kann nicht festgestellt werden. Es ist anzunehmen, dass bereits während der ersten Pflugvorgänge der im Untersuchungsgebiet sehr geringmächtige Oberboden (10-17 cm auf Referenzflächen) gänzlich überbearbeitet wurde. Zum Ackerrand hin führte die Bodenbearbeitung nach Abtrag des Oberbodens zur Kappung des nun oberflächennah anstehenden Bv-Horizontes. In den Fahren wurde dieser ebenso wie der darunterliegende reliktische Oxidationshorizont (rGol) vollständig zerstört. Hier konnten in dem sauren Milieu (pH 3,4-4,2) Verbraunungsprozesse zügig einsetzen und den heute in den Fahren sichtbaren Unterboden (Bv) bilden. Zusammenfassend ergibt sich demnach bodengenetisch eine reliktisch vergleyte Braunerde mit aufliegendem reliktischen Pflughorizont (rAp). Im Bereich der Fahren wurde der Boden bis unter die Geländeoberfläche abgetragen, sodass Bodenhorizonte vollständig zerstört wurden. Nach Aufgabe der Äcker konnte sich hier erneut ein Verbraunungshorizont (Bv) formieren.

Auf bereits im Mittelalter saure bis sehr saure Bodenverhältnisse lassen auch historische Aufzeichnungen von kümmerlichen Ernteerträgen sowie die Ackerbegleitpflanzen (Kleiner Ampfer, Kornblume) im Pollendiagramm schließen, die als Zeigerpflanzen für saure und stickstoffarme Böden gelten (BRANDE 1992, ELLENBERG et al. 1992). Eine Düngung der Ackerfelder mit Tierdung oder ein Auftrag von Mergel zur Kalkung wurde nach MÜLLER (1990) in der Region nicht durchgeführt. Eine Kalkung wäre wegen des reichlichen Vorkommens von Kalkmudden im Heiligensee und Tegeler See allerdings zu erwarten (SUKOPP & BRANDE 1984/85).

5 Die Wölbackerflur im historischen Kontext

Die landwirtschaftliche Tätigkeit kann anhand von zwei Faktoren in den Bohrkernen aus dem Heiligensee und dem Lingenpfuhl nachgewiesen werden (BRANDE 1978/79, 1992). Zum einen ist der bereits erwähnte Sandeintrag in den Heiligensee infolge von Erosions- und Denudationsprozessen durch den Ackerbau festzustellen. Zum anderen geben in Verbindung damit die Pollenanalysen Aufschluss über Beginn und Menge des Getreideanbaus. Nachdem bereits seit der Germanen- und Slawenzeit Getreidepollen nachgewiesen ist, spiegelt der rapide Anstieg vor allem von Roggen und Ackerbegleitpflanzen im Hochmittelalter das Erschließen und Erweitern der Ackerflächen wider. Konträr dazu kann ein Rückgang der Baumbestände (Birke und Kiefer) aufgrund der Flächenrodung beobachtet werden.

Wann genau einzelne Felder erschlossen und bewirtschaftet wurden, wird in schriftlichen Quellen selten explizit erwähnt. Die frühsten Aufzeichnungen über Ackerflächen in der Feldmark Heiligensee sind im Landbuch Kaiser Karls IV. von 1375 mit 58–62 Hufen belegt (SCHLICKEISER 2008). Da sich dieses Flächenmaß an der Ertragsleistung des Bodens orientierte, kann eine Hufe regional unterschiedlich groß ausfallen. Nach MARTINI (1883), der für den Raum Berlin für das Jahr 1816 eine Umrechnung von 1 Hufe = 765,966955 Ar (= 7,7 ha) angibt, entsprächen die angegebenen Hufen der Fläche der bäuerlichen Gewanne A-C mit ca. 471 ha. Eine Bewirtschaftung dieser Gewanne seit der Dorfgründung um 1230 ist daher anzunehmen. Eine Erweiterung des Ackerlands um das Hinterfeld (D in Abb. 4) ist dagegen durch historische Aufzeichnungen erst nach 1600 belegt (SCHLICKEISER 2008). Dieses als "Ackerbeiland" bezeichnete Areal war unabhängig von der Hufengewannflur und wurde üblicherweise nicht in Dreifelderwirtschaft bestellt.

Die Ackerflächen innerhalb der Königlichen Heide werden einmalig im Zusammenhang mit dem Eigentum der belehnten Adelsfamilie von Bredow in einer Urkunde aus dem Jahr 1434 erwähnt (DÜRKS 1937). Wann und warum die Gewanne der Königlichen Heide aufgegeben wurden und somit keinen Eingang in die historischen Karten des 18. Jahrhunderts fanden, kann nur anhand von Indizien erschlossen werden. Wie zu der Zeit üblich, ließen die Ritter von Bredow - wahrscheinlich seit 1290 mit den Ländereien Heiligensees belehnt - ihre Felder von zugezogenen Arbeitskräften, den Kossäten, bewirtschaften (HERBIG 1973, SCHLICKEISER 2008). Nach dem Landbuch von 1375 lebten 23 Kossätenfamilien in Heiligensee, deren Anzahl zwischen der Dorfgründung um 1230 und dem genannten Volkszensus jedoch deutlich höher angenommen wird (SCHLICKEISER 2008). Ein stetiger Rückgang von Kossäten seit dem 14. Jahrhundert hingegen korreliert mit dem wirtschaftlichen Niedergang der verschuldeten Familie von Bredow. Sie verpfändete im Jahr 1434 Teile ihres Besitzes in Heiligensee, darunter die Hälfte ihrer Ackerflächen in der Königlichen Heide. Zwar ist aufgrund von deren Erwähnung im Register anzunehmen, dass dort zu dieser Zeit noch Ackerland existierte, aber der Rückgang an Arbeitskräften und die finanziellen Schwierigkeiten der Adelsfamilie lassen auf nur wenige bewirtschaftete Flächen schließen. Der seit dem 14. Jahrhundert wieder abnehmende Anteil von Getreide und Segetalflora (Kornblume, Kleiner Ampfer) im Pollendiagramm Lingenpfuhl (BRANDE 1992) läutet das Ende der großflächigen Landwirtschaft in Heiligensee ein. Damit nimmt der Pollenanteil von Birke und Hasel zu, die sich auf den Brachen ausbreiten.

Heiligensee und seine Ländereien wurden aufgrund der Verschuldung der Ritter von Bredow 1472 an die Ritter von Pfuhl verkauft (KOISCHWITZ 1984) und gingen im 16. Jahrhundert in den Besitz von Joachim II., Kurfürst von Brandenburg über (DÜRKS 1937), der das Gut Tegel zu Jagdzwecken anlegte (MÜLLER 1990). Während das alte Wegenetz bis in das 18. Jahrhundert erhalten blieb, fand das Ackerland innerhalb der Königlichen Heide keine Erwähnung mehr.

6 Schlussfolgerung

Wölbäcker bilden eine wichtige Archivfunktion mittelalterlichen Ackerbaus. Sie geben nicht nur Aufschluss über landwirtschaftliche Techniken und daraus resultierende Bodenveränderungen, sondern ermöglichen in Kombination mit geowissenschaftlichen, historisch-botanischen und archivalischen Quellen auch Aussagen über die sozialgesellschaftlichen Veränderungen des Dorfes selbst. Die vorliegende Untersuchung stellt darüber hinaus erstmals Kartenmaterial mit detaillierten Informationen zur Ausdehnung und Lagebeziehung der ehemaligen Ackerflächen der Feldmark Heiligensee zur Verfügung. Die Bodenlandschaft im Südteil des heutigen Tegeler Forstes wird demzufolge zu großen Teilen vom anthropogenen Einfluss geprägt und bildet die letzte weitläufige reliktische Wölbäckerflur innerhalb der Grenzen Berlins. Weitere Untersuchungen in den Berliner Forsten und ihrer Umgebung stehen noch aus.

Hinweis der Schriftleitung

Im Band 26 dieser Zeitschrift erschien der Beitrag von RAAB et al. (2019) über Wölbäcker und Holzkohlenmeiler in der Niederlausitz. Der vorliegende Beitrag ist eine Kurzfassung aus der Masterarbeit (FIEGE 2019) an der FU Berlin, die noch ohne Kenntnis dieser Abhandlung verfasst wurde. Er stellt demnach eine Ergänzung und Bereicherung aus einer Nachbarregion dar. Die M.Sc.-Arbeit bei Margot Böse entstand aufgrund einer Anregung von Arthur Brande und Lutz Essers, der 2016 die hier beschriebenen Wölbäcker fand (ESSERS 2018). Auch in der Nähe der Wölbäcker des Tegeler Forstes wurden Plätze ehemaliger Holzkohlenmeiler gefunden und auf einer Exkursion der Berliner Bodendenkmalpflege am 13.10.2018 von Lutz Essers vorgestellt.

Literatur

- ALCANTARA, V., DON, A., WELL, R. & R. NIEDER (2017): Legacy of medieval ridge and furrow cultivation on soil organic carbon distribution and stocks in forests. – Catena **154**, S. 85–94, Exeter (UK)
- BERGMANN, R., PEINE, H.-W., POLLMANN, H.-O. & M. SCHAICH (2011): Ergebnisse des Airborne Laserscanning am Nordrand der Warburger Börde. – Archäologie in Westfalen-Lippe, S. 217–220, Heidelberg
- BÖCKER, R. & R. GRENZIUS (Red.) (1998): Stadtökologische Raumeinheiten von Berlin (West). – Ber. Inst. Landschaftsu. Pflanzenökologie Univ. Hohenheim, Beih. 8, 204 S., Stuttgart-Hohenheim. (Erläuterungen zur gleichnamigen Karte 1 : 50 000, Hrsg.: SENSTADTUM Berlin 1986)
- Böse, M. (1991): A palaeoclimatic interpretation of frost wedge casts and aeolian sand deposits in the lowlands between Rhine and Vistula in the Upper Pleniglacial and Late Glacial. – In: KOZARSKI, S. (ed.): Late Vistulian (=Weichselian) and Holocene Aeolian Phenomena in Central and Northern Europe – Zeitschrift für Geomorphologie NF, Suppl.-Bd. **90**, S. 15–28, Stuttgart
- BRANDE, A. (1978/79): Die Pollenanalyse im Dienste der landschaftsgeschichtlichen Erforschung Berlins. – Berliner Naturschutzblätter **65/66**, S. 435–443, Berlin
- BRANDE, A. (1980): Heiligensee. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung **3**, S. 76–81, Berlin
- BRANDE, A. (1992): Der Lingenpfuhl ein vegetationsgeschichtliches Archiv der Baumberge (Berlin-Heiligensee). – Berliner Naturschutzblätter **36**, S. 17–23, Berlin
- DÜRKS, W. (1937): Zwischen See und Havel das sagenumwobene Heiligensee. – In: PAULS, W. & W. TESSENDORFF (Hrsg.): Der Marsch in die Heimat – Ein Heimatbuch des Bezirks Berlin-Reinickendorf. – S. 469–508, Berlin

- ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WER-NER, W. & D. PAULISSEN (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. – Scripta Geobotanica 18, 258 S., Göttingen
- ESSERS, L. (2018): Wölbäcker im Tegeler Forst. 3D-Daten offenbaren ungewöhnliche Bodenstrukturen in Berlins Norden. – Archäologie in Berlin und Brandenburg 2016, S. 106–110, Berlin
- FIEGE, C. (2019): Untersuchungen zu Wölbackerstrukturen in der historischen Feldmark Heiligensee (Berlin).
 M.Sc.-Arb. FU Berlin, Institut Geographische Wissenschaften, FR Physische Geographie, 90 S., Berlin
- FRIEDRICH, F. (1971): Bodengesellschaft der Baumberge und des Tegeler Forstes. – Dipl.-Arb. TU Berlin, 51 S., 2 Karten, 2 Catenen, Tskr., Berlin
- FRIES, J. (1995): Mit dem Pflug fürs täglich Brot. Archäologie in Deutschland 2/1995, S. 24–27, Stuttgart
- GRENZIUS, R. (1987): Die Böden Berlins (West). Klassifizierung, Vergesellschaftung, ökologische Eigenschaften.– Diss. TU Berlin, 520 S., Tskr., Berlin
- HERBIG, H. (1973): Gesellschaft und Wirtschaft der Mark Brandenburg im Mittelalter. – In: Historische Kommission (Hrsg.): Veröffentlichungen Historischen Kommission zu Berlin **41**, 203 S., Berlin
- JÄGER, H. (1951): Die Entwicklung der Kulturlandschaft im Kreise Hofgeismar. – Göttinger Geographische Abhandlungen **8**, 114 S., Göttingen
- KAISER, K., KELLER, N., BRANDE, A., DALITZ, S., HENSEL, N., HEUSSNER, K.-U., KAPPLER, CH., MICHAS, U., MÜL-LER, J., SCHWALBE, G., WEISSE, R. & O. BENS (2018): A large-scale medieval dam-lake cascade in central Europe: Water level dynamics of the Havel River, Berlin-Brandenburg region, Germany. – Geoarchaeology 33: S. 237–259, Wiley Publ.
- KOISCHWITZ, G. (1984): Sechs Dörfer in Sumpf und Sand. 238 S., Berlin
- KONOLD, W., ISELE, B., SCHÜBEL, K. & B. SPUHLER (2010): Von Wässerwiesen und Wölbäckern: Kulturlandschaftsrelikte im ehemaligen Oberamt Kirchheim. – Schriftenreihe des Stadtarchivs Kirchheim unter Teck **34**, S. 7–23, Kirchheim
- KÜSTER, H. (1999): Geschichte der Landschaft in Mitteleuropa Von der Eiszeit bis zur Gegenwart. – 424 S., München
- MEIBEYER, W. (1969): Über den Profilaufbau des Pflughorizontes in Wölbäckern. – Zeitschrift für Agrargeschichte und Agrarsoziologie **17**, S. 161–170, Frankfurt a. M.

- MüLLER, A. VON & H. SEYER (1991): Die mittelalterlichen Dörfer auf dem Territorium von Berlin. – Führer zu archäologischen Denkmälern in Deutschland **23**: Berlin und Umgebung, S. 133–148, Stuttgart
- MÜLLER, M. (1990): Heiligensee Ein Angerdorf im Wandel der Zeit. – Chronik des Bezirkes Reinickendorf von Berlin **3**, 48 S., Berlin
- MÜLLER, M. & R. TESCHNER-STEINHARDT (1994): Zur Genese und dem Alter der Dünen im Bereich der Havel-Niederung, Berlin-Tegeler Forst. – Die Erde **125**, S. 123–138, Berlin
- PACHUR, H.-J. (1987): Die Sedimente in Berliner Seen als Archive der Landschaftsentwicklung. – In: SCHARFE, W. (Hrsg.): Berlin und seine Umgebung in Kartenbild nebst Beiträgen zur Landschafts- und Klimageschichte des Berliner Raumes, S.73–81, Berlin
- PROTZ, H. (1973): Mittelalterliche Teerschwelerei im Berliner Raum. Mitteilungsbl. Vor- u. Frühgeschichte 24: S. 157–160, Berlin
- RAAB, TH., HIRSCH, F., RAAB, A., SCHNEIDER, A., BONHAGE,
 A. & E. BÖNISCH (2019): Böden historischer Landnutzung
 in der Niederlausitz Wölbäcker und Kohlenmeiler. –
 Brandenburg. Geowiss. Beitr. 26, 1/2, S. 5–14, Cottbus
- SCHLICKEISER, K. (2008): Heiligensee 700 Jahre Geschichte eines Reinickendorfer Ortsteils. Chronik des Bezirkes Reinickendorf von Berlin. – 248 S., Berlin
- SUKOPP, H. & A. BRANDE (1984/85): Beiträge zur Landschaftsgeschichte des Gebietes um den Tegeler See. – Sitzungsber. Ges. Naturforsch. Freunde Berlin N.F. 24/25, S. 198–214 + Lit.-Verz. S. 1 – 7, Berlin

Internetquellen

- MARTINI, A. (1883): Manuale di metrologia, ossia misure, pesi e monete in uso attualmente e anticamente presso tutti i popoli. – http://www.braidense.it/dire/martini/modweb/pagine/074.htm (abgerufen: 05.03.2019)
- MLU HALLE (2017): Neues Forschungsprojekt: Welchen Nutzen hatten Wölbäcker? –https://pressemitteilungen. pr.uni-halle.de/index.php?modus=pmanzeige&pm_ id=2705 (abgerufen: 20.07.18)
- SENSTADTWOHN 2015: SENATSVERWALTUNG FÜR STADT-ENTWICKLUNG UND WOHNEN BERLIN: Bodengesellschaften 2015, Umweltatlas Berlin. – https://www.berlin.de/ umweltatlas/boden/bodengesellschaften/2015/karten/artikel.919905.php (abgerufen: 21.06.21)

Karten

- AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG (1953): Deutscher Planungsatlas – Atlas von Berlin. Karte No. 26: Heiligensee 1739 – Großes Angerdorf mit planmäßiger Hufengewannflur.
- GEOLOGISCHER ATLAS VON BERLIN (Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz (Hrsg.)) (2007): Geologische Skizze von Berlin. Maßstab 1:50.000.
- SPALDEHOLTZ, S. (1739): Carte von der Feldmarck Heiligensee zum Königl. Preuß. Amte Müllenbek gehörig. Maßstab 1 : 5000. – Archiv: Geheimes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz, Berlin.
- SPARRE (1782): Carte von der Feldmarck Heiligensee. Maßstab 1 : 12.750. Vermesser: I.H.B. (1753). – Archiv: Geheimes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz, Berlin.

Anschrift der Autorinnen:

Cäcilia Fiege Margaretenstr. 5B 12203 Berlin Germany cfiege@posteo.de

Prof. Dr. Margot Böse Freie Universität Berlin Institute of Geographical Science, Physical Geography Malteserstr. 74-100 12249 Berlin Germany m.boese@fu-berlin.de

S. 15-28

Wie Glasfaserkabel als Geosensoren zur Erkundung und Überwachung des Untergrunds genutzt werden können – Anwendung und Potenzial von ortsverteilten akustischen Dehnungsmessungen

How fibre optic cables can be used as geosensors to explore and monitor the subsurface – application and potential of distributed acoustic sensing

Charlotte Krawczyk

1 Einleitung

Faseroptische Technologien werden in immer mehr Forschungsbereichen der Naturwissenschaften und ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen eingesetzt, und zwar nicht nur zur Datenübertragung, sondern auch zur Sensorik. Die verteilte faseroptische Abtastung hat im letzten Jahrzehnt viel Aufmerksamkeit erlangt (MASOUDI & NEWSON 2016, MARTIN et al. 2017, REINSCH et al. 2021, CARTLIDGE 2021). Die physikalischen Eigenschaften von Lichtwellenleitern erlauben es, bei geeigneter Konstruktion und Abfrage mit einer geeigneten Lichtquelle, auch unter schwierigen Bedingungen auf die Veränderung von Umweltparametern zu reagieren, z. B. auf Temperatur, Dehnung oder chemische Konzentration (FREIFELD et al. 2008, DALEY et al. 2013, BECKER et al. 2017, HARTOG et al. 2018).

Verteilte faseroptische Sensoren ermöglichen eine kontinuierliche Messung von Umweltparametern mit hoher räumlicher Auflösung entlang der Messfaser (Meterskala) und mit hoher zeitlicher Abtastrate (> kHz) über große Entfernungen (mehrere km) (Abb. 1). Das physikalische Messprinzip beruht je nach Abfragetechnik auf verschiedenen Streuphänomenen des Lichts innerhalb der Faser (z. B. Brilloin, Rayleigh, Raman). So können durch Abfrage der Lichteigenschaften (z. B. Intensität, Phase, Laufzeit, Polarisation) charakteristische Eigenschaften gemessen werden (Wu et al. 2015, ZHOU et al. 2015, LIEHR et al. 2020).

Zu den Anwendungen gehören Integritätsüberwachung von Materialien (NÖTHER et al. 2008, PEARCE et al. 2009, REINSCH et al. 2012, 2017, HUSSELS et al. 2019, BÜCKER & GROSSWIG 2017, KINDLER & GROSSWIG 2018, LIPUS et al. 2021b), Perimetersicherheit (MAHMOUD et al. 2012), Überwachung von Telekommunikations- und Bahnnetzen (PENG et al. 2014, MARTIN et al. 2017), aber auch geophysikalische Anwendungen in der Industrie und Untergrundspeicherung. Die Geosensorik mit Glasfasern umfasst beispielsweise vertikale seismische Profile in Bohrungen (MESTAYER et al. 2011, MILLER et al. 2012, MATEEVA et al. 2014, HENNINGES et al. 2021, MARTUGANOVA et al. 2021), Überwachung der Mikroseismizität während hydraulischer Stimulationen (KARRENBACH et al. 2017, MOLTENI et al. 2017, LELLOUCH et al. 2020), Überwachung des Flüssigkeitsstroms durch Produktion im Bohrloch (z. B. EARLES et al. 2011, LIPUS et al. 2021a), Erkennung von Erdbeben (LINDSEY et al. 2017, WANG et al. 2019, MARRA et al. 2019, CURRENTI et al. 2021) und die Erforschung der Struktur der Erdkruste (DOU et al. 2017, JOUSSET et al. 2018, AJO-FRANKLIN et al. 2019, KRAWCZYK et al. 2019, 2021) und ihrer Oberflächenbewegung (MICHLMAYR et al. 2016, SCHENATO et al. 2017).

In diesem Beitrag wird zunächst das generelle Prinzip kurz erläutert, um danach auf ortsverteilte Dehnungsmessungen zu fokussieren, deren Potenzial an vorhandenen Beispielen und mit einem Ausblick auf Brandenburg und städtische Bereiche erläutert wird.

2 Funktionsweise von faseroptischen Messungen

2.1 Physikalisches Grundprinzip

Für ortsverteilte akustische Dehnungsmessungen (Distributed Acoustic Sensing, DAS) wird typischerweise die phasensensitive, optische Zeitbereichsreflektometrie (q-OTDR) eingesetzt (vgl. WU et al. 2015, MASOUDI & NEWSON 2016). Eine spezielle Messeinheit injiziert ultrahochfrequente Laserimpulse in die Glasfaser (Abb. 2). Während diese den optischen Pfad hinunterwandern, kommt es zu Wechselwirkungen innerhalb der Faser, die zu Lichtreflexionen, der sogenannten Rückstreuung, führen. Das reflektierte Licht wandert die Faser wieder hinauf zum Messgerät, wo die zurückgestreuten Signale als Messwerte aufgezeichnet werden. Durch die Zeitsynchronisation des Laserpulses kann das Rückstreuereignis (Rayleigh-Streuung) genau einer Faserdistanz zugeordnet werden. Sobald der Lichtimpuls das Ende der Faser erreicht hat und alle Reflexionen zum Abfragegerät zurückgelaufen sind, kann der nächste Laserimpuls, ohne das Risiko von Interferenzen, eingeleitet werden. Für jeden Laserpuls wird so die gesamte Faserlänge an jedem Punkt der Faser abgetastet.



Abb. 1:

Aufzeichnung des seismischen Wellenfelds und der Deformation des Untergrundes mittels ortsverteilter faseroptischer Dehnungsmessungen (Distributed Acoustic Sensing, DAS) zur Exploration von geologischen Strukturen sowie zur Überwachung des Untergrundes (z. B. Änderung physikalischer Gesteinseigenschaften oder Fließbewegungen; GEOPUR 2021).

Fig. 1:

Recording of the seismic wave field and subsurface deformation using Distributed Acoustic Sensing (DAS) for exploration of geological structures and monitoring of the subsurface (e. g., changes in physical rock properties or flow movements; GEOPUR 2021).



Abb. 2:

Prinzip der ortsverteilten akustischen Dehnungsmessung (Distributed Acoustic Sensing, DAS) (nach KRAWCZYK et al. 2019).

Fig. 2:

Principle of Distributed Acoustic Sensing (DAS) along a fibre optic cable (after KRAWCZYK et al. 2019).

Das Ergebnis ist eine kontinuierliche akustische Abtastung entlang der gesamten Länge der optischen Faser mit einem Frequenzbereich von Millihertz (mHz) bis über 50 Kilohertz (kHz) und einem Dynamikbereich von über 120 dB. Die Änderung des lokalen interferometrischen Musters gibt schließlich Aufschluss über die an einer bestimmten Stelle aufgenommene zeitlich variable Dehnung, wobei angenommen wird, dass der Phasengang linear zur induzierten Dehnung ist (Abb. 2).

Die feinste Dehnung einer Glasfaser kann zum einen mit seismischen Quellen aktiv vor Ort und kontrolliert angeregt werden. Zum anderen kann man passiv eine Vielzahl von Signalen messen, die z. B. sowohl durch die Nutzung des Untergrunds als Speicher oder bei der Rohstoffförderung als auch durch Erschütterung bei industriellen-/Bau-Maßnahmen oder den Verkehr entstehen. Nicht zuletzt liefern die unterschiedlichen geologischen Prozesse Signale, deren Auswertung auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen den Zustand und die Veränderungen des Geosystems erfassen und vorhersagen helfen.

Parameter, die für ein Experiment gewählt werden müssen, umfassen die Messlänge (Länge des Intervalls entlang des Kabels, für die die Phasendifferenz gemessen wird; normalerweise zwischen 2–10 m) und die Bandbreite des DAS-Signals (im Bereich von mHz bis kHz). Die dann gemessene physikalische Größe ist die Veränderung der Deformation des Kabels mit der Zeit (*strain rate*). Integriert man diesen Messwert über die Zeit, ergibt sich daraus die lokale Verformung (*strain*). Je nach Ausrichtung des Untersuchungsobjektes und gewünschtem Detailgrad, kann man ein Kabel sowohl vertikal im Bohrloch verwenden oder nach Abteufen einer Bohrung hinter der Verrohrung einbringen als auch neue oder vorhandene Telekommunikationskabel, die horizontal im Untergrund verlaufen, nutzen. Insbesondere ist die flächige Abtastung im Aufwand den bisher verwendeten Seismometer- und Geophon-Auslagen überlegen, wenn ein dichtes Messraster aufgenommen werden soll (siehe Beispiel in Kap. 3.1).

Aufgrund dieser hohen Frequenzen und Abtastraten entstehen neue Anforderungen an die Datenübertragung und das Datenhandling, da Datensätze mit sehr großem Volumen erzeugt werden. Misst man zum Beispiel mit einem 10 km langen Kabel, unter Abtastung alle 4 m und mit 1 kHz Akquisitionsrate, so ergeben sich für 3700 gemessene Spuren etwa 1 GB/Minute an Daten, also etwa 12 TB/Woche. Auch ist die Auswertung dieser Daten noch keinesfalls etablierter Standard. Aktuelle Forschungsbereiche in der Künstlichen Intelligenz und zur Anwendung von maschinellem Lernen sind hier besonders gefragt (MARTIN et al. 2018).

2.2 Technische Installation

Bei einer Messung mit dem DAS-Verfahren ist nicht viel von der eigentlichen Messtechnik zu sehen, außer einer Messeinheit, die an das Kabel angeschlossen wird, und ggf. ein Kontrollmonitor. Am Beispiel des Telegrafenberg Campus in Potsdam können die Komponenten eines Experiments veranschaulicht werden (Abb. 3). Nach Überlassung der Liegenschaft Albert-Einstein-Straße durch das Land Brandenburg und die Stadt Potsdam an das GFZ wurde im Rahmen der Ertüchtigung 2018 die Liegenschaft an das Rechenzentrum auf dem Telegrafenberg Campus mit neuen Glasfaserkabeln (Abb. 3a) angeschlossen. Per Horizontalbohrung war die Verbindung zwischen den Gebäuden geschaffen und Hohlrohre (Abb. 3b) verlegt worden, die die Datenleitungen beinhalten. Im Serverraum zur Kabelübergabe (Abb. 3c) kann jederzeit ein lasergepulstes Mess- und Aufnahmegerät angeschlossen und per Monitor die Messung überwacht werden (Abb. 3d). Verwendet man bereits existierende Telekommunikationskabel, muss solch ein Zugang mit dem entsprechenden Netzbetreiber verhandelt und technisch an entsprechenden Zugangspunkten möglich gemacht werden.

2.3 Charakteristische Signale in den Rohdaten

Während einer Messung kann man von einem Kontrollmonitor die aktuelle Deformationsrate entlang der Messstrecke anzeigen lassen. Charakteristische Signale können dabei für unterschiedliche Ereignisse erkannt werden. Ein Aufbau mit mehreren Komponenten am Atna Vulkan (Abb. 4, KRAWCZYK et al. 2020) veranschaulicht sowohl natürliche als auch künstlich erzeugte Ereignisse. Das typische Zickzack-Muster vom städtischen Fahrzeugverkehr (Abb. 4b, Fahrzeuge in entgegengesetzter Richtung) setzt sich deutlich vom gleichmäßigen Rauschen im marinen Bereich (Abb. 4c, ähnliche Signale auf allen Spuren) und den hochaufgelösten Ereignissen am Vulkankrater (Abb. 4d, Erdbeben und Explosionen) ab. Die gezeigten Verformungsraten sind alle im Frequenzbereich zwischen 0,01-0,5 Hz abgebildet, aber für sehr unterschiedliche Reichweiten (12/25/1 km), die es in Abb. 4b-d auch hinsichtlich ihrer Auflösung zu beachten gilt. Detaillierte Auswertungen zu den am Ätna gewonnenen Datensätzen finden sich in CURRENTI et al. (2021) und JOUSSET et al. (2021).



Abb. 3: Verlegen eines Glasfaserkabels zwischen Campus Telegrafenberg und Außenstelle Albert-Einstein-Straße anlässlich der Ertüchtigung der Liegenschaft in 2018: a) Glasfaserkabel vor Einbau, b) Hohlrohre zur unterirdischen Kabelverlegung, c) Kabelübergabe im Serverraum, d) DAS-Aufnahmeeinheit mit Kontrollmonitor. (Photos: M. Wanjek, GFZ).

Fig. 3: Installation a fibre optic cable between the Telegrafenberg campus and the Albert-Einstein-Strasse branch office on the occasion of the property upgrade in 2018: a) Fibre optic cable before installation, b) hollow tubes for underground cable laying, c) cable handover in the server room, d) DAS recording unit with control monitor. (Photos: M. Wanjek, GFZ).



Abb. 4: Typische DAS-Signale, die 2019 am Ätna-Vulkan aufgezeichnet wurden: a) Karte des Ätna mit den drei gezeigten Messlokationen (rote Markierungen), b) städtische Messung in Linera, c) untermeerische Messung vor dem Hafen von Catania, d) lokale Aufstellung nahe am Vulkankrater (nach KRAWCZYK et al. 2020; zur Auswertung siehe CURRENTI et al. 2021).

Fig. 4: Typical DAS signals recorded at the Etna volcano in 2019: a) map of Etna with the three survey locations shown (red markings), b) urban measurement in Linera, c) submarine measurement off the port of Catania, d) local deployment close to the volcanic summit (after KRAWCZYK et al. 2020; for detailed analysis see CURRENTI et al. 2021).

3 Island: Geodynamik und Geotechnik

Island ist von intensiver seismischer Aktivität in Verbindung mit dem nordatlantischen Riftprozess geprägt, der sich in Verwerfungen und Vulkansystemen mit jungtertiären bis rezenten Basaltformationen manifestiert (SAEMUNDSSON 1979). Neben der geodynamischen Entwicklung ist vor allem die Nutzung dortiger geothermischer Lagerstätten von wissenschaftlichem und praktischem Interesse (SIGMUNDSSON et al. 2020).

3.1 Abbildung von Störungszonen, die nicht an der Oberfläche sichtbar sind

Die Reykjanes-Halbinsel im Südwesten Islands liegt innerhalb der Westlichen Vulkanzone. Die tektonische Dehnungsaktivität zwischen der Nordamerikanischen und der Eurasischen Platte (2 cm/Jahr, seit 6–7 Ma) führt hier zu einer Vielzahl von aktiven Störungszonen. Hier wurden 2017 aktive seismische Messungen entlang eines Profils und passive seismische Messungen mit räumlich aufgestellten Geophonen und Seismometern durchgeführt. Das Ziel war es, die Struktur und Dynamik des Untergrunds zu erforschen, der durch mehrere Lavaflüsse und Störungssysteme geprägt ist, was eine geophysikalische Herausforderung für die Abbildung darstellt.

Zur Methode der ortsverteilten Dehnungsmessung (DAS) wird in der Arbeit von JOUSSET et al. (2018) erläutert, wie kontinuierlich seismische Signale von natürlichen und künstlichen Quellen mit nur 4 m Registrierabstand entlang eines 15 km langen Glasfaserkabel-Layouts für neun Tage aufgezeichnet und ausgewertet werden. Mit herkömmlichen Geophonauslagen hätte solch ein Experiment einen um Größenordnungen höheren, auch finanziellen Aufwand bedeutet: Verfügbarkeit und Transport von 3750 einzelnen Geophonen inkl. Peripherie und Aufzeichnungseinheiten, Einsatz vieler Feldteams und Fahrzeuge sowie sehr zeitintensive Aufbau- und Abbauphasen. Die Datenerfassung erfolgte mit einem Standard-Telekommunikationskabel, das 1994 verlegt worden war. Das Kabel liegt in ca. 0,5 m Tiefe, und dessen Kopplung an den Untergrund wurde mit einem einfachen theoretischen Ansatz (REINSCH et al. 2017) abgeschätzt. Die Dehnungsübertragung zwischen dem Untergrund und der optischen Faser hat den bei der Messung in Island erhaltenen Frequenzbereich und die Signalamplitude nahezu perfekt erfasst.

Entlang der 15 km langen Messstrecke wurden räumlich unverzerrte, breitbandige Nano-Dehnungsdaten gemessen (Abb. 5). Das optische Telekommunikationskabel passiert eine Störungszone, die von der Schadenszone an der Oberfläche bekannt ist (Abb. 5a). In dieser Zone beobachteten die Autoren eine Zunahme sowohl der Dauer als auch der Amplitude von stehenden Wellen (Reflexionen), die durch lokale Erdbeben angeregt werden (Abb. 5b). Solche stehenden Phasen werden oft in großräumigen Messungen gesehen, aber nicht mit dieser hohen räumlichen Abtastung von wenigen Metern. Die räumlich dichten Glasfaseraufzeichnungen erlauben es daher, Details der Ausbreitung der Phasen von Erdbebenwellen innerhalb der Störungszone zu verfolgen (JOUSSET et al. 2018). Für das Fallbeispiel Island wird bewiesen, dass die an der Oberfläche mit ca. 75 m Breite kartierte Störungszone tatsächlich einen größeren räumlichen Bereich abdeckt und sich im Untergrund ca. 50 m weiter nach Westen erstreckt. Dieses Phänomen kann besonders dann von Bedeutung sein, wenn beispielsweise Gutachten zur Untergrundstabilität oder an sensiblen Infrastrukturen eine Aussage darüber treffen müssen, welches Schadensperimeter (die Ausdehnung der zu schützenden Flächen) angesetzt werden soll. Auch können durch verborgene Störungen Einflussbereiche und Auswirkungen von einzelnen Erdbebenereignissen oftmals erst nachträglich verstanden und in geodynamischen Modellen berücksichtigt werden.

3.2 Einfluss von Fahrzeugen auf den Untergrund

Neben den oben angesprochenen Signalen aus dem geologischen Untergrund gibt es auch eine Vielzahl von durch den Menschen erzeugten Signale. Erschütterungen durch den Straßenverkehr verursachen im Allgemeinen eine kleine Deformation der Erdoberfläche. Die Modellierung auf der Basis von DAS-Daten kann helfen, diesen Einfluss in Zukunft zu bestimmen. In einem ersten Test modellierten JOUSSET et al. (2018) die Wirkung des Messwagens auf den Boden (Gewicht ca. 2,2 t).

Die Form der Dehnungsspur mit der Zeit an einem Ort (Abb. 6) ist von der Geschwindigkeit und dem Gewicht eines Fahrzeugs, von dessen Abstand zum Kabel und von den elastischen Eigenschaften des Bodens, z. B. der P-Wellen-Geschwindigkeit abhängig. Während die elastischen Eigenschaften den absoluten Dehnungswert beeinflussen, der entlang des Lichtwellenleiters aufgezeichnet wird, verändert die Geschwindigkeit des Fahrzeugs die Dauer der Deh-



Deformation (nanostrain)

- Abb. 5: Störungszone in Island. In Ergänzung zum Oberflächenausbiss der Störung (a) zeigen die neuen Daten Beweise für blinde Störungsäste (b) (nach JOUSSET et al. 2018).
- Fig. 5: Fault damage zone on Iceland. In addition to the surface exposure of the fault (a), the newly acquired data evidence hidden fault traces (b) (modified after JOUSSET et al. 2018).

nungsanomalie. Die gemessene Verformungskurve passt am besten für das Modell eines mit 25 km/h fahrenden Autos mit einer P-Wellen-Geschwindigkeit des Untergrunds von 750 m/s (rote Linie in Abb. 6). Zusätzlich zu solch einer zeitlichen Analyse, können die Daten auch im räumlichen Bereich (mehrere benachbarte Spuren zur gleichen Zeit) mit dem gleichen Ergebnis analysiert werden. Da die Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen und der verein-



Abb. 6: Deformation des Bodens an einem Messpunkt durch ein vorbeifahrendes Fahrzeug (Geländefahrzeug mit ca. 2,2 t Gewicht) für verschiedene Geschwindigkeiten und Bodeneigenschaften. Hellgraue Kurve: aufgezeichnete Daten; dicke schwarze Kurve: dieselben Daten, aber geglättet; farbige Kurven: modellierte Verformung für ein Fahrzeug, das sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit entlang einer Straße und bei verschiedenen P-Wellen-Bodengeschwindigkeiten bewegt (Jousset et al. 2018).

Fig. 6: Deformation of the ground at a survey location due to a passing car (4WD car of ca. 2.2 t weight) for different velocities and subsurface properties. Grey light curve: recorded data; thick black curve: same data but smoothed; colour curves: modelled deformation for a car moving at different speed along a road for various P-wave ground velocities (Jousset et al. 2018).

fachten Vorhersage überraschend gut ist, sollten zukünftige, verfeinerte Modelle eine wesentlich bessere Bestimmung vom Impakt und von oberflächennahen elastischen Eigenschaften entlang langer Profile ermöglichen können.

4 Groß Schönebeck: Tiefe Geothermie

Das Land Brandenburg ist Teil des Norddeutschen Tieflands und landschaftlich durch Moränenlandschaften und Urstromtäler geprägt (STACKEBRANDT & FRANKE 2015). Tektonisch betrachtet ist Brandenburg ein Teil des Norddeutschen Beckens, das sich nach dem Rückzug des Zechsteinmeeres mit bis zu 5 km Mächtigkeit auf sedimentärem und vulkanischem Rotliegend abgelagert hat (DEKORP-BASIN RESEARCH GROUP 1999), unterlagert von Baltica, Avalonia und Armorica. Groß Schönebeck liegt auf den Hochflächen des Jungmoränengebiets nördlich des Eberswalder Urstromtals (STACKEBRANDT & FRANKE 2015).

Forschungsfragen zu geothermischen Energiesystemen sind breit aufgefächert und umfassen u. a. die Exploration, Erschließung und Nutzung von oberflächennahen und tiefen Reservoiren, Reservoirmonitoring, die materialtechnische Komplettierung sowie die modelltechnische Abbildung des Gesamtsystems. Im Land Brandenburg ist die Geothermie-Forschungsplattform Groß Schönebeck des GFZ ein international gefragter Teststandort und Nukleus (inter-)nationaler Kooperationen (Übersicht in BLÖCHER et al. 2016, RISSDOM 2021). In einem der jüngsten Projekte am Standort haben wir sowohl eine konventionelle 3-D Reflexionsseismik von der Oberfläche aus gemessen und weiterführend bearbeitet (KRAWCZYK et al. 2019, BAUER et al. 2020) als auch die Glasfaser-Technologie im Bohrloch zur vertikalen seismischen Profilierung (VSP) eingesetzt und neue Methoden der Datenbearbeitung entwickelt (HENNINGES et al. 2021, MARTUGANOVA et al. 2021).

Die Zielstellung dieser Messungen war es, eine bessere Charakterisierung des Untergrunds und insbesondere des in etwa 4 km Tiefe liegenden geothermischen Reservoirs zu erreichen, um einen weiteren Ausbau der Forschungsplattform für die geothermische Exploration zu ermöglichen. Dies ist auch deshalb ein ambitioniertes Vorhaben, da es bisher keine in der internationalen Literatur veröffentlichen Daten aus DAS-VSP Messungen in der tiefen Geothermie gibt, die solch große Zieltiefen erreichten und in zwei Bohrungen gleichzeitig gemessen werden konnten. Methodisch standen zusätzlich noch ungeklärte Fragen wie die Ankopplung des Sensorkabels, die Übertragung der Dehnung auf äquivalente VSP-Daten, die mit Geophonketten im Bohrloch gemessen werden und die Unterdrückung von Störsignalen im Fokus. Die Korridorstapelungen für die DAS-Messungen in den Bohrlöchern GrSk3 und GrSk4 zeigen, dass die aufgezeichneten Reflexionen sehr gut über die gesamte Tiefe (HENNINGES et al. 2021) und somit der bekannten Lithologie (KRAWCZYK et al. 2019) korrelieren. Die detaillierte Charakterisierung des Reservoirbereichs mit den neuen Daten bildet die Reflexionen der Zechsteinbasis sehr klar ab (Abb. 7, Z1-3), auch wenn noch ein Grundrauschen die Daten stört. Das geothermische Reservoir beginnt mit einem Sandsteinintervall in 4 km Tiefe (Abb. 7, R3), das von Vulkaniten unterlagert wird (Abb. 7, H6). Bei VSP-Messungen, die ein frei hängendes Kabel im Bohrloch verwenden, kommt es im Gegensatz zu Messungen, die ein hinter der Verrohrung eingebautes Kabel verwenden, zu auffälligen Störsignalen, die die Abbildungsqualität einer Messung stark beeinträchtigen können. Ein Nachhall im Kabel (*ringing*) bei drahtgebundenen, verteilten akustischen Dehnungsmessungen kommt möglicherweise dadurch zustande, dass die temporäre Kabelverlegung Probleme mit der Ankopplung verursacht und dadurch zusätzliches kohärentes Rauschen mit aufzeichnet. Das so ausgebildete, typische Zickzack-Muster wurde auch



Abb. 7: Reservoirabbildung mit seismischen VSP-Messungen unter Verwendung der DAS-Technologie in Groß Schönebeck in den Bohrungen GrSk3 and GrSk4 (aus HENNINGES et al. 2021). Die Bohrlochsondierungen (GR: Gammastrahlung, Vp: Kompressionswellengeschwindigkeit, RHOB: Dichte, AI: akustische Impedanz (aus Vp und RHOB berechnet), NPHI: Neutronenporosität) bilden zusammen mit den Korridorstapelungen (CS) die lithologische (Lith.) und seismische Ansprache der Reflektoren (Refl.) sehr gut ab. Strat.: Stratigraphie.

Fig. 7: Reservoir imaging with seismic VSP measurements using the DAS technology in Groβ Schönebeck in boreholes GrSk3 and GrSk4 (from HENNINGES et al. 2021). Well logs (GR: gamma ray, Vp: sonic velocity, RHOB: bulk density, AI: acoustic impedance (calculated from bulk density and sonic velocity), NPHI: neutron porosity) image together with corridor stacks (CS) the drilled lithology (Lith.) and seismic reflectors (Refl.) very well. Strat.: stratigraphy.

in den wenigen anderen, weltweit vergleichbaren DAS-Messungen registriert (MILLER et al. 2012, HARTOG et al. 2014, YU et al. 2016).

Um dieses Problem nachträglich zu beheben, haben MARTUGANOVA et al. (2021) eine numerische Lösung entwickelt. In einem zweistufigen Ansatz wird das Rauschen als physikalisches Modell bestimmt, um dann von den gemessenen Daten subtrahiert zu werden. Das Eingangssignal wird dazu in eine gewichtete Summe von Gabor-Funktionen zerlegt und diese hinsichtlich der Eigenschaften Frequenz, Amplitude und Zeit analysiert. Das bietet die Möglichkeit, Anteile im Signal zu unterscheiden und das durch das schwingende Kabel verursachte Rauschen darzustellen. Dieser Ansatz wurde erstmals erfolgreich auf die DAS-VSP-Daten in Groß Schönebeck angewendet (Abb. 8).

Die gemessenen Rohdaten (Abb. 8a) beinhalten Nutzsignal plus Rauschen. Werden die Störsignale eindeutig erkannt (Abb. 8b), können durch dessen Subtraktion die Reflexionen wichtiger Horizonte wesentlich deutlicher abgebildet werden (Abb. 8c). Der Effekt ist besonders in geringen Tiefen stark ausgeprägt, wo die hohen Rauschamplituden das Signal fast komplett überdecken: der Buntsandstein konnte erst nach der Bearbeitung klar erkannt und korreliert werden (Abb. 8c). Dies sichert auch weiterführende Interpretationen zusätzlich ab.

In Groß Schönebeck wurde das Messkabel in zwei Bohrlöcher gehängt und nicht, wie meist üblich, hinter der Verrohrung einzementiert. Der hier vorgestellte und geprüfte *Wireline*-Ansatz erlaubt somit neue Beobachtungsmöglichkeiten auch in alten Bohrlöchern und für eine Vielzahl von Zwecken. Die DAS-Methode ermöglicht zudem Messungen bei erhöhten Temperaturen von bis zu 150°C und führte auch hier wieder zu erheblichen Zeit- und Kosteneinsparungen im Vergleich zum Einsatz eines konventionellen Bohrloch-VSP.

Die vorgestellte Glasfaser-Technologie kann nicht nur in der Vorerkundung, sondern auch in der Überwachung von zukünftigen Produktionsbohrungen eine wesentliche Rolle spielen, um die Energiewende sicherer zu gestalten und beispielsweise für Brandenburg ein geowissenschaftliches Erkundungsprogramm zur Erschließung tiefer geothermischer Quellen voranzubringen (ACKSEL et al. 2020).

5 Potsdam – Urbane Geophysik für eine smarte Zukunft

Das Stadtgebiet von Potsdam bietet durch den geplanten Ausbau der Breitbandinfrastruktur und neue Messungen zur energetischen Erschließung des Untergrunds ein ideales angewandtes Testfeld für die Nutzung vorhandener Telekommunikationsinfrastrukturen zur Weiterentwicklung der Landeshaupstadt, mit dem Ziel klimaneutral zu werden. Die hohe Dichte von Telekommunikationsnetzen in städtischen Gebieten steht oft im Gegensatz zur meist unzureichend bekannten lokalen Geologie in Städten. Deshalb ist der Einsatz der DAS-Technologie eine zeitgemäße Lösung, diese Lücke effizient zu schließen und neue Erkenntnisse über den Untergrund zu erlangen. Zusätzliche technische



- Abb. 8: Vergleich von unbearbeiteten und bearbeiteten DAS-VSP-Daten in Groß Schönebeck für eine einzelne Vibrationspunktanregung (für mehr Detail siehe MARTUGANOVA et al. 2021). Die drei Paneele zeigen von links nach rechts a) die Rohdaten mit allen gemessenen Effekten, b) das Modell der Störsignale und c) die bereinigten Daten als Subtraktion von a) minus b). Es bleiben nur wenige, unvollständig korrigierte Bereiche (Kreis), sodass einzelne Reflexionen insbesondere in geringen Tiefen wesentlich besser interpretiert werden können.
- Fig. 8: Comparison of unprocessed and processed DAS-VSP data in Groß Schönebeck for a single vibration point excitation (for more detail see MARTUGANOVA et al. 2021). The three panels show from left to right a) the raw data with all measured effects, b) the noise model, and c) the cleaned data as subtraction of a) minus b). Only a few incompletely corrected areas (circle) remain, so that individual reflections can be interpreted much better, especially at shallow depths.

Fragen sind beispielsweise die Lokalisierung vorhandener Kabel und die benötigte Genauigkeit, die Aufnahmeempfindlichkeit und die Reichweite der aktiven Stimulation an der Erdoberfläche.

5.1 Kontrollierte Sprengung von Weltkriegsbomben im Stadtzentrum

Eine günstige Gelegenheit, die DAS-Technologie im Potsdamer Untergrund zu testen, ergab sich aus der Sprengung zweier Weltkriegsbomben im Juni/Juli 2020, die im Stadtzentrum von Potsdam nahe des Hauptbahnhofs gefunden worden waren. In Absprache mit dem Kampfmittelbeseitigungsdienst des Landes Brandenburg (KMBD) und der Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP) gelang es, innerhalb von nur eineinhalb Tagen eine geophysikalische Kampagne zu organisieren. Damit sollte die Detonation als Signalquelle für eine Messung im städtischen Bereich genutzt werden, um zu testen, wie sich solch ein Signal abbildet und wie weit das Signal verfolgt werden kann. Für die Messkampagne wurden 15 Geophone auf dem Telegrafenberg und 3 Geophone in 10, 50 und 100 Meter Entfernung vom Schusspunkt aufgestellt. Die Einbeziehung von zwei Glasfasern des städtischen Telekommunikationsnetzes, an die kurzfristig Messgeräte angeschlossen werden konnten, lieferte eine ca. 9 km lange Messlinie.

Die Detonation der 250 kg schweren Bombe konnte entlang der gesamten Messstrecke erfasst werden (Abb. 9). Wie weit das Signal maximal hätte aufgezeichnet werden können, kann nicht abgeschätzt werden, da die Distanz von 9 km noch zu kurz dafür war. In den Rohdaten ist der Verbrämungsschuss, der vor der Sprengung gemacht wurde, ebenfalls sehr gut zu erkennen. Die kleine Ladungsmenge, die oberirdisch gezündet wurde, kann entlang einer Ausdehnung von insgesamt ca. 4 km als seismisches Signal detektiert werden. Dies belegt die enorme Empfindlichkeit dieser Messtechnik. Das typische Streifenmuster von Fahrzeugen, die sich in dem dargestellten Zeitraum entlang der Messstrecke bewegt haben, ist ebenfalls vorhanden (Abb. 9), jedoch in viel kleinerer Dichte als im Beispiel vom Ätna (vgl. Abb. 4), da bei der Bombensprengung in Potsdam ein Sperrkreis eingerichtet und der Verkehr umgelenkt war.

5.2 Urbane Erkundung zur Erschließung des geothermischen Potenzials

Nachdem die Testmessungen bei den Sprengungen in Potsdam so positiv verlaufen waren, hat das GFZ Potsdam mit dem örtlichen Wärmeversorger Energie & Wasser Potsdam (EWP GmbH) seine Kooperation vertieft. Die Landeshauptstadt Potsdam wird exemplarisch als urbaner Raum u. a. im Rahmen des Projekts geoPuR untersucht und insbesondere das geologische Modell des Potsdamer Untergrunds nach und nach verfeinert (GEOPUR 2021). Das Ziel unserer Kooperation ist die Erkundung und Nutzung geothermischer Ressourcen, um langfristig die Integration tiefer geothermischer Wärmequellen und -speicher in die Potsdamer Fernwärmeversorgung sicherzustellen, da hier die Einsparpotenziale am höchsten sein werden (SWP 2021).



Abb. 9:

DAS-Aufzeichnung der kontrollierten Sprengung einer 250 kg schweren Weltkriegsbombe in Potsdam entlang einer 9 km langen Messstrecke in einem vorhandenen Telekommunikationskabel.

Fig. 9:

DAS registration of the controlled detonation of a 250 kg world war bomb in Potsdam along a 9 km long profile in an existing telecommunication cable. Vibroseismik-Messungen der EWP GmbH zur geothermischen Exploration in Potsdam fanden im Vorfeld der Niederbringung einer Geothermie-Bohrung im Dezember 2020 statt (Abb. 10). Während die beauftragten Vibratorfahrzeuge gezielt seismische Signale entlang von vier Profilen anregten (Abb. 10a) und diese konventionell mit Geophonauslagen aufgezeichnet wurden, haben Zusatzmessungen entlang eines Glasfaserkabels durch das GFZ stattgefunden (KRAWCZYK et al. 2021b). Das seismische Signal wurde in Echtzeit vor Ort überprüft, um eine funktionierende Registrierung sicherzustellen. Entlang der 6.5 km langen faseroptischen Messstrecke werden die angeregten Sweeps der Vibratoren klar beobachtet und sind wesentlich stärker ausgeprägt als die Streifenmuster durch den vorbeifahrenden Verkehr (Abb. 10b). Die Bearbeitung und Auswertung der 2-D seismischen Daten findet durch die EWP statt, das Zusatzexperiment wird zur Etablierung von technischen und Processingabläufen genutzt (WOLLIN et al. 2021, KRAWCZYK et al. 2021b). Die Auswertungen werden zum Potsdamer Untergrundmodell beitragen und die Optimierung einer geothermischen Erschließung im städtischen Raum voranbringen.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die wissenschaftliche Bedeutung der innovativen Technik der ortsverteilten akustischen Dehnungsmessungen (*Distributed Acoustic Sensing*, DAS) und der nutzbare Transfer in die Gesellschaft liegen in der Überwachung kritischer Systemparameter 1) zur Minderung der seismischen und vulkanischen Gefährdung; 2) zur Dynamik des Untergrundes und der Landoberfläche (z. B. Erdfälle, Hangrutschungen) inklusive der Entwicklung geotechnischer Lösungen; und 3) für die sichere Nutzung des Untergrundes (z. B. Energiegewinnung, Energiespeicherung).

Das in diesem Artikel umrissene Potenzial der Methode für räumlich und zeitlich kombinierte engmaschige Beobachtungen ist zugleich eine große Herausforderung in Bezug auf Datenspeicherung, Datenhandhabung und Berechnung. Da die Speicherung und Auswertung von DAS-Daten noch kein etablierter Standard sind, erlangen mathematisch und IT-orientierte Forschungsarbeiten in diesem Kontext eine große Bedeutung. Künstliche Intelligenz und die Anwendung von maschinellem Lernen werden besonders benötigt, um beispielsweise mit neuronalen Netzen die Abtastung des seismischen Wellenfeldes in kurzer Zeit und möglichst in Echtzeit durchführen zu können.

Generell werden die Überwachung bei der Nutzung des oberflächennahen Untergrunds, die Vulkanüberwachung, die Kontrolle unterirdischer Explosionen, die Gefährdungsbeurteilung und -überwachung sowie die globale Seismologie unter Verwendung transatlantischer Kabel von derartigen Technologien profitieren. Vorstellbar sind auch Experimente zum Vergleich neuer Instrumentenentwicklungen, die Kopplung mit Sensoren in der Rotationsseismologie, detaillierte Untersuchungen der Eigenschaften von Rayleigh-Wellen und die Inversion des kompletten Wellenfeldes.

Neben dieser Vielzahl von eher allgemein gehaltenen (geo-) wissenschaftlichen Fragestellungen, werden mit Bezug auf das Land Brandenburg und benachbarte Gebiete die



Abb. 10: Vibroseismik-Messungen der EWP GmbH zur geothermischen Exploration in Potsdam. Die Anregung seismischer Signale durch Vibratorfahrzeuge (a) wird entlang eines Glasfaserkabels in Echtzeit vor Ort sichtbar (b). (Photos: C. Cunow, GFZ).

Fig. 10: Vibroseismic survey of EWP GmbH for geothermal exploration in Potsdam. The seismic signal generated by the vibrator trucks is visualized along the nearby fibre-optic cable in real-time and on site (b). (Photos: C. Cunow, GFZ).

Anwendungsbereiche Senkungsstrukturen, Oberflächeneinbrüche, Hangstabilitäten, stillgelegten Tagebaue, Geothermie sowie Untergrund-Speicherung (Wasserstoff, CO₂, etc.) als sehr relevant erachtet, die sowohl in der Forschung als auch im Praxisbezug von der neuen DAS-Technologie stark profitieren werden können.

Zusammenfassung

Die effiziente Erkundung der Erdkruste und die Vorhersage von Naturgefahren profitieren von dichten Messungen. Seismologische Techniken liefern Bodenbewegungsdaten, während die aktive Seismik auf die strukturelle Abbildung und zunehmend auf die Bestimmung physikalischer Eigenschaften abzielt. Dichte Netze existieren in Explorationsgebieten für Kohlenwasserstoffe und in einigen Vulkangebieten, aber kaum in städtischen Gebieten oder an Küsten, wo die Datenerfassung schwieriger ist. Das wird jetzt durch die dynamische Dehnungsbestimmung mit konventionellen Glasfaserkabeln, die für die Telekommunikation eingesetzt werden, möglich. Diese innovative Technologie wird in jüngster Zeit weltweit stark für die Krustenexploration sowie Erdbebenortung entwickelt und liefert wichtige Datensätze für das Verständnis der Dynamik des Untergrunds, insbesondere in Küstenregionen und städtischen Gebieten, die bisher messtechnisch schwer zu erfassen sind. Auch die Entwicklungen weiterer Anwendungen in Richtung Smarte Energie (z. B. in Bezug auf Geothermie, Untergrundspeicher) und Smarte Städte (z. B. in Bezug auf U-Bahn, Autoverkehr, Diebstahlsicherung) sind in Sicht, die für einen breit aufgestellten gesellschaftlichen Nutzen entwickelt werden.

Summary

Efficient crustal exploration and natural hazard prediction benefit from dense surveys. Seismological techniques provide ground-motion data, while active seismics aims at structural imaging and increasingly on physical properties determination. Dense networks exist in hydrocarbon exploration plays and on some volcanoes, but rarely in urban and coastal areas where data acquisition is more challenging. This is now becoming possible: dynamic strain determination can be carried out with conventional fibre optic cables used for telecommunication. This new tool is lately strongly developed worldwide, for crustal exploration and for earthquake location. Thereby, this method provides key records for understanding subsurface dynamics, especially in coastal and urban areas that still experience measurement gaps. The developments of further applications towards smart energy (e.g., related to geothermics, subsurface storage) and smart cities are also in sight being developed for wider societal benefit.

Danksagung

Das hier vorgestellte Wissen wurde in vielen verschiedenen Projekten erzeugt. Die dazu notwendigen finanziellen Mittel wurden durch die Europäische Union (608553), die Projekte SENSE (BMWi 03EE4009), geoPuR (EFRE 85037956) und GeConnect (BMWi 0324269) sowie den Iceland Geosurvey und das GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum bereitgestellt. Im wissenschaftlichen und technischen Bereich haben sich dankenswerterweise insbesondere die Mitglieder aus der Glasfaser-Gruppe für die sehr kurzfristig angesetzten Messungen stark engagiert: C. Wollin, T. Reinsch, M. Lipus, S. Lüth, P. Jousset, C. Cunow, A. Siebert, S. Fuchs und M. Wanjek. Die gute Kooperation mit der Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP), der ILB, dem Kampfmittelbeseitigungsdienst Brandenburg, dem LBGR Brandenburg und die Unterstützung durch die betroffene Bevölkerung und Organisationen in Groß Schönebeck und Potsdam wird hier ausdrücklich hervorgehoben. Ihnen allen sei an dieser Stelle freundlich gedankt.

