

Fritz Haubold, Sascha Meszner und Dominik Faust

Einblicke in die Vergangenheit – Böden und Sedimente als Archive des Klimawandels

1 Böden und ihre Funktionen

Böden sind Naturkörper mit vielfältigen Funktionen. Neben den natürlichen Funktionen (z.B. Filter-, Puffer-, Transformatorfunktion für Stoffe) unterscheidet man noch gesellschaftliche in Form von Nutzungsfunktionen (z.B. Standort für Siedlungen, landwirtschaftliche Produktion) und die Informationsfunktion. Letztere wird, da sie sich auf den Boden als „Archiv der Natur- und Kulturgeschichte“ bezieht, oft auch als Archivfunktion bezeichnet. Hier soll die Frage diskutiert werden, welche Informationen uns die Böden hinsichtlich ihrer Entstehungsgeschichte bereitstellen. Dabei geht es nicht nur um die direkt erkennbaren Merkmale an der Profilwand, sondern vielmehr darum, was man aus den unmittelbaren Informationen, die uns diese Merkmale liefern, ableiten und interpretieren kann. Der Boden ist somit ein Informationsträger (Proxy), der Rückschlüsse auf das Klima und den Klimawandel, auf die geomorphologische Prozessdynamik in der Vergangenheit, auf die Auswirkungen der menschlichen Wirtschaftsweise auf den Boden (Stichwort „Bodenerosion“) und auf die Zeitdauer sämtlicher auf den Boden wirkender Prozesse erlaubt. Unter geomorphologischer Prozessdynamik versteht man alle Vorgänge der Reliefformung und die Entwicklung der Formen. Der Boden kann somit die Natur- und Kulturgeschichte archivieren.

Böden können unter anderem als Klima-zeiger angesehen werden. Folgt man dem Konzept der zonalen Böden, ordnet man dem Klima eine dominierende Rolle unter den bodenbildenden Faktoren zu, das heißt, man versucht dabei eine Korrelation zwischen den Ökozonen der Erde und den mit ihnen im Einklang stehenden vorherrschen-

den Böden herzustellen. Ein Beispiel dafür sind die Podsole, die als typische klimazonale Böden für den borealen Raum (Nadelwaldzone, Taiga) angesehen werden können. Gebunden an eine hohe Bodenacidität kommt es unter dem Einfluss des kühlgemäßigten, humid geprägten Klimas zur Abwärtsverlagerung bzw. Auswaschung von Huminstoffen, also Abbauprodukten der abgestorbenen organischen Materie, und/oder Metalloxiden. Ähnlich verhält es sich mit anderen Klimaten der Erde, die jeweils charakteristische Böden hervorbringen. Unter dieser Voraussetzung können die sich im Boden auf diese Bedingungen einstellenden Merkmale „als diagnostisch für definierte klimatische Bedingungen angesehen werden“ [4]. War ein Boden lange Zeit der Atmosphäre ausgesetzt, so entwickelt er zwar Merkmale, die ein über längere Zeiträume herrschendes Klima erkennen lassen. Klimatische Fluktuationen, wie wir sie in den letzten 10 000 Jahren erfahren haben, können daraus jedoch nicht abgeleitet werden.

Sedimente und eingeschaltete Böden, die die Sedimente untereinander trennen, enthalten jene Informationen, die wir brauchen, um eine Landschaft mit ihren unterschiedlichen Teilräumen zu rekonstruieren, einschließlich der Veränderungen, die sie im Laufe der Zeit erfahren haben. Interpretationen, die auf Archiven mit sedimentologischen, geomorphologischen und bodenkundlichen Daten basieren, können Informationen über die Landschaftsdynamik, die Prozesse und die geomorphologischen Veränderungen liefern. Dabei gilt der allgemeine Grundsatz: Je kürzer die Untersuchungsperiode in die Vergangenheit zurückreicht, umso besser ist die Auflösung.

Die Untersuchung von fluvialen Sedimenten und die sie trennenden Bodenbildungen lässt erkennen, was an einem

Durch seine Archivfunktion wird der Boden zum Informationsträger über vergangene Prozessabläufe und Umweltbedingungen in Zeit und Raum. Da sowohl für Böden als auch für Sedimente eine deutlich ausgeprägte Korrelation zum Klima besteht, lassen sich durch ihre Analyse wesentliche Hinweise auf das Paläoklima rekonstruieren.

Through its archive function, the soil becomes a source of information about past processes and environmental conditions in time and space. As both soils and sediments display a striking correlation to climate in many cases, their analysis permits reconstruction of the palaeoclimate.

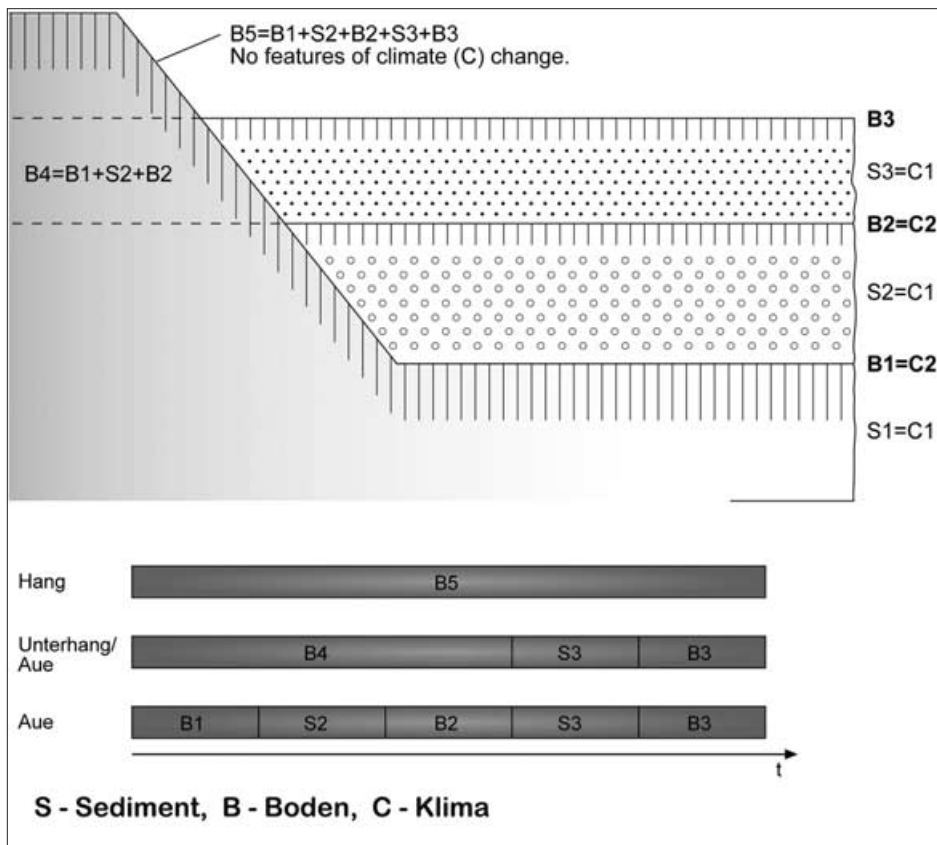


Bild 1. Sedimentations- und Bodenbildungsphasen in einer Talau in Relation zur zeitlichen Abfolge

bestimmten Standort oder in einem ganzen Einzugsgebiet geschehen ist, vorerst ohne etwas über die Ursachen der morphodynamischen Veränderungen auszusagen. Dabei stellt ein überdeckter Boden in erster Linie einen stratigraphischen Marker dar und andererseits einen Paläoumweltindikator. Der Wechsel von einem Boden zu einem darüberliegenden Sediment zeigt eine Veränderung im Sedimentationsverlauf an. Dies wiederum lässt auf Veränderungen in der Stabilität der betreffenden Landschaft schließen, die ihrerseits Schlussfolgerungen über entweder klimainduzierte bzw. anthropogene Umweltveränderungen oder über Veränderungen von systeminhärenten Bedingungen (z.B. der Fluss mäandriert) erlauben. Aber was können uns Böden erzählen?

2 Böden und ihr Alter

Böden sind wesentlich besser als Zeiger für Paläoumwelten geeignet als für das Klima, da sie meist eine standörtliche Ausprägung haben, die eng mit der Reliefposition korreliert. Das heißt, Bodenmerkmale können sich im Laufe der Zeit auch unabhängig vom Klima verändern. Betrachtet man beispielsweise die aktuellen bodenbildenden Prozesse in den inneren Tropen, so scheinen diese im Verlauf der letzten 2000 Jahre [2] unter Bedingungen freier Drainage mehr oder weniger braune Böden hervorzubringen. Diese Böden sind vergleichbar mit den Braunerden (Cambisols) in den temperierten Mittelbreiten. Das Beispiel zeigt, dass eine eher geringe Korrelation zwischen Klima und Boden besteht, was dem Konzept der klimazonalen Bodenabfolge widerspricht. Aber der rote tropische Boden, den wir kennen, ist ein Produkt aus mehreren Faktoren, wobei die Zeit als Dominanzfaktor anzusehen ist, demnach die Korrelation Bodenausprägung und Zeit deutlich enger ist. Aus diesem

Grunde korreliert der Soil Development Index (PDI) nach BIRKELAND am besten mit dem Alter des Bodens [1]. Alter steht in dem Fall für Zeitdauer, aber bis heute sind wir nach wie vor nicht in der Lage, die Dauer der bodenbildenden Prozesse aus den Bodenmerkmalen genau zu bestimmen. Der PDI leitet sich ab aus den Unterschieden zwischen Merkmalen des Ausgangssubstrats, aus dem der Boden sich entwickelt hat, und denen der zugehörigen Bodenhorizonte. Als Parameter zur Berechnung dienen Bodeneigenschaften wie zum Beispiel Textur, Struktur und Rubefizierung. Somit liefert der PDI lediglich Aussagen zur Intensität der bodenbildenden Prozesse. Hinweise zur Intensität sind hilfreich, liefern uns aber nur eine ungefähre Zeitdauer, die ein Boden benötigte, um unter den herrschenden Klimabedingungen gebildet zu werden. Genaue Vorstellungen, in welcher Zeitspanne sich bestimmte Merkmale in entsprechender Intensität ausbilden, können nur über präzise Datierungen erreicht werden. Böden eignen sich keinesfalls als Altersindikatoren. Trotzdem eignen sich Chronosequenzen oder der PDI gut als methodische Hilfsmittel zumindest bei der relativen Altersbestimmung.

Geomorphologische Untersuchungen im Sinne der Evolution der Landschaftssphäre laufen stets auf regionaler Ebene ab. Solche Studien beinhalten meist die Aufnahme und Analyse von Böden in unterschiedlichen morphologischen Positionen (z.B. auf einer Bergkuppe oder an einem Hang). Auf diesem Wege kommen wir in Berührung mit verschiedenen Umwelten, die unmittelbar benachbart sind. Entsprechend seiner geomorphologischen Position können wir bei jedem Boden bestimmte Eigenschaften erkennen. Somit spiegeln sich in den Böden unterschiedliche Umweltbedingungen wider.

Aber von diesen unterschiedlichen Umweltbedingungen auf die regionalen Klimateigenschaften zu schließen, ist nur in sehr begrenztem Maße möglich. Dies gilt erst recht für

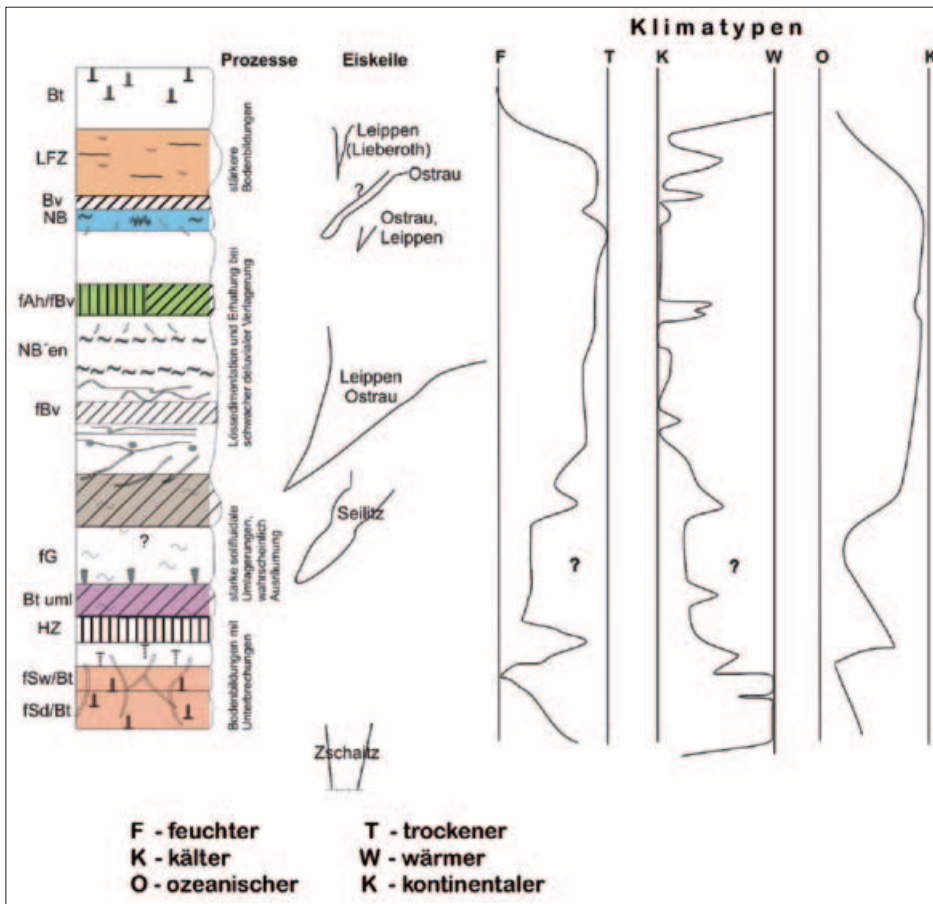


Bild 2. Die klimatische Entwicklung Sachsens der letzten 100 000 Jahre. Interpretation aus terrestrischen Archiven (Löss-Paläoboden-Sequenzen)

Aussagen über globale Klimaveränderungen, insbesondere die holozänen Klimafluktuationen, die kaum in unseren Böden dokumentiert sind (Bild 1). Das Beispiel in Bild 1 zeigt eine fiktive holozäne Sediment-Paläoboden-Abfolge. Angenommen, in einer Flussaue lagert sich unter bestimmten Klimabedingungen (C1) ein Sediment (S1) ab. Durch eine Klimaänderung (C2) – es wird beispielsweise wärmer und feuchter – bildet sich in diesem Sediment ein Boden (B1) aus. Darauf folgt wieder eine Klimaperiode, die der von C1 entspricht, in der der Boden B1 von einem Sediment S2 überdeckt wird. Durch einen erneuten Klimawechsel entwickelt sich im Sediment S2 einer weiterer Boden (B2) usw. Auf diese Weise wächst im Laufe der Zeit eine Sediment-Paläoboden-Abfolge auf. In dieser stratigraphischen Abfolge zeichnen sich die abgebildeten Böden lediglich durch unterschiedliche Intensitäten aus, die auf die unterschiedlichen Expositionszeitspannen zurückzuführen sind. So zeigt der heute noch exponierte Boden (B5) lediglich eine stärkere Intensität (z.B. Braunfärbung) an. Den Wechsel der Paläoumweltbedingungen, die zu dem Aufbau der Sediment-Bodenabfolge geführt hat, ist in B5 nicht archiviert. Erst der Aufschluss der gesamten Sediment-Paläoboden-Abfolge erlaubt Rückschlüsse auf den Wandel der Umweltbedingungen. Mithilfe intensiver Arbeit an dem gesamten Sediment-Boden-Archiv gelangt man zu genaueren Vorstellungen des Prozessgeschehens, das diese Abfolge entstehen ließ. Selbst wenn die Prozessabläufe bekannt sind, wissen wir immer noch nicht, durch wen oder was die Prozesse gesteuert wurden. Eine entscheidende Frage in dieser Forschungsrichtung bleibt die nach dem Dominanzfaktor: Mensch, Klima, Tektonik oder systeminhärente Faktoren. Die Böden im Zusammenspiel mit den zugehörigen Lockersedimenten sind hierbei mit die wichtigsten Informa-

tionsträger, um vom Archiv zum Prozess und darüber hinaus zu den Ursachen zu kommen.

3 Böden und Klima

Zur besseren Illustration gerade des zuletzt genannten Problems wird hier ein Beispiel aus den laufenden Forschungsarbeiten an der Professur für Physische Geographie im Mittelsächsischen Lössgebiet herangezogen (Bild 2). Auf der Basis von vier selbstständig aufgenommenen, teilweise mehr als 10 m mächtigen Lössaufschlüssen (Leippen, Seilitz, Ostrau und Zschaitz) sowie eines weiteren aus der Literatur (Leippen/Lieberoth) soll hier exemplarisch gezeigt werden, wie man aus den Befunden Klima-Proxies ableiten kann. Diese Auswertung stellt einen ersten Versuch dar, die morphologischen, stratigraphischen, sedimentologischen und pedogenetischen Ergebnisse in paläoklimatische Bedingungen zu übersetzen, die zur Zeit der Entstehung der einzelnen Schichten und Horizonte geherrscht haben könnten. Mit in diese Arbeiten einbezogen wurden absolute Altersdatierungen und Untersuchungen zur Molluskenfauna. Das Ziel dieser Analyse besteht vorerst nicht darin, exakte Beweise für die Klimabedingungen zu liefern. Vielmehr geht es darum, alle Befunde auf ihre Klimarelevanz hin zu untersuchen.

Ausgangspunkt bildet eine Eiskeilpseudomorphose, die im Liegenden (d. h. unterhalb) der letztglazialen Bodenbildung eines Aufschlusses gefunden wurde. Eiskeilpseudomorphosen sind keilförmige Relikte aus Phasen mit anhaltendem sehr kaltem Klima. Der Keil ist mit stark schluffhaltigem Material gefüllt. Somit stand beim Auftauen des Eiskeiles äolisches Material zum Verfüllen zur

Verfügung. Das gleiche Material, das auch in einem zweiten Profil aufgeschlossen ist, hat anschließend eine intensive Bodenbildung erfahren. Die dabei entwickelte pseudovergleyte Parabraunerde muss unter warmzeitlichen, also dem heutigen Klima ähnlichen Bedingungen entstanden sein. Den Abschluss dieser Bodenbildungsphase muss eine feuchtere Klimaperiode gebildet haben, da alle bis dahin beteiligten Böden, gleich in welcher Reliefposition, deutliche Spuren einer Pseudovergleyung tragen. Der bodenbildende Prozess der Pseudovergleyung ist stets an Stauwasser bzw. Wassersättigung im Boden gebunden. Ein Sprung im Tongehalt des fossilen Bt-Horizonts dieser Parabraunerde kann als Hinweis auf eine mehrphasige Bildung dieses Bodens gedeutet werden. Offensichtlich wurde die Bodengenese, wie man aus Befunden aus anderen Gebieten Deutschlands weiß, auch in Sachsen von kurzen kalten Phasen unterbrochen.

Profilaufwärts kommt es zu einem raschen Wechsel in der Sedimentfolge. Zunächst folgt eine Umlagerungszone, welche hangend (d. h. darüber) relativ unvermittelt von einer Humuszone abgelöst wird. Die Letztere muss unter kontinentalem Klima entstanden sein. Zwischen diesen beiden Bildungen fand Erosion statt. Anschließend kam es unter relativ trockenen Bedingungen zur Bodenbildung mit Akkumulation von Humus. Darauf folgt, ebenfalls mit relativ abruptem Wechsel, ein rotes toniges Bodensediment, welches in den meisten Aufschlüssen nachgewiesen wurde.

Der gesamte bisher beschriebene Abschnitt lässt ein Muster aus morphodynamischen Stabilitätsphasen mit Bodenbildungen im Wechsel mit morphodynamischen Aktivitätsphasen mit Bodenumlagerungen erkennen. In kurzen Kaltphasen wurde meist Löss sedimentiert. Als morphodynamische Stabilitätsphasen werden Klimaperioden bezeichnet, in denen aufgrund intensiven Pflanzenwachstums potenziell zur Verfügung stehende Lockermaterialien nicht oder kaum hangabwärts bewegt werden können. Die Reliefdynamik ist also stark gehemmt. Morphodynamische Aktivitätsphasen weisen dagegen eine starke Reliefdynamik auf, die sich unter anderem in Materialumlagerungen äußert.

Im Hangenden folgt ein grau gebleichtes, umgelagertes Sediment mit hohen Nebengemengeanteilen und Rosterscheinungen. Diese Umlagerungen könnten unter ähnlichen Bedingungen wie jene im Liegenden entstanden sein. Darüber hinaus müssen entsprechende klimatische Voraussetzungen für die Bleichung und die Oxidation geherrscht haben. Solche festen und großen Fe-Oxidationen deuten auf intensive Frostdynamik hin. In der Abbildung ist diese Phase deshalb als kalt, aber trotzdem relativ feucht gekennzeichnet. Im Anschluss muss das Klima allmählich arider geworden sein, verbunden mit einer Löss-Sedimentation. Danach wurde es wieder feuchter und kühler und ein schwach ausgebildeter Boden (Roströhrengley) entstand. Mit zunehmender Abkühlung nahm die Tendenz zur Löss-Sedimentation und -erhaltung zu. Anfangs wurden diese Ablagerungen bei mäßig feuchten Bedingungen verlagert. Davon zeugt die Streifigkeit im Schwemmlöss. In einzelnen Aufschlüssen wurde diese Phase von einer sehr schwachen Bodenbildung

unterbrochen. Trotz der relativ unscheinbaren Ausbildung muss diese Bildung während einer Klimaverbesserung entstanden sein.

Über selten anzutreffenden Nassböden ist in den meisten Profilen eine relativ kräftige Bodenbildung zu finden. Diese Bodenbildung muss mit einem Temperaturanstieg verbunden gewesen sein. Im Liegenden dieser Bodenbildung konnten die größten Eiskeilpseudomorphosen gefunden werden (Leippen/Ostrau). Sie stehen als Zeugen tiefen Bodenfrostes während einer lang anhaltenden Kaltphase. Über dieser dunkel gefärbten Zone sind meist zwei Nassböden entwickelt. Oberhalb dieser Nassböden ist ein Bv- oder Ah-Horizont erhalten, welcher in einer Warmphase der ausgehenden Weichseiszeit entstanden ist (vermutlich Bölling vor ca. 15 000 Jahren). In der folgenden Kaltphase, der Älteren Dryas, wurde darüber möglicherweise wieder Löss sedimentiert, der in der anschließenden Warmphase (Alleröd vor ca. 12 000 Jahren) durch eine Bodenbildung überprägt wurde. Diese Bodenbildung ist durch Tonmineralneubildung bei gleichzeitiger schwacher Tonverlagerung dokumentiert. Dieses schwach tonige Material geriet in der letzten Kaltphase der ausklingenden Eiszeit, der Jüngeren Dryas (vor ca. 11 000 Jahre), in den Schwankungsbereich des Dauerfrostbodens. Dabei wurde der Ton in unterschiedlichen Sortierungsvorgängen unter Mitwirkung von Eislinsen von größeren Bodenpartikeln getrennt. Der darüberliegende Bereich wurde durch stärkere Umlagerungen in der Auftauschicht homogenisiert. Mit der beginnenden heutigen Warmzeit intensivierten sich auch die Bodenbildungsprozesse. Die Niederschläge und Temperaturen stiegen auf dem heutigen Niveau ähnliche Werte an und das Klima bekam aufgrund des zunehmenden orografischen Einflusses des benachbarten Erzgebirges einen feuchteren Gesamtcharakter. Möglicherweise kann nach detaillierteren Untersuchungen der sächsischen Lössse eine Rekonstruktion der Grenze zwischen ozeanisch und kontinental geprägtem Klima über die Weichseiszeit hinweg erstellt werden.

Die aufgezeigten Beispiele machen deutlich, dass Böden und Sedimente durchaus wertvolle Archive darstellen. Mit ihrer Hilfe lassen sich Aussagen machen zu Erscheinungen und Prozessen, die in der Geografie als Landschaftsentwicklung und -wandel bezeichnet werden. Da es nach wie vor schwierig ist, die genaue Zeitdauer der Prozesse zu rekonstruieren, die ein Boden für seine Entwicklung oder ein Sediment für seine Ablagerung benötigte, können sich die Aussagen in der Regel nur auf längerfristige Abläufe oder Zustände beziehen. Dazu gehört in erster Linie auch das Klima. Kurze Klimafluktuationen bilden sich in Böden nur unscharf oder gar nicht ab. Auch gibt es Versuche, Aussagen zum Paläoklima derart zu quantifizieren, dass man die einzelnen Klimaelemente (Niederschlag und Temperatur) mit konkreten Werten unterlegt. Hier steht die Forschung aber noch relativ am Anfang. Außerdem sollte man stets berücksichtigen, dass Böden und Sedimente keine statischen Archive darstellen, sondern sich stetig verändern bzw. weiterentwickeln.

Literatur

- [1] *Birkeland, P. W.*: Soils and geomorphology. Oxford: Oxford University Press, 1999
- [2] *Faust, D.*: Die Böden der Monts Kabyè (N-Togo). Frankfurt am Main: Institut für Physische Geographie der Johann Wolfgang Goethe-Universität, 1991 (= Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten / D, Band 13)
- [3] *Meszner, S.*: Löss in Sachsen. Unveröffentlichte Diplomarbeit. TU Dresden, 2008
- [4] *Retallack, E. J.*: Soil of the Past, an Introduction to Palaeopedology. London: Harper Collins Academic, 1990

Manuskripteingang: 18.6.2009
Angenommen am: 22.7.2009



Haubold, Fritz

Dr. rer. nat.

Studium Diplomlehrer für Mathematik und Geographie von 1973 bis 1977 an der Pädagogischen Hochschule Dresden ♦ 1983 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geographie, Fakultät Forst, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



Faust, Dominik

Prof. Dr. rer. nat. habil.

Studium Geowissenschaften (Physische Geographie, Bodenkunde, Botanik) von 1974 bis 1982 an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main ♦ 1989 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 1994 Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. ♦ seit 2001 Professor für Allgemeine Physische Geographie am Institut für Geographie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



Meszner, Sascha

Dipl.-Geogr.

Studium Geographie von 2001 bis 2008 an der TU Dresden ♦ 2008 Studienabschluss als Diplom-Geograph ♦ seit 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geographie, Fakultät Forst, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden