

## 1 Einleitung

Die terrestrisch entstandene, unterpermische Tambach-Formation im mittleren Thüringer Wald eignet sich exemplarisch für eine Analyse der in ihr enthaltenen Sedimentmarken für paläoklimatische Zwecke. In der zurückliegenden Erforschungsgeschichte traten unterschiedliche Auffassungen und Deutungen auf.

PABST (1908) hat sich während seiner Tätigkeit am Herzoglichen Museum Gotha (1890 bis 1908) vorwiegend mit der Paläontologie von Tetrapodenfährten, insbesondere mit der Fundstätte am Bromacker (Tambach Formation) beschäftigt. Sicher ist es seinem umfangreichen meteorologischen Wissen zu verdanken (MARTENS 1994, PABST 1904), dass er auch die Entstehung der fossilen Netzleisten auf den Fährtenplatten erstmals richtig deuten konnte. In seiner zusammenfassenden Arbeit von 1908 bezeichnete Pabst Netzleisten als „reliefartige Wulste“ und als „klassisches Beispiel“ für die Erklärung dieser fossilen Erscheinung in Gesteinen als ehemalige Trockenrisse. Auf der Fährtenplatte Gotha Nr. 1394 (heute im Bestand der Sammlung des Phyletischen Museums Jena) erkannte er eine ausgetrocknete Wasserlache und das sich auf ihr neben Regentropfenabdrücken zahlreiche „Wellenfurchen“ befinden.

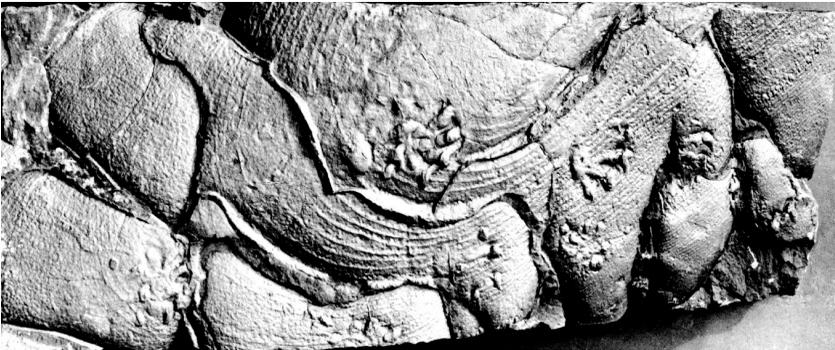


Abb. 1. Fährtenplatte, Gotha Nr. 1394, heute im Bestand der Sammlung des Phyletischen Museums Jena, nach Pabst (1908): „ausgetrocknete Wasserlache...zahlreiche Wellenfurchen“, Foto Arch. MNG.

MÜLLER (1956) interpretierte die fährtenführenden Sedimente vom Bromacker als Beleg für Wasseransammlungen in nur kleinen Tümpeln oder Lachen-artigen Seen. Die Bildung erfolge durch temporäre Niederschläge und wolkenbruchartigen Regen (Ruckregen). Die Wassermassen breiteten sich nach seiner Ansicht flächenhaft im Becken aus. In tieferen Stellen sammelte sich Wasser, das die Tierwelt anlockte. Durch Austrocknung entstanden in den Sedimenten Trockenrisse. Regentropfeneindrücke sind der Beleg für Niederschläge. Das Vorkommen von Walchien (Koniferen) bezeichnete er als Trockenvegetation.

STEINER & SCHNEIDER (1963) erwähnten vom Tambacher Sandstein Netzleisten und Regentropfeindrücke verschiedener Größen.

EYRICH (1964), Abb. 40, beschrieb Netzleisten als positive Hyporeliefs in polygonaler Anordnung und verwies auf die Wölbung der dabei entstehenden Tontafeln. Höhenlinienartige Strukturen zusammen mit Netzleisten deutete er als fossile Wasserstandsmarken eines austrocknenden Tümpels mit fossilen Regentropfenabdrücken. Außerdem beschrieb er Schlammstrommarken, entstanden durch schräg auffallenden Regen auf die Sedimentflächen. Aus der Richtung des fallenden Regens lasse sich die Windrichtung erkennen. Aber auch Strömungsrippeln (Strömungsmarken) waren ihm bereits aufgefallen.

THALHEIMER (1965) erkannte bei seinen Geländearbeiten Netzleisten (Ausfüllung polygonaler Trockenrisse, äolisch oder fluviatil), Rippelmarken (Strömungsmarken), Regentropfeindrücke und Schlammstrommarken (Starkregenmarken), entstanden in einem „festländischen, wüstenartigen Bereich. Das Klima war jedoch nicht extrem arid...“ Es „war heiß bis wechselfeucht“. Es habe abflusslose Senken im Beckenzentrum gegeben. Er sprach von Oasen. Es habe längere Trockenzeiten mit kurzen Regenperioden gegeben. „Durch die gewaltigen Regengüsse wurden die unbedeckten, lockeren Geröllmassen als flächenhafte Schuttströme (Fanglomerate) bewegt“. Thalheimer verwies auf Tonscherben, die sich von den Trockenriss-Flächen lösten und an anderer Stelle wieder abgelagert wurden.

HAUBOLD (1973) publizierte erstmals einen umfassenden Überblick zur Lebewelt des Tambacher Sandsteins und der paläökologischen Bedingungen. Er geht auch auf das Paläoklima ein. Er spricht von einer allgemeinen Aussage, dass im Verlauf des Rotliegend zunehmende Trockenheit und Erwärmung anerkannt sei (GOTHAN & GIMM 1930). Er distanzierte sich allerdings von der extremen Einschätzung in GOTHAN & GIMM (1930): „...auch die Bestände der Callipteriden-Walchien-Assoziationen mußten immer mehr einer toten Wüste weichen und waren gegen Ende der Rotliegendzeit nur noch auf kleine Gebiete oasenartiger Natur beschränkt“. An anderer Stelle steht bei GOTHAN & GIMM (1930): „eine erbarmungslose Tropensonne gab der Landschaft immer mehr das Gepräge einer toten Wüste.“ HAUBOLD (1973) erkannte richtig: „Die bekannte Lebewelt des Tambacher Sandsteins paßt zwar in den Rahmen zunehmender Aridität, beweist aber zugleich in dem unteren Abschnitt des Saxons durchaus günstige Lebensbedingungen für Pflanzen und Tiere in großer Zahl.“ Haubold erklärte: „Wahrscheinlicher als einzelne Oasen ist in der fraglichen Zeit eine mehr oder weniger lückenlos verbreitete Vegetation..., eine der Grundlagen des Lebensraums einer arten- und individuenreichen Tierwelt.“ Bezüglich der Rotsedimente verwies HAUBOLD (1973) auf folgende Feststellung: „Rotfärbung bei Verwitterung in saurer oxidierender Umgebung setzt hohes Wasserangebot von etwa 1000 mm im Jahr und Jahresmitteltemperaturen von über 16°C voraus (VAN HOUTEN 1961).“ Er spricht von einer tropischen bis subtropischen Savanne. Die Tambach-Formation wird einem warm humiden bis semi-humiden Klima zugeordnet. Das Trockenfallen der Sedimente sei auf bestimmte Trockenzeiten beschränkt. Wüstenhaftes Klima zur Zeit des Saxon mit Oasen wurde auch von MÜLLER (1980) angenommen.

LÜTZNER (1981) beschrieb ausführlich die „Sedimentation der variszischen Molasse im Thüringer Wald“. In den „Sandigen Aluvionen“, dem Tambacher Sandstein, erwähnt er Strömungsmarken, Rippelmarken und Trockenrisse. Erstmals wurden als Seltenheit Eiskristallabdrücke genannt und abgebildet (Tafel XIV, Bild 1 u.2 in LÜTZNER 1981). Die Sandsteine repräsentierten im wesentlichen Sedimente der Strömungsrinnen eines nach NO gerichteten Flusssystemes. Die feinkörnigeren Ablagerungen resultierten aus (?) periodischem Hochwasser, nach dessen Abfluss. Die feinste Suspensionsfracht lagerte sich in flachen Aue-Seen ab. Von klimatischem Interesse seien Anzeichen von ausfrierenden Feuchtstellen (Eiskristallabdrücke) oder von flach mit Wasser bedeckten Sedimenten.

EBERTH et al. (2000) widmete sich umfassend den terrestrischen Bedingungen im Tambacher Becken. Seine zweiwöchigen, eingehenden Studien (1998) erbrachten zu Klima und Sedimentation folgende Aussagen: Relativ gering mäandrierende Flüsse mit kurzlebigen Strömungszuständen transportierten sandige und tonige Suspension und bildeten horizontale bis flachwinklige Schichtung bei allgegenwärtiger Austrocknung. Das verbreitete Auftreten von Schlamm-Chip-Intraklasten an der Basis und innerhalb von Kreuzschichten und massivem Sediment zeige an, dass die dominanten Strömungsbedingungen hohe Energie und Erosionskraft aufwiesen, was zur Überarbeitung von zuvor abgeschiedenen und konsolidierten Siltsteinen führte. Durch die Mäandrierung verlagerten sich Erosion und Ablagerung seitlich. Angenommen wird eine geringe Größe des Einzugsgebiets des Tambacher Beckens (geschätzt hier zwischen 200-300 km<sup>2</sup>). Nach Ansicht von EBERTH et al. (2000) weisen die Paläochannel-Ablagerungen häufig Grate mit einer Größe von weniger als 1 mm auf die konzentrisch angeordnet sind. Der vertikale Abstand von Grat zu Grat liege bei 0,5-2,0 cm. Diese Merkmale werden als Verdunstungsmarken (inferred evaporation marks, fig. 5 C in EBERTH et al. 2000) interpretiert. Es wird angenommen, dass der vertikale Abstand zwischen jedem Grat einen täglichen oder sehr kurzen Zyklus von Verdunstungs-Wasserverlust widerspiegelt. Die Luft-Wasser-Grenzfläche scheuerte möglicherweise und erzeugte einen Grat, wenn die Verdunstungsraten niedrig waren (bei Nacht?). Angesichts der Tatsache, dass das Relief über erhaltenen Schichtformen und Erosionsflächen in diesen Paläochannel-Ablagerungen nirgendwo einen Meter übersteige, erschiene es vernünftig, dass diese Marken den Beweis lieferten, dass im Kanal während einer Zeitspanne von Tagen bis Monaten Wasser verdunstete. Der Wasserverlust durch Versickerung sei wahrscheinlich gering gewesen aufgrund von Schlammauskleidungen in den Tümpeln und im gesamten Becken – als eine Art Sättigung nach Überschwemmungsereignissen. Das häufige Auftreten von Austrocknungsrisse zeige an, dass das Klima heiß genug war (zumindest saisonal), um hohe Verdunstungsraten zu erklären. Der Zyklus der Überschwemmung und Verdunstung soll Tage bis Monate gedauert haben. Die Exposition der frisch sedimentierten Ablagerungen hielt wahrscheinlich nicht länger als ein Jahr an. Sedimentation und Paläokanal-Ablagerungen ließen keine Muster oder Rhythmicität erkennen. Paläobotanische Daten deuteten eindeutig auf saisonale Zyklen hin. Das Klima des Tambacher Beckens sei durch abwechselnde Nass- und Trockenperioden von saisonalem Ausmaß charakterisiert gewesen.

In MARTENS (2007) wurde insbesondere auf die Bedeutung von Sedimentmarken (Wetter- und Klimamarken) innerhalb der feinklastischen Sedimente der Tambach-Formation hingewiesen. Dabei konnten die von LÜTZNER (1981) erstmals gefundenen Hinweise auf Frostmarken durch neue Beobachtungen an höhenlinienartigen Strukturen auf den fährtenführenden Schichtunterseiten erweitert werden. Ein Teil der höhenlinienartigen Strukturen werden als Eisschichtmarken gedeutet, deren Abbildung auf der Sedimentoberfläche unterschiedlich abgelaufen sein kann. Inzwischen ist es möglich, sowohl im fossilen Beleg, als auch im rezenten Vergleich neue Vorstellungen und Deutungen der speziellen Sedimentmarken zu erklären. Sie ermöglichen neue Hinweise auf das Wettergeschehen und das Klima im Unteren Perm im Bereich der Varisziden des Tambacher Beckens in Thüringen.

## 2 Allgemeine Bemerkungen zur Paläometeorologie und Paläoklimatologie im Unteren Perm

Grundsätzlich ist auch im Unteren Perm zwischen Untersuchungen zur Paläoklimatologie und Paläometeorologie zu unterscheiden. Es sind auch immer die Fragen zu beantworten, welche Daten und Beobachtungen ergeben Aussagen über Wettererscheinungen und welche Daten und Beobachtungen können direkte Aussagen zum Klima einer Region machen.

Mehr als 90 % aller bisherigen Paläoklimastudien berücksichtigen nur die relativ kurze Zeitspanne des Quartär von ca. 1,8 Ma (z. B. CRONIN 1999).

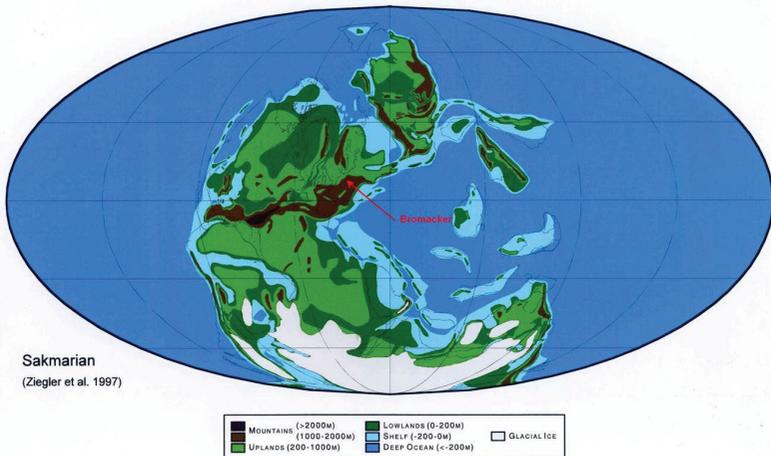


Abb. 2. Paläogeographie von Pangäa im Sakmarium (Untere Perm) nach ZIEGLER et al. 1997

Ohne eine erschöpfende Auswertung aller verfügbaren Wetter- und Klimazeugen einer bestimmten Region in einem durch Sedimente belegten, relativ kurzen Zeitabschnitt der Erdgeschichte ist eine Klimaaussage reiner Wunschgedanke und bloße Phantasie und gibt ein scheinbares Ergebnis vor, dass nicht belegt werden kann. Um die Möglichkeiten und Grenzen einer paläoklimatischen Analyse aufzuzeigen, wird als Beispiel für kontinentale Ablagerungen der Zeitraum der Tambach-Formation als Teil des Oberrotliegend (Unteres Perm) im mittleren Thüringer Waldes gewählt. Hierfür soll die bereits von SCHWARZBACH (1988) vorgestellte Untergliederung der Klimazeugen in erweiterter Form genutzt werden:

- a) Biologische Klimazeugen (fossile Pflanzen und Tiere, Lebensspuren von Invertebraten und Vertebraten)
- b) Lithologische Klimazeugen (Klima und Sedimentbildung, Klima und Verwitterung - Bodenbildung, Wettermarken)
- c) Geomorphologische Klimazeugen (Fossil erhaltene Landoberflächen, Gebirge, Becken, Land- und Meerverteilung, Verteilung der Kontinente auf der Erde).

Im vorliegenden Beitrag wird vor allem auf spezielle lithologische Klimazeugen der Tambach-Formation eingegangen. Das Hauptaugenmerk gilt dem Nachweis eines bestimmten, an einem Ort und zu einer bestimmten Zeit existierenden, begrenzten Temperaturniveaus. Dabei erwartet man nicht eine exakte Temperatur in °C, sondern ein Temperaturfenster, das sich nur durch wenige Grad unterscheidet.

Die Beschränkung auf kontinentale Ablagerungen hat den Vorteil, dass die atmosphärischen Wetter-Erscheinungen auf die Oberfläche der sich ablagernden Sedimente, sieht man von Ablagerungen in größeren, tiefen Seen ab, uneingeschränkt wirken können. Der Kontakt Atmosphäre - Sedimentoberfläche wird nicht von einer abschirmenden Wasserhülle (Hydrosphäre) unterbunden. Die meteorologischen Erscheinungen sind dann teilweise direkt mittels erhaltener Wettermarken von der Gesteinsoberfläche ablesbar. Die Wettermarken widerspiegeln die Einwirkung von Wettererscheinungen an einem eng begrenzten Ort A1 zu einem bestimmten Zeitpunkt T1 oder zu einer kurzen Zeitspanne T1 bis T2 wieder. Die Summe der Analysen aller nachweisbaren Wettermarken in der Tambach-Formation können dann Hinweise auf das Paläoklima und deren Veränderung in dieser Zeitspanne wiedergeben. Folgende Wettermarken werden innerhalb der Tambach-Formation einer genaueren Betrachtung unterzogen:

- 1. Austrocknungsmarken (Wasserverdunstung auf und im Sediment, fossile Trockenrisse, polygonale Netzleistensysteme)
- 2. Wasserstandsmarken (Rückgang des Wasserstandes in einem stehenden oder schwach fließenden Gewässer durch Wellengang, Versickerung oder Verdunstung)
- 3. Temperaturmarken (Einwirkung bestimmter bodennaher Luft- und Wassertemperaturen auf die Sedimentoberfläche, Frostmarken, Eisschichtmarken)
- 4. Niederschlagsmarken (Auswirkungen verschiedener atmosphärischer Niederschläge wie Regenarten, Schnee, Graupel oder Hagel auf Sedimentoberflächen mit oder ohne geringer Wasserbedeckung)

5. Strömungsmarken (Auswirkungen fließenden Wassers über feinklastischen Sedimenten mit Hinweisen auf Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit und paläotopographisches Gefälle bzw. Umlagerung von Sediment durch fließendes Wasser innerhalb einer Gefällstrecke)
6. Windmarken (vom Wind beeinflusste Sedimentablagerungen mit und ohne Wasserbedeckung, Windschliff an Geröllen (Windkanter) und auf trockenen Sedimentoberflächen)

Die Aussagen zur Klimageschichte im Unterperm beschränken sich vor allem noch auf allgemeine Trends und Übersichtsdarstellungen (PARRISH 1993). PAUL (2012): S. 732 erklärte: „Die ältere Literatur bis zur Mitte des vergangenen Jahrhunderts sagte über das Klima des Rotliegend meist nur pauschal sinngemäß aus, dass es trocken und heiß war“.

Zur paläoklimatischen Analyse des Unterperm wurden bisher vor allem Meeressedimente, marine und terrestrische Fossilien, einige kontinentale Sedimente und Ablagerungen der Binnenseen verwendet (COLBERT 1963, VAN HOUTEN 1963, CLAUSING & BOY 2000, DIMICHELE et al 2001).

In den 90er Jahren sind in einem größeren Rahmen Klima-Modelle für Pangäa von PATZKOWSKI et al. (1991), KUTZBACH & ZIEGLER (1994), PARRISH (1995), CROWELL (1995) UND GIBBS et al. (2002) aufgestellt worden.

Vor allem die Vereisungsgeschichte der Südkontinente (Gondwana) und ihre Auswirkungen auf Pangäa haben starkes wissenschaftliches Interesse gefunden (VISSER 1990, 1995, 1997, VISSER & YOUNG 1990, FRANCIS 1994, CHUMAKOV & ZHARKOV 2002). Aus den Erkenntnissen der quartären Vereisung lassen sich auch für die permokarbone Eiszeit mehrere Wechsel zwischen Glazialen und Interglazialen vermuten. Diese Änderungen im „Weltklima“ müssen sich auch auf die Verteilung und Ausprägung der Paläoklimate im Unterperm im äquatornahen Bereich ausgewirkt haben. Es besteht daher die Notwendigkeit, eine detailliertere Analyse der Klimaentwicklung für diesen Zeitraum durchzuführen. Im Beitrag beschränken wir uns vorerst auf eine paläogeographische Region des Tambacher Becken innerhalb der Varisziden und für einen Zeitabschnitt, der zur Ablagerung der Tambach-Formation ausgereicht hat hat. In diesem Zeitraum könnte es zu ähnlichen Klimaschwankungen wie im Quartär gekommen sein. Diese Aussage bleibt aber noch eine unbegründete These, so lange es keine zeitlich engmaschigeren Untersuchungen gibt.

Zum Thema Klima im Rotliegenden sind in der Vergangenheit zahlreiche Arbeiten erschienen, hier eine Auswahl: LÜTZNER (1981), GLENNIE (1983), HAUBOLD (1985), GRALLA (1988), GAST (1991), GEBHARDT et al. (1991), RÖBLER (1995), KARNKOWSKI (1999), CLAUSING & BOY (2000), CLAUSING (2001), KLEDITZSCH (2004), OPLUŠTIL (2004), BOY & HANEKE (2005), PAUL (2005, 2006, 2012), KIERSNOWSKI & BUNIAK (2007), LEGLER & SCHNEIDER (2008), LÜTZNER et al. (2012), SCHNEIDER et al. (2006) und ROSCHER & SCHNEIDER (2006).

PAUL 2012, S. 733 verwies auf die Möglichkeit, verwitterungsanfällige Minerale, zum Beispiel Biotit, Feldspat oder Granat als Klimaanzeiger zu nutzen. Bestes Beispiel sei der Kaolinit, der sich als Endprodukt der Verwitterung von Feldspat-reichen Gesteinen unter sauren Bedingungen in einem humiden und warmen Klima bildet (MILLOT 1970). Ähnliche Möglichkeiten bestehen mit Chlorit (VELDE 1985, SELTER 1990).

Unklarheit besteht bei Rotsedimenten. Früher wurden sie häufig mit einer ariden Entstehung in Verbindung gebracht (TURNER 1980). Rotsedimente (red beds) im Unterperm können eine hohe Bioturbationsdichte aufweisen. Die Sediment fressenden Organismen (z.B. Erzeuger von *Scoyenia gracilis*) können primär nur in einem Sediment mit hohem organischen Inhalt gelebt haben, dessen Farbe primär eher grau als rotbraun war. Es kam häufig sekundär im Rahmen der Diagenese zur Oxidation und einer Verfärbung zu rotbraun wegen des entstehenden fein verteilten Hämatits. Nach WALKER (1967) und GLENNIE (1972, 1983) bilden sich terrestrische Rotsedimente sowohl in heißen, semi-ariden, wechselfeuchten Klimaten als auch in vegetationsarmen, trockenen Wüsten. Das färbende Pigment im Sediment ist Hämatit, der in Sand- und Schluffsteinen die Körner umhüllt und in Tonsteinen an Tonminerale gebunden ist (WALKER & HONEA 1969). Bekannt ist auch die Tatsache, dass Fanglomerate bevorzugt in ariden oder semiariden Gebieten auftreten. Dagegen bilden sich wohl gerundete Gerölle in überwiegend permanent fluvialem Umfeld. Sie geben uns eindeutige Hinweise für fließendes Wasser.

Nicht nur im Quartär, durchaus auch schon im Unterperm können sich die Milankovitch-Zyklen im Sediment widerspiegeln – z. B. im Naab-Becken (PAUL 2012). Humide Phasen herrschten von der Ilmenau-Formation bis zur Oberhof-Formation (LÜTZNER et al. 2012). Der Höhepunkt der Humidität wurde möglicherweise in der Manebach-Formation erreicht, die ein Maximum der Kohlebildung enthält. Schon in der oberen Manebach-Formation zeigen die häufigen Reste von Walchien und anderen meso- und xerophilen Pflanzen die Nähe trockener Standorte an (HAUBOLD 1985). Auch in der darüber folgenden Goldlauter-Formation kommen noch zahlreiche und ausgedehnte Ablagerungen von Seen vor. Die zunehmende Verbreitung von Rotsedimenten ab Oberhof-Formation und das Fehlen von Schwarzhorizonten ab der Rotterode-Formation über die Tambach-Formation bis zur Eisenach-Formation suggeriert eine zunehmende Aridisierung. Ursachen können aber auch mit der Beckenentwicklung zusammenhängen.

Sediment-Strukturen und die Fossilinhalte sprechen eher für einen jahreszeitlich bedingten Wechsel von Trocken- und Regenzeiten im höheren Rotliegend bis ins Niveau der Tambach-Formation. Lediglich die Eisenach-Formation enthält feinklastische Sedimente mit Steinsalz pseudomorphosen, Fanklomeraten und überwiegend fossilfreien Feinklastika. Eine Ausnahme bilden die Unteren Tonstein der Eisenach-Formation (MARTENS 1979). Die Eisenach-Formation ist überwiegend in einem hochariden Klima entstanden.

Allgemein spricht PAUL (2012) von zyklischen Klimaentwicklungen im Unterperm, die möglicherweise den Milankovitch-Zyklen entsprechen. Dabei werden Zyklen von 25

800, 100 000 und 400 000 Jahren unterschieden. Der 400 000 Jahre Zyklus (GAST 1993) und der 100 000 Jahre Zyklus (PAUL 2002) werden beide durch die Exzentrizität der Erdbahn verursacht. Die Zyklen bestehen aus einem Wechsel von

jeweils feuchten und trockenen Perioden, wobei der Umschwung von trocken nach feucht relativ rasch zu erfolgen scheint. Teilweise liegen grobe Konglomerate direkt auf Paläoböden der vorausgegangenen Trockenphase (PAUL 2012, PARRISH 1995, GAST 1995). PAUL (2012) ist der Meinung, dass die Zyklik des Klimas im Rotliegend durch die Überlagerung mehrerer Parameter bestimmt wird, darunter sind Milankovitch-Parameter, aber auch längerfristige Zyklen, deren Ursachen bislang unbekannt sind. Er sieht die größten Hindernisse für eine genauere Betrachtung des mitteleuropäischen Klimas in der Zeit Oberkarbon bis Perm in einer nach wie vor zu groben Chronostratigraphie und in der ungenauen Korrelationsmöglichkeit der voneinander isolierten Becken. Es fehlten auch Aussagen zu den damaligen Temperaturen und der Kontinentalität des Klimas. Er betonte, solange es nicht möglich sei, die beiden am besten untersuchten Rotliegend-Vorkommen Deutschlands, das Saar-Nahe-Becken und den Thüringer Wald, sicher zu korrelieren, seien interkontinentale Korrelationen skeptisch zu betrachten.

Zur Entschlüsselung paläoklimatischer und paläometeorologischer Merkmale des Lebensraumes terrestrischer Tetrapoden im Unterperm der Tambach-Formation werden aussagefähige fossile Sedimentmarken im Tambach-Sandstein mit rezenten Beobachtungen verglichen, die in den zurückliegenden Jahren gemacht wurden. Die verschiedenen Sedimentmarken entstanden oft nach kurzzeitigen Wettererscheinungen als meteorologische Marken im fluviatilen und temporären, flach-limnischen Milieu. Sie ergeben meist keine direkte Aussage auf das vor Ort herrschende Klima. Da man aber Zusammenhänge zwischen Wetter und Klima nicht leugnen kann, ergeben sich auch erste Hinweise auf das vor Ort herrschende Regionalklima.

### **3 Bedeutung aktualistischer Untersuchungen zur Wetter- und Klimaanalyse des Unteren Perm**

Die Analyse des Paläoklimas ist nur mit der Anwendung des Prinzips des Aktualismus durchführbar (HOFF 1822, 1824, 1834, KAISER 1932, MARTENS 1987). Karl Ernst Adolf von Hoff erkannte 1822, also vor genau 200 Jahren, im Band I seines Werkes „Geschichte der durch Überlieferung nachgewiesenen natürlichen Veränderungen der Erdoberfläche“ eine seit „Äonen“ wirkende Dynamik der Erde, die man aus Beobachtungen der Gegenwart interpretieren kann. Auch die gegenwärtigen Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten in der Erdatmosphäre können dabei als Maßstab für die geologische Vergangenheit genutzt werden. Im Laufe der zurückliegenden Erdgeschichte kam es sicher zu Änderungen in der chemischen Zusammensetzung und damit in der physikalischen Wirksamkeit der Erdatmosphäre. Man sollte aber nicht zu dem Schluss kommen, dass dann das aktualistische Prinzip nicht mehr voll angewandt werden könnte.

Abweichende physikochemische Bedingungen der Erdatmosphäre gegenüber der Gegenwart verhindern nicht das Wirken der noch heute allgemein wirksamen Naturgesetze. Sie gelten für den Gesamtzeitraum der Erdgeschichte und sind eine Grundvoraussetzung für die Anwendung des aktualistischen Prinzips.

Wie bereits von MARTENS (2007) hervorgehoben, kann man auch das gegenwärtige Klima in einer bestimmten Region der Erde nicht aus den Bedingungen der Atmosphäre zu einem Zeitpunkt T1 in einer Lokalität A1 bestimmen. Die Definition des aktuellen Klimas einer bestimmten Region erfordert das Erfassen und eine statistische Analyse aller verfügbaren meteorologischen Größen über einen längeren Zeitraum (in der Regel 30 Jahre). Die zu erfassenden meteorologischen Größen werden als Klimaelemente (Klimagrößen) bezeichnet (SCHÖNWIESE 1994). Bereits PERLEWITZ (1929) definierte Klima und Wetter auf folgende Art: „Unter dem Klima eines Ortes verstehen wir die Gesamtheit der Witterungserscheinungen, die im Laufe des Jahres bei der Doppelbewegung unserer Erde um eine eigene Achse und um die Sonne in mehr oder weniger gleicher Weise wiederkehren und für das organische Leben, insbesondere für den Menschen, von größter Wichtigkeit sind. Das Wetter nur einen einzelnen Vorgang aus den mannigfachen, aufeinanderfolgenden Witterungszuständen, die in ihrer Gesamtheit und während einer bestimmten Zeitdauer eben das Klima, ausgedrückt durch Mittel- und Grenzwerte, bilden". Rezente Wettermarken können Messreihen ergänzen aber nicht ersetzen und als Klimazeugen genutzt werden. Im Beitrag werden Beispiele rezenter Wettermarken aus verschiedenen Regionen der Erde beschrieben, deren Entstehung nachvollziehbar ist. Sie können bei Anerkennung des aktualistischen Prinzips fossilen Wettermarken des Unteren Perm, insbesondere des Tambach-Sandsteins gegenüber gestellt werden. Ursache und Wirkung identischer Marken können dann aus Gründen des Aktualismus sicher übertragen werden oder es ergibt sich immerhin ein Ansatz für weitere Untersuchungen. Für einen aktualistischen Vergleich werden folgende rezenten Beobachtungen verwendet:

1. Während einer Urlaubreise im Juli 2005 in verschiedene Gebiete der nordchilenischen Atacama-Wüste (Winter) wurden kurz vorher abgelagerte Sedimenttypen untersucht. Die Atacama gilt zwar als eine Extremwüste unter den Wüsten. Dennoch ergeben sich wegen der verschiedenen Höhenlagen der Sedimentationsbecken bis über 2000 m recht interessante Beobachtungen.
2. Ähnliche Beobachtungen an Trockenrissen stammen aus der Wüste Gobi (W. Karwoth Juni 2015).
3. Während eines Winterurlaubes auf der Insel Hiddensee konnten rezente Eisschichtmarken untersucht werden (21. 01. 2011), ebenso in der Nähe von Großrettbach (17. 12. 2009), dem Wohnort des Autors und im Thüringer Wald (17. 11. 2018).
4. Die Entstehung rezenter Wasserstandsmarken im feinkörnigen Strandsand der Ostsee auf Hiddensee (17. 02. 2014), am Weststrand bei Prerow, Darß und am Ufer der Elbe bei Wittenberg (25. 04 2021) konnten direkt beobachtet werden. Sie ergaben wichtige Hinweise zur Unterscheidung von Wasserstandsmarken und Eisschichtmarken und Hinweise zur Bildung von Spülsäumen.

Die Lufttemperatur, gemessen in 2 m Höhe über dem Erdboden, variiert in den einzelnen Klimazonen etwa zwischen  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In warm-ariden Gebieten entstehen Gips-, Steinsalz- oder andere Salzablagerungen. Sie deuten auf Temperaturen weit über  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und beständig anhaltende Trockenheit (Aridität). In kalt-ariden Gebieten mit Temperaturen weit unter  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  produzieren vor allem Inlandeismassen charakteristische Klimazeugen in Form von Moränenablagerungen, Eisschliffbildungen und Eiskeilen in Dauerfrostböden. Einfache Frostmarken belegen lediglich Temperaturen unter dem Gefrierpunkt des Wassers bei heutigen Luftdruckverhältnissen. Die Lufttemperatur kann aber nicht direkt aus Marken im Sediment bestimmt werden. Sie geben lediglich Hinweise auf Temperaturschwankungen um den Gefrierpunkt zwischen Tag und Nacht oder extrem tiefe Temperaturen (Eiskeile im Sediment, Dauerfrostboden).

Der absolute Luftdruck wird von der Höhenlage und von der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmt (KESSLER 1923). Weder Luftdruckwerte noch Luftdruckschwankungen lassen sich mit Sedimentmarken direkt nachweisen. Es gibt dafür bisher keine aktualistischen Methoden. Lediglich indirekt lassen sich Luftdruckunterschiede in der Atmosphäre annehmen, wenn man Marken nachweisen kann, die auf die Anwesenheit von Wind in Bodennähe schließen lassen: Wind ist eine Folge von Luftdruckunterschieden zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten und folglich eine Ausgleichsbewegung von Luftmassen aus dem Hochdruckgebiet ins Tiefdruckgebiet. Die Ermittlung der Windrichtung ist möglich und deutet auf die Lage von Hoch- und Tiefdruckgebiet am Ort und Zeitpunkt der Entstehung der Windmarken. Bekannte Beispiele sind Windschliffmarken (Windkanter, Dreikanter) an Geröllen in Wüsten und Polargebieten, Staub- und Sanddünen und Wellenrippeln.

Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre und damit ein wichtiges Klimaelement. Hohe Luftfeuchtigkeit erzeugt keine speziellen Sedimentmarken. Kann man allerdings Niederschlagsmarken nachweisen, ist dies ein Beleg für hohe Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung in der Atmosphäre. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre auf über 100 %, beginnt die Ausfällung des überschüssigen Wassers in fester oder flüssiger Form (Wolkenbildung, Niederschlag). Die Schwerkraft und die Luftbewegungen sorgen für verschiedene Niederschlagsformen, die als Landregen, Nieselregen, Starkregen, Schnee, Graupel oder Hagel zu Boden fallen und die freiklastischen Sedimentoberflächen unterschiedlich modellieren (KREJCI-GRAF 1927). Es entstehen verschiedene Niederschlagsmarken, die aktualistisch mit fossilen Marken verglichen werden können. Deutlich lassen sich einzelne Regetrophen-Einschlagskrater von den flächendeckenden Starkregenmarken unterscheiden.

Bei geringer Luftfeuchtigkeit bilden sich auf vorher durchfeuchteten Sedimenten nach oberflächlicher Austrocknung und Schrumpfungsvorgängen im Sediment Austrocknungsmarken als polygone Trockenrissssysteme (fossile Netzleisten) Entscheidend für die Trockenrissbildung ist ein gewisser Tongehalt im Sediment.