Literatur

- ACKSEL, D., HUENGES, E., REINSCH, T., BOHNHOFF, M., HARMS, U., KRAWCZYK, C. & M. SCHECK-WENDEROTH (2020): Geowissenschaftliches Erkundungsprogramm zur Erschließung tiefer geothermischer Quellen in den ostdeutschen Bundesländern. – Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, https://doi.org/10.2312/ GFZ.4.0.2020.001
- AJO-FRANKLIN, J. B., DOU, S., LINDSEY, N. J., MONGA, I., TRACY, C. & M. ROBERTSON (2019): Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection. – Scientific Reports 9, 1, S. 1–14
- BAUER, K., NORDEN, B., IVANOVA, A., STILLER, M. & C.
 M. KRAWCZYK (2020): Wavelet transform-based seismic facies classification and modelling: Application to a geothermal target horizon in the NE German Basin.
 Geophysical Prospecting 68, S. 466–482, https://doi. org/10.1111/1365-2478.12853
- BECKER, M. W., CIERVO, C., COLEMAN, T. & M. MONDANOS (2017): Fracture hydromechanical response measured by fiber optic distributed acoustic sensing at milliHertz frequencies. – Geophysical Research Letters 44, S. 7295-7302; doi:10.1002/2017GL073931
- BLÖCHER, G., REINSCH, T., HENNINGES, J., MILSCH, H., RE-GENSPURG, S., KUMMEROW, J., FRANCKE, H., KRANZ, S., SAADAT, A., ZIMMERMANN, G. & E. HUENGES (2016): Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. – Geothermics 63, S. 27–43; doi:10.1016/j.geothermics.2015.07.008

- BÜCKER, C. & S. GROSSWIG (2017): Distributed temperature sensing in the oil and gas industry - insights and perspectives. - Oil Gas European Magazine 43, 4, S. 209–221, doi: 10.19225/171207
- CARTLIDGE, E. (2021): DAS: A Seismic Shift in Sensing. – Optics & Photonics News **32**, S. 26–34; 1047-6938/21/06/26/8
- CURRENTI, G., JOUSSET, P., NAPOLI, R., KRAWCZYK, C. M. & M. WEBER (2021): On the comparison of strain measurements from fibre optics with a dense seismometer array at Etna volcano (Italy). Solid Earth **12**, S. 993–1003, https://doi.org/10.5194/se-12-993-2021
- DALEY, T., FREIFELD, B., AJO-FRANKLIN, J., DOU, S., PE-VZNER, R., SHULAKOVA, V., KASHIKAR, S., MILLER, D., GOETZ, J., HENNINGES, J. & S. LUETH (2013): Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. – The Leading Edge 32, S. 699–706, doi: 10.1190/tle32060699.1
- DEKORP-BASIN RESEARCH GROUP, 1999. The deep crustal structure of the Northeast German basin: New DEKO-RP-BASIN'96 deep-profiling results. – Geology **27**, S. 55–58.
- DOU, S., LINDSEY, N., WAGNER, A. M., DALEY, T. M., FREIFELD, B., ROBERTSON, M., PETERSON. J., ULRICH, C., MARTIN, E. R. & J.B. AJO-FRANKLIN (2017): Distributed acoustic sensing for seismic monitoring of the near surface: a traffic-noise interferometry. – Scientific Reports 7, S. 11620, doi: 10.1038/s41598-017-11986-4
- EARLES, D. M., STOESZ, C. W., SURVEYOR, N., PEARCE, J. G. & H. A. DE JONGH (2011): Fiber Optic Strain Sensing at the Sand Face Enables Real-Time Flow Monitoring and Compaction Mitigation in Openhole Applications. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, USA.
- FREIFELD, B. M., FINSTERLE, S., ONSTOTT, T. C., TOOLE, P. & L. M. PRATT (2008): Ground surface temperature reconstructions: Using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation sensor. – Geophys. Res. Lett. 35, S. L14309, doi:10.1029/2008GL034762
- GEOPUR (2021): https://www.gfz-potsdam.de/sektion/ geophysikalische-abbildung-des-untergrunds/projekte/ geopur-effiziente-erkundung-des-geothermischen-potenzials-in-urbanen-raeumen/
- HARTOG, A. H., BELAL, M. & M. A. CLARE (2018): Advances in Distributed Fiber-Optic Sensing for Monitoring Marine Infrastructure, Measuring the Deep Ocean, and Quantifying the Risks Posed by Seafloor Hazards. – Marine Technology Society Journal **52**, S. 58–73

- HENNINGES, J., MARTUGANOVA, E., STILLER, M., NORDEN, B. & C. M. KRAWCZYK (2021): Wireline distributed acoustic sensing allows 4.2 km-deep vertical seismic profiling of the Rotliegend 150° C-geothermal reservoir in the North German Basin. – Solid Earth 12, S. 521–537, https:// doi.org/10.5194/se-12-521-2021
- HUSSELS, M. T., CHRUSCICKI, S., ARNDT, D., SCHEIDER, S., PRAGER, J., HOMANN, T. & A. HABIB (2019): Localization of Transient Events Threatening Pipeline Integrity by Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing. – Sensors **19**, S. 3322; doi:10.3390/s19153322
- JOUSSET, P., REINSCH, T., RYBERG, T., BLANCK, H., CLARKE, A., AGHAYEV, R., HERSIR, G. P., HENNINGES, J., WEBER, M. & C. M. KRAWCZYK (2018): Strain determination using fibre-optic cables allows identification of structural features. – Nature Communications 9, S. 2509, doi:10.1038/ s41467-018-04860-y
- JOUSSET, P., CURRENTI, G., TILMANN, F., ZUCCARRELO, L., CHALARI, A., REINSCH, T. & C. M. KRAWCZYK (2019): Towards seismic and volcanic hazard assessment with distributed acoustic sensing in fibre optic cables. – Geophysical Research Abstracts **21**, EGU 2019-17281
- JOUSSET, P., CURRENTI, G., SCHWARZ, B., CHALARI, A., TIL-MANN, F., REINSCH, T., ZUCCARELLO, L., PRIVITERA, E. & C. M. KRAWCZYK (2021): Fibre-optic Distributed Acoustic Sensing of volcanic events. – Nature Communications, **in Revision**
- KARRENBACH, M., KAHN, D., COLE, S., RIDGE, A., BOONE, K., RICH, J., SILVER, K. & D. LANGTON (2017): Hydraulic fracturing-induced strain and microseismic using in situ distributed fiber-optic sensing. – Leading Edge **36**, S. 837–844, https://doi.org/10.1190/tle36100837.1
- KINDLER, A. & S. GROSSWIG (2018): Distributed Strain Sensing in der Geotechnik. – Bautechnik **95**, S. 385–393
- KRAWCZYK, C. M., LÜTH, S., BIEDA, N. & C. WOLLIN (2021a): From DAS measurement to a seismic section: workflow example from a geothermal survey in Potsdam. – Solid Earth eingereicht
- KRAWCZYK, C. M., WOLLIN, C., LÜTH, S., LIPUS, M., CU-NOW, C., SIEBERT, A., JOUSSET, P. & S. FUCHS (2021b): Urban DAS recording of a vibroseismic campaign with a 21 km-long dark fibre in Potsdam, Germany. – Geophysical Research Abstracts 21, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7868
- KRAWCZYK, C. M., JOUSSET, P., CURRENTI, G., WEBER, M., NAPOLI, R., REINSCH, T., RICCOBENE, G., ZUCCARELLO, L., CHALARI, A. & A. CLARKE (2020): Monitoring volcanic and seismic activity with multiple fibre-optic Distributed Acoustic Sensing units at Etna volcano – EGU General

Assembly, EGU2020-15252, https://doi.org/10.5194/ egusphere-egu2020-15252

- KRAWCZYK, C. M., JOUSSET, P. & T. REINSCH (2019): Fibre-Optic Strain Sensing: Game Changer for (Urban) Seismic Surveying? In: Proceedings EAGE. – 1st Conference on Geophysics for Infrastructure Planning Monitoring and BIM, S. 1–5, https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902547
- KRAWCZYK, C. M., STILLER, M., BAUER, K., NORDEN, B., HENNINGES, J., IVANOVA, A. & E. HUENGES (2019): 3-D seismic exploration across the deep geothermal research platform Groß Schönebeck north of Berlin/Germany. – Geothermal Energy 7, S. 1–18, https://doi.org/10.1186/ s40517-019-0131-x
- LELLOUCH, A., LINDSEY, N. J., ELLSWORTH, W. L & B. L. BIONDI (2020): Comparison between Distributed Acoustic Sensing and Geophones: Downhole Microseismic Monitoring of the FORGE Geothermal Experiment. – Seismol. Res. Letters **91**, S. 3256–3268, https://doi. org/10.1785/0220200149
- LIEHR, S., BORCHARDT, C. & S. MÜNZENBERGER (2020): LONG-DISTANCE FIBER OPTIC VIBRATION SENSING USING convolutional neural networks as real-time denoisers. – Optics Express 28, S. 39311–39325, https://doi. org/10.1364/OE.402789
- LING, Z., FENG, W., XIANGCHUAN, W., YUN, P., ZHENQIN, S., JI, H. & Z. XUPING (2015): Distributed Strain and Vibration Sensing System Based on Phase-Sensitive OTDR. – IEEE Photonics Technology Letters 27, S. 1884–1887
- LINDSEY, N. J., MARTIN, E. R., DREGER, D. S., FREIFELD, B., COLE, S., JAMES, S. R., BIONDI, B. L. & J. B. AJO-FRAN-KLIN (2017): Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields. – Geophysical Research Letters **44**, S. 11792–11799, doi:10.1002/2017GL075722
- LIPUS, M. P., REINSCH, T., WEISENBERGER, T. T., KRAGSET, S., STEFANSSON, A. & S. BOGASON (2021a): Monitoring of a reverse cement job in a high-temperature geothermal environment. – Geothermal Energy 9, S. 2195–9706, https://doi.org/10.1186/s40517-021-00187-y
- LIPUS, M. P., SCHÖLDERLE, F., REINSCH, T., WOLLIN, C., KRAWCZYK, C. M., PFRANG, D. & K. ZOSSEDER (2021b): Dynamic motion monitoring of a 3.6 km long steel rod in a borehole during cold-water injection with distributed fiber-optic sensing. – Solid Earth Discuss. preprint, https://doi.org/10.5194/se-2021-63
- MAHMOUD, S. S., VISAGATHILAGAR, Y. & J. KATSIFOLIS (2012): Real-time Distributed Fiber Optic Sensor for Security Systems: Performance. Event Classification and Nuisance Mitigation. – Photonic Sensors **2**, S. 225–236, 10.1007/s13320-012-0071-6

- MARRA, G., CLIVATI, C., LUCKETT, R., TAMPELLINI, A., KRO-NJÄGER, J., WRIGHT, L., MURA, A., LEVI, F., ROBINSON, S., XUEREB, A., BAPTIE, B. & D. CALONICO (2018): Ultrastable laser interferometry for earth-quake detection with terrestrial and submarine cables. – Science, https://doi. org/10.1126/science.aat4458
- MARTIN, E. R., HUOT, F., MA, Y., CIEPLICKI, R., COLE, S., KARRENBACH, M. & B. BIONDI (2018): A Seismic Shift in Scalable Acquisition Demands New Processing: Fiber-Optic Seismic Signal Retrieval in Urban Areas with Unsupervised Learning for Coherent Noise Removal. – IEEE Signal Processing Magazine **35**, S. 31–40
- MARTIN, E. R., CASTILLO, C. M., COLE, S., SAWASDEE, P. S., YUAN, S., CLAPP, R., KARRENBACH, M. & B. L. BIONDI (2017): Seismic Monitoring Leveraging Existing Telecom Infrastructure at the Stanford Distributed Acoustic Sensing Array: Active, Passive and Ambient Noise Analysis. – The Leading Edge 36, 12, S. 1025–1031, doi:10.1190/ tle36121025.1
- MARTUGANOVA, E., STILLER, M., BAUER, K., HENNINGES, J. & C. M. KRAWCZYK (2021): Cable reverberations during wireline distributed acoustic sensing measurements: their nature and methods for elimination. Geophysical Prospecting **69**, 5, S. 1034–1054, http://dx.doi. org/10.1111/1365-2478.13090
- MASOUDI, A. & T. P. NEWSON (2016): Contributed review: distributed optical fibre dynamic strain sensing. – Rev. Sci. Instrum. **87**, S. 011501, doi: 10.1063/1.4939482
- MATEEVA, A., LOPEZ, J., POTTERS, H., MESTAYER, J., COX,
 B., KIYASHCHENKO, D., WILLS, P., GRANDI, S., HORNMAN,
 K., KUVSHINOV, B., BERLANG, W., YANG, Z. & R. DETOMO (2014): Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling. Geophysical Prospecting 62, S. 679–692, https://doi.org/10.1111/1365-2478.12116
- MESTAYER, J., COX, B., WILLS, P., KIYASHCHENKO, D., LOPEZ, J., COSTELLO, M., BOURNE, S., UGUETO, G., LUPTON, R., SOLANO, G., HILL, D. & A. LEWIS (2011): Field trials of distributed acoustic sensing for geophysical monitoring.
 SEG Technical Program Expanded Abstracts, S. 4253–4257
- MILLER, D., PARKER, T., KASHIKAR, S., TODOROV, M. & T. BOSTICK (2012): Vertical seismic profiling using a fibre-optic cable as a distributed acoustic sensor. – Conference Proceedings 74th EAGE Conference, Y004
- MICHLMAYR, G., CHALARI, A., CLARKE, A. & D. OR (2016): Fiber-optic high-resolution acoustic emission (AE) monitoring of slope failure. – Landslides, https://10.1007/ s10346-016-0776-5

- MOLTENI, D., WILLIAMS, M.J. & C. WILSON (2017): Detecting microseismicity using distributed vibration. – First Break **35**, S. 51–55
- NÖTHER, N., WOSNIOK, A., KREBBER, K. & E. THIELE (2008): A distributed fiber optic sensor system for dike monitoring using Brillouin optical frequency domain analysis. – Proc. SPIE 6933, doi:10.1117/12.775133
- PARKER, T., SHATALIN, S. & M. FARHADIROUSHAN (2014): Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications. – First Break **32**, 2, S. 61–69, https://doi. org/10.3997/1365-2397.2013034
- PEARCE J.G., RAMBOW, F. H. K., SHROYER, W., HUCKABEE, P., DE JONGH, H., DRIA, D. E., CHILDERS, B. A., HALL, T. & T. DOMINIQUE (2009): High Resolution, Real-Time Casing Strain Imaging for Reservoir and Well Integrity Monitoring: Demonstration of Monitoring Capability in a Field Installation. – SPE Annual Technical Conference and Exhibition. https://doi.org/10.2118/124932-MS
- PENG, F., DUAN, N., RAO, Y.J. & J. LI (2014): Real-time position and speed monitoring of trains using phasesensitive OTDR. – IEEE Photonics Technol. Lett. 26, S. 2055–2057
- REINSCH, T., JOUSSET, P. & C. M. KRAWCZYK (2021): Fiber Optic Distributed Strain Sensing for Seismic Applications. In H. K. Gupta (Ed.). – Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series 2nd Ed. Springer Nature Switzerland. S. 379–383, https://doi. org/10.1007/978-3-030-58631-7 284
- REINSCH, T., THURLEY, T. & P. JOUSSET (2017): On the mechanical coupling of a fiber optic cable used for distributed acoustic/vibration sensing applications - a theoretical consideration. – Measurement Science and Technology 28, S. 127003; doi:10.1088/1361-6501/aa8ba4
- REINSCH, T.; BLÖCHER, G.; MILSCH, H.; BREMER, K.; LEWIS,
 E.; LEEN, G. & S. LOCHMANN (2012): A fibre optic sensor for the in-situ determination of rock physical properties.
 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 55, S. 55–62
- RISSDOM (2021): https://www.gfz-potsdam.de/sektion/ geoenergie/infrastruktur/geothermie-forschungsplattform-gross-schoenebeck/
- SAEMUNDSSON, K. (1979): Outline of the geology of Iceland. – Jokull **29**, S. 7–28
- SCHENATO, L., PALMIERI, L., CAMPORESE, M., BERSAN, S., COLA, S., PASUTO, A., GALTAROSSA, A., SALANDIN, P. & P. SI-MONINI (2017): Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. – *Scientific Reports* 7, S. 14686; https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1

- SIGMUNDSSON, F., EINARSSON, P., HJARTARDÓTTIR, A. R., DROUIN, V., JÓNSDÓTTIR, K., ÁRNADÓTTIR, T., GEIRSSON, H., HREINSDÓTTIR, S., LI, S. & B. ÓFEIGSSON (2020): Geodynamics of Iceland and the signatures of plate spreading. – J. Volcanol. Geoth. Res. **391**, S. 106436; doi:10.1016/j. jvolgeores.2018.08.014
- STACKEBRANDT, W. & D. FRANKE (2015): Die Geologie von Brandenburg. – 805 S., Stuttgart (Schweizerbart)
- SWP (2021): https://www.swp-potsdam.de/tiefengeothermie/
- WANG, H. F., ZENG, X., MILLER, D. E., FRATTA, D., FEIGL, K. L., THURBER, C. H. & R. J. MELLORS (2018): Ground motion response to an ML 4.3 earthquake using co-located distributed acoustic sensing and seismometer arrays. – Geophysical Journal International **213**, S. 2020–2036
- WOLLIN, C., LÜTH, S., LIPUS, M., CUNOW, C., SIEBERT, A., JOUSSET, P., FUCHS, S. & C. M. KRAWCZYK (2021): Vibrator-source exploration seismics in urban environments using DAS, a feasibility study in Potsdam, Germany. – General Assembly Seismol. Soc. America, April 2021, virtual
- WU, H., XIAO, S., LI, X., WANG, Z., XU, J. & Y. RAO (2015): Separation and Determination of the Disturbing Signals in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR). – Journal of Lightwave Technology **33**, S. 3156–3162
- YU, G., CAI, Z., CHEN, Y., WANG, X., ZHANG, Q. & Y. LI (2016): Walkaway VSP using multimode optical fibers in a hybrid wireline. – The Leading Edge **35**, S. 615–619; http://doi.org/10.1190/tle35070615.1

Anschrift der Autorin

Prof. Dr. Charlotte Krawczyk

Helmholtzzentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Telegrafenberg D-14473 Potsdam

und

Technische Universität Berlin Fachgebiet Angewandte Geophysik Ernst-Reuter-Platz 1 D-10587 Berlin

E-Mail: lotte@gfz-potsdam.de

Vergleichende Analyse und Validierung flächenhafter Bewertungsmethoden der Grundwasservulnerabilität am Beispiel Nordost-Brandenburg

Comparative analysis and validation of groundwater vulnerability methods using the example of northeastern Brandenburg

ANTONIA ERBER, STEFAN BRODA, SILVIO JANETZ, MAXIMILIAN NÖLSCHER, ACHIM SCHULTE

Einleitung

Grundwasser ist eine wertvolle natürliche Ressource, die vor einer Verschlechterung und chemischen Verschmutzung geschützt werden muss (EU-GWRL 2006). In diesem Zusammenhang ist die Bewertung der Grundwasservulnerabilität relevant. Das Ziel ist die Ausweisung von Gebieten, die auf natürliche Weise besser bzw. schlechter vor Schadstoffeinträgen durch die Grundwasserüberdeckung geschützt sind (MAGIERA 2000). Diese wird von HÖLTING et al. (1995) als Boden- und Gesteinskörper über dem obersten zusammenhängenden Grundwasserstockwerk definiert, welches für die Erschließung von Grundwasser nutzbar ist. Die Schutzfunktion bewertet die Rückhalteeigenschaften der Grundwasserüberdeckung, während sich die Grundwasservulnerabilität auf die Verschmutzungsempfindlichkeit eines Grundwasserleiters gegenüber anthropogenen Einflüssen bezieht. Beide Bewertungsmethoden beschreiben somit die Gefährdungssituation des vom Nutzer vorgegebenen Bewertungshorizonts (z. B. entweder des obersten Grundwasserleiters oder der darüber liegenden Deckschichten) auf eine unterschiedliche Weise.

Die vorliegende Arbeit stützt sich auf VBRA & ZAPOROZEC (1994). Sie beschreiben die Vulnerabilität als intrinsische Eigenschaft eines Grundwassersystems und dessen Empfindlichkeit gegenüber menschlichen und/oder natürlichen Einflüssen. Grundsätzlich wird die intrinsische von der spezifischen Vulnerabilität unterschieden. Diese Arbeit konzentriert sich auf die intrinsische (= allgemeine oder natürliche) Vulnerabilität, die als unabhängig von einem bestimmten Schadstoff- sowie Verunreinigungsszenario gilt (NEUKUM 2012). Nach SINREICH et al. (2009) gehen in die Bewertung nur dem System inhärente Eigenschaften in Form von pedologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Parametern ein. Die Vulnerabilität wird durch die Grundwasserüberdeckung beeinflusst.

Zur Beurteilung der Grundwasservulnerabilität wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden entwickelt und angewendet. Nach MAGIERA (2000) können diese in fünf Kategorien unterschieden werden: 1. Hydrogeologische Systembetrachtungen

S. 29–44

- 2. Indexverfahren und Analogiemodelle
- 3. Punktbewertungs- und Matrixverfahren
- 4. Mathematische Modelle
- 5. Statistische Verfahren

Bei den hydrogeologischen Systembetrachtungen wird versucht, die Erkenntnisse von einem untersuchten System A auf ein anderes System B zu übertragen, das ähnliche hydrogeologische Charakteristika aufweist. In diese Kategorie zählen zum Beispiel die Arbeiten von MARGAT (1968) und ALBINET & MARGAT (1970).

Bei Indexverfahren und Analogiemodellen werden mathematische Gleichungen zur Erfassung hydrogeologischer Prozesse verwendet, um die Grundwasservulnerabilität zu ermitteln. Ein Indexverfahren ist zum Beispiel der Aquifer Vulnerability Index (AVI) von VAN STEMPOORT et al. (1993). Das Verfahren der DIN 19732 (2011) wird beispielsweise in die Gruppe der Analogiemodelle eingeordnet.

Bei den Punktbewertungs- und Matrixverfahren werden die Eingangsparameter klassifiziert, bewertet und gewichtet bzw. in einer Matrix gegenübergestellt. Ein Matrixverfahren ist zum Beispiel die GOD-Methode von Foster (1987) oder das HK50-Verfahren von VOIGT (1987). Zu den Punktbewertungsmethoden gehören beispielsweise Verfahren wie DRASTIC (ALLER et al. 1987), SINTACS (CIVITA 1994), ISIS (CIVITA & DE REGIBUS 1995), GALDIT (CHACHADI et al. 2003), EPIK (DOERFLIGER et al. 1999), PI (GOLDSCHEIDER et al. 2000), COP (COST 2003) oder die GLA-Methode (HÖLTING et al. 1995).

Mit mathematischen Modellen wird die Grundwasservulnerabilität über die Schadstoffverlagerung bewertet. Bei den statistischen Verfahren wird versucht, die Komplexität der Prozesse zu erfassen, die die Grundwasservulnerabilität beeinflussen. Hierfür kommen beispielsweise Korrelations- und Regressionsanalysen zur Anwendung (MAGIERA 2000). In der Literatur existiert eine Vielzahl an Untersuchungen, die sich mit der Grundwasservulnerabilität befassen. Der Vergleich von verschiedenen Vulnerabilitätsmethoden zeigt, dass oft vergleichbare, mitunter jedoch größere Abweichungen zwischen den Bewertungsergebnissen bestehen (z. B. GOGU et al. 2003, POLEMIO et al. 2009, BRINDHA & ELANGO 2015, LUOMA et al. 2016).

Neben der Vulnerabilitätsbewertung ist die Validierung der Ergebnisse ein wichtiger Bestandteil bei der Ergebnisüberprüfung und -interpretation. Ein einheitliches Verfahren existiert nicht (NEUKUM 2012). Die Validierung kann beispielsweise über Abflussganglinien, hydrochemische Daten, bakteriologische Wasseranalysen, Markierungsversuche, numerische Simulationen oder isotopenhydrologische Analysen erfolgen (DALY et al. 2002, NEUKUM 2012). Die Validierung mit hydrochemischen Daten, insbesondere mit Nitratkonzentrationen, wird am häufigsten angewendet. Beispiele dafür sind die Untersuchungen von KUMAR et al. (2013), OUEDRAOGO et al. (2016) und JARRAY et al. (2017).

Aktuell fordert die europäische Wasserrahmenrichtlinie die Charakterisierung der Grundwasserüberdeckung in den Mitgliedsstaaten (EU-WRRL 2000). Dazu zählt die Bestimmung der Grundwasservulnerabilität der Grundwasserkörper (HEINKELE et al. 2002). Diese Aufgabe wird in Deutschland von den Bundesländern übernommen (BANNICK et al. 2008). Aufgrund der unterschiedlichen angewendeten Methoden, den bundeslandbedingten Anpassungen und verschiedenen Datengrundlagen sind die Ergebnisse deutschlandweit nicht einheitlich. Sichtbar wird dies an den Bundesländergrenzen, wo teilweise Bewertungssprünge auftreten (BGR 2005, BGR & SGD 2021).

Um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Methoden hinsichtlich der Vulnerabilitätsbewertung zu analysieren, konzentriert sich der vorliegende Artikel auf den Vergleich ausgewählter Grundwasservulnerabilitätskarten für ein Untersuchungsgebiet in Brandenburg. Im Untersuchungsgebiet liegen drei verschiedene Vulnerabilitätsbewertungen vor, die auf unterschiedlichen Verfahren basieren. Diese sind:

- Karte der Grundwassergefährdung des Hydrogeologischen Kartenwerks (HK50) der DDR nach dem Matrixverfahren von VOIGT (1987) (HK50-Methode),
- Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung der Hydrogeologischen Karte des Landes Brandenburg (HYK50) nach der Punktbewertungsmethode von HÖLTING et al. (1995) (GLA-Methode),
- Karte der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung (LUGV 2013) nach dem Analogiemodell der DIN 19732 (2011) (DIN-Methode).

Die Methoden wurden ausgewählt, da die Grundwasservulnerabilitätsbewertungen im Untersuchungsgebiet in einem vergleichbaren Bearbeitungsmaßstab vorliegen und deutschlandweit zum Einsatz kommen. Das Ziel der Untersuchung ist, die Unterschiede zwischen den drei Vulnerabi-

litätsbewertungen zu ermitteln und eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den verschiedenen Methoden herzustellen. Außerdem wird der Versuch unternommen, die Ergebnisse zu validieren. Das Ziel der Validierung ist die Überprüfung der Vulnerabilitätsbewertungen mit gemessenen Daten aus dem Untersuchungsgebiet. Dafür werden Parameterkarten des anthropogenen Stoffeintrags (Ammonium, Nitrat, Sulfat) aus dem Gütebericht zur Grundwasserbeschaffenheit des Landesamts für Umwelt Brandenburg (LFU 2015) und Daten zu Grundwasserstandsganglinien (LFU 2018) verwendet. Die Validierung mit Grundwasserstandsganglinien erfolgt mithilfe von Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DwD 2018). Es wird berechnet, mit welcher zeitlichen Verzögerung die Ganglinien auf ein Niederschlagsereignis reagieren. Die Ergebnisse werden den Verweilzeitenklassen der GLA-Methode zugeordnet.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 1) liegt in Nordost-Brandenburg. Es erstreckt sich über die Landkreise Barnim, Märkisch-Oderland, Uckermark und Oberhavel bis an die polnische Grenze. Es liegt ungefähr zwischen 52°40' bis 53°0' nördlicher Breite und 13°30' bis 14°20' östlicher Länge. Die Größe beträgt 1.812 km² und es werden Geländehöhen von 0 bis etwa 155 m ü. NHN erreicht (Abb. 1).

Die glazialen und interglazialen Prozesse im Quartär haben eine insgesamt 100 bis 150 m mächtige Abfolge von Lockergesteinen sowie zwei prägende geomorphologische Formen hinterlassen: Die Hochflächen des Barnim und der Uckermark sowie die Niederungsbereiche des Eberswalder Urstromtals und Oderbruchs (STACKEBRANDT et al. 2010). Die Hochflächen weisen überwiegend bindige Ablagerungen in Form von Geschiebemergeln und -lehmen auf, die zum Teil durch Eisbewegung verursachte Lagerungsstörungen und an den südlichen Randbereichen durch sandig-kiesige Sanderablagerungen charakterisiert sind. Die Hochflächen werden als Grundwasserneubildungsgebiete angesehen. Sie weisen meist bedeckte Grundwasserleiter und gespannte Grundwasserverhältnisse auf. Die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung beträgt im Mittel zwischen 20 und 30 Metern. Der Flurabstand liegt durchschnittlich bei 20 Metern (HERMSDORF et al. 1999, AD-HOC AG HYDROGEOLOGIE 2016). Die Niederungsgebiete stellen ehemalige Schmelzwasserabflussbahnen (Eberswalder Urstromtal) bzw. fluviatile Akkumulationen des Holozäns (Oderbruch) dar. Diese weisen ca. 20 bis 30 Meter mächtige sandig-kiesige Grundwasserleiter auf, die zum Großteil unbedeckt sind und nur lokal eine geringmächtige Bedeckung aus Auenlehmen, Torfen, Mudden, Schluffen oder Tonen aufweisen. Die Niederungsbereiche können als Grundwasserentlastungsgebiete angesehen werden. Der Flurabstand liegt im Mittel bei unter fünf Metern (HOTZAN 1998, HERMSDORF et al. 1999, AD-HOC AG HYDROGEOLOGIE 2016).



Abb. 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets im Nordosten Brandenburgs, Datengrundlage: DGM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), Bundesländer- und Landkreisgrenzen (BKG 2011/2018)
 Fig. 1: Overview map of the study area in the northeast of Brandenburg, data basis: DEM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), borders of federal states and counties (BKG 2011/2018)

Das Untersuchungsgebiet wird durch ein subkontinentales, niederschlagsbenachteiligtes Klima charakterisiert (IFL 2003). Die mittleren Jahresniederschlagswerte liegen für den Nordosten Brandenburgs bei zum Teil unter 500 mm (GERSTENGARBE et al. 2003). Zum größten Teil wird das Untersuchungsgebiet landwirtschaftlich (ca. 50 %) und forstwirtschaftlich (ca. 30 %) genutzt. Geringere Anteile nehmen die Siedlungs- und Verkehrsflächen, Gewässer und sonstige Flächen ein (LBV BRANDENBURG 2013).

Verwendete Grundwasservulnerabilitätsverfahren

Die HK50-Methode fällt nach MAGIERA (2000) in die Kategorie der Matrixverfahren. Die Parameter sind in Klassen definiert, mit denen die Vulnerabilität bewertet wird. Die HK50-Methode liegt in den ostdeutschen Bundesländern als Karte der Grundwassergefährdung des Hydrogeologischen Kartenwerks der DDR im Maßstab 1:50.000 für den ersten süßwasserführenden Grundwasserleiter vor (VOIGT 1987). Die Eingangsparameter bei den Lockergesteinen sind (1) der Flurabstand des Grundwassers und (2) die Mächtigkeit stauender Zwischenschichten ausgedrückt als Prozentanteil bindiger/ stauender Schichten an der ungesättigten Zone. Für den Flurabstand wird bei ungespanntem Grundwasser der Abstand zur Grundwasseroberfläche und bei gespanntem Grundwasser der Abstand zur Grundwasserdeckfläche verwendet (VOIGT 1987, MAGIERA 2000).

Die Bestimmung der Grundwasservulnerabilität erfolgt für Locker- und Festgesteine getrennt. Für beide werden drei Hauptvulnerabilitätsklassen ausgewiesen: A (nicht geschützt), B (relativ geschützt) und C (geschützt). In allen drei Klassen gibt es Unterkategorien.

Die GLA-Methode ist ein Punktbewertungsverfahren (MAGIERA 2000). Im Untersuchungsgebiet wird die GLA-Methode für die Schutzfunktionskarte der Grundwasserüberdeckung der Hydrogeologischen Karte Brandenburgs 1:50.000 (LBGR 2019) verwendet. Die Bewertung der Schutzfunktion bezieht sich auf den obersten angetroffenen Grundwasserleiter. In der Schutzfunktionskarte wird zwischen dem Grundwasserleiterkomplex 1 (mit und ohne Bedeckung) und dem Grundwasserleiterkomplex 2 (wasserwirtschaftlicher Hauptgrundwasserleiter) unterschieden. Die Parameter der GLA-Methode werden klassifiziert und mit einer Punktzahl versehen bzw. gewichtet. Abschließend werden die Punktzahlen aller betrachteter Parameter addiert, um eine Gesamtpunktzahl zu ermitteln. Dieser werden ein Vulnerabilitätsgrad und eine Verweilzeit zugeordnet. Die Vulnerabilitätsbewertung wird für die Boden- und die ungesättigte Zone getrennt vorgenommen. Die Parameter zur Bewertung der Bodenzone sind (1) die nutzbare Feldkapazität und (2) die Sickerwassermenge. Letztere ergibt sich aus der Grundwasserneubildungsrate oder alternativ aus der klimatischen Wasserbilanz. Zur Berechnung der Vulnerabilität der Bodenzone (S1) wird die Punktzahl der nutzbaren Feldkapazität (B) mit dem Faktor der Sickerwassermenge (W) multipliziert:

$$\mathbf{S}_{1} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{W} \tag{1}$$

Bei den Lockergesteinen der ungesättigten Zone wird die Gesteinsart als Parameter verwendet. Die abgeleitete Punktzahl (G) wird mit der jeweiligen Schichtenmächtigkeit (M) multipliziert und zu einer Gesamtpunktzahl aufsummiert. Diese wird mit dem Faktor der Sickerwassermenge (W) multipliziert. Artesische Druckverhältnisse (D) und schwebende Grundwasserstockwerke mit Quellaustritten (Q) können über Punktzuschläge berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (S2) gilt:

$$S_2 = (G_1 \cdot M_1 + G_2 \cdot M_2 + \dots + G_n \cdot M_n) \cdot W + D + Q$$
 (2)

Die errechneten Punktzahlen der Boden- und ungesättigten Zone werden abschließend addiert, um eine Gesamtpunktzahl zu erhalten. Bei der GLA-Methode kommen fünf Klassen zum Einsatz, mittels derer die zugeordnete Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung und Verweilzeit ablesbar ist. Generell gilt: Je höher die Punktzahl, desto länger ist die Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung und desto geringer ist die Vulnerabilität (HÖLTING et al. 1995).

Die DIN-Methode ist ein Analogiemodell (MAGIERA 2000). In der Fassung von 1997 wurde die DIN-Methode zuerst im zweistufigen Vulnerabilitätsbewertungsverfahren von HEINKELE et al. (2002) verwendet. ZEILFELDER et al. (2011) wenden die DIN-Methode später für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern an. In Brandenburg nutzte das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV) die DIN-Methode in der Fassung von 2011 zur Erstellung der Verweilzeitenkarte des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung (LUGV 2013). Die Berechnung der Verweilzeiten bezieht sich auf den wasserwirtschaftlichen Hauptgrundwasserleiter, welcher nicht zwangsläufig der oberste Grundwasserleiter sein muss. Die Vulnerabilität wird nach der DIN-Methode anhand der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung über zwei Formeln abgeleitet. Zunächst wird die Verlagerungsgeschwindigkeit (v.) des Sickerwassers unterhalb der effektiven Durchwurzelungstiefe berechnet. Dafür werden die Sickerwasserrate bzw. die Grundwasserneubildungsrate (SR) und der Volumenanteil an Wasser (V_w) (über die Feldkapazität) benötigt:

$$v_s = SR / V_w$$
(3)

Die berechnete Verlagerungsgeschwindigkeit wird verwendet, um mithilfe der Mächtigkeit der ungesättigten Zone (Z_u) die Verweilzeit des Sickerwassers (t_s) in Jahren zu berechnen:

$$\mathbf{t}_{s} = \mathbf{Z}_{u} / \mathbf{v}_{s} \tag{4}$$

Für Gebiete mit gespanntem Grundwasser erfolgt durch das Lugv (2013) eine Weiterentwicklung der DIN-Methode, da der Verweilzeit der ungesättigten Zone die Zeit für die Passage zwischen der Grundwasserdruckfläche und Grundwasserdeckfläche hinzugerechnet werden muss. Aufgrund der angenommenen Wassersättigung des Porenraums können die Formeln der DIN 19732 nicht übertragen werden. Stattdessen wird über den Durchlässigkeitsbeiwert ($k_{f(z)}$), der durchflusswirksamen Porosität (n_{dw}) und einem hydraulischen Gradienten (i) die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit bzw. vertikale Abstandsgeschwindigkeit v_{a(z)} nach dem Darcy-Gesetz berechnet:

$$\mathbf{v}_{a(z)} = \mathbf{k}_{f(z)} \cdot \mathbf{i} / \mathbf{n}_{dw} \tag{5}$$

Für die Schematisierung der vertikalen Sickerströmung wird ein hydraulischer Gadient von i = 1 [mm/mm] angenommen. Die Zeit (t_s), die für die Passage durch den wassergesättigten Bereich benötigt wird, errechnet sich über die ermittelte Abstandsgeschwindigkeit ($v_{a(z)}$) und Schichtmächtigkeit (M):

$$\mathbf{t}_{s} = \mathbf{M} / \mathbf{v}_{a(z)} \tag{6}$$

Die Ergebnisse der einzelnen Schichten werden aufsummiert. Um die Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung zu bestimmen, werden abschließend die Verweilzeit der ungesättigten Zone und die Zeit der Passage durch den gesättigten Bereich in Gebieten mit gespanntem Grundwasser zusammengeführt (LUGV 2013). Die errechneten Verweilzeiten werden im Rahmen dieser Arbeit nach dem Schema von HÖLTING et al. (1995) in fünf Klassen gruppiert.

Datengrundlage und methodisches Vorgehen

Die Grundlage für diese Arbeit sind die drei existierenden Karten zur Grundwasservulnerabilität. Diese wurden vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) und vom Landesamt für Umwelt (LfU) Brandenburg zur Verfügung gestellt. Während die HK50- und GLA-Daten als Vektordaten vorliegen, wurden die Ergebnisse der DIN-Methode als Rasterdaten geliefert. Für die Validierung werden Grundwasserstandsganglinien des LfU (2018), Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (2018) und die Parameterkarten zum anthropogenen Stoffeintrag des LfU (2015) verwendet. Die parameterbezogene Auswertung der Grundwasserbeschaffenheit für den Hauptgrundwasserleiter wird anhand von Mittelwerten der zuletzt bestimmten Analysen (hier der Jahre 2011/12) für jede einzelne Grundwassermessstelle in der jeweiligen Übersichtskarte dargestellt. Die wesentlichen Bearbeitungsschritte sind:

- · die Reklassifizierung,
- die Gegenüberstellung der Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden,
- der Vergleich der Methoden hinsichtlich der Eingangsparameter und -daten,
- der Validierungsversuch mit Grundwasserstandsganglinien und Parameterkarten zu anthropogenen Stoffeinträgen.

Reklassifizierung

Die Notwendigkeit der Reklassifizierung zur Vereinheitlichung der Ergebnisse wird beispielsweise von GOGU et al. 2003 beschrieben. Um eine einfachere und bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, wird eine Reklassifizierung in fünf einheitlich festgelegte Klassen durchgeführt (sehr geringe, geringe, mittlere, hohe und sehr hohe Vulnerabilität). Diese werden im Anschluss als prozentuale Anteile an der Gesamtfläche des betrachteten Gebiets gegenübergestellt. Die vorliegende Arbeit orientiert sich bei der Darstellung der Reklassifizierungsergebnisse u. a. an der Vorgehensweise von GOGU et al. 2003. Die Reklassifizierung dient dazu, die Ergebnisse der drei Methoden zu vereinheitlichen. Dies ist notwendig, da die aus den einzelnen Bewertungsmethoden resultierende Grundwasservulnerabilität in unterschiedlichen Klasseneinteilungen ausgedrückt wird. Während die HK50-Methode die Klasse A, B, C und deren Unterkategorien nutzt, geben das GLA- und DIN-Verfahren Verweilzeitenklassen an. Die Reklassifizierung wird in fünf Klassen vorgenommen (Tab. 1). Diesen Klassen werden die von Hölting et al. (1995) definierten Verweilzeiten zugeordnet. Bei der HK50-Methode wird das Verfahren des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LFULG 2003) zur Umwandlung der Klassen A, B, C und ihrer Unterkategorien in fünf Vulnerabilitätsklassen zu Hilfe genommen.

Gegenüberstellung der Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden

Über eine Überlagerungsanalyse wird analysiert, wo die Methoden eine übereinstimmende bzw. nicht übereinstimmende Bewertung aufweisen. Um herauszufinden, um wie viele Klassen sich die Methoden bei nicht übereinstimmenden Bewertungen unterscheiden, wird eine Subtraktionsanalyse durchgeführt. In Anlehnung an BRINDHA & ELANGO (2015) werden die Übereinstimmungen bzw. Abweichungen zwischen zwei Methoden als prozentuale Anteile bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets angegeben. Der wesentliche Schritt besteht darin, die reklassifizierten Bewertungskategorien zweier Methoden voneinander zu subtrahieren.

Validierungsversuch mit Grundwasserstandsganglinien

Ein Versuch die Vulnerabilitätskarten zu validieren, erfolgt mit Grundwasserstandsganglinien und Niederschlagsdaten. Es wird berechnet, mit welcher zeitlichen Verzögerung die Ganglinien der jeweiligen Grundwassermessstellen auf ein Niederschlagsereignis reagieren. Die getroffene Annahme lautet: Je größer (kleiner) die zeitliche Verzögerung ist, desto langsamer (schneller) versickert das Niederschlagswasser. Die Grundwasservulnerabilität müsste demnach geringer (höher) sein.

Es werden nur Grundwasserstandsganglinien verwendet, die keine zeitlichen Lücken in der Messwertaufzeichnung aufweisen und sich auf den Hauptgrundwasserleiter beziehen. Insgesamt können 163 Grundwassermessstellen (LFU 2018) berücksichtigt werden. Über Thiessen-Polygone werden die Ganglinien den 21 relevanten Niederschlagsstationen (DwD 2018) zugeordnet. Für die Berechnung der zeitlichen Verzögerung müssen die Zeiträume der Grundwasserstandsganglinien auf die Zeitspannen der Niederschlagsdaten zugeschnitten werden. Die mithilfe eines in R implementierten Algorithmus berechneten Verzögerungen werden in Monaten angegeben. In Anlehnung an die Verweilzeiten der GLA-Methode werden die Verzögerungen klassifiziert. Die berechneten Verzögerungen fallen in die drei Kategorien: ≤ 1 Jahr, > 1 bis 3 Jahre und > 3bis 10 Jahre. Die Klassifizierung wird durchgeführt, um den Vergleich zwischen den errechneten Verzögerungen und den Vulnerabilitätsbewertungen zu vereinfachen. Die Grundwassermessstellen mit den berechneten Verzögerungen werden mit den Vulnerabilitätskarten verschnitten. Für jede Messstelle ist ablesbar, wie die Vulnerabilität bewertet wird und welche Verzögerung berechnet wurde.

Reklassifizierung	Beschreibung der Klassen	Verweilzeiten (verändert nach Hö∟тıng et al. 1995)	
Klasse 1	sehr geringe Vulnerabilität	> 25 Jahre	
Klasse 2	geringe Vulnerabilität	> 10-25 Jahre	
Klasse 3	mittlere Vulnerabilität	> 3–10 Jahre	
Klasse 4	hohe Vulnerabilität	> 1-3 Jahre	
Klasse 5	sehr hohe Vulnerabilität	≤ 1 Jahr	

Tab. 1: Reklassifizierte Vulnerabilitätsklassen, deren Beschreibung und zugeordnete Verweilzeiten

Tab. 1: Reclassified vulnerability classes, their description and associated residence times

Validierungsversuch mit Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge

Für einen weiteren Validierungstest werden die Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge verwendet; in diesem Fall sind die betrachteten Parameter: Ammonium, Nitrat und Sulfat. Die gemessenen Konzentrationen stehen für 119 Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Für die Stoffe werden nach der Grundwasserverordnung (GRwV 2010) Schwellenwerte angegeben (Ammonium: 0,5 mg/l, Nitrat: 50 mg/l, Sulfat: 240 mg/l) (LfU 2015). Es wird untersucht, ob die Grundwassermessstellen mit schwellenwertüberschreitenden Konzentrationen in vulnerabel bewerteten Gebieten liegen. Dabei gilt: Ist die Konzentration der Stoffe größer oder gleich der Schwellenwerte, sind sie als schwellenwertüberschreitend einzuordnen. Die Ergebnisse der Grundwassermessstellen werden mit den Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden verschnitten. Für jede Messstelle ist ablesbar, wie die Vulnerabilität bewertet wird.

Ergebnisse

Methodenvergleich

Der Vergleich der Methoden erfolgt hinsichtlich der Eingangsparameter und -daten. Dafür werden die Informationen aus der Literatur zusammengetragen. Die Tab. 2 zeigt, welche Parameter bei den Methoden für das Untersuchungsgebiet eingehen. Es ist ersichtlich, dass alle Methoden die Lithologie der ungesättigten Zone, den Grundwasserflurabstand und die Mächtigkeit als Eingangsparameter

verwenden. Während die Mächtigkeit bei der GLA- und DIN-Methode als Wert eingeht, sind bei der HK50-Methode Klassen definiert. Alle Verfahren berücksichtigen die Druckverhältnisse. In Form von festgelegten Klassen wird bei der HK50-Methode zwischen gespanntem und ungespanntem Grundwasser differenziert. Bei der GLA-Methode können artesische Druckverhältnisse als Punktzuschlag einbezogen werden. Beim vom LUGV (2013) weiterentwickelten DIN-Ansatz werden Gebiete mit gespanntem Grundwasser gesondert berücksichtigt. Die Grundwasserneubildungsrate wird sowohl bei der DIN- als auch bei der GLA-Methode verwendet. Letztere bezieht sie als Gewichtungsfaktor in die Berechnung mit ein. Beim DIN-Verfahren geht die Grundwasserneubildungsrate als Quotient ein. Alle anderen dargestellten Parameter werden jeweils nur von einer Methode berücksichtigt.

Neben dem Vergleich der Eingangsparameter müssen die Eingangsdaten betrachtet werden. Für die HK50-Methode liegen keine detaillierten Informationen über die Eingangsdaten vor. Als Hauptdatengrundlage werden von VOIGT (1987) die Hydrogeologische Grundkarte und die Karte der hydrogeologischen Kennwerte für alle Parameter benannt. Beide Karten beruhen auf der Lithofazieskarte Quartär 1:50.000 (СЕРЕК 1968, СЕРЕК 1999).

Für die Vulnerabilitätsbewertung nach der GLA-Methode werden die Eingangsdaten vom LBGR (2001) beschrieben. Für die Bewertung der Mächtigkeit, Druckverhältnisse, Lithologie und schwebenden Grundwasserstockwerke werden hauptsächlich Bohrungsdaten verwendet. Teilweise kommen ergänzend die Geologische Karte 1:25.000 und die Hydrogeologische Karte 1:50.000 zum Einsatz. Die

Eingangsparameter	HK50-Methode	GLA-Methode	DIN-Methode
Lithologie (ungesättigte Zone)	Х	x	х
Mächtigkeit	Х	х	х
Flurabstand	Х	х	х
Druckverhältnisse	Х	х	Х
Grundwasserneubildungsrate		х	х
nutzbare Feldkapazität		х	
schwebende Grundwasserstockwerke mit Quellaustritten		x	
Feldkapazität			х
Lithologie (gesättigte Zone)			Х
durchflusswirksame Porosität			х
Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert)			Х
Gradient zur Schematisierung des Fließgefälles			X

Tab. 2: Eingangsparameter für das Lockergestein und das Untersuchungsgebiet

 Tab. 2:
 Input parameters for the unconsolidated rock and the study area

Werte für die nutzbare Feldkapazität und Grundwasserneubildungsrate wurden aus HÖLTING et al. (1995) entnommen und für Brandenburg angepasst. Die Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung im Maßstab 1:50.000 wurde digital auf Grundlage der Bohrungsdaten erstellt und anschließend vom Kartenbearbeiter flächenhaft extrapoliert. Die Erstellung der Vulnerabilitätskarte nach der DIN-Methode wird im Bericht des LUGV (2013) beschrieben.

Reklassifizierung

Die Ergebnisse der Reklassifizierung zeigt die Abb. 2. Es wird ersichtlich, dass die Methoden zum Teil ähnliche, mitunter aber sehr verschiedene Vulnerabilitätsbewertungen für gleiche Gebiete ergeben.

Die HK50-Methode bewertet einen Flächenanteil von rund 32 % der Gesamtfläche mit einer mittleren Vulnerabilität in den Niederungsgebieten. Der südöstliche Teil des Oderbruchs sowie das Eberswalder Urstromtal werden mit einer sehr hohen Vulnerabilität (Klasse 5) charakterisiert. Die Hochflächen sind zu 33 % durch eine geringe bis sehr geringe Vulnerabilität (Klassen 1 und 2) gekennzeichnet.

Bei der GLA-Methode wird das Untersuchungsgebiet insgesamt stärker vulnerabel klassifiziert. Die Klasse 5 nimmt die größte Fläche ein (\approx 36 %) und erstreckt sich von den nordwestlichen Bereichen der Uckermarkhochfläche über das Urstromtal bis in den Oderbruch. Die zweitgrößte Fläche nimmt die Klasse 2 mit ca. 22 % ein. Sie befindet sich auf den Hochflächen.

Die DIN-Methode bewertet das Untersuchungsgebiet nahezu flächendeckend als gering bis sehr gering vulnerabel. Die Klassen 1 und 2 nehmen dabei fast 70 % der Gesamtfläche ein. Teilweise werden die Niederungsbereiche vulnerabler eingeschätzt. Im Unterschied zur HK50- und GLA-Methoden werden die Gewässer nicht als separate Klasse ausgewiesen, sondern fallen überwiegend in die Klasse 5.

Gegenüberstellung der Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden

Durch die Überlagerungsanalyse wird sichtbar, wo zwei Methoden eine übereinstimmende bzw. nicht übereinstimmende Bewertung aufweisen. Bei der Subtraktionsanalyse wird ermittelt, um wie viele Klassen sich die Bewertungen der betrachteten Methoden unterscheiden. Die Ergebnisse zeigt zusammengefasst für beide Analysen die Tab. 3. In der Abb. 3 werden die Subtraktionsergebnisse graphisch dargestellt.

Die HK50- und GLA-Methode weisen rund 39 % der Gesamtfläche mit einer übereinstimmenden Bewertung aus. Für die nicht übereinstimmenden Bewertungen zeigt sich, dass die HK50-Methode zum größten Teil (≈ 23 %) eine Klasse (-1) niedriger als der GLA-Ansatz bewertet. Das bedeutet, wenn die GLA-Methode die Klassen 5, 4, 3, 2 vergibt, weist die HK50-Methode entsprechend die Klassen 4, 3, 2, 1 aus. Die HK50-Methode bewertet die Vulnerabilität geringer. Wird dies räumlich verortet, fällt auf, dass die Klasse -1 sowohl auf den Hochflächen als auch in den Niederungsbereichen auftritt. Werden alle Ergebnisse betrachtet, wird ersichtlich, dass die HK50-Methode für alle Subtraktionskategorien (-4/4, -3/3, -2/2, -1/1) einen größeren Anteil in der negativen Richtung aufweist, d. h. die Vulnerabilität geringer einstuft.

Die Gegenüberstellung der HK50- mit der DIN-Methode zeigt, dass rund 22 % der Gesamtfläche übereinstimmend bewertet werden. Den größten Anteil bei den nicht übereinstimmenden Bewertungen hat die Subtraktionsklasse 2 (≈ 27 %). Dies bedeutet, dass die HK50-Methode die Vulnerabilität je zwei Klassen über der DIN-Bewertung einschätzt. Wenn die HK50-Methode die Klassen 5, 4, 3 ausweist, bewertet das DIN-Verfahren die Vulnerabilität mit 3, 2, 1. Werden alle Ergebnisse betrachtet, wird deutlich, dass die HK50-Methode gegenüber der DIN-Methode die Vulnerabilität stets höher einschätzt, da die positiven Subtraktionsklassen (1–4) einen größeren Flächenanteil einnehmen. Im südöstlichen Bereich des Oderbruchs sind die Abweichungen mit 4 Klassen besonders hoch.

Der Vergleich zwischen der GLA- und DIN-Methode zeigt eine Übereinstimmung beider Methoden für etwa 22 % der Gesamtfläche an. Der größte Anteil (je \approx 23 %) wird vom GLA-Verfahren um eine bzw. zwei Klassen höher eingeschätzt. Die Gesamtbetrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die GLA-Methode bei allen Subtraktionsklassen einen größeren Flächenanteil in der positiven Richtung aufweist. Dies spiegelt sich tendenziell im gesamten Untersuchungsgebiet wider.

Ergebnisse der Validierungsversuche

Die Ergebnisse der Validierungsversuche mit Grundwasserstandsganglinien und den Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge fallen nicht wie erwartet aus. Der Grund dafür ist die relativ geringe Übereinstimmung zwischen den Grundwasservulnerabilitätsbewertungen und den Ergebnissen der Grundwasserstandsganglinien bzw. Parameterkarten.

Bei den Grundwasserstandsganglinien zeigt Abb. 4 die räumliche Verteilung der errechneten Verzögerungen, die anzeigen, wie schnell die Grundwasserganglinien auf ein Niederschlagsereignis reagieren. In den Niederungsbereichen liegen hauptsächlich die Grundwassermessstellen mit Verzögerungen von > 1 bis 3 Jahren und > 3 bis 10 Jahren. Die Mehrheit der Messstellen in den Niederungsbereichen und auf den Hochflächen weist jedoch eine Verzögerung von unter einem Jahr auf. Dies entspricht jedoch mögli-



Abb. 2: Reklassifizierungsergebnisse und Prozentanteile der Bewertungsklassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets, G: Gewässer, o. n. GW: ohne nutzbare Grundwasserführung

Fig. 2: Reclassification results and the percentage of rating classes in the study area, G: water bodies, o. n. GW: no usable groundwater
e	%	%	%			
ohne Angab	2,35	4,7	3,2			A Total
4	0,1%	1,5%	5,4%		e (III)	Ofenite
ო	0,5%	7,5%	17,7%		DIN-Method	Irkhochfläche hochfläche
2	4,4%	27,1%	22,5%		on: GLA- und	Uckerma alder Urstrom Barnim
~	12,5%	25,7%	22,7%	ts.	Subtraktic	Eleast
0	39,2%	22,2%	21,7%	rsuchungsgebie		
7	23,3%	6,3%	4,6%	läche des Unte	DIN-Methode (II	ochliache
	13,5%	4,2%	1,6%	ie Gesamtfi study area	HK50- und I	Uckermarkh Urstromtal
ကု	3,5%	0,5%	0,4%	o the whole	Subtraktion:	Eberswalde
-4	0,7%	0,3%	0,2%	e Anteile be ge related ti		
abweichenden Vulnerabilitätsklassen	node im Vergleich zur GLA-Methode	node im Vergleich zur DIN-Methode	ode im Vergleich zur DIN-Methode	Subtraktionsergebnisse als prozentuale Subtraction results shown as percentag	tion: HK50- und GLA-Methode (I)	Uckermarkhochfläche swalder Urstromfal Barnimhochfläche
Anzahl de	HK50-Met	HK50-Met	GLA-Meth	lab. 3: lab. 3:	Subtral	Ebe

nicht geschützt/stärker vulnerabel →

übereinstimmend

← geschützt/wenig vulnerabel



ohne Angabe

4

Э

2

0

7

2

ကို

4

 \leftarrow Anzahl der abweichenden Vulnerabilitätsklassen \rightarrow



Abb. 4: Messstellen der Grundwasserstandsganglinien und die berechneten Verzögerungen auf ein Niederschlagsereignis (eigene Darstellung), Datengrundlage: DGM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), Grundwasserstandsganglinien (LfU 2018)

Fig. 4: Measuring points of hydrographs of groundwater levels and the calculated lags (own map), data basis: DEM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), hydrographs of groundwater levels (LfU 2018)

cherweise nicht den erwarteten regionalen hydrogeologischen Gegebenheiten. Insbesondere für die Hochflächen wurde angenommen, dass längere Verzögerungen berechnet werden und damit eine stärkere Differenzierung zwischen Niederungsbereichen und Hochflächen erkennbar ist. Die Gegenüberstellung mit den Vulnerabilitätsbewertungen der drei Methoden ergibt in der Folge nur bedingt Übereinstimmungen mit den berechneten Verzögerungen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die größte Übereinstimmung zwischen den berechneten Verzögerungen und der GLA-Methode bestehen.

Für die Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge zeigt Abb. 5, bei welchen Grundwassermessstellen eine Schwellenwertüberschreitung bei mindestens einem der betrachteten Stoffe (Ammonium, Nitrat, Sulfat) feststellbar ist. Die Mehrheit der Messstellen mit Schwellenwertüberschreitungen liegt in den Niederungsbereichen, vor allem im Oderbruch. Auf den Hochflächen finden sich nur vereinzelt Messstellen, an denen der Schwellenwert der Grundwasserverordnung (GRWV 2010) überschritten wird. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Vulnerabilitätsbewertungen deutet an, dass die größten Übereinstimmungen mit der GLA-Methode bestehen. Dies wird damit begründet, dass die Mehrheit der Grundwassermessstellen mit Schwellenwertüberschreitungen in (sehr) hoch vulnerabel bewertete Gebiete fallen bzw. viele der Messstellen ohne Schwellenwertüberschreitung in gering vulnerabel bewertete.

Diskussion

Unterschiede zwischen den Vulnerabilitätsbewertungen

Die Vulnerabilität des Untersuchungsgebiets wird vom GLA-Ansatz tendenziell als hoch und von der HK50-Methode als mittel bewertet. Die DIN-Methode zeigt nahezu flächendeckend eine geringe bis sehr geringe Vulnerabilität. Räumlich gesehen, werden die Niederungsbereiche mit einer höheren Vulnerabilität ausgewiesen. Die hydrogeologischen Gründe dafür sind die sandig-kiesigen Ablagerungen, die oftmals fehlenden stauenden Deckschichten und der geringere Grundwasserflurabstand. Im Gegensatz dazu werden die Hochflächen mit einer geringeren Vulnerabilität bewertet. Hydrogeologisch kann dies durch die bindigen Ablagerungen, die mächtigere Überdeckung und den größeren Grundwasserflurabstand erklärt werden. Insgesamt ist die räumliche Abgrenzung der Niederungsgebiete und Hochflächen durch die unterschiedlichen Vulnerabilitätsbewertungen am deutlichsten beim GLA-Verfahren und teilweise bei der HK50-Methode zu erkennen. Bei der DIN-Methode sind die Grenzen nur ansatzweise sichtbar, da flächendeckend eine geringe Vulnerabilität ausgewiesen wird.

Durch die Überlagerungs- und Subtraktionsanalyse wird ermittelt, dass die HK50- und GLA-Methode die größte Übereinstimmung in ihrer Bewertung haben. Dies erklärt sich durch die ähnliche Charakterisierung der Hochflä-



Abb. 5: Messstellen der anthropogenen Schadstoffeinträge mit und ohne Schwellenwertüberschreitung bei mindestens einem der betrachteten Stoffe (Ammonium, Nitrat, Sulfat) (eigene Darstellung), Datengrundlage: DGM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF (LBGR 2018), anthropogene Stoffeinträge (LfU 2018)

Fig. 5: Measuring points of anthropogenic pollution inputs with and without exceeding the limit values for at least one of the considered substances (ammonium, nitrate, sulphate) (own image), data basis: DEM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF (LBGR 2018), anthropogenic pollution inputs (LfU 2018)

chen und Niederungsbereiche. Im Gegensatz dazu weisen die HK50- und DIN-Methode bzw. GLA- und DIN-Methode geringe Übereinstimmungen auf. Dies wird mit der überwiegend gering eingeschätzten Vulnerabilität durch die DIN-Methode erklärt, welche von den beiden anderen Methoden abweicht. Vor allem in den Niederungsbereichen werden die Unterschiede zwischen den Methoden sichtbar.

Gründe für die Unterschiede der Vulnerabilitätsbewertungen

Für die Unterschiede lassen sich vier Gründe bestimmen: (1) die Vorgehensweise der Methoden, (2) die Eingangsparameter, (3) die Eingangsdaten und (4) die Subjektivität bei Entscheidungen in der Methodenanwendung.

Die Vorgehensweise ist bei allen Methoden unterschiedlich. Die HK50-Methode ist ein Matrixverfahren und basiert auf fest definierten Klassen. Die GLA-Methode ist ein Punktbewertungsverfahren, bei dem der errechneten Gesamtpunktzahl eine Verweilzeit zugewiesen wird. Der DIN-Ansatz ist ein Analogiemodell und berechnet die Verweilzeit. Die unterschiedliche Vorgehensweise und der sich daraus ergebende unterschiedliche Einfluss der Parameter werden von HEINKELE et al. (2002) für die GLA- und DIN-Methode untersucht. Anhand eines Beispiels stellen sie fest, dass sich die Ergebnisse sogar bei gleichen Eingangsdaten unterscheiden. Die GLA-Methode leitet für Grundwasserneubildungsraten von 300 mm und 50 mm jeweils eine Verweilzeit von 3–10 Jahren ab. Die DIN-Methode berechnet hingegen fünf Jahre (300 mm) und 30 Jahre (50 mm). HEINKELE et al. (2002) bemerken weiterhin, dass der GLA-Ansatz die Verweilzeit in den Neubildungsgebieten tendenziell um eine bzw. zwei Klassen niedriger einschätzt als die DIN-Methode. Die Ursache führen sie auf die unterschiedliche Berechnung der Verweilzeit zurück. Während bei der DIN-Methode die Grundwasserneubildungsrate als Quotient eingeht, wird sie nach Höllting et al. (1995) in einen Faktor umgewandelt. Der Einfluss der Grundwasserneubildungsrate wird vom GLA-Verfahren abgeschwächt und unterschätzt (HEINKELE et al. 2002).

Ein weiterer Grund für die Abweichungen zwischen den Methoden sind die unterschiedlichen Parameter. Während beispielsweise die Parameter Lithologie oder Mächtigkeit bei allen Methoden verwendet werden, wird die Grundwasserneubildungsrate nicht bei allen Bewertungsverfahren berücksichtigt.

Die Hauptursache für die Unterschiede ist die verwendete Datengrundlage. Im Untersuchungsgebiet wird beispielsweise die Mächtigkeit bei der HK50-Methode über die zugrunde gelegten Karten abgeleitet. Beim GLA-Verfahren wird sie über Bohrungsdaten und die geologische Karte ermittelt. Die DIN-Methode berechnet die Mächtigkeit über ein digitales Geländemodell und einen Grundwassergleichenplan. In der Folge ergeben sich unterschiedliche Mächtigkeitswerte, die die Vulnerabilitätsbewertung beeinflussen. Außerdem kommt es zu subjektiven, vom jeweiligen Bearbeiter bzw. regionalen Hydrogeologen abhängigen Entscheidungen bei der Methodenanwendung, die Einfluss auf das jeweilige Ergebnis und somit auf die Vergleichbarkeit mit anderen bewerteten Regionen haben.

Vergleichbarkeit zwischen der HK50-, GLA- und DIN-Methode

Eine Vergleichbarkeit kann nur erreicht werden, wenn die Methoden in ein einheitliches Bewertungsschema überführt werden. Dafür wurde die Reklassifizierung eingesetzt. Grundsätzlich gibt es dafür verschiedene Möglichkeiten. In der vorliegenden Arbeit wurde sie in Form von fünf Klassen vorgenommen. Die Ergebnisse basieren auf dieser Reklassifizierungsart. Damit hat sie einen maßgeblichen Einfluss auf die getroffenen Aussagen. Kritisch sei angemerkt, dass die Reklassifizierung in fünf Klassen eine unscharfe Grenze zwischen den Kategorien mit sich bringt. Die Differenzierung in "sehr geringe" bzw. "geringe" oder vergleichbar "hohe" bzw. "sehr hohe" Vulnerabilität ist nicht eindeutig. Dennoch wird diese Unterteilung in der Literatur, beispielsweise von NEUKUM & HÖTZL (2006), angewendet.

Für die statistische Analyse wurden die Überlagerungsund Subtraktionsanalysen durchgeführt, mit denen die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Methoden herausgearbeitet wurden. Für die Vergleichbarkeit der Methoden sind die Gegenüberstellung der Eingangsparameter und -daten sowie die Einflussweise der Parameter wichtig. Nur so kann beurteilt werden, worin (abgesehen von den Vulnerabilitätsergebnissen) und warum die Unterschiede bestehen.

Validierungsversuche mit Grundwasserstandsganglinien und Parameterkarten des anthropogenen Stoffeintrags

Die Ergebnisse der Validierungsversuche zeigen, dass die Vulnerabilitätsbewertungen nur ansatzweise mit den gemessenen Daten im Untersuchungsgebiet übereinstimmen. Es deutet sich an, dass davon die größte Übereinstimmung mit der GLA-Methode besteht. Im räumlichen Vergleich weisen die Niederungsbereiche tendenziell eine größere Übereinstimmung auf. Auf den Hochflächen, insbesondere bei dem Validierungstest mit den Grundwasserstandsganglinien, weichen die Ergebnisse deutlich voneinander ab. Die gering berechneten Verzögerungen passen nicht mit den hydrogeologischen Gegebenheiten zusammen. So deuten große Flurabstände bzw. eine mächtigere Grundwasserüberdeckung sowie gespannte Verhältnisse im Bereich der Hochflächen auf längere Verweilzeiten hin.

Als mögliche Gründe können bei den Grundwasserstandsganglinien Undichtigkeiten des Ringraums, Fehler bei der Zuordnung der Grundwasserleiter, die Zuord-

nung der Ganglinien und Niederschlagsstationen nach den Thiessen-Polygonen, die Zuordnung der Niederschlagsereignisse sowie die Problematik der nicht in die Bewertung einfließenden Grundwasserdynamik (Ort des Eintrags ist nicht notwendigerweise Ort der Schwellenwertüberschreitung) angeführt werden. Bei den Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge wurde nur zwischen Überschreitung und keiner Überschreitung des Schwellenwerts unterschieden. Erhöhte Stoffkonzentrationen, die noch unter dem Schwellenwert liegen, wurden nicht berücksichtigt. Eine feinere Differenzierung könnte andere Ergebnisse liefern. Möglicherweise ergäbe sich daraus eine größere bzw. geringere Übereinstimmung mit den Vulnerabilitätsbewertungen. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass beispielsweise der Abbau von Schadstoffen relevant ist und die Ergebnisse beeinflusst. In den Vulnerabilitätsbewertungen werden diese Prozesse nicht berücksichtigt.

Ein Problem in beiden Validierungsverfahren ist die schwierige Vergleichbarkeit zwischen qualitativ arbeitenden Matrix- und Punktbewertungsverfahren und quantitativen Daten. Ein direkter Vergleich zwischen den Karten und Daten ist nicht möglich, da ordinale Vulnerabilitätsklassen und physikalische Größen aufeinandertreffen. Nur über Annahmen können Aussagen getroffen werden (NEUKUM 2012), beispielsweise die Annahme, dass die schwellenwertüberschreitenden Konzentrationen in vulnerabel ausgewiesenen Gebieten liegen sollten.

Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit werden die Vulnerabilitätsbewertungen der HK50-, GLA- und DIN-Methode am Beispiel eines Untersuchungsgebiets im Nordosten Brandenburgs verglichen. Ein wichtiger Schritt für den Vergleich ist die Reklassifizierung der Vulnerabilitätsklassen, der in fünf Klassen vorgenommen wird. Die Gegenüberstellung der reklassifizierten Daten zeigt, dass zwischen den Methoden zum Teil deutliche Abweichungen bestehen. Das DIN-Verfahren bewertet die Vulnerabilität fast flächendeckend gering. Die HK50-Methode weist tendenziell eine mittlere Vulnerabilität aus und die GLA-Methode schätzt sie eher hoch ein. Räumlich werden die Niederungsbereiche eher vulnerabel und die Hochflächen weniger vulnerabel eingestuft. Dies lässt sich auf die hydrogeologischen Gegebenheiten zurückführen.

Begründet werden die Abweichungen mit der jeweiligen methodischen Vorgehensweise, den verschiedenen Eingangsparametern und -daten sowie den subjektiven Einschätzungen. Um die teilweise deutlichen Unterschiede zwischen den Vulnerabilitätsbewertungen zu überwinden und auf nationaler Ebene eine Vergleichbarkeit zu schaffen, wird empfohlen, die Datengrundlage zu harmonisieren. Beispielsweise könnte in Abstimmungsprozessen länderübergreifend geklärt werden, welche Daten (nicht) zur Verfügung stehen, welche Maßstäbe verwendet werden, ob Vektor- oder Rasterdaten zum Einsatz kommen, welche Modelle zur Ableitung von Parametern genutzt werden etc. Insbesondere an Bundesländergrenzen ist die Abstimmung wichtig, damit keine durch Eingangsdaten verursachten Bewertungssprünge bei der Vulnerabilitätseinschätzung auftreten.

Beide Validierungsversuche zeigen, entgegen der Erwartung, nur ansatzweise Übereinstimmungen zwischen den gemessenen Daten im Untersuchungsgebiet und den Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden. Als mögliche Gründe werden beispielsweise Undichtigkeiten im Ringraum der Grundwassermessstellen, Fehler bei der Zuordnung der Grundwasserleiter und die fehlende Berücksichtigung von Schadstoffabbauprozessen benannt. Die Ergebnisse der Validierungsversuche verdeutlichen die Schwierigkeit, qualitative Vulnerabilitätsmethoden mit quantitativen Daten zu vergleichen. Gleichzeitig zeigen sie für das Untersuchungsgebiet die Notwendigkeit, die Validierungsversuche auszubauen. Beispielsweise könnte bei den anthropogenen Stoffeinträgen der Frage nachgegangen werden, wie sich eine stärkere Differenzierung der Werte in geringe, hohe und schwellenwertüberschreitende Konzentration auf den Vergleich mit den Vulnerabilitätsbewertungen auswirkt. Für zukünftige Arbeiten bietet daher vor allem die Validierung Anknüpfungspotential.

Zusammenfassung

Für ein Untersuchungsgebiet in Nordost-Brandenburg werden drei Grundwasservulnerabilitätsmethoden verglichen. Untersucht werden die HK50-Methode nach dem Matrixverfahren von VOIGT (1987), die GLA-Methode nach dem Punktbewertungssystem von HÖLTING et al. (1995) und die DIN-Methode nach dem Analogiemodell der DIN 19732 (2011).

Der Kartenvergleich zeigt teilweise deutliche Unterschiede in der Vulnerabilitätseinschätzung, die hauptsächlich auf eine inhomogene Datengrundlage und methodische Unterschiede zurückzuführen sind. Während beim Matrix- und Punktbewertungsverfahren ca. 39 % der Gesamtfläche übereinstimmend bewertet werden, zeigt die Gegenüberstellung beider Methoden mit dem Analogiemodell eine Übereinstimmung von nur etwa 22 %. Das Punktbewertungssystem zeigt für das Untersuchungsgebiet eine hohe, das Matrixverfahren eine mittlere und das Analogiemodell eine geringe Vulnerabilität.

Die Validierung der Vulnerabilitätsbewertungen erfolgt mithilfe des Niederschlags- bzw. Ganglinienverhaltens an 163 Grundwassermessstellen und der Beurteilung von anthropogenen Stoffeinträgen an 119 Grundwassergütemessstellen.

Um die Vulnerabilitätsbewertungen auf nationaler und internationaler Ebene zukünftig besser vergleichen zu können, wird empfohlen, die Datengrundlage zu harmonisieren.

Summary

Three groundwater vulnerability methods are compared for a study area in northeastern Germany: the HK50 method based on the matrix method of VOIGT (1987), the GLA method according to the point-count system of HÖLTING et al. (1995) and the DIN method based on the analogue model of DIN 19732 (2011).

The vulnerability maps differ due to inhomogeneous data and methodological differences. While the matrix and point-count system, indicate a similar vulnerability assessment for 39 % of the study area, the comparison with the analogue model shows an agreement of 22 %. The point-count system shows a high, the matrix method a medium and the analogue model a low vulnerability for the study area.

Precipitation data, hydrographs from 163 and anthropogenic pollutant inputs from 119 groundwater-monitoring stations are used for validation.

To improve the comparability of future vulnerability assessments at a national and international level, it is recommended to harmonise the data basis.

Danksagung

Für die Bereitstellung der Daten und Informationen danken wir Frau Hermsdorf vom Landesamt für Umwelt Brandenburg.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland – Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. 456 S.; Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 163, Hannover
- ALBINET, M. & J. MARGAT (1970): Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. Bull. BRGM, zéme série, section 3 4, 13–22
- ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J. H., PETTY, R. H., HACKETT, G. (1987): DRASTIC – a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. Environmental Protection Agency, 600/2-87/035, 641 S.
- BANNICK, C., ENGELMANN, B., FENDLER, R., FRAUENSTEIN, J., GINZKY, H., HORNEMANN, C., ILVONEN, O., KIRSCHBAUM, B., PENN-BRESSEL, G., RECHENBERG, J., RICHTER, S., ROY, L., WOLTER, R. (2008): Grundwasser in Deutschland. https://www.umweltbundesamt.de/sites/ default/files/medien/publikation/long/3642.pdf. Zugegriffen am: 05. August 2019

- BGR & SGD (2021): Prüfung der Methoden zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung hinsichtlich Anwendbarkeit, verfügbarer Datengrundlagen, Fortentwicklungsbedarf. – Abschlussbericht der AG Hydrogeologie. https://www.infogeo.de/Infogeo/ DE/BIZ/Downloads/AG_hydrogeologie_AA-HY2_abschlussbericht.zip?__blob=publicationFile&v=4 zugegriffen am 20.09.2021
- BGR (2005): Europäische Wasserrahmenrichtlinie. Charakterisierung der Deckschichten. https://www.bgr.bund.de/ DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/Beratung/ Sgwu/sgwu_karte.pdf?__blob=publicationFile&v=5. Zugegriffen am: 05. August 2019
- BRINDHA, K. & L. ELANGO (2015): Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. Journal of Hydrology 524, 597–613
- CEPEK, A. G. (1968): Projekt Lithofazieskarte Quartär für die angewandte Geologie. 178 S.; Zentrales Geologisches Institut (ZGI), Berlin
- CEPEK, A. G. (1999): Die Lithofazieskarten Quartär 1:50000 (LKQ 50) – eine Erläuterung des Kartenkonzepts mit Hinweisen für den Gebrauch. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 6/2, 3–38
- CHACHADI, A. G., LOBO-FERREIRA, J. P., NORONHA, L., CHOUDRI, B. S. (2003): Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal aquifers using GALDIT, APRH/CEAS. Seminário Sobre Águas Subterrâneas, Lisbon
- CIVITA, M. (1994): Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria & practica (Aquifer vulnerability maps to pollution). Pitagora Ed, Bologna
- CIVITA, M. & C. DE REGIBUS (1995): Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli aquiferi. Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Ed. Bologna, 3, 63–71
- Cost (2003): Action 620 Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. European Commission, Directorate-General for Research, EU-Report 20912, Luxemburg
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHEIDER, N., NEALE, S., POPESCU, I. C., ZWAHLEN, F (2002): Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal 10, 340–345
- DIN 19732 (2011): Bodenbeschaffenheit Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbierbaren Stoffen. 12 S.; Deutsches Institut für Normung, Berlin

- DOERFLIGER, N., JEANNIN, P.-Y., ZWAHLEN, F. (1999): Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology, 39(2), 165–176
- DwD (2018): CDC Climate Data Center. Niederschlagsdaten Brandenburg. https://cdc.dwd.de/portal/201912031600/ view1. Zugegriffen am: 29. November 2018
- EU-GWRL (2006): Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung.- Amtsblatt Nr. L 372 vom 27/12/2006, S. 0002–0018
- EU-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.- Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000, S. 0001–0073
- FOSTER, S. S. D. (1987): Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: VAN DUIJVENBOODEN, W., VAN WAEGENINGH, H. G. (Hrsg.): Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, international conference, Noordwijk aan Zee, the Netherlands, 69–86
- GERSTENGARBE, F.-W., BADECK, F., HATTERNMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F., WERNER, P. C. (2003): PIK Report 83: Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. https://www.pik-potsdam. de/4c/web_4c/publications/pik_report_83.pdf. Zugegriffen am: 05. August 2019
- GOGU, R. C., HALLET, V., DASSARGUES, A. (2003): Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). Environmental Geology 44, S. 881–892
- GOLDSCHEIDER, N., KLUTE, M., STURM, S., HÖTZL, H. (2000): The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Zeitschrift für angewandte Geologie, 46(3), 157–166
- GRWV (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers vom 09.11.2010 (Grundwasserverordnung). Bundesministeriums der Justiz, Berlin.
- HEINKELE, T., VOIGT, H.-J., JAHNKE, C., HANNAPPEL, S., DONAT, E. (2002): Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern. Forschungsbericht 299 22 278. 126 S.; Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

- HERMSDORF, A., HOTZAN, G., JESCHKE, R., KALATZ, R. (1999): Grundwasserlagerstätten im Land Brandenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 6/1, 47–55
- HÖLTING, B., HAERTLÉ, T., HOHBERGER, K.-H., NACHTIGALL, K. H., VILLINGER, E., WEINZIERL, W., WROBEL, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. 19 S.; Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- HOTZAN, G. (1998): Hydrogeologische Verhältnisse im brandenburgischen Abschnitt des Odertales. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 5/2, 73–79
- IFL (2003): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Band
 3 Natur und Umwelt II: Klima, Pflanzen- und Tierwelt.
 176 S.; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- JARRAY, H., OUESSAR, M., ZAMMOURI, M., HAMZAOUI, F. (2017): Groundwater vulnerability based on GIS approach: Case study of Zeuss-Koutine aquifer, South-Eastern Tunisia. Geofísica Internacional 56-1, 7–12
- KUMAR, S., THIRUMALAIVASAN, D., RADHAKRISHNAN, N., MATHEW, S. (2013): Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model. Geomatics, Natur Hazards and Risk 4, 339–354
- LBGR (2001): Richtlinien zur Hydrogeologischen Bearbeitung des Landes Brandenburg im Maßstab 1:50.000. 26 S.; unveröffentlicht
- LBGR (2019): Hydrogeologische Karte des Landes Brandenburg 1:50.000. http://www.geo.brandenburg.de/lbgr/ hydrogeologie. Zugegriffen am: 05. August 2019
- LBV (2013): Berichte der Raumbeobachtung. Kreisprofil Barnim; Märkisch-Oderland; Uckermark 2013. https://lbv.brandenburg.de/3099.htm. Zugegriffen am: 15. Oktober 2019
- LFU (2015): Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit im Land Brandenburg 2006 – 2012. https://mlul.brandenburg.de/media_fast/4055/guetebericht_lgb.pdf. Zugegriffen am: 05. August 2019
- LFU (2018): Zeitreihen von Grundwasserständen an 163 Messstellen. LfU Brandenburg, Potsdam
- LFULG (2003): Handbuch zur Altlastenbehandlung. Teil 3. Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Grundwasser. https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/hza3.pdf. Zugegriffen am: 05. August 2019
- LUGV (2013): Karten des Grundwasserflurabstandes und der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung des Hauptgrundwasserleiters. 78 S.; unveröffentlicht

- LUOMA, S., OKKONEN, J., KORKKA-NIEMI, K. (2016): Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. Hydrogeology Journal 25, 203–222
- MAGIERA, P. (2000): Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 3, 103–114
- MARGAT, J. (1968): Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. BRGM-Veröffentlichung, 68 SGL 198 HYD
- NEUKUM, C. (2012): Eine Übersicht zu Methoden und Anwendungen der Validierung von Vulnerabilitätsbewertungen. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 18, 15–24
- NEUKUM, C., HÖTZL, H. (2006): Standardization of vulnerability maps. Environmental Geology 51(5), 689–694
- OUEDRAOGO, I., DEFOURNY, P., VANCLOOSTER, M. (2016): Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. Science of the Total Environment 544, 939–953
- POLEMIO, M., CASARANO, D., LIMONI, P. P. (2009): Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). Natural Hazards and Earth System Sciences 9, S. 1461–1470
- SINREICH, M., KOZEL, R., MEYLAN, B., MURALT, R. (2009): Konzept der Vulnerabilität im Grundwasserschutz. Anwendung auf die Verhältnisse der Schweiz. Gas, Wasser, Abwasser: schweizerische Zeitschrift für Gasversorgung und Siedlungswasserwirtschaft 89/2, 109–117
- STACKEBRANDT, W., MANHENKE, V., LIPPSTEU, L. (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1:1.000.000. https://www.geobasis-bb.de/geodaten/lbgr/ pdf/4 Geoatlas.pdf. Zugegriffen am: 05. August 2019
- VAN STEMPOORT, D., EWERT, L., WASSENAAR, L. (1993): Aquifer Vulnerability Index AVI: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques, 18, 25–37
- VBRA, J., ZAPOROZEC, A. (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. 131 S.; Verlag Heinz Heise, Hannover
- VOIGT, H.-J. (1987): Hydrogeologisches Kartenwerk der DDR 1: 50.000, Berlin

ZEILFELDER, S., REJMAN-RASINSKA, E., HANNAPPEL, S. (2011): Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732 für Mecklenburg-Vorpommern. http://www.wrrl-mv.de/ doku/2011_verweilzeiten_sickerwasser.pdf. Zugegriffen am: 21. Oktober 2019 (2011)

Anschrift der Autoren:

M.Sc. Antonia Erber Freie Universität Berlin Malteserstraße 74–100, 12249 Berlin E-Mail: antonia.erber@outlook.de

Dr. Stefan Broda Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Arbeitsbereich Flächeninformation Grundwasser (B2.2) Wilhelmstraße 25–30, 13593 Berlin E-Mail: Stefan.Broda@bgr.de Telefon: 030 36993250 Fax: 0511 643531250

Dr. Silvio Janetz Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg Dezernat Hydrogeologie Inselstraße 26, 03046 Cottbus E-Mail: Silvio.Janetz@lbgr.brandenburg.de Telefon: 0355 48640162 Fax: 0355 48640110

M.Sc. Maximilian Nölscher Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Arbeitsbereich Flächeninformation Grundwasser (B2.2) Wilhelmstraße 25–30, 13593 Berlin E-Mail: Maximilian.Noelscher@bgr.de Telefon: 030 36993260

Prof. Dr. Achim Schulte Freie Universität Berlin Fachrichtung Angewandte Physische Geographie, Umwelthydrologie und Ressourcenmanagement Malteserstraße 74–100, 12249 Berlin E-Mail: Achim.Schulte@fu-berlin.de Telefon: 030 83870253 Fax: 030 838 458705

Untersuchung zur Ursache des Chloridanstiegs im WW Kleinmachnow – geogen salinar oder anthropogen?

Investigations into the cause of rising chloride concentrations in the waterworks Kleinmachnow near Berlin – geogenic salinisation or anthropogenic sources?

FLORIAN JENN, SILVIA DINSE, ANETT BREMER, DIETMAR SCHÄFER

1 Einleitung /Aufgabenstellung

Das Wasserwerk Kleinmachnow des Wasser- und Abwasserzweckverbandes "Der Teltow" (WAZV), welches von der Mittelmärkischen Wasser- und Abwasser GmbH (MWA) betrieben wird, ist von erheblicher Bedeutung für die Trinkwasserversorgung im prosperierenden südwestlichen Umland von Berlin. Der steigende Wasserbedarf erfordert perspektivisch ein höheres Wasserrecht und die Anpassung der Bewirtschaftung des Wasserwerkes (WW), dessen Brunnen aus pleistozänen Grundwasserleitern (GWL) fördern. In diesem Zusammenhang musste u. a. die Ursache steigender Chlorid-Konzentrationen im westlichen Anstrombereich der Brunnen geklärt und deren Entwicklung abgeschätzt werden. Dies erweist sich an diesem Standort als aufwändig, da auch mit dem Zutritt geogen salinaren Tiefenwassers zu rechnen ist. Im Artikel werden die durchgeführten Arbeiten und Auswertungsergebnisse zusammengefasst.

2 Überblick über Hydrogeologie und Wassergewinnung

Die im Verbund betriebenen WW Kleinmachnow und Teltow versorgen ca. 66 000 Einwohner. Die mittlere tägliche Förderung (Q_{365}) des WW Kleinmachnow in den letzten fünf Jahren betrug im Durchschnitt 3 000 m³/d.

Das WW befindet sich im Bereich der frühpleistozänen Dreilinden-Tegeler Tiefenrinne. Dabei handelt es sich um eine in der Elsterkaltzeit angelegte Erosionsrinne im Bereich der Teltow-Hochfläche. In dieser sind die quartären Ablagerungen tief in tertiäre und teilweise auch mesozoische Schichten eingeschnitten.

Dem WW stehen zur Förderung derzeit 7 Brunnen zur Verfügung, von denen Br. 2a aus technischen Gründen und Br. 4 aufgrund hoher DOC-Gehalte nicht genutzt werden. Die Brunnen 1b, 2a, 5 und 7 sind im GWL 2 (Saale-kaltzeitliche Vorschüttsande; GWL 2.1 nach LBGR-Nomenklatur; Hydrostratigraphie L 3.1) verfiltert, während die Brunnen 3 und 6 aus dem tiefer gelegenen GWL 3 (Elster-kaltzeitliche Nachschüttsande; GWL 2.2 nach LBGR-Nomenklatur; Hydrostratigraphie L 3.2) fördern. Abb. 1 zeigt die Lage der Brunnen und der Grundwassermessstellen (GWMS) des WW Kleinmachnow sowie die Spur des in Abb. 2 gezeigten Schnitts durch die Wasserfassung und ihr südwestliches und nordwestliches Vorfeld.

Die Brunnen fassen das von der Teltow-Hochfläche aus SSE zuströmende Grundwasser (Hydroisohypsen in Abb. 1). Aus deren Anstrom fördert auch das ebenfalls dem WAZV zugehörige WW Teltow, das in ca. 5 km Entfernung südöstlich des WW Kleinmachnow liegt. Die Brunnen des WW Kleinmachnow liegen zudem eingebettet in das Einzugsgebiet der Brunnen des WW Beelitzhof der Berliner Wasserbetriebe.

3 Untersuchungskonzept Grundwasserbeschaffenheit

Die MWA betreibt ein Netz von GWMS in den GWL 1 – 3 zur Beobachtung von Grundwasserdynamik und Grundwasserbeschaffenheit (Abb. 1). Im Jahr 2018 wurden an vier Standorten im näheren Fassungsumfeld GWMS-Gruppen mit je drei Filterstrecken in den drei GWL errichtet. Bei trockenem GWL 1 wurde der OP im GWL 2 ausgebaut. Zielstellung war u. a. die Klärung der Herkunft der sehr chloridhaltigen Wässer, die in der westlich der Fassung gelegenen Messstellengruppe Klm 1/95 und im Brunnen 5 beobachtet werden. Hierfür wurden die Messstellengruppen Klm 01/18 und Klm 02/18 konzipiert. Die tiefste Messstelle der Gruppe Klm 01/18 wurde so gebaut, dass zukünftig mittels Induktionslogmessungen Änderungen der Salinität im Grundwasserleiter (bezogen auf das nähere Bohrungsumfeld) beobachtet werden können.

Zusammen mit den langjährig vorliegenden Beschaffenheitsdaten der Überwachungsmessstellen im Umfeld des WW Kleinmachnow wurden die Untersuchungsergebnisse der neu errichteten Messstellen im Hinblick auf die salinare



Abb. 1: Übersichtskarte WW Kleinmachnow

Fig. 1: Overview map of Kleinmachnow waterworks

> Abb. 2 Geologischer Schnitt durch die Wasserfassung und das Vorfeld (Verlauf der Schnittlinie in Abb. 1)

> Fig. 2 Geological cross-section through the wellfield and its surroundings (section line shown in Fig. 1)



Beeinflussung, u. a. auch mit der Software GEBAH (LBGR 2021) ausgewertet und mit dem LBGR diskutiert. Da im Umfeld des WW Kleinmachnow Rupelfehlstellen kartiert sind und im nördlich von Kleinmachnow gelegenen WW Beelitzhof seit Jahrzehnten ein Zutritt hoch mineralisierter Grundwässer beobachtet wird, wurde eine Altersbestimmung der Wässer in Klm 01/18 OP und im Br. 5 mittels Isotopenanalytik (Kohlenstoff-14/Kohlenstoff-13 am DIC, Sauerstoff-18, Deuterium, Tritium und tritiogenes Helium-3) durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, durch die Kombination der verschiedenen, für die Altersbestimmung relevanten Isotope die Mischungsanteile von Jungwasser (< 70 Jahre seit Infiltration) und älteren Komponenten zu quantifizieren und zu datieren, um Rückschlüsse auf mögliche Fließpfade und Eintragsquellen (Jungwasserkomponente) bzw. Hinweise auf eine Beeinflussung durch aufsteigendes Tiefenwasser (ältere Komponente) ziehen zu können.

4 Recherche zu möglichen Chlorid-Quellen

Die Untere Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde des Landkreises Potsdam-Mittelmark (UAB) führte eine **historische Recherche** zu potenziellen anthropogenen Eintragsstellen durch (BUSCHALSKY & WALTHER 2018). Im Fokus standen dabei vor allem bekannte Altlastenverdachtsflächen, insbesondere die ehemalige Grenzübergangsstelle Dreilinden/Drewitz, die im direkten Grundwasseranstrom auf das WW lag. Die Recherchen beinhalteten auch Zeugenbefragungen. Die relevanten Ergebnisse sind zusammenfassend:

- Die Grenzübergangsstelle Dreilinden wurde von 1969 bis 1990 betrieben.
- Fast die gesamte 36 ha umfassende Fläche war durch Betonbeläge versiegelt.
- Auf dieser Fläche sei nach Recherchen im Zuge einer orientierenden Altlastenvoruntersuchung Magnesiumchlorid (MgCl₂) als Auftaumittel und zur Unkrautbekämpfung neben Chlorphenoxylalkansäure (MCPA – schwer abbaubares Herbizid) auch Natriumchlorat (NaClO₃) verwendet worden.
- Im Jahr 1994 wurden alle Gebäude, versiegelten Flächen und die Leitungssysteme der Grenzübergangsstelle zurückgebaut.
- An zwei Bohrpunkten wurden 1992 in einer Tiefe bis 1 m unter Betondecke erhöhte Chlorid-Gehalte im Boden (bis 355 mg Cl/kg TS) analysiert, deren Herkunft vermutlich durch Auftausalze bedingt ist; an einem dieser Punkte konnten in einer Tiefe von 8–10 m noch Chlorid-Gehalte von 188 mg Cl/kg TS nachgewiesen werden.
- Die 1994 durchgeführten Altlastenuntersuchungen erfassten im Grundwasser nicht den Parameter Chlorid.
- Die Zeugenbefragungen ergaben keine verwertbaren Hinweise auf Art um Umfang der während des Betriebs des Grenzübergangs stattgefundenen Anwendung und Lagerung von Auftaumitteln.
- Der unteren Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde sind keine Lagerplätze von Salz im Einzugsgebiet der Wasserfassung bekannt.

Zur Abschätzung des von der **Straßenlaugung** auf der BAB 115 ausgehenden Gefährdungspotenzials wurden bei den für die Straßenlaugung in diesem Bereich zuständigen Behörden der Länder Berlin und Brandenburg Recherchen durchgeführt, die folgende Ergebnisse erbrachten.

Brandenburger Gebiet:

- Als Laugungsmittel wird seit 1990 ausschließlich Natriumchlorid verwendet.
- Eine auf einzelne Autobahnabschnitte bezogene jährliche oder zeitlich höher auflösende Bilanzierung der aufgebrachten Salzmengen ist nicht möglich, es wurde aber eine Zusammenstellung der jährlich auf dem gesamten von der Autobahnmeisterei Rangsdorf betriebenen Autobahnnetz (196 Streckenkilometer) ausgebrachten Salzmengen für den Zeitraum 2010–2017 bereitgestellt (pro Winter im Mittel 770 g/m²).
- Das nördlich des Europarcs und westlich der BAB gelegene Regenrückhaltebecken (Abb. 1) fasst das Niederschlagswassers eines 600 m langen Abschnitts der östlichen Fahrbahn in Richtung Berlin und bringt dieses Wasser vollständig zur Versickerung. Auf den übrigen im Einzugsgebiet des WW gelegenen Streckenverläufen der BAB erfolgt eine Versickerung des Niederschlagwassers über die Randgräben bzw. -mulden (Abb. 1).
- Das Versickerungsbecken ging im Jahre 2000 als Neubau in Betrieb.

Berliner Gebiet:

- Als Laugungsmittel werden in Berlin standardmäßig NaCl in fester Form und eine 20%ige CaCl₂-Lösung (Sole) im Mischungsverhältnis Salz : Sole von 70 : 30 verwendet (Feuchtsalz FS30).
- Die Straßenlaugung durch die Berliner Stadtreinigung erfolgt ausschließlich auf den Flächen der BAB einschließlich des Zehlendorfer Kreuzes sowie im Bereich der östlichen Tankstelle im Kreuz Zehlendorf. Weitere Flächen des ehem. Areals Dreilinden (jetzt Europarc) werden nicht berücksichtigt.
- Das im gesamten Bereich anfallende Niederschlagswasser wird gefasst und über ein Regenwasserkanalnetz dem Regenwasserpumpwerk im Autobahnkreuz Zehlendorf zugeleitet. Demnach kommt auf Berliner Gebiet kein von der Autobahn stammendes und potenziell mit Auftaumitteln versetztes Niederschlagswasser zu Versickerung.

Die in den frühen 1960er Jahren **eingerichteten Grenzanlagen der DDR** beinhalteten zwei sogenannte Kontrollstreifen ("K2" und "K6") mit 2 m und 6 m Breite, die zur Sichtbarmachung von Fußabdrücken bewuchsfrei gehalten wurden. Dazu wurden nach Recherche von GCI vorrangig die anorganischen Herbizide Natriumchlorat und/ oder Kaliumchlorat ("Agrosan", "UnkrautEx" und/oder "Wegerein K") sowie die organischen Herbizide Simazin und Amitrol ("Azaplant", "Azaplant Kombi") sowie nach Recherche der unteren Abfallbehörde Potsdam-Mittelmark Chlorphenoxylalkansäure (MCPA) eingesetzt. Die Kontrollstreifen begleiteten auch den im Jahr 1968 in Betrieb genommenen Autobahnabschnitt, der im Einzugsgebiet der Wasserfassung liegt. Die Kontrollstreifen nördlich und westlich der Wasserfassung sind heute noch als Schneisen im Wald zu erkennen. Die Messstellengruppe Klm 01/18 ist ca. 15 m südlich des ehemaligen Kontrollstreifens "K2" errichtet worden. Die Messstellengruppe Klm 1/95 liegt ca. 45 m östlich des Kontrollstreifens, der die Autobahn begleitete.

5 Ergebnisse

5.1 Entwicklung Chlorid-Konzentrationen

In den GWMS Klm 1/95 OP, MP und UP (Filter alle in GWL 2) werden etwa seit dem Jahr 2011 deutlich steigende Chlorid-Konzentrationen registriert (Abb. 3). Die hohen Konzentrationen von 200–260 mg/l Chlorid werden durch die Analysen der im Jahr 2018 errichteten GWMS Klm 01/18 OP und MP sowie Klm 02/18 OP bestätigt. Die benannten GWMS sind im GWL 2 ausgebaut und befinden sich zeitlich mehrheitlich im Anstrom auf die Br. 1/91 (Br. 1a) bzw. dessen Nachfolgebrunnen Br. 1/14 (Br. 1b) sowie im Anstrom von Br. 5/11, sofern dieser betrieben wird. In den GWMS, die sich im südlichen bis nordöstlichen Anstrom auf die Förderbrunnen des GWL 2 befinden, werden deutlich geringere Chlorid-Konzentrationen als in den in Abb. 3 aufgeführten nördlichen und nordwestlichen GWMS detektiert (vgl. Abb. 4, < 60 mg/l Cl). Sie zeigen außerdem keine zunehmende Konzentrationsentwicklung an. Br. 2/91 (2a) wurde bis zum Jahr 2015 betrieben und von Br. 7/14 abgelöst, der deutlich näher an der BAB 115 sowie dem ehem. Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz liegt. Br. 7 (Abb. 4) zeigt mit 70–90 mg/l ähnlich hohe Chlorid-Konzentrationen wie Br. 1 (Abb. 3).

Die vorliegenden langjährigen Zeitreihen der im GWL 3 ausgebauten Brunnen (Br. 3 und 6) und GWMS (Klm 1/96 BR 4 ist außer Betrieb und wird als GWMS genutzt; Klm 2/96 UP und Klm 2/88 UP) belegen geringe Chlorid-Konzentrationen und keine auffälligen Änderungen (Chlorid < 50 mg/l).

Die Analysen der neu im GWL 3 errichteten GWMS Klm 01/18 UP bis Klm 04/18 UP zeigen bis auf Klm 02/18 UP ebenfalls keine erhöhten Chlorid-Konzentrationen (Abb. 5). In Klm 02/18 UP werden höhere Chlorid- und Sulfat-Konzentrationen angetroffen als im MP, der im GWL 2 ausgebaut ist. Es wird davon ausgegangen, dass er einen Zustrom aus dem Bereich der ehemaligen Dreilindener Maschinen-



- Abb. 3: Zeitliche Entwicklung Chlorid in GWL 2 Br. 1a/b und Br. 5/11 sowie Messstellen im westlichen bis nordwestlichen Anstrom Klm 1/95 OP, MP und UP, Klm 1/18 OP MP und Klm 2/18 OP
- Fig. 3: Development of chloride concentration in aquifer 2 – production wells 1a/b and 5/11, and monitoring wells Klm 1/95 OP, MP, UP, Klm 1/18 OP, MP, Klm 2/18 OP located west to northwest of the wellfield



- Abb. 4: Zeitliche Entwicklung Chlorid in GWL 2 Br. 2a und Br. 7 sowie Messstellen im südlichen bis nordöstlichen Anstrom Klm 1/88 MP, Klm 2/88 MP, Klm 2/95 OP, MP, UP, Klm 2/96 MP, Klm 02/18 MP, Klm 03/18 MP und Klm 04/18 MP
- Fig. 4: Development of chloride concentration in auqifer 2 – production wells 2a and 7, and monitoring wells Klm 1/88 MP, Klm 2/88 MP, Klm 2/95 OP, MP, UP, Klm 2/96 MP, Klm 02/18 MP, Klm 03/18 MP, Klm 04/18 MP located south to northeast of the wellfield



- Abb. 5: Zeitliche Entwicklung Chlorid in GWL 3 Br. 3/3a und Br. 6/11 sowie Anstrommessstellen Klm 1/96 BR 4 (nicht betriebener Br. 4), Klm 1/88 UP, Klm 2/88 UP, Klm 2/96 UP, Klm 01/18 UP bis Klm 04/18 UP
- Fig. 5: Development of chloride concentration in auqifer 3 – production wells 3/3a and 6/11, and monitoring wells Klm 1/96 BR 4 (unused production well 4), Klm 1/88 UP, Klm 2/88 UP, Klm 2/96 UP, Klm 01/18 UP through Klm 04/18 UP

baufabrik bzw. der südöstlich gelegenen Deponie erhält. Die Chlorid-Konzentrationen von 80–95 mg/l bei einem gleichzeitigen Nachweis von 240–260 mg/l Sulfat deuten nicht auf eine geogen salinare Beeinflussung in Klm 02/18 UP hin. Bei derart hohen Sulfat-Gehalten wären Chlorid-Konzentrationen in dreistelliger oder noch höherer Größenordnung zu erwarten, wenn sie geogener Herkunft wären.

5.2 Hydrochemische Berechnung mit GEBAH

Alle Analysen der GWMS und Brunnen mit einem Ionenbilanzfehler besser als 5 % wurden mit der Software GE-BAH 1.3 (LBGR 2021) ausgewertet. In den Zeitreihen sind z. T. deutliche Veränderungen der Gesamtmineralisation, der Anteile der Berechnungssalze und der Lagepunkte erkennbar, wie das Beispiel der GWMS Klm 1/95 UP zeigt. Zu Beginn der Zeitreihe (1996, Abb. 6) liegt der Lagepunkt im Sulfattyp, nahe des Salinarfelds, der Anteil des Berechnungssalzes NaCl ist 8 %, CaCl, ist nicht vorhanden. Mit einem ersten Anstieg von Chlorid 1998 tritt CaCl, mit 12 % auf, während NaCl unverändert bleibt. Dieser Zustand besteht bis 2010, danach steigen Chlorid und CaCl, deutlich an. Ab 2013 steigt auch NaCl leicht an. Bis 2020 (Abb. 7, redaktionelles Ende der Datenreihe) hat sich die Gesamtmineralisation nahezu verdoppelt und der Lagepunkt befindet sich im Chloridtyp.

5.3 Isotopenuntersuchung

Die Auswertung der Isotopenanalysen der GWMS Klm 01/18 OP und des Br. 5 erbrachte folgende Ergebnisse (HEIDINGER 2019):

- die Alterszusammensetzung der beiden Proben ist sehr ähnlich und es dominieren jüngere Grundwasserkomponenten (Anteil ca. 75 %) mit Verweilzeiten im Bereich von 35 bis 45 Jahren
- höhere Anteile von alten (deutlich älter als 60 Jahre) Grundwasserkomponenten sind wenig wahrscheinlich und für Anteile > 30 % auszuschließen
- auf anthropogene Ursachen des erhöhten CaCl₂-geprägten Chlorid-Niveaus deuten:
 - Cl/Br-Verhältnisse (667 bezogen auf Masse), die deutlich abweichend zu typischen Salz/Evaporit- oder Meerwasser-Cl/Br-Verhältnissen liegen
 - ein untypisch hoher ${}^{14}C$ -Gehalt in Br. 5/11 in Verbindung mit untypisch hohen $\delta^{13}C$ -DIC-Werten in beiden Proben

6 Diskussion

Die gegenüber Hintergrundwerten in Brandenburg erhöhten Chlorid-Konzentrationen der Brunnen des GWL 2 und die anhand langjähriger Untersuchungen des Br. 1 und seiner Vorfeldmessstelle Klm 1/95 nachgewiesenen steigenden Chlorid-Konzentrationen deuten in Verbindung mit den auffällig hohen Anteilen des GEBAH-Berechnungssalzes CaCl, auf einen Eintrag von Salzwässern hin. Das Berechnungssalz CaCl, kann aus direktem Eintrag von CaCl, stammen (z. B. aus CaCl, -haltigen Auftausalz-Mischungen). Vor allem aber kann es aus NaCl-bürtigen Einträgen (geogen oder anthropogen) und Kationenaustausch Na⁺ gegen Ca²⁺ während des Fließweges (Erdalkalisierung) resultieren. Deshalb führen NaCl-Einträge zunächst nicht zu einem Anstieg des Berechnungssalzes NaCl. Erst wenn die Kationenaustauscherplätze im Untergrund mit Na⁺ voll belegt sind, geht CaCl, zurück und NaCl steigt an.

Prinzipiell kommen am Standort der Wasserfassung Kleinmachnow folgende Eintragsquellen in Betracht:

- Zutritt von geogen salinaren Tiefenwässern
- Eintrag von Kaliumchlorat (Unkrautvernichtungsmittel "Wegerein-K") und/oder Natriumchlorat ("Agrosan", "UnkrautEx") mit Abbau des Chlorats zu Chlorid in den ehemaligen Kontrollstreifen der zwischen 1961 und 1990 betriebenen DDR-Grenzanlage, ggf. auch auf der Fläche des Kontrollpunktes Dreilinden/Drewitz
- Eintrag von Auftausalzen entlang der Autobahn, die in ihrer jetzigen Lage innerhalb des Einzugsgebietes des Wasserwerkes im Jahr 1968 in Betrieb genommen wurde
- Eintrag von Auftausalzen am ehemaligen Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz (heute Europarc), der im Zeitraum 1969–1990 betrieben und ca. 1995–1997 zurückgebaut wurde



Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 1/2-2021



Abb. 7: Genesediagramm GEBAH Klm 1/95 UP, Analyse 2020 mit starker Aufsalzung
 Fig. 7: GEBAH genetic diagram and time series for monitoring well Klm 1/95 UP, analysis from 2018 with strong salinisation

Die nachgewiesenen zeitlichen und räumlichen Muster der analysierten Konzentrationen und GEBAH-Berechnungssalze sprechen, unterstützt von den 2019 durchgeführten Altersbestimmungen des Wassers von Br. 5 und Klm 01/18 OP, für einen Eintrag des Salzes von der Oberfläche, also gegen einen Zutritt geogen salinarer Tiefenwässer. In den im März 2019 gewonnenen beiden Proben dominiert in der Isotopenauswertung weitaus die jüngere Grundwasserkomponente mit mittleren Verweilzeiten im Bereich von 35 bis 45 Jahren (Anteil ca. 75 % der Probe). Die Anteile von alten, insgesamt vor deutlich mehr als 60 Jahren neugebildeten Grundwasserkomponenten, nehmen in den Proben maximal 30 % ein.

6.1 Einsatz von Chlorat als Herbizid im Zeitraum 1961 – 1990 im ehemaligen Grenzstreifen

Kaliumchlorat (KClO₂) und Natriumchlorat (NaClO₂) dissoziieren leicht. Dementsprechend gehen die Kationen ähnlich wie bei Chlorid-Salzen sofort in Lösung und können transportiert und sorbiert werden. Hinsichtlich des Kationen-Verhaltens unterscheidet sich ein Chlorat-Eintrag nicht von einem Chlorid-Eintrag vergleichbarer Menge. Im Unterschied zu Chloriden ist das Chlorat-Anion (ClO³⁻) jedoch reaktiv. Durch Disproportionierung kann das Chlorat-Anion in Chlorid und Perchlorat zerfallen. Vor allem aber wirkt es als starkes Oxidationsmittel, das organische Substanz zersetzen oder mit oxidierbaren Mineralen (z. B. Pyrit) reagieren kann. Die Oxidationsvorgänge verlaufen jedoch deutlich langsamer als die Dissoziation, sodass ein Chlorat-Eintrag zu einer geringeren Konzentration von Chlorid, dies jedoch über einen längeren Zeitraum verteilt, führt als ein vergleichbarer direkter Eintrag von Chlorid.

Das ClO^{3–}-Ion ist mobil, sodass die o.g. Reaktionen nicht nur am Ort des Eintrags, sondern auch entlang der Fließstrecke stattfinden können, z. B. in tieferen GWL mit reduzierendem Milieu.

Im Folgenden wird betrachtet, ob ein Chlorat-Eintrag auf den Kontrollstreifen "K2" und "K6" der ehemaligen Grenzanlage nördlich und westlich der Wasserfassung eine plausible Erklärung für die beobachteten Beschaffenheitsentwicklungen in den Br. 1 und 5 sowie den GWMS Klm 01/18 und Klm 1/95 sein kann. Bei Annahme einer erhöhten Grundwasserneubildung (geringe Verdunstung und sehr gute Infiltration im Sand) von 250 mm/a und Verwendung der Mächtigkeitsangaben und hydraulischen Parameter des bei den Untersuchungen begleitend genutzten numerischen Strömungsmodells kann für einen an der Oberfläche eintretenden Wassertropfen im ehemaligen Kontrollstreifen eine Fließzeit von ca. 30-40 Jahren abgeschätzt werden. Die abgeschätzte Gesamtfließzeit harmoniert sehr gut mit den Ergebnissen der 3H/3He-Isotopenuntersuchungen, wonach bei den untersuchten Grundwässern weitaus die jüngeren Grundwasserkomponenten mit mittleren Verweilzeiten im Bereich von 35 bis 45 Jahren dominieren.

Die aufgetragenen Herbizid-Mengen sind nicht bekannt. In VVB AZ (1973) wurde für die Freihaltung von Wegen und Plätzen die zweimalige Anwendung von je 30 g/m² Wegerein-K empfohlen. Es ist anzunehmen, dass für die Sicherstellung der Bewuchsfreiheit der Kontrollstreifen eine größere Menge aufgebracht wurde. Es wurde deshalb mit der doppelten Menge (120 g/m²/a) gerechnet. Werden typische Kationenaustauschkapazitäten für Sand bzw. Lehm aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) zugrunde gelegt, reicht die angenommene Eintragsmenge aus, um in ca. 10–20 Jahren die Austauscherplätze mit Kalium/Natrium zu belegen und eine äquivalente Menge Calcium freizusetzen.

Die ersten Analysen der Klm 1/95 datieren aus dem Jahr 1996, sodass keine Vergleichswerte aus dem Zeitraum vor Beginn der angenommenen Beeinflussung infolge des Chlorat-Eintrages vorliegen. Mit der Erstanalyse im Jahr 1996 wurden mit ca. 80 mg/l in Klm 1/95 OP und MP bereits erhöhte Chlorid-Konzentrationen nachgewiesen, was darauf hinweist, dass die Verweilzeit im GWL 1 und Geschiebemergel eher eine Größenordnung von 30 Jahren hat. Der Anteil des Berechnungssalzes CaCl, war mit 10 % (OP) und 15 % (MP) ebenfalls auffällig erhöht. Die Analysenwerte der tiefsten Filterstrecke Klm 1/95 UP entsprachen 1996 eher dem Chemismus, der in einem pleistozänen tiefen bedeckten GWL natürlicherweise zu erwarten wäre. Eine leichte anthropogene Beeinflussung war auch hier bereits zu erkennen. Die Chlorid-Konzentrationen lagen noch unter 30 mg/l. Auch wurde noch kein CaCl, festgestellt (Abb. 6). 1996 wären demnach bei Annahme des Chlorat-Eintrages im Kontrollstreifen im OP und MP bereits deutliche Anzeichen der Folgen des Eintrages nachgewiesen worden, der jedoch den tieferen Bereich des GWL 2 noch

nicht vollständig erfasst hatte. 2020 sind die Chlorid-Konzentrationen und die $CaCl_2$ -Anteile in Klm 1/95 UP ähnlich hoch wie im OP und MP (200–230 mg/l, 30–40 % CaCl₂, Abb. 7).

Für den Brunnen 1/91 (Br. 1a), in dessen westlichen Anstrom sich die GWMS-Gruppe Klm 1/95 befindet, gibt es bereits seit 1991 Rohwasseranalysen. Diese zeigen bis zum Jahr 1999 relativ stabile und niedrige Chlorid-Konzentrationen um 40 mg/l, was den Konzentrationen von Klm 1/95 UP Mitte der 1990er Jahre entspricht. CaCl, wurde bis 1999 im Rohwasser des Br. 1 nicht bzw. maximal mit 2 % an der Gesamtmineralisation angetroffen. Seit 1999 steigen auch in Br. 1 die Chlorid-Konzentrationen und CaCl2-Anteile, sodass 2020 im Rohwasser des Nachfolgebrunnens Br. 1/14 (Br. 1b) doppelt so hohe Cl-Gehalte (80 mg/l) wie vor 1999 sowie deutlich erhöhte CaCl₂-Anteile (10 %) angetroffen werden. Die Gehalte in Br. 5/11 sind höher als in Br. 1, was in der nördlichen Lage des Brunnens begründet sein dürfte, da er sich näher am ehemaligen Kontrollstreifen befindet, für den der linienhaften Eintrag des Chlorats unterstellt wird.

Zur Plausibilitätsbewertung wurden die auf dem Kontrollstreifen eingetragenen Frachten mit den in den Br. 1 und 5 ab 2015 gemessenen Chlorid-Konzentrationen überschlägig verglichen. Gegenüber der anfänglich in Klm 1/95 UP gemessenen Chlorid-Konzentration (ca. 30 mg/l) ist in diesen Brunnen ein Chlorid-Überschuss von ca. 50 mg/l (Br. 1) bis 90 mg/l (Br. 5) zu beobachten. Bei durchschnittlichen Entnahmemengen von ca. 290 m3/d mit Br. 1 und 220 m3/d mit Br. 5 ergeben sich ab 2015 Chlorid-Frachten von ca. 21 000 kg/a (Br. 1) und 7 300 kg/a (Br. 5), die aus den Chlorat-Einträgen erklärt werden müssten. Mit der o. g. Anwendungsmenge von 120 g/m²/a und einer im Anstrombereich beider Brunnen liegenden Länge des Grenzstreifens von ca. 2,2 km ergibt sich eine eingetragene Chlorid-Fracht von ca. 700 kg/a. Somit könnten nur ca. 2 % der über die Brunnen ausgetragenen zusätzlichen Chlorid-Fracht durch den Herbizid-Einsatz erklärt werden. Die Fracht der beiden Brunnen weist auf weitere, mengenmäßig bedeutendere Salzeintragsquellen und ggf. eine höhere Anwendungsmenge des Herbizids hin.

Neben dem Anstieg des Chlorids und dem Nachweis des Berechnungssalzes $CaCl_2$ in relativ hohen Anteilen an der Gesamtmineralisation sind außerdem erhöhte Gehalte an DOC, Fe^{2+} und Sulfat als Reaktionsprodukte der Oxidation von organischer Substanz (DOC) und Pyrit (FeS₂) durch das starke Oxidationsmittel Chlorat zu erwarten und auch nachgewiesen.

Allgemein muss beachtet werden, dass die hier vorgenommenen Kalkulationen grobe Abschätzungen darstellen. Es ist zudem von unterschiedlichen Sickerzeiten (Heterogenität des Geschiebemergels) und unterschiedlich langen Fließwegen von den verschiedenen Eintragsstellen auszugehen.

6.2 Auftausalz-Eintrag im Zeitraum 1968 – 1990 am Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz sowie entlang der A 115

Im Folgenden wird der Transfer und die Fracht von Auftausalzen ausgehend von der Fläche des Kontrollpunkts Dreilinden/Drewitz und von dem ca. 1.200 m langen Autobahnabschnitt im Einzugsgebiet der Wasserfassung betrachtet und ein Vergleich zur Fracht der Brunnen gezogen. Zu DDR-Zeiten wurden NaCl, MgCl₂ und evtl. CaCl₂ in nicht bekannten Mischungsverhältnissen und Mengen im Winterdienst eingesetzt (Sprühsalz). Da für die DDR-Zeit keine Auftragsmengen recherchiert werden konnten, wurde der für 2011 – 2017 recherchierte Mittelwert (770 g/m² pro Winter) auf die Vergangenheit übertragen.

Der Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz lag im Areal des heutigen Europarcs westlich bis südwestlich von den Brunnen (Abb. 1) und wurde zwischen 1969 und 1990 betrieben. Die schnee- und eisfrei zu haltende Fläche wurde anhand historischer Luftbilder zu 7 ha angesetzt.

Im Bereich des Kontrollpunkts sind der GWL 1 und der Geschiebemergel geringer mächtig ausgebildet (vgl. Bohrprofil Klm 2/18 in Abb. 2) als am Standort der Br. 1 und 5 und im Bereich der Kontrollstreifen. Die Fließzeit bis zur GWMS Klm 02/18 OP wird zu ca. 25 - 30 a. bis zur GWMS Klm 1/95 MP sowie Br. 1 und 5 zu ca. 35 – 40 a abgeschätzt. Mit einem ersten Salzzutritt ausgehend vom Kontrollpunkt war demnach in Klm 02/18 OP in den Jahren 1995 - 2000 und in Klm 1/95 OP bis UP bzw. den Brunnen in den Jahren 2005 - 2010 zu rechnen. Die in der GWMS Klm 1/95 MP und mit ca. 2 Jahren Verzögerung im UP beobachteten Anstiege der Berechnungssalze CaCl₂ und NaCl ab den Jahren 2011 bzw. 2013 passen zum Beginn des Tausalzeintrags auf der Fläche des Kontrollpunkts Dreilinden/Drewitz Ende der 1960er Jahre mit einer Reaktionszeit, die mit 43 – 45 a geringfügig länger ist als die oben abgeschätzte Fließzeit. Die angenommene Eintragsmenge würde, wenn es sich um reines NaCl handelte, stöchiometrisch betrachtet zu einem vollständigen Kationenaustausch in weniger als einem Jahr führen. Unter diesen Bedingungen ist es unwahrscheinlich, die Erdalkalisierung und den Durchbruch von NaCl in den Ganglinien auflösen zu können. Zudem ist davon auszugehen, dass ein Gemisch von NaCl, MgCl, und evtl. CaCl, eingetragen wurde, sodass es zu keinem vollständigen Ionenaustausch im Sinne einer Erdalkalisierung kommt. Insgesamt kann angenommen werden, dass sich das Mischungsverhältnis der Salze beim Transport nicht wesentlich ändert.

Für die überschlägige Frachtberechnung wurde eine 1:1-Mischung von NaCl und $MgCl_2$ angesetzt (jährliche Auftragsmenge 770 g/m²). In diesem Fall wäre eine Fracht von ca. 36 000 kg/a Chlorid von der ca. 7 ha großen schnee- und eisfrei zu haltenden Fläche des Kontrollpunktes zu erwarten.

Der Kontrollpunkt liegt im Anstrom der Brunnen 1, 2, 5 und 7 mit einer mittleren Gesamtförderung von ca. 2 000 m³/d seit dem Jahr 2015. Die Brunnen zeigen im Mittel einen Chlorid-Überschuss von ca. 55–65 mg/l gegenüber der Hintergrundkonzentration (ca. 30 mg/l). Die überschüssige Chlorid-Fracht beträgt dann ca. 40 000–48 000 kg/a. Somit können bei der Annahme, dass das auf die Fläche aufgebrachte Salz den GWL 2 erreicht, ca. 75–90 % der über die Brunnen ausgetragenen zusätzlichen Chlorid-Fracht erklärt werden. In Abhängigkeit davon, ob das Tausalz der gesamten Fläche oder nur eines Teiles davon den Untergrund erreichte, fiele die Fracht geringer aus.

Über die betrachteten Eintragsquellen ehemaliger Grenzstreifen und Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz hinaus ist zu beachten, dass von der **Autobahn A115** seit ihrer Inbetriebnahme im Jahr 1968 ebenfalls jährlich ein winterlicher Eintrag von Auftausalzen anzunehmen ist. Zu DDR-Zeiten hatte die Autobahn insgesamt vier Fahrstreifen, also eine eisfrei zu haltende Breite von ca. 14 m. Unter Ansatz einer Länge von 1 200 m (aus der numerischen Modellierung ermitteltes Einzugsgebiet) und dem angenommenen mittleren jährlichen Auftrag von 770 g/m² ist zwischen 1968 und 1990 mit einer mittleren jährlichen Chlorid-Fracht von 9 000 kg/a zu rechnen.

Die insgesamt vom Kontrollpunkt und der Autobahn ausgehende jährliche Fracht (ca. 44 700 kg/a im Zeitraum 1968–1990) kann somit den Fracht-Überschuss von 40 000– 48 000 kg/a Chlorid der Brunnen im GWL 2 erklären.

6.3 Rezenter Eintrag von Salz entlang der BAB 115

Die **linienhafte Versickerung** der Straßentausalze entlang der BAB 115 setzt sich ab 1990 fort, wobei i. d. R. nur NaCl als Auftausalz verwendet wird. Von dem 1 200 m langen Autobahnstreifen (Annahme 6 Streifen, ca. 29 m breit) im Einzugsgebiet der Wasserfassung ist im Zeitraum 1990– 2000 im Mittel von einer Fracht in Höhe von 16 000 kg/a Chlorid auszugehen. Da mit der Inbetriebnahme eines Regenrückhaltebeckens im Jahr 2000 drei Fahrstreifen auf einer Länge von 600 m nicht mehr zur linienhaften Versickerung beitragen (gestrichelte Linie in Abb. 1), wird für den verbleibenden Autobahnabschnitt (600 m × 3 Fahrstreifen + 600 m × 6 Fahrstreifen) ab dem Jahr 2000 eine mittlere jährliche linienhafte Chlorid-Fracht von 12 000 kg/a abgeschätzt.

Das den Br. 5 bzw. Br. 1 zufließende Grundwasser erfasst relativ zentral ein **Regenwasserrückhaltebecken** (Abb. 1), über das die am östlichen Fahrbahnrand (600 m × 3 Fahrstreifen, gestrichelte Linie in Abb. 1) abfließenden Niederschlagswässer seit dem Jahr 2000 punktuell versickert werden. Es ist davon auszugehen, dass vom Regenrückhaltebecken ein punktförmiger Eintrag und damit konzentrierter Zutritt zu den Br. 5 bzw. Br. 1 erfolgen wird. Da das Regenrückhaltebecken im Jahr 2000 in Betrieb genommen wurde und die Verweilzeit im GWL 1 und dem liegenden Geschiebemergel auf 25–35 Jahre geschätzt wird, ist erst zukünftig (ca. ab 2025) mit dem Zutritt von Salzwasser in den Br. 5 bzw. 1 zu rechnen. Die Fracht ausgehend vom Regenwasserrückhaltebecken wird auf ca. 4 000 kg/a geschätzt.

Seit 1990 ist ausgehend von dem Salzauftrag auf die Autobahn mit einer Fracht von ca. 16 000 kg/a Chlorid auszugehen (linienhafte und punktförmige Einträge). Langfristig sollte folglich die durchschnittliche Chlorid-Belastung der Brunnen wieder abnehmen, da die Fracht ausgehend von den zeitlich begrenzten Einträgen (1961-1990) am Kontrollpunkt Dreilinden, an der Grenzanlage und entlang der Autobahn (insges. ca. 44 700 kg/a und ca. 700 kg/a aus Chlorat) ca. dreimal so groß war. Bei einer Fließzeit vom ehem. Kontrollpunkt von ca. 40 Jahren (Abschnitt 6.2) ist ein Rückgang der Chlorid-Belastung aufgrund der Stilllegung der Grenzanlagen frühestens ab 2030 zu erwarten. In den Br. 5 bzw. 1 könnte es durch den punktförmigen Eintrag über das Regenwasserrückhaltebecken ab ca. 2025 zu einer Erhöhung der Chloridbelastung gegenüber den anderen Brunnen kommen, wobei dieser Anstieg geringer zu erwarten ist als der ab ca. 2030 erwartete generelle Konzentrationsrückgang infolge der nachlassenden Wirkung des Grenzkontrollpunktes.

6.4 Zusammenfassende Bewertung der Chloridbeeinflussung des GWL 2

Mehrere Indizien sprechen für eine anthropogene Ursache der beobachteten signifikanten Erhöhung der Chlorid-Konzentrationen in GWL 2:

- 1. keine auffällige Chlorid-Belastung und kein Chlorid-Anstieg im GWL 3 (Abb. 5) sowie in den südlichen bis nordöstlich gelegenen GWMS im GWL 2 (Abb. 4)
- 2. unauffälliger Induktionslog-Befund in Klm 01/18 UP
- Belege und Zeitzeugenberichte zur intensiven Verwendung von Auftausalzen (Spr
 ühsalz) auf dem Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz und der Autobahn
- 4. Ergebnisse der Altersdatierung und sonstigen Isotopenuntersuchungen der im März 2019 genommenen Proben aus Klm 01/18 OP und Br. 5/11, die auf ca. 35–45 Jahre altes Grundwasser deuten
- zunehmende Chlorid-Konzentrationen im GWL 2, die sich mit der Tiefe in einem zeitlichen Versatz zeigen (s. Klm 1/95 OP nach UP) und damit auf den Eintrag von oben deuten
- 6. Konzentrationsänderungen, die zeitlich mit den erwarteten Verweil- und Transferzeiten von Salz übereinstimmen, das vor 1990 im ehemaligen Grenzbereich als Tausalz bzw. Herbizid (Chlorate) eingetragen wurde
- Die abgeschätzte Eintragsmenge an Chloriden auf ehemaligen Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz und entlang der Autobahn kann die Chlorid-Fracht der Brunnen des GWL 2 erklären. Dazu kommt der ebenfalls abgeschlossene Eintrag von Chlorid über Chlorat im ehemaligen Grenzgebiet.

Die LBGR-Software GEBAH kann im nördlichen bis zum südöstlichen Einzugsgebiet der WF Kleinmachnow nur zur Ermittlung der Berechnungssalze verwendet werden, um charakteristische Zusammensetzungen zu erkennen. Die Mineralisation des Grundwassers im Umfeld des WW ist durch die Verwendung von Tausalzen (vor 1999 Gemische aus NaCl, MgCl,, ggf. auch CaCl,), den Einsatz von Natrium- und/oder Kaliumchloraten als Herbizid (vor 1990) und diverse Quellen wie ehemalige Industrieansiedlungen (ggf. auch unterschwellig Chlorid aus LCKW-Abbau), Altablagerungen und ggf. Rieselfeldabfluss massiv verändert worden. Die Verhältniszahlen GGV und SMK aus GEBAH haben hier deshalb i. d. R. keine Aussagekraft. Um eine geogen salinare Komponente bei GWMS mit hohen oder steigenden Chlorid- bzw. Sulfat-Gehalten ausschließen zu können, werden weitere Isotopenuntersuchungen zur Altersdatierung empfohlen.

Die Chlorid-Konzentration im Reinwasser, die in den letzten Jahren infolge der Fahrweise der Brunnen und des Anstieges von Chlorid in den Brunnen des GWL 2 (v. a. Br. 1 und Br. 5) von im Mittel 25 mg/l auf 56 mg/l zugenommen hat, wird in den nächsten Jahren in der Größenordnung der bisher analysierten Konzentrationen (Spitzen bis 100 mg/l) zu erwarten sein und langfristig (frühestens ab 2030) evtl. etwas zurückgehen, wenn die oben dargelegte Hypothese zutrifft, dass das Salz hauptsächlich aus der Streusalzanwendung auf dem Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz und der Autobahn stammt.

Die Entwicklung der Salinarbeeinflussung wird im GWL 2 und 3 jährlich über die Untersuchung der Hauptanionen und -kationen erfolgen. Dabei wird die Entwicklung der Berechnungssalze aus GEBAH mit ausgewertet, um Änderungen der Mineralisationszusammensetzung erkennen zu können.

Es ist empfehlenswert, das Regenrückhaltebecken der Autobahn außerhalb des Einzugsgebietes des WW zu verlegen sowie die übrigen Fahrstreifen der Autobahn auch über ein Entwässerungssystem zu erfassen und schadlos aus dem Einzugsgebiet abführen.

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden v. a. im nordwestlichen Zustrom des Wasserwerks Kleinmachnow steigende Chlorid-Konzentrationen festgestellt, die nach den hier vorgestellten Untersuchungen anthropogen bedingt sind. Im Rohwasser der Brunnen 5 und 1 sind bis zu 190 mg/l bzw. 100 mg/l Chlorid analysiert worden. In deren Vorfeldmessstellen werden Chlorid-Konzentrationen in der Größenordnung des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung gefunden.

Die Hauptanionen- und -kationenanalysen der Brunnen und Grundwassermessstellen wurden umfassend mit Hilfe der LBGR-Software GEBAH, unterstützt durch eine Isotopenuntersuchung zur Altersbestimmung, ausgewertet. Auf Basis von Recherchen zu möglichen Eintragsorten und -mengen von Auftausalzen im Bereich des ehemaligen Kontrollpunktes Dreilinden und entlang der Autobahn BAB 115 sowie auf Basis der Annahmen zum Stofftransport lassen sich sowohl die Konzentrationsentwicklungen in den betroffenen Grundwassermessstellen und Brunnen als auch die beobachteten Chloridfrachten der Brunnen erklären. Als weitere mögliche Chlorid-Quellen kommen der Einsatz von Chlorat als Herbizid entlang des Grenzkontrollstreifens im Zeitraum 1961–1990 sowie Altlasten und ggf. Rieselfeldeinfluss in Betracht. Die Abschätzungen zu diesen Eintragsmengen können einen kleinen Teil der Chlorid-Fracht der Brunnen plausibel machen.

Die Auswirkungen des winterlichen Salzeintrages sind jeweils mit einem Zeitversatz von ca. 40 Jahren im Grundwasserleiter 2 zu beobachten. Es ist deshalb in den nächsten Jahren weiterhin mit Chlorid-Konzentrationen im Rohwasser zu rechnen wie sie in den letzten Jahren analysiert wurden. Ab dem Jahr 1990 (nach Schließung des Grenzkontrollpunkts) trägt allein die Behandlung des Autobahnabschnittes, der im Einzugsgebiet der Wasserfassung liegt, zur Aufsalzung des Grundwassers bei. Es kann deshalb langfristig mit einem Rückgang der Chlorid-Konzentrationen gerechnet werden.

Summary

In the last years, increasing chloride concentrations in groundwater especially to the northwest of the waterworks Kleinmachnow have been observed, which are of anthropogeneous origin according to the investigations presented in this article. Maximum concentrations in raw water from production wells 5 and 1 have reached 190 mg/l and 100 mg/l, respectively. The monitoring wells upstream of these production wells exhibit concentrations around the limit of the German drinking water ordinance.

Major ion analyses of production and monitoring wells have been extensively evaluated using the software GEBAH (developed by the State Geological Survey of Brandenburg), supported by groundwater dating by isotope analyses. The development of concentrations in production and monitioring wells and mass fluxes from production wells can be explained based on a review of locations and amounts of road salt use on the former border checkpoint Dreilinden/ Drewitz and the highway BAB 115, and by estimated conditions of mass transport in the aquifers. Other possible sources of chloride are the use of chlorates as herbicide along the former border control stripes during 1961–1990, as well as abandoned hazardous sites and former sewage farms. The estimated inputs from these sources can explain an additional small fraction of the chloride flux in the wells.

Effects of road salt use can be observed with a delay of approx. 40 years in the second aquifer. Therefore, it is likely that for the near future raw water chloride concentrations

stay on the level of the last years. Since closure of the border checkpoint in 1990, only salt use on the highway section located in the wellfield catchment zone contributes to salinisation of the groundwater. In the long term, a reduction of chloride concentrations can be expected.

Danksagung

Die Autoren danken der MWA (Hr. Könnemann, Fr. Krüger) für die Bereitstellung der Daten und Diskussion der Ergebnisse, dem LBGR (Hr. Brose, Hr. Hotzan) für die umfangreichen Diskussionen zu den GEBAH-Analysen und der Unteren Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde Potsdam-Mittelmark (Hr. Buschalsky) für die umfangreiche Recherche zu potentiellen Chloridquellen.

Literatur

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. Hrsg. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 5. Aufl.
- BUSCHALSKY & WALTHER (2018): Kurzbericht zu erhöhten Chloridkonzentrationen im Wasserwerk Kleinmachnow. 12 S., Untere Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde Landkreis Potsdam-Mittelmark, 07.09.2018
- HEIDINGER, M. (2019): Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen zur Grundwasseraltersabschätzung auf Basis der Gehalte von Kohlenstoff-14/Kohlenstoff-13, Tritium und tritigenem Helium-3 Kleinmachnow. 29 S., Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen, 11.11.2019
- LBGR (2021): Software GEBAH. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, https://lbgr. brandenburg.de/lbgr/de/landesamt/abteilung-geologie/ hydrogeologie/hydrogeochemische-grundlagen/, Abruf am 28.09.2021
- VVB AZ (1973): Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel aus der chemischen Industrie der Deutschen Demokratischen Republik. VVB Agrochemie und Zwischenprodukte, 3. Aufl.

Anschriften der Autoren

Florian Jenn, Silvia Dinse, Anett Bremer, Dietmar Schäfer GCI GmbH Bahnhofstr. 19 15711 Königs Wusterhausen 03375 294785 mail@gci-kw.de http://www.gci-kw.de/

Das Geotopkataster des UNESCO Global Geoparks Muskauer Faltenbogen/Łuk Mużakowa, Teil 1: Revision 2020

The Geotope Cadastre of the UNESCO Global Geopark Muskau Arch / Łuk Mużakowa, Part 1: Revision 2020

Wolfram Heidenfelder, Jochen Rascher, Linda Richter, Jacek Koźma, Kersten Löwen, Matthias Rascher, Manfred Kupetz

Zusammenfassung

1999–2001 wurde erstmals ein Geotopkataster für den Geopark Muskauer Faltenbogen erarbeitet. In den letzten 20 Jahren erweiterte sich das geologische Wissen über sein Gebiet erheblich. Es wurden u. a. ca. 800–900 Vorschläge für neue Geotope durch Fachgeologen und ehrenamtlich Tätige vorgelegt. 2020–2021 wurde das Kataster grundlegend überarbeitet und aktualisiert. Besonderer Wert wurde dabei auf die Spezifik von Geotopen in Lockergesteinsgebieten sowie die glazialtektonischen Großformen im Muskauer Faltenbogen gelegt. Außerdem wird ein allgemeiner Überblick über die aktuelle Geotopthematik in Brandenburg, Sachsen und Polen, bezogen auf die Belange des Geoparks Muskauer Faltenbogen, gegeben.

Summary

In 1999–2001, a geosite cadastre was drawn up for the Geopark for the first time. In the last 20 years, the geological knowledge about its area has expanded considerably. Among other things, approx. 800–900 proposals for new geosites have been submitted by specialized geologists and volunteers. The cadastre was fundamentally revised and updated in 2020–2021. Particular emphasis was placed on the specifics of geosites in areas with unconsolidated rocks and the large scale glaciotectonic features in the Muskau Arch push end moraine area. In addition, a general overview of the current geosite issues in Brandenburg, Saxony and Poland related to the concerns of the Muskau Arch Geopark, is given.

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Geotope sind für die Tätigkeit von Geoparks fachliche Arbeitsgrundlagen (siehe auch Teil 2 dieses Beitrages im vorliegenden Heft). In der Geotop-Ersterhebung für den Geopark wurden 1999–2001 im Muskauer Faltenbogen insgesamt 95 Geotope erhoben, beschrieben und bewertet (HÜBNER et al. 1999, REIN et al. 2001, 2002). Nach 20 Jahren hat sich der Kenntnisstand zu den geologischen Verhältnissen, der historischen rohstoffgewinnenden und -verarbeiten Industrie, der kulturellen und landschaftsgestaltenden Nutzung von geologischen Objekten sowie der anthropogenen Landschaftsveränderung enorm vergrößert. Deshalb war es erforderlich, das Geopark-Geotopkataster umfassend zu revidieren. Diese Aufgabe wurde methodisch zweigeteilt. Schritt 1 umfasste eine zusammenfassende Darstellung und Übersichtsbewertung (HEIDENFELDER et al. 2019), Schritt 2 die objektkonkrete Überarbeitung und Erweiterung des Katasters einschließlich einer detaillierten Neuaufnahme und Bewertung im Gelände (HEIDENFELDER et al. 2020). Besonderes Augenmerk wurde dabei darauf gelegt, dass nicht nur die Geotopthematik auf der deutschen Geoparkseite im Bundesland Brandenburg und im Freistaat Sachsen etwas unterschiedlich behandelt wird, sondern auch zwischen Deutschland und Polen gewisse Unterschiede bestehen.

Aus der Netzwerktätigkeit des Muskauer Faltenbogens im European Geoparks Network (EGN) und Global Geoparks Network (GGN) ist bekannt, dass in anderen Geoparks üblicherweise 80 bis 120 Geotope ausgewiesen sind. Durch eine qualifizierte on desk-Revision wurde deshalb eine Vorauswahl von 120, max. 140 offiziellen Geopark-Geotopen vorgenommen und die Auswahl verbal-argumentativ begründet. Diese Auswahl war ein Vorschlag, der durch den Geopark nachfolgend geprüft, bewertet und ggf. modifiziert wurde. Außerdem wurde eine Methodik entwickelt, wie künftig mit den nicht in die Vorauswahl eingegangenen Geotopen verfahren werden kann. Ziel ist es dabei, dass der Kenntnisstand dazu für die Zukunft nicht verloren geht. Für die Geotopbewertung wurde eine Auswertung von internationalen Bewertungsansätzen vorgenommen und ein Vorschlag für das Untersuchungsgebiet vorgelegt. Das neue Kataster wurde DV-basiert unter Berücksichtigung der Arbeitsanleitung zur Geotopkartierung und zum Geotopschutz der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD 2018) sowie der von den Diensten im Land Brandenburg, im Freistaat Sachsen und in der Republik Polen durchgeführten Erhebung angelegt. Hierzu wurde eine praktikable Datenbankvorlage entwickelt.

2 Zur Geotopdefinition

Im deutschen Sprachgebrauch existierte bis LOOK (1996) kein eindeutiger und allgemein anerkannter Fachausdruck für die Beschreibung und Definition besonderer geowissenschaftlicher Objekte. Bildungen der unbelebten Natur, wie Aufschlüsse, Landschaftsformen, erdgeschichtliche Bildungen usw. wurden als "Naturschöpfungen, Bildungen, Gebilde, Erscheinungen" oder als "Geowissenschaftlich schutzwürdige Objekte" (GeoschOb) bzw. als "Geologisches Naturdenkmal" (GND) bezeichnet. Der Begriff "Geotop" bezeichnete ursprünglich in der geographischen Fachliteratur für die Raumplanung der DDR die kleinste quasihomogene Grundeinheit eines Naturraums (HAASE & SCHLÜTER 1980). In der Folgezeit vollzog sich ein Begriffswandel, wobei der raumplanerische Aspekt zurücktrat. Zu Beginn der 1990er Jahre wurde der Geotopbegriff von der Arbeitsgemeinschaft "Geotopschutz in deutschsprachigen Ländern" auf "an der Erdoberfläche erkennbare oder von dieser aus zugängliche Teile der Geosphäre, die räumlich begrenzt und im geowissenschaftlichen Sinne von ihrer Umgebung klar unterscheidbar sind" angewandt (GRUBE & WIEDENBEIN 1992). Nach dieser Definition handelt es sich bei einem Geotop, analog zum Begriff Biotop, um einen räumlich begrenzten Ort (griech: "topos"), an dem nicht die belebte Natur (griech: "bios"), sondern der Aufbau, die Entwicklung und die Eigenschaften der Erde (griech: "gä") eine besondere Bedeutung haben. Aus diesem Grund bedarf dieser Ort eines besonderen Schutzes, sofern das Geotop erhalten werden soll.

Im Jahr 1992 beauftragten der Direktorenkreis der Staatlichen Geologische Dienste (SGD) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) eine Arbeitsgruppe, die fachlichen Grundlagen für eine Unterschutzstellung von "erdwissenschaftlichen Objekten" im Rahmen der jeweils gültigen Naturschutzregelungen der Bundesländer zu erarbeiten. Es hatte sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass nicht nur die belebte Natur des rechtlichen Schutzes bedarf, sondern auch typische Erscheinungen der unbelebten Natur. Beginnend im Jahr 1994, erarbeitete die Ad-hoc AG Geotopschutz die Definition des Begriffes "Geotop" und formulierte Kriterien der Schutzwürdigkeit von Geotopen. Die Definition beschreibt analog zum Begriff "Biotop" im Bereich der belebten Natur-Objekte der unbelebten Natur. In ihr spielt neben dem Schutz und dem Erhalt von geowissenschaftlichen Objekten auch der Gedanke der Erkenntnisvermittlung über die Erdgeschichte eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus wurde ein System zur Erfassung und Bewertung von Geotopen entwickelt, das eine länderübergreifende Vergleichbarkeit bei der Beurteilung der Schutzwürdigkeit erreichen sollte. Der Abschlussbericht zu diesen Arbeiten erschien im Jahre 1996 (LOOK 1996). Er wurde 2018 aktualisiert (SGD 2018).

"Schutzwürdige Geotope" sind jene Geotope, die sich durch ihre besondere erdgeschichtliche Bedeutung, Seltenheit, Eigenart oder Schönheit auszeichnen. Sie sind für die Wissenschaft, Forschung und Lehre sowie für Naturund Heimatkunde Dokumente von besonderem Wert. Sie können insbesondere dann, wenn sie gefährdet sind und vergleichbare Geotope zum Ausgleich nicht zur Verfügung stehen, eines rechtlichen Schutzes bedürfen.

"Geotopschutz" ist der Bereich des Naturschutzes, der sich mit Erhaltung und Pflege schutzwürdiger Geotope befasst. Die fachlichen Aufgaben der Erfassung und Bewertung von Geotopen sowie die Begründung von Vorschlägen für Schutz-, Pflege- und Erhaltungsmaßnahmen für schutzwürdige Geotope werden von den Geologischen Diensten der Länder wahrgenommen.

In Polen werden Geotope als geostanowiska bzw. in der englischen Übersetzung aus dem Polnischen als geosites bezeichnet. Auf der Internetseite des Staatlichen Geologischen Dienstes (Państwowy Instytut Geologiczny – PGI) werden Geotope wie folgt definiert (PGI 2019):

"About Geosites

Geosite or geotope (German: Geotope, Polish: geostanowisko) is a single or a mosaic spread object with outstanding geological values. The geosite documents the geological history of the area or illustrates various geologic processes, e.g.: interesting forms of landscapes, boulders, accumulation of fossil fauna and flora etc. The Central Register of Polish geosites will enable easy access to information about geosites."

Übertragung ins Deutsche:

"Über Geosites

Ein Geosite oder ein Geotop (Deutsch: Geotop, Polnisch: geostanowisko) ist ein einzelnes oder mosaikartiges Objekt mit hervorragenden geologischen Werten. Die Geotope dokumentieren die geologische Geschichte eines Gebietes oder veranschaulichen verschiedene geologische Prozesse, z.B.: interessante Landschaftsformen, Gesteinsformationen, Findlinge, Fossilfundorte etc. Das polnische Geotop-Zentralregister ermöglicht einen einfachen Informationszugang zu Geotopen."

3 Geotope und Geotopschutz im Freistaat Sachsen, im Land Brandenburg sowie in Polen

Seit den 1980iger Jahren rückte in Deutschland der Umwelt- und Naturschutz stärker in den Mittelpunkt des gesellschaftlichen und fachlichen Interesses. Dabei lag das Augenmerk vorrangig auf biologischen Aspekten. Naturschutz und Artenschutz wurden nahezu als Synonym wahrgenommen. Der nicht belebte Anteil der Natur wurde lediglich als ein Teil des natürlichen Ökosystems betrachtet, meist jedoch ohne ihm selbst die angemessene Wertschätzung und den erforderlichen Schutz zuteilwerden zu lassen.

In den letzten Jahren hat sich die öffentliche Wahrnehmung von geowissenschaftlichen Objekten als ein sichtbares Zeugnis erdgeschichtlicher Vorgänge wesentlich verbessert. Der Geotopschutz wird heute als ein Teilgebiet des Naturschutzes betrachtet. Neben der Bewahrung und dem Schutz von einzigartigen Landschaftsformen, Gesteinsaufschlüssen und Bodenvorkommen rücken verstärkt auch umweltpädagogische und geotouristische Aspekte in den Fokus der Gesellschaft. Ziel ist nicht nur der Schutz und Erhalt geowissenschaftlicher Objekte, sondern auch die verständliche Darstellung der erdgeschichtlichen Entwicklung unseres Planeten. Gesteinsaufschlüsse werden detailliert in der Fachliteratur beschrieben und dienen als Exkursionsziele für Lehr- und Forschungszwecke.

Der rechtliche Schutz von Geotopen ist in den Bundesländern nach wie vor nicht einheitlich geregelt. Neben derzeit ungeschützten Objekten können Geotope nach unterschiedlichen Bundes- oder Landesgesetzen geschützt werden. Schutzmaßnahmen waren häufig das Resultat der Arbeit von Naturschutzbehörden, Heimat- und Touristikverbänden, aber auch von hauptsächlich auf lokaler Ebene tätigen Gruppen oder Einzelpersonen. Für den Aufbau und die Laufendhaltung der Geotopkataster sind in Deutschland die Geologischen Dienste zuständig.

In der Republik Polen hält der Staatliche Geologische Dienst ein gesamtpolnisches Geotopkataster vor (Centralny Rejestr Geostanowisk Polski CRGP, PGI 2019). Sein Aufbau begann 2009 mit 1.500 Geotopen. Aktuell umfasst es 3.700 Geotope (Abb. 1). Seine Aufgaben und sein Zweck werden wie folgt beschrieben:

"The aim of the project is to support the preservation geodiversity and geological heritage of the country. Easy access to information about the geodiversity of the region is important for the government and organizations and associations dealing with nature conservation. The Central Register of Polish Geosites will contain information characterizing an object from the location and identify opportunities for directions, through the geological characteristics of the object, photo galleries, and bibliographies on the geosites."

Übertragung ins Deutsche:

"Ziel des Projekts ist es, die Erhaltung der Geodiversität und des geologischen Erbes des Landes zu unterstützen. Der einfache Zugang zu Informationen über die Geodiversität der Region ist wichtig für die Regierung, die Organisationen und Verbände, die sich mit Naturschutz befassen. Das polnische Geotop-Zentralregister enthält Lageinformationen sowie geologische Beschreibungen einschließlich von Fotos und bibliographischen Angaben."



Abb. 1: Übersichtskarte über die vom Polnischen Staatlichen Geologischen Dienst erfassten Geotope, (https://cbdgportal.pgi.gov.pl/geostanowiska/ Stand 08.12.2019).

Fig. 1: General map of the geotopes recorded by the Polish State Geological Survey, (https://cbdgportal.pgi.gov.pl/geostanowiska/ Stand 08.12.2019).

<u>Hinweis</u>: Im polnischen Verständnis werden der Aufbau und die Laufendhaltung des staatlichen Geotopkatasters als Projekt bezeichnet.

Ein der deutschen Arbeitsanleitung vergleichbares Regelwerk für dessen Erfassung und Bewertung ist nicht bekannt. Im CRGP werden die Geotope in einem komplexen DV-Programm gegliedert und in folgenden Registerkarten interaktiv im Internet vorgehalten:

- 1. Allgemeine Informationen
- 2. Physische Eigenschaften der Geotope
- 3. Gegenwärtiger Zustand
- 4. Geologische Beschreibung der Geotope
- 5. Graphische Dokumentation
- 6. Bearbeiter (bzw. Bearbeitungsstand) und
- 7. Bibliographie

Diese beinhalten insgesamt 37 Unterpunkte sowie Kartenausschnitte, Fotos, Abbildungen und ein Quellenverzeichnis. Für eine schnelle Übersicht ist es möglich, sich für jedes Geotop ein Dokumentationsblatt (Karta Dokumentacyjna Geostanowiska) ausgeben zu lassen.

Die Geotoperfassung, -pflege und -präsentation gehört für UNESCO Global Geoparks in allen Ländern wie auch für Nationale Geoparks in Deutschland zu deren Aufgaben. Wegen der fehlenden gesetzlichen Grundlage für den Geotopsschutz und für Geoparks sind diese Aufgaben aus hoheitlicher Sicht jedoch freiwillige Aufgaben.

4 Zur Spezifik von Geotopen im Lockergesteinsgebiet des pleistozänen Vereisungsgebietes

Die weit überwiegende Anzahl von Geotopen in Deutschland und Polen befindet sich in Mittel- oder Hochgebirgsregionen (Abb. 2). Es sind meist markante Felsformationen, künstliche Aufschlüsse in Festgesteinen oder geomorphologisch markante Landschaftselemente. Darüber hinaus sind die im Gebiet der nordischen Vereisungen Deutschlands und Polens ausgewählten Geotope nicht selten lokale Grundgebirgsaufbrüche oder präpleistozäne Schollen, die in der Eiszeitlandschaft einen eher exotischen Charakter haben, als dass sie diese charakterisieren. Beispiele dafür sind in Deutschland die Kalkgrube Lieth bei Elmshorn (Zechsteindiapir, LOOK & QUADE 2007, S. 8) oder die Kreideküste der Insel Rügen (Schreibkreide, Maastricht, LOOK & QUADE 2007, S. 26) und in Polen das Salzbergwerk in Kłodawie (Kopalnia Soli w Kłodawie, Zechstein, Wojewodschaft Großpolen, SŁOMKA et al. 2006, S. 232) sowie das Kliff von Chłapowo an der Ostseeküste (braunkohlenführende Miozänscholle, Wojewodschaft Pommern, SŁOMKA et al. 2006, S. 168). Die Unterrepräsentanz von Lockergesteinsgeotopen kommt u. a. auch in der tabellarischen "Erläuterung ausgewählter geowissenschaftlicher Begriffe und Geotoptypen" (Anl. 1 in SGD 2018) zum Ausdruck.



- Abb. 2: Die Übersicht der 103 "schönsten Geotope Deutschlands" zeigt sehr deutlich die zahlenmäßig geringe Flächenbelegung mit Geotopen im nördlichen, pleistozän geprägten Teil Deutschlands (LOOK & QUADE 2007).
- Fig. 2: The overview of the 103 "most beautiful geotopes in Germany" clearly shows the low number of geosites in the northern, Pleistocene part of Germany (LOOK & QUADE 2007).

Oftmals ist es schwierig, die pleistozänen Lockergesteine als attraktive Geotope in Szene zu setzen. Dies hat folgende Gründe:

- 1. Die pleistozänen Lockersedimente treten i. d. R. in nur wenig markanten Landschaftsformen auf.
- Sie bilden an der Erdoberfläche auf Grund ihrer guten Bodenbildungseigenschaften (Korngröße, Permeabilität) flächendeckend Böden aus, sodass sie i. d. R. nur in künstlichen Aufschlüssen in geologisch nicht veränderter Form auftreten.
- 3. Die Böden sind i. d. R. dicht mit einer Gras- und Krautschicht oder Wald und Forsten bedeckt. Diese maskieren die geomorphologischen Strukturen zusätzlich.

5 Einzelaktivitäten zur Erhebung weiterer Geotope im Zeitraum 2001-2019

Insgesamt wurden für den Muskauer Faltenbogen im Zeitraum von 2001–2019 ca. 800 bis 900 neue Geotopvorschläge unterbreitet. Durch acht Aktive bzw. Projekte in der Region (Fördervereinsmitglieder, Geoparkführer, Mitglieder der Geschäftsstelle und regionale Akteure) gingen diese in Arbeitspapiere und nicht publizierte Projektberichte ein (Tab. 1, lfd. Nr. 1–10). Die weiteren Vorschläge wurden inhaltlich in acht Gruppen klassifiziert (Tab. 1, lfd. Nr. 11–18). Da die Vorschläge teilweise nach Autoren und teilweise nach Geotoptypen geordnet sind, überschneiden sich einige Geotope, weil die Autoren thematisch und nicht nach Geotoptypen gearbeitet haben. Tab. 1 gibt dazu einen nicht auf Vollständigkeit ausgerichteten Überblick.

6 Revision des Geotopkatasters

Die Arbeitsanleitung Geotopschutz in Deutschland (SGD 2018) teilt die Geotope in Deutschland in fünf Geotoptypen mit 20 Untertypen ein. Diese Untergliederung wurde auch bei der Geotoperstkartierung im Muskauer Faltenbogen genutzt. Geschuldet der unscharfen Bestimmung des Geotopbegriffes haben Autoren der Arbeitsanleitung jedoch ein Problem, Geotoptypen tatsächlich zu formulieren. Sie verstehen sie in diesem wesentlichen Punkt ihrer Arbeitsanleitung mehr als Anhaltspunkt als ein zur konkreten Anwendung empfohlenes Klassifizierungsschema. Sie führen dazu aus:

"Als Anhaltspunkt für die Bearbeiter bei der Erfassung von Geotopen im Gelände dient die im Anhang als Anlage 1 aufgeführte Zusammenstellung ausgewählter geowissenschaftlicher Begriffe. Sie erhebt mit den fünf Hauptgruppen Aufschlüsse, Landschaftsformen, Quellen, Höhlen sowie geohistorische Objekte keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für die einzelnen Bundesländer sind entsprechend der geologischen Verhältnisse jeweils nur Teile der Aufzählung in Anlage 1 relevant ..."

Als Ausdruck dieses unscharfen Geotoptypen-Begriffes ist auch die zitierte Anl. 1 mit "*Erläuterung ausgewählter geowissenschaftlicher Begriffe und Geotoptypen*" überschrieben. Aufgezählt werden insgesamt 407 Begriffe. Für den Muskauer Faltenbogen sind davon nur etwa 30 bis 40 zutreffend bzw. anwendbar. Genauer benennen kann man die Zahl nicht, weil sich einige Begriffe inhaltlich überschneiden. Dennoch ist diese Zusammenstellung ein hilfreiches Bearbeitungsinstrument. Entsprechend der Intention der Arbeitsanleitung Geotopschutz wird im Folgenden die zweigegliederte Geotopeinteilung, die bereits bei der Ersterfassung im Muskauer Faltenbogen zum Einsatz kam, verwendet und weiterentwickelt.

6.1 Eckpunkte

6.1.1 Zur Frage der Geotopgröße und der Nationale Geotop[®] Muskauer Faltenbogen

Für die Größe von Geotopen gibt es keine einheitlichen Regeln, auch keine Diskussion in Fachpublikationen. Üblicherweise sind es natürliche oder künstliche Aufschlüsse von wenigen Metern oder Dekametern, in Einzelfällen auch 100 oder 200 Metern Länge. Sieht man die Gesamtstruktur des Muskauer Faltenbogen als Geotop an, was in diesem Falle sinnvoll ist, handelt es sich um eine hufeisenförmige Stauchend- bzw. Grundbruchmoräne von ca. 20 km westöstlicher und etwa 22 km nordsüdlicher Erstreckung. Daraus ergibt sich eine Gesamtfläche von ca. 440 km² (Abb. 3). In diesem Sinne hat KUPETZ (1996) den Muskauer Faltenbogen als Geotop von Europäischer Bedeutung beschrieben. Auch die Akademie der Geowissenschaften zu Hannover zertifizierte 2006 den Muskauer Faltenbogen in diesem Sinne als Nationalen Geotop® und bestätigte 2017 seine Rezertifizierung (Abb. 4).

Insgesamt werden im Muskauer Faltenbogen nach der Geotopgröße drei Dimensionen ausgehalten:

- 1. die 20 km Dimension: das entspricht dem Muskauer Faltenbogen s. str. oder dem Neißedurchbruch durch den Faltenbogen,
- 2. die Dimension weniger Hundert Meter bis wenige Kilometer: das entspricht z. B. dem Moränentor von Halbendorf (Dübener Depression), dem Giesergebiet der Drachenberge oder dem Versunkenen Wald in der Grube Conrad, wo Teile des untertägigen Braunkohlenbergbaus der drei Mulden Elise, Erika und Emma zu Bruch gegangen sind) und
- die Dimension weniger Meter bis weniger Hundert Meter: z. B. ein normaler einzelner Gieser, die Großen Babina-Quellen oder der Braunkohlenschurf am Felixsee.

Der Übergang zwischen diesen Größen ist fließend. Dieser generellen Einteilung sollte man sich stets bewusst sein, um eventuelle Irritationen zu vermeiden.

6.2 Revision der Geotoptypen-Klassifikation

Die Geotoptypen-Klassifikation wurde faltenbogenspezifisch überarbeitet und erweitert (Tab. 2). Die wichtigsten Punkte dazu sind:

1. Durch einige Einzelstudien sind heute eine Reihe von Großformen der glazialtektonischen Lagerungsstörungen bekannt, die weltweit aus keiner anderen Stauchendmoräne in dieser Genauigkeit beschrieben wurden. Deshalb wurde in der Geotoptypen-Gruppe glazialtektonische Lagerungsstörungen eine Untergliederung in sechs (Einzel-)Geotope vorgenommen:

lfde Nr.	Ordnungskriterium	Autor	Kommentare
1	vermutete Sollstrukturen	Киретz (2003)	Karte vermuteter Sollstrukturen auf der Informationstafel "Soll von Klein Kölzig"
2	Planungsvorhaben Großschurf Kromlau	Rascher & Heidenfelder (2009)	Projekt eines 300 m langen Großschurfes im Kromlauer Perk, nicht realisiert
3	Findlinge	Mädler (2006, 2009, 2011a, b)	Findlingsinventur im gesamten Gebiet des Muskauer Faltenbogens
4	Neißedurchbruch, seine Terrassen und Seitentäler	Bölscher u.a. (2008)	
5	Raseneisenerze und rezente sekundäre Eisen(III)-Mineralbildungen	Rzepa & Воżęскі (2007, 2008), Киретz et al. (2012), Киретz (2018)	mineralogische und röntgenenogrphische Unter- suchungen zu sekundären Eisen(III)-Mineralen (Eisenschlämme) und Raseneisenerz
6	Geotopvorschläge von Uwe Bartholomäus	Bartholomäus (2015a,b)	schwerpunktmäßig relikte des historischen Braunkohlenbergbaus im deutschen Geoparkteil
7	Geotopvorschläge von Nancy Sauer aus dem DBU-Projekt Kulturlandschaft Muskauer Faltenbogen	Sauer (2018)	schwerpunktmäßig geomorphologische und kulturlandschaftsbezogene Geotope
8	Dissertation Jacek Koźma	Коźма (20218)	bergbauhistorische Objekte, anthropogene Landschaftsveränderungen verschiedener Art, siehe auch Abb. 10
9	antropogene Geotope i.S. der Verwendun- gen von Feldsteinen und Findlingen	Berndt & Hylla (2002), Köbbl & Tschuk (2005), Kotzan & Ulbrich (2009)	Die zwei erstgenannen genannten Quellen beinhalten eine flächendeckende Dokumentation über die Verwendung von Feldsteinen in Profan- bauten für den Landkreis Spree-Neiße. Die dritte Quelle beschreibt den Lausitzter Findlingspark Nochten unter geologischem Aspekt.
10	Findlingszusammentragung im Rahmen des gescheiterten Projektes Runen- und Bildsteinpark in Gosda II 1993	Thiel (1993)	Zusammentragung von ca. 500, z. T. sehr großen Findlingen auf drei Privatgrundstücken mit unsicheren Informationen über deren Herkunft
11	Großformen der glazialtektonischen Deformation		Einzelinformationen aus verschiedenen Publikationen und eigene Beobachtungen
12	Gieser		Einzelinformationen aus verschiedenen Publikationen und eigene Beobachtungen
13	Quellen		Einzelinformationen aus verschiedenen Publikationen und eigene Beobachtungen
14	Böden		Böden blieben auf Grund fehlender flächenhafter Übersicht zunächst außen vor.
15	Bergbaufolgeseen	Baron (2007), Koźma (2018)	Umfangreiche Erhebungen zu Bergbau- folgegewässern im polnischen Teil durch Jacek Koźma.
16	verdeckte Geotope		Nicht aufgeschlossenen, oberflächennahe Roh- stoffvorkommen sowie Erdöl- und Erdgasvorkom- men, Informationen aus verschiedenen Quellen.
17	temporäre Geotope		Geologisch relevante temporäre Aufschlüsse, Baugruben, Straßenanschnitte. Informationen aus verschiedenen Quellen.
18	sonstige Geotope		Spezielle Geotope, die nicht ohne weiteres zuordenbar sind.

Tab. 1: Übersicht zu den neuen, im Zeitraum von 2001–2019 erarbeiteten Vorschlägen für Geopark-Geotope.

Tab. 1: Overview of the new Geopark geotope proposals developed in the period 2001–2019.



- Abb. 3: Schattenreliefdarstellung des Muskauer Faltenbogens im digitalen Geländemodell (DGM). Bearbeiter Jacek Koźma 2006, aus Kupetz & Kupetz (2009, S. 226).
- Fig. 3: Shadow relief representation of the Muskau Arch in the digital terrain model (DTM). Processor Jacek Koźma 2006, from Kupetz & Kupetz (2009, S. 226).

Abb. 4: Zertifizierungsurkunde des Muskauer Faltenbogens als Nationaler Geotop[®] 2006.

> Fig. 4: Certification document of the Muskau Arch as a National Geotope[®] 2006.



Akademie der Geowissenschaften zu Hannover e. V.

Der eiszeitliche "Muskauer Faltenbogen" in Brandenburg

wurde im Wettbewerb "Die bedeutendsten Geotope in Deutschland" mit dem Prädikat

NATIONALER GEOTOP

ausgezeichnet.

Hannover, 12. Mai 2006 WWWW Prof. Dr. Dr. h. c. Horst Quas - Prisident der Akademie - Schuppen, Diapire und Diapirfalten, irreguläre Deformationen, große Mulden sowie Schollen (Abb. 5a-d, 6a-d, 7a-c, 8).

- 2. Wesentliche Erkenntnisfortschritte erzielte MÄDLER (2006, 2009, 2011A-C, 2018) mit seiner systematischen, flächendeckenden Findlingskartierung.
- Mit den Untersuchungen von BożĘCKI (2010, 2013) und KUPETZ et al. (2012) wurde der Kenntnisstand zu den Raseneisenerzen und den rezenten, sekundär gebildeten Eisen(III)-Mineralen erheblich erweitert und damit eine entsprechende Berücksichtigung bei der Geotoprevision begründet.
- 4. Bei den Bergbaufolgeseen wurden die sog. Versunkenen Wälder (unter Wasser gegangene Tiefbaubruchgebiete) ergänzt, weil diese einerseits faltenbogenspezifisch und andererseits von sehr hoher ästhetischer Attraktivität sind.
- 5. Eine stärkere Wichtung erhalten ebenfalls die bei der Erstkartierung weniger stark beachteten Seitentäler der Lausitzer Neiße (oftmals Trockentäler).
- 6. Für die menschliche Tätigkeit im Faltenbogen hat die historische Rohstoffnutzung einen besonderen Stellenwert. Sie sollte besonders unter dem Aspekt der nachhaltigen Bildung hinsichtlich der sozialen Entwicklung der Region und der Entstehung neuer Technologien zur Rohstoffverarbeitung betrachtet werden. Deshalb erweitert sich das Spektrum der Rohstoffe bei den Geotopen um geologisch junge Tone als Begussmasse für das Muskauer Steinzeug sowie die rezente Bildung mächtigerer Eisen(III)-Mineralabsätze als Beispiel für den rezenten Prozess der Raseneisenerzbildung (Abb. 9).
- 7. In den Kontext der Rohstoffe fallen auch die historische Erdölförderung und die gegenwärtige Solenutzung aus einer tiefen Bohrung.
- Durch geologische Untersuchungen des oberflächennahen Bereiches wurden einige Lockergesteine gefunden, die aus geowissenschaftlicher und/oder geodidaktischer Sicht von Interesse sind. Beispiele sind das Kieselgurvorkommen bei Jocksdorf, die Seekreide bei Tschernitz und die Bändertone bei Kromlau.
- 9. Mit der Geotoprevision erhalten durch den Menschen genutzte Feldsteine und Findlinge einen größeren Stellenwert als bisher. Zu nennen ist an erster Stelle der Findlingspark Nochten in seiner Gesamtanlage mit ca. 7000 Findlingen und hier speziell die Sammlung der 77 ausgewählten Findlinge in "Klein-Skandinavien". Neu bewertet werden darüber hinaus einige größere, bisher kaum beachtete Feldsteinbauten. Bislang außerhalb des Fokus standen auch die wenigen, noch original erhaltenen Kopfsteinpflasterstraßen aus "Katzenköpfen" (Feldsteinen).
- 10. Die Kategorie der bergbauhistorischen Objekte wurde durch KoźMA (2018) beispielhaft bearbeitet. Dabei stechen besonders die noch gut erhaltenen, mit Ziegelsteinen gemauerten Schrägschächte im polnischen Teil des Faltenbogens hervor (Abb. 10). Sie haben eine große Bedeutung als potentiell touristisch zu erschließende Geotope.

 Schließlich gibt es einige wichtige verdeckte und temporäre Oberflächenaufschlüsse, die zumindest teilweise dokumentiert, nicht aber veröffentlicht wurden. Einige bedeutende von ihnen sollten in eine der beiden nachgeordneten Stufen 2 oder 3 des revidierten Geotopkatasters (vgl. Abschnitt 6.4.) aufgenommen werden. Hierzu gehören die fotographisch dokumentierte, 23 m lange Tertiärschuppe (Sand, Schluff und Ton) des Straßeneinschnittes der Umgehungsstraße (B12) von Łęknica 2010 (Abb. 5d) sowie der Aufschluss eines Braunkohlenflözes in der Baugrube des Schulneubaus in Döbern 2019.

6.3 Entwicklung der Geotoprevision an einem Beispiel

Zur Veranschaulichung des Revisionsprozesses soll ein charakteristisches Geotop in Form von Lockersedimenten im pleistozänen Vereisungsgebiet des Muskauer Faltenbogens herangezogen werden. Es handelt sich um ein Schichtenprofil steilstehender miozäner Sande, Kiese, Sande, Schluffe und Tone der ehemaligen Tongrube Irena bei Łęknica. Nach Beendigung des Abbaus wurde das Restloch mit einer Abdichtung versehen und einer sekundären Funktion als Abfalldeponie zugeführt, die wiederum derzeit abgedeckt und begrünt ist. Das Geotop besteht in seiner heutigen Form im Wesentlichen aus zwei Teilen: 1) einer in NE-SW Richtung verlaufenden, 5 m hohen und etwa 60m langen ehemaligen Grubenwand und 2) einem rechtwinklig von dieser Wand nach NW abbiegenden, 16m langen Schichtenprofil (Abb. 11a, b). Ein häufiges Problem bei dieser Art von Lockersedimentaufschlüssen besteht einerseits in den bereits unter Kapitel 4 genannten Aspekten, aber auch in ihrer geringen Beständigkeit bzw. Konservierungsfähigkeit. Knappe 20 Jahre nach der Erstaufnahme des Geotops in das Geotopkataster wäre heute ein erheblich schlechterer Erhaltungs- bzw. Aufschlusszustand erwartbar gewesen, sodass es in der Revision möglicherweise nur noch als temporäres (oder ehemaliges) Geotop erscheinen würde. Aufgrund der leichten Silifizierung großer Teile der Schichtenfolge stellte sich im Rahmen der Neuaufnahme allerdings ein exzellenter Aufschluss- und Erhaltungszustand heraus. Die Verkieselung ist vor allem im südöstlichen Bereich stärker ausgebildet und tritt in Form von etwa 1,0-1,5 m großen Tertiärquarzit-Blöcken innerhalb der Schichtfolge in Erscheinung (Abb. 11c). Das eigentliche Highlight, das die geowissenschaftliche Signifikanz des Geotops unterstreicht, ist das knapp 16 m lange Profil im SW des Aufschlusses. Das glazialtektonisch verschuppte Schichtenprofil setzt sich zusammen aus einer steilgestellten Abfolge von miozänen, teils tonigen Sanden und Kiesen und geht linker Hand in eine pleistozäne Kiesschuppe über, die durch eine gut sichtbare Störung von (teils zerscherten) miozänen Sanden und Tonen im Liegenden getrennt wird (Abb. 11d). In den permeablen Bereichen des Profils sind die Sedimente durch eisenreiche Grundwässer braun gefärbt, was neben den kleinskaligen attraktiven Strukturen zur optischen Strahlkraft beiträgt.



 Abb. 5: Glazialtektonische Groβschuppen im Muskauer Faltenbogen im Überblick.
 a) Schuppenabfolge in der ehemaligen Braunkohlengrube Julius bei Wolfshain/Friedrichshain. Die Grafik wurde aus zahlreichen Bohrungen, geologischen Schnitten und einer Interpretation eines hochauflösenden DGM rekonstruiert. Nicht berücksichtigt sind dabei die Veränderungen der geo-logischen Verhältnisse durch den über- und untertägigen Bergbau, aus KUPETZ et al. (2004).

b) Geomorphologisch treten die linienhaften Braunkohlenausstriche über den ausstreichenden Braunkohlenflözen häufig durch mittelmaßstäbliche Talbildungen (Gieser) in Erscheinung. Gieserlandschaft östlich von Reuthen.

c) Zwei Gieser treten durch helleres Grün von Birken im Kiefernforst in Erscheinung. Es sind Gieser mit charakteristischer Feuchtvegetation infolge von Vermoorung auf ihrer Sohle. Die seitlichen Hochflächen sind Kiefernforste. Typisch ist der feuchtigkeitsbedingte Bestand mit einzelnen Birken im und am Rand des Giesers, Gieserlandschaft südöstlich des Felixsees. (Foto: Peter Radke, LMBV).

d) Glazialtektonische Schuppe in miozänen Tonen, Schluffen und Sanden nicht näher bestimmbaren Alters. Der Geländeanschnitt entstand im Rahmen des Neubaus der Umgehungsstraße B12 von Łęknica am 10.04.2010, temporäres Geotop.

Fig. 5: Overview of glacial-tectonic large thrust slices in the Muskau Arch.

a) Thrust slice sequence (glaciotectonic rafts) in the former Julius lignite mine near Wolfshain/Friedrichshain. The diagram was reconstructed from numerous boreholes, geological sections and an interpretation of a high-resolution DTM. The changes in the geological conditions due to surface and underground mining are not taken into account, from KUPETZ et al. (2004).

b) Geomorphologically, the linear lignite outcrops above the striking lignite seams often appear as mid-scale valleys (Gieser valley). Gieser landscape east of Reuthen.

c) Two gieser valleys are characterised by lighter green birch trees in the pine forest. These are Gieser valleys with characteristic wetland vegetation as a result of bogging on its bed. The lateral uplands are pine forests. Typical is the moisture-related stand with individual birch trees in and at the edge of the gieser valley, Gieser landscape southeasr of lake Felixsse. (Photo: Peter Radke, LMBV).

d) Glacial-tectonic thrust slice in Miocene clays, silts and sands of indeterminable age.

The outcrop was exposed during the construction of the new B12 bypass road in *Łęknica on 10.04.2010, temporary geotope.*



Abb. 6: Der Bohsdorfer Diapir.

a) Geländeansicht von Südosten her.

b) Baumkronenfoto von Süden her, der vertorfte, ellipsenförmig umlaufende Gieser wird durch den Ausfall des Kiefernbestandes sichtbar, Bildhöhe ca. 500 m (Foto: Peter Radke, LMBV).

c) Ansicht des N–S verlaufenden Diapirs im hochauflösenden DGM-Image, Bildhöhe ca. 1,3 km, aus Киретz & Koźмa (2015).

d) Der Bohsdorfer Diapir (roter Kreis). Er wurde aus seinem charakteristischen, ellipsoiden Gieser und einem hochauflösenden DGM rekonstruiert, aus KUPETZ et al. (2004).

Fig. 6: The Bohsdorf diapir.

a) View of the terrain from the south-east.

b) Treetop photo from the south, the peaty, ellipsoidal gieser valley becomes visible through the lower pine stand, image height approx. 500 m (Photo: Peter Radke, LMBV). c) View of the N–S trending diapir in the high-resolution DTM image, image height approx. 1.3 km, from KUPETZ & KOŹMA (2015). d) The Bohsdorf diapir (red circle). It was reconstructed from its characteristic ellipsoidal Gieser valley

and a high-resolution DTM, from KUPETZ et al. (2004).



- Abb. 7: Irreguläre glazialtektonische Biegefließfalten im Bereich der Gruben Mathilde bei Lieskau und Anna bei Reuthen. Der doppelt S-förmige Grundriss des Sees zeichnet eine plastische Biegefließfalte, die von zwei ebenfalls glazialtektonischen Bruchstörungen durchzogen wird, aus KUPETZ & KoźMA (2015). a) Bergbaufolgesee des Tagebaus der Grube Mathilde. Aufgenommen aus ostsüdöstlicher Richtung, Höhe des Bildes etwa 500 m. Foto: Peter Radke, LMBV. b) Innerhalb der gefalteten Schichtenfolge bildet das Braunkohlenflöz einen Leithorizont, der die Faltungscharakteristik abbildet. Die Skizze zeigt eine Flözrekunstruktion auf der Grundlage von Altbergbaurissen.
- Fig. 7: Irregular glacial-tectonic flexural flow folds in the area of the Mathilde pit near Lieskau and Anna pit near Reuthen. The double S-shaped outline of the lake traces a plastic flexural flow fold traversed by two likewise glacial-tectonic fracture faults, from KUPETZ & KoźMA (2015). (a) Post mining lake of the open pit Mathilde. Taken from east-southeast direction, height of the picture about 500 m. (Photo: Peter Radke, LMBV).
 (b) Within the folded sequence, the lignite seam forms a lithological key bed that depicts the folding characteristics. The sketch shows a seam reconstruction based on old mining cracks.



Abb. 8:

Farbkodierter Ausschnitt aus einem hochauflösenden DGM ohne Bewaldung südlich der Geologie-Tour. Bildbeherrschende Struktur ist eine gestaffelte, dextrale Diagonalstörung in den Lockergesteinen des glazialtektonisch gestörten Miozäns, Bildausschnitt 800 x 800 m, Überhöhung 2 x, aus KUPETZ (2003).

Fig. 8:

Colour-coded section from a high-resolution DTM without forestation south of the geology tour. The dominant structure is a staggered, dextral diagonal fault in the unconsolidated rocks of the glacial-tectonically disturbed Miocene sequence, image section 800 x 800 m, superelevation 2 x, from KUPETZ (2003).







Abb. 9:

Rotbraune Bergbaufolgenseen und rezente Bildung rotbrauen Eisenschlämmen sowie mächtigeren Eisen(III)-Mineralkrusten.

a) Ausfällung von sekundären Eisen(III)-Mineralen am Überlauf des Kleinen in den Großen Luisensee in der Braunkohlengrube Franz bei Klein Kölzig.

b) Ungestörte, chemisch nachträglich verfestigte Probe aus den 20–30 cm mächtigen Eisenmineralbildungen im Luisensee.

c) Bildung der sekundären Eisen(III)-Minerale, erarbeitet im polnischen Teil des Geoparks (Bożęcki 2009).

Fig. 9:

Red-brown post mining lakes and recent formation of red-brown iron muds and thicker iron(III) mineral crusts. a) Precipitation of secondary iron(III) minerals at the overflow of the Small Luisensee into the Large Luisensee in the Franz mine near Klein Kölzig.

b) Undisturbed, chemically subsequently solidified sample from the 20-30 cm thick iron mineral formations in the Luisensee.

c) Formation of the secondary iron(III) minerals, developed in the Polish part of the Geopark (ВоżĘски 2009).



Abb. 10:

Die Schrägschächte zur Braunkohlenförderung im östlichen Teil des Geoparks als besondere bergbauhistorische Geotope. a) Braunkohlenförderung in einem Schrägschacht in dem 1930er Jahren in der Braunkohlengrube Babina bei Łęknica (Lugknitz) aus DAWCZYK & MACIANTOWICZ (2014). b) Mit den für den Muskauer Faltenbogen charakteristischen gelben Ziegeln gemauerter, repräsentativer Eingangsbereich eines Schrägschachts. Consolidierte Tschöpelner Braunkohlengruben bei Braunsdorf (Bronowice), aus KożмA (2018). c) Mit den für den Muskauer Faltenbogen charakteristischen gelben Ziegeln gemauerter, repräsentativer Eingangsbereich eines Schrägschachts. Grube Pauline bei Nowe Czaple, aus Dawczyk & Maciantowicz (2014).

Fig. 10

The inclined shafts for lignite mining in the eastern part of the Geopark as special historical mining geotopes. a) Lignite mining in an inclined shaft in the 1930s in the Babina mine near Łęknica (Lugknitz) from DAWCZYK & MACIANTOWICZ (2014). b) Representative entrance area of an inclined shaft constructed with the characteristic yellow bricks of the Muskau Arch. Consolidated Tschöpeln lignite pits near Broniwice (Braunsdorf), from KożMA (2018). c) Representative entrance area of an inclined shaft constructed with the characteristic yellow bricks of the Muskau Arch. Pauline pit near Nowe Czaple, from DAWCZYK & MACIANTOWICZ (2014).

Geotoptypenklassifikati	on MFB (1999)*	Geo- toptyp (2018)***	Revidierte Geotoptypenklassifikation für den MFB	
Geotoptypen (Gruppe)	(Einzel-)Geotope		Geotoptypen (Gruppe)	(Einzel-)Geotope
	glazialtektonische Lagerungsstörungen			Grundbruchmoräne
		AL		große glazialtektonische Rupturen, Flexuren und Seitenverschiebungen
			große Einzelformen von glazialtektonischen Deformationen	Schuppen
Lagerungsverhältnisse/				Diapire und Diapirfalten
				irreguläre Deformationen
				Schollen
	geomorphologisch wirksame Gesteinsgrenze		geomorphologisch wirksame Gesteinsgrenze	
		FF	anthropogene Bachmelioration und Umverlegung	
-	-		rezente Erosions- und Sedimentationsformenformen	
-	-	AB	Boden	
	Endmoräne		Endmoräne	
		FG	Moränentor	
			Glaziäres Becken	
	Geschiebemergel	AG	Geschiebemergel	
glaziale und periglaziale	Soll	FG	Soll	
Abtragungs- und Ablagerungsformen	Findling	AG	Findling	
Ablagerungsformen	Blockpackung	AG	Blockpackung	
	Gieser	FV	Gieser	
		AG	Tertiärquarzit	
windbedingte	Düne		Düne	
Abtragungs- u. Ablagerungsformen	Bestreuung mit Windkantern auf Tertiär (Steinsohle)	FW	Bestreuung mit Windkantern auf Tertiär (Steinsohle)	
	Altarm		Altarm	
]	Mäander	
fluviatile Abtragungs-	Flussterrasse] FF	Flussterrasse	
and Ablagerangsformen	Tal, Schlucht		Trockental	
	Durchbruchstal		Durchbruchstal	
	Moor in Giesern		Moor in Giesern	
Moore	Gehängemoor	ES	Gehängemoor	
	Flachmoor		Flachmoor	
	Quelle		Quelle	
Quellen	Wasserüberlauf zwischen Bergbaurestgewässern	Q	Wasserüberlauf zwischen Bergbaufolgeseen	
			Solquellen	

Geotoptypenklassifikat	ion MFB (1999)*	Geo-	Revidierte Geotoptypenklassifikation für den MFB	
Geotoptypen (Gruppe)	(Einzel-)Geotope	toptyp (2018)***	Geotoptypen (Gruppe)	(Einzel-)Geotope
		AS	rezente Raseneisenerzbildung	
			pleistozäner Ton	
	Raseneisenerz	1	Raseneisenerz	
	Kies und Sand		Kies und Sand	
	Torf		Torf	
		- AG	Kieselgur	
Rohstoffe	Braunkohle		Braunkohle	
	Alaunton		Alaunton	
	Ton	-	miozäner Ton	
			Erdöl	
	saures Restgewässer des Braunkohlenbergbaues		saurer Braunkohlenbergbaufolgesee	Bergbaufolgeseen
Bergbaurestgewässer	oigotrophes, naturnahes Restgewässer des Braunkohlen- u. Kiesbergbaues		oligotropher, naturnahe Folgesee des Braunkohlen- u. Kiesbergbaues	oligotrophe, naturnahe Folgegewässer des Braunkohlen- u. Kiesbergbaues
	Restgewässer des Tonbergbaues		Folgesee des Tonabbaues	Folgeseen des Tonbab- baues
trockene Braunkohlent- agebaurestlöcher)**			trockene Braunkohlentagebaurestlöcher	
Feldsteinhäuser	Gebäude aus Lesesteinen		Feldsteinhäuser	Feldsteinbauten
		G		Kopsteinpflasterstraßen aus Feldsteinen
Landaahafta gaataltar	Basaltsäule		landschaftsgestalterische Geoobjekte	Basaltsäulen
ische Geo-objekte	gartenarchitektonisch genutzter Findling			gartenarchitektonisch genutzter Findling
			bergbauhistorische Objekte	Schachtanlagen
			anthropogene Landschaftsge- staltung	Bachmeliorationen

MFB – Muskauer Faltenbogen

)* Geotopschutzgutachten (HÜBNER et al. (1999) sowie Geotopkartierung in der Machbarkeitsstudie (REIN et al. 2001, Anlagenteil 2)

)** Ergänzung durch Коźма et al.(2001)

)*** SGD (2019; Arbeitsanleitung Geotopschutz in Deutschland, 2. Aufl.)

Tab. 2: Geotoptypen-Klassifikation im Geopark Muskauer Faltenbogen (methodische Geotoptabelle).

Tab. 2: Geotope type classification in the Muskau Arch Geopark (methodological geotope table).

Insgesamt stellt die ehemalige Tongrube ein hervorragendes Beispiel für ein leicht zugängliches Geotop dar, an dem verschiedene faltenbogenspezifische Charakteristika zu beobachten sind. Innerhalb unserer Klassifikation wird es aufgrund seiner Verbindung zum Tonabbau in die Geotoptypen (Gruppe) der Rohstoffe eingeordnet und weiter als (Einzel-)Geotop in der Kategorie Kies & Sand geführt. Es schafft aber auch die Verbindung zu weiteren geologischen Prozessen wie der Verkieselung oder glazialtektonischer Deformation, die hier sehr anschaulich dargestellt werden können.

6.4 Das dreistufige Modell für die Geotopkataster-Revision

Die Vielzahl und Heterogenität der Geotope erforderte einen differenzierteren Umgang bei der Revision des Katasters, als das bei der Ersterhebung 1999–2001 der Fall war. Seinerzeit wurde aus der Literaturkenntnis heraus und durch Geländebegehungen eine erstmalige Bestandaufnahme durchgeführt. Demgegenüber liegt heute eine etwa zehn- bis zwanzigfach größere Zahl von Geotopvorschlägen vor. Auf der Grundlage der revidierten Geotoptypen-Klassifikation (Tab. 2, Spalten 4–5) und neuen Geotopvorschlägen (Tab. 1) wurde verbal-argumentativ der Schwerpunkt bei der Geotopauswahl auf folgende faltenbogenspezifische Geotoptypen gelegt:

- 1. die sehr gut bekannten Großformen der glazialtektonischen Deformation und ihrem geomorphologischen Erscheinungsbild, den Giesern,
- die oftmals farbigen Bergbaufolgeseen einschlie
 ßlich der "Versunkenen W
 älder",
- 3. die Findlinge und Feldsteine in ihrem natürlichen Kontext sowie ihren Nutzungsformen und
- 4. die Rohstoffe.

Hierzu wurde ein dreistufiges Modell für das künftige Geotopkataster entwickelt (Tab. 3). Ziel dieses Modells ist es, zum einen ein offizielles Kataster für die Präsentation des Geoparks, die internationale Revalidierung sowie für die zehnjährig wiederkehrende Revalidierung als Nationaler Geotop® vorzuhalten. In den Katasterstufen 2 und 3 werden noch einmal gewichtete, nachgeordnete Geotope erfasst, damit einmal erhobenes Wissen nicht verloren geht. Auch im Augenblick unwesentlich erscheinende Vorschläge können später einmal unter besonderen Umständen wertvoll werden. Die Geotope, die in die Katasterstufen 2 und 3 einzuordnen sind, werden in weiteren Bearbeitungsschritten zu klassifizieren sein. Bei der Geotopauswahl ist zu beachten, dass oftmals verschiedene geologisch relevante Aspekte an einem Objekt auftreten können. Zum Beispiel kann über einer glazialtektonischen Schuppe durch Bergbau ein Tagebaufolgesee oder ein Tiefbaubruchfeld liegen.

6.5 Geotopbewertung

Die Geotopbewertung in der Ersterhebung erfolgte nach einem System mit drei Kriterien mit jeweils drei Unterkriterien und einem Bewertungsmaßstab von vier oder zwei Wertigkeiten (Tab. 4). Dieses erwies sich bei der Anerkennung als Nationaler Geopark 2006 und bei der Aufnahme in das European Geoparks Network (EGN) sowie das Global Geoparks Network (GGN) als zielführend und erhielt die Bestätigung zur Erfüllung der jeweiligen Prüfungskriterien. Entsprechend wurde es auch bei den UNESCO-Revalidierungen 2015 und 2019 vorgelegt und anerkannt.

Zwischenzeitlich gibt es zwei weitere Bewertungsansätze für die Geotope im Muskauer Faltenbogen. Sie hatten methodischen Charakter und wurden nicht in das das offizielle Geotopkataster übernommen. Zum einen waren das die Studie einer japanischen und einer polnischen Bearbeiterin (SUZUKI & TAKAGI 2017) und zum anderen die Dissertation von KoźMA (2018).

SUZUKI & TAKAGI (2017) wählten für ihre Studie relativ große und geologisch-inhaltlich weit gefächerte Geotope wie den gesamten geotouristischen Pfad der Babina Grube aus. Sie verwendeten sechs Kriterien mit vier Bewertungsstufen und stellten die Ergebnisse in Form von international verbreiteten Strahlendiagrammen dar (Abb. 12 und 13). Insgesamt ist die Bewertung von der Wahl der Kriterien her auf Präsentation und Schutz ausgelegt. Der eigentlich geologische Aspekt bleibt dabei unterbewertet.

KoźMA (2018) nutzte 124 räumlich kleinere, überwiegend neue Geotopvorschläge für eine von ihm entwickelte Bewertungsmethodik. Er verwendete dazu Haupt- und ergänzende Kriterien gemäß Tab. 5. Beide Gruppen von Kriterien wichtete er im Weiteren mit 4, 3, 2 oder 0 Punkten. Das vollständige Bewertungssystem ist in seiner Dissertation (S. 275–280) ausgeführt und liegt in der deutschen Übersetzung in HEIDENFELDER et al. (2019, Anl. 7) vor. Ähnlich wie bei SUZUKI & TAKAGI erfolgt auch bei KoźMA die Wahl der Bewertungskriterien mit Betonung auf eher geologiefernen Aspekten.

In Zusammenfassung mit den vorstehend referierten neuen Bewertungsmethoden wird die bewährte Bewertungsmethodik aus HÜBNER et al. (1999) auch künftig beibehalten.


Abb. 11: Geotoprevision an der ehemaligen Tongrube Irena.
a) Steilstehende, durch leichte Silifizierung Schichtenfolge der seria Poznańska (Rauno Formation) am Rande der rekultivierten Tongrube Irena bei Łęknica.
b) Aufschlusskartierung (Skizze).
c) Silifizierte Tertiärquarzite in miozänen Ton- bzw. Sandsteinschichten im südöstlichen Teil des Aufschlusses.
d) Scharf ausgebildete glazialtektonische Störung zwischen pleistozänen Sanden/Kiesen (Hangendes) und miozänen Tonen/Sanden (Liegendes).
e) Steilgestellte Abfolge halb links in Abb. a).
Fig. 11: Geotope revision at the former clay pit Irena.
a) Steeply declined sequence of the seria Poznańska (Rauno Formation) at the edge of the recultivated clay pit Irena near Łęknica.

b) Outcrop mapping (sketch).

c) Silicified Tertiary quartzites in Miocene clays/sandstones in the south-eastern part of the outcrop.

d) Sharp glaciotectonic fault between Pleistocene sands/gravels (situated above) and Miocene clays/sands (situated below).

e) Steeply declined sequence half left in the picture a).



Katasterstufe	Geotopkategorie
1	offizielles Geotopkataster des UNESCO Global Geoparks
2	Kataster zweitrangiger Geotope
3	sonstige

- Tab. 3: Dreistufiges Modell für die Geotopgliederung im Geopark Muskauer Faltenbogen. Katasterstufe 1 enthält Vertreter aller Typen aus der revidierten Geotoptypenliste. Sie umfasst alle Geotope von besonderer Bedeutung, darüber hinaus eine qualifizierte Auswahl aus der Gesamtheit der Vorschläge und Aufschlüsse sowie Lokalitäten, die aus ergänzenden Kenntnissen bekannt sind. *Katasterstufe 2 beinhaltet mehrfach auftretende* Geotope eines Typs und solche, die nur eine weniger große Bedeutung besitzen. Katasterstufe 3 umfasst Geotope von untergeordneter Bedeutung, für die jedoch Beschreibungen oder Kenntnisse, eventuell auch nur in eine spezielle Richtung gehende Aussagen, vorliegen.
- Tab. 3:Three-stage model for the geotope classification
in the Muskau Arch Geopark. Cadastral level 1
contains representatives of all types from the
revised list of geotope types. It includes all
geotopes of special importance, plus a qualified
selection from the totality of proposals and
outcrops, as well as localities known from
supplementary knowledge. Cadastral level 2
includes geotopes of one type that occur several
times and those that are only of lesser importance.
Cadastral level 3 comprises geotopes of minor
importance, for which, however, descriptions or
knowledge, possibly also only statements in a
special direction, are available.

Abb. 12:

Strahlendiagramm zur Veranschaulichung der Geotopbewertung. Die Farbgraduierung von Blau zu Gelb zeigt das Verhältnis von natürlichem Erhaltungszustand (blaue Seite) zu anthropogener Veränderung (gelbe Seite), aus SUZUKI & TAGAGI (2017). blau: Bildungswert für alle Altersgruppen grün: natürliches Erbe rot: Annehmlichkeit und touristische Attraktivität.

Fig. 12:

Ray diagram to illustrate geosite valuation. The colour gradation from blue to yellow shows the ratio of natural conservation status (blue side) to anthropogenic change (yellow side), from SUZUKI & TAGAGI (2017). blue: educational value for all age groups – green: natural heritage – red: amenity and tourist attractiveness.

6.6 Aufbau der Datenbank

Die Geotopdatenbank des UNESCO Geoparks Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa wurde im Ergebnis eines längeren Diskussionsprozess zweistufig gegliedert und im Excelformat angelegt.

In der ersten Stufe umfasst die Datenbank "geologische und geotouristische Informationen":

- Identifikationsschlüssel (neue Geotopnummern, alte Nummern zusätzlich weiterhin dargestellt),
- Geotoptyp und -art,
- Objektname (Bezeichnung der Lokalität),
- Geologie, Stratigraphie, Aufschlussart (sofern ein Aufschluss vorliegt),
- Raumbezug / Lage nach allen gängigen Koordinatensystemen und
- Kurzcharakteristik jedes Geotops (mit einer Begrenzung auf 500 Zeichen).

In Stufe zwei sind "Detailinformationen" enthalten:

- administrative Lagemerkmale wie Gemeindezugehörigkeit und Flurstücksnummer,
- Daten zum Schutzstatus bzw. zu den Erfassern,
- gegebenenfalls vorliegende Publikationen oder unveröffentliche Quellen zum Geotop,
- Detailbeschreibung (mit einer Begrenzung auf 4000 Zeichen),
- Lagebeschreibung (Kurzbeschreibung der Lage im Verhältnis zu markanten Punkten im Gelände und Angaben zur Begehbarkeit mit einer Begrenzung auf 500 Zeichen)
- Überblick zur Lage in Schutzgebieten,
- Erhaltungszustand,



Abb. 13: Bewertungsergebnisse für drei Geotope im Muskauer Faltenbogen, aus SZUZUKI & TAGAGY (2017). A1: offizielle Geopark-Tour Alte Grube Babina-Grube A2: Rhododendron- und Azaleenpark Kromlau A3: Feldsteingebäude der historischen Kirche in Niwica. (Ved: Bildungswert – Vsc: wissenschaftlicher Wert – Vtr: touristischer Wert – Vsa: Grad der Sicherheit und Erreichbarkeit (im Gelände) – Vcs: Schutz- und Nachhaltigkeitswert – Vti: touristischer Informationswert. Fig. 13:

Evaluation results for three geosites in the Muskau Arch, from SZUZUKI & TAGAGY (2017).

A1: official Geopark tour Old Babina Mine

A2: Rhododendron and Azalea park Kromlau

A3: fieldstone building of the historic church in Niwica. (Ved: educational value – Vsc: scientific value – *Vtr:* tourist value - Vsa: degree of safety and accessibility (in the field) - Vcs: protection and sustainability value – Vti: tourist information value.

Kriterium	Unterkriterium	Bewertungsmaßstab
	scientific value	1 – of minor value
geoscientific value	educational value	2 – significant
	a a touristia volua	3 – valuable
	geolounslic value	4 – of special value
	trails	1 – of minor value
public interpretation	interpretation panels	2 – tourist educational object
	la offete	3 – scientific excursional, educational and research object
	leanets	4 – special scientific reference object
aignificance	international	- national = significant for Poland/Germany
Significance	IIILEITIAIIUITAI	- international = global significance, significance for Europe

Tab. 4: Aktuelle Geotopbewertung gemäß der Ersterhebung nach HÜBNER et al. (1999, S. 54 ff. und Anl. 2, hier tabellarisch in englischer Sprache für die Geopark-Revalidierung 2015 zusammengefasst).

Current geotope evaluation according to the initial survey by HÜBNER et al. (1999, p. 54 ff. and Annex 2, Tab. 4: summarised here in tabular form in English for the Geopark revalidation 2015).

Bewertungskriterien	
Hauptkriterien	ergänzende Kriterien
A. Einzigartigkeit der Objekte im Geopark	A.1 ästhetischer Wert
	A.2 emotionaler Wert
B. Schutzkriterien	
C. Bildungswert	C.1 Nutzungswert
	C.2 Authentizität des nachbergbaulichen Objektes (historischer Wert)
D. potenzieller geotouristischer Wert	D.1 geotouristische Zugänglichkeit
E. (Möglichkeit der touristischen Nutzung)	D.2 Sicherheitskriterien für die geotouristische Nutzung
F. wissenschaftliche Bedeutung	E.1 Bedingungen für wissenschaftliche Beobachtungen

Geotopbewertungskriterien für potentielle und bestehende geotouristische Objekte im polnischen Teil des Tab. 5: Geoparks Muskauer Faltenbogen, aus Коźма (2018, Tab. 7.1. S. 198; Übertragung ins Deutsche Krzystof Czahajda und Manfred Kupetz).

Geotope evaluation criteria for potential and existing geotourism objects in the Polish part of the Muskau Arch Geopark, from Koźma (2018), (Tab. 7.1. p. 198; translation into German Krzystof Czahajda and Manfred Kupetz).

- Einschätzung des geowissenschaftlichen Wertes im nationalen und internationalen Kontext
- Einschätzung der Bedeutung des Geotops für Bildungszwecke und
- vorhandene öffentlichkeitswirksame Präsentationsmittel (Informationstafeln, Flyer, Broschüren, Prospekte, benachbarte Wege).

Aufgrund der Anlage der Geotopdatenbank im Excel-Format sowie einiger klar definierter Formatierungsanforderungen (z. B. Zeichentyp, Zeichenanzahl) ist eine unkomplizierte Weiterverwendung und -bearbeitung der Daten mit gängigen Geographischen Informationssystemen (GIS) möglich. Zudem existieren zu jedem Geotop eine größere Anzahl von Fotos, teilweise auch Profilschnitte und Karten. Diese dem Geotopkataster zugehörigen Bilddaten sind nach der Geotopnummer verschlüsselt und damit leicht zuzuordnen.

Sollte im Geopark zukünftig der Bedarf an einer komplexeren Datenbankablage entstehen, können die vorliegenden Geotopdaten problemlos in diese eingegliedert werden.

Dank

Wir danken allen ehrenamtlich für den Geopark Tätigen, ohne dass wir sie im Einzelnen aufführen können. Ein gleicher Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe für die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit. Ebenfalls danken wir Frau Dr. Marie-Luise Frey, Geschäftsführerin des UNESCO Welterbe Grube Messel, Mitglied des UNESCO Global Geoparks Council und Mitglied des Executive Boards der Global Geoparks Network Association für wertvolle Diskussionen und Hinweise zum Manuskript.

Ergänzung nach Redaktionsschluss

Erst nach Redaktionsschluss wurde den Autoren eine Publikation über Naturdenkmale und Geotope im nordwestlichen Teile des Muskauer Faltenbogens bekannt und konnte nicht mehr eingearbeitet werden. Sie enthält u. a. wichtige, weiterführende Kenntnisse zu Raseneisenerzbildungen (S. 80-8997) und zu den Erdölvorkommen (S. 89-97).

SCHMIDT, K. (2015): Über Naturdenkmale und Geotope im Raum um Forst (Lausitz) – ein (nicht nur) geologischer Streifzug.- Selbstverlag, 117 S., Forst

Anschrift der Autoren

Wolfram Heidenfelder Dr. Jochen Rascher Linda Richter Matthias Rascher

GEOmontan Gesellschaft für angewandte Geologie mbH Am St. Niclas-Schacht 13 09599 Freiberg

w.heidenfelder@geomontan.de j.rascher@geomontan.de l.richter@geomontan.de m.rascher@geomontan.de

Dr. Kersten Löwen UNESCO Global Geopark Muskauer Faltenbogen/ Łuk Mużakowa/ Muskau Arch Geschäftsstelle Klein Kölzig An der Ziegelei 1 03159 Neiße-Malxetal k.loewen@muskauer-faltenbogen.de

Dr. Jacek Koźma Państwowy Instytut Geologiczny Państwowy Instytut Badawczy Oddział Dolnośląski im. Henryka Teisseyre'a Al. Jaworowa 19 53-122 Wrocław Polska jacek.kozma@pgi.gov.pl

Dr. Manfred Kupetz Förderverein Geopark Muskauer Faltenbogen e.V. c/o Schulweg 1a 03055 Cottbus manfred.kupetz@t-online.de

Das Geotopkataster des UNESCO Global Geoparks Muskauer Faltenbogen/Łuk Mużakowa, Teil 2: Seine Anwendung in der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)

The Geotope Cadastre of the UNESCO Global Geopark Muskau Arch/Łuk Mużakowa, Part 2: Its application in education for sustainable development (ESD)

MANFRED KUPETZ, NANCY SAUER, JACEK KOŻMA, EWA BRAUER, KATAZYNA JAGIEŁŁO, KERSTEN LOEWEN, DETLEF NICKEL

Zusammenfassung

Die Erhaltung des geologischen Erbes ist gemäß ihren Statuten eine zentrale Aufgabe für UNESCO Global Geoparks. Die Parks werden turnusmäßig aller vier Jahre einer Revalidierung unterzogen. Dabei gehen die Erhaltung, die Präsentation und der Einsatz des geologischen Erbes in der Umweltbildung mit etwa einem Drittel in das Bewertungsvolumen der Evaluierung ein. Ausgehend von den Ergebnissen der Neuaufstellung des Geotopkatasters (Teil 1 in diesem Heft) wird die Rolle des geologischen Erbes in der Geoparkarbeit, dabei insbesondere in der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE), dargestellt. Das BNE-Konzept wird vorgestellt und seine Umsetzung exemplarisch in der Ausbildung von Geoparkführern, der Aufstellung und Pflege von Geotopen und Informationstafeln, an Geoparktouren sowie in Druckerzeugnissen (Imagebroschüre, geotouristische Karte, außerschulisches Lehrmaterial für Lehrer und die Schriftenreihe GEOPARK mini für Schulkinder) gezeigt. Die Informationstafeln und die Druckerzeugnisse sind auch elektronisch verfügbar und liegen meist dreisprachig (D, PL, EN) vor.

Summary

According to their statutes and guidelines, the preservation of the geological heritage is a central task for UNE-SCO Global Geoparks. The parks are revalidated every four years. The conservation, presentation and use of the geological heritage in environmental education account for about one third of the evaluation volume. Based on the results of the new geosite cadastre (Part 1 in this issue), the role of geological heritage in Geopark work, especially in education for sustainable development (ESD), is presented. Based on the results of the new geosite cadastre, the ESD concept is presented and its implementation in the training of Geopark guides, the installation and maintenance of geosites and information boards on Geopark tours as well as in printed products (image brochure, geotouristic map, extracurricular teaching material for teachers and the GEOPARK mini series for school children) is outlined. The information boards and printed materials are also available electronically and are mostly available in three languages (D, PL, EN).

1 Einleitung

Die Anforderungen an die UNESCO Global Geoparks sind in den Statuten und Richtlinien (Statuts and Operational Guidelines for UNESCO Global Geoparks) formuliert. Dort ist die Aufgabe eines Geoparks bezogen auf das geologische Erbe wie folgt definiert (UNESCO 2017, S. 4; Übertragung aus dem Englischen).

"Ein UNESCO Global Geopark muss ein Gebiet von geologisch internationaler Bedeutung enthalten. Es wird unabhängig von wissenschaftlichen Fachleuten in der jeweiligen Geowissenschaftsdisziplin bewertet. UNESCO Global Geoparks sind lebendige, funktionierende Landschaften, in denen sich Wissenschaft und lokale Gemeinschaften auf eine für beide Seiten vorteilhafte Weise engagieren.

Bildung auf allen Ebenen steht im Mittelpunkt des UNESCO Global Geopark-Konzepts. Universitäre Forscher ebenso wie örtliche Gruppen von Interessierten fördern das Bewusstsein für die Geschichte des Planeten, wie es aus den Gesteinen, der Landschaft und den rezenten geologischen Prozessen herausgelesen werden kann. Globale Geoparks fördern ebenso die Verbindungen zwischen dem geologischen Erbe und allen anderen Aspekten des natürlichen und kulturellen Erbes der Region, um deutlich aufzuzeigen, dass die Geodiversität die Grundlage aller Ökosysteme und die Grundlage menschlicher Interaktion mit der Landschaft ist.

UNESCO Global Geoparks tragen durch die Förderung der Geologie und Wissenschaft im Allgemeinen zur Erreichung der UNESCO-Ziele bei, wobei diese Bildung, Kultur und Kommunikation einbeziehen bzw. auf diese übergreift." Anders als bei den anderen beiden UNESCO-Flächendestinationen Welterbe und Biosphärenreservat, deren Titel in der Regel dauerhaft verliehen werden, haben sich die Geoparks mit einer Rechenschaftslegung und einem Fortschrittsbericht vierjährig einer internationalen Revalidierung zu unterziehen. Dabei wird die Umsetzung der generellen Anforderungen an die Geoparks, zusammengefasst in den Guidelines, u.a. auch durch eine Vor-Ort-Begutachtung (field mission) bewertet. Das Bewertungsschema umfasst dabei in den sog. Dokumenten A und B jeweils numerische Bewertungen (GGN 2016). Das Dokument A ist eine Selbstbewertung (self evaluation), bei der in der Kategorie I: Geologie und Landschaft insgesamt 35 Prozentpunkte und in der Kategorie IV: Geotourismus 15 Prozentpunkte, also in Summe 50 %, vergeben werden. Ebenso wichtig für das Revalidierungsergebnis ist das Dokument B, der durch den zu bewertenden UNESCO-Geopark erstellte Fortschrittsbericht (geopark progress evaluation). Hierin spielen die Mitwirkung im Global Geoparks Network, die Management- und Finanzstruktur des Geoparks sowie eine nachhaltige Entwicklung eine etwas größere Rolle. Verteilt auf mehrere Unterpunkte hat in diesem das geologische Erbe (geological heritage), d.h. auch seine Erhaltung, Präsentation und Einsatz in der Umweltbildung, einen Anteil von etwa einem Fünftel des Bewertungsvolumens.

Diese Schwerpunktsetzung spiegelt sich auch in den Anforderungen der Deutschen UNESCO-Kommission an UNESCO Global Geoparks in Deutschland wieder (BUTLER MANNING 2018, DUK 2020).

"UNESCO-Geoparks sind Gebiete mit geologischen Stätten und Landschaften von internationaler geowissenschaftlicher Bedeutung. Sie laden ein, auf den Spuren der Vergangenheit unseren Planeten und die Bedingungen des Lebens besser zu verstehen und lebenswerte Regionen zu gestalten. Als Modellregionen für nachhaltige Entwicklung arbeiten sie an tragfähigen Zukunftsoptionen für die Region und greifen globale gesellschaftliche Herausforderungen auf – wie die Endlichkeit natürlicher (vor allem geologischer) Ressourcen und den Klimawandel. UNESCO-Geoparks sind Regionen, die Besucherinnen und Besucher zum Entdecken einladen und in denen die Menschen heute - und morgen - gut leben" (DUK 2020).

In den Kriterien des Nationalkomitees für UNESCO Global Geoparks in Deutschland wird das in den Punkten geowissenschaftliche Bedeutung und Repräsentativität näher untersetzt (DUK 2016, S. 1; Abb. 1):

 Geowissenschaftliche Bedeutung: Ein Geopark umfasst geowissenschaftlich im weltweiten Vergleich bedeutende Landschaften und Geotope. Die geographisch zusammenhängende Fläche eines Geoparks ist durch eine Grenze klar definiert. Grenzüberschreitende Geotope und Landschaften sollten in einem Geopark zusammengefasst werden.





2. Repräsentativität: Ein nominierter Geopark muss Landschaften und Geotope umfassen, die von UNESCO Global Geoparks oder anderen von der UNESCO ausgezeichneten Stätten und/oder Gebieten (Welterbestätte und/oder Biosphärenreservat) in Deutschland bislang nicht ausreichend repräsentiert werden. Die Geotope müssen repräsentativ für die Landschaft und deren geologische Entstehungsgeschichte sein."

Diesem Rechnung tragend hat der Geopark 20 Jahre nach Aufstellung seines Geotopkatasters dieses 2019–2020 umfassend überarbeitet und ergänzt (siehe Teil 1 in diesem Heft). Es ist die Basis für die im folgenden dargestellte Verwendung im Rahmen von Projekten der Bildung für nachhaltige Entwicklung im Geopark Muskauer Faltenbogen.

2 Das BNE-Konzept im Geopark Muskauer Faltenbogen/ Łuk Mużakowa

UNESCO Global Geoparks sind nach den Zielstellungen der Deutschen UNESCO-Kommission Modellregionen für nachhaltige Entwicklung (DUK 2017). Speziell für den Muskauer Faltenbogen wurden dazu drei Schlüsselziele der Agenda 2030 identifiziert. An erster Stelle steht die Bildung für nachhaltige Entwicklung, manifestiert im Nachhaltigkeitsziel oder Sustainable Development Goal SDG 4 (Hochwertige Bildung, Abb. 2). Hierzu hat der Geopark Muskauer Faltenbogen ein zweiteiliges BNE-Konzept, resultierend aus den bisherigen Erfahrungen der Geoparkmitarbeiter und externem Sachverstand erarbeitet. Das zweigeteilte Vorhaben definiert im Teil 1 das allgemeine Verständnis von BNE und gibt einen Überblick bezüglich seiner Umsetzung im Muskauer Faltenbogen (LIEWALD 2020). Teil 2 untersucht die einzelnen bereits vorhandenen Angebote hinsichtlich möglicher Verbesserungen und wird ein mittel- und langfristig umzusetzendes methodisch-didaktisches Konzept beinhalten. Hierin arbeiten Praktiker aus der Geopark-Geschäftsstelle und Lehrer zusammen. Erstmalig einbezogen werden darüber hinaus Kinder und Jugendliche in einem sogenannten Youth Panel. Eine erste Veranstaltung mit dem neuen Gremium im Oktober 2021 gab den Jugendlichen nicht nur die Möglichkeit, sich mit Geopark-Inhalten auseinanderzusetzen, sondern auch zu einer Verbesserung bestehender Angebote beizutragen. Ziel des Youth Panels ist es, Jugendlichen Gehör zu schenken, abzufragen, welche Themen sie interessieren und in welcher Form sie unter Nutzung ihrer eigenen Kompetenzen zielgruppengerecht vermittelt und für die Gestaltung ihres künftigen Lebensumfeldes sinnvoll genutzt werden können. Hervorzuheben ist, dass das Youth Panel entsprechend der Transnationalität des Geoparks ein deutsch-polnisches Konzept ist. Die Fertigstellung von Teil 2 ist für Ende 2021 geplant (LIEWALD et al 2021).

Auf nationaler Ebene ist der Geopark Muskauer Faltenbogen Mitwirkender am Kooperationsprojekt der Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz, der Deutschen UNESCO-Kommission und der anerkannten deutschen UNESCO-Geoparks am BNE-Projekt "SDG für 2030: Umsetzung von Bildung für eine nachhaltige Entwicklung (BNE) in Bildungsangeboten deutscher Geoparks" (Laufzeit Dezember 2020 bis Dezember 2022). Im Rahmen des Projektes wird im Muskauer Faltenbogen voraussichtlich im Oktober 2022 ein internationales Symposium stattfinden.

Agenda 2030 – Gute Beispiele aus dem UNESCO-Geopark Muskauer Faltenbogen

SDG 4 Bildung für nachhaltige Entwicklung

Zahlreiche Projektbausteine bilden das Rückgrat der Bildungsarbeit im Geopark Muskauer Faltenbogen. Im Mittelpunkt stehen Begegnungen auf internationaler Ebene, z.B. deutsch-polnische Schulprojekte oder das Internationale Geoparkcamp. Als Initiator der Kooperation zwischen den vier UNESCO-Stätten in der Lausitz nimmt der Geopark auch Entwicklungsaufgaben wahr: Über einen gemeinsamen BNE-Ansatz soll der Strukturwandel vor Ort begleitet und die Lausitz wettbewerbsfähig gemacht werden.

- Abb. 2: Die Deutsche UNESCO-Kommission benannte u.a. das SDG 4 aus der Agenda 2030 als Modellziel für die Entwicklung des Geoparks, DUK (2017, S. 12).
- Fig. 2: The German UNESCO Commission named, among others, SDG 4 from the 2030 Agenda as a model goal for the development of the Geopark, DUK (2017, p. 12).

3 Geologische Wissensvermittlung im Licht von BNE

Im Sinne der Umweltbildung wurde im Geopark von Anfang an großer Wert darauf gelegt, geologische Inhalte leicht verständlich, gleichzeitig aber auch fachlich richtig zu vermitteln (ANSPACH et al. 2005, 2006). Als wesentlich erwiesen sich dabei drei Aspekte:

- 1. geologische Inhalte nicht als Aufzählung von Fakten, sondern in Form von Erläuterungen geologischer Prozesse zu vermitteln,
- 2. so weit als möglich zur Veranschaulichung graphische Darstellungen (Abbildungen und Kartenskizzen) zu verwenden und
- 3. Erläuterungen an authentischen Lokalitäten bzw. Landschaftselementen und bergbau- und anderen industriehistorischen Relikten vorzunehmen.

Der erste Punkt entspricht dem global verfolgten Ansatz, aus der (geologischen) Vergangenheit unter Berücksichtigung der heutigen Erkenntnisse für die Zukunft zu lernen und entsprechende Schlüsse daraus zu ziehen (MARTINI 2020: Creating a new strong Geopark Identity in front of other world UNESCO territories: The Past-Present-Future Concept). Der dritte Punkt erwies sich insofern als besonders wichtig, weil im Zeitalter des Internets und sozialer Medien zu jedem beliebigen Sachverhalt Informationen abgerufen werden können. Diese vermitteln einen schnellen, oftmals infotainment-orientierten Ansatz. Demgegenüber ist es Ziel der Geoparkarbeit, natürliche und gesellschaftliche Entwicklungsprozesse in ihrer Komplexität, Vielschichtigkeit und Widersprüchlichkeit aufzuzeigen und dadurch eigenes Mit- und Weiterdenken anzuregen. Aus diesem Grund wurden o.g. Aspekte um weitere wichtige Elemente ergänzt. Sie sollen künftig Bestandteil aller Angebote sein und die Wissensvermittlung nachhaltiger gestalten. Im Einzelnen sind dies:

- Vermittlung von Werten durch Herstellen eines Bezugs geologischer Themen zu aktuellen gesellschaftlichen Herausforderungen von globalem Interesse, die so einen Alltagsbezug herstellen und Betroffenheit generieren, bspw. durch die Verknüpfung von Wissen zur Klimageschichte mit aktuellen Erfahrungen und sozialen Aspekten (SDG 13, Maßnahmen zum Klimaschutz) und Ermutigung zur Diskussion von kurz- und langfristigen Perspektiven
- Schaffung von Möglichkeiten und Anreizen zur Aneignung neuer Kompetenzen und Fähigkeiten, auf Basis von angeeignetem und reflektiertem Wissen das eigene Handeln zu hinterfragen und Alternativen auszuprobieren, resp. Entscheidungen daran auszurichten, bspw. das eigene Konsumverhalten im Zusammenhang mit dem Ressourcenverbrauch (SDG 12 Nachhaltiger Konsum und Produktion)
- Schaffung neuer und neuartiger Lernumgebungen und Erlebniswelten unter Einbeziehung moderner techni-

scher Möglichkeiten und größerer Flexibilität und Mobilität. Dies gilt insbesondere, als dass Wissen heute zu jeder Tageszeit konsumiert werden und nur qualitativ gut gemachte, spannende Angebote Anreiz für den Konsum hochwertiger Bildung geben können.

Schaffung von Beteiligungsangeboten und -formaten, die breiteren Bevölkerungsgruppen die Möglichkeit geben, sich einzubringen, und die damit eine Aufwertung ihrer Persönlichkeiten und eine breitere Akzeptanz, Respekt und Gleichberechtigung erfahren (SDG 5 Geschlechtergerechtigkeit sowie 16 Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen).

Der Schwerpunkt wird im Geopark Muskauer Faltenbogen grundsätzlich auf eine langfristig konzipierte, kontinuierliche BNE-Arbeit gelegt, um bei Besuchern und insbesondere Kindern und Jugendlichen an einer Bildung zu ihrer Region mitzuwirken. Da die Geoparkaktivitäten bislang überwiegend projektfinanziert waren, ist die Umsetzung längerfristiger und kontinuierlicher Leitlinien eine besondere Herausforderung.

4 Faltenbogenspezifische geologische Inhalte in der Geoparktätigkeit

Das Geotopkataster wird als die inhaltliche Basis für die Arbeit mit den konkreten geologischen Inhalten des Geoparks verstanden. Als Informationspool fasst seine Aktualisierung 2020/2021 das i. d. R. verstreute geologische Wissen einschließlich der Kenntnisse über seine Rohstoffe sowie die historische Rohstoffgewinnung und -verarbeitung und die anthropogenen Landschaftsveränderungen zusammen. In Form von zwei größeren Exkursionsführern gaben zwei im Geopark tätige Geologen, Manfred Kupetz und Jacek Koźma, gemeinsam mit Co-Autoren zwei umfangreiche Exkursionsführer heraus. Es sind "Der Muskauer Faltenbogen - Wanderungen in die Erdgeschichte" (KUPETZ & KUPETZ 2009) und der "Łuk Mużakowa po obu stronach Nysy Łuk Mużakowa - Przewodnik geologiczno-touristyczny (Der Muskauer Faltenbogen - Ein geologisch-touristischer Führer (MACIANTOWICZ & KoźмA 2014). Beide gehören ebenfalls zum geoparkrelevanten Basiswissen. Aus insbesondere rechtlichen Gründen war es nicht möglich, einen gemeinsamen deutsch-polnischen geologischen Führer herauszugeben.

Da in Geoparks Wissensvermittlung überwiegend im Gelände stattfindet, ist ein wesentlicher Aspekt die haptische Ansprache von Besuchern und Einwohnern in der Fläche. Das im Geopark Muskauer Faltenbogen existierende und qualitativ gute Wander- und Radwegenetz mit zahlreichen Park- und Rastmöglichkeiten und eine gute Besucherführung wecken das Interesse, die Landschaft kennenzulernen und Wissenserwerb im Gelände mit eindrucksvollen Erlebnissen zu verbinden (Abb. 3). Damit dient die eigens für den Geopark geschaffene Wegeinfrastruktur neben den geologischen Erkenntnissen als attraktive Plattform für Freizeitgestaltung und Wissensaufnahme. Im Folgenden werden verschiedene Angebote der Bildungsarbeit im Geopark Muskauer Faltenbogen vorgestellt.

4.1 Geoparkführer

2009 bildete der Geopark erstmals deutsche und polnische Geoparkführer (Guides) aus. Die deutschen Führer sind durch die Sächsische Landesstiftung Natur und Umwelt zertifizierte Natur- und Landschaftsführer (ZNL-Zertifizierung). Die polnischen Geoparkführer werden durch die Verwaltung der Wojewodschaft Lebuser Land zertifiziert. Innerhalb des Geoparks erhalten alle Führer durch hauptamtliche Mitarbeiter/innen der Geoparkgeschäftsstelle jährlich thematische Weiterbildungen. Darüber hinaus sind sie in einer Arbeitsgruppe organisiert, die die Weitergabe wichtiger Informationen in beide Richtungen gewährleistet und den Geoparkführern eine direkte Beteiligung an der Geoparkarbeit ermöglicht. Damit geht einher, dass flexibel auf Themen und Inhalte reagiert und neues Wissen weitergegeben werden kann. Auch der BNE-Gedanke konnte darin sukzessive verhaftet und vermittelt werden, bevor er in der Wintersaison 2021/2022 in eine komplexe Weiterbildung mündet. Da die Geoparkführer als Multiplikatoren auftreten, ist diese stufenweise Vermittlung von wesentlicher Bedeutung.

Die Geoparkführer sind mit Informationsmappen ausgestattet, die eine Anzahl einheitlicher Erläuterungsabbildungen und -grafiken enthalten (Abb. 4). Darüber hinaus haben sich einige Geoparkführer thematisch oder örtlich spezialisiert (z. B. auf historischen Braunkohlenbergbau, die Waldeisenbahn Muskau, das Welterbe Fürst-Pückler-Park Muskau oder Themenkombinationen wie Geologie und Böden).

4.2 Imagebroschüre und Lehrmaterial

2004 gab der Geopark erstmals eine Imagebroschüre heraus. Diese enthält etwa 15, meist eigens für den Faltenbogen entworfene Abbildungen, die mehr als nur den Charakter einer Textillustration haben. Sie erzählen in lockerer Abfolge mehrere in sich geschlossene Geschichten zum Faltenbogen. Das Heft wurde 2018 in der dritten Auflage dreisprachig (Deutsch, Polnisch und Englisch) herausgegeben (KUPETZ et al. 2018).

Besondere graphische Elemente in der Geoparkarbeit sind drei Landschaftsbilder. Sie stellen die Eiszeitlandschaft zum Zeitpunkt der Entstehung des Muskauer Faltenbogens, seine Rohstoffe und deren Gewinnung im 19. und 20. Jahrhundert sowie die Waldeisenbahn Muskau Ende des 19. und im 20. Jahrhundert dar. 2021 erschienen in zweiter Auflage zu diesen Bildern als schulisches Lehrmaterial aufbereitete Erläuterungen in den drei Sprachen (KUPETZ & KUPETZ 2021). Als Beispiel dafür dient das in Abb. 5 dargestellte "Rohstoffbild". Es ist bezogen auf die tatsächliche Situation im Muskauer Faltenbogen konzeptionell umfassend durchgearbeitet. Es



- Abb. 3: Übersichtskarte des UNESCO Global Geoparks Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa (international: Geopark Muskau Arch).
- Fig. 3: General map of the UNESCO Global Geopark Muskau Arch / Łuk Mużakowa (international: Geopark Muskau Arch).



Abb. 4: Informationsmaterial für Geoparkführer.

Fig. 4: Information material for Geopark guides. zeigt den Braunkohlenbergbau mit dem damals im Tagebau Frieden eingesetzten Eimerkettenbagger, die dazugehörige Außenhalde und ein entsprechendes Kraftwerk zur Kohleverarbeitung. Die Gewinnung im Tiefbau wird mit dem charakteristischen Zwei-Schacht-Betriebssystem - bestehend aus Förder- und Wetterschacht und einer Brikettfabrik, wie sie auf der Grube Conrad existierte, gezeigt. Bergbaurestgewässer, der positiveren Konnotation wegen im Muskauer Faltenbogen Bergbaufolgeseen genannt, vervollständigen den gedanklichen Rahmen. In gleicher Weise werden die Gewinnung von Glassand, Ton, Torf, Alaun und Mineralwasser dargestellt. Die Bilder hängen als Großschaubilder (2 x 4 m) im Geoparkinformationszentrum Schullandheim Jerischke und dem Besucherzentrum "Anlage Mitte" der Waldeisenbahn Muskau in Weißwasser/ O.L. und haben sich dort zum Besuchermagnet entwickelt. Auf den ersten Blick sind es lediglich Wimmelbilder. Sie erlauben es, ebenso auf unvorbereitete

Besucherfragen anhand der Bilder zu reagieren, wie es umgekehrt auch Besuchern erlaubt, sich nach den gehörten Erläuterungen eigenständig mit der Materie weiterzubeschäftigen (Erfahrungen des Schullandheim-Leiters Dietmar Thron und des WEM-Geschäftsführers Heiko Lichnok).

4.3 Schriftenreihe GEOPARK mini

Seit 2014 gibt der Geopark zwei Mal jährlich, im Frühjahr und Hebst, speziell für Kinder die Schriftenreihe GEO-PARK mini (Ausgaben in Deutsch und Polnisch) heraus (Abb. 6). Die Reihe folgt von Beginn an einem einheitlichen inhaltlichen Konzept, der ein roter Faden, jedoch kein starrer Rahmen ist. 30-50 % des Druckumfanges umfasst altersgerecht aufbereitet geologische und geoparknahe Themen (Tab. 1). Dabei bauen einzelne Themen aufeinander auf oder



Abb. 5: Die Rohstoffe, die im Muskauer Faltenbogen in historischer Zeit abgebaut wurden bzw. teilweise noch heute werden. Entwurf: Manfred Kupetz, Grafik: Norbert Anspach, aus Kupetz et al. (2021).

Fig. 5: The raw materials that were mined in the Muskau Arch in historical times or are still being mined today in some cases. Design: Manfred Kupetz, graphic: Norbert Anspach, from KUPETZ et al. (2021).



Abb. 6:

Das GEOPARK mini wendet sich seit 2014 zwei Mal jährlich in deutscher und polnischer Sprache vorzugsweise an Schulkinder der niederen Klassen, wird aber auch von Lehrern und Eltern nachgefragt.

Fig. 6:

Since 2014, the GEOPARK mini has been published twice a year in German and Polish, primarily for schoolchildren in the lower grades, but is also in demand from teachers and parents.

Nr.	Heft	Entdecken, Exkursionen	Verstehen	Erforschen, Experimen- tieren	Erkennen (Glossar)	Vorstellung anderer Geoparks
1	2014/1	Eiszeiten, Entstehung des Muskauer Faltenbogens, Exkursion in die Alte Grube Hermann	Eiszeiten und Kaltzeit- en, Entstehung des Muskauer Faltenbo- gens	Moräne bauen	Minerale und Gesteine	
2	2014/2	Exkursion "Rund um den Felixsee"	Braunkohle, Die Rohst- offe des Muskauer Faltenbogens	Grundwasser reinigen	Feldspat und Granit	
3	2015/1	Exkursion "Alte Grube Babina" bei Łęknica	Ton, Wie die Findlinge zu uns kamen	Frost- sprengung	Quarz und Gneis	
4	2015/2	Exkursion entlang der Altbergbautour	Alaun, Seen im Muskauer Faltenbogen	Kristalle züchten	Glimmer und Basalt	Geoparks in Deutschland
5	2016/1	Der Muskauer Park	Moore – Lebensräume und Rohstoffe	Kompost herstellen	Kupfer und Sandstein	UGGp Vulkaneifel
6	2016/2	NSG Nad Młyńską Strugą (Mühlenstruga)	Dünen aus der Eiszeit	Sandknete herstellen	Pyrit und Porphyr	UGGp Harz
7	2017/1	Rundwanderweg Märchenwald	Quellen – Lebenselexiere	"Trockenes Wasser"	Olivin und Diabas	UGGp TERRA.vita
8	2017/2	Exkursion "Drachenberge"	Mammut von Klinge (Susi)	Massenbewe- gung (Sand)	Achat und Kaolin	UGGp Schwäbische Alb
9	2018/1	Exkursion "Schwerer Berg"	Erneuerbare Energien	Regenerosion	Diamant und Steinkohle	Geopark Świętokrzyski (bei Kielce, Polen)
10	2018/2	Alt-Keula-Tour	Die Lausitzer Neiße – die fließende Grenze	Vom Eis zerschürft	Calcit und Tuff	UGGp Bergstraße – Odenwald
11	2019/1	Die Muskauer Brücken	UNESCO-Stätten der Lausitz	Druckkraft	Bernstein und Schiefer	UGGp Česki Ráj (Tschechien)
12	2019/2	Glasindustriegeschichte Weißwasser	gelbe Ziegel im Faltenbogen	Rippeln erzeugen	Flussspat und Quarz	NP Porphyrland
13	2020/1	Exkursion durch den Findlingspark Nochten	Die Geheimnisse der Bläulinge	Frost- sprengung	Andesit, Pyroxen und Amphibol	Hațeg Country Dinosaurs Geopark – Romania
14	2020/2	Perlen von Tuplice (Bergbaufolgeseen)	Feldsteine als Baumaterial	roter und blauer Himmel	Was ist Sand?	Land der erloschenen Vulkane, Geoparkaspi- rant, Polen
15	2021/1	Naturschutzgebiet "Luisensee"	Die Geschichte der Sorben	Ausbruch eines Mini-Vulkans	Glossar und Sand	UGGp Grube Messel
16	2021/2	Radtour zum Teufelsstein	Hermann von Pückler-Muskau	Kompass	Sand	UGGp Thüringen Insels- berg – Drei Gleichen

Tab. 1: Die Struktur der Vermittlung geologischer, rohstoffgeologischer und rohstoffverarbeitender Industriethemenin der Schriftenreihe GEOPARK mini sowie die Vorstellung anderer Geoparks.

Tab. 1:The structure of conveying geological, raw material geological and raw material processing industrial topics
in the series of publications GEOPARK mini as well as the presentation of other Geoparks.

werden durch Querverweise miteinander verknüpft. Besonderer Wert wird auf die Vermittlung des Alltagsbezugs der vorgestellten Themen gelegt, um so den Kindern den Wert der geologischen Themen und der erlangten Kenntnisse aufzuzeigen. Möglichkeiten zur Reflexion des Gelesenen bieten Quizfragen im Heft sowie weitere Rätsel.

4.4 Geotoppräsentation an den Geopark-Touren

Das wesentlichste Outdoor-Element des Geoparks sind seine 10 Geoparktouren, die zwei Aussichtstürme einschließen (Abb. 3). Ergänzt werden diese durch zwei historische, heute touristisch genutzte 600 mm-Schmalspurbahnen, die Waldeisenbahn Muskau (https://www.waldeisenbahn. de) und die Ziegeleibahn Klein Kölzig (http://www.ziegeleibahn-klein-koelzig.de).

Auf fünf Touren wurden von 2019 bis 2021 die Informationstafeln erneuert. Das heißt, dass ihre Texte entsprechend den modernen Anforderungen an die Wissensvermittlung im Gelände und im Allgemeinen als auch unter Berücksichtigung der aktuellen globalen Fragestellungen grundsätzlich überarbeitet wurden. Sie wurden methodisch schwerpunktmäßig auf die Erläuterung von natürlichen geologischen und biologischen, anthropogenen, industriehistorischen Prozessen unter Einbindung und Verknüpfung von jeweils relevanten SDGs angepasst und mit aussagefähigen Grafiken und Fotos ausgestattet. Gleichzeitig wurden die Texte gekürzt, so dass die Tafeln jetzt dreisprachig präsentiert werden. Beispielhaft ist dazu die Entstehung von Windkantern als Zeugen der Eiszeit dargestellt (Abb. 7). Durch ihr omnipräsentes Vorkommen kann man Windkanter im Gelände selbst finden. Außerdem sind an der Tafel drei große Windkanter aus dem Deckgebirge des



Abb. 7: Infotafel an der Geologie-Tour. Dargestellt wird hier der Entstehungsprozess von Windkantern in kurzerdreisprachiger Erläuterung sowie anhand von vier Skizzen.

Fig. 7: Information board at the geology tour. The process of the formation of ventifacts (wind- blown pebbles) is presented here in a shorttrilingual explanation as well as on the basis of four sketches.

Braunkohlentagebaus Nochten (0,6-1,2 m Größe) exemplarisch aufgestellt.

5 Geotouristische Erschließung

Zur Vermittlung geologischer Inhalte im weiteren Sinne (Entstehung, Geomorphologie, Rohstoff- und Bergbaufolgenutzung, allgemeine Landnutzung für landwirtschaftliche Bebauung, Forst, etc.) ist es erforderlich, nicht nur kleinpunktuell eine Information anzubieten, sondern das Geotop bzw. ein etwas großflächigeres Areal in seinem Umfeld ästhetisch und infrastrukturell aufzuwerten. Hierzu werden im Folgenden drei Beispiele gegeben.

5.1 Die Ziegelei Klein Kölzig

An der Ziegelei Klein Kölzig wird die Arbeit der Geologen bei der Lagerstättenprospektion auf Ziegelton erläutert. Der Ton selbst sowie die Braunkohle aus der angrenzenden Grube Franz (1851–1928) in Klein Kölzig waren die Rohstoffbasis für die Produktion von bis zu 5000 charakteristisch gelbgefärbten Ziegeln pro Tag in ihrer Produktionsphase von 1892/94 bis 1962. Die Ziegelei ist in mehreren Arbeitsschritten zwischen 2003/2004 und 2020 rekonstruiert worden. Sie ist heute Sitz des UNESCO Global Geoparks mit seiner Geschäftsstelle, des Ziegeleibahnvereins Klein Kölzig sowie der Heimatstube Klein Kölzig. In der Ziegelei werden Führungen angeboten, in denen die historische Ziegelproduktion nicht nur in technischer Art und Weise, sondern auch in ihrer sozialen Bedeutung für das Leben der Bevölkerung thematisiert wird (Abb. 8). Höhepunkt der Führungen in der Ziegelei ist die Möglichkeit, einen 60 m langen Ringbrandofen Hoffmann'scher Bauart vollständig zu begehen. Der gesamte Standort wird durch eine historische 600 mm Schmalspur Ziegeleibahn für touristische Zwecke ergänzt.

Zusätzlich können hier Bildungsangebote, bspw. ein sich im Aufbau befindliches Lehrkabinett zu geologischen Schwerpunkten des Geoparks, wie seinen Rohstoffen und Sedimenten, wahrgenommen werden. Auf diese Weise ist an der Ziegelei Klein Kölzig ein zentraler Anlaufpunkt für Wissensaustausch bzw. -transfer sowie Umweltbildungsaktivitäten entstanden und stellt ein breit gefächertes kulturelles Freizeitangebot zur Verfügung.

5.2 Grube Babina

Die ehemalige Grube Babina befindet sich in direkter Nachbarschaft zur polnischen Grenzstadt Łękica. Auf ihrem Gelände wurde im Zeitraum von 1921–1973 die tertiäre Braunkohle und Keramikton des Faltenbogens im industriellen Umfang sowohl im Tief- als auch im Tagebau gewonnen. Nach dem Ende des Bergbaus sind in diesem Gebiet nur geringfügige Rekultivierungsmaßnahmen durchgeführt worden. Im Wesentlichen überließ man das anderweitig nicht nachgenutzte Bergbaugelände der Renaturierung. 2012–2013 wurden Bergsicherungsmaßnahmen durchgeführt und ein etwa 5 km langer geotouristischer Pfad mit Picknickhütte, drei Parkplätzen und weiterer touristischer Infrastruktur angelegt (Abb. 9). Heute ist die ehemalige Grube Babina eine attraktive Bergbaufolgelandschaft, die als Landschaftspark nach polnischem



Abb. 8: Das Wandbild in der Ziegelei Klein Kölzig gibt die historische Ziegelproduktion detailgetreu wieder, Airbrush-Bild von Frank Stein, pixelbrush.

Fig. 8:

The mural in the brickworks Ziegelei Klein Kölzig reproduces the historical brick production in detail, airbrush picture by Frank Stein, pixelbrush.



Abb. 9: Karte des geotouristischen Pfades "Ehemalige Babina Grube".*Fig. 9:* Map of geotouristic route "Old Mine Babina".

Naturschutzrecht geschützt ist. Das Areal ist eine anthropogene Seenplatte, deren besondere Merkmale seine farbigen Wasserflächen, Versunkenen Wälder und die Babinaquellen sind. Ein Highlight in dieser Landschaft sind die Außenhalden der ehemaligen Tagebaue, in die sich tiefe Erosionsrinnen eingeschnitten haben und deren ständige Weiterentwicklung gut beobachtet werden kann. Sie sind durch entsprechende Absperrmaßnahmen vor unbefugtem Zutritt gesichert. Die Babina ist mit zahlreichen Informationstafeln zur Entstehung des Faltenbogens und seiner Geomorphologie sowie zur Rohstoffgewinnung und Entwicklung der Bergbaufolgelandschaft und ihrer Gewässer ausgestattet. Besucher können die ehemalige Grube auf eigene Faust oder mit Geopark Führern erkunden und unmittelbar die weiterhin andauernden, natürlichen Renaturierungsprozesse einer Bergbaufolgelandschaft erleben. Ein eigens errichteter Aussichtsturm ermöglicht den Blick aus der Vogelperspektive, aus der das Gebiet am besten zu erfassen ist. Gegenwärtig wird der Babina-Pfad im Nordwesten durch durch eine neue Wegstrecke zu einem Rundkurs ausgebaut.

5.3 Waldeisenbahn Muskau

Die Waldeisenbahn Muskau (WEM, www.waldeisenbahn. de) diente einst zum Transport der im Faltenbogen wichtigen Rohstoffe Holz, Braunkohle und Ton sowie den von der ansässigen Industrie hergestellten Produkten. Nachdem sie ihre Bedeutung in der zweiten Hälfte in des 20. Jahrhunderts verloren hatte, sind große Teile des einstigen Streckennetzes zurückgebaut worden. In den 1980er und 90er Jahren ist die WEM als touristische Bahn wieder aufgebaut worden, und Teile des Streckenverlaufs sind wiederhergestellt. Heute ist die WEM als Museumsbahn eine eindrucksvolle Sehenswürdigkeit und verbindet wichtige touristische Destinationen im sächsischen Gebiet des Geoparks. Als Hauptanlaufpunkt dient das Besucherzentrum der "Anlage Mitte" in Weißwasser/O.L., in dem sich interessierte Besucher über die Geschichte und Bedeutung der Waldeisenbahn sowie die Verknüpfung mit der Geologie des Muskauer Faltenbogens anhand von Schaubildern informieren können (Abb. 10). Von dort aus erschließt die Infrastruktur den Turm am Schweren Berg mit der Tagebaurekultivierungsfläche und dem aktiven Braunkohlen-Großtagebau Nochten im Hintergrund, den Kromlauer



Abb. 10: Informationszentrum der Waldeisenbahn "Anlage Mitte" in Weißwasser.
Fig. 10: Information Center of the Forest Railroad "Anlage Mitte" in Weißwasser.

Park (https://www.rakotzbruecke.de/kromlauer-park) mit seiner Nutzung der Gieserlandschaft als morphologisches gartengestalterisches Element und den Oberlausitzer Basaltsäulen. Außerdem gut zu erreichen ist der Bergpark im Welterbe Fürst-Pückler-Park in Bad Muskau mit dem historischen Alaunbergbau (https://www.muskauer-park. de). An allen Lokationen werden den Gästen umfangreiche Informationen in Form von Tafeln oder in den eingerichteten Besucherzentren zur historischen und aktiven Bergbautätigkeit und der Rohstoffnutzung, dem damit verbunden landschaftlichen und industriellen Wandel, sowie den geologischen Besonderheiten des Muskauer Faltenbogens bereitgestellt.

6 Geological Storytelling als didaktisches Instrument

Storytelling ist ein bewährtes Instrument, das zur Bildung, im Wissensmanagement und in der allgemeinen Kommunikation angewendet wird. Ihr besonderes Merkmal ist es, ähnlich einer Novelle, etwas Besonderes oder Überraschendes zu vermitteln sowie durch eine bildhafte Sprache Inhalte und Emotionen zu transportieren. Im Tourismus wird Storytelling häufig im Zusammenhang mit Mystik, Sagen oder Aberglauben eingesetzt. Im Geopark wird beim Storytelling vornehmlich auf die Vermittlung von geologischen und rohstofflichen Aspekten sowie die Landschaftsveränderung durch den Menschen einschließlich der Klimaveränderungen gesetzt. Ergänzend spielen auch Sagen, Mythen sowie künstlerische und ästhetische Aspekte eine gewisse Rolle. Dazu einige Beispiele.

Wenn im Muskauer Faltenbogen die durch glazialtektonische Prozesse aufgestauchte Braunkohle eine besondere Rolle spielt, dann ist es erforderlich, diese auch zu zeigen. Hierzu wurde im Ausbissbereich der Kohle, in einem Gieser, bereits 2003 ein Großschurf angelegt. Er wird durch regelmäßige Pflege offen gehalten (Abb. 11a). Eine Grafik zeigt etwas vereinfacht die glazialtektonische Schuppe und die holozänen, im Giesertälchen ausgebildeten Torfschichten (Abb. 11b). An diesen Torfen wurden palynologische Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse vorgestellt und erläutert werden (Abb. 11c). Dies gibt die Möglichkeit, sowohl die Arbeit der Geologin aufzuzeigen als auch die durch Klimawandel bedingte Veränderung der Moorvegetation über einen Zeitraum von ca. 3000 Jahren hinweg zu vermitteln. Seine volle Wirkung entfaltet das so aufbereitete Wissen in der Nutzung durch Geoparkführer, die darauf aufbauend authentische Geschichten wiedergeben und den Besucher daran teilhaben lassen.

Nach Rückmeldungen von Besuchern und Medienresonanz besitzen die "Bunten Seen" im Muskauer Faltenbogen die größte Attraktivität. Sie sind bei am Boden arbeitenden Fotografen und in letzter Zeit insbesondere bei Drohnenfliegern beliebte und mit einem positiven Image besetzte Beobachtungsobjekte. Die obligatorische Frage nach der Ursache der Färbungen eröffnet eine breite Palette an Antwort- und Diskussionsmöglichkeiten.

Sie beginnen bei den braunen Seen, deren Färbung durch "Eisenschlämme", d. h. verschiedene sekundäre Eisen(III)-Minerale hervorgerufen wird (vgl. Abb. 9c in Teil 1). Gelbbraune, wassertrübende Farben bilden sich, wenn gerade die Ausfällungsprozesse stattfinden (Abb. 12a). Dunkelrotbraune Farben und transparentes Wasser wird durch auf dem Boden abgesetzten Eisenschlamm in Zeiten, in denen keine Ausfällungen erfolgen, verursacht (Abb. 12c). Grüne Farbtöne gehen häufig auf Planktonwachstum in zurück (Abb. 12b), während schokoladenbraune auf umgekippte Seen infolge von Überdüngung deuten. Blaue oder schwarze Farben sind glasklare, oftmals fischreiche Gewässer, deren Färbung durch Reflexionen des Seegrundes oder des wolkenlosen Himmels bedingt sind. Die Aussicht, dass sich die Farben jahreszeitlich und wetterbedingt ändern können, animieren zu wiederholten Besuchen. Die Farben der Seen führen fast im Selbstlauf zu Themen wie pH-Wert, natürlichen oder anthropogenen Ursachen und fördern das Verständnis für die Komplexität natürlicher Vorgänge resp. die Auswirkungen des menschlichen Handelns - in diesem Fall den jahrhundertelangen Abbau von Rohstoffen.

Die wahrscheinlich überraschendste Pointe hat die Story von Mammut Susi (Abb. 13a). Ihr Skelett wurde 1803 in Klinge bei Forst in einer Eem-zeitlichen Schicht gefunden (FISCHER 1996). Der Fund in warmzeitlichen Schichten steht dem allgemein verbreiteten Image des Mammuts als "Eiszeittier" gegenüber (Abb. 13b). Das Mammut erhielt 2001 in einer Umfrage unter den Mitarbeitern der Verwaltung des Landkreises Spree-Neiße in Forst, wo seine Replik steht, den Namen "Susi Stoßzahn" und entwickelte sich nachfolgend zum Geoparkmaskottchen und als Comicfigur zum Sympathieträger in der Schriftenreihe GEOPARK mini.



- Abb. 11: Ein künstlicher Aufschluss erlaubt den Einblick in einen Gieser südlich des Felixsees bei Bohsdorf an der Geologie-Tour.
 - (a) Geotopflege durch Instandhaltungsarbeiten am Aufschluss.
 - (b) Schematischer geologischer Schnitt durch den Gieser.
 - (c) Palynologische Untersuchungen an den Torfbildungen dieses Giesers, SB Subat-lantikum,

ÄSA – Älteres Subatlantikum, JSA – Jüngeres Subatlantikum, Bearbeiterin: J. Strahl, LBGR Brandenburg, veröffenticht in KUPETZ & KUPETZ (2009 S. 66).

Abb. 11: An artificial outcrop allows a view into a gieser valley south of the Felixsee near Bohsdorf at the Geology Tour.

(a) Geotope maintenance by maintenance work on the outcrop.

(b) Schematic geological section through the gieser valley.

(c) Palynological investigations on the peat formations of this gieser, SB – Subatlantic, ÄSA – Older Subatlantik, JSA – Younger Subatlantic, editor: J. Strahl, LBGR Brandenburg, published in KUPETZ & KUPETZ (2009 p. 66).



Abb. 12: Die Bunten Seen. Durch natürliche und/oder anthropogene Prozesse haben die zahlreichen Bergbaufolgeseen oftmals attraktive Färbungen.

- (a) Braunkohlentiefbau-Folgesee, Bereich Grube Viktor bei Tuplice, Foto: Jarosław Ramucki.
- (b) Braunkohlentagebau-Folgesee, Mulde VII Grube Frieden West bei Halbendorf.
- (c) Braunkohlentagebau-Folgesee, Grube Czaple II bei Broniwice, Foto: Peter Radke, LMBV.
- (d) Braunkohlentiefbau-Folgesee, Bereich Grube Viktor bei Tuplice, Foto: Jarosław Ramuski.
- *Fig. 12:* The colourful lakes. Due to natural and/or anthropogenic processes, the numerous post-mining lakes often have attractive colorations.
 - (a) Lignite post-mining lake, area of Viktor pit near Tuplice, photo: Jarosław Ramuski.
 - (b) Opencast post-mining lake, Frieden West pit near Halbendorf.
 - (c) Opencast post-mining lake, Czaple II pit near Broniwice, photo: Peter Radke, LMBV.
 - (d) Lignite post-mining lake, Viktor pit area near Tuplice, photo: Jarosław Ramuski.







Abb. 13:

Das Mammut Susi Stoßzahn, gefunden als weitgehend erhaltenes Skelett 1903 in Klinge bei Forst. Sie ist das Maskottchen des Geoparks. (a) Replik des Skeletts im Verwaltungsgebäude des Landkreises Spree-Neiße in Forst. (b) Lebensbild des Mammuts von Klinge in einer mit wärmeliebenden Birken bestandenen Auenlandschaft. (c) Mammut Susi begleitet als Comicfigur die Leser im GEOPARK mini.

Fig. 13:

The mammoth Susi tusk, found as a largely preserved skeleton in 1903 in Klinge near Forst. She is the mascot of the Geopark. (a) Replica of the skeleton in the administrative building of the district Spree-Neiße in Forst. (b) Life picture of the Klinge mammoth in a floodplain landscape covered with warm climate indicating birch trees. (c) Mammoth Susi accompanies readers as a comic figure in GEOPARK mini. а





Abb. 14: Die Entstehung eines Versunkenen Waldes.
(a) Geologische Schnitte zur Veranschaulichung, wie durch einen flächenhaften Tagebruch über einem historischen Braunkohlen-Tiefbaufeld die Erdoberfläche unter Wasser gelangt. Rekonstruiert nach bergbaulichen Unterlagen am Beispiel der Mulde Hermann Nord I in der Grube Julius bei Friedrichshain. Aus der Informationstafel GE01 an der Geologie-Tour, ebenfalls in KUPETZ & KUPETZ (2009, S. 137).
(b) Versunkener Wald in der Grube Hermann bei Weißwasser/O.L.
(c) Ein Versunkener Wald in der Mulde (Schuppe) III der Grube Babina bei Łęknica. Pastellzeichnung von Sebastian Baran 2008.

Fig. 14: The formation of a sunken forest.
(a) Geological sections to illustrate how the surface of the earth is submerged by an extensive open-cast fracture above a historic deep mining lignite field. Reconstructed according to mining documents using the example of Hermann Nord I in the Julius mine near Friedrichshain. From information board GE01 at the geology tour, also in KUPETZ & KUPETZ (2009, p. 137).
(b) Sunken forest in the Hermann pit near Weißwasser/O.L.

(c) A sunken forest in the scale III of the Babina pit near Łęknica. Pastel drawing by Sebastian Baran 2008.

Versunkene Wälder sind im Muskauer Faltenbogen weit verbreitet (Abb. 14). Sie bilden sich in flächenhaften Bruchgebieten über historischem Braunkohlentiefbau. Dabei versinken die Kiefernforstflächen, und es entstehen attraktive Landschaftsmotive (Abb. 14). Die Versunkenen Wälder lassen unerwartete Vergleiche zu, beflügeln die Fantasie und wecken Emotionen. Da hier die Spuren des Bergbaus allgegenwärtig und nicht zu verleugnen sind, bieten sie Ansatzpunkt für die Auseinandersetzung mit geo-relevanten Themen wie solchen des Landschaftsverbrauchs, dem Rohstoffhunger der Gesellschaft und der Rekultivierung devastierter Flächen. Das wahrscheinlich attraktivste Geotop im Muskauer Faltenbogen sind die Großen Babinaquellen. Sie wurden 2013 durch eine Zuwegung und einen Holzsteg touristisch erschlossen (Abb. 15a, b). Das Areal direkt um die Quellen ruft dabei Assoziationen zu einer Mars- oder Mondlandschaft hervor. Storytelling ist hier eine der nachhaltigeren Methoden, um die Besucher in ihrem Vergleich abzuholen und die Geodiversität in ihren mannigfaltigen Ausprägungen in den Mittelpunkt zu stellen.

Der Diabelski Kamen (Teufelsstein) ist der auf 100 t geschätzte, mit Abstand größte Findling im Muskauer Faltenbogen und nach polnischem Gesetz als Naturdenkmal geschützt. Er ist eine prähistorische Kultstätte mit einer





Abb. 15:
Die Große Babinaquelle.
(a) Die Quelle und ihr Umfeld
vor der touristischen Zugänglichmachung, Foto: 2007.
(b) Die Erschließung durch einen Holzsteg 2013.
(c) Pastellzeichnung der Quelle
von Sebastian Baran 2007.

Fig. 15:
The Great Babina Spring.
(a) The spring and its surroundings before making it accessible to tourists, photo: 2007.
(b) It was made by a wooden footbridge 2013.
(c) Pastel drawing of the spring by Sebastian Baran 2007.

Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 1/2-2021







- Abb. 16: Der Diabelski Kamen (Teufelsstein) bei Tuplice (Teuplitz). (a) Teufelsstein nach gründlicher Reinigung 2020 (Geotoppflege).
 (b) Archäologische Interpretation der mittelalterlichen Skulptur auf dem Findling als kultisches Sonnensymbol durch Piotr Haracz in: KUPETZ & KUPETZ (2009, S. 113).
 (c) Theateraufführung der Sage vom Müller und dem Teufel beim Teufelssteinfest am 10. Oktober 2020 durch Kinder der Grundschule Trzebiel.
- Fig. 16: The Diabelski Kamen (Devil's Stone) near Tuplice (Teuplitz). (a) Devil's stone after thorough cleaning in 2020 (geotope maintenance).
 (b) Archaeological interpretation of the medieval sculpture on the boulder as a cultic sun symbol by Piotr Haracz in: KUPETZ & KUPETZ 2009, p. 113).
 (c) Theater performance of the legend of the miller and the devil at the Devil's Stone Festival on October 10, 2020 by children of the Trzebiel Elementary School.

großen, von Löchern umgebenen Scheibe, die als Sonnensymbol interpretiert werden kann. Bisher ist im nordmitteleuropäischen Vereisungsgebiet kein Findling mit vergleichbaren menschlichen Bearbeitungsspuren bekannt und gibt entsprechenden Diskussionsanlass (Abb. 16a, b). Der Sage nach verlor der Teufel in Menschengestalt diesen Stein beim Flug durch die Lüfte, als er vergeblich um eine schöne Müllerstochter freite (Abb. 16c).

Dank

Wir danken allen ehrenamtlich für den Geopark Tätigen, ohne dass wir sie im Einzelnen aufführen können. Ein gleicher Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe für die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit. Ebenfalls danken wir Frau Dr. Marie-Luise Frey, Geschäftsführerin des UNESCO Welterbe Grube Messel, Mitglied des UNESCO Global Geoparks Council und Mitglied des Executive Boards der Global Geoparks Network Association für wertvolle Diskussionen und Hinweise zum Manuskript.

Literatur und Quellen (Auswahl):

- ANSPACH, N., KUPETZ, A., KUPETZ, M. & NEMITZ, D. (2005): Didaktischer Ansatz und grafische Umsetzung der Schautafeln an den brandenburgischen Geopark-Touren im Muskauer Faltenbogen.- Brandenburg. geowiss. Beitr. 12, 1/2, S. 61–72
- ANSPACH, N, KUPETZ, A., KUPETZ, M. & NEMITZ, D. (2006): Geodidaktik im Muskauer Faltenbogen.- Tagungsband und Exkursionsführer der 73. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen vom 06.–09. Juni 2006 in Halle (Saale), S. 9–10
- BARON, U. (2007): Hydrogeologie der "Vier bunten Seen" im Muskauer Faltenbogen. – Brandenburg. Geowiss. Beitr. 14, 1, S. 75–86
- BARTHOLOMÄUS, U. (2015a): Forschungskonzept für den Geopark "Muskauer Faltenbogen" (Entwurfsstand). – Manuskript, 14 S., Hänichen (unveröff.)
- BARTHOLOMÄUS, U. (2015b): Suchliste potenzieller Geotope im Geopark (Sächsischer Bereich). – Manuskript, 9 S., Hänichen (unveröff.)
- BERNDT, R. & HYLLA, E. (2002): Die Verwendung von Feldsteinen in Profanbauten - Landkreis Spree-Neiße. – Dokumentation i.A. des Fördervereins Kulturlandschaft Niederlausitz e. V. Cottbus (unveröff.)
- BÖLSCHER, J., REIMANN, T. & BÖSE, M. (2008): Geomorphologische Untersuchungen zum Verhältnis von Trokkentälern zu den Flussterrassen der Niederlausitzer Neiße zwischen Bad Muskau und Zelz. – Vortrag auf dem 8. deutsch-polnischen Geoparktreffen Muskauer Faltenbogen in Forst am 12.09.2008. – 7 S. (unveröff.)
- BOŻĘCKI, P. (2010): Ergebnisse mineralogischer Untersuchungen im polnischen Teil des Muskauer Faltenbogen.-Schriftenreihe Deutsch. Gesellsch. Geowissensch., 62, S. 24–32

- BOŻĘCKI, P. (2013): Studium osadów tworzących się w obszaze eksploataciji węgla brunattego w rejonie Łęknicy (Łuk Mużakowa).- Rozprawa doktorska, Akademia Górniczno-Hutniczna (AGH) Kraków, 184 S., 92 Abb., 51 Ta. 25 Fot., [Dissertationsschrift: Untersuchung der Mineralabscheidungen im Braunkohlenabbaugebiet um Łęknica (Muskauer Faltenbogen)].
- BRAUER, E., JANETSCHKE, J., KUPETZ, M.& LICHNOK, H. [Red.]: Der Muskauer Faltenbogen, Lehrmaterial für den außerschulischen Unterricht.- [Hrsg.:] Förderverein Geopark Muskauer Faltenbogen e.V., 36 S.
- BUTLER MANNING, C., KRAMPE, L. & MÖLLER, L. (2018): Education for sustainable development in German UNESCO Global Geoparks: The way forward.- Proc. 8th International Conference on UNESCO Global Geoparks,.
 [Ed.] UNESCO Global Geopark Adamello Brenta, Madonna de Campoglio, Italy, p. 46. CROFTS, R., GORDON, J.E., BRILHA, J., GRAY, M., GUNN, J., LARWOOD, J., SAN-TUCCI, V.L., TORMEY, D. & WORBOYS, G.L. (2020): Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas.- [Ed.] International Union for Conservation of Nature - IUCN, 159 p., ISBN: 978-2-8317-2079-1, https:// www.researchgate.net/publication/346259512_Guidelines_for_geoconservation_in_protected_and_conserved_ areas#fullTextFileContent (Zugriff 05.08.2021)
- DAWCZYK, G. & MACIANTOWICZ, M. (2014): Aus der Geschichte der Bergbaus und der Bahn im Muskauer Faltenbogen.- [Hrsg.:] Croma Drukarnia Krysztof Raczkowski und Landkreis Żary,) 90 S. (polnisch) + 90 S. (deutsch)
- DUK (2016): Kriterien des Nationalkomitees für UNESCO Global Geoparks in Deutschland.- 14 S. https://www. unesco.de/sites/default/files/2018-04/UNESCO%20Global%20Geoparks NK Kriterien 11 2016.pdf
- DUK (2017): Modellregion für nachhaltige Entwicklung: UNESCO Global Geopark Muskauer Faltenbogen/ Łuk Mużakowa und die Globale Nachhaltigkeitsagenda.-[Hrsg.] Deutsche UNESCO-Kommission, Bonn, 16 S., erschienen sowohl in gedruckter Form als auch elekronisch unter https://www.unesco.de/sites/default/files/2018-01/ unesco geopark Muskauer Faltenbogen.pdf
- DUK (2020): Modellregion für nachhaltige Entwicklung: UNESCO Geopark, Vom geologischen Erbe zu einer nachhaltigen Zukunft.- [Hrsg.] Deutsche UNESCO-Kommission, Bonn, 28 S. https://www.unesco.de/sites/ default/files/2020-06/Geoparks_Imagebroschuere_2020. pdf [Zugriff 20.08.2021]
- FISCHER, K. (1996): Das Mammut (*Mammuthus primigenius* BLUMENBACH, 1799) von Klinge bei Cottbus in der Niederlausitz (Land Brandenburg).- Berliner geowiss. Abh., E 18, S. 121–167
- GGN (2016): Evaluation Document A 2016(EN_UGG Evaluation_Doc A: Self-evaluation 12 Feb 2016, xls file) and Evaluation Document B - 2016 (UNESCO_Evaluation-Document-B-2015-Geopark-progress-evaluation, xls file) http://globalgeoparksnetwork.org/?page_id=338 [Zugriff 19.08.2021]

- GRUBE, A. & WIEDENBEIN, F. W. (1992): Geotopschutz eine wichtige Aufgabe der Geowissenschaften. Die Geowissenschaften **10**, 8, S. 215–219
- HAASE, G. & SCHLÜTER, H. (1980): Zur inhaltlichen Konzeption einer Naturraumtypenkarte der DDR im mittleren Maßstab. – Peterm. Geogr. Mitt. **124**, S. 139–151
- HEIDENFELDER, W., RASCHER, J., RASCHER, M. & GÖHLER, A.; unter Mitwirkung von Kupetz, M. & Czahajda, K. (Geopark Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa) (2019): Erstellung eines Geotopkatasters Teil 1: Sachstandsermittlung der Entwicklung seit Ersterhebung 2001, Auswertung und Neubewertung der Geotoperfassung und -bewertung für das Gebiet des Geoparks Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa UNESCO Global Geoparks (D / PL). – Bericht, GEOmontan GmbH Freiberg, 117 S., Freiberg (unveröff.)
- HEIDENFELDER, W.; RICHTER, L.; KÄSTNER, S.; LIPP, J. & GÖHLER, A. (2020): Erstellung eines Geotopkatasters, Teil 2: Begehung, Dokumentation und Bewertung von 140 ausgewählten Geotopen für das Gebiet des Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa UNESCO Global Geoparks (D / PL).- Bericht, GEOmontan GmbH Freiberg, 30 S., Freiberg (unveröff.)
- HÜBNER, F., MEIER, J. & RASCHER, J. (1999): Geotopschutzgutachten für den Muskauer Faltenbogen, Abschlußbericht. – Gemeinsame Landesplanungsabteilung der Länder Berlin und Brandenburg, GEOmontan Gesellschaft für angewandte Geologie mbH Freiberg, 95 S., Freiberg.
- KUPETZ, M. (1996): Der Muskauer Faltenbogen ein Geotop von europäischer Bedeutung.- Brandenburg. Geowiss. Beitr. 3,1, S. 125–136
- KÖBBL & TSCHUK (2005): Die Verwendung von Feldsteinen in Profanbauten Südbrandenburgs - Erfassung, Dokumentation, Bewertung. – In: (Hrsg.) Förderverein Kulturlandschaft Niederlausitz e. V. Cottbus, S. 57–66.
- KOTZAN & ULBRICH (2009): Der Lausitzer Findlingspark Nochten – eine Perle in der Bergbaulandschaft. – In: (Hrsg.) KUPETZ, A & KUPETZ, M (2009): Wanderungen in die Erdgeschichte (24), – 226 S., München (Pfeil)
- KoźMA, J., GAWLIKOWSKA, E., BADURA, L, & KASIŃSKI (2001): Ocena geotopów w polskiej części obszaru Łuka Mużakowa. – Państwowy Instytut Geologiczny Oddział Dolnośląski im. Henryka Teisseyra, Wrocław, 106 S.
- KoźMA, J. (2018): Analisa ewolucji krajobrazu Polskiej części Łuku Mużakowa i jego waloryzacja w aspekcie ochrony dziedzictwa geologicznego, rozprawa dokorska.
 Dissertation Państwowy Instytut Geologiczny Wrocław, 347 S. (unveröff.), [Analyse der Landschaftsentwicklung des polnischen Teils des Muskauer Faltenbogens und dessen Bewertung unter dem Gesichtspunkt des Schutzes des geologischen Erbes].
- KUPETZ, M. (2003): Informationstafel am Soll von Groß Kölzig an der Altbergbau-Tour.
- KUPETZ, M. (2018): Stellungnahme des Geoparks Muskauer Faltenbogen zur Planung für die Aufstellung des FFH-Managementplanes für das FFH-Gebiet Luisensee. – Cottbus 24.05.2018, 5 S.

- KUPETZ, A. & KUPETZ, M. [Ed.] (2009): Der Muskauer Faltenbogen.- Wanderungen in die Erdgeschichte (24), 226 S., München (Pfeil)
- KUPETZ, A., KUPETZ, M., KOŻMA, J. & BOŻĘCKI, P. (2012):
 Quellen und Eisenhydroxidminerale im polnischen Teil des Geoparks Muskauer Faltenbogen. – Der Aufschluss, 63, S. 101–114
- KUPETZ, A., KUPETZ, M. & RASCHER, J. (2004): Der Muskauer Faltenbogen – ein geologisches Phänomen, Grundlage einer 130jährigen standortgebundenen Wirtschaftsentwicklung und Geopark in Brandenburg, Sachsen und der Wojewodschaft Lebuser Land.- [Hrsg.:] Gesellschaft für Geowissenschaften e. V., Berlin, 36 S.
- KUPETZ. K., KUPETZ, A. & RASCHER, J. (2018): Muskauer Faltenbogen, Łuk Mużakowa, Muskau Arch.- [Hrsg.:] Förderverein Geopark Muskauer Faltenbogen e.V., 3. erweiterte Aufl.- 44 S.
- КUPETZ, М. & KoźмA, J. (2015): Europäischer und Globaler Geopark Muskauer Faltenbogen / Geopark Łuk Mużakowa – die weltweit am besten untersuchte Grundbruchmoräne ("Stauchendmo-räne").- Exkurs.-führer und Veröff. DGG (EDGG), 255, S. 113–135
- LIEWALD, A. in Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des UNESCO Global Geopark Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa (2020): Konzept zur kulturellen Vermittlung und Bildung für nachhaltige Entwicklung im UNESCO Global Geopark Muskauer Faltenbogen / Łuk Mużakowa.- unveröff. Bericht, Pan b Freiraumperspektiven, Tschernitz, 35 S. [BnE Teil I]
- LIEWALD, A. et al. (2021): Methodisch-didaktisches Konzept [BNE Teil II].- in Bearbeitung, Fertigstellung Ende 2021 [BnE Teil II]
- LOOK, E.-R. [Red.] (1996): Arbeitsanleitung Geotopschutz in Deutschland: Leitfaden der Geologischen Dienste der Länder der Bundesrepublik Deutschland. - Angew. Landschaftsökologie, **9**, 105 S. Bad Godesberg
- LOOK, E.-R. & QUADE, H. (2007): Faszination Geologie: Die bedeutendsten Geotope Deutschlands. – 2. überarbeitete Aufl., 175 S., Stuttgart (Schweizerbart)
- MACIANTOWICZ, M. & KoźMA, J. (2014): Łuk Mużakowa po obu staronach Nysy Łuk Mużakowa - Przewodnik geologiczno-touristyczny.- [Hrsg.:] Croma Drukarnia Krysztof Raczkowski, Żary.- 200 S., Łęknica [Der Muskauer Faltenbogen - Ein geologisch-touristischer Führer]
- MÄDLER, F. (2006): Zwischenauswertung zur Kartierung nordischer Geschiebe im Bereich des Muskauer Faltenbogens. – Stand: September 2006, Manuskript.
- MÄDLER, F. (2009): Teufelssteine. 17 S., Forst/Lausitz (unveröff.) [Inhalt: Donnerkeile, Hühnergötter und Teufelssteine Aberglauben, Sagen und Legenden um nordische Geschiebe].
- MÄDLER, F. (2011a): II-7.2 Findlinge im Muskauer Faltenbogen. – In: (Hrsg.) J.H. Schroeder: Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg Nr. 10: Cottbus und Landkreis Spree-Neiße. – 267 S., Berlin (Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V.)
- Mädler, F. (2011b): ohne Titel. 147 S., Forst/Lausitz (unveröff.)

- MÄDLER, F. (2011c): Die östliche Niederlausitz, Portät einer Landschaft.- unveröff. Manuskript, Forst/ Lausitz 23 S. [Inhalt: Natursagen, Wer ist wer? Markgraf Gero I. und die Lausitz].
- MÄDLER, F. (2018): Natursagen Donnerkeile, Hühnergötter und Teufelssteine zwischen Spree, Neiße und Bober.- unveröff. Manuskript, Forst/ Lausitz 23 S.
- MARTINI, G. (2012): Creating a new strong Geopark identity in front of other World UNESCO Territories: The PPF concept.- Proc. 11th European Geoparks Conference 2012, Arouka Geopark, Partugal, 19.21 September 2012, p. 185–186
- PGI (2019): Geostanowiska geoportal.- Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa http://geoportal.pgi.gov. pl/portal/page/portal/geostanowiska/projekt [Zugriff 10.12.219]
- RASCHER, J. & HEIDENFELDER, W. (2009): Machbarkeitsstudie für den Großaufschluss Kromlau im Geopark Muskauer Faltenbogen. – Gutachten, GEOmontan mbh Freiberg, 35 S. (unveröff.)
- RASCHER, J., MEIER, J. & KUPETZ, M. (2000): Der Geopark Muskauer Faltenbogen – Grundlagen,
- Stand, Perspektiven. Geowiss. Mitt. Thüringen 10, S. 75–85
- REIN, H., BRUST, M. K., KASINSKI, J., KASTNER, H., KOŹMA, J., KRUKENBERG, E., KUPETZ, M., RASCHER, J. & SCHWIERZY, A. (2002): Der "Geopark Muskauer Faltenbogen" – Machbarkeitsstudie als Meilenstein zur Entwicklung eines UNESCO-Geoparks. – Brandenburg. Geowiss. Beitr., 9, 1/2, S. 139–152
- REIN, H., KRUKENBERG, E, KASTNER, H., SCHWIERZY, A., RASCHER, J., & BRUST, M. (2001): Machbarkeitsstudie zum "Geopark Muskauer Faltenbogen" – Meilenstein zur Entwicklung eines UNESCO-Geoparks. – BTE Berlin, GEOmontan GmbH Freiberg, Rödl & Partner Poznan i. A. Geopark Muskauer Faltenbogen, vorläufiger Abschlussbericht, 12/2001, 130 S.
- RZEPA, G. & P. BOŻĘCKI (2007): Mineral composition of AMD precipitates in the Łęknica region (the Muskau Arch, Western Poland). – Mineralogia Polonica Special Papers **31**, S. 243–246
- RZEPA, G. & BOŻĘCKI, P. (2008): Mineral composition of AMD precipitates in the Łęknica area (the Muskau Arch, western Poland). Poster, Kraków, AGH University of Science and Technology, Dep. Min., petr., and geoch. (unveröff.)
- SAUER, N. (2018): Geologische Inventarisierung. In: Bericht der Stiftung "Fürst-Pückler-Park Bad Muskau" zum Projekt "Kulturlandschaft Muskauer Faltenbogen, Erfassung und Integration von Elementen historischer Kulturlandschaft als Grundlage für ein grenzübergreifendes Entwicklungskonzept", S. 36–77, Bad Muskau (unveröff.)
- SŁOMKA, T., KICIÑSKA-ŚWIDERSKA, A., DOKTOR, M. & JONIEC, A. (2006): Katalog obiektów geoturystycznych w Polsce. – 260 S., Kraków (Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie)
- SGD (Hrsg.) (2018): Arbeitsanleitung Geotopschutz in Deutschland: Leitfaden der Geologischen Dienste der Länder der Bundesrepublik Deutschland. – 2. Aktualisierte und ergänzte Aufl., 136 S. Jena

- THIEL, U. (1993): Einladungskarte zur Eröffnung des "Runen und Bildsteinparks" am 02.04.1993 nach Gosda.
- SUZUKI, D. A. & TAKAGI, H. (2017): Evaluation of Geosite for sustainable Planning and Management in Geotourism. – Geoheritage, **10**, S. 123–135
- UNESCO (2017): Statutes of the International Geoscience and Geoparks programme, and Operational Guidelines for the UNESCO Global Geoparks.- https://globalgeoparksnetwork.org/wp-content/uploads/2015/03/IGGP_ EN_Statutes-and-the-Guidelines.pdf

Anschrift der Autoren

Dr. Manfred Kupetz Förderverein Geopark Muskauer Faltenbogen e.V. c/o Schulweg 1a 03055 Cottbus manfred.kupetz@t-online.de

Detlef Nickel Förderverein Geopark Muskauer Faltenbogen e.V. c/o Dorfstr. 40 02953 Kromlau d.nickel@muskauer-faltenbogen.de

Nancy Sauer Ewa Brauer Katazyna Jagiełło Dr. Kersten Loewen UNESCO Global Geopark Muskauer Faltenbogen/ Łuk Mużakowa/ Muskau Arch Geschäftsstelle Klein Kölzig An der Ziegelei 1 03159 Neiße-Malxetal n.sauer@muskauer-faltenbogen.de e.brauer@muskauer-faltenbogen.de k.jagiello@muskauer-faltenbogen.de k.loewen@muskauer-faltenbogen.de

Dr. Jacek Kożma Państwowy Instytut Geologiczny Państwowy Instytut Badawczy Oddział Dolnośląski im. Henryka Teisseyre'a Al. Jaworowa 19 53-122 Wrocław Polska jacek.kozma@pgi.gov.pl

S. 97-124

Stratigraphie und Genese eines karbonatreichen Beckenprofils am Kliff von Meschendorf (Ostsee, Mecklenburg)

Stratigraphy and genesis of a carbonate-rich basin profile at the cliff of Meschendorf (Baltic Sea, Mecklenburg)

ROBERTO HENSEL, WOLFGANG JANKE, STEFAN MENG, SEBASTIAN LORENZ

Reinhard Lampe zum 70. Geburtstag gewidmet.

Zusammenfassung

Am Kliff bei Meschendorf an der südlichen Ostseeküste sind, wie an nur ganz wenigen Steilküstenabschnitten in Mecklenburg-Vorpommern, Weichsel-spätglaziale und holozäne, karbonatische und organogene Sedimente als Profil aufgeschlossen. Sie stammen aus dem Randbereich eines ehemals bis in die heutige Ostsee hineinreichenden Beckens. Es werden erste Untersuchungsergebnisse von zwei Referenzprofilen (Me-1 und Me-2) zur Sedimentologie, Molluskenfauna, Pollen- und Diatomeenflora, sowie ein Versuch der Rekonstruktion der Beckengenese vorgestellt und diskutiert.

Die Sedimentabfolge über Geschiebemergel und aufgelagerten Beckensanden der Pommern-Phase beginnt mit einem Regosol des Meiendorf-Interstadials. Darüber sind bis zum 13. Jahrhundert unserer Zeit nur Sedimente, die während Vernässungsphasen infolge Überstauung gebildet wurden, erhalten geblieben. Phasen mit niedrigem Grundwasserspiegel führten dagegen zum Sedimentationsausfall während bestimmter Zeitabschnitte des Weichsel-Spätglazials und Holozäns (Ausbildung von Hiatus). Das Becken wurde wahrscheinlich im späten Subboreal von der Ostsee angeschnitten und fiel trocken. Die bis heute anhaltende Kliff- und Beckenentwicklung wird vor allem durch den Küstenrückgang einschließlich der Bildung von Kliffranddünen und Flugsandtätigkeit sowie die agrarische Nutzung mitbestimmt. Die bis in die gegenwartsnahe Zeit im Jahresverlauf zeitweilig auftretenden Überstauungen des Beckens wurden dabei durch die seeseitige Abriegelung mit Flugsanden begünstigt. Die Kalkmudden sind Ablagerungen, die sich sedimentologisch, durch Mikroflora und -fauna sowie durch die Molluskenfauna voneinander unterscheiden. An non-pollen palynomorphs (NPP) reiche Kalkmudde- und Seekreideabschnitte zeugen von lokal trockenerem Milieu, z. B. im mittleren Holozän auch als Folge des Kliffanschnitts durch die Ostsee. Für folgende Zeiträume bestehen Hiatus, deren Dauer pollenanalytisch und durch ¹⁴C-Datierungen nur annähernd eingegrenzt werden kann:

- 1.) Älteste Dryas bis frühes Allerød (bei 254 cm),
- 2.) ausklingendes Allerød und Jüngere Dryas (bei 246 cm),
- jüngstes Präboreal, Boreal und Teile des Älteren Atlantikums (bei 223 cm) sowie
- jüngstes Subboreal bis frühes Subatlantikum (bei 170,5 cm).

Summary

The Meschendorf cliff is located at the southern Baltic Sea coast, where Late glacial and Holocene carbonate gyttja is deposited in boundary areas of a swamp. First results on sedimentology, palynology, diatoms and mollusk fauna, as well as an attempt to reconstruct the genesis of the basin will be exemplarily explained for the profile Me-1. The sedimentation sequence starts with a regosol of the Meiendorf interstadial directly on top of the boulder clay and its deposited sands. Up to the 13th century, only sediments of water logging have been preserved above the regosol; due to dry periods sediments of Late Weichselian and Holocene partially are missing at the site. Probably, the basin was truncated by the Baltic Sea during the declining Subboreal and dried out.

Subsequently, the cliff- and basin genesis is influenced by cliff foredunes and aeolian transports, as well as agriculture. During the course of the year the basin is temporarily flooded and closed seaside by aeolian sand. Genetically, the calcareous gyttja represent calcareous sediments, which differ sedimentologically and by their micro flora, as well as by their mollusk fauna. The following periods are sedimentologically absent, since their duration can only be estimated by palynology and ¹⁴C analysis:

- 1.) Oldest Dryas until early Allerød (at 254 cm),
- 2.) declining Allerød and Younger Dryas (at 246 cm),
- 3.) recent Preboreal, Boreal und parts of the older Atlantic (at 223 cm)
- youngest Subboreal until early Subatlantic (at 170,5 cm).

1 Einführung

An der südlichen Ostsee werden im Bereich aktiver Kliffe mehrfach Becken von Seen und Mooren angeschnitten, deren Aufschlüsse vielfältige sedimentologische und paläoökologische Untersuchungen ermöglichen (z. B. HALLIK & LUDWIG 1959, LUDWIG 1963, KOPCZYŃSKA-LAMPARSKA et al. 1984, LANGE et al. 1986, STRAHL & KEDING 1996, KOSSLER & STRAHL 2014, LAMPE et al. 2016). Meschendorf ist der bisher einzige interdisziplinär bearbeitete Kliffaufschluss der mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste, in dem auch Kalkmudde und Seekreide führendes Binnenholozän des Mittel- und Jungholozäns mit angeschnitten ist.

Am ca. 500 m langen Kliffabschnitt sind zwei Abfolgen aus Kalkmudden und Wiesenkalken eines ehemaligen, heute von Flugsanden und Kolluvien bedeckten Beckens aufgeschlossenen. Sie erfuhren durch ZIMMERMANN (1929) und JAECKEL (1948), die die artenreiche Molluskenfauna dieser "Quellkalke" untersuchten, eine erste naturwissenschaftliche Bearbeitung. Eine detaillierte Neuaufnahme der Meschendorfer Kliffe erfolgte durch eine Diplomkartierung und daran anknüpfende paläoökologische Untersuchungen (HENSEL 2010, LORENZ & JANKE 2010, JANKE 2011). Weitere Studien bezogen den Kliffabschnitt Meschendorf nur hinsichtlich des Küstenrückgangs ein (z. B. REINHARD 1959, SCHULZ 1994, HUPFER et al. 2003). Zielstellung der vorliegenden Arbeit bildet die Erfassung der Genese und Prozessdynamik sowie der Stratigraphie des äolisch und kolluvial überprägten Standortes unter Einbeziehung pollen- und diatomeenanalytischer sowie malakologischer Untersuchungen.

2 Untersuchungsgebiet

Etwa 4 km westlich von Kühlungsborn und 7 km nordöstlich der Halbinsel Wustrow, zwischen den Küstenkilometern (KKM) 116,750–117,250, sind am Steilufer nördlich der Ortslage Meschendorf (Abb. 1) fossile Beckensedimente angeschnitten. Nahezu der gesamte Kliffabschnitt ist überdünt, wobei begrabene Regosole eine Mehrphasigkeit der Aufwehung belegen. In direkter Ortsnähe zu Meschendorf treten zusätzlich Kolluvien auf.

Am Steilufer von Meschendorf ist die im nördlichen Mecklenburg flächenhaft verbreitete Grundmoräne der Pommern-Phase (qW2) angeschnitten (SCHULZ 1994), wobei deren Geschiebemergel ungestört lagert und nach Norden bzw. Nordwesten einfällt (SCHULZ 1988; KATZUNG 2004, DUPHORN 2008). Ein pommersches Alter dieses Geschiebemergels ergaben auch von R. LAMPE durchgeführte Kleingeschiebeanalysen (freundliche schriftliche Mitteilung R. Lampe, Greifswald). Die jüngere, geringmächtige und lückige Grundmoräne der Mecklenburg-Phase (qW3) fehlt vor Ort, ist im weiteren Umland jedoch mehr oder weniger flächendeckend ausgebildet (vgl. HEERDT 1965, NIEDERMEYER 2011 sowie GÜK 200, Blatt 12/13).

Die Grundmoränenlandschaft ist untergliedert durch küstennahe Becken, wie den Rieden oder den Conventer See und Täler (z. B. bei Meschendorf oder das Fulgenbachtal). Auf ihre seeseitige Fortsetzung vor der Littorina-Transgression deuten submarin nachgewiesene Baumstubben und Torflagen bisher unbekannten Alters, aber auch archäologische Funde auf dem Grund der Mecklenburger Bucht (LÜBKE 2000; LÜBKE 2004; TAUBER 2007). Weitere Torflagen beschrieb auch KOLP (1961, 1964) aus den tieferen Zentralbereichen der Mecklenburger Bucht, von denen die meisten Versumpfungstorfe des ausklingenden Boreals und Atlantikums darstellen.

Das Kliff bei Meschendorf ist durch starke Abbrüche gekennzeichnet, die in Abhängigkeit von der Geschiebemergelklüftung und nachfolgend entstandenen Brandungshöhlen vor allem nach Sturmhochwässern auftreten (NIEDERMEYER et al. 1987). Vorwiegend im Winter kommt es zu Abbrüchen durch Wasseraustritte aus sandigen Schichten über dem Geschiebemergel (vgl. GELLERT 1989). Bedeutend für die langfristige Küstenentwicklung ist die Lage in einem geologischen Senkungsgebiet, wobei hier ein säkularer Meeresspiegelanstieg von 1,2 mm/a angenommen wird (LAMPE 2008). Der abrasive Küstenrückgang im Bereich Meschendorf wird in älterer Literatur mit 20-65 cm/a angegeben (ZANDER 1934, SCHÜLER 1987). Der gegenwärtige mittlere Küstenrückgang beträgt laut aktuellen amtlichen Angaben 35-55 cm/a (MLUV M-V 2009).

3 Methoden

3.1 Geländearbeiten und geochemische Analysen

Die Geländearbeiten von April bis November 2009 umfassten die kartographische und photographische Erfassung der rezenten Morphologie und Schichtabfolgen, das Vermessen der Kliffhöhen und Schichtmächtigkeiten, die sedimentologische und bodenkundliche Schicht- bzw. Horizontansprache nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) sowie die Beprobung der zwei Referenzprofile Me-1 und Me-2 für sedimentologische und paläoökologische Analysen im Zentimeterabstand (Abb. 2 und 3). Die landseitige Kartierung zur Ermittlung der Beckengröße erfolgte mittels Pürckhauer. Tiefenangaben beziehen sich in der vorliegenden Arbeit auf Zentimeter unter Geländeoberkante (GOK).



Abb. 1:Übersichtskarte des untersuchten Küstenabschnitts bei Meschendorf.Fig. 1:General map of the investigated coastal section near Meschendorf.



Abb. 2: Generalisierte Darstellung des bearbeiteten Kliffabschnitts (KKM 116,75-117,25) mit Dimension und Lage der beiden untersuchten Becken.

Fig. 2: Generalized figure of the Meschendorf cliff section (coast kilometer 116.75-117.25) including size and location of the two investigated basins.



Abb. 3:Photos der Profile Me-1 (links, S. Lorenz) und Me-2 (rechts, R. Hensel).Fig. 3:Images of the Profiles Me-1 (left, S. Lorenz) and Me-2 (right, R. Hensel) profiles.

Die geochemischen Analysen an den Sedimentproben umfassten die nachfolgend genannten Standardparameter: Der Glühverlust wurde durch zweistündiges Glühen bei 550 °C bestimmt. Die Korngrößenverteilung der Fraktionen kleiner 1 mm erfolgte mittels Laser Particle Sizer (Fa. Fritsch). Der CaCO₃-Gehalt wurde an der SCHEIBLER-Apparatur nach DIN ISO 10693 ermittelt.

3.2 Pollen- und Diatomeenanalysen

Im Rahmen der pollenanalytischen Aufbereitung wurden je Probe 1 bzw. bei den sehr karbonatreichen Ablagerungen 2 cm³ Sediment in aufeinander folgenden Arbeitsgängen mittels HCl, KOH, Acetolyse-Methode und abschließender HF-Behandlung zur Reduzierung des silikatischen Anteils aufbereitet. Von Proben mit mittlerer bis hoher Pollendichte (= P-Werte) kamen 300 Baumpollen, bei Proben mit geringer Pollendichte 200 bzw. im Bereich der basalen, extrem pollenarmen Seekreide zum Teil nur 100-200 Baumpollen zur Auszählung. Die Summe aus Baum- (BP), Strauch- (Str) und Nichtbaumpollen (NBP) entspricht der sogenannten Grundsumme, die auf 100 % gesetzt wird [Σ (BP+Str+NBP) = 100 %]. Auf diese Grundsumme bezieht sich der prozentuale Anteil der einzelnen Baum-, Strauchund Nichtbaumpollen-Typen. Der Pinus-Pollen besitzt zwei Luftsäcke und ist leicht zerstörbar. So wird der Parameter

Pinus ganze, welcher dem prozentualen Anteil ganzer Pinus-Pollen an Pinus gesamt entspricht, als Indikator für Umlagerungen im marinen, brackischen und lakustrinem Milieu angesehen (JANKE 1978, LAMPE et al. 2010b) und auch in dieser Studie mit herangezogen. Des Weiteren wurde der Ulmus-Quotient gebildet, in dem Ulmus prozentual auf die Summe der Prozente von Ulmus und Quercus bezogen wurde (= Ulmus *100 / Ulmus + Quercus). Dieser Quotient unterstreicht den Anteil von Ulmus als eine der ersten Hauptarten an den früh- bis mittelholozänen thermophilen Laubwäldern. Quantitativ ausgezählt und ebenfalls auf die genannte Grundsumme bezogen wurden des Weiteren Sporenpflanzen, Grünalgen, insbesondere Pediastrum-Arten und Radiococcus nimbatus, Cleistothecien von Schlauchpilzen, Kleinkrebse (Cladocera u. a.) sowie Gemmulae und Skleren von Süßwasserschwämmen.

Die Sammelgruppe "Mikrokörper unsicherer Genese" (im Folgenden: Mikrokörper, vgl. Abb. 7) umfasst nicht sicher bestimmbare Kleinorganismen unterschiedlicher Zuordnung mit einer Größe zwischen 40 und 600 μ m, bei Zusammenwachsungen sogar von über 1200 μ m. Aufgrund ihrer Größe dürften den Hauptteil der in Abb. 6 dargestellten NPP Fruchtkörper von Schlauchpilzen sowie eventuell auch weiterer Mikrofungi-Gruppen bilden. Kleinere Formen (Abb. 7: 16 und 17) ähneln "sterile fungal stroma" entsprechend DIETRE et al. (2014, fig. 6g). Einen kleinen

Teil (Abb. 7: 5 und 6) der NPP könnten wohl auch in Zersetzung befindliche bzw. korrodierte Reste von Holz (vgl. PRAGER et al. 2006) bzw. Kleinst-Ständerpilzen ausmachen. Des Weiteren enthält diese Gruppe in geringen Anteilen wahrscheinlich auch Porifera-Gemmulae, Hüllen beschalter Amöben und Rotifera-Dauereier. Trotz Konsultation von Botanikern und Zoologen gelang nur in Einzelfällen, so bei Arcella sp., eine Bestimmung bis zur Gattung. Da jedoch die Arten dieser Rhizopoden-Gattung unterschiedliche Lebensräume besiedeln, konnten keine weiterführenden Aussagen zur Kalkmudde- bzw. Seekreide-Genese abgeleitet werden. Dieses Problem betrifft auch die anderen mit einbezogenen Mikroorganismen-Gruppen. Diese Sammelgruppe als Teil der NPP wurde deshalb in das Pollendiagramm aufgenommen, um auf ihren hohen Anteil - vor allem in den Seekreiden des Mittelholozäns - aufmerksam zu machen und zu entsprechenden Studien anzuregen. Der Anteil der Mikrokörper übersteigt in den Seekreiden zum Teil das Mehrfache der Pollen-Grundsumme.

Die biostratigraphische Gliederung mittels Pollenzonen (PZ) erfolgte im Wesentlichen nach FIRBAS (1949/52), variiert durch SCHOKNECHT (in KAISER et al. 2002) und JANKE (in LAMPE et al. 2009), die Grenze PZ IX/X wurde an den Übergang von der Slawenzeit zur Deutschen Ostkolonisation gesetzt. Als Bestimmungsgrundlage für die verschiedensten, im Pollendiagramm erfassbaren Parameter dienten vor allem die Arbeiten von MOORE et al. (1991), BEUG (2004), KOMÁREK & JANKOVSKÁ (2001), EGGERS & EISELER (2007), VAN GEEL (1978), ELLIS & ELLIS (1997) und VAN GEEL & ATROOP (2006), die drei letzteren als Orientierungshilfe zur Ansprache von Fungi-Fruchtkörpern. Aus Platzgründen konnten nicht alle im Text besprochenen Parameter in das Pollendiagramm (Abb. 6) aufgenommen werden, in Abschnitten besonders auffälligen Vorkommens wird jedoch im Text darauf eingegangen. Die Diagrammdarstellung erfolgte mit der Software C2 (JUGGINS 2007). Die diatomeenanalytische Aufbereitung und Artbestimmung richteten sich im Wesentlichen nach KRAMMER & LANGE-BERTALOT (1986-1991) und LANGE-BERTALOT & METZELTIN (1996). In der Gattungs- und Artennomenklatur folgten wir vorwiegend CANTONATI et al. (2017).

3.3 Mollusken

Für die Analyse der Mollusken (überwiegend Gastropoden) erfolgte im Gelände eine schichtbezogene Entnahme von 6 bis 8 l Sediment. Die Mollusken wurden durch die bei LOŽEK (1964) beschriebenen Methoden mit Schlämmen, Sieben (0,5 mm Maschenweite) und Auslesen der Sedimentproben gewonnen. Bei sehr individuenreichen Proben kam nur ein Teil des Probenmaterials zur Auszählung und mit Hilfe eines aus der Größe der berücksichtigten Probenmenge ermittelten Faktors wurde auf die Gesamtindividuenzahl geschlossen.

4 Ergebnisse

4.1 Sedimentanalysen

Sedimentologisch wurde der Kliffabschnitt Meschendorf auf einer Länge von 500 m untersucht. Markant treten durch den Küstenrückgang zwei Beckenanschnitte mit weißen bis dunkelgrauen kalkreichen Sedimenten hervor, die in ca. 230 m Entfernung voneinander im Kliffaufschluss liegen (Abb. 1, 2). Für beide Anschnitte wurde jeweils ein Referenzprofil bearbeitet (Abb. 2 und 3), für den südwestlichen, ca. 70 m breiten Anschnitt das Profil Me-1 und für den nordöstlichen Anschnitt das Profil Me-2. In einer Kartierung Mitte der 1990er Jahre wurde ein dritter Beckenanschnitt zwischen den beiden heutigen beschrieben, der mittlerweile nicht mehr existiert (vgl. SCHULZ 1996). Die beiden heute noch bestehenden Anschnitte haben durch Rückverlegung seitdem deutlich an Breite verloren (10 m bzw. 30 m).

Die karbonatreichen, hellgrauen bis weißen Sedimente wurden von JAECKEL (1948) als Quellkalk interpretiert (vgl. auch Langer 1954, ZIMMERMANN 1929). Dem widersprach SCHULZ (1988) und begründete mit dem Fehlen von überkrusteten Pflanzenresten das Anstehen einer "echten Seekreide". Auch ROGGE (1958) beschreibt eine Seekreide im Bereich Meschendorf. Nach der Klassifikation von Suc-COW & JOOSTEN (2001) für Moorstandorte wäre zusätzlich eine Ansprache als Quellkalk möglich. Nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) enthält Seekreide über 90 und Kalkmudde zwischen 30 und 90 Masse-% CaCO3. Weiterhin gilt, beträgt der Anteil der Organik mehr als 5 % ist es Kalkmudde, ist der Organikanteil kleiner als 5 % handelt es sich um Seekreide oder Seekalk. Die Meschendorfer karbonatreichen Sedimente weisen in der Regel mehr als 5 % Organik und zumeist unter 90 % CaCO₂ auf. Daher erfolgt die Ansprache der Karbonatablagerungen im Meschendorfer Kliff entsprechend der KA 5 hauptsächlich als Kalkmudde und nur in Abschnitten als Seekreide.

4.1.1 Das südwestliche Profil Me-1

Im zentralen Teil des südwestlichen Beckenanschnittes befindet sich das Referenzprofil Me-1 (Abb. 3, 4). Die Beprobung erfolgte durchgehend entlang der Messlatte. Das Kliff hat in diesem Bereich (Abb. 2, 4) eine durchschnittliche Höhe von 5,50 m (Kliffoberkante 6,13 m NHN). Die Basis der aufgeschlossenen Sedimente bildet ein bis 3,25 m über NHN anstehender, grauer bis blaugrauer qW2-Geschiebemergel [Sedimentationsabschnitt (SA) 1, bis 288 cm unter GOK]. Darüber lagern graue Beckensande mit schwacher Kalkführung (SA 2 und 3, 288–257 cm). Sie weisen zum Hangenden einen leichten Anstieg der Schlufffraktion auf. Den Beckensanden aufgelagert ist eine bis 12 cm mächtige Torf- Sand-Wechselfolge mit bis zu drei Torfbändern (SA 4, 257–243 cm), die Glühverlustwerte von 30 bis 60 % aufweisen. Das untere der beiden Sandbänder besteht aus



Abb. 4:Aufbau, sedimentologische Parameter und stratigraphische Zuordnungen in den Profilen Me-1 und Me-2.Fig. 4:Composition, sedimentological parameters, and stratigraphic relations of the profiles Me-1 and Me-2.

geschichteten Mittelsanden. Im Bereich der östlichen Profilwand wird das obere Sandband mit scharfer Grenze von einer 7 cm mächtigen weichselspätglazialen Kalkmudde mit durchschnittlich 14 % Organik und 67 % CaCO₃ abgelöst, die zusätzlich analysiert wurde (roter Pfeil in Abb. 4). Mit einem scharfen Sedimentwechsel, der pollenanalytisch als Hiatus erkennbar ist, schließt sich im Hangenden der Sand-Torf-Wechselfolge eine ca. 70 cm mächtige, weiße bis graue Kalkmudde-Seekreide-Wechselfolge (SA 5-8, 243-170 cm) an. Sie weist Organikanteile von rund 5 % und Kalkgehalte von etwa 60 bis z. T. > 90 % auf. In den untersten etwa 10 cm dieser Kalkmudde befindet sich ein nur zwei Zentimeter mächtiges, graues Band mit leicht auf etwa 63 % zurückgehendem Kalkgehalt, dessen Graufärbung auf den feinklastischen Anteil (nach Korngrößenanalyse Ton und vor allem Schluff; Abb. 4) zurückzuführen ist. Eine ähnliche Situation findet sich in einer rund 30 cm mächtigen Schicht im Sedimentationsabschnitt 6 und 7 (222-183 cm) wieder. Bei Glühverlustwerten um 5 % und Kalkgehalten von zumeist 90 % ist deren Graufärbung vermutlich auf einen erhöhten feinklastischen Eintrag zurückzuführen.

Die Oberkante des SA 8 (Abb. 4) ist stark minerogen durchsetzt. Auf die Kalkmudden folgt nach einem auch pollenanalytisch zu belegenden Hiatus das diskordante Aufwachsen eines Torfes (SA 9, 170 bis 158 cm). Dieser ist stark sandig, kalkfrei und verzeichnet Glühverlustwerte von zumeist über 40 %. Aufgrund seiner starken Zersetzung kann keine weitere Klassifizierung des Torfes vorgenommen werden. Oberhalb des Torfes folgt eine weitere geringmächtige Kalkmudde (SA 10, 158-145 cm) mit Kalkgehalten von 50 bis 70 % und rund 20 % Organikanteil. Im Hangenden dieser Kalkmudde schließt sich ein rund 20 cm mächtiges und kalkführendes Anmoor an (SA 11, 145-124 cm). Dieses zeigt ähnlich hohe Glühverlustwerte wie die Kalkmudde zuvor und zeichnet sich durch einen deutlichen Rückgang der Kalkgehalte auf ca. 10 % aus. Innerhalb des Anmoors finden sich vereinzelt kleine Holzkohlepartikel. Überdeckt wird das Anmoor durch eine kalkfreie, ca. 9 cm mächtige Flugsandlage (SA 12-14, 124-115 cm). Diese enthält bei 121 cm (SA 13) ein knapp 1 cm mächtiges humoses Band, in dem der Organikanteil auf über 4 % ansteigt. Im Hangenden dieser Flugsandlage befindet sich schlecht sortierter, grobsandiger Mittelsand (SA 15, 115-60 cm) mit Glühverlustwerten von 3 bis 7 % und Kalkgehalten bis 10 %. Diese Schicht wird durch eine Flugsandlage (SA 16, 60-46 cm unter GOK) abgelöst. Deutliche Eisenausfällungen (Vergleyung, Go-Horizont) innerhalb des Flugsandes treten in Erscheinung. Den Abschluss des Profils (SA 17, 46-0 cm) bildet eine Auflage karbonatfreien grobsandigen Mittelsandes mit bis zu 7 % Organikanteil, der sowohl Dünensandzufuhr vom angrenzenden Strand als auch ein kolluviales Ablagerungsmilieu belegt. Eine signifikante Molluskenführung weisen die Sedimentationsabschnitte 5 bis 15 (243-60 cm) auf. In den jüngsten Sedimenten oberhalb 60 cm waren keine Mollusken nachweisbar.

4.1.2 Das nordöstliche Profil Me-2

Die Kliffhöhe im Bereich des nordöstlichen Profils ist mit über fünf Metern vergleichbar mit der von Me-1 (Abb. 2, 4). Die Basis der aufgeschlossenen Sedimente bildet auch hier bis ca. 2,62 m NHN anstehender grauer qW2-Geschiebemergel. Im Unterschied zu Me-1 lagert diesem unmittelbar eine schwächer konsolidierte Schicht, bestehend aus tonigem Sand auf (SA 2, 360-350 cm). Mit diffusem Übergang - im Unterschied zu Me-1 ohne basalen Torf - folgt darüber eine weiße bis hellgraue Kalkmudde mit ca. 80 cm Mächtigkeit (SA 3-7, 350-269 cm). Deren Kalkgehalte schwanken zwischen 50 und 90 %, gehen im jüngeren Teil jedoch auch bis ca. 30 % zurück. Die Organik-Gehalte liegen um 5 %. Auch in dieser Kalkmudde ist in den untersten zehn Zentimetern ein ca. 2 cm mächtiges, graues Band ausgebildet (SA 4, 344-342 cm). Es ist an dieser Stelle jedoch sehr viel deutlicher entwickelt und weist einen niedrigeren Kalkgehalt als in Me-1 auf (ca. 9 %). Bei 339-290 cm unter GOK tritt eine graue Kalkmudde auf, die auffällig erhöhte feinklastische Anteile aufweist. Die Kalkmudde-Schicht wird mit einer ca. 30 cm mächtigen, stark verfestigten Schicht intensiver Eisenausfällungen abgeschlossen (limonitische Kalkmudde, SA 8, 269-240 cm). Im Hangenden folgt ein bröckeliger Torf mit Kalkgehalten von 10-40 % und Organikanteilen um 30 % (SA 9, 240-225 cm), der nicht altersgleich mit dem Torf in Me-1 ist. Den sedimentologischen Abschluss des Profils bildet eine über 220 cm mächtige Flugsanddecke. Im unteren Viertel (SA 12, 192-185 cm) wird dieser äolische Sedimentationskomplex durch einen 7 cm mächtigen, braunen Anmoor-Horizont unterbrochen (Glühverlust >20 %). Zudem sind in den äolischen Sanden mehrere dünne humose Bänder [fA(i)h-Horizonte] entwickelt, die eine Mehrphasigkeit im Sedimentationsgeschehen belegen.

4.2 Landseitige Erstreckung und Verbindung der Becken

Die binnenseitige Dimension der im Kliff angeschnittenen Becken lässt sich über das landseitige Ausstreichen der karbonatischen Beckensedimente über Bohrungen ableiten (Abb. 5). Anhand von Peilstangenbohrungen konnte für den nordöstlichen Beckenbereich (Profil Me-2) ein Ausstreichen der karbonatischen Sedimentation nach ca. 140 m landeinwärts ermittelt werden. Der südwestliche Beckenbereich dagegen streicht bereits nach 65 m aus (Profil Me-1). Generell dürfte das Vorkommen der Beckensedimente in etwa mit der Verbreitung der heutigen Feuchtwiesen übereinstimmen (vgl. Abb. 1). Ihre Entwässerung erfolgte in gegenwartsnaher Zeit durch Gräben und bis an die Kliffkante heranreichende Drainagen.

In Me-2 streichen, in Bezug zur Höhenlage, die Anmoor-Torfe (SA 9, 240–225 cm) im Hangenden der Kalkmudden eher aus als die Kalkmudde (SA 3–8, 350-240 cm) selbst.



Abb. 5: Vereinfachte Schnitte der Profile Me-1 und Me-2; Lage der Schnitte siehe Abb. 1. Fig. 5: Simplified sections of the profiles Me-1 and Me-2. For locations see Fig. 1.

An der binnenwärtigen Basis der Kalkmudden lagerten sich hier, anders als im Kliffaufschluss erkennbar, limnische, stark humose Mittelsande ab, die im Vergleich zu Me-1 einer ufernäheren Position entsprechen (Abb. 5).

4.3 Radiokohlenstoff-Datierungen

Am Profil Me-1 wurden drei Radiokohlenstoffanalysen im ¹⁴C-Labor der Universität Erlangen durchgeführt (Tab. 1), die nach REIMER et al. (2004) kalibriert wurden. Die unterste Probe (Erl-14739) weist im Vergleich zu pollenanalytischen Daten (PZ IVa) ein deutlich zu junges Alter auf, was in einer sekundären Durchwurzelung begründet sein könnte. Die beiden anderen unterstützen die Pollendatierungen.

4.4 Pollenanalysen

Für den holozänen Teil des Profils Meschendorf Me-1 (Abb. 6) wurden die Proben entlang derselben Profillinie entnommen wie auch die Sedimente für die Sedimentund Molluskenanalyse. Der Weichsel-Spätglazialanteil stammt jedoch aus einer Parallelbeprobung 60 cm östlich (auf Höhe des Pfeils, Abb. 4) des auf entlang der Messlatte verlaufenden Hauptprofiles (Me-1, Abb. 3), wo anstelle des für das Hauptprofil charakteristischen gröberen Sandbandes in 254 bis 247 cm Tiefe ein Kalkmuddeband ansteht. Dessen Mituntersuchung könnte zur Lösung der in der Literatur diskutierten Genese der Meschendorfer Kalkmudde (s. Kap. 4 und 5) beitragen. Die es begrenzenden Torflagen sind in der Weichsel-Spätglazialfolge nachweisbar und weisen das gleiche Pollenbild auf. Hauptaufgabe der

Bàume Stri	räucher 7	terres	trische Kräut	er		
Sological Sologi	ALT S. CHARLES C. CHAR	*n.e [*] , og eester tenter, n.	View n Steffna	A LI	Cunucon to the start of the sta	¹ eques of tot
	Secale of the first				Shinder	
						X
						Xb2
						Xb1
						Xa
			<u>}</u>			IXc IXb IXb
						NII
						PAI IIA+IA
	n 	•		- 196 - 196		NCC IVD IVD Mei2 Mei2
270 270 280 280 25 50 75 0 25 50 75 0 25 50 05 100 1530 0 5 100 1530 0 25 50 3 6 0	6 12 0 10 20 0 3 6 0 2	4 0 3 60 2 3 0 1				60 0 25 50
Abb. 6:				A	nalysen W. Jank	; (2010)
Ausgewählte pollenanalytische Parameter aus dem Pollendiagramm Me-1.						
Die Sträucher-, NBP- und Sporenwerte sind auf 100 BP bezogen. Die linke Spalte	Labor-ID	BP	δ ¹³ C	Material	Tiefe [cm]	Kalibriertes Alter, 20
enmau ausgewanne Seameniparameter.	Erl-14737	1324±42	-13,0	Schale von Capala hortensis	145-158	644-775 AD
Fig. 6: Selected valvnological varameters from	Erl-14738	2806±39	-30,2	Torf	168-169	1052-841 BC
pollen diagram Me-1. Shrubs, non arboreal pollen	Erl-14739	8795±36	-29,2	Torf	244-245	7986-7718 BC
ana spores are calculated for 100 arooral pollen. The left column shows important sedimentary indicators.	Tab. I: Rac Tab. I: Rac	liokarbon-D liocarbon da	aten aus ttings fro	dem Profil Me-I. m the Me-I profile.		

Pollenanalyse war es, durch die Untergliederung in Pollenzonen eine relative Altersansprache des Profils vorzunehmen. Deren Abgrenzung ist jedoch aufgrund mehrerer Hiatus und der Pollenarmut einiger Schichten mit Unsicherheiten verbunden.

Die basalen Beckensande (300–268 cm) des ausklingenden Weichsel-Pleniglazials im hier beispielhaft dargestellten Profil Me-1 sind pollenanalytisch nicht auswertbar, da fast nur umgelagerte Pollen und Sporen auftreten. Unter den umgelagerten Baumpollen dominiert der *Pinus sylvestris*-Typ. Nur im Profil Me-1 sind Weichsel-spätglaziale Sedimente erhalten geblieben, im Profil Me-2 fehlt das Weichsel-Spätglazial komplett; es beginnt mit der Seekreide der präborealen PZ IVb.

Das Weichsel-Spätglazial setzt im Profil Me-1 mit dem Meiendorf-Interstadial (PZ Mei 1 und 2: 268-254 cm) als erste spätglaziale Vegetations- und Bodenbildungsphase ein. Es weist - im Vergleich zu den nachfolgenden Vegetationsabfolgen des Weichsel-Spätglazials und Frühholozäns - einen besonders hohen NBP- und Sträucher-Anteil auf und wird durch das Salix-Hippophaë-Maximum des Profils gekennzeichnet (Abb. 6). Unter den Gehölzen dominiert Pinus vor Betula. Juniperus ist stets mitvertreten und erreicht die höchsten Werte im Diagramm. Im Verlaufe des Meiendorf 2 geht als Folge zunehmender Vernässung und Vermoorung der Hippophaë-Anteil zugunsten von Salix schnell zurück. Parallel dazu nimmt der Equisetum-Anteil zu, Porifera (Gemmulae und seltener Schwammkörper) sind ständig und Grünalgen vereinzelt mitvertreten, wodurch auf die - zumindest zeitweilige - Existenz eines Kleingewässers geschlossen werden kann. Der zu Beginn des Meiendorf 1 noch sehr hohe Anteil umgelagerten Pollens wärmeliebender Gehölze geht im oberen Drittel stark zurück. Auffällig sind auch die für das frühe Weichsel-Spätglazial schon recht hohen P-Werte.

Die PZ I sensu FIRBAS (1949) - einschließlich dem Betuladominierten Bølling-Interstadial - fehlt. Auf einen Hiatus folgt von 254 bis 246 cm die erste, 8 cm mächtige Kalkmudde-Sedimentationsphase, die dem Allerød (PZ II) zugeordnet wird. Die Summenkurve der Hauptkomponenten zeigt einen sehr hohen BP- bei nur noch niedrigem Sträucher-Anteil und einem NBP-Rückgang. Für das Meiendorf auffallend ist dessen mit bis zu über 50 % hoher Pinus-Anteil. Dabei steht auch hier die Frage nach dem heimischen Vorkommen von Pinus, wenn man berücksichtigt, dass diese Baumart auf Sandstandorten - nachgewiesen als Baumstubben - während des Allerøds weit verbreitet im heute küstennahen Raum vorkam [Bansin (HALLIK & LUDWIG 1959), Ueckermünder Heide (BRAMER 1975, BÖR-NER et al. 2011), Lubminer Heide (JANKE 2002), Altdarß (KAISER et al. 2006), Rostocker Heide (LUDWIG 1964)]. So kann ein Vorkommen von Pinus im Meiendorf an der Lokalität Meschendorf nicht ausgeschlossen werden. Hippophaë und Salix sind nur noch untergeordnet vertreten und JUNIPERUS fehlt. Offenlandzeiger wie Empetrum

und Pollen vom Betula nana-Typ, beides kalkmeidende Spezies, sowie Artemisia kommen nur noch vereinzelt vor. Betula nana konnte pollenanalytisch nur zwischen 256 und 235 cm Tiefe mit Schwerpunkt in den beiden Torfbändern des Meiendorf und von Präboreal (IVa) nachgewiesen werden, wobei ihr Anteil maximal nur 0.5 bis 1 % der Grundsumme erreicht. Für eine stärkere Mitbeteiligung dürfte der pH-Wert der anstehenden Sedimente zu hoch gewesen sein. Es ist nicht auszuschließen, dass es sich bei beim jüngeren Meiendorf (PZ Mei 2) auch schon um den Übergang zur Älteren Dryas handelt. Umgelagerter Pollen wärmeliebender Gehölze tritt letztmalig mit auf. Erhöhte Equisetum-Werte unterstreichen das Bestehen eines ufernahen Flachgewässers. Des Weiteren auffallend sind die äußerst niedrigen P-Werte der Kalkmudde bei fast völligem Fehlen höherer Wasserpflanzen und ein erstes Maximum der Mikrokörper (Abb. 7).

Die Jüngere Dryas als letztes Kryomer des Weichsel-Spätglazials fehlt. Diskordant folgt das viergeteilte Präboreal (PZ IVa bis IVd: 246-223 cm). Es beginnt im Profil Me-1 mit der Betula-dominierten und an Salix-reichen Friesland-Wärmeschwankung (PZ IVa), für die des Weiteren ein sehr hoher BP- (Betula und zunehmend Pinus) und niedriger NBP-Anteil sowie schnell zunehmende P-Werte charakteristisch sind. Es ist eine Vernässungsphase mit Torfwachstum. An der Grenze der PZ IVa/IVb erfolgt - in etwa zeitgleich mit der erneuten Ablagerung von Kalkmudde - eine schnelle klimatisch bedingte Zunahme von Pinus. Es erfolgt ein Umschlag von einem Betula- zu einem Pinus-dominiertem Wald mit nur untergeordnetem Betula-Anteil, der bis zur hiesigen Präboreal-Obergrenze erhalten bleibt. Auch Salix ist ab jetzt nur noch gering vertreten und die BP+Str.-Kurve weist zeitweise ihre höchsten Werte im gesamten Pollendiagramm auf, während die NBP-Werte niedrig ausfallen. Corylus kommt nur sporadisch vor. Die Pollendichte nimmt merklich zu; zum Teil wohl auch als Folge der hohen Dominanz des wieder heimisch gewordenen starken Pollenproduzenten Pinus. Deutlich auffallend während der Subzonen IVb bis IVd ist das massenhafte Vorkommen der Tetraden bildenden Grünalge Radiococcus nimbatus. Des Weiteren treten in der präborealen Kalkmudde vereinzelt die Grünalge Pediastrum integrum sowie Schwammnadeln auf. Der Anteil von Mikrokörpern ist gegenüber jenem der Kalkmudden des Allerøds und des nachfolgenden Mittelholozäns vergleichbar gering.

Die PZ IVc (233–228 cm) fällt dabei sowohl durch eine zwischenzeitliche leichte *Betula*-Zunahme auf Kosten von *Pinus* sowie auch einen BP-Rückgang und NBP-Anstieg auf. Ab der PZ IVc kommen in allen Kalkmudden regelmäßig Laubmoose vor mit besonders hohen Werten in den PZ IVc/ IVd sowie VI bis VIII. Das jüngste Präboreal (PZ IVd), von dem lediglich die Anfangsphase erhalten ist, kennzeichnen eine Zunahme von *Corylus* und in der zweiten Hälfte ein schneller Rückgang von *Pinus* zugunsten von *Betula* und in geringerem Maße von *Ulmus* und *Quercus*.



- Abb. 7: Ausgewählte Begleitelemente in Pollen- und Diatomeenproben von Meschendorf-01. Die Objekte 1-5 stellen Gemmulae und zusammengewachsene Schwammkörper von Süßwasserschwämmen aus 217 cm unter Flur nach pollenanalytischer Aufbereitung dar. Bei der großen kreisförmigen Struktur auf Objekt 1 handelt es sich um einen Keimporus, bei den kleinen rundlichen Körpern um kuglige Kragengeißelkammern, rechts unten ist eine äußere Schwammknospe angepfropft. Auf Objekt 2 sind 30 bis 40 µm große Sporen und Pollen aufgelagert und an dessen Unterrand befinden sich zwei äußere Knospen. Objekt 6 zeigt zwei glatte Schwammnadeln von 250 bzw. 220 µm Länge aus 221 cm Tiefe. Objekt 7 bilden Grünalgen vom Radiococcus nimbatus-Typ aus 233 cm unter Flur. Die Einzelzellen sind im Durchschnitt 10 µm, die Tetraden 30 µm groß.
- Fig. 7: Selected accompanying elements in pollen and diatom samples from Meschendorf-01. Objects 1-5 represent gemmules and coalesced sponge bodies of freshwater sponges from 217 cm below floor level after pollen analytical processing. The large circular structure on object 1 is a germ pore, the small roundish bodies are globular collar flagellar chambers, an outer sponge bud is grafted on the lower right. Object 2 has 30 to 40 μm spores and pollen on it and two outer buds on its lower edge. Object 6 shows two smooth sponge needles of 250 and 220 μm length from 221 cm depth. Object 7 forms green algae of the Radiococcus nimbatus type from 233 cm below floor level. The single cells are on average 10 μm, the tetrads 30 μm in size.

Dem Präboreal folgt in beiden Meschendorf-Profilen das Atlantikum (PZ VI und VII, 223–200 cm). Das Boreal (PZ V), in der Regel gekennzeichnet durch einen kräftigen Erstanstieg der *Corylus*-Kurve, fehlt ebenso wie wohl auch das beginnende Ältere Atlantikum (PZ VI), das durch ein Ansteigen der Kurven der Eichenmischwald (EMW)-Vertreter bei hohem *Ulmus*-Anteil, hohe *Corylus*-Werte und eine immer noch hohe, im Verlaufe der Entwicklung rückläufige *Pinus*-Kurve geprägt sein sollte.

In den Pollenzonen VI+VII fallen zwei Phänomene auf. Zum einen ist es der stufenartige Abfall des Ulmus-Quotienten, der sich in fünf Stufen zum Jüngeren vermindert. Dabei fehlt eventuell dessen ältester Teil als Bestandteil des in 223 cm Tiefe auftretenden boreal-frühatlantischen Hiatus. Zum anderen fällt zwischen 223-215 cm der starke BP-Rückgang zugunsten von Sträuchern (Corylus und Salix) sowie NBP (Poaceae, Aster-Typ) und Polypodiales auf. Ursache für diesen auffallenden Vegetationswandel im Älteren Atlantikum könnte eine auf den jüngsten Ausbruch des Agassiz-Sees in den Nordatlantik vor 8400 Jahren erfolgte Abkühlungsphase gewesen sein, die in Europa mit der Misox-Schwankung in den Schweizer Alpen und dem Finse-Ereignis in Norwegen, jeweils um 8200 BP, angesetzt werden (NESJE et al. 2001). Auch das Bond-Ereignis 5 (Nordatlantik) fällt in diese Zeit (BOND et al. 1997). Die Abkühlungsphase fand kurz vor Erreichen der Küsten der südlichen Ostsee durch die Littorina-Transgression statt und ist auch im Pollendiagramm Kleiner Jasmunder Bodden (KJB3, in LAMPE et al. 2010b) deutlich ausgeprägt.

Der Beginn des Atlantikums wird mit Einsetzen der geschlossenen Alnus- und Tilia-Kurven angesetzt (SCHOKNECHT in KAISER et al. 2002). Speziell das Diagramm Me-1 weist jedoch sehr hohe Betula-Werte bei nur langsam zunehmenden EMW-Vertretern und äußerst hohem NBP-Anteil auf, was für einen Betula-Bruchwald sprechen könnte. Im Profil Me-2 sind diese "Ausreißer" weitaus schwächer ausgeprägt. Parallel zur hohen NBP-Beteiligung fallen im Atlantikum die durchgehend niedrigen, bis unter 40 % abfallenden und für das gesamte Profil einmalig niedrigen Pinus ganze-Werte auf. Die hohen NBP-Werte resultieren vor allem aus einem Anstieg der Kurven von Poaceae und des Aster-Typs. In etwa zeitgleich mit dem jüngsten Betula-Peak erfolgt ein Anstieg der Alnus-, Salix-, Polypodiales- und Equisetum-Kurven. Die P-Werte sind extrem niedrig.

Eine weitere Besonderheit im Floren- und Sporenbild, speziell des Atlantikums und des Subboreals (200–170,5 cm) bildet mit steilem Kurvenanstieg an der Atlantikum-Untergrenze der hohe Anteil von Mikrokörpern, deren Kurve anfangs noch von der rückläufigen *Radiococcus*-Kurve begleitet wird und deren Konservierung in der Kalkmudde erfolgte. Unter ihnen dominieren Fungi-Fruchtkörper und in Zersetzung befindliche Holzreste. Gewässerindikatoren wie *Pediastrum*, Porifera-Gemmulae und Cladocera fehlen jedoch durchgehend. Schwammnadeln sind – wohl auch aufgrund des hohen pH-Wertes des Sediments – nur vereinzelt mitvertreten. Auffallend ist der hohe Anteil von Sporen des Laubmoos-Typs, der für einen feuchten bis nassen Standort spricht.

Im Subboreal bestand auf der umgebenden Hochfläche ein an EMW-Vertretern reicher Kiefernmischwald mit sehr hohem Tilia-Anteil und stetiger Abnahme von Corylus. Quercus ist untervertreten und Fagus zeigt noch keinen geschlossenen Kurvenverlauf. Im Feucht- und Nassbereich erfolgte eine starke Alnus-Zunahme. Dieser Zeitabschnitt weist das zweite BP+Str-Maximum des Diagramms bei erneut sehr hohen Pinus ganze-Werten und gleichzeitig niedrigen NBP-Werten auf. Weitere Besonderheiten sind ein merklicher Betula-Rückgang sowie ein Rückgang des Ulmus-Quotienten im Vergleich zum Atlantikum. Die Polypodiales-Werte bleiben ebenfalls weiterhin hoch, ebenso die Massenentwicklung erwähnter Mikrokörper. Außer sporadisch Artemisia - diese Gattung kommt auf natürlichen und anthropogenen Offenstandorten vor - treten noch keine Nutzungszeiger (Ruderalpflanzen und Kräuter) auf, Getreide (Cerealia ohne Secale) ist noch nicht nachweisbar. Die P-Werte fallen letztmals sehr niedrig aus. Der jüngste Teil der PZ VIII, aber auch der unterste Teil der PZ IX (Älteres Subatlantikum) fehlen. Nicht ausgebildet ist auch ein Corylus-reicherer und oft Besiedlungsindikatoren aufweisender Abschnitt im ausklingenden Subboreal.

Wohl gegen Ende des Subboreals setzte im Profil Me-1 mit scharfer Obergrenze die Kalkmuddesedimentation aus. Die auf einen weiteren, den vierten Hiatus folgende Vermoorungsphase erfolgte aus pollenanalytischer Sicht ableitend aus dem Steilanstieg einiger Pollenkurven wohl erst im Verlaufe des Älteren Subatlantikums.

Im Profil Me-2 besteht sowohl in den Pollensubzonen IVb und IVd als auch durchgehend vom Atlantikum bis zum Übergang vom Subboreal in das Ältere Subatlantikum ausschließlich Kalkmudde-Sedimentation. Mit Beginn der PZ IX setzen der Flugsandeintrag und die starke Anreicherung von Eisenoxiden (Verockerung) ein; dieser Abschnitt ist pollenanalytisch quantitativ nicht auszählbar. Es besteht bis einschließlich der PZ Xa noch starke Kalkfällung.

Palynologisch ist in Me-1 wohl nur ein Teil (170,5–158 cm) des Älteren Subatlantikums (PZ IXa) erhalten, der weder der La Tène-Zeit noch der Römischen Kaiserzeit sicher zuordenbar ist. Im Baumpollenbild ist von einem *Quercus-Pinus*-Wald der Hochflächen auszugehen, wobei der *Betula*-Anteil stark abnimmt und unter den EMW-Vertretern *Tilia* und *Ulmus* deutlich in den Hintergrund treten. *Fagus* zeigt noch keinen geschlossenen Kurvenverlauf. In den Beckenrandlagen beider Profile dominiert *Alnus* bei ab jetzt in Richtung Gegenwart zunehmendem *Salix*-Anteil. Signifikant für das Ältere Subatlantikum (PZ IX) sind des Weiteren die Abnahme des BP-Anteils bei gleichzeitiger NBP-Zunahme sowie erstmals das Auftreten von Nutzungsanzeigern wie *Plantago lanceolata* und Pollen des
Triticum-Typs. Auffallend sind ein nahezu vollständiger Rückgang von *Equisetum* sowie die gleichzeitige starke Zunahme der P-Werte. Im frühen Subatlantikum (PZ Xa) von Me-2 (275–269 cm) erreicht *Alnus* sogar 40 % der Grundsumme und die Nutzungsindikatoren *Plantago lanceolata* und *Triticum*-Typ sind ebenfalls nachweisbar.

Das Ältere Subatlantikum mit der Völkerwanderungszeit (PZ IXb, ca. 158-152 cm) umfasst das dritte und oberste BP+Str.-Maximum. Die Waldzusammensetzung ähnelt weiterhin jener des Älteren Subatlantikums der PZ IXa. Dabei erreicht Alnus nach Diagrammlage ihre höchsten Werte. Der NBP-Anteil ist ausgesprochen niedrig. Ackernutzung und Waldweide lassen sich über entsprechende Indikatoren nicht nachweisen. In der folgenden Slawenzeit (PZ IXc) tritt - analog wie in der Kelten- bzw. Römischen Kaiserzeit - erneut kleinräumige agrarische Nutzung auf, und das Baumpollenspektrum zeigt merkliche Änderungen. Der Fagus-Anstieg setzt erst mit Beginn der PZ IXc und im Vergleich mit anderen Pollenprofilen (z. B. SCHO-KNECHT 1996; ENDTMANN 2004) äußerst spät ein und fällt sehr niedrig aus. Parallel zum Fagus-Anstieg nehmen Alnus und Pinus ab. In der gesamten PZ IX treten die für das Atlantikum und Subboreal als dominant beschriebenen Mikrokörper weiterhin nur noch untergeordnet mit auf, hingegen ist die Pollenakkumulation durchgehend sehr hoch.

Das Jüngere Subatlantikum mit vier Subzonen (PZ Xa, Xb1, Xb2, Xc) umfasst den Zeitraum von der Deutschen Ostkolonisation bis zur Gegenwart. An der Untergrenze von Xa erfolgt - in etwa zeitgleich mit einer starken Zunahme der Flugsandtätigkeit – eine der schärfsten Änderungen im Vegetationsbild von Me-1 und Me-2. Sie äußert sich im Pollenbild unter anderem durch einen steilen BP-Rückgang und durch eine ebenso starke Zunahme des NBP-Anteils einschließlich der Getreide- und Unkrautarten. Es entstehen großflächig waldfreie Habitate. Im gesamten Jüngeren Subatlantikum (PZ Xa und b) bestand extensive Landwirtschaft mit einem sehr hohen Anteil entsprechender direkter und indirekter Zeigerarten (Centaurea cyanus, Plantago lanceolata als Tritt- und Weidezeiger, Polygonum aviculare und Rumex acetosella-Typ). Im Baumpollenspektrum-Spektrum erfolgt eine Abnahme der waldbildenden Laubgehölze, wobei es zu einer Verschiebung zugunsten von Pinus und vor allem Salix bei Vorherrschaft von Salix caprea, der Salweide, kommt. Diese Art mit auffallend kleinem Pollen (im Mittel $< 20 \,\mu$ m) besiedelt frische Ödländer, Kliffränder, Flugsand- und Dünenareale; sie ist auch in der Gegenwart an der Kliffoberkante der Meschendorfer Steilküste dominant. Des Weiteren sind während der gesamten PZ Xb Lycopodiella inundata (feuchte Pionierstandorte), Porifera-Gemmulae und -Nadeln und Cladocera stärker vertreten. Die P-Werte nehmen in Richtung Gegenwart mehr oder weniger stetig ab. Im Profil Me-2 ist die PZ Xa (245–235 cm) nur als schmale Übergangszone mit abnehmendem BP-Anteil und einsetzender Getreide-Kurve (Secale- und Triticum-Typ) erhalten, daran schließt die erste Flugsandphase an. Der Ackerbodenhorizont (PZ Xa) folgt

Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 1/2-2021

unmittelbar auf die pollenanalytisch nicht auswertbare flugsand- und eisenoxidreiche Kalkmudde (rostfarben), die wahrscheinlich während des Älteren Subatlantikums (PZ IXa und b) abgelagert wurde. Dieser Horizont besitzt ein ausgeprägtes Klumpengefüge und stand aufgrund des hohen und im Horizontverlauf zunehmenden Minerogenanteils im Substrat ebenfalls unter Flugsandeinfluss.

Eine Besonderheit der PZ Xb1 von Me-1 (120-60 cm) ist bei äußerst hohem NBP-Anteil das verstärkte Vorkommen von Poaceae, Cyperaceae, Sporen vom Laubmoos-Typ (200-600 % der Pollengrundsumme) sowie Salix caprea und oberhalb 115 cm unter GOK zahlreicher Diatomeenarten. In den PZ Xb2 und Xc nimmt der Laubmoosanteil stetig und verschwindet fast vollständig nahe der Oberfläche. Der hohe Cyperaceaen-Anteil lässt auf einen Seggen-Nassstandort schließen. Vereinzelt war Menyanthes trifoliata als See- oder Sumpfindikator nachweisbar. Auch im Pollendiagramm Me-2 (240-225 cm) dominieren Cyperaceae, aber auch fenestrate Asteraceae des Sonchus- und Hieracium-Typs, in einer zwischen Flugsandhorizonten aufgeschlossenen kalkhaltigen Anmoorlage, deren Entstehungzeitraum auf Grund ihres Florenbildes dem Nasshorizont der PZ Xb1 in Me-1 entsprechen dürfte. Nur in Me-2 ausgebildet ist zwischen Flugsanden ein weiterer, jedoch kalkfreier Anmoor-Horizont (192-185 cm unter GOK), der aufgrund ähnlicher Pollenzusammensetzung zeitlich wohl mit der PZ Xb1 im Profil Me-1 gleichzusetzen ist. Es fällt ebenfalls durch seinen hohen NBP-Anteil auf, wobei die Cyperceae bis zu 50 % der Pollensumme ausmachen können; ebenfalls hohe Werte erreichen fenestrate Asteraceae. In PZ Xb2 von Me-1 gehen Poaceae und Cyperaceae innerhalb desimmer noch stark dominierenden NBP-Anteils deutlich zurück, an ihre Stelle tritt zum Teil Pollen aus der Gruppe fenestrater Asteraceae, zu denen vor allem die Gattungen Sonchus und Hieracium gehören könnten. Gemmulae, Schwammnadeln, Mikrokörper und Cladocera sind in PZ Xb2 letztmals stark vertreten. Die PZ Xc entspricht in etwa dem Zeitraum der jüngsten 150 Jahre. Sie ist gekennzeichnet durch einen BP-Anstieg und NBP-Rückgang, das jüngste Pinus-Maximum sowie den Rückgang extensiver Unkräuter. Die Hauptgehölzart wird sowohl vom natürlichen Bewuchs als auch vom Pollentyp von Salix caprea gebildet. Außerdem treten verstärkt Picea, Hippophaë und Juniperus bei weiterhin niedrigen P-Werten mit auf.

4.5 Diatomeenanalysen

Diatomeen sind fast nur in den obersten 115 cm des Profils Me-1 (PZ Xb, Xc) nachweisbar sowie in den humosen Horizonten der PZ Xb von Me-2. Es ist nicht auszuschließen, dass sie einst auch in den Profilabschnitten verbreitet waren, in denen Schwammnadeln erhalten sind, zumal sie auch ein Teil der Nahrung von Schwämmen bilden. Im Tiefenbereich 115–59 cm [Diatomeenzone (DZ) 1, Abb. 4) dominieren epipelische bis epipsammische und epiphytische Arten des Litorals bis Supralitorals, obligatorische Plankter fehlen. Es sind vorwiegend robuste Arten, welche im Jahresverlauf zumindest ein längerzeitig bestehendes Gewässer benötigen. Zu den Hauptarten gehören vor allem Amphora ovalis, Amphora pediculus, Campylodiscus hibernicus, Cymatopleura elliptica und C. solea, Encyonema silesiacum, Diploneis ovalis, Epithemia adnata, Epithemia frickei, Staurosira venter, Staurosirella pinnata, Melosira varians, Placoneis elginensis, Placoneis gastrum, cf. Pinnularia viridis, Rhoicosphenia abbreviata, Rhopalodia gibba, Stauroneis phoenicenteron sowie Surirella bifrons, S. elegans, S. minuta und S. ovalis. Die meisten von ihnen bevorzugen basisches Milieu und vertragen aerophytische Bedingungen (mündl. Mitt. T. Hübener, Universität Rostock). Ein weiterer Teil der Arten tritt auch an Quellstandorten und auf überfluteten Moosrasen auf oder bevorzugt sie sogar, so z. B. Caloneis bacillum, Cymbella aspera, Epithemia argus, Eunotia praerupta, Meridion circulare, Navicula amphibola und Surirella spiralis. Vereinzelt sind auch Arten borealer Hauptverbreitung mit vertreten, u. a. Surirella bifrons.

In den obersten 59 cm des Profils (DZ 2, Abb. 4) kommen in geringer Anzahl ebenfalls Diatomeen vor. Dabei dominieren drei Kieselalgen-Arten mit ca. 65 % Anteil an der Flora: Hantzschia amphioxys (aerophil), Epithemia turgida (Epiphyt) und cf. Pinnularia viridis (epipelisch, wahrscheinlich zeitweiliges Austrocknen vertragend). Insgesamt ist das Artenspektrum jedoch breiter und enthält in geringen Mengenanteilen als Feinschill auch mehrere der für den Tiefenbereich 115-59 cm aufgeführten "See"-Arten. Im Bereich der Grasnarbe stellt das Hantzschia amphioxys-Luftplankton sogar mehr als 50 % der Diatomeen-Individuen. Trotz der bestehenden Ufernähe fehlen Brackwasserarten. Die Diatomeenflora in den beiden Organogen-reicheren Horizonten von Me-2 (240-225 und 192-185 cm, PZ Xb) ist wesentlich artenärmer und schlechter erhalten als in Me-1 und besteht nahezu ausschließlich aus epipelischen und epipsammischen Arten des Litorals; Schwammadeln sind ebenfalls nachweisbar.

4.6 Molluskenanalyse

Aus Mittel- und Nordeuropa liegen zahlreiche Studien zur nacheiszeitlichen Entwicklung der Mollusken-Faunen vor (LOŽEK 1982, KOPCZYŃSKA-LAMPARSKA et al 1984, GEDDA 2001, MEYRICK 2001, MEYRICK & PREECE 2001, SANKO et al. 2008). In Mecklenburg-Vorpommern handelt es sich bei dem Kliffaufschluss von Meschendorf, neben dem Tierbautensystem von Pisede bei Malchin (KROLOPP et al. 1977) sowie der Schichtenfolge vom Niedersee, NE-Rügen (Kossler & Strahl 2011, Menzel-Harloff & Strahl 2012), um eines der bedeutendsten Vorkommen holozäner Mollusken-Faunen. Meschendorf ist nicht nur durch artenreiche Gesellschaften gekennzeichnet, sondern bildet auch ein umfangreiches Archiv, das die lokale Faunen-Sukzession vom Präboreal bis zum beginnenden Jüngeren Subatlantikum beschreiben kann. Es dominieren zudem terrestrische Gastropoden, die für die Rekonstruktion der Landschaftsgeschichte besonders geeignet sind.

Untersucht wurden die holozänen Mollusken von Meschendorf bisher von ZIMMERMANN (1929), JAECKEL (1948) und JUEG (in ZETTLER et al. 2006). Außerdem publizierte JUEG (2012) die umfangreichen Aufsammlungen von Gerhard Krille vom Meschendorfer Kliff aus den 1950er und 1960er Jahren, welche heute im "Natureum" in Ludwigslust aufbewahrt werden.

Die aktuellen Aufsammlungen wurden erstmals horizontbezogen vorgenommen (Molluskenzone = MZ, Abb. 4) und erbrachten insgesamt etwa 70 Arten, mit über 56.000 Individuen (Tab. 2, Abb. 8). In den weichselspätglazialen Sedimenten des untersuchten Profils Me-1 (PZ I und II) konnten bisher keine Mollusken nachgewiesen werden. Dagegen lieferten die hellen Kalkmudden (MZ 1, 246–223 cm) des Präboreals eine relativ arten- und individuenreiche frühholozäne Fauna.

Die präboreale Molluskenfauna von Meschendorf wird von Offenlandbewohnern dominiert. Die meisten dieser Arten bevorzugen feuchtere Habitate, darunter z. B. *Carychium minimum, Vertigo geyeri* (Abb. 8, Fig. 2), *Vertigo genesii* (Abb. 8, Fig. 3), *Vertigo angustior* oder auch *Pupilla pratensis* (Abb. 8, Fig. 4), eine Form, welcher erst kürzlich ein selbstständiger Artstatus zugesprochen wurde (v. PROSCHWITZ et al. 2009) und aktuell zu *Pupilla alpicola* gestellt wird (Haase et al. 2021). Die subarktisch-alpin/ boreal verbreitete *Vertigo genesii*, welche im nördlichen Europa während des Präboreals noch weit verbreitet war, kann als Kaltzeitrelikt gedeutet werden. Zudem gilt auch die boreal/alpin geprägte Windelschnecke *Vertigo geyeri* als eine Charakterart des frühen Holozäns (MANIA 1973, GEDDA 2001, MEYRICK & PREECE 2001).

Süßwassermollusken sind lediglich durch wenige Arten, wie die amphibisch lebende Schnecke *Galba truncatula* oder *Anisus leucostoma* repräsentiert. Neben den zahlreichen mesophilen feuchtigkeitsliebenden Arten sind mit *Vallonia costata* und *Vallonia excentrica* auch Bewohner trockenerer Offenlandhabitate nachgewiesen. Xerotherme Elemente fehlen. Auf Gehölzstandorte im weiteren Umfeld verweisen einige anspruchslose Wald-Arten, wie z. B. die hauptsächlich boreal verbreitete Schnecke *Discus ruderatus* (Tab. 2), *Discus rotundatus, Vertigo pusilla* sowie *Clausilia bidentata*. Das Boreal konnte pollenanalytisch (siehe Kap. 4.4) nicht bestätigt werden und fehlt offenbar im Profil.

Die dunkelgrauen Kalkmudden (MZ 2, 223–200 cm) repräsentieren pollenanalytisch das Atlantikum, das eine Phase maximalen Artenreichtums darstellt (LožEK 1982). Auch im Profil Me-1 konnten entsprechend hohe Diversitäten festgestellt werden. Kennzeichnend für das Atlantikum ist die intensive Waldentwicklung, die sich in Meschendorf mit über 60 % Waldarten und Arten, die häufig in der Wald-Fauna vertreten sind (Tab. 2), u. a. mit Vertigo pusilla, Acanthinula aculeata (Abb. 8, Fig. 6), Merdigera obscura, Discus rotundatus, Vitrea contracta, Cochlodina laminata

Ökologische Gruppen	Mollusca (Gastropoda, Bivalvia)	MZ 1	MZ 2	MZ 3	MZ 4	MZ 5	MZ 6	MZ 7
terrestrisch								
Wald	Vertigo pusilla O.F. Müller 1774	3	17	48	-	26	54	-
	Lauria cylindracea (Da Costa 1778)	-	-	-	1	-	-	-
	Acanthinula aculeata (O. F. Müller 1774)	1	21	163	1	20	32	-
	Spermodea lamellata (JEFFEYS 1830)	-	-	57	-	-	2	-
	Merdigera obscura (O. F. Müller 1774)	-	-	3	1	-	1	-
	Discus rotundatus (O. F. Müller 1774)	6	259	697	23	192	101	-
	Discus ruderatus (A. Férussac 1821)	10	17	18	-	-	19	-
	Vitrea contracta (Westerlund 1871)	-	27	23	-	5	6	-
	Aegopinella pura (Alder 1830)	-	18	102	3	43	25	-
	Cochlodina laminata (Montagu 1803)	-	15	10	-	9	10	-
	Macrogastra ventricosa (Draparnaud 1801)	-	-	1	1	-	2	-
	Macrogastra attenuata lineolata (Held 1836)	-	-	-	-	1	-	-
	Macrogastra plicatula (Draparnaud 1801)	-	1	-	-	-	4	-
	Clausilia bidentata (Sтком 1765)	1	3	3	-	1	10	-
	Clausilia dubia (Draparnaud 1805)	-	1	2	-	-	3	-
	Clausiliidae	1	26	50	15	30	50	-
	Helicigona lapicida (Linnaeus 1758)	-	2	frg.	-	1	2	-
	Monachoides incarnatus (O. F. Müller 1774)	-	7	-	-	1	4	-
überwiegend Wald (oder Schatten), hygrophil	Carychium tridentatum (Risso 1826)	30	450	2100	8	125	63	-
	Vertigo substriata (Jeffreys 1833)	33	5	119	1	7	7	-
	Clausilia pumila (C. Preiffer 1828)	-	21	3	1	19	29	-
	Perforatella bidentata (Gmelin 1788)	-	19	-	1	28	19	-
Wald und Offenland,	Cochlicopa lubrica (O. F. Müller 1774)	55	199	95	-	336	89	-
mesophil bis hygrophil	Columella edentula (Draparnaud 1805)	6	12	45	-	23	5	-
	Columella sp.	1	-	-	-	-	-	-
	Punctum pygmaeum (Draparnaud 1801)	69	31	36	1	15	128	-
	Vitrina pellucida (O. Müller 1774)	3	-	-	-	1	-	-
	Vitrea crystallina (O. F. Müller 1774)	6	128	187	10	82	130	-
	Aegopinella nitidula (Draparnaud 1805)	-	152	38	-	-	-	-
	Oxychilus cellarius (O. F. Müller 1774)	-	36	-	-	5	13	-
	Nesovitrea hammonis (Sтком 1765)	22	130	731	14	94	255	-
	Perpolita petronella (L. PFEIFFER 1853)	12	10	68	-	-	-	-
	Trochulus hispidus (Linnaeus 1758)	frg.	9	-	-	84	5	-
	Fruticicola fruticum (O. F. Müller 1774)	frg.	7	1	-	1	3	-
	Arianta arbustorum (LINNAEUS 1758)	1	5	1	1	1	3	-
Wald und Offenland, mesophil	Vertigo alpestris (ALDER 1838)	-	-	4	-	-	1	-
	Euomphalia strigella (Draparnaud 1801)	-	5	3	-	-	2	-
	Cepaea hortensis (O. F. Müller 1774)	-	7	-	1	2	35	-
	Cepaea nemoralis (LINNAEUS 1758)	-	-	-	-	-	1	-
	Cepaea sp.	-	-	1	-	2	frg.	-
überwiegend Offenland, mesophil bis hygrophil	Succinella oblonga (Draparnaud 1801)	-	9	-	-	18	3	-
	Vallonia pulchella (O. F. Müller 1774)	138	3	-	-	-	3	-

Ökologische Gruppen	Mollusca (Gastropoda, Bivalvia)	MZ 1	MZ 2	MZ 3	MZ 4	MZ 5	MZ 6	MZ 7
Offenland, überwiegend mesophil	Cochlicopa lubricella (Porro 1838)	-	4	41	2	-	3	-
	Vertigo pygmaea (Draparnaud 1801)	-	-	-	-	-	6	-
	Vallonia costata (O. F. Müller 1774)	509	154	311	11	84	1014	-
	Vallonia excentrica Sterki 1893	4	3	-	-	-	2	-
hygrophil (z. B. Sumpf)	Carychium minimum (O. F. Müller 1774)	843	7200	7650	179	9761	2210	-
	Succinea putris (LINNAEUS 1758)	46	-	-	-	-	-	8
	Succineal Oxyloma	frg.	191	5	6	553	52	-
	Cochlicopa nitens (Gallenstein 1848)	6	-	-	-	-	-	-
	Vertigo antivertigo (Draparnaud 1801)	4	101	105	2	72	17	-
	Vertigo moulinsiana (Dupuy 1849)	-	11	8	-	1	-	-
	<i>Vertigo genesii</i> (Gredler 1856)	20	-	-	-	-	-	-
	Vertigo geyeri (Lındholm 1925)	184	-	-	-	-	-	-
	Vertigo angustior (JEFFRYS 1830)	33	17	49	-	-	182	-
	Pupilla pratensis (CLESSIN 1871)	55	-	-	-	-	-	-
	Zonitoides nitidus (O. F. Müller 1774)	22	355	110	3	696	539	-
	Euconulus praticola (Reinhardt 1883)	43	38	112	1	58	14	-
Nicht näher interpretierbar	Limacidae/Agriolimacidae	15	104	10	1	22	-	-
	Schnecken-Eier (ca. 1-1,5 mm)	10	12	5	-	1	6	-
	Schnecken-Eier (ca. 4 mm)	1	-	-	-	-	-	-
Limnisch								
Stillwasser	Valvata cristata (O. F. Müller 1774)	-	-	14	-	-	4	28
	Aplexa hypnorum (Linnaeus 1758)	1	48	68	-	5	3	-
	Galba truncatula (O. F. Müller 1774)	45	363	442	49	1940	343	-
	Stagnicola sp.	-	-	-	-	-	-	135
	Myxas glutinosa (O. F. Müller 1774)	-	1	-	-	-	-	-
	Bathyomphalus contortus (LINNAEUS 1758)	-	-	-	-	-	-	39
	<i>Gyraulus crista</i> (Linnaeus 1758)	-	-	-	-	-	-	2
	Anisus leucostoma (MILLET 1813)	50	3	255	1	-	6	-
Nicht näher interpretiert	Pisidium spp.	4	4156	433	52	4563	822	110
Marin								
	Mytilus sp.	-	frg.	-	-	frg.	-	-
	Littorina littorea (LINNAEUS 1758)	-	-	-	-	1	-	-
	Arten: (mind. 70)	38	49	43	27	41	50	6
	Individuen: (56.919)	2296	14.413	14.227	390	18.928	6343	322

Tab. 2:Mollusken aus der holozänen Kliffserie von Meschendorf (absolute Individuenzahlen, frg.: Fragmente).Die Auszählung erfolgte horizontbezogen mit folgender Unterteilung (siehe auch Abb. 4): MZ 1 = Präboreal,
helle Kalkmudden (246–223 cm); MZ 2 = Atlantikum, dunkelgraue Kalkmudde (223–200 cm);
MZ 3 = Subboreal, hellere Kalkmudde (200–170 cm); MZ 4 = Älteres Subatlantikum, Torf (170–158 cm);

MZ 5 = ausgehendes Älteres Subatlantikum, heller Kalkmuddekeil (158–145 cm);

MZ 6 = Jüngeres Subatlantikum, Kolluvium (145–120 cm); MZ 7 = Jüngeres Subatlantikum, "Kolluvium" im äolischen Sand (120–60 cm).

Tab. 2: Molluscs from the Holocene cliff series of Meschendorf (absolute numbers of individuals, frg.: fragments). The count was carried out horizontally with the following subdivision (see also Fig. 4): MZ 1 = Preboreal, pale calcareous mud (246-223 cm); MZ 2 = Atlantic, dark grey calcareous mud (223-200 cm); MZ 3 = Subboreal, paler calcareous mud (200-170 cm); MZ 4 = Early Subatlantic, peat (170-158 cm); MZ 5 = outgoing Early Subatlantic, pale calcareous mudstone wedge (158-145 cm); MZ 6 = Late Subatlantic, colluvium (145-120 cm); MZ 7 = Early Subatlantic, "colluvium" in aeolian sand (120-60 cm).



Abb. 8: Mollusken des Meschendorfer Kliffabschnitts: 1. Vertigo alpestris (MZ 6: Jüngeres Subatlantikum),
2. Vertigo geyeri (MZ 1: Präboreal), 3. Vertigo genesii (MZ 1: Präboreal), 4. Pupilla pratensis (MZ 1: Präboreal), 5. Spermodea lamellate (sample MZ 3: Subboreal), 6. Acanthinula aculeate (MZ 3: Subboreal), 7. Aplexa hypnorum (MZ 3: Subboreal), 8. Cochlicopa lubrica (MZ 3: Subboreal),
9. Cochlicopa lubricella (MZ 3: Subboreal), 10. Lauria cylindracea, apex (MZ 4: Älteres Subatlantikum), a) seitlich, b) von unten. – Maβstab = 1 mm.

Fig. 8: Molluscs from the Meschendorf cliff section: 1. Vertigo alpestris (MZ 6: Late Subatlantic),
2. Vertigo geyeri (MZ 1: Preboreal), 3. Vertigo genesii (MZ 1:Preboreal), 4. Pupilla pratensis (MZ 1: Preboreal), 5. Spermodea lamellata (MZ 3: Subboreal), 6. Acanthinula aculeate (MZ 3: Subboreal),
7. Aplexa hypnorum (MZ 3: Subboreal), 8. Cochlicopa lubrica (MZ 3: Subboreal), 9. Cochlicopa lubricella (MZ 3: Subboreal), 10. Lauria cylindracea, apex (MZ 4: Early Subatlantic), a. Frontal view, b. View from below. – Scale: 1 mm.

oder *Macrogastra plicatula*, widerspiegelt. Zudem gelten insbesondere die im Profil häufigen Arten *Clausilia pumila* und *Perforatella bidentata* als Bewohner ausgesprochener Feuchtwälder.

Die Faunen nasser Standorte haben während des Atlantikums auch weiterhin hohe Stetigkeiten. Regelrecht massenhaft ist *Carychium minimum* vertreten. Neben weiteren Feuchtigkeitszeigern, wie z. B. *Vertigo antivertigo* und *Vertigo angustior*, wurde auch die klimatisch anspruchsvollere Windelschnecke *Vertigo moulinsiana* nachgewiesen. *Vertigo geyeri* und *Pupilla pratensis* fehlen jetzt im Profil, was auf eine deutliche Veränderung der Habitatstrukturen, z. B. mit höherwüchsiger Sumpfvegetation, wie Röhrichte, sowie größeren Gehölzanteilen hinweist. Trotzdem zeigen beispielsweise *Vallonia costata, Vallonia excentrica* oder *Cochlicopa lubricella* (Abb. 8, Fig. 9), dass im Umfeld auch weiterhin trockenere Habitate vorhanden waren.

Die Süßwasserfauna mit *Aplexa hypnorum* (Abb. 8, Fig. 7) oder *Galba truncatula* wird von Arten temporärer Gewässer dominiert. Sehr häufig sind auch die Kleinmuscheln *Pisidium* spp. vertreten. Erwähnenswert ist auch der Einzelfund der anspruchsvollen Süßwasserschnecke *Myxas glutinosa*.

Die im Hangenden folgenden helleren Kalkmudden (MZ 3, 200–170 cm) entsprechen dem Subboreal. Das Subboreal ist im Vergleich zum Atlantikum zeitweise etwas trockener, was im Profil Meschendorf jedoch nur schwach in Erscheinung tritt. Lediglich sind *Vallonia costata* oder *Cochlicopa lubricella*, Arten mit Präferenzen für trockenere Habitate, etwas häufiger. Hygrophile Elemente und Waldarten treten ebenfalls mit großen Häufigkeiten in Erscheinung. Auffällig ist die starke individuelle Zunahme von beispielsweise *Acanthinula aculeata, Carychium tridentatum, Vertigo substriata* oder *Discus rotundatus*.

Bemerkenswert ist die hohe Abundanz der in ihrer Verbreitung atlantisch geprägten anspruchsvolleren Waldart *Spermodea lamellata* (Abb. 8, Fig. 5), die erstmals (ZIMMER-MANN 1929) im Kliff von Meschendorf nachweisen konnte. Offenbar konzentriert sich ihr Vorkommen in Meschendorf hauptsächlich auf das Subboreal. Die Süßwasserfauna wird jetzt neben *Aplexa hypnorum* und *Galba truncatula* auch durch die Sumpfart *Anisus leucostoma* geprägt.

Die Torfe (MZ 4, 170–158 cm) sind in das Ältere Subatlantikum eingestuft. Auf Grund des fehlenden Kalkes, verbunden mit einem geringeren Erhaltungspotential für Mollusken, liegt hier nur eine relativ arten- und individuenarme Fauna vor. Die Gesamtcharakteristik dieser Phase hat sich aber offenbar im Vergleich zum Subboreal kaum verändert. Erwähnenswert ist der Nachweis der überwiegend atlantisch verbreiteten Schnecke *Lauria cylindracea* (Abb. 8, Fig. 10 a, b).

Die im Profil auskeilende helle Kalkmudde (MZ 5, 158-145 cm) des ausgehenden Älteren Subatlantikums ist dementsprechend wieder sehr arten- und individuenreich entwickelt. Im Vergleich zum Atlantikum und Subboreal, wird diese Fauna jedoch durch deutlich anspruchslosere Elemente dominiert, wie z. B. Discus rotundatus, Cochlicopa lubrica (Abb. 8, Fig. 8) oder Trochulus hispidus. Bemerkenswert ist dagegen der Nachweis der anspruchsvollen Waldart Macrogastra attenuata lineolata, die bisher für Mecklenburg-Vorpommern ausschließlich fossil von Meschendorf bekannt geworden ist (JAECKEL 1948). Heute lebt die Art z. B. im benachbarten Schleswig-Holstein (vergl. ZETTLER et al. 2006). Die hygrophilen Elemente sind vor allem durch Carychium minimum, Succinea/Oxyloma und Vertigo antivertigo vertreten. Die Süßwasserfauna erhält mit dem Massenauftreten von Galba truncatula auch weiterhin den Charakter temporärer Gewässer.

In den folgenden Sedimenten im Hangenden (MZ 6– MZ 7) des Jüngeren Subatlantikums verstärken sich die Anzeichen einer intensivierten Landnutzung durch den Menschen im näheren Umfeld des Ablagerungsraumes. In MZ 6 (145–120 cm) ist die starke individuelle Zunahme von *Vallonia costata* und *Cepaea hortensis* ein deutlicher Hinweis auf die zunehmende Entwicklung offener und nur mäßig feuchter Habitate.

Im Gegensatz zu der vorangegangenen Entwicklung konnte in den von 120–60 cm unter GOK anstehenden Sedimenten (MZ 7) am Standort erstmals ein dauerhaftes Stillgewässer nachgewiesen werden. Landschnecken sind hier lediglich durch die Sumpfform *Succinea/Oxyloma* vertreten. Zudem fehlt in der Fauna *Galba truncatula* (vgl. oben). Dominiert werden die Sedimente jetzt vor allem durch *Stagnicola* sp., *Valvata cristata* und *Bathyomphalus contortus*.

5 Diskussion und Synthese

Das am Meschendorfer Kliff aufgeschlossene Beckenprofil ist eines von wenigen an der südlichen Ostseeküste, in denen weichselspätglaziale und holozäne Ablagerungen in Form von Kalkmudden, Seekreiden und Torfen zu finden sind oder waren (z.B. BOEHM-HARTMANN 1937, LUDWIG 1963, LANGE et al. 1986, STRAHL & KEDING 1996, KOSSLER & STRAHL 2014, LAMPE et al. 2016). Bis zum 13. Jahrhundert unserer Zeit sind darin nur Sedimente erhalten geblieben, die während Vernässungsphasen gebildet wurden. Hiatus bestehen für Zeitabschnitte mit tieferem Grundwasserstand am Standort. Die darauffolgende Kliffund Beckenentwicklung bis zur Gegenwart wird vor allem durch Kliffranddünen, Flugsande und agrarische Nutzung mitbestimmt. Über weichselpleniglazialen kalkhaltigen Beckensanden bis zum Zeitraum der deutschen Ostkolonisation sind - getrennt durch vier Hiatus - mehrere Vernässungsböden bis -torfe und verschiedene Kalkmudden aufgeschlossen. Hiatus bestehen dabei für folgende Zeiträume, deren Dauer pollenanalytisch nur annähernd erfasst werden kann: 1.) Älteste Dryas bis zumindest frühes Allerød, 2.) ausklingendes Allerød und Jüngere Dryas, 3.) jüngstes Präboreal bis frühes Atlantikum sowie 4.) jüngstes Subboreal bis frühes Älteres Subatlantikum.

Ausklingendes Weichsel-Pleniglazial sowie Weichsel-Spätglazial (Meiendorf bis Allerød):

Die in Richtung Mecklenburger Bucht einfallende Grundmoränenplatte war Festland und wird in tieferen Lagen von Weichsel-pleniglazialen Sanden unterschiedlicher Mächtigkeit überdeckt.

Der Übergang vom Weichsel-Pleniglazial zum Meiendorf-Interstadial im Profil Me-1 ist um 14.450 J. v. h. durch einen äußerst schnellen Erwärmungsprozess gekennzeichnet wie er sowohl mittels geophysikalischer und/bzw. biologischer Parameter von grönländischen Eisbohrkernen (u. a. RASMUSSEN et al. 2006, SVENSSON et al. 2006) als auch pollenanalytisch aus mitteleuropäischen Profilen (MENKE 1968, STRAHL 2005) nachgewiesen ist.

Im Verlauf des Meiendorf 1 (Mei 1, 271-253,9 cm) im Profil Me-1 entstand erstmals nach dem Abschmelzen des Inlandeises der Mecklenburg-Phase eine geschlossene Boden- und Vegetationsdecke. Mit zunehmender Standortvernässung entwickelte sich aus einem Pionierboden (Regosol; 0,6 % Humusgehalt) ein sandreicher Uferschlick bis Vernässungstorf mit bis zu 56 % Organik. Im unteren Abschnitt wurde die Bodenbildung mehrfach durch fluviatile sandige Einschaltungen unterbrochen und das Pollenspektrum ist noch durch einen hohen Anteil umgelagerten Pollens wärmeliebender Gehölze gekennzeichnet. Beide Fakten sprechen für anfangs noch bestehende Sedimentbewegungen (Hangumlagerungen, Solifluktion), die im jüngeren Meiendorf jedoch nur noch vereinzelt auftreten. Pollenanalytisch ist das Meiendorf durch das einzige Hippophaë-Maximum des Pollendiagramms und schnell ansteigene Salix- sowie nur mäßig erhöhte NBP-Werte bei nahezu fehlenden Offenlandkräutern gekennzeichnet. Die P-Werte weisen auf eine schon relativ hohe Pollenproduktion hin. Gegen Ende des Meiendorf-Interstadials verdrängt Salix infolge weiter zunehmender Grundnässe Hippophaë. Ein steiler Anstieg der Equisetum-Kurve unterstreicht diesen Vernässungsprozess. Die hohen Anteile von Hippophaë und Salix belegen eine geschlossene Decke strauchartiger Gehölze für zumindest den größeren jüngeren Teil des Meiendorf-Interstadials. Auffallend unter den Baumpollen ist die hohe Pinus-Dominanz bei nur niedrigem Betula-Anteil. Ein großer Teil des Baumpollens, vor allem jener von Pinus, könnte dabei jedoch aus dem Frühweichsel (Interstadiale?) umgelagert sein oder aus äolischem Ferntransport stammen. Falls dem so ist, wäre der NBP-Anteil im Pollendiagramm nicht zeitspezifisch, sondern unterrepräsentiert.

Aus dem Allerød ist nur der Bildungszeitraum der Kalkmudde (254-246,9 cm) überliefert, der wahrscheinlich in das weichselspätglaziale Klimaoptimum fällt. HEIKKILÄ & SEPPÄ (2003) und MAKHNACH et al. (2004) beschreiben Kalkmudden des Allerød als vorwiegend biogenes Ausfällungsprodukt bereits wärmerer Klimaphasen. Auf Grund der niedrigen P-Werte und des Fehlens von See-Makrophyten im Profil Me-1 muss auf eine starke Mitbeteiligung von Kalk geschlossen werden, der im Zuge von Hang- oder Grundwasseraustritten im Sinne eines Quellkalks abgeschieden wurde. Dabei wäre sowohl eine biogene als auch eine abiogene Kalkfällung möglich. Das Auftreten von Porifera-Gemmulae und -Spongien, vereinzelten Pediastrum-Arten, speziell von Pediastrum kawraiskyi, sowie auch von Equisetum spricht für zumindest zeitweise bestehende Kleingewässer bzw. Blänken. Die Mikrokörper erreichen ein erstes kurzzeitiges Maximum. Das Fehlen von Mollusken und Diatomeen sowie die sehr geringe Pollendichte schließen dabei jedoch eine Mitbeteiligung von Quellkalk als Folge angestiegenen Grundwasserspiegels nicht aus, die niedrigen P-Werte ließen sich aber auch durch eine sehr hohe Sedimentationsgeschwindigkeit erklären. Im Umland bestand ein weitgehend geschlossener Pinus-Wald mit Betula-Anteil. Der Anteil von Salix dagegen ist stark rückläufig, was darauf hindeutet, dass das Klima offensichtlich merklich trockener und der Grundwasserstand auch vegetationsbedingt tiefer als im ausklingenden Meiendorf war. Mollusken konnten für das Weichsel-Spätglazial nicht nachgewiesen werden. Ebenso ließen sich keine Anzeichen für kryogene und toteisbedingte Deformationen in dieser Beckenphase feststellen.

Präboreal und Boreal:

Ein weiterer Hiatus liegt bezüglich des Fehlens von Ablagerungen der Jüngeren Dryas vor. Das folgende Präboreal (246,9-223 cm) ist in Profil Me-1 viergegliedert und beginnt mit einem Vernässungstorf mit Betula-Dominanz, der der kurzen Friesland-Wärmeschwankung (246,9-243 cm) entsprechen dürfte. Die ihr vorangegangene Übergangsphase betrug TINNER & AMMANN (2005) zufolge nur ca. 50 Jahre. Die Betula-dominierte Friesland-Schwankung wird von mehreren Autoren als frühholozänes Baumpollen- (und Sträucher-) Maximum beschrieben (u. a. LANGE et al. 1986; KOSSLER et al. 2004, STRAHL 2005, LAMPE et al. 2016). In Abweichung zu den meisten anderen Friesland-Profilen weist Me-1 zwar einen Anstieg der BP+Str-Kurve auf, das frühholozäne BP-Maximum wird jedoch erst in der folgenden schon Kiefer-dominierten Pollensubzone IVb erreicht.

Der Wechsel von der *Betula-* zur *Pinus-*Dominanz an der Grenze IVa/IVb fällt im Profil Me-1 mit dem Beginn der frühholozänen Kalkmuddebildung zusammen. Im Profil Me-2 fehlt das Weichsel-Spätglazial. Die Sedimentation setzt dort erst mit der Kalkmuddeakkumulation in der Pollensubzone IVb des Präboreals ein. Die präboreale Kalkmudde-Phase von Me-1 und Me-2 lässt sich sowohl sedimentologisch als auch pollenanalytisch in drei Subzonen (PZ IVb-d) untergliedern (Abb. 4, 6). Die BP+Str-Kurve weist ihre höchsten Werte des gesamten Pollendiagramms auf, während die NBP-Werte stark abnehmen. Die Pollendichte nimmt merklich zu, zum Teil wohl auch als Folge der hohen Dominanz des starken Pollenproduzenten *Pinus*, die für den norddeutschen Raum typisch ist. Es bestand geschlossene Bewaldung. Charakteristisch speziell für diesen Entwicklungsabschnitt sind Grünalgen vom *Radiococcus nimbatus*-Typ und *Pediastrum integrum*.

Im mittleren Abschnitt von Me-1 (234–228 cm = PZ IVc) fallen im Sediment eine schluff- und tonreichere Zwischenlage und im Pollenbild ein leichter BP- und Pinus-Rückgang zugunsten von NBP und Betula auf. Des Weiteren tritt in IVc - analog wie auch in den Küstenprofilen Jezero Żarnowieckie (LATAŁOWA & TOBOLSKI 1989) und Glowe 3 (LAMPE et al. 2016, dort ausführlichere Diskussion) - Empetrum auf, dessen Erscheinen auf die Existenz lichterer Standorte schließen lässt. Es handelt sich hierbei um die Rammelbeek-Kälteschwankung, die zuerst in den Niederlanden (u. a. BOHNCKE & HOEK 2007) und bald darauf auch von der Müritz nachgewiesen werden konnte (LAMPE et al. 2009). Im Unterschied zu Glowe 3 tritt Empetrum nur in einer Pollensubzone auf. Möglicherweise spielt für Empetrum aber auch die küstennahe Lage eine Rolle, da diese Spezies nicht nur einen hochmontanen, sondern auch einen ozeanischen Verbreitungsschwerpunkt aufweist.

Die basale Kalkmudde des Präboreals (MZ 1, 246-223 cm) enthält eine arten- und individuenreiche frühholozäne Molluskenfauna überwiegend terrestrisch geprägter Feuchtstandorte mit Dominanz borealer Arten. Während die meisten dieser Arten eine Präferenz zu feuchteren Habitaten besitzen, erreichen allein schon die hygrophilen Elemente insgesamt ca. 30 % der Arten- sowie 70 % der Individuenzahlen (Tab. 2) mit Dominanz der vor allem boreal/ alpin verbreiteten, heute hauptsächlich in Skandinavien vorkommenden Art Vertigo geyeri. Im Tiefland bevorzugt die Artengesellschaft von Me-1 Kalkmoor-Standorte mit relativ niedrigwüchsiger Sumpfvegetation (z. B. Carex). Da Süßwassermollusken nur durch wenige Arten, wie die amphibisch lebende Schnecke Galba truncatula und Anisus leucostoma vertreten sind, kann geschlussfolgert werden, dass das Feuchthabitat vermutlich temporär überstaut und auch mit Wasser aus Ouellbereichen überrieselt wurde. Dafür sprechen auch die Nachweise von Laubmoosen in allen Kalkmudden, beginnend ab PZ IVc. Aus Sicht der Molluskenanalyse waren Gehölzbereiche im näheren Umfeld wahrscheinlich nur inselartig bzw. lückenhaft entwickelt. Die Zusammensetzung der Molluskenfauna und das starke Vorkommen von Laubmoosen unterstreicht die Genese der Kalkmudden in Zusammenhang mit Quellaustritten, womöglich im Übergang zu einem Flachgewässer. Das vereinzelte Vorkommen von Porifera-Gemmulae spricht für

das Bestehen zumindest saisonaler Blänken. Nicht ausgeschlossen ist, dass ein Teil der Schwammreste im Zuge der HF-Aufbereitung vernichtet wurde.

Die Ergebnisse von Pollen- und Malakoanalysen scheinen zum Teil einander zu widersprechen, denn während das Pollendiagramm für den Zeitraum der Entstehung der präborealen Kalkmudde (PZ IVb bis IVd) die höchste BP-Dichte des gesamten Profils Me-1 aufweist, dominierte aufgrund des Molluskenspektrums eine Offenlandfauna. Die Lösung für diesen Widerspruch dürfte darin liegen, dass die Molluskenfauna die Artenzusammensetzung unmittelbar vom nicht bewaldeten Beprobungsstandort wiedergibt, während im Pollendiagramm die hohe Pollenproduktion weiter binnenwärts wachsender Kiefernwälder gegenüber der vergleichsweise geringen Pollenproduktion Krautpflanzen-reicherer Biotope vor Ort dominierte.

Die präboreale Kalkmuddeakkumulation ist die Folge der raschen frühholozänen Erwärmung sowie eines schnellen Wasserspiegelanstiegs unmittelbar nach Ende der Jüngeren Dryas bei zunehmend kontinentaler und wärmer sowie trockener werdendem Klima. Dieses führte dazu, dass die Kalkmuddeakkumulation im Verlaufe des Präboreals, spätestens jedoch zu Beginn des anschließenden Boreals und bis in das frühe Atlantikum anhaltend zum Erliegen kam (Ausbildung des dritten Hiatus). Die präboreale Beckenentwicklung ähnelt jener der des Glower Paläosees (LAMPE et al. 2016).

Dieser frühpräboreale Wechsel zu einer karbonatisch dominierten Sedimentation ist auch für einige Seen des Binnenlandes in litoralen und profundalen Sedimenten nachweisbar (u. a. RICHTER 1968, WENNRICH et al. 2005, LORENZ 2007, LAMPE et al. 2009). Gleichzeitig ist das Frühholozän als kurzer und hydrologisch prägnanter Zeitraum deutlich verminderter Wasserstände in den Seen bekannt (u. a. JANKE 2004, KAISER 2004, KALIS et al. 2003, KAI-SER et al. 2007, 2012). Die Dauer dieses Abschnitts der Kalkmuddeakkumulation entspricht in etwa jener von Glowe 3 (LAMPE et al. 2016).

Das pollenanalytisch belegte Fehlen von Sedimenten des Boreals und des beginnenden Älteren Atlantikums (Abb. 6) lässt für diesen Zeitraum auf eine besonders trockene Klimaphase mit tieferem Grundwasserstand und stark nachlassenden Quellwasserzutritten schließen. Daraus resultierende Hiatus treten in Moor- und Seeablagerungen nicht nur des südlichen Ostseeumlandes verbreitet auf (siehe hierzu auch LAMPE et al. 2016, S. 51 f.) Nur in tieferen Becken, z. B. dem der Müritz (LAMPE et al. 2009), des Kleinen Jasmunder Boddens (Bohrung KJB3 in LAMPE et al. 2002; 2010b) und des Greifswalder Boddens (STRAHL 1996) wie auch der Halbinsel Jasmund (LANGE et al. 1986, STRAHL 1999, ENDTMANN 2004) sind diese Zeitabschnitte pollenanalytisch immer nachweisbar.

Atlantikum und Subboreal:

Im Älteren Atlantikum erreichte die Ostsee bei zunächst schnellem Anstieg die Mecklenburger Bucht und gegen Ende des Atlantikums die 2 m-Isobathe und somit die gesamte südliche Ostseeküste (LAMPE et al. 2010a). Die Phase des mehrere Jahrhunderte andauernden BP-Minimums in der PZ VI entspricht zeitlich diesem littorinazeitlichen schnellen Meeresspiegelanstieg und stimmt zeitlich wohl auch mit der Endphase des Auslaufens des Aggasiz-Stausees und dem Misox-Gletschervorstoß in den Schweizer Alpen überein (vgl. ZOLLER et al. 1966, NESJE et al. 2001). In den Profilen Me-1 und Me-2 wurden - im Unterschied zu den hellen Kalkmudden des Allerøds und des Präboreals - dunkelgraue Kalkmudden abgelagert, wobei deren dunkle Färbung nicht auf erhöhte organische Anteile, sondern auf verstärkte Toneinträge zurückzuführen ist (Profil Me-2). Die Toneinträge erfolgten während des gesamten Atlantikums, wahrscheinlich aus dem unmittelbaren Einzugsgebiet. Es ist von flachen Wasserständen (max. wenige Dezimeter) auszugehen. In der PZ VI setzte nach einem längeren Hiatus die Akkumulation von Kalkmudden wieder ein.

Die Hauptmerkmale der PZ VI und VII, die ansteigenden Kurven der EMW-Elemente, das Maximum des Ulmus-Quotienten, der Anstieg der geschlossenen Alnus-Kurve sowie ein hoher Corylus- und ein abnehmender Pinus-Anteil, sind speziell im Diagramm Me-1 relativ schwach ausgeprägt. Stattdessen weist es sehr hohe Betula-Werte bei nur langsam zunehmenden EMW-Vertretern und äußerst hohem NBP-Anteil auf, im Profil Me-2 sind die EMW-Vertreter und Corylus weitaus stärker vertreten. Parallel zur hohen NBP-Beteiligung im Profil Me-1 fallen im Atlantikum die durchgehend niedrigen, bis unter 40 % abfallenden und für das gesamte Profil einmalig niedrigen Pinus ganze-Werte auf. Ursachen dürfte einerseits die Betula-dominierte Lokalflora ebenso wie ein zu jener Zeit besonders unruhiges Ablagerungsmilieu (z. B. in Ufernähe) gewesen sein. Die hohen NBP-Werte resultieren vor allem aus einem Anstieg der Poaceae und von Pollen des Aster-Typs. Der wahrscheinlich lokal stark erhöhte Betula-Anteil und der Alnus-, Salix-, Polypodiales- und Equisetum-Anstieg sprechen dabei für eine Ausweitung der Feuchtstandorte aufgrund eines ansteigenden Grundwasserspiegels. Dadurch wurden v. a. Pinus im Umfeld verdrängt und Poaceae begünstigt. Zudem breitete sich Corylus aus, ihr sehr hoher Anteil spricht für eine noch lichte Bewaldung der angrenzenden Hochflächenwälder. Die Vegetation im Umland des Beckens entwickelte sich zu einem Corylus-dominierten Quercus-Mischwald mit schon hohem Tilia-Anteil. Es ist nicht auszuschließen, dass Tilia und zuvor auch Ulmus ablagerungsbedingt sekundär stark angereichert und überrepräsentiert sind.

Unter den Mollusken dominieren im Atlantikum mit 60 % Waldarten und Arten, die häufig in der Waldfauna vertreten sind. Die nachgewiesenen Süßwassermollusken *Aplexa hypnorum* sowie *Galba truncatula* dominiert vor allem temporäre Gewässers und sprechen gegen das Bestehen eines größeren und dauerhaften Gewässers im Ablagerungsraum. Eventuell bildeten aus malakologischer Sicht die Habitate aber auch die Randfazies zu einem vorgelagerten Seebecken. Hierfür könnte auch der Einzelfund der anspruchsvollen Süßwasserschnecke *Myxas glutinosa* sprechen, welche möglicherweise in den Ablagerungsraum eingespült wurde.

Aufgrund der hohen Anteile von Landschnecken mit zahlreichen Waldarten und feuchtigkeitsliebenden Elementen, welche aus taphonomischer Sicht gegen eine Ablagerung in einem lakustrinen Milieu sprechen (vgl. MZ 7), sowie der Charakteristik der Süßwasserfauna kann, wie schon von JAECKEL (1948) dargestellt, davon ausgegangen werden, dass im Sedimentationsraum ausgedehnte Feuchthabitate mit offenen und bewaldeten Strukturen, z. T. mit Bruchwäldern, entwickelt waren, die nur temporär überstaut wurden.

Eine Besonderheit im Pollenbild, insbesondere des Atlantikums und des Subboreals bilden Mikrokörper, welche die rückläufige Radiococcus-Kurve ablösen. Die Ursache für diesen Wechsel ist unbekannt. Unter den Mikrokörpern dominieren Fungi-Fruchtkörper als Besiedler von Krautpflanzen sowie von Stämmen und Blättern verschiedener Gehölze sowie Formen, die als in Zersetzung befindliche Ständerpilz- bzw. Holzreste interpretiert werden und für Gehölzbewuchs im Ablagerungsraum sprechen. In der Literatur werden derart hohe Anteile von NPP bisher nur vereinzelt beschrieben, so u. a. bei WIJMSTRA et al. (1971) für das Wietmarscher Hochmoor (Niedersachsen), bei BARTHELMES et al. (2006) für ein Erlenmoor im Ziesetal (Mecklenburg-Vorpommern) und bei DIETRE et al. (2014) für das Las Gondas-Moor in den Silvretta-Alpen. Sie unterscheiden sich - wohl auch infolge der unterschiedlichen Standortmilieus - in ihrer Komponenten-Zusammensetzung sehr stark voneinander, erreichen in den Charakterhorizonten jedoch NPP-Werte von 1000 bis über 3000 % der Pollengrundsumme. Gemeinsam ist den drei genannten Profilen, dass die Entwicklung ihrer NPP-Maxima unter trockeneren Bedingungen als die der jeweils unterund oberhalb anstehenden Sedimente erfolgte. WIJMST-RA et al. (1971) zufolge wird im Wietmarscher Moor das NPP-Maximum nahe der Subboreal-Subatlantikum-Grenze erreicht. Auch DIETRE et al. (2016) zufolge fallen die jüngsten NPP-Maxima in den Endzeitraum einer Trockenphase mit Verlangsamung des Torfwachstums um ungefähr 2850 cal. BP. Im Ziesetalmoor charakterisiert das NPP-Maximum den Abschluss einer längeren, ingesamt trockeneren Talentwicklungsphase mit hohem Pinus- und Tilia-Anteil, auf die eine Phase mit zunehmender Talvernässung mit hoher Alnus-Dominanz folgt. Auch van GEEL & ATROOP (2006) beschreiben den Zusammenhang zwischen NPP-Maxima und relativ trockenen Moorentwicklungsabschnitten. Für die Mikrorest-Maxima der Meschendorfer Kalkmudden schließen wir im Analogieschluss sowie aus den Befunden der Molluskenanalyse auf ein trockeneres gehölzdominiertes Milieu im Beprobungsgebiet mit zeitweiligen Überstauungen und Blänken über Kalkmudde vom Atlantikum bis zum ausklingenden Subboreal. Die meisten Mikrokörper-Spezies von Me-1 dürften zudem an neutrale bis basophile Standorte angepasst sein.

Gewässerindikatoren, wie höhere Wasserpflanzen, *Pediastrum* und *Cladocera* fehlen durchgehend und Schwammadeln sind (evtl. auch aufgrund des hohen pH-Wertes oder auch der HF-Aufbereitung) nur vereinzelt mitvertreten. Als Ursache für die niedrige Pollenproduktion wird – wie schon für das Allerød – eine hohe Sedimentationsgeschwindigkeit eines gut durchlüfteten Quellkalks angenommen. Mit den aufgeführten Befunden kann das gelegentliche Austrocknen in Zeiten niedriger Wasserstände infolge trockneren Klimas nicht ausgeschlossen werden. Im Unterschied dazu weisen die präborealen und späteren subatlantischen Kalkmudden sehr hohe P-Werte auf, was eventuell auf eine vergleichsweise langsamere Kalksedimentation schließen lässt.

Die Schalenfragmente der Miesmuschel *Mytilus edulis*, die wahrscheinlich über Speiballen von Möwen eingetragen wurden, liefern einen Beleg für die Meeresnähe zu jener Zeit.

Auch für das Atlantikum scheint ein Widerspruch zwischen Pollenbild und Malakofauna zu bestehen. Während der NBP-Anteil bis auf 36 % ansteigt, dominieren im Molluskenspektrum waldtypische Arten. Jedoch widerspiegelt die Malakofauna immer das engere Umfeld, das Pollenspektrum jedoch das weitere Umfeld. Erhöhte NBP-Anteile während des Atlantikums könnten vom Röhrichtbewuchs einer Uferzone stammen oder ein Beleg für noch sehr lichte Wälder mit *Corylus, Betula* und zunehmend *Quercus* und *Tilia* bilden. Möglicherweise hatte auch der Ausbruch des Agassiz-Sees eine klimatische Fernwirkung.

Für das Subboreal bleiben weiterhin extrem niedrige P-Werte und die Massenentwicklung von Mikroorganismen charakteristisch. Auf der angrenzenden Hochfläche bestand ein an EMW-Vertretern reicher Pinus-Mischwald mit sehr hohem Lindenanteil und bei stetiger Abnahme von Corylus. Quercus ist untervertreten und Fagus zeigt noch keinen geschlossenen Kurvenverlauf. Im Feucht- und Nassbereich erfolgte eine starke Alnus-Ausbreitung. Dieser Zeitabschnitt weist das zweite BP+Str-Maximum beider Profile bei erneut sehr hohen Pinus ganze-Werten und gleichzeitig niedrigen NBP auf. Weitere Besonderheiten sind ein merklicher Betula-Rückgang sowie ein Rückgang des Ulmus-Quotienten im Vergleich zum Atlantikum. Die Polypodiales-Werte bleiben ebenfalls weiterhin hoch. Außer sporadisch Artemisia - diese Gattung kommt auch auf Offenstandorten vor - treten noch keine Ruderalpflanzen und Unkräuter auf. Auch Getreide (Cerealia ohne Secale) ist noch nicht nachweisbar, was darauf hindeutet, dass keine Ackernutzung und wohl auch keine Waldweide stattfanden. Der jüngste Teil der PZ VIII, aber auch der unterste Teil der PZ IX (Älteres Subatlantikum) fehlen.

Die Kalkmudden reichten zur Zeit ihrer größten Ausdehnung seewärts bis in das Gebiet der heutigen Schorre hinein. Im späten Subboreal wurde der Kalkmuddekörper durch das Meer angeschnitten und es erfolgte ein abruptes Trockenfallen des Nassstandortes. Im Bereich von Me-1 kam es dadurch infolge Grundwasserabsenkung zu einem zeitweiligen Aussetzen der Kalkmuddesedimentation (vierter Hiatus). Das Ufer der Ostsee lag zu dieser Zeit bei ca. -1 m NHN sowie vermutlich mehr als 1.000 m seewärts des heutigen. Unter Beachtung des von SCHULZ (1996) kartierten dritten (= mittleren) Anschnittes, muss angenommen werden, dass die derzeitigen Anschnitte eine größere Breite aufwiesen und vormals in Verbindung standen. Ein fortwährendes Schmalerwerden der aktuellen Aufschlüsse dürfte zu erwarten sein.

Subatlantikum:

Das diskordant über den subborealen Kalkmudden einsetzende Torfwachstum (Me-1) datiert in den Übergang vom Subboreal zum Subatlantikum (siehe Tab. 1, Probe 168–169 cm) und war die Folge eines klimabedingten festländischen Grundwasserspiegelanstiegs. Pollenanalytisch lässt sich das Torfwachstum erst für die feucht-kühlere Eisenzeit (Älteres Subatlantikum) nachweisen. Gegenüber der vorangegangenen und folgenden Kalkmuddephase ist der Anteil der Nässezeiger (*Alnus, Salix*) besonders hoch und die BP gehen zugunsten von *Salix* und des NBP zurück. Auffallend für den sandigen Torf sind des Weiteren der nahezu vollständige Rückgang der Schwämme und Farne sowie die gleichzeitig starke Zunahme der P-Werte.

Malakologisch liegt im Bereich des Torfes nur eine relativ arten- und individuenarme Fauna vor. Die Gesamtcharakteristik dieser Phase hat sich aber offenbar im Vergleich zum Subboreal kaum verändert. Erwähnenswert ist der Nachweis der überwiegend atlantisch verbreiteten Schnecke *Lauria cylindracea*.

In Profil Me-2 setzt sich im Unterschied zu Me-1 die Kalkmudde-Sedimentation über das Subboreal hinaus bis zum pollenanalytisch sicher datierbaren Beginn der Pollensubzone Xa als flugsandreiche, und stark mit Eisenoxid durchsetzte Kalkmudde mit leichter Abnahme des Karbonatgehalts weiter fort (Abb. 4). Ein Hiatus als Folge eines Beckenanschnitts durch die Ostsee und die darauf anschließende Vermoorungsphase – wie in Me-1 – fehlen offenbar. In Me-2 erfolgte stattdessen während des älteren und mittleren Subatlantikums eine Kalkmuddeakkumulation unter Flugsandzufuhr. Letztere ermöglichte durch verbesserte O2-Zufuhr die Anreicherung von oxidiertem Eisen, ebensowie die Mineralisation einst vorhandener Pflanzenreste. Vermutlich trägt auch der rasche Küstenrückgang zu einer Verockerung der immer wieder neu entstehenden Kliffprofile bei. Die Tatsache, dass dort die Kalksedimentation nicht unterbrochen wurde, spricht ebenfalls für dessen Genese unter ständigem binnenseitigem Wasserzutritt.

Die nächste Phase der Kalkmuddeablagerung in Profil Me-1 umfasst die Vorrömische Kaiserzeit und reicht eventuell noch in die Völkerwanderungszeit hinein. In etwa ab Christi Geburt ist kleinräumige agrarische Nutzung in Form von Waldweide und Ackerbau nachweisbar und im Pollenbild durch das Auftreten von Pollen von *Plantago lanceolata* und des *Triticum*-Typs belegt. Das Baumpollenbild der Hochflächen spiegelt einen *Pinus*-reichen *Quercus*-Wald wider. Der *Betula*-Anteil nimmt sehr stark ab und unter den EMW-Arten fehlen *Tilia* und *Ulmus* fast völlig. *Fagus* zeigt noch keine geschlossene Kurve. Der Niederungsbereich ist ein Erlenstandort mit höherem Weiden-Anteil als zuvor. Die bereits für das Atlantikum beschriebenen Poriferae-Gemmulae sowie Schwammnadeln und Mikrokörper treten weiter sporadisch mit auf.

Im mittleren Älteren Subatlantikum erfolgt in Me-1 die Ablagerung der obersten Kalkmudde, deren Schüttung mit Beginn der deutschen Ostkolonisation – eventuell als direkte Folge von Entwaldung und Ackerbau – deutlich zurückgeht. Sie ist jedoch merklich humoser und als Folge zunehmender Flugsandeinwehung minerogener als die älteren Ablagerungen und die Pollenakkumulation innerhalb dieser Kalkmudde bleibt – im Unterschied zu den erwähnten Kalkmudden des Allerøds, Atlantikums und Subboreals – hoch.

Alle Kalkmudden unterscheiden sich - vor allem sedimentologisch und faunistisch - deutlich voneinander, ohne dass diese Unterschiede und die sie auslösenden Milieufaktoren schon befriedigend begründet werden könnten. Pollenanalytisch fehlen den Kalkmudden des Allerøds, Atlantikums und Subboreals für Gewässer typische Makrophyten und deren P-Werte sind für Zeitabschnitte mit voll entwickelter Makrophytenvegetation viel zu niedrig. Auch für das Präboreal und das Subatlantikum konnten keine gewässereigenen Makrophyten nachgewiesen werden. Hinsichtlich der niedrigen P-Werte spricht viel für eine sekundäre Ausdünnung des Sporomorpheninventars durch Luftzutritt. Es ist davon auszugehen, dass dabei die Karbonatverfügbarkeit im älteren und mittleren Holozän am höchsten war und infolge zunehmender Entkalkungstiefe in Richtung Gegenwart abnimmt. Im Kontrast dazu stehen die Kalkmudden des Präboreals (PZ IVb bis IVd) und des mittleren Subatlantikums mit hohen P-Werten. Letztere lassen den Schluss auf einen geschlossenen Pflanzenbewuchs im Gebiet der Kalkmuddesedimentation zu.

Das Pollenbild des mittleren Älteren Subatlantikums umfasst das dritte und oberste BP+Str-Maximum des Profils. Während der Völkerwanderungszeit fand keine Ackernutzung statt und die Waldzusammensetzung ähnelt weiterhin jener der Römischen Kaiserzeit. In der Slawenzeit tritt erneut kleinräumige agrarische Nutzung auf, das Baumpollenspektrum zeigt dabei merkliche Änderungen. *Pinus* und *Alnus* gehen deutlich zugunsten von *Fagus* und *Salix* zurück, wobei der *Fagus*-Anstieg im Vergleich mit binnenländischen Pollenprofilen (z. B. SCHOKNECHT 1996) äußerst spät einsetzt und ausgesprochen niedrig ausfällt. Die obersten vier Vegetationsabschnitte des Subatlantikums (PZ Xa, Xb1, Xb2, Xc) umfassen den Zeitraum von der Deutschen Ostkolonisation bis zur Gegenwart. An der Untergrenze von PZ Xa erfolgt mit Einsetzen der Deutschen Ostkolonisation eine der schärfsten Änderungen im Vegetationsbild dieses Profils. Sie beginnt nahezu zeitgleich mit dem Einsetzen der Flugsandtätigkeit und äußert sich im Pollenbild unter anderem durch einen starken BP-Rückgang und durch eine ebenso intensive Zunahme des NBP-Anteils einschließlich der Getreide- und Unkrautarten. Während der gesamten PZ Xa und Xb bestand extensive Landwirtschaft, wofür - bezogen auf den Cerealia ohne Secale-Pollenanteil - der sehr hohe Anteil entsprechender Unkräuter spricht. Des Weiteren erfolgt im Verlauf der PZ Xa eine kontinuierliche Abnahme der CaCO₃-Zufuhr; sie geht auf < 5 % in Me-1 bzw. 15 % in Me-2 zurück.

Im Verlaufe der mittelalterlichen Rodungsphase kommt es zu einer Verschiebung im Gehölz-Spektrum zugunsten von *Pinus* und vor allem *Salix* bei Vorherrschaft von *Salix caprea*. Des Weiteren sind während der gesamten PZ Xb *Lycopodiella inundata*, Schwammnadeln und -gemmulae, Cladocera sowie Sporen vom Laubmoos-Typ stärker vertreten. Die P-Dichte nimmt in Richtung Gegenwart mehr oder weniger stetig ab.

Die PZ Xb1 beginnt bei Me-1 mit einer Sandlage (123 bis 115 cm). Sie könnte der binnenseitige Ausläufer einer auf der damaligen Kliffkante entstandenen Kliffranddüne gewesen sein, die den seewärtigen Abfluss des Beckens verhinderte und anschließend zum Aufstau eines über mehrere Jahrhunderte existierenden, stehenden Flachgewässers führte (115-59 cm). Die Mollusken mit Stagnicola sp., Valvata cristata und Bathyomphalus contortus sprechen jetzt für ein dauerhafteres, die Diatomeen verlangen ein zumindest längerzeitig im Jahresverlauf bestehendes Flachgewässer. Es wird weiterhin durch Kalkzufuhr gespeist - der Karbonatgehalt der Sande erreicht bis zu 10 % - verflacht durch Flugsandzufuhr zunehmend und geht letztendlich im Übergang zur PZ Xb2 in einen organogenreichen Nassboden über. Pollenanalytisch spiegelt die PZ Xb1 eine nahezu waldfreie Landschaft wider. Der auffallend hohe Cyperaceae-Anteil spricht für einen Seggen-dominierten Flachsee oder dessen Verlandungsgürtel mit Menyanthes trifoliata, der hohe Anteil von Pollen des Hieracium-Typs für Dünen oder Flugsande im nahen Umland.

In der Diatomeenflora des Tiefenbereichs 115–59 cm (PZ Xb1, DZ1, Abb. 4) dominieren basophile Arten des Litorals bis Supralitorals, obligatorische Plankter fehlen. Es sind vorwiegend robuste Arten, welche im Jahresverlauf zumindest ein längerzeitig bestehendes Gewässer benötigen. Die meisten von ihnen vertragen zeitweise aerophytische Bedingungen. Ein weiterer Teil der Arten tritt auch an Quellstandorten und überfluteten Moosrasen auf oder bevorzugt sie sogar. Für ein solches Flachgewässer spricht auch das bereits erwähnte Vorkommen von Schwammnadeln und Cladocera. Im Profil Me-1 endet die Kalksedimentation und auch die feuchtebedingte Humusakkumulation spätestens an der Grenze zur PZ Xbl. Ursachen hierfür waren einerseits das Einsetzen der Flugsandablagerungen und Kliffranddünen sowie andererseits die Nutzung als Acker- und Weideflächen.

In Me-2 entspricht der PZ Xb1 von Me-1 sowohl zeitlich als auch pollenanalytisch das oberhalb der eisenoxidreichen Kalkmudde anstehende Kalk-Anmoor (240-225 cm), an dessen Obergrenze ebenfalls die Kalkmuddesedimentation ausklingt. Es enthält eine artenarme, vorwiegend aus robusten epipelischen Arten bestehende Diatomeenflora, in der Schwammnadeln und Mikrokörper weiterhin mit vertreten sind. Hohe Biomasseproduktion infolge kräftiger Nährstoffversorgung führten zur Aufhöhung beider Becken (Me-1 und Me-2) bis über das Anmoor hinaus, dass letztendlich von Flugsanden und Kolluvium überdeckt wurde. Die Dauer vom Ende der Kalkmuddeakkumulation (als Folge sinkenden Grundwasserstandes, womöglich dem Anschnitt des Kliffes durch die Ostsee geschuldet) bis zum endgültigen Ausklingen des Torfwachstums in Me-2 betrug mindestens 2.200 Jahre.

Das in Me-2 zwischen Dünensanden zusätzlich ausgebildete, jedoch kalkfreie Anmoorband in 192–185 cm unter GOK könnte auf Grund seines äußerst hohen *Cyperaceae*-Anteils (bis zu 50 % der Pollengrundsumme) zeitlich ebenfalls noch in die nur für Me-1 ausgewiesene Subzone Xbl fallen, da robuste Diatomeenarten, Schwammnadeln und Mikrokörper weiterhin nachweisbar sind.

In der Me-1-PZ Xb2 gehen *Poaceae* und *Cyperaceae* innerhalb der weiterhin stark dominierenden NBP-Flora stark zugunsten fenestrater *Compositae*, vor allem des *Hieracium*-Typs, zurück. Als Ursache der Zunahme vor allem von *Hieracium sp.* wird auch hier das Näherkommen des Strand- und Kliffranddünengürtels angenommen. Mikrokörper, Schwammnadeln und *Cladocera* sind letztmals stark vertreten.

Die PZ Xc umfasst die obersten 34 Profilzentimeter und entspricht in etwa dem Zeitraum der jüngsten 150 Jahre. Er ist gekennzeichnet durch das jüngste *Pinus*-Maximum als Folge von Nadelholzaufforstungen und durch die Intensivierung der Landwirtschaft, erkennbar am BP-Anstieg und NBP-Rückgang vor allem als Folge des Verschwindens extensiver Unkräuter. Die P-Werte sind in den kolluvial durchsetzten Dünensanden sehr niedrig. Hauptgehölzart bleibt *Salix caprea*. Das Fehlen von Mollusken in den jüngsten Sedimenten (PZ Xb1 und Xc) dürfte auf die Auffüllung durch Flugsande sowie die Entwässerung durch Gräben in jüngster Zeit zurückzuführen sein.

Die in den Sanden (vorwiegend Flugsande) der obersten 59 Profilzentimeter (DZ 2) enthaltenen Gewässer-Diatomeen und Schwammnadeln dürften durch Umlagerung (Pflügen?), Einwehung und Einspülung in das Sediment gelangt sein. In den oberflächennahen Sedimenten dominiert die aerophile Diatomee *Hantzschia amphioxys*.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung im Gelände und fachliche Hinweise bei V. Häußler (Kühlungsborn), R. Lampe (Greifswald) und B. Bartels (Meschendorf) sowie bei H. Rabe (Greifswald) für die labortechnische Aufbereitung der Pollen- und Diatomeenproben. Unser Dank gilt des Weiteren R. Lampe für die Durchführung von Analysen von Geschiebemergelproben aus dem Meschendorfer Kliff sowie all Jenen, die uns beratend bei der Bestimmung der NPP-Mikrokörper unterstützten, insbesondere A. Barthelmes, P. de Klerk, B. Dietre, M. Feike, P. Frenzel, R. Gehrels, M. Schult, J. Strahl und M. Theuerkauf. Des Weiteren möchten wir uns bei Th. Hübener (Rostock) für Hinweise zur Milieuansprache der Diatomeen bedanken. Für die kritische Durchsicht und wertvolle Hinweise zum Manuskript bedanken wir uns bei J. Strahl.

Literatur

- Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. - 438 S., Hannover (Schweizerbart)
- BARTHELMES, A., PRAGER, A. & JOOSTEN, H. (2006): Palaeoecological analysis of Alnus wood peats with special attention to non-pollen palynomorphs. – Review of Palaeobotany and Palynology **141**, 1-2, S. 33–51
- BEUG, H.-J. (2004): Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete. 542 S.; München (Verlag Dr. Friedrich Pfeil)
- BOEHM-HARTMANN, H. (1937): Spät- und postglaziale Süßwasserablagerungen auf Rügen. I. Pollenanalytische und paläontologische Untersuchungen. – Archiv für Hydrobiologie **31**, S. 1–37
- BOHNCKE, S. J. P. & HOEK, W. Z. (2007): Multiple oscillations during the Preboreal as recorded in a calcareous gyttja, Kingbeekdal, The Netherlands. Quaternary Science Reviews. **26**, 15-16, S. 1965–1974
- BOND, G., SHOWERS, W., CHESEBY, M., LOTTI, R., ALMASI, P., DE MENOCAL, P., PRIORE, P., CULLEN, H., HAJDASAND, I., BONANI, G. (1997): A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. – Science 278, 5341, S. 1257–1266
- BÖRNER, A., JANKE, W., LAMPE, R., LORENZ, S., OBST, K., SCHÜTZE, K. (2011): Geowissenschaftliche Untersuchungen an der OPAL-Trasse in Mecklenburg-Vorpommern – Geländearbeiten und erste Ergebnisse. Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge 18, 1-2, S. 9–28
- BRAMER, H. (1975): Über ein Vorkommen von Allerødtorf in Sedimenten der Ueckermünder Heide. - Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Greifswald, Mathematisch-naturwissenschaftliche Reihe 24, 3-4, S. 183–187
- CANTONATI, M., KELLY, M. G. & LANGE-BETALOT, H. (2017): Freshwater Benthic Diatoms of Central Europe: Over 800 Common Species Used in Ecological Assessment. – 942 S.; Koeltz Botanical Books

- Снковок, S. M., Nass, A. & Nitz, B. (1983): Allgemeine Aspekte festländischer Kalkbildung periglaziärer und glaziär überformter Räume am Beispiel der Rüdnitz-Melchower Rücklandzone (Barnim). – Z. geol. Wiss. **11**, 2, S. 179–191
- DIETRE, B., WALSER, C., LAMBERS, K., REITMAIER, T., HAJDES, I. & HAAS, J. N. (2014): Palaeoecological evidence for Mesolithic to Mediaval climatic change and anthropogenic impact on the Alpine flora and vegetation of the Silvretta Massif (Switzerland/Austria). Quaternary International **353**, S. 3–16
- DUPHORN, K., KLIEWE, H., NIEDERMEYER, R.-O., JANKE, W. & WERNER, F. (1995): Die deutsche Ostseeküste. Sammlung geologischer Führer **88**. 285 S.; Stuttgart; Berlin (Borntraeger).
- EGGERS, T. O. & EISELER, B. (2007): Bestimmungssschlüssel der Süßwasser-Spongilidae (Porifera) Mittel- und Nordeuropas. – Lauterbornia **60**, S. 1–53
- ELLIS, M. B. & ELLIS, J. P. (1997): Microfungi on Land Plants. An Identification Handbook. – 868 S.; Slough (The Richmond Publishing)
- ENDTMANN, E. (2004): Die spätglaziale und holozäne Vegetations- und Siedlungsgeschichte des östlichen Mecklenburg-Vorpommern. Eine paläoökologische Studie. – 181 S.; Dissertation Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Greifswald
- FIRBAS, F. (1949/1952): Waldgeschichte Mitteleuropas. 2 Bände, 480/256 S.; Jena (Gustav Fischer).
- GEDDA, B. (2001): Environmental and climatic aspects of the early to mid-Holocene calcareous tufa and land mollusk fauna in southern Sweden. – LUNDQUA Thesis 45, S. 1–50; Lund
- GELLERT, J. F. (1989): Geomorphologisch wirksame Prozesse und genetische Formtypen der Steilufer, insbesondere der südlichen Ostsee. – Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau **54**, S. 149–156
- HALLIK, R. & LUDWIG, A. O. (1959): Ein spätglaziales Torfprofil auf der Insel Usedom. – Archiv der Freunde der Naturgeschichte in Mecklenburg 5, S. 20–35
- HAASE, M., MENG, S. & HORSÁK M. (2021): Tracking parallel adaptation of shells morphology through geological times in the land snails genus Pupilla (Gastropoda: Stylommatophora: Pupillidae). – Zoological Journal of the Linnaean Society **191**, S. 720–747
- HEERDT, S. (1965): Zur Stratigraphie des Jungpleistozäns im mittleren Nord-Mecklenburg. – Geologie 14, S. 589–609
- HEIKKILÄ, M. & SEPPÄ, H. (2003): A 11.000-yr palaeotemperature reconstruction from the southern boreal zone in Finland. Quaternary Science Reviews **22**, 5-7, S. 541–554
- HENSEL, R. (2010): Fossile Seebecken im Kliffaufschluss bei Meschendorf (Nordwestmecklenburg) – Untersuchung zur Verbreitung, Stratigraphie und Sedimentgenese. – Diplomarbeit, Institut für Geographie und Geologie der Universität Greifswald, 162 S.
- HUPFER, P. HARFF, J., STERR, H. & STIGGE, H.-J. (2003): Die Wasserstände an der Ostseeküste. Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel, S. 19–21 und 220–231. – Die Küste, Sonderheft **66**, 331 S.

- JAECKEL, S. (1948): Die Molluskenfauna des postglazialen Quellkalkes an der mecklenburgischen Küste bei Meschendorf. – Archiv für Molluskenkunde **77**, S. 91–97
- JANKE, W. (1978): Untersuchungen zu Aufbau, Genese und Stratigraphie küstennaher Talungen und Niederungen Nordost-Mecklenburgs als Beitrag zu ihrer geoökologischen und landeskulturellen Charakteristik. – Univ. Greifswald, Wiss. Rat, Habilitationschrift, 172 S., Greifswald
- JANKE, W. (2002): Basin sands and inland dunes of the Lubminer Heide. Greifswalder Geographische Arbeiten **27**, S. 145–146
- JANKE, W. (2004): Holozän im Binnenland. In: KATZUNG, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern: S. 265–284; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- JANKE, W. (2011): E 9: Kühlungsborn Rostocker Heide. In: NIEDERMEYER, R.-O., LAMPE, R., JANKE, W., SCHWAR-ZER, K., DUPHORN, K., KLIEWE, H. & WERNER, F.: Die deutsche Ostseeküste, Sammlung geologischer Führer 105, S. 206–219; Stuttgart (Borntraeger).
- JUGGINS, S. (2007): C2, Software for Ecological and Palaeoecological Data Analysis and Visualisation. User Guide Version 1.5. University of Newcastle
- JUEG, U. (2012): Dr. Gerhard Krille, ein passionierter Sammler für die Wissenschaft – Teil III: Zoologische Sammlung (außer Insekten). - Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Mecklenburg 12, 1, S. 37–57; Ludwigslust
- KAISER, K. (2004): Lake basin development in the Endinger Bruch area (Vorpommern, NE-Germany) during the Late Pleistocene and Early Holocene. – Zeitschrift für Geomorphologie 48, S. 461–480
- KAISER, K., BARTHELMES, A., CZAKÓ PAP, S., HILGERS, A., JANKE, W., KÜHN, P., THEUERKAUF, M. (2006): A Lateglacial palaeosol cover in the Altdarss area, southern Baltic Sea coast (northeast Germany): investigations on pedology, geochronology and botany. – Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw 85, 3, S. 197–220
- KAISER, K., LORENZ, S., GERMER, S., JUSCHUS, O., KÜSTER, M., LIBRA, J., BENS, O. & HÜTTL, R. F. (2012): Late Quaternary evolution of rivers, lakes and peatlands in northeast Germany reflecting past climatic and human impact – an overview. – E&G Quaternary Science Journal 61, S. 103–132.
- KAISER, K., ROTHER, H., LORENZ, S. GÄRTNER, P. & PAPEN-ROTH, R. (2007): Geomorphic evolution small river-lakesystems in Northeast Germany during the Late Quaternary. – Earth Surface Processes and Landforms **32**, S. 1516–1532
- KAISER, K., SCHOKNECHT, TH., JANKE, W., KLOSS, K. & PREHN, B. (2002): Geomorphologische, palynologische und archäologische Beiträge zur holozänen Landschaftsgeschichte im Müritzgebiet (Mecklenburg-Vorpommern). Eiszeitalter und Gegenwart 51, S. 15–32
- KALIS, A. J., MERKT, J. & WUNDERLICH, J. (2003): Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe – human impact and natural causes. Quaternary Science Reviews **22**, 1, S. 33–79

- KATZUNG, G. (2004): Quartär an den Steilküsten der Ostsee. – In: KATZUNG, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern: S. 292–332; Stuttgart (Schweizerbart).
- KOMÁREK, J. & JANKOVSKÁ, V. (2001): Review of the green Algal Genus Pediastrum; Implication for Pollenanalytical Research. – Bibliotheca Phycologica 108, 127 S.; Stuttgart (J. Cramer).
- KOLP, O. (1961): Beiträge zur Entwicklungsgeschichte der Mecklenburger Bucht. – Petermanns Geographische Mitteilungen, 105, S. 249–254
- KOLP, O. (1964): Der eustatische Meeresanstieg im älteren und mittleren Holozän, dargestellt auf Grund der Spiegelschwankungen im Bereich der Beltsee. – Petermanns geographische Mitteilungen 108, S. 54–62
- KOPCZYŃSKA-LAMPARSKA, K., CIEŚLA, A. & SKOMPSKI, S. (1984): Evolution of fossil Lake Basins of the Late Glacial and Holocene in the Cliff near Niechorze (Pomeranian Lakeland, Poland). Quarternary Studies in Poland 5, S. 39–58
- KOSSLER, A. & STRAHL, J. (2011): The Late Weichselian to Holocene succession of the Niedersee (Rügen, Baltic Sea) – new results based on multiproxy studies. – E&G Quaternary Science Journal 60, 4, S. 434–454
- KRAMMER, K. & LANGE-BERTALOT, H. (1986-1991): Bacillariophyceae. – 4 Bände; Stuttgart, Jena. (Gustav Fischer)
- KROLOPP, E., LOŽEK, V., JÄGER, K.-D. & HEINRICH, W.-D. (1977): Die Konchylien aus dem fossilen Tierbautensystem von Pisede bei Malchin. – Wissenschaftliche Zeitschrift der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Math.-naturwiss. Reihe 26, 3, S. 257–274
- LAMPE, R. (2008): Ausmaß und Folgen isostatischer Erdkrustenbewegungen an der Ostsee NE-Deutschlands.
 Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt 62, S. 179–182
- LAMPE, R., JANKE, W., ZIEKUR, R., SCHURICHT, R., MEY-ER, H. & HOFFMANN, G. (2002): The Late glacial/Holocene evolution of a barrier spit and related lagoonary waters – Schmale Heide, Kleiner Jasmunder Bodden and Schmachter See. – Greifswalder Geographische Arbeiten 27, S. 75–88
- LAMPE, R., LORENZ, S., JANKE, W., MEYER, H., KÜSTER, M., HÜBENER, TH., SCHWARZ, A. (2009): Zur Landschafts- und Gewässergeschichte der Müritz. – Forschung und Monitoring 2, 92 S.; Greifswald (Geozon Science Media)
- LAMPE, R., ENDTMANN, E., JANKE, W., & MEYER, H. (2010a): Relative sea-level development and isostasy along the NE German Baltic Sea coast during the past 9 ka. – E&G Quaternary Science Journal 59, 1/2, S. 3–20
- LAMPE, R., JANKE, W., TERBERGER, T., KOTULA, A. & KRI-ENKE, K. (2010b): Exkursion F. Die Insel Rügen [II] – Meeresspiegelanstieg, Nehrungsentwicklung und frühe Siedler. – In: LAMPE, R.; LORENZ, S. (Hrsg.): Eiszeitlandschaften in Mecklenburg-Vorpommern. – Exkursionsführer zur 35. Hauptversammlung der Deutschen Quartärvereinigung in Greifswald: S. 112–131

- LAMPE, R., JANKE, W., SCHULT, M., MENG, S. & LAMPE, M. (2016): Multiproxy-Untersuchungen zur Paläoökologie und -hydrologie eines spätglazial- bis frühholozänen Flachsees im nordostdeutschen Küstengebiet (Glowe-Paläosee/Insel Rügen). – E&G Quaternary Science Journal 65, S. 41–75
- LANGE-BERTALOT, H. & METZELTIN, D. (1996): Oligotrophie-Indikatoren. 800 Taxa repräsentativ für drei diverse Seen-Typen. – Iconographica Diatomologica, vol. 2. – 390 S.; Hoeltz Scientific Books
- LANGER, H (1954): Aufnahmebericht zur geologischen Übersichtskartierung (Maßstab 1:100.000) der Meßtischblätter Rerik, Kühlungsborn, Bad Doberan, Russow und Kröpelin. – Unveröffentl., LUNG Güstrow, 24 S.
- LATAŁOWA, M. & TOBOLSKI, K. (1989): Type Region P-u: "Baltic Shore". – Acta Palaeobotanica 29, S. 109–114.
- LORENZ, S. (2007): Die spätpleistozäne und holozäne Gewässernetzentwicklung im Bereich der Pommerschen Haupteisrandlage Mecklenburgs. – 349 S.; Dissertation Univ. Greifswald.
- LORENZ, S. & JANKE, W. (2010): Kliffabschnitt Meschendorf Fossile Seebecken im Kliffaufschluss. Sedimentations- und Siedlungsgeschichte am Rand der Wismarbucht.
 In: LAMPE, R.; LORENZ, S. (Hrsg.): Eiszeitlandschaften in Mecklenburg-Vorpommern. Exkursionsführer zur 35. Hauptversammlung der Deutschen Quartärvereinigung in Greifswald. S. 6 ff.; Greifswald (Geozon Science Media).
- LOŽEK, V. (1964): Die Quartärmollusken der Tschechoslowakei. – Rozpravy UUG 31: 374 S., Prag.
- LOŽEK, V. (1982): Faunengeschichtliche Grundlinien zur spät- und nacheiszeitlichen Entwicklung der Molluskenbestände in Mitteleuropa. – Academia Praha 92 (4): 106 S.
- LUDWIG, A. O. (1963): Ein belebtes spätglaziales Becken im Fischland. – Archiv der Freunde der Naturgeschichte in Mecklenburg 9, S. 81–87
- LUDWIG, A. O. (1964): Neue Fossilfunde im Spätglazial (Allerød) der Rostocker Heide. Archiv der Freunde der Naturgeschichte in Mecklenburg 10, S. 59–66
- LÜBKE, H. (2000): Submarine steinzeitliche Fundstellen in der Wismar-Bucht. – In: Skyllis, Zeitschrift für Unterwasserarchäologie 3, 1, S. 20–21
- LÜBKE, H. (2004): Spät- und endmesolithische Küstensiedlungsplätze in der Wismarbucht – Neue Grabungensergebnisse zur Chronologie und Siedlungsweise. Bodendenkmalpflege in Mecklenburg-Vorpommern 52, S. 83–110; Lübstorf
- MAKHNACH, N., ZERNITSKAJA, V., KOLOSOV, I. & SIMAKO-VA, G. (2004): Stable oxygen and carbon isotopes in Late Glacial-Holocene freshwater carbonates from Belarus and their palaeoclimatic implications. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 209, S. 73–101
- MANIA, D. (1973): Paläoökologie, Faunenentwicklung und Stratigraphie des Eiszeitalters im mittleren Elbe-Saalegebiet auf Grund von Molluskengesellschaften. – Geologie, Beiheft 78/79, 155 S.

- MENKE, B. (1968): Das Spätglazial von Glüsing. Eiszeitalter und Gegenwart, 19, S. 73–84. In Bock, W.; Menke, B; Strehl, E. & Ziemus, H: Neuere Funde des Weichselspätglazials in Schleswig-Holstein. Eiszeitalter und Gegenwart 35, S. 161–180
- MENZEL-HARLOFF, H. & STRAHL, J. (2012): Die weichselglaziale bis holozäne Schichtenfolge des Niedersees (Jasmund, Insel Rügen) – Teil 2: Die holozäne Molluskenfauna unter besonderer Berücksichtigung der terrestrischen Gastropoden. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 19, 1, 49–56
- MEYRICK, R. A. (2001): The development of terrestrial mollusk faunas in the 'Rheinland region' (western Germany and Luxembourg) during the Lateglacial and Holocene. –Quaternary Science Reviews 20, S. 1667–1675
- MEYRICK, R. A. & PREECE, R. C. (2001): Molluscan successions from two Holocene tufas near Northampton, English Midlands. – Journal of Biogeography 28, S. 77–93
- MLUV M-V (2009): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtsheft – Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick. – Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin, 102 S.
- NESJE, A. & DAHL, S.O. (2001): The Greenland 8200 cal. yr BP event detected in loss-on-ignition profiles in Norwegian lacustrine sediment sequences. – Journal of Quaternary Science 16, 2, S. 155–166
- NIEDERMEYER, R.-O. (2011): Wismar-Bucht und Umgebung. – In: NIEDERMEYER, R.-O., LAMPE, R., JANKE, W., SCHWARZER, K., DUPHORN, K., KLIEWE, H. & WERNER, F.: Die deutsche Ostseeküste, Sammlung geologischer Führer 105: 195–206; Stuttgart (Borntraeger).
- NIEDERMEYER, R. O.; KLIEWE, H. & JANKE, W. (1987): Die Ostseeküste zwischen Boltenhagen und Ahlbeck, 164 S.; Gotha (Hermann Haack).
- PRAGER, A., BARTHELMES, A., THEUERKAUF, M. & JOOSTEN, H. (2006): Non-pollen palynomorphs from modern Alder carrs and their potential for interpreting microfossil data from peat. – Review of Palaeobotany and Palynology 141, S. 7–31
- PROSCHWITZ, T.V., SCHANDER, C., JUEG, U. & THORKILD-SEN, S. (2009): Morphology, ecology and DNA-Bording distinguish *Pupilla pratensis* (Clessin, 1871) from *Pupilla muscorum* (Linnaeus, 1758) (Pulmonata: Pupillidae). – Journal of Molluscan Studies, 75, S. 315–322
- RASMUSSEN, S. O., Andersen, K. K., Svensson, A. M., Steffensen, J. P., Vinther, B. M., Clausen, H., Siggaard-Andersen, M.-L., Johnsen, S. J., Larsen, L. B., Dahl-Jensen, D., Bigler, M., Röthlisberger, R., Fischer, H., Goto-Azuma, K., Hansson, M. E., Ruth, U. (2006): A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. – Journal of Geophysical Research, 111
- REIMER, P. J. et al. (2004): IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. – Radiocarbon 46, S. 1029–1058
- REINHARD, H. (1959): Die mecklenburgische Ostseeküste und die Insel Rügen, Beiträge zur Entwicklung der Küstenlandschaft der südlichen Ostsee. Geographische Berichte. Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in der Deutschen Demokratischen Republik 10/11, S. 1–9

- RICHTER, G. (1968): Fernwirkungen der litorinen Ostseetransgression auf tiefliegende Becken und Flusstäler. – Eiszeitalter und Gegenwart 19, S. 48–72
- ROGGE, H. J. (1958): Bericht über die Strand- und Vorstranduntersuchungen zwischen Meschendorf und Fulgen. – Unveröffentlichter Bericht, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie M-V, Güstrow.
- SANKO, A., GAIGALES, A., RUDNICKAITĖ & MELEŠYTĖ, M. (2008): Holocene malacofauna in calcareous deposits of Dūkšta site near Maišiagala in Lithuanian. – Geologija 50, 4, 64, S. 290–298
- SCHOKNECHT, TH. (1996): Pollenanalytische Untersuchungen zur Vegetations-, Siedlungs- und Landschaftsgeschichte in Mittelmecklenburg. – Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mecklenburg-Vorpommerns 29: 68 S. – Lübstorf (Archäologisches Landesmuseum M-V)
- SCHÜLER, G. (1987): Ingenieurgeologische Stellungnahme zu den Verhältnissen im Steiluferbereich des Campingplatzes Meschendorf. – Unveröff., Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow, 3 S.
- SCHULZ, W. (1988): Ingenieurgeologisches Gutachten zur Steilufersicherung bei Rerik –Meschendorf. – Unveröffentl., StAUN Rostock, 7 S.
- SCHULZ, W. (1994): Strukturelle Typisierung der Steilufer an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns. – Die Küste 56, S. 67–77
- SCHULZ, W. (1996): Bericht über die Veränderungen am Kliff zwischen Rerik, Meschendorf und dem Kägsdorfer Bach durch das Sturmhochwasser vom 3./4. 11. 1995. – Unveröff., Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow.
- STRAHL, J. (1996): Pollenanalytische Untersuchung eines Vibrokernprofils aus dem NW-Teil des Greifswalder Boddens, südliche Ostsee. - Senckenbergiana maritima 27, 1-2, S. 49–56
- STRAHL, J. (1999): Die Vegetationsgeschichte des Herthamoores in der Stubnitz (Halbinsel Jasmund, Rügen). – Greifswalder Geowissenschaftliche Beiträge 6, S. 437– 477
- STRAHL, J. (2005): Zur Pollenstratigraphie des Weichselspätglazials von Berlin-Brandenburg. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 12, S. 87–112
- STRAHL, J. & KEDING, E. (1996): Pollenanalytische und karpologische Untersuchung des Aufschlusses Hölle unterhalb Park Dwasieden (Halbinsel Jasmund, Insel Rügen), Mecklenburg-Vorpommern. – Meyniana 48, S. 165–184
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. - 622 S., Stuttgart (Schweizerbart)
- SVENSSON, A., ANDERSEN, K. K., BIGLER, M., CLAUSEN, H. B., DAHL-JENSEN, D., DAVIES, S. M., JOHNSEN, S. J., MUSCHELER, R., RASMUSSEN, S. O., RÖTHLISBERGER, R., STEFFENSEN, J. P. & VINTHER, B. M. (2006): The Greenland Ice Core Chronology 2005, 15–42 ka. Part 2: comparison to other records. – Quaternary Science Reviews 25, 23-24, S. 3258–3267

- TAUBER, F. (2007): Sea floor exploration with sidescan sonar for geo-archeological investigations. In: HARFF, J. & LÜTH, F. [Eds.]: SINCOS Sinking coasts. Geosphere, Ecosphere and Anthroposphere of the Holocene Southern Baltic Sea. Bericht der Römisch-Germanischen Kommission 88, S. 67–78
- TINNER, W. & AMMANN, B. (2005): Reaktionsweisen von Gebirgswäldern – schneller als man denkt. – In: GAME-RITH, W., MESSERLI, P., MEUSBURGER, P. & WANNER, H. (Eds.): Alpenwelten – Gebirgswelten. Inseln, Brücken, Grenzen. – 54. Deutscher Geographentag in Bern 2003, Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlung: S. 95–101; Heidelberg; Bern u. a.
- GÜK 200 (1996): Geologische Karte von Mecklenburg-Vorpommern: Karte der quartären Bildungen 1:200000, Blatt 12/13 (Bad Doberan/Rostock). – Schwerin (Geologisches Landesamt Mecklenburg-Vorpommern.
- VAN GEEL, B. (1978): A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and The Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals. – Review of Palaeobotany and Palynology 25, S. 1–20
- VAN GEEL, B. & APTROOT, A. (2006): Fossil ascomycetes in Quaternary deposits. – Nova Hedwigia 82, S. 313–329
- WENNRICH, V. et al. (2005): Late Glacial and Holocene history of former Salziger See, Central Germany, and its climatic and environmental implications. – International Journal of Earth Sciences 94, 2, S. 275–284
- WIJMSTRA, T. A., SMIT, A., VAN DER HAMMEN, T. & VAN GEEL, B. (1971): Vegetational succession, fungal spores and short-term cycles in pollen diagrams from the Wietmarscher Moor. – Acta Botanica Neerlandica 20, 4, S. 401–412
- ZANDER, R. (1934): Die rezenten Änderungen der mecklenburgischen Küste. – Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Rostock, Beiheft 1, 78 S; Rostock.
- ZETTLER, L. M., JUEG, U., MENZEL-HARLOFF, H., GÖLL-NITZ, U., PETRICK, S., WEBER, E. & SEEMANN, R. (2006): Die Land- und Süßwassermollusken Mecklenburg-Vorpommerns. 318 S.; Schwerin (Obotritendruck).
- ZIMMERMANN, K. (1929): Acanthinula lamellata Jeffr. (Gastrop. Pulm) in Mecklenburg. – Archiv des Vereins der Freunde der Naturgeschichte in Mecklenburg 4, S. 36–43
- ZOLLER, H., SCHINDLER, C., RÖTHLISBERGER, H. (1966): Postglaziale Gletscherstände und Klimaschwankungen im Gotthardmassiv und Vorderrheingebiet. – Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel 77, S. 97–164

Autoren:

Roberto Hensel, Wolfgang Janke, Stefan Meng, Sebastian Lorenz

Institut für Geographie und Geologie, Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße 16, D-17489 Greifswald sebastian.lorenz@uni-greifswald.de Cottbus

S. 125–136

Die Glaziallandschaften im Nordosten Brandenburgs im Focus der Märkischen Eiszeitstraße (e.V.)

The glacial landscapes in the northeast of Brandenburg in the focus of the Märkische Eiszeitstraße (e.V.)

Gerd W. Lutze & Joachim Kiesel

Einleitung

Seit über 25 Jahren widmet sich die Märkische Eiszeitstraße (e. V.) regionalen geowissenschaftlichen und kulturgeschichtlichen Themen, die im engen Bezug zur eiszeitlichen Genese der Naturräume und Landschaften stehen, aber auch dem Wirken der Menschen seit ihrer frühen Besiedlung im Neolithikum bis zur Neuzeit. Das Wirken der Gesellschaft zur Erforschung und Entwicklung der Märkischen Eiszeitstraße (e. V.) spiegelt sich in zahlreichen Vortragsveranstaltungen, in den Erkundungen landschaftlich und kulturell Sehenswertem durch Exkursionen sowie in Publikation im Internet und in der Herausgabe der Reihe Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße wider. Bei den Bemühungen um die populärwissenschaftliche Verbreitung neuester geowissenschaftlicher Erkenntnisse aus der Region und darüber hinaus bewährt sich eine lange Partnerschaft mit namhaften Geowissenschaftlern.

Im Verlaufe der Zeit entstand mit den Publikationen ein wohl einmaliges "Kompendium" des Wissens sowohl über geound naturwissenschaftliche als auch über regional- und kulturgeschichtliche Themen für den Nordosten Brandenburgs.

Mit der Benennung einer *Landschaft des Jahres* für die Landkreise Barnim und Uckermark begann im Jahr 2017 eine neue Serie, mit der das besondere Augenmerk der Besucher und Einwohner der Region auf ausgewählte Landschaften gerichtet werden soll. Die Landschaften werden mit einem ganzheitlichen Blick auf die Region vorgestellt. Beginnend mit ihrer glazialen Entstehungsgeschichte werden ihren Eigenheiten und Schönheiten erkundet, um damit auch Ausflugs- und Wanderziele mit neuem Wissen und Entdeckungsfreude zu verbinden.

Zur Methodik der Landschaftsvisualisierung

Für die Präsentation der Glaziallandschaften kommen moderne Technologien der Visualisierung zur Anwendung. Oftmals erschließen sich gerade die eiszeitlich geformten, relativ flachen Landschaften dem Betrachter oder Erkunder nicht so offenkundig, da z. B. charakteristische geomorphologische Bildungen sich nicht so deutlich abheben und erkennbar sind. Endmoränenzüge und lange ehemalige Abflussrinnen werden meist vom Wald "verdeckt". Die charakteristischen Landschaftsformen lassen sich nur eingeschränkt vom Boden oder auch aus der Luft fotografisch wahrnehmen. Deshalb werden bei der Präsentation der Landschaft des Jahres neuartige virtuelle, mit Computerprogrammen modellierte und komponierte Sichten (Views) erarbeitet. Landschaftsvisualisierungen - unter Einbeziehung von digitalen Geländemodellen unterschiedlicher Maßstäbe - haben sich für Landschaftsbeschreibungen als notwendig und hilfreich erwiesen. So wie mit einem Mikroskop sich dem Betrachter der Mikrokosmos erschließt, bieten computergestützte Visualisierungen den gewünschten makroskopischen Überblick über Landschaften. Es lässt sich fast ein idealer Landschaftsblick erzeugen, ohne die Wirklichkeit zu verfremden (DALCHOW et al. 2012).

Dabei werden Geodaten verschiedener Quellen und Qualitäten überlagert und integriert. Die dabei entstehenden virtuellen Sichten (Views) können besonders interessante räumliche Konfigurationen und Kompositionen abbilden. Sie können z. B. fachliche Zusammenhänge zwischen eiszeitlich vorgeprägten naturräumlichen Formen und den aktuellen Landnutzungsmustern veranschaulichen. Es ist wenig überraschend, dass die Grundmoränen mit fruchtbaren Böden bevorzugt ackerbaulich genutzt werden, dass die großen Sanderflächen mit trockenen, sandigen, nährstoffarmen Standorten ausgedehnte Kiefernwälder tragen und dass die vermoorten Niederungen die Standorte des natürlichen Grünlandes sind. Den Verlauf z. B. des Eberswalder Urstromtals, die Lage und Struktur von Dünenfeldern in Waldgebieten oder der Verlauf der nicht immer tief eingeschnittenen und langen Rinnen (z. B. der Gamengrund und die Werbellinsee-Rinne) kann in der Natur nur ausschnittsweise betrachtet werden. Die Landschaftsvisualisierung eröffnet neue Wege zur Vermittlung eines vertieften Landschaftsverständnisses.

Im Folgenden sollen die bisher bearbeiteten Landschaften kurz vorgestellt werden. Ausführliche Beschreibungen können den Bänden 18 bis 23 in der Reihe *Entdeckungen* *entlang der Märkischen Eiszeitstraße* (www.Maerkischeeiszeitstrasse.de) entnommen werden.

Der Chorin-Parsteiner Endmoränenbogen und das Becken des Parsteiner Sees

Der Chorin-Parsteiner Endmoränenbogen mit dem Becken des Parsteiner Sees – beschrieben im Heft 22 der *Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße* (LUTZE & POHLE 2020) – ist Teil der klassischen quartärgeologischen Meile. Die Elemente der Glazialen Serie und insbesondere der Endmoränenbogen der Pommerschen Phase sind prägnant und in übersichtlicher Nähe ausgebildet. Mit Hilfe der Visualisierung konnten diese Strukturen akzentuiert dargestellt werden (Abb. 1), einschließlich der Spezialbögen, wie sie zuerst von BERENDT & SCHRÖDER (1891, 1892, 1897) beschrieben wurden.

Hier ist der Choriner Spezialbogen ein Teil des Parsteiner Hauptbogens, wie von SCHLAAK (2020a) ausdrücklich hingewiesen wird. Mit Respekt auf den Bekanntheitsgrad von Chorin wurde für die Gesamtendmoräne die Bezeichnung *Chorin-Parsteiner Endmoränenbogen* gewählt. In vielen Publikationen wird er auch nur als Choriner Endmoränenbogen bezeichnet. Die Verwendung der digitalen Geologischen Übersichtskarte 1:100 000 des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburgs erbringen in Verbindung mit der morphologischen Abbildung der Landschaft eine stimmige Erklärung der Landschaftsformen (Abb. 2). So können interessierten Betrachter die geomorphologischen Strukturen anschaulich erklärt werden.

Diese geomorphologische Abbildung verweist aber auch auf Überprüfendwertes z. B. bei der Grenzziehung der Endmoränen, auf das hier nicht näher eingegangen werden kann.

Die geomorphologisch reich gegliederte Landschaft führte zu einer vorzüglichen naturräumlichen Ausstattung mit Biotopen und Artendiversität bzw. verschiedenartigen Ökosystemen. Akteure vom Forschungsstandort Eberswalde bzw. Berlin erkannten frühzeitig diesen Schatz, aber auch seine Gefährdungen. Im fruchtbaren Zusammenwirken vom Forstmeister M. Kienitz, Leiter des Choriner Forstlehrreviers, und dem preußischen Landwirtschaftsminister H. Conwentz wurde 1907 mit dem Plagefenn das erste preußische Naturschutzgebiet (NSG) eingerichtet (damals 177 ha). In den 1950er bis 1980er Jahren folgten weitere NSG und das große Landschaftsschutzgebiet "Choriner Endmoränenbogen". Als eine Kernstruktur entstand aus ihr schließlich das Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin. Diese Landschaft wurde und wird geologisch, siedlungsgeschichtlich und naturschutzfachlich als auch waldökologisch umfangreich untersucht und beschrieben (u.a. Schroeder 1994, Schlaak 2020b).

Im erwähnten Band 22 der *Entdeckungen* wird auf ein besonderes Phänomen der angespannten Wasserbilanz im nordöstlichen Brandenburg aufmerksam gemacht (KRONE & MICHELS 2020). Die Abb. 3 veranschaulicht das oberirdische Wassereinzugsgebiet des Beckens des Parsteiner Sees,



Abb. 1: Morphologie des Chorin-Parsteiner Endmoränenbogens und des Beckens des Parsteiner Sees

Fig. 1: Morphology of the Chorin-Parsteiner terminal moraine arch and the basin of Lake Parstein



Abb. 2:Chorin-Parsteiner Endmoränenbogen und Becken des Parsteiner Sees – geologische ÜbersichtFig. 2:Chorin-Parsteiner terminal moraine arch and basin of Lake Parstein – geological overview



Abb. 3: Oberirdisches Wassereinzugsgebiet des Parsteiner Sees

Fig. 3: Above ground water catchment area of Lake Parstein



Abb. 4: Nettelgraben

Fig. 4: Nettelgraben

das über einen Graben mit dem Einzugsgebiet des Ziethener Seebruchs verbunden ist und so auf eine Fläche von ca. 105 km² kommt. Einbezogen sind weitere 12 Seen und 256 kleinere Standgewässer, darunter auch größere Sölle. Der einzige oberirdische Abfluss führt über den von Mönchen im 13. Jahrhundert geschachteten Nettelgraben. Über ihn fließt schon seit Jahren kaum noch Wasser!

Die Joachimsthaler Glaziallandschaft und der Grumsin

Der Pommerschen Hauptendmoräne des Chorin-Parsteiner Bogens nach Nordwesten folgend, erreicht man über den Joachimsthaler Endmoränenbogen die Joachimsthaler Glaziallandschaft mit dem Werbellin- und dem Grimnitzsee und den Grumsin. Diese Landschaft steht geohistorisch in engem Bezug zur Landschaft des Chorin-Parsteiner Endmoränenbogens. Bei der schweren Geburt der Inlandeistheorie wurden im Joachimsthal-Choriner Raum erste modellhafte Vorstellungen entwickelt und kartografisch dargestellt (MARCINEK 2018).

Die Landschaftsvisualisierung des Gebietes bringt die morphologischen Hauptstrukturen anschaulich in den Mittelpunkt der Betrachtung (Abb. 5).

Die Pommersche Endmoräne, hier relativ schmal ausgebildet, kommt aus dem Raum von Ziethen und verläuft zunächst zwischen dem Grimnitzsee im Norden und dem Werbellinsee im Süden und führt schließlich nach Nordwesten. Im Hinterland der Endmoräne liegt das flache Becken des Grimnitzsees. Von der Endmoräne im Nordwesten nach Süden verläuft der große, komplett bewaldete Flächensander der Schorfheide. Durch das Einarbeiten von Laserscandaten bei der Geländemodellierung kommen auch die Dünenfelder in der Schorfheide eindrucksvoll zur Ansicht. In zentraler Lage erstreckt sich die Rinne des Werbellinsees von Nordost nach Südwest. Wenig auffällig beginnt sie westlich von Althüttendorf, hat sich dann aber steil und tief in die Hochfläche eingeschnitten. Sie gibt dem bis 55 m tiefen Rinnensee ein wundervolles Bett. Schließlich gelangt sie mit dem Werbellinkanal bis zum Eberswalder Urstromtal, das sie ursprünglich noch querte und bis in die Hochfläche des Barnim gelangte. JUSCHUS (2018) beschreibt anschaulich und plausibel die Genese der Rinne.

Ihre besonderen landschaftlichen Formationen sind die großen Wälder vom Westen der Schorfheide bis zum Grumsiner Forst im Nordosten, dem wunderschönen langgestreckten, tiefen Werbellinsee und dem flachen ovalen Grimnitzsee, beide vom hügeligen Endmoränenumfeld einbettet. Diese Landschaftskonstellation macht sie schon seit langem für die ehemaligen Landesfürsten als auch für Bewohner und Besucher attraktiv und erlebenswert.

Sowohl die modellhaft geformte geomorphologische Landschaftsstruktur als auch die reichhaltige naturräumliche Ausstattung mit unterschiedlichen, weiträumigen, unzerschnittenen Habitaten und hoher Artenvielfalt verleihen dem Gebiet eine hohe Schutzwürdigkeit. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass die ausgewählte Landschaft zu den Kerngebieten des Biosphärenreservats Schorfheide-Chorin und des Nationalen Geoparks Eiszeitland am Oderrand gehört.

Das bei dieser Art der Darstellung sehr massiv erscheinende große, kompakte Stauchungsgebiet des Grumsin im Nordosten ist auf Grund seiner geomorphologischen Struktur seit langer Zeit ein ausgewiesener Waldstandort. Die hier schon naturgemäß ausgebildeten Rotbuchen-Waldökosysteme erlangten 2011 den Status des UNESCO-Weltnaturerbes "Alte Buchenwälder".



Abb. 5: Morphologie der Joachimsthaler Glaziallandschaft mit dem Grumsin und dem Verlauf der Pommerschen Endmoräne (rot gepunktete Linie)

Fig. 5: Morphology of the Joachimsthal glacial landscape with the Grumsin and the course of the Pomeranian terminal moraine (red dotted line)

Die Lychen-Templiner Wald- und Seenlandschaft

Die abwechslungsreiche Wald- und Seenlandschaft mit den kleinen Städten Lychen und Templin im Südwesten der Uckermark schließt sich geografisch und geomorphologisch der Joachimsthaler Glaziallandschaft entlang der Pommerschen Endmoräne nach Nordwesten an. Sie ist mit dieser geomorphologisch eng verwandt, aber dennoch von sehr eigenem Charakter (Abb. 6).

Der weitgeschwungene uckermärkische Bogen der Pommerschen Endmoräne setzt im Temmener Raum an und erstreckt sich diagonal nach Nordwesten in Richtung Feldberg (Mecklenburg-Vorpommern). Insgesamt ist er nicht sehr stark ausgebildet. Dafür nimmt ein ausgebreiteter Flächensander den überwiegenden Raum ein. Er kann als die Fortsetzung des Schorfheidesanders angesehen werden, weshalb das Gebiet südwestlich zwischen Lychen und Templin auch als *Kleine Schorfheide* – ehemals ein riesiger Truppenübungsplatz – bezeichnet wird. Die sandigen, nährstoffarmen Böden zeichnen dafür verantwortlich, dass die Landschaft überwiegend bewaldet ist. Lediglich inselartige Grundmoränen ragen südwestlich von Templin und nordwestlich von Lychen aus dem Sander (Abb. 7). Hier ist Ackerbau möglich. Fast würde der Ausdruck Streusandbüchse, der von Theodor Fontane für die weite Umgebung von Berlin geprägt wurde, für diese Landschaft zutreffen. Das prägende Merkmal dieser Landschaft ist jedoch ihr Netz von glazialen Abflussrinnen (Abb. 6). Bei Lychen und bei Templin scheinen sie sich sogar zu kreuzen, was damit erklärt wird, dass sie unterschiedlichen Alters sind und die Gletscher etwas unterschiedlichen Fließrichtungen folgten. Ohne diese Rinnen wäre diese Landschaft ein wenig attraktives Waldgebiet.

In den Rinnen entwickelten sich zahlreiche Rinnenseen. Sowohl um Lychen als auch um Templin bildeten sich faszinierende Seenkreuze und die Städtchen sind anziehende Tourismuszentren. Im Untergrund aufgeschlossenes geothermisches Potenzial fördert den ganzjährigen Tourismus.

Naturnahe Seen und Feuchtgebiete in der wenig gestörten, großräumig geschützten Landschaft bewahrten eine artenreiche Naturraumausstattung und z. B. Lychen als Hotspot der Libellenartendiversität in Deutschland.



Abb. 6:Morphologie der Lychen-Templiner Wald- und Seenlandschaft – mit Netz von glazialen AbflussrinnenFig. 6:Morphology of the Lychen-Templiner forest and lake landscape – with network of glacial drainage channel



Abb. 7: Lychen-Templiner Wald- und Seenlandschaft – geologische Übersicht

Fig. 7: Lychen-Templiner forest and lake landscape – geological overview

Die Uckerseenrinne und das Uckertal

JUSCHUS (2017) führt in die Landschaft der Uckerseenrinn und des Uckertals ein: "Schon mit einem Blick auf eine Topographische Karte fällt auf, dass das Uckertal für Brandenburg einige Besonderheiten aufzuweisen hat. Landschaftlich tendiert es schon eher nach Mecklenburg-Vorpommern und nicht nach Brandenburg. Dies wird an der auffälligen Verwandtschaft zu den großen Mecklenburg-Vorpommerschen Talungen, wie dem Tollense- und dem Peenetal deutlich. Es ist ein weites, mit großen Seen durchsetztes "Flusstal", welches außerdem kräftig in seine Umgebung eingetieft ist (Abb. 8).

Allerdings ist der zugehörige Fluss alles andere als groß, sondern bescheiden. Auch hier bestehen Ähnlichkeiten zu den erwähnten Tälern in Mecklenburg-Vorpommern. ... Es wird schnell klar, dass die Ucker das Gebiet, welches sie durchfließt, nicht selbst als Erosionstal geschaffen hat. Sie benutzt hier lediglich eine tief liegende, eiszeitlich geformte Landschaft." Maßgeblich für die Entstehung der Rinne war wohl schon eine Saale-kaltzeitliche Depression. Das sich bevorzug sammelnde Schmelzwasser vertiefte unter dem Weichsel-zeitlichen Eisvorstoß die Rinne und führte so zu ihrer Hauptausformung (JUSCHUS 2017). In dieser Rinne entwickelten sich der große flache Unteruckersee und der tiefere Oberuckersee. Letzterer teilt diesen durch einen längsverlaufenden Landrücken, der nicht ganz den Seespiegel erreicht, fast in zwei Rinnenseen. Der Abfluss des Schmelzwassers erfolgte nach Südwesten in Richtung Temmen, wo ein großes Gletschertor der Pommerschen Eisrandlage den Austritt ermöglichte. JUSCHUS (2017) verweist jedoch darauf, dass gerade in diesem Raum manche eiszeitlichen Vorstellungen weiterer Untersuchungen bedürfen. Ungeachtet dessen, entstand hier eine wundervolle Landschaft, die neben den beiden großen Seen weitere Kleine aufnimmt und von der vom Süden kommenden namensgebende Ucker durchströmt wird. Insbesondere die den Oberuckersee umgebenden Hochflächen ergeben – insbesondere bei einem Blick von einem Boot – ein fantastisches Panorama.

Die Landschaftsvisualisierungen des Gebietes offenbarten zwei überraschende Phänomene: zunächst auf der östlichen Hochfläche zwischen Melzow und Polzen einen Schwarm von auffälligen "Plateaubergen", die als Kameshügel gedeutet werden (Abb. 9) und auf der westlichen Hochfläche in der Landschaft um den Böckenberg drei schmale (< 100 m) parallel zueinander verlaufende, sehr lang gestreckte Niederungen (Abb. 10). Für sie gibt es noch keine schlüssige Erklärung (JUSCHUS 2017).





Abb. 8: Die Uckerseenrinne und das Uckertal (links: Nordteil mit Unteruckersee und rechts Südteil mit Oberuckersee)

Fig. 8: The Ucker lake channel and the Ucker valley (left: northern part with Unterucker lake and right southern part with Oberucker lake)



Abb. 9: Schwarm von Kameshügeln in der Landschaft zwischen Melzow und Polßen

Fig. 9:

Swarm of kame hills in the landscape between Melzow and Polßen



Abb. 10:

Drei parallel zueinander verlaufende Niederungen in der Landschaft um den Böckenberg

Fig. 10: Three parallel lowlands in the landscape around the Böckenberg

Das Biesenthaler Becken – ein zeitweiliger Eiskeller im Barnim

Das Biesenthaler Becken, beschrieben im Band 18 der *Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße*, ist in den mittleren Norden der Hochfläche des Barnim eingesenkt und nach Norden zum Eberswalder Urstromtal geöffnet. Naturräumlich wird es schon dem westlichen Barnim zugerechnet. Mit der Beschreibung der glazialen und postglazialen Genese wird besonders auf die landschaftsgestaltende Kraft von Toteis aufmerksam gemacht (GÄRTNER 1993, 2017, Nitz 2004).

Die eiszeitliche und nacheiszeitliche Entstehungsgeschichte als auch die gegenwärtige wunderbare Ausprägung der Beckengestalt sind dem Besucher aufgrund seiner "Unübersichtlichkeit" nur schwer zu erklären. Die Ausformung des Beckens ist im Gelände nur begrenzt verständlich nachvollziehbar zu erkennen. Selbst diverse fotografische Abbildungen vom Boden, aus der Luft oder vom Aussichtsturm auf dem Schlossberg von Biesenthal bringen wenig Erhellung. Neue digitale "Views" visualisieren jedoch anschaulich seine Lage im Barnimplateau und seine "amöbenartige" Landschaftsgestalt (Abb. 11). Sehr eindrucksvoll erscheinen im Bild auch die ehemaligen Abflussbahnen. Der nach Norden zum Eberswalder Urstromtal führende breite Abfluss fungiert heute als das Tal der Finow dem Weg zur Oder. Die (ursprünglich, eiszeitlich) nach Westen geneigte Rinne hat am Hellsee ihren Anfang. Sie bildet eine lange Seenkette über den Obersee bei Lanke, den Liepnitzsee mit seiner Insel, den Wandlitzer See, den Rahmer See und weiteren kleinen Seen bis zum Berliner Urstromtal. Ein Blick in das Biesenthaler Becken zeigt eine vermoorte

Niederungslandschaft von Teilbecken und z.T. mit verlandeten Seen und zahlreichen kleinen Fließen sowie von Hügeln, die eine Kameslandschaft formieren.

Erwähnt werden sollten aber auch die beiden Dünenfelder nördlich des Biesenthaler Beckens (Abb. 12). Sie befinden sich schon im "Liefergebiet" ihres Baumaterials, im Eberswalder Urstromtal mit seinen hoch- und periglazialen Ablagerungen.

Abb. 11: Biesenthaler Becken

Fig. 11: Biesenthal Basin





Abb. 12: Biesenthaler Becken mit Teilbecken und Hügeln (Kameslandschaft) Fig. 12: Biesenthal basin with sub-basins and kame hills (kames lands cape)

Das Untere Odertal

Das Untere Odertal beginnt im Süden zwischen Oderberg und Cedynia (Zehden). Es erstreckt sich im Norden bis zum Stettiner Haff. Mit leichten Bögen schwingt es zunächst nach Osten und dann nach Westen, um anschließend fast direkt nach Norden zu schwenken (Abb. 13).

Das Tal ist ca. 2 bis 7 km breit und ca. 60 km lang. Die Talsohle weist nur geringe Reliefunterschiede auf. Bei Hohensaaten erreicht sie 150 bis 200 cm über NHN und bereits 30 km nördlich zwischen Piasek (Peetzig) und Zaton Dolny (Niedersaaten) bis zur Einmündung der Schwedter Querfahrt liegt sie schon auf Ostseeniveau.

Nach Norden erweitert sich das relativ schmale Odertal, nachdem es das Lunow-Bielineker Tor (1,5 km) passiert hat, zum Stolpe-Piaseker Becken (7,5 km breit) und verengt sich am Criewen-Raduner Tor wieder auf 2,5 km. Nach Norden folgen die weiteren Beckenareale von Schwedt-Widuchowa und von Gryfino. Als markante Erscheinung zweigt das Randow-Welsebruch auf der Höhe von Schwedt zunächst nach Westen ab und schwenkt dann nach Norden. Hier durchfloss der erste Urstrom das Gebiet, der in den Baltischen Eisstausee mündete.

Baltischen Eisstausee mündete.

Abb. 13: Morphologie des Unteren Odertals Fig. 13: Morphology of the Lower Oder Valley

10 1

Die geomorphologischen Gegebenheiten im Unteren Odertal und den angrenzenden Hochflächen mit ihren End- und Grundmoränenbildungen und Hochflächensanden veranschaulicht Abb. 14.

Auf dem Weg von Süd nach Nord überwand die Oder im Raum zwischen Oderberg-Liepe und der heutigen Neuenhagener Oderinsel zunächst die Endmoräne der Pommern-Phase.

Dieser Vorgang wiederholte sich zeitlich nachfolgend entlang der Endmoräne der Angermünde-Chojna-Phase. Die Endmoränen dieser Phase sind gekennzeichnet durch den Reichtum an erratischen Blöcken. In der Nähe von Krzymó (Hanseberg) kann einer der beeindruckendsten Findlinge im Gebiet der Unteren Oder erkundet werden. Schließlich musste auch die Endmoräne der Penkun-Mielęcin Subphase durchbrochen werden.



Abb. 14:Geomorphologie des Unteren OdertalsFig. 14:Geomorphology of the Lower Oder Valley

Hohen-

aaten

Stellvertretend für eine Vielzahl von Geologen, die das Untere Odertal und sein Umfeld erkundet haben, stehen der deutsche Geologe Fritz Brose (u. a. BROSE 1998) und der polnische Geologe Andrzej Piotrowski (Szczecin). Für Geologen und Geohistoriker ist der kleine Ort Stolpe von Interesse, der Geburtsort von *Leopold von Buch* (1774– 1853), dem Mitbegründer der Geologie in Deutschland.

Nach Flussregulierungen, Eindeichungen und Meliorationen im oberen und mittleren Flussabschnitt der Oder erfolgten insbesondere im Zeitraum von 1906-1929 auch im unteren Tal umfangreiche Bauarbeiten. Am 4. August 1904 stimmte der Preußische Landtag dem Gesetz "Zur Verbesserung der Vorflut in der unteren Oder" zu bewilligte die dafür notwendigen Mittel von rund 47 Millionen Mark. Im Ganzen gab es 38 Millionen Kubikmeter Bodenbewegungen, davon 25 Millionen Kubikmeter Nassbaggerleistungen. Die hergestellten Durchstiche hatten eine Gesamtlänge von 33 km. Insgesamt wurden 177 km Deichanlagen, von denen 51 km Winterdeiche und 126 km Sommerdeiche waren, gebaut. Hinzu kamen 129 Kunstbauten zur Bewirtschaftung der Polder, darunter 21 Kahnschleusen, 30 Deichlücken, 10 Fähren, 7 Ablagen, 2 Düker und 2 große Wehre und fast 30 Brücken. "Nach Abschluss der umfänglichen Kultur- und Regulierungsarbeiten hatte sich die Landschaft im Unteren Odertal einschneidend und grundsätzlich verändert. Zwei schiffbare Hauptströme entlang der beiden Talränder, mittig gelegene Flutungspolder, die von Sommer- und Winterdeichen umschlossen waren, prägten das Bild. Ein- und Auslassbauwerke in den Deichen sowie Schöpfwerke ermöglichten unter Berücksichtigung der Oderwasserstände zumindest zeitweilig die Flutung der Niederungswiesen (WILKE 2021)".

Trotz der vor 100 Jahren intensiv kulturbautechnisch Umgestaltung zu einer Deichlandschaft, wird das Untere Odertal heute als eine der letzten mitteleuropäischen noch weitgehend intakten Flussauenlandschaften angesehen. Bezieht man die Hangbereichen zu den beiderseits der Odertalung gelegenen Hochfläche ein, so wird ein Landschaftsverbund von großer Vielfalt und Dynamik vorgefunden. Bezogen auf den gesamten Landschaftsraum existieren von den Flussauen bis zu den echten Trockenrasenareale kontrastreiche ökologische Lebensräume. Aufgrund des besonderen Artenreichtums der Trockenrasen im Verbund mit den diversen andersartigen Lebensräumen gehört das untere Odergebiet zu den an Gefäßpflanzen reichsten Gebieten Norddeutschlands (BENKERT et al. 1996) – ein absoluter "Hot-Spot" der Biodiversität.

Seit Mitte der 1990er Jahre engagiert sich der *Nationalpark Unteres Odertal* – nicht ganz konfliktfrei – für die Erhaltung und Entwicklung dieser Flusslandschaft.

Zusammenfassung

Die im Rahmen einer Folge von Landschaftsbeschreibungen der Märkischen Eiszeitstraße (e.V.) jeweils als *Landschaft des Jahres* für das Gebiet in Nordosten Brandenburgs vorgestellten Gebiete sind von den wesentlichen eiszeitlichen Gestaltungskräften, der Gletscherdynamik (Glaziale Serie), der Wirkung von subglazialem Schmelzwasser (Rinnenbildungen) und dem Abschmelzen von Toteisblöcken, geformt. Obwohl alle vorgestellten Areale sehr verwandte Glaziallandschaften darstellen, haben sie doch ihre jeweiligen Besonder- und Eigenheiten, die sich auch in einem ausgeprägten Facettenreichtum an Lebensräumen widerspiegelt.

Die Herausgeber der Märkischen Eiszeitstraße (e. V.) dankbar für die Unterstützung bei der "Theorie-betonten" Beschreibung der Landschaften durch die geowissenschaftlichen Experten aus Berlin und Brandenburg. Wir könne zwar keine eigenen Forschungen tätigen, aber doch bei der Verbreitung neuer geowissenschaftlicher Erkenntnisse mitwirken. Gelegentlich aber vielleicht auch solche anregen.

Summary

In the context of a series of descriptions of landscapes, the *Märkische Eiszeitstraße (e. V.)* presents *landscapes of the year* for Northeast of Brandenburg. They are shaped by the essential glacial design forces, glacial dynamics (glacial series), the effect of subglacial meltwater (channel formation) and the melting of dead ice blocks. They have their respective peculiarities and peculiarities, which are also reflected in a pronounced diversity of habitats.

The editors of the *Märkische Eiszeitstraße* (e. V.) are grateful for the support of the geoscientific experts from Berlin and Brandenburg in the "theory-emphasized" description of the landscapes. Although we cannot carry out our own research, we can contribute to the dissemination of new geoscientific findings. Occasionally, however, perhaps also stimulate such.

Literatur

- BENKERT, D., F. FUKAREK & H. KORSCH (Hrsg.) (1996): Verbreitungsatlas Farn- u. Blütenpflanzen Ostdeutschlands (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen). Gustav Fischer, Jena Stuttgart Lübeck Ulm, 615 S.
- BERENDT, G. & H. SCHRÖDER (1891, 1892, 1897): Geologische Spezialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten, Blatt Hohenfinow.
- BROSE, F. (1998): Genese holozäner Flussauen, dargestellt am Beispiel des Unteren Odertals. Brandenburgische Geowiss. Beitr., H. 1, S. 7–13.

- DALCHOW, C., J. KIESEL & G. LUTZE (2012): Visualisation and Interpretation of Moraine Landscapes in North-East Germany – the Ideal View on Landscape. Die Erde, 143, H. 1–2, pp. 1–21.
- GÄRTNER, P. (2017): Facetten der Landschafts- und Nutzungsgeschichte des Biesenthaler Beckens. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 18, S. 16–31.
- GÄRTNER, P. (1993): Beiträge zur Landschaftsgeschichte des Westlichen Barnim. Berliner geogr. Arbeiten, H. 77, S. 1–120.
- JUSCHUS, O. (2017): Zur eiszeitlichen Entstehung der des Uckertals in Brandenburg. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 19, S. 19–28.
- JUSCHUS, O. (2018): Zur eiszeitlichen Entstehung der Werbellinseerinne in Brandenburg. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 20, S. 19–25.
- KRONE, A. & MICHELS, R. (2020): Das Gewässer- und Seensystem des Parsteiner Seebeckens. Eiszeitliche Genese und Bildungen des Endmoränenbogens. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 22, S. 32–40.
- LUTZE, G. W. & H.-J. POHLE (Hrsg.) (2020): Der Chorin-Parsteiner Endmoränenbogen und das Becken des Parsteiner Sees. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 22, 164 S.
- MARCINEK, J. (2018): Das klassische Gebiet der Eiszeitforschung in Norddeutschland – seine geohistorische Bedeutung. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 20, S. 26–37.
- NITZ, B. (2004): Landschaftsentwicklung Grundzüge. In: Schroeder, J. H. (Hrsg.): Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg. Nr. 5: Nordwestlicher Barnim – Eberswalder Urstromtal. S. 47–55.
- SCHLAAK, N. (2020a): Eiszeitliche Genese und Bildungen des Endmoränenbogens. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 22, S. 20–31.
- SCHLAAK, N. (2020b): Zur Entstehung der Rummelsberge bei Brodowin. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 22, S. 142–148.
- SCHROEDER, J. H. (Hrsg.) (1994): Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg. No. 2: Bad Freienwalde - Parsteiner See. Berlin 1994, 188 S.
- WILKE, H.-J. (2021): Das Gewässer- und Poldersystem im Unteren Odertal – sein historischer Ausbau für den Hochwasserschutz, die Landwirtschaft und die Schifffahrt. Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße, Heft 23, S. 60–71.
- MARTIN, M. R. (1998): Flutgraben für trockene Keller. In: Kloster Chorin - Geschichte, Geist und Gegenwart. Festschrift – 725 Jahre Chorin – 900 Jahre Citeaux, S. 100– 102

Anschrift der Autoren

- Dr. sc. Gerd W. Lutze Am Stadion 4 16225 Eberswalde Germany gerd.lutze@gmail.com
- Joachim Kiesel Spreewaldstraße 10 16227 Eberswalde Germany joachim_kiesel@online.de

Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge

Autorenhinweise

Die Zeitschrift "Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge" widmet sich geologischen, lagerstättenkundlichen und bergbaulichen Themen von Brandenburg und Berlin sowie dem neuesten Forschungsstand in den geowissenschaftlichen Disziplinen. Die eingereichten Beiträge sollen diesem Profil entsprechen. Es werden Originalarbeiten und wissenschaftliche Informationen veröffentlicht, die noch nicht andernorts publiziert wurden. Die Redaktion behält sich das Recht vor, Manuskripte zur Überarbeitung an die Autoren zurückzusenden.

Ihre Manuskripte senden Sie bitte in digitaler Form (e-mail, CD) an das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, Redaktion z. Hd. Dr. Norbert Schlaak (Tel.: 0355-48640-157), PSF 10 09 93, 03009 Cottbus oder per e-mail an: <u>norbert.schlaak@lbgr.brandenburg.de</u>. Weitere Anfragen richten Sie bitte ebenfalls an die obige Adresse.

Manuskript

- Der Umfang des Manuskripts sollte zehn Seiten (A4, 1,5 zeilig) nicht überschreiten. Wissenschaftliche Kurzinformationen sind einschließlich der Abbildungen auf maximal fünf Seiten zu bemessen.
- Jedem Beitrag ist eine kurze deutsche und englische Zusammenfassung beizufügen.
- Bitte übersetzen Sie den Titel des Beitrags, die Unterschriften der Abbildungen, Tafeln und Tabellen ebenfalls ins Englische.
- Die Textdateien sollten unformatiert sein und in Word abgefasst werden (Schrift: Times New Roman 10 pt).
- Absätze bitte mit einer Leerzeile trennen.
- Word-Dokumente bitte nicht mit integrierten Abbildungen liefern, d. h. Text und Abbildungen immer in separaten Dateien einschicken!

Abbildungen

- Wir empfehlen, die Anzahl von bis zu 7 Abbildungen je Beitrag nicht zu überschreiten.
- Zur Beschriftung in den Abbildungen verwenden Sie bitte den Schriftsatz "Arial".
- Jede Abbildung ist separat mit Nummer und Autorennamen zu kennzeichnen und als einzelne Datei zu liefern.
- Die Abbildungsunterschriften sind in einer gesonderten Datei beizugeben.
- Digital hergestellte Zeichnungen und Abbildungen sollten die Formate Adobe Illustrator (.ai), Corel-Draw (.cdr) oder .pdf und .eps aus vorgenannten Programmen haben, Fotos hochauflösendes (mindestens 300 dpi!) TIFF (.tif)-bzw. JPG (.jpg)-Format, andere nach Absprache. Das Originalformat bitte immer mitschicken!

Tabellen

• Tabellen bitte mit einem Tabellenprogramm schreiben (Word, Excel).

Zitierweise

Im Text:

- WUNDERLICH (1974) bzw. (WUNDERLICH 1974) oder
- PILGER & STADLER (1971) sowie NÖLDEKE et al. (1977) bei mehr als zwei Autoren

Im Literaturverzeichnis:

- BUBNOFF, S. v. (1953): Über die Småländer "Erdnaht". Geol. Rdsch. 41, S. 78–90
- NIESCHE, H. & F. KRÜGER (1998): Das Oder-Hochwasser 1997 Verlauf, Deichschäden und Deichverteidigung. Brandenburg. Geowiss. Beitr. 5, 1, S. 15–22
- FAUTH, H., HINDEL, R., SIEWERS, U. & J. ZINNER (1985): Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland 1 : 200 000.
 79 S., Hannover (Schweizerbart)
- KRONBERG, P. (1976): Photogeologie, eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern. 268 S., Stuttgart (Enke)

Autorennamen bitte in Kapitälchen schreiben, nicht in Großbuchstaben.

Autorenname(n): Akademischer Titel, Vorname, Name, und Anschrift der Institution oder gegebenenfalls die Privatanschrift, wenn gewünscht, auch e-mail-Adresse

Grundsätze zu Rechtschreibung und Zeichensetzung

Datum: Entweder 1. März 2011 oder 01.03.2011; **Einheiten**: 2 km, 50 % – Einheitszeichen mit Zwischenraum zwischen Zahl und Zeichen verwenden; **Euro**: ausschreiben; **Rechenzeichen**: 6 + 2 = 8 – mit Zwischenraum zwischen Zahl und Rechenzeichen, ebenso </> mit festem Leerzeichen vor der Zahl **ABER** -2 – Vorzeichen vor der Zahl ohne Zwischenraum; **mehrstellige Zahlen**: 5 350 Gliederung von der Endziffer aus durch Zwischenraum in dreistellige Gruppen; **Schräg-strich**: 2010/11 – ohne Zwischenraum; **Gedankenstrich**: 1999–2011 Gedankenstrich für "gegen" und "bis"; **Festabstände**: z. B., u. a. – Abkürzungen mit Zwischenraum