

# HALLESCHES JAHRBUCH FÜR GEOWISSENSCHAFTEN



Band 32/33



2011



# HALLESCHES JAHRBUCH FÜR GEOWISSENSCHAFTEN

## Herausgeber

Institut für Geowissenschaften und Geographie  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

G. BORG K. FRIEDRICH M. FRÜHAUF  
C. GLÄßER H. HEINISCH W. KÜHLING C. LEMPP  
H. PÖLLMANN K.-H. SCHMIDT W. THOMI P. WYCISK

## Schriftleitung

N. HAUSCHKE & R. LÄHNE

# Band 32/33

Halle (Saale) 2011

Institut für Geowissenschaften und Geographie  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg



## **Titelbild / Frontpage**

Im Hintergrund rechts: Porträt von Johannes Walther aus dem Jahre 1900, Archiv der Geologisch-Paläontologischen Sammlungen der Martin-Luther-Universität.

Im Vordergrund links: Durch Windschliff bizarre geformter Operculinenkalk. 3D-Scan. Größte Breite: 6,3 cm. Sammlung Johannes Walther in den Geologisch-Paläontologischen Sammlungen der Martin-Luther-Universität.

Bildautoren: L. Schimpf / M. Seiffert.

Right side in the background: Portrait of Johannes Walther, photograph from 1900. Archive of the Geological and Palaeontological collections of Martin Luther University.

Left side in the foreground: Operculina limestone that is formed bizarre by eolian corrosion. 3D scanning. Maximum width: 6.3 cm. Collection "Johannes Walther" in the Geological and Palaeontological collections of Martin Luther University.

Photograph of 3D scanning and arrangement: L. Schimpf / M. Seiffert.

## **Anschrift von Herausgebern und Schriftleitung:**

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Institut für Geowissenschaften und Geographie  
Von-Seckendorff-Platz 3/4  
D-06120 Halle (Saale)  
Tel.: 0345/55 26 115  
e-mail: [norbert.hauschke@geo.uni-halle.de](mailto:norbert.hauschke@geo.uni-halle.de)

Neue Schriftleitung ab Band 34 (2012): Th. Degen ([thomas.degen@geo.uni-halle.de](mailto:thomas.degen@geo.uni-halle.de)), D. Mertmann ([dorothee.mertmann@geo.uni-halle.de](mailto:dorothee.mertmann@geo.uni-halle.de)) und St. Stöber ([stefan.stoeber@geo.uni-halle.de](mailto:stefan.stoeber@geo.uni-halle.de))

**Druck:** druck-zuck GmbH, Seebener Straße 4, 06114 Halle (Saale)

---

ISSN 1432 - 3702

© 2011 im Selbstverlag des Instituts für Geowissenschaften und Geographie  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Alle Rechte vorbehalten

## Vorwort

Mit Band 32/33 des Halleschen Jahrbuchs für Geowissenschaften erscheint, diesmal als Doppelband für die Jahre 2010 und 2011, wieder ein „regulärer“ Band, nachdem Band 31 des Halleschen Jahrbuchs für Geowissenschaften als Tagungsband der 2009 in Halle (Saale) stattgefundenen 87. Tagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft erschienen war.

Das Hallesche Jahrbuch für Geowissenschaften wurde von Band 17 (1995) bis einschließlich Band 27 (2005) in den zwei getrennten Reihen A (Geographie und Geoökologie) und B (Geologie, Paläontologie, Mineralogie) herausgegeben, wobei Band 27 nur noch in der Reihe B erschienen ist. Die Reihe B flankierten 24 Beihefte, die in der Regel thematisch ausgerichtet waren. Reihe A und B wurden ab Band 28 zusammengeführt und bis Band 30 (2008) unter der Schriftleitung von Herrn Dr. F. Eigenfeld weitergeführt. Dr. Eigenfeld hat sich um das Hallesche Jahrbuch für Geowissenschaften in langjähriger gewissenhafter, mühevoller und erfolgreicher Arbeit große Verdienste erworben, wofür ihm sehr herzlich gedankt sei.

Die im vorliegenden Band 32/33 zusammengefassten Beiträge lassen sich vier Themenbereichen zuordnen. Eingeleitet wird der Band von einem wissenschaftshistorischen Aufsatz (Schwab et al.), in dem anlässlich des 150. Geburtstages von Johannes Walther eines bedeutenden Ordinarius der Martin-Luther-Universität gedacht wird, der als Begründer der Faziesregel den meisten Geowissenschaftlern auch heute noch ein Begriff ist. In einem eigenen Themenkomplex werden acht Beiträge zusammengefasst, in denen Ergebnisse eines Treffens des Arbeitskreises Hydrologie präsentiert werden, das 2010 an der Martin-Luther-Universität in Halle (Saale) stattfand und von Herrn Dr. D. Morche koordiniert wurde. Zwei weitere Arbeiten runden den Themenbereich Hydrologie und Hydrogeologie ab. Im Beitrag von Gossel et al. geht es um die Auswertung von Grundwasserstandsdaten auf dem Weinberg-Campus der Martin-Luther-Universität, der auch das Institut für Geowissenschaften beherbergt. Eine Gliederung des Bundeslandes Sachsen-Anhalt in hydrologische Regionen nehmen Hoffmann et al. in ihrem Beitrag vor. Ein dritter Themenbereich umfasst drei Arbeiten zu paläontologischen Themen. Brauckmann & Gröning stellen mit *Macrolepharum africanum clauthalense* eine neue Unterart dieses zu den Proetidae gestellten Trilobiten-Taxons aus dem Devon des Oberharzes vor. Dass die bedeutenden Fossilfunde aus dem Eozän des Geiseltals nach wie vor zu wissenschaftlichen Untersuchungen Anlass geben können, zeigt der Beitrag von Hellmund, in dem „Zahntürkis“ an einem Mandibelfragment von *Propalaeotherium isselanum* nachgewiesen werden konnte. Über osteologische Untersuchungen am postcranialen Skelett von *Propalaeochoerus pusillus*, das aus einer miozänen Karstspaltenfüllung in Südwestdeutschland stammt, berichten Hellmund & Heizmann. Ein Artikel von Heider & Siemroth zum Themenbereich Mineralogie befasst sich mit Erzmineralisation im Kupferberggreisen des Ramberg-Plutons im Harz.

Herausgeber und Schriftleitung bedanken sich bei allen Autoren für die eingereichten Beiträge und des Weiteren bei allen externen und internen Gutachtern, die die Manuskripte kritisch begutachtet haben. Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr. I. Lerche, der sich in bewährter Weise den englischsprachigen Texten angenommen hat.

## Preface

Volume 32/33 of "Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften" is published again as a regular annual volume, after having published Volume 31 as a proceedings volume on the occasion of the "Deutsche Mineralogische Gesellschaft" (German Mineralogical Society) 87<sup>th</sup> Conference, held in Halle (Saale) in 2009.

"Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften" from 1995 until 2005 was published in the two series A (Geography and Geoecology) and B (Geology, Palaeontology, Mineralogy). Volume 27 was published only in series B. In addition to series B 24 supplement volumes were published, mostly with a thematical orientation. Since Volume 30 (2008) the former series A and B were fused to a single series under the former editor Dr. F. Eigenfeld, who had edited series B since 1995. Dr. Eigenfeld rendered outstanding services to "Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften" during his long lasting, conscientious, successful work, for which sincere thanks are given.

The papers that are combined in this volume are assigned to four subject areas. This volume opens with a paper on scientific history (Schwab et al.), dealing with Johannes Walther (1860-1937) on the occasion of his 150<sup>th</sup> birthday. Walther was one of the most famous professors of Halle University. For most geoscientists today Walther is known as the founder of "Walther's Law". A special subject area summarizes eight papers that deal with topics presented at a workshop on hydrology which was held at Martin Luther University in Halle (Saale) in 2010. Coordinator of the workshop was Dr. D. Morche. A further two papers complete the subject area of hydrology and hydrogeology. The contribution of Gossel et al. focuses on groundwater level measurements at the Weinberg Campus, also Martin Luther University, in Heide-Süd area, where the Institute of Geosciences is situated. Hoffmann et al. present methods and results of a classification of Saxony-Anhalt in hydrological regions. A further three papers deal with palaeontological topics, the third subject area. The new subspecies of a trilobite, *Macroblepharum africanum clausthalense*, is described from the Wissenbach Shale (Devonian) of the Upper Harz Mountains in the paper by Brauckmann & Gröning. The contribution of Hellmund on "Zahntürkis" (Vivianite) from a mandible fragment of *Propalaeotherium isselanum*, which was found in the Upper middle coal (Upper middle Eocene) of the Geiseltal, demonstrates that the findings of this famous fossil site are still today of much importance for scientific studies. Comparing osteological studies on the postcranial skeleton of *Propalaeochoerus pusillus* (Suoidea) from a fissure filling of Lower Miocene age are the focus of the Hellmund and Heizmann article. Mineralogy, the fourth subject area of this volume, is represented by an article of Heider and Simroth dealing with the occurrence of ore minerals found in the "Kupferberggreisen" at the northeastern margin of Ramberg pluton in the Harz Mountains.

The publishers and the editors thank the authors for the submitted papers and the external and internal reviewers for critical reading of the manuscripts. We are indebted to Prof. Dr. I. Lerche, who corrected the English.

**Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, VI + 207 S.**  
Halle (Saale), Mai 2011

## Inhaltsverzeichnis

### Johannes Walther zum 150. Geburtstag

**Schwab, M., Hauschke, N. & Hellmund, M.**

Johannes Walther (1860 – 1937), dem Begründer der Faziesregel und Ordinarius der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zum 150. Geburtstag. .... 1-18

### Beiträge zum Treffen des Arbeitskreises Hydrologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Halle (Saale)

**Koordinator: David Morche**

**Bartsch-Herzog, B. & Opp, Chr.**

Interaktive Umweltbildung am Beispiel eines Gewässerlehrpfades an der Ulster. .... 19-32

**Dammann, S., Meinel, T. & Beljaev, V. & Frühauf, M.**

Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden auf den Bodenwasserhaushalt in Trockengebieten. .... 33-48

**Grashey-Jansen, S.**

Simulation einer sensorgestützten Präzisionsbewässerung von Standorten im Südtiroler Obstanbau. .... 49-56

**Olmo Gil, E., Trappe, M. & Becht, M.**

Saisonale Variabilität des Einflusses von Karsttributären auf die hydrologische Entwicklung der Altmühl (Bayern). .... 57-68

**Trier, H. & Opp, Chr.**

Zustand, Leitbild, Defizite, Maßnahmenvorschläge und Probleme bei der Renaturierung des Oberflächenwasserkörpers (OWK) Wenkbach. .... 69-82

**Eitelmann, A. & Morche, D.**

Untersuchungen zu Totholzablagerungen und deren Einfluss auf die Gerinnemorphologie in einem Hochgebirgsbach. .... 83-96

**Chiffard, P., Köchling, M. & Didszun, J. & Zepp, H.**

Die flächenhafte Ausweisung von Bodenfeuchteregimes – Eine Methode im Rahmen des pre-processing für die Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes. .... 97-112

**Fleischer, G.**

Hochwasser und Murgänge in kleinen alpinen Einzugsgebieten – Bedingungen, Ereignisdatenzusammenhang und menschliche »Ohnmacht«. .... 113-128

### Hydrologie und Hydrogeologie

**Gossel, W., Lähne, R., Rienäcker, J., Krauss, G. & Wycisk, P.**

Auswertung von Grundwasserstandsdaten auf dem Weinberg-Campus der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. .... 129-141

**Hoffmann, T. G., Mehl, D. & Mühlner, Chr.**

Methoden und Ergebnis einer Gliederung des Landes Sachsen-Anhalt in hydrologische Regionen. .... 143-158

## Paläontologie

### **Brauckmann, C. & Gröning, E.**

A well preserved specimen of the trilobite *Macrolepharum africanum* from the Wissenbach Shale (Devonian: Emsian/Eifelian transition) of the Upper Harz Mountains (Lower Saxony, Germany). ..... 159-164

### **Hellmund, M.**

„Zahntürkis“ an einem Mandibelfragment von *Propalaeotherium isselanum* aus dem eozänen Geiseltal bei Halle (Saale), Deutschland. .... 165-170

### **Hellmund, M. & Heizmann, E. P. J.**

Vergleichende osteologische Untersuchungen am postcranialen Skelett von *Propalaeochoerus pusillus* (Suoidea) aus der untermiozänen Karstspaltenfüllung Tomerdingen (SW-Deutschland). ..... 171-190

## Mineralogie

### **Heider, J. & Siemroth, J.**

Das Vorkommen von Erzmineralen im Kupferberggreisen am Nordostrand des Ramberges im Harz. .... 191-198

## Mitteilungen aus dem Institut

### Veranstaltungen

#### **Hellmund, M.**

75 Jahre Geiseltalmuseum an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Jahre 2009. .... 199-204

### Nachrufe

#### **Kaemmel, Th.**

Hans Jürgen Rösler, \*14. Mai 1920 - †12. Januar 2009, in memoriam. .... 205-206

#### **Schmidt, K.-H.**

Günter Zinke, \*8. Mai 1940 - † 27. Mai 2010, in memoriam. .... 206-207

## **Johannes Walther (1860-1937), dem Begründer der Faziesregel und Ordinarius der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zum 150. Geburtstag**

Max Schwab, Norbert Hauschke & Meinolf Hellmund\*

Gewidmet der Johannes Walther-Biografin, Frau Dr. Ilse Seibold, Freiburg im Breisgau

Schwab, M., Hauschke, N. & Hellmund, M. (2011): Johannes Walther (1860-1937), dem Begründer der Faziesregel und Ordinarius der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zum 150. Geburtstag. [In honour of Johannes Walther (1860-1937), the founder of Walther's Law and holder of the chair in Geology and Palaeontology at Martin Luther University Halle-Wittenberg on the occasion of his 150th birthday.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 1-18, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Johannes Walther (1860-1937) war nach seiner Berufung an die Universität Halle (Saale) von 1906-1914 zunächst Direktor des Mineralogischen Instituts und ordentlicher Professor für Mineralogie. Von 1914-1928 hatte er dann den Lehrstuhl für Geologie und Paläontologie inne und war gleichzeitig Direktor des Geologisch-Paläontologischen Instituts. Von 1924-1931 war Walther Präsident der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina in Halle (Saale). Zahlreiche seiner wissenschaftlichen Erkenntnisse zählen heute zum Allgemeingut der geologischen Wissenschaften. Ein herausragendes Beispiel ist das Gesetz von der Korrelation der Fazies (Walther'sche Faziesregel).

**Abstract:** After being appointed at the University of Halle (Saale), Johannes Walther (1860-1937) became the Director of the Mineralogical Institute and a full professor for mineralogy from 1906 to 1914. From 1914 to 1928 he held the Chair for Geology and Palaeontology and simultaneously was Director of the Institute of Geology and Palaeontology. From 1924 to 1931 Walther was President of the "Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina" in Halle (Saale). Today, numerous of Walther's scientific results are generally accepted in geosciences. An outstanding example is Walther's Law for the correlation of facies.

**Schlüsselwörter:** Wissenschaftsgeschichte, Gesetz von der Korrelation der Fazies (Walther'sche Faziesregel), Riffe, Wüsten, Geiseltal, Ordinarius der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Geologisch-Paläontologisches Institut, Präsident der Leopoldina

**Keywords:** history of sciences, Walther's Law, reefs, deserts, Geiseltal, Chair in Geology and Palaeontology at Martin Luther University Halle-Wittenberg, Institute for Geology and Palaeontology, President of the German Academy of Natural Scientists Leopoldina

---

\* Anschriften der Autoren:

Prof. Dr. Max Schwab (drmaxschwab@gmx.de), Talstr. 37c, D-06120 Halle (Saale);

Dr. Norbert Hauschke (norbert.hauschke@geo.uni-halle.de), Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06110 Halle (Saale);

Dr. Meinolf Hellmund (meinolf.hellmund@zns.uni-halle.de), Zentralmagazin Naturwissenschaftlicher Sammlungen, Geiseltalmuseum, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Domstr. 5, D-06108 Halle (Saale).

## 1. Einführung

Johannes Walther (1860-1937; Abb. 1) gehört als einer der führenden Forscherpersönlichkeiten in die klassische Periode der universitären Geologie in Deutschland und zu den bedeutenden Geowissenschaftlern Thüringens mit internationaler Ausstrahlung. Man kann ihn zu den Geowissenschaftlern zählen, die auf Forschungsreisen im 19. Jahrhundert dazu beitrugen, „weiße Flecken“ auf der Erde zu tilgen. Walther bereiste alle Kontinente, mit Ausnahme Südamerikas und der Antarktis. Er führte seine Reisen zu Zielen, die versprochen, zur Aufklärung bislang ungelöster geologischer Sachverhalte beizutragen und deren Gesetzmäßigkeiten zu erkennen.

Die väterliche und lenkende Anteilnahme Ernst Haeckels (1834-1919; siehe Walther 1953) an Walthers Studien begründete dessen spätere Forschungen, die ihm posthum die Würdigung als Begründer der Biogeologie (Bülow 1962, Seibold 1992, Middleton 1973, Ginsburg et al. 1994) und der modernen Sedimentforschung (Grabau 1913, Grumbt 1975, Friedman 1986, 1987) eintrugen. Walther studierte zunächst in Jena Zoologie bei Ernst Haeckel und anschließend Geologie und Paläontologie in Leipzig und München. Noch während seiner Studienjahre begann er an der Zoologischen Station in Neapel mit marin-geologischen Untersuchungen, wobei Algenriffe sein besonderes Interesse fanden. Damit kristallisierten sich schon frühzeitig Riffe als bevorzugtes Forschungsthema heraus. Bereits während seines ersten Neapel-Aufenthaltes 1883/84 unternahm Walther Reisen nach Sizilien und Tunis. Tunis nutzte er als Sprungbrett für einen Abstecher in die nordafrikanischen Wüsten. Das flüchtige „Erlebnis Wüste“ wurde allerdings „für sein empfängliches Gemüt zu einem Eindruck, der ihn nicht mehr loslassen sollte“ (Seibold 1992). Denn damit traten neben den Riffen die Wüsten der Gegenwart und Vergangenheit in den Fokus seiner zukünftigen Forschungstätigkeit. Walthers Reisen wurden kürzlich im Rahmen einer Sonderausstellung der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg anlässlich seines 150. Geburtstages thematisiert (Hauschke et al. 2010b). Als ein Meilenstein in der Sedimentgeologie gilt das von Walther (1893/94) formulierte „Gesetz von der Korrelation der Fazies“ (Walthersche Faziesregel), das besagt, dass verschiedene Lithofazies, die sich im Profil überlagern und damit aufeinander folgende Zeitebenen repräsentieren, in einer Zeitebene nebeneinander zur Ablagerung kommen.

Es ist eine gewisse Tragik im Leben von Johannes Walther, dass seine wichtigsten und bis heute gerühmten Forschungsergebnisse zwar die Grundlage für seine wissenschaftliche Karriere bildeten, ihn aber erst mit 46 Jahren (1906) in ein Ordinariat führten. Der Weg von Jena an die Universität in Halle (Saale) erfolgte nach fast zwanzigjährigem Forschen und Lehren seit seiner Habilitation im Jahre 1886. Die Tatsache, dass Walthers früher Konkurrent, Gustav Steinmann, seinen Ruf nach Halle als Sprungbrett von Freiburg auf den Lehrstuhl an die Universität Bonn nutzte, ermöglichte es Walther im Herbst 1906, die Universität Jena zu verlassen. Er erhielt nun an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg die Zusage auf das Ordinariat für Mineralogie. Die gleichzeitige Bestallung zum Direktor des dortigen Mineralogischen Instituts nutzte er umgehend für die Umwidmung in ein Geologisch-Mineralogisches Institut. 1914 wechselte er auf das erstmals eingerichtete Ordinariat für Geologie und Paläontologie über.

## 2. Johannes Walther in Jena und sein Weg an die Universität Halle-Wittenberg

Walther hatte vor der Berufung nach Halle (Saale) zunächst die Position eines schlecht bezahlten Privatdozenten (1886-1890) und anschließend die eines Titularprofessors (1890-1906) in Jena inne. Moralische, aber auch finanzielle Unterstützung erhielt er insbesondere von seinem engsten Freund, Carl Duisberg (1861-1935; siehe Abb. 2), die er lebenslang in Anspruch nehmen konnte. Im Übrigen musste er sich auf Privatmittel seines Vaters „zur selbstständigen Lebensführung“ stützen (Seibold 1992). Dem Einfluss Ernst Haeckels hatte er es zu verdanken, dass er 1894 als Erster zu einer bezahlten a. o. Professur (1894-1906) aus dem Ernst-Haeckel-Vermächtnis kam. In die Jenaer Hochschullehrerzeit fielen Reisen, die Walther im Rahmen Internationaler Geologenkongresse in Washington (1891), in der Schweiz (1894) und in St. Petersburg (1897) unternahm. Speziell die damit verbundenen ausgedehnten Exkursionen waren für seine Forschungen von herausragender Bedeutung (Seibold 1992, Hauschke et al. 2010a, b). Walther war jedoch, wann immer es ihm möglich war, auch auf Exkursionen in Europa unterwegs. So unternahm er unermüdlich geologische Wanderungen durch Deutschland. Die „freie“ Zeit in

Jena nutzte er zur Auswertung seiner frühen Forschungsreisen und zur Publikation der Ergebnisse.



Abb. 1: Porträt von Johannes Walther; Foto aus dem Jahre 1900.

Fig. 1: Portrait of Johannes Walther; photograph from 1900.

Nach dem Erscheinen der dreibändigen „Einführung der Geologie als historische Wissenschaft“ (Walther 1893/94) veröffentlichte er in den zwölf Jahren als a. o. Professor 31 weitere wissenschaftliche Bücher und Aufsätze, darunter „Klassiker“, wie „Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit“ (Walther 1900) sowie die speziell für den Schulunterricht verfassten Bücher „Geologische Heimatskunde von Thüringen“ (Walther 1902) und das Lehr- und Übungsbuch „Vorschule der Geologie“ (Walther 1905). Die meisten dieser Werke erlebten mehrere Neuauflagen.

Erst im Jahre 1906 gab es für Walther die Chance, Karl von Fritsch (1838-1906) auf den Lehrstuhl in Halle (Saale) nachzufolgen. Am 18. Februar teilte er Duisberg brieflich mit, dass er in Halle (Saale) für ein frei gewordenes Ordinariat vorgeschlagen sei. Die Philosophische Fakultät

an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg hatte Gustav Steinmann (1856-1929), Freiburg, an erster und Johannes Walther, zusammen mit Ernst von Koken (1860-1912), Tübingen, an zweiter Stelle auf die Berufungsliste gesetzt: „An zweiter Stelle und zwar *pari loco* schlägt die Fakultät zwei Gelehrte vor, die zwar nicht die Vielseitigkeit von Steinmann besitzen, aber ebenfalls jeder in seinem Gebiet Ausgezeichnetes geleistet haben, den a. o. Professor der Universität Jena, Dr. Johannes Walther, und den o. Professor der Universität Tübingen, Ernst v. Koken“ (Seibold 1992: 105).

In der Begründung der Philosophischen Fakultät heißt es: „Johannes W. (geb. 1860) ist in Deutschland der hervorragende Vertreter der dynamischen Geologie. Seine glänzenden Untersuchungen über die Denudation in der Wüste, die Frucht ausgedehnter Forschungsreisen in Nordafrika, Nordamerika und Vorderasien, haben eine Fülle von neuen Ergebnissen gezeitigt. Ebenso haben seine Beobachtungen über die Riffbauten bei Neapel, im Rothen Meer und bei Ceylon die Lehre von der Entstehung zoogener Gesteine erheblich gefördert. Daß er mit Stratigraphie und Feldgeologie wohl vertraut ist, hat er außer durch kleinere Arbeiten auch durch seine großen zusammenfassenden Werke dargeboten. Er wird als trefflicher Redner und anregender Lehrer sehr gerühmt. Für Halle würde er sich ganz besonders auch wegen seiner gründlichen Kenntnis der geologischen Verhältnisse des benachbarten Thüringens eignen“ (Seibold 1992: 105-106).

Steinmann verhandelte in Berlin mehrfach, und es scheint, dass er Zeit gewinnen wollte, um statt des Rufes nach Halle, den von ihm gewünschten Ruf nach Bonn zu erreichen. Als dieser Ruf dann ergangen war, schrieb Walther am 10. August 1906 an Duisberg: „Steinmann war in Bonn nicht vorgeschlagen, wollte aber dorthin, deshalb nahm er vorübergehend Halle an“ (Seibold 1992: 107).

Am 18. Oktober 1906 teilte der Preußische Minister für die geistlichen, Unterrichts- und Medizinalangelegenheiten Walther schließlich die Ernennung zum o. Professor für Mineralogie in Halle (Saale) und gleichzeitig seine Bestallung als Direktor des Mineralogischen Instituts schriftlich mit. Seine Erfolge in Jena, die nicht zuletzt darauf beruhten, die Geologischen Wissenschaften in die deutsche Öffentlichkeit und aufgrund seiner pädagogischen und rhetorischen Fähigkeiten auch in die Schulen zu tragen, schienen das preußische Erziehungsministerium hiervon überzeugt zu haben.



Abb. 2: Der enge Freundeskreis: Johannes Walther (rechts), Carl Duisberg (Mitte) und Carl Hauptmann (links): Foto um 1881 (aus Duisberg 1933).

Fig. 2: The close circle of friends: Johannes Walther (right), Carl Duisberg (center), and Carl Hauptmann (left): photograph from about 1881 (from Duisberg 1933).

Karl von Fritsch hatte sich als tatkräftiger und mit privaten Finanzen gut ausgestatteter Wissenschaftler und Organisator erwiesen, so dass Walther Anlass fand, sich positiv über das Wirken seines Vorgängers in Halle zu äußern: „*Seinem persönlichen Wirken* (gemeint ist hier von Fritsch) *allein ist es zu verdanken, daß sich das einstige, »mineralogische Kabinett« zu einem Institut für Geologie, Paläontologie und Mineralogie entwickelte, an dem in der letzten Zeit sieben Mitarbeiter als Dozenten und Assistenten gleichzeitig tätig waren*“ (zitiert nach Reichstein 1998: 136).

Zum Lehrkörper gehörten bei Walthers Ankunft im Jahre 1906 der Mineraloge a. o. Prof. Otto Luedecke (prom. 1874, habil. 1878, apl. Prof. 1894) und die Geologen Priv.-Doz. Dr. Ewald Wüst (prom. 1900, habil. 1903, Berufung nach Kiel 1910) und Dr. Hans Scupin (prom. in Berlin 1895, habil. Halle 1899, apl. Prof. 1908), sowie der Paläontologe Priv.-Doz. Dr. Dietrich v. Schlechtendahl (Priv.-Doz. von 1884 bis 1916).

Gegen Ende seiner Dienstzeit im Jahre 1901 und nach erfolgter erster Modernisierung des Institutes äußerte sich der inzwischen 63-jährige

von Fritsch resigniert in seinen Schlussworten anlässlich der 46. Versammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Halle: „*So wird wohl ein Jahrzehnt vergehen müssen, bis Halle wieder an die Reihe kommen kann, vielleicht sogar noch mehr. In jener Zeit wird hoffentlich das mineralogische Institut unserer Universität und dessen Sammlungen noch weit mehr als jetzt der Aufmerksamkeit der Geologen würdig sein. Vielleicht sehen Sie, die Sie dann zurückkehren, diese Sammlungen dann in einem neuen Gebäude, wo die wissenschaftlichen Schätze nicht so wie jetzt in der alten »Residenz« durch Feuchtigkeit und Schimmel gefährdet sind, und wo auch die Beleuchtungsverhältnisse noch besser sind als zur Zeit*“ (von Fritsch 1901: 65; vgl. Abb. 4).

In Halle (Saale) angekommen, sollte Walther sofort in das bereits begonnene Wintersemester 1906/07 mit Vorlesungen einsteigen. Das bedeutete für ihn, sich auf für ihn ungewohnte Vorlesungsinhalte vor einer größeren und erwartungsvollen Hörerzahl einzustellen. Er musste auch ihm bislang nicht vertraute Aufgaben übernehmen, wie die erneute Erweiterung und Reorganisation des Institutes und die Betreuung der Dok-

toranden, die von Fritsch hinterlassen hatte. Die Herrichtung des Institutsgebäudes musste beginnen, Anträge für finanzielle Mittel, die für dringende Renovierungsarbeiten und für die bauliche Erweiterung des Institutsgebäudes notwendig waren, mussten gestellt werden. Es ging darum, zeitgemäße Räumlichkeiten für den Unterricht, für Labore, die Sammlungen, die Bibliothek und ebenfalls Arbeitsräume für die Mitarbeiter zu schaffen.



Abb. 3: Titelbild von Johannes Walthers »Wüstenklassiker« „Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit“ in 2. neu bearbeiteter Auflage von 1912.

Fig. 3: Book cover of Johannes Walther's desert classic "The law of desert formation – present and past", the 2nd edition 1912.

Neben seinen Bemühungen um Verbesserung der personellen, finanziellen und strukturellen Verhältnisse im Institut musste Walther auch an seine Familie denken. Seine Ehefrau Janna, Sohn Hellmut (geb. 1900) und Tochter Sigrun (geb. 1905) übersiedelten in zwei Etappen von Jena nach Halle (Saale). Walther mietete nach dem Bezug eines Übergangsquartiers im Vorort Giebichenstein (September - Oktober 1906) eine im

damaligen Neubauviertel in der Nähe des Reilecks gelegene Wohnung in der Reichardtstraße 21 an. Später erfolgte der Umzug in eine eigene Villa im sog. Heimatstil, gelegen im heutigen Denkmalbereich »Kurviertel am Reilsberg«, Fasanenstr. 4 (J. W. PA 16629). Die Familie integrierte sich rasch in die gehobenen akademischen Kreise der Universität, in denen Walther 23 Jahre lang als angesehener Ordinarius wirken sollte. Am Ende seiner Laufbahn als Hochschul-lehrer lautete der Eintrag im Halleschen Adressbuch: „Walther, Johannes; Dr. med. h. c., Dr. sc. h. c., Dr. phil., em. Univ. Prof., Geh. Rat.“

Trotz seiner zahlreichen neuen Aufgaben in Halle (Saale) bereitete Walther im Sommer 1906 seinen geplanten dritten Aufenthalt in Neapel vor (siehe Kap. 3). Am 11. August 1906 stellte er beim zuständigen Ministerium einen Antrag auf die Überlassung eines Arbeitsplatzes in der dortigen Zoologischen Station für den Zeitraum von Oktober bis Dezember 1906. Darüber hinaus bat er um die Genehmigung, seine Vorlesungen den Herren Luedeke, Scupin und Wüst bis zum 1. Januar 1907 zu übertragen. Beide Anträge wurden durch die Fakultät und das Ministerium genehmigt (J. W. PA 16629). Der Minister bestätigte diese Anträge am 6. September 1906 mit den folgenden Worten: „... auf die Gesuche vom 17.-20. Juli dieses Jahres (dem schriftlichen Antrag war vermutlich ein mündliches Gesuch vorangegangen) will ich Ihnen einen der zu meiner Verfügung stehenden Arbeitstische in der Station des Geheimen Reg.-Rats Professor Dr. Dohrn zu Neapel für Monate Oktober, November, December 1906 hiermit zur Benutzung überlassen. Herr Prof. Reg.-Rat Prof. Dr. Dohrn ist mit entsprechender Nachricht versehen.“

Dieser Vorgang ist datiert vor der am 18. Oktober 1906 durch den zuständigen preußischen Minister im Auftrag von Kaiser Wilhelm I. erfolgten „Ernennung zum ordentlichen Professor an der Philosophischen Fakultät der Universität Halle-Wittenberg“. Mit dieser Ernennung waren der sofortige Antritt und die unmittelbare Einsendung des Verzeichnisses der für das Wintersemester 1906/07 angekündigten Vorlesungen an den Dekan verbunden. Offenbar hatte Walther im Ministerium einen sehr guten Stand, so dass niemand an dessen Forschungsreise und die Übertragung seiner Lehrverpflichtungen an die drei Dozenten des Mineralogischen Instituts (Reichstein 1998, Schwab 2003) Anstoß nahm. Auch sein im Frühjahr 1910 erfolgter Arbeitsaufenthalt an der Station in Neapel wurde ihm auf diesem Wege genehmigt. Damit hatte Walther die

Möglichkeit, seine bereits 1883/84 begonnenen Untersuchungen an der Taubenbank zu Ende zu führen (Walther 1910a).

Walther verwendete in der Zeit von 1907 bis 1909 viel Kraft auf die angestrebte Einführung der „Geologie“ in den Schulunterricht und entfaltete außerdem noch eine rege Publikationstätigkeit. So konnte er in Halle (Saale) bald auf Erfolge blicken, die in Jena ausgeblieben waren. Er hielt bereits im Sommersemester 1907 vor 25 Hörern die Vorlesung zur „Erdgeschichte“ und betreute 40 Studenten im Anfängerpraktikum. Bei seiner ersten öffentlichen Vorlesung im Wintersemester 1907/08 erschienen im großen Hörsaal der Universität etwa 300 Personen.



Abb. 4: Der von Johannes Walther verfasste „Führer durch die Lehr- und Schausammlungen des Geologisch-Palaeontologischen Instituts der Universität Halle“, in 2. Auflage (Walther 1928b).

Fig. 4: “Guide for the Collections of the Geological and Palaeontological Institute of Halle University”, 2nd edition 1928, written by Johannes Walther.

Am 20. Juni 1910 stellte Walther einen Antrag auf eine Forschungsreise nach Oberägypten und

Nubien, die von Januar bis Ende April 1911 dauern sollte. Er schreibt dazu: „Nachdem ich mehr als drei Jahre meine Kraft der Umgestaltung des mir unterstellten Instituts und der Einrichtung des darin zu leistenden akademischen Unterrichts gewidmet habe, fühle ich die Verpflichtung, wissenschaftliche Unternehmungen, die durch meine Berufung nach Halle unterbrochen waren, wieder aufzunehmen. In den letzten Osterferien konnte ich meine Arbeiten über die Sedimente der Taubenbank im Golf von Neapel zum Abschluss bringen. Nun drängt es mich meine früher so eifrig gepflegten Wüstenstudien wieder aufzunehmen ...“ (J. W. PA 16629). Die Vertretung seiner Vorlesungen während dieser Abwesenheit sollten, wie bereits früher geschehen, die Herren Luedecke und Scupin und die Institutsleitung der Bibliothekar von Schlechtendahl übernehmen.

Mit seiner zweiten Ägyptenreise 1911 verfolgte Walther das Ziel, zunächst die Beobachtungen in den Wüsten Oberägyptens und des Sudans fortzusetzen und dort auch Georg Schweinfurth zu treffen, der Walther „das nach ihm benannte »Walther-Tal« zeigen wolle. Danach vertiefe er die Korallenriffbeobachtungen am Roten Meer“ (J. W. PA 16629). Er erhielt wiederum die Zustimmung zu einer Forschungsreise, ohne dass sein Einkommen dadurch geschmälert wurde. Außerdem bekam er noch eine Reisebeihilfe von 1500 RM mit der Auflage, „die Ausbeute der Studienreise an Sammlungen pp dem Geologisch-Mineralogischen Institut als Eigentum zu überweisen“ (J. W. PA 16629).

Nach Vorlage eines Kostenvoranschlags für die Ägyptenreise vom 29.10.1910 von über 4000 RM für Eisenbahn- und Dampferfahrten, Transportiere und von 3000 RM für den täglichen Unterhalt der Begleiter, Dolmetscher und deren Löhne, erhielt er eine weitere Beihilfe von 1000 RM. Die jetzt noch fehlenden Mittel wollte Walther durch den Verkauf von so genannten 15-Stück-Sammlungen charakteristischer „Wüsten-gesteinsarten“ zu je 100 RM in Deutschland aufbringen, ein Geschäft, das sich offenbar lohnte. Auf ähnliche Weise plante er auch die Finanzierung der Australienreise vom 15. Juni bis Ende Oktober 1914, die dann durch den Ausbruch des 1. Weltkriegs abenteuerliche Züge annahm (siehe Seibold 1992, Hauschke et al. 2010b). Dieses dokumentierte er am 22. Januar 1915 in seinem Reisebericht an das zuständige Ministerium (J. W. PA 16 629). Die Australienreise von Johannes Walther, der aufgrund seiner richtungweisenden Forschungen mittlerweile internationale Be-

rühmtheit erlangt hatte, erfolgte auf Einladung der British Association, die in Melbourne und Sydney einen Kongress veranstaltete. Auf Exkursionen bot sich ihm unter anderem die Möglichkeit, seine Untersuchungen an Lateriten entscheidend weiterzuentwickeln (Walther 1915, 1916).

Walther setzte zunächst den durch von Fritsch begonnenen strukturellen Ausbau der „Geologie und Paläontologie“ an der Universität Halle (Saale) mit dem Ziel fort, diese auch institutionell abzutrennen (Reichstein 1998). Offenbar beschleunigten dessen Aktivitäten die 1915 vollzogene Teilung des Institutes in das Mineralogisch-Petrographische und das Geologisch-Paläontologische Institut. Mit der Schaffung zweier Institute war eine wechselseitige Vertretung der beiden Direktoren verbunden. Bis 1930 existierte für beide Institute haushaltsrechtlich ein gemeinsamer Etat, der folgendermaßen aufgeteilt wurde: Für das Mineralogisch-Petrographische Institut 2700 RM, für das Geologisch-Paläontologische Institut 4550 RM und für die gemeinsam genutzten Räume 2250 RM.

In den ersten Jahren ergaben sich bereits verschiedene personelle Veränderungen. Als Nachfolger für den 1910 verstorbenen Mineralogen O. Luedecke wurde im Jahre 1911 H. E. Boeke (1881-1918) zum apl. Professor für Mineralogie und Petrographie berufen. Zum Nachfolger von Boeke, der 1914 den Ruf auf den Lehrstuhl der Universität Frankfurt am Main annahm, wurde auf Vorschlag von Walther der von der TH Danzig kommende Vulkanologe Ferdinand von Wolff (1874-1952, prom. 1899, habil. 1907) berufen und zum Direktor des Mineralogisch-Petrographischen Institutes ernannt. Über einen Zeitraum von 38 Jahren vertrat dann von Wolff das Fachgebiet Mineralogie und Petrographie an der Universität in Halle (Saale). Im Schatten von Walther spielte der Stratigraph Scupin (1869-1938) weiterhin nur eine Nebenrolle (vgl. Schwab 2003).

Walther setzte einerseits die durch von Fritsch begonnene Ausrichtung der wissenschaftlichen Arbeiten auf Mitteleuropa fort, andererseits rückte er das Institut durch seine Person stärker in das Blickfeld der internationalen Aufmerksamkeit. Hinzu kam, dass besonders während des 1. Weltkriegs und danach ein gesteigertes Interesse an den mitteleuropäischen Bodenschätzen bestand. Dies führte zur Gründung des vom Bergbau und der Industrie geförderten „Halleschen Verbandes für die Erforschung der Mitteleuropäischen Bodenschätze und ihrer Verwertung e.V.“ durch Johannes Walther sowie den Direktor des Oberbergamts Halle (Saale), Otto Scharf. Unter der redak-

tionellen Betreuung von Johannes Weigelt und Ferdinand von Wolff wurden zwischen 1919 und 1944 18 Bände vom „Jahrbuch des Halleschen Verbandes für die Erforschung der Mitteleuropäischen Bodenschätze und ihrer Verwertung e.V.“ herausgegeben.

Es wurden jeweils am Montag Instituts-Kolloquien sowie gemeinsame Veranstaltungen mit den Instituten in Leipzig und Jena durchgeführt. Erhalten hat sich eine diesbezügliche Fotografie aus dem Innenhof der Neuen Residenz, die die Teilnehmer eines gemeinsamen Kolloquiums in Halle (Saale) zeigt (Abb. 5). Die erläuternde Namensliste wurde dankenswerterweise von Dr. Kurt Pietzsch, Leipzig, dem späteren Direktor des Sächsischen Geologischen Landesamtes, zur Verfügung gestellt. Anwesend waren damals auch die drei Institutsdirektoren Kossmat, von Seidlitz und Walther. Die Abwesenheit von Johannes Weigelt auf diesem Bild erklärt sich durch dessen USA-Aufenthalt.

Unter Walther und Weigelt wurden im Zeitraum von 1907 bis 1929 27 Dissertationen und eine Habilitation (1918: Johannes Weigelt) erfolgreich abgeschlossen. Weigelt kehrte damals schwer verwundet aus dem 1. Weltkrieg zurück. Insgesamt fielen in diesem Krieg sieben junge Mitarbeiter aus den beiden Instituten.

Nach seiner Wahl zum Präsidenten der Leopoldina (1924) ging Walthers Tätigkeit als Institutsdirektor mehr und mehr auf Johannes Weigelt über. Leider gibt es aber hierzu keine offiziellen Dokumente, da viele Unterlagen in den Umbruchszeiten nach 1945 (Kriegsende, Ablösung und Deportation von Weigelt), 1968 (Institutsauflösung) und 1990 im Zuge der Neugründung des „Instituts für Geologische Wissenschaften und Geiseltalmuseum“ offenbar verloren gegangen sind.

Die gemeinsame Festsitzung von Universität und Leopoldina am 20. Juli 1930, die dem Präsidenten Johannes Walther anlässlich seines 70. Geburtstages gewidmet war, bildete zugleich den Schlusspunkt in Walthers Wirken am Institut und in der Akademie. Das im Laufe seiner Amtszeit als Leopoldina-Präsident von Walther vernachlässigte und von Weigelt vertretene Direktorat des Geologisch-Paläontologischen Instituts übergab Walther schließlich im Sommersemester 1929 offiziell an Johannes Weigelt. Um den Berufungsvorschriften zu genügen, war letzterer nach kurzem Intermezzo an der Universität in Greifswald wieder nach Halle (Saale) zurückgekehrt.

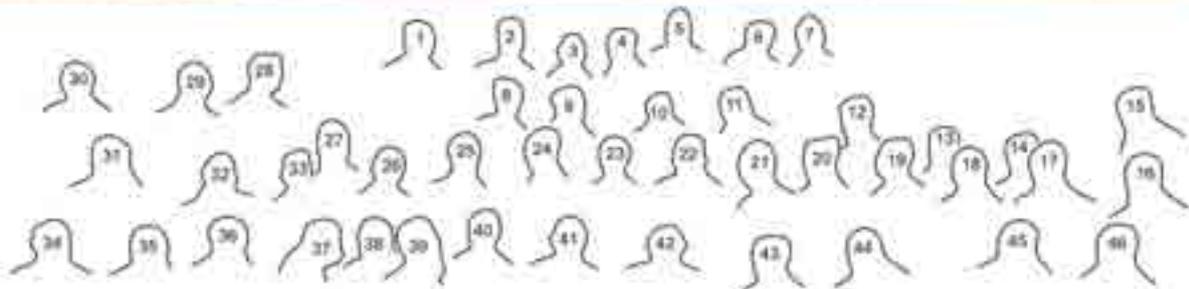


Abb. 5: Teilnehmer am gemeinsamen Instituts-Kolloquium der Universitäten Halle (Saale), Jena und Leipzig; aufgenommen im Jahre 1926 im Innenhof der Neuen Residenz, dem damaligen Geologisch-Paläontologischen Institut in Halle (Saale).

Fig. 5: Participants of the general Geological Institute Colloquium of the Universities in Halle (Saale), Jena and Leipzig; photograph from 1926 in the courtyard of the "New Residence", the former Institute for Geology and Palaeontology in Halle (Saale).

Namensliste / List of participants: 1. Studienrat Nuß, Senftenberg, 2. Dr. Hans Becker, Leipzig, 3. Herbert Wugk, Leipzig, 4. Walter Bücking, Leipzig, 5. Juan Olsacher, Córdoba, Argentinien, Stud. in Dresden, 6. Dr. Johannes Kühnel, Leipzig, 7. Willibald Höpfner, Leipzig, 8. Gertrud Langer, Leipzig, 9. Adele Bonnet, Leipzig, 10. Hedwig Frenzel, Leipzig, 11. Dr. Erich Wettig, Leipzig, 12. Hans Gellert, Leipzig, 13. Dr. Frick, Leuna, 14. Forstass. W. v. Freyberg, Gräfenhainichen, 15. Hans Wehrli, Leipzig, 16. Dr. Walter Hoppe, Jena/Leipzig, 17. Dr. Hugo Lück, Leipzig, 18. Dr. Richard Lehmann, Halle (Saale), 19. Armin Graupner, Leipzig, 20. Paul Reibisch, Leipzig, 21. Dr. Ben Barnes, Halle (Saale), 22. Dr. W. Staub, Jena, 23. P. Müllers, Jena, 24. Dr. Hans Reichert, 25. Dr. Fritz Härtel, Leipzig, 26. Dr. Reichard Pfalz, Leipzig/Florenz, 27. Karl Bürger, Halle (Saale), 28. Dr. Johannes Schultzky, Halle (Saale), 29. Dr. Albert Bernstein, Leipzig, 30. Otto Worch, Halle (Saale), 31. Berging. Öhring, Halle (Saale), 32. Dr. Kunitz, Halle (Saale), 33. Dr. Deubel, Jena, 34. Georg Moesta, Leipzig, 35. Dr. Röpke, Halle (Saale), 36. Dr. Bruno v. Freyberg, Halle (Saale), 37. Dr. C.W. Kockel, Leipzig, 38. Dr. Carl Gäbert, Naumburg, 39. Geheimrat Prof. Johannes Walther, Halle (Saale), 40. Prof. Henkel, Schulpforta, 41. Prof. Sun Yen Chu, Peking/Halle (Saale), 42. Prof. v. Wolff, Halle (Saale), 43. Geheimrat Prof. Franz Kossmat, Leipzig, 44. Prof. von Seidlitz, Jena, 45. Prof. Schlüter, Halle (Saale), 46. Dr. Kurt Pietzsch, Leipzig.

Walther zog sich nach seiner Emeritierung 1928 weitgehend aus dem Institut zurück und nahm nur noch ausnahmsweise an den Institutskolloquien teil. Seine letzte Eintragung ins Kolloquienbuch datiert vom 1. Mai 1930.

### 3. Walthers geowissenschaftliche Forschungen

Walthers Forschungsschwerpunkte konzentrierten sich auf Riffe und Wüsten der erdgeschichtlichen Vergangenheit und Gegenwart. Dabei nahmen seine Untersuchungen an Riffen ihren Ausgang im Golf von Neapel (Walther 1885, Walther & Schirlitz 1886). Als besonders geeignetes Forschungsgebiet hatte sich die Taubenbank, eine Untiefe im Golf, erwiesen (Abb. 6), die sich nach seinen Kartierungen von 1885 „durch die Anhäufung kalkabscheidender Algen, welche in ziemlich regelloser Verteilung, aber vorwiegend auf den höchsten Teil der Untiefe gedeihen“ (Walther

1910a), auszeichnete. Als Walther nach 25 Jahren die Taubenbank erneut kartierte, fand er hier eine völlig veränderte Sedimentverteilung und eine ebenfalls veränderte Besiedlung vor (Walther 1910). Nach Überprüfung seiner früher bereits erzielten Ergebnisse stellte er fest, dass in der Zwischenzeit tatsächlich wesentliche Veränderungen in der Sedimentverteilung und der Besiedlung erfolgt waren. Er schloss daraus, dass Fazieswechsel nicht zwangsläufig über lange geologische Zeiträume hinweg erfolgen müssen, sondern dass sich auch kurzzeitige Veränderungen im Ablagerungsraum, wie die Auswirkungen des verheerenden Ausbruchs des Vesuvs im Jahre 1906, widerspiegeln. Seine auf der Taubenbank gemachten Beobachtungen stimmen gut mit Erfahrungen überein, „welche der Geologe beim Studium mariner Profile immer wieder macht: organisch entstandene, geschichtete Kalke zeigen oft in den aufeinanderfolgenden Lagen einen raschen Wechsel fossilreicher Lumachellen,

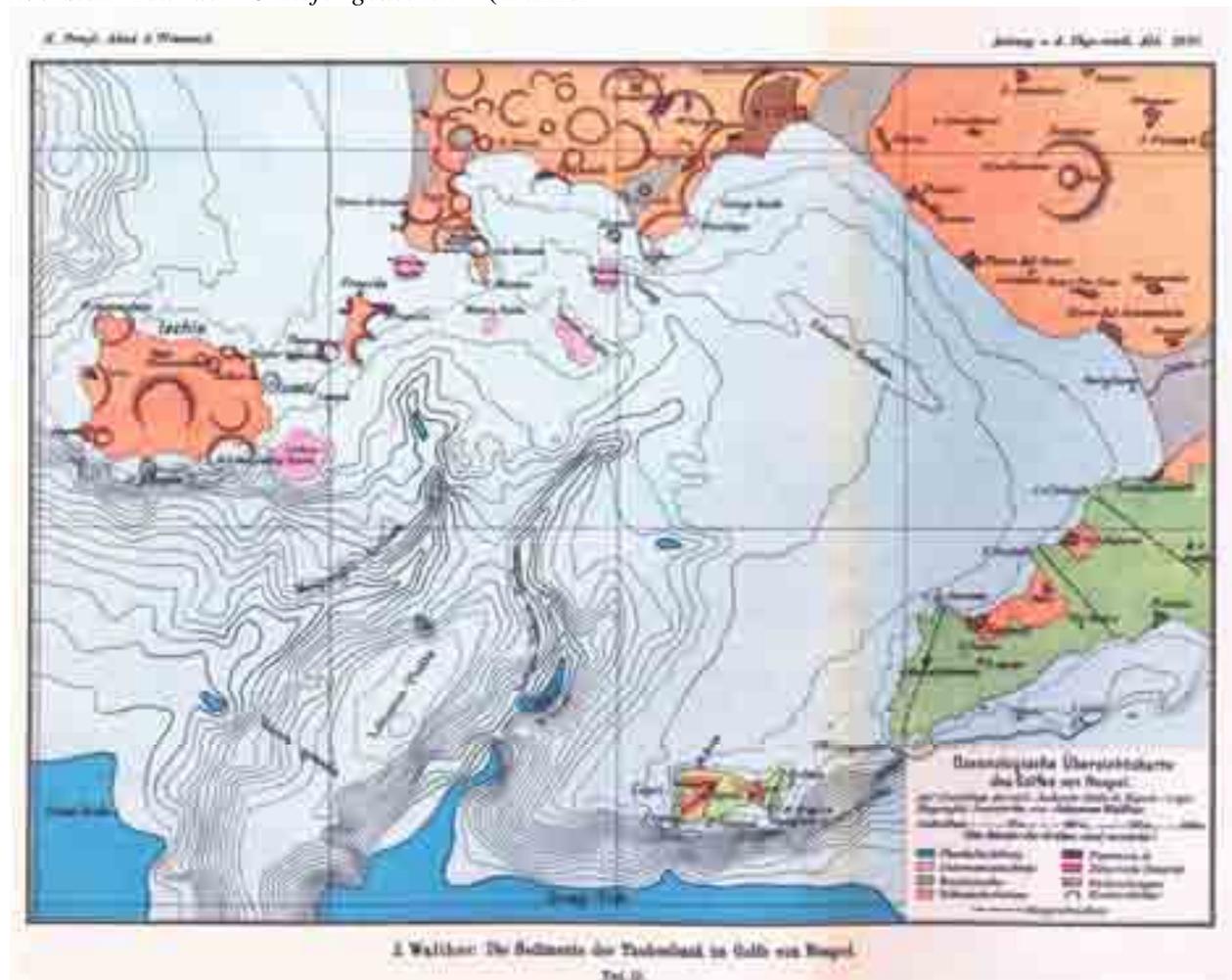


Abb. 6: Karte des Golfes von Neapel mit der südlich von Pozzuoli gelegenen Taubenbank, aus Walther (1910a).  
Fig. 6: Map of the Gulf of Naples, with the "dove bank", a shoal south of Pozzuoli; from Walther (1910a).

*dichter Kalkbänke und anderer Zwischenlagen, die auf angewitterten Flächen aus zahlreichen Bruchstücken nicht näher bestimmbarer Schalenreste zusammengesetzt sind“* (Walther 1910a).

In seinen Arbeiten über die Taubenbank beschrieb Walther erstmalig Algen als Riffbildner (Hauschke & Gischler 2008). Hierbei betonte er die Sediment bindende Funktion dieser Kalk ausscheidenden Algen, die durch rasches Wachstum Lockersedimente fixieren und dadurch zum Aufbau einer erhöhten, riffartigen Struktur führen können. Walther wies entschieden auf die Entstehung von Karbonatsanden durch Bioerosion hin, wobei er die Tätigkeit von Crustaceen besonders herausstellte. Er war der Erste, der die Bedeutung der Bioerosion erkannte. Diesem Problem widmete er sich später noch ausführlich im Rahmen seiner Untersuchungen an Riffen in Südindien (Walther 1891a). Anstelle der Kalkalgen betonte er hier aber besonders die Bedeutung von Korallen bei der Riffbildung, wie übrigens bereits bei der Erkundung der Sinai-Riffe (Walther 1888). In seiner Arbeit von 1891a beschrieb er Riffe anschaulich als Gerüste, die verhindern, dass sich der Detritus auf dem Meeresboden gleichmäßig verteilt, was auf diese Weise zu einem positiven Relief führt.

Seine ausgeprägte Beobachtungsgabe und die Fähigkeit, geologische wie biologische Befunde miteinander zu verknüpfen, führten Walther zu völlig neuen Einsichten und Erkenntnissen hinsichtlich der Riffentwicklung. Er stellte in seiner Sinai-Arbeit (Walther 1888) auch die engen Beziehungen zwischen der Internstruktur und der äußeren Form von Riffkörpern heraus und erkannte als Erster den für die Riffe bedeutsamen Aspekt der geologisch strukturierten Riff-Unterlage ("antecedent topography", Hoffmeister & Ladd 1944; siehe Ginsburg et al. 1994). Die heraus gehobenen und bereits erosiv zertalten Sinai-Riffe ermöglichten es ihm, deren dreidimensionales Faziesmuster exakt zu erfassen und mit der Riff-Topographie in Beziehung zu setzen.

Auch der Wüstenforschung widmete sich Walther auf ausgedehnten Forschungsreisen. Neben den Wüstengebieten Nordafrikas, insbesondere Ägyptens (1887, 1911), bereiste er auch die heutigen Wüsten im Westen der USA (1891), Zentralasiens (1897) und Australiens (1914). Daneben galt sein Interesse aber immer auch Wüstenablagerungen der erdgeschichtlichen Vergangenheit, wobei die Sedimentfolgen

des Buntsandsteins rasch in den Fokus seiner Forschungen und Überlegungen zur Identifikation fossiler Wüsten und zum Paläoklima gerieten. Zusammengefasst wurden die Ergebnisse dieser Untersuchungen in seinem »Wüsten-Klassiker« „Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit“, der vier Auflagen erlebte und von Auflage zu Auflage ständig aktualisiert und erweitert wurde (vgl. Abb. 3: in 2. Aufl.). Aufgrund des Nachweises verschiedener Klimazeugen, deren paläogeographischer Verteilung seit dem Präkambrium bis heute, folgerte Walther, dass sich das Klima verändert haben musste und ebenfalls die Lage der Kontinente zueinander. In Ermangelung eines Mechanismus, wie er heute durch die Plattentektonik gegeben ist, erwog er „*Verschiebungen der Erdachse*“ (z. B. im „Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit“, 4. Aufl. von 1924; siehe Gischler & Glennie 1997).

Bei seinen Wüstenforschungen richtete Walther sein Augenmerk auf die grundlegenden Charakteristika von Wüsten, wie Erosions- und Sedimentationsprozesse. Des Weiteren interessierten ihn die Voraussetzungen, die Wüsten heute und in der Erdgeschichte entstehen ließen. Einen Detailspekt, die Entstehung von Windkantern (Walther 1887, 1911), arbeitete Walther in mehreren Zeitschriftenartikeln gesondert heraus. Diese „Kantengerölle“, die durch die schleifende Wirkung von mit Sand beladenen Windströmungen entstehen, treten sowohl in arid-heißen, als auch in arid-kalten Klimaten auf. Walther fand Windkanter in präkambri-schen Ablagerungen Schottlands, im Buntsandstein Mitteleuropas und auch im Pleistozän Norddeutschlands. Er schloss darauf, dass sedimentäre Abfolgen, in die Windkanter eingeschaltet sind, Hinweise auf einen kontinental geprägten, wüstenhaften Ablagerungsraum geben (Seibold 1992, Gischler & Glennie 1997, Hauschke et al. 2010a, b).

Während seiner aktiven Zeit in Halle (Saale) musste sich Walther häufig mit Kritik auseinandersetzen, die sich an den von ihm formulierten sog. ontogenetischen Regeln und Aussagen zur Biogeologie, zum Aktualismus, zur Fazies (Walther 1893/94, 1926b und 1927) und zu seinen Bestrebungen, die Geologie als Lehrfach in den Schulen zu etablieren (Walther 1908, 1910b, 1918 u.a.), entzündeten. Als Ordinarius für Geologie und Paläontologie an einem „Mineralogischen“ Institut der preußischen, protestantischen „Provinz-Universität“ Halle-Wittenberg

war sein Einfluss auf die geologischen Wissenschaften in Deutschland gering. Von größerer Bedeutung jedoch war es, dass er, der weltweit Gereiste, es nicht vermochte, weder in Jena noch in Halle (Saale) eine größere Zahl von Schülern um sich zu scharen. Heute wenig bekannt ist die Würdigung Johannes Walthers durch den Wiener Geologen und Lehrbuch-Autor Schaffer (1924), der schreibt: *„Das Buch ist Johannes Walther gewidmet, der den steinernen Zeugen der Vorwelt Leben und Kraft der Gegenwart verlieh. Damit wollte ich den Hauptwert der wissenschaftlichen Tätigkeit Walther's kurz kennzeichnen, sein überragendes Verdienst, das er sich durch das Erfassen der Bedeutung der ontologischen Methode für die geologische Erkenntnis erworben hat. Es war eine bahnbrechende Tat, als er 1890-1893 die drei Bände der »Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft« veröffentlichte. Er behandelte darin auf Grund seiner umfangreichen Studien die heutigen Erscheinungen der Erdoberfläche als Wirkung derselben Kräfte der Vorzeit, die heute noch am Werke sind. Dadurch hat er unserer Forschung neue Bahnen gewiesen.“*

Walther wurde im Ausland weitaus höher geschätzt als in Deutschland. Bedeutende zeitgenössische Würdigungen seiner maßgebenden Arbeiten fanden in Publikationen zum Aktualismus (Andree 1908 bis 1938, Weigelt 1930) und zur Sedimentologie (Grabau 1913), ferner auch in den Glückwunschschriften und Nachrufen insbesondere von Johannes Weigelt (Weigelt 1930, 1937, 1938) ihren Niederschlag. Weigelt zollte seinem Lehrer und Förderer Johannes Walther große Hochachtung, verdankte er ihm doch sein Interesse an der Paläobiologie und Biostratonomie (Weigelt 1927, 1999).

Bei den meisten Würdigungen handelt es sich allerdings um posthume Beiträge. Unter den späteren Arbeiten, die sich dem Leben und Werk von Johannes Walther widmen, seien hier aus dem deutschsprachigen Raum stellvertretend genannt: Schaffer (1939), Steiner (1957), von Bülow (1962, 1970), Grumbt (1975), Seibold (1987, 1992), Partier (1993) und Hauschke & Gischler (2008). In den USA machten sich um die „Wiederentdeckung“ von Walther besonders folgende Autoren verdient: Twenhofel (1938), Middleton (1973), Friedman (1986, 1987, 1997), Ginsburg (siehe Ginsburg et al. 1994) und Gischler (siehe Gischler & Glennie 1997). In der UdSSR ist Vysockij (1965) zu nennen. Unter den jüngeren Würdigungen müssen besonders Okada & Kenyon-Smith (2009) genannt werden.

Ohne diese Autoren wäre die mit seinem Namen verbundene stratigraphische Grundregel, sein „Gesetz von der Korrelation der Fazies“, der Vergessenheit anheim gefallen (Hesse et al. 1974).

Besondere Beachtung fanden Walthers langjährige Bestrebungen, geologische Erkenntnisse auch in die Schulen zu tragen (Dorsch 2005). Bemerkenswert ist, dass Walther damit bereits in Jena begann und diese Bestrebungen in Halle (Saale) fortsetzte. Er löste so besonders unter Geographen, Geologen und Pädagogen kontroverse Diskussionen aus, die bis in die Gegenwart reichen. In der DDR vertrat besonders Rudolf Hohl (1906-1992) die Ansicht, dass die Geologie auch in die Schulbücher und in den Unterricht der Mittel- und Oberstufe gehöre, und er erreichte letztlich dieses Ziel für den damaligen Osten Deutschlands.



Abb. 7: Titelblatt zur ersten Publikation über Wirbeltierfunde aus dem Eozän des Geiseltals von Ben Barnes (1927).

Fig. 7: Title page of the first publication, written by Ben Barnes (1927), on findings of vertebrates from the Eocene of the Geiseltal.

Während Walthers Tätigkeit in den 1920er Jahren in Halle (Saale) rückten die Aufsehen erregenden Wirbeltierfunde in den mitteleozänen Braunkohlen und Zwischenmitteln des Geiseltals in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses. Der konkrete Anteil von Johannes Walther an der Erforschung des Geiseltals und



Abb. 8: Ausgräber im Geiseltal, in der Bildmitte Ehrhard Voigt mit Wollmütze, über einen neuen Fund gebeugt. Es handelt sich dabei um den berühmt gewordenen Urferd-Hengst *Propalaeotherium isselanum*. Foto aus dem Jahre 1933.

Fig. 8: Excavators in the Geiseltal, with Ehrhard Voigt in the middle of the photo (with woollen hat) bending over a new finding: the famous ancestral horse stallion *Propalaeotherium isselanum*. Photograph from 1933.

dessen Fossilinhalts bleibt jedoch insgesamt gering. Publikationen unter seiner alleinigen Autorenschaft sucht man vergebens.

Die Chronologie der Fossilfunde aus dem Geiseltal liest sich in dieser Zeit folgendermaßen. Sie umfasste bis 1925 erst wenige Fundstücke, deren Verbleib zum Teil nicht mehr zweifelsfrei nachvollziehbar ist:

1. Wirbeltierfund (*Lophiodon* = großes unpaarhufiges Säugetier) von Steiger Krögel aus dem Jahre 1908, Grube Cecilie (vgl. Vetter 1931, 1932: 29). Dieser Fund wurde dem Geologischen Institut in Halle (Saale) durch Lehrer Heck übergeben (vgl. Barnes 1927: 18).

2. Salzmann barg 1912 weitere Reste von *Lophiodon*, von Schildkröten und 1913 von Gastropoden, die insgesamt nicht erhalten werden konnten (Vetter 1931, 1932: 30).

Dies ist vermutlich auf das damalige Konservierungsproblem zurückzuführen, denn die Paraffin- und die Lackfilmmethode zur dauerhaften Konservierung wurden erst Anfang der 1930er Jahre von Ehrhard Voigt entwickelt (z. B. Voigt 1933a, b).

3. Ein Steiger fand 1925 Reste einer Sumpfschildkröte auf der Grube Cecilie, und Direktor Schlüter übermittelte diese dem Geologischen Institut in Halle (Saale) (Vetter 1931, 1932: 31).

Durch die letztere Nachricht war schließlich auch Johannes Walther auf die Fossilfunde im Geiseltal aufmerksam geworden. Er folgerte aufgrund der Fundumstände auf das Vorhandensein eines ganzen fossilführenden Horizontes (vgl. Barnes 1927: 5; Abb. 7).

Die eigentliche Bedeutung von Johannes Walther für die Geiseltalforschung liegt in der Tatsache begründet, dass er, nachdem über viele Jahre nur sporadische Funde gemacht und geborgen worden waren, seinen Doktoranden Ben Barnes (siehe Abb. 5: Nr. 21), dessen Vorfahren ursprünglich aus Liberia stammten, beauftragte, zum allerersten Mal eine systematische Grabung an einer konkreten und fossilhöffigen Fundstelle auf der Grube Cecilie im Geiseltalrevier durchzuführen.

Der Beginn der systematischen Grabungsaktivitäten lag im Frühjahr 1926 (vgl. Vetter 1931, 1932: 31), und es kam in vergleichsweise kurzer Zeit eine kleine Wirbeltierfauna zu Tage, die sowohl Reptilien wie z. B. Schlangen, Schild-

kröten und Krokodilreste, aber auch Zähne und Knochen verschiedener Huftierarten umfasste. Barnes legte diese Ergebnisse in einer ansprechenden Publikation nieder (Barnes 1927; Abb. 7), die er mit sieben Textfiguren und drei Bildtafeln erläuterte. Nach Abschluss der Arbeit von Barnes wurden die Ausgrabungen weiter fortgesetzt. Es steht außer Frage, dass Walther damit auch den entscheidenden Anstoß für die Folgegrabungen von Johannes Weigelt und für diejenigen der zahlreichen wissenschaftlichen Nachfolger gegeben hat. Insofern hat er auch einen erheblichen Anteil an der sich später ergebenden, weltweiten Bedeutung dieser dann so genannten „Fossilagerstätte Geiseltal“ (Abb. 8).

Johannes Walther hat also lediglich eine Arbeit zum Thema „Geiseltal“ verfasst und dies in gemeinsamer Autorenschaft mit Johannes Weigelt (Walther & Weigelt 1931, 1932; beide Arbeiten sind inhaltsgleich), seinem Nachfolger auf dem Lehrstuhl in Halle (Saale). Diese Arbeit ist betitelt: „Die eozäne Lebewelt in der Braunkohle des Geiseltals“, publiziert in einem Tagungsband für die Teilnehmer der „Deutschen Paläontologischen Gesellschaft“ in Halle 1931, der unter dem Gesamttitel „Die Wirbeltierfundstellen im Geiseltal“ steht. Zu diesem Zeitpunkt war Walther bereits Emeritus.

#### 4. Walther als XIX. Präsident der Leopoldina

Walther wurde am 6.10.1924 zum XIX. Präsidenten der Leopoldina gewählt und behielt dieses Amt bis 1931 inne (Abb. 9). Seine Präsidentschaft gilt aus Sicht der Akademie jedoch als wenig erfolgreich (Seibold 1992, Kaasch & Kaasch 2002). Der Zeitpunkt der Amtsübernahme war an sich schon ungünstig, denn diese fiel mit der Inflation, der Weltwirtschaftskrise und den politischen Unruhen während der Weimarer Republik zusammen. Voller Optimismus ging Walther unmittelbar nach seiner Wahl jedoch „ungesäumt an die Realisierung der schon längere Zeit angedachten Reformen“ (Kaasch & Kaasch 2002). Zunächst wurden regelmäßige Zusammenkünfte für die in Halle (Saale) und im Umland lebenden Mitglieder eingeführt, aus denen die bis in die jüngste Vergangenheit abgehaltenen Monatssitzungen hervorgingen. Seine Hauptsorge galt aber der Arbeitsfähigkeit des Vorstandes und der Erhaltung der Bibliothek, die sein Vorgänger August Gutzmer (1921-

1924) der staatlichen Verwaltung gegen Zahlung angeboten hatte.

Erfolgreicher waren allerdings Walthers Bemühungen, die Akademie durch die Anpassung an zeitgemäße Bedingungen voranzubringen. Er setzte gezielt die Gewinnung von Förderern aus der Industrie fort und bewegte u. a. Carl Bosch, Hugo Eckener, Carl Friedrich von Siemens und den Stahlmagnaten Albert Vögler zur Mitgliedschaft in der Leopoldina. Die allein auf Vorschlägen von Mitgliedern beruhenden Zuwahlen von Wissenschaftlern führten 1925 zu 130 und 1926 zu 101 Neuaufnahmen (Kaasch & Kaasch 2002). Damit zeichnete sich wieder eine positive Entwicklung im Mitgliederbestand der Akademie ab. Die Ehrenmitgliedschaft der Leopoldina erhielten unter Walthers Präsidentschaft folgende Geowissenschaftler: Wilhelm von Branco (1925), Rogier Verbeek (1925) und Walthers ehemaliger Reisebegleiter, der Geograph und Botaniker Georg Schweinfurth (1925).

Drei Publikationsprojekte aus seiner Amtszeit als Leopoldina-Präsident haben sich als Leitlinien von Walthers Wirken herausgestellt: der Deutschland-Band (Walther 1928a), der Amerika-Band (Walther et al. 1929) und der Goethe-Band (Walther 1930). Im Deutschland-Band wollte er, unterstützt von weiteren Autoren mit deutschnationalem Hintergrund, die „*natürlichen Wurzeln aufdecken, auf denen sich die deutsche Kultur im Laufe von Jahrtausenden entfaltet hat, um zu prüfen, was die Eigenkraft der Nation geleistet hat*“ (Walther 1928a). Der erfolgreichere Amerika-Band war das Ergebnis einer von ihm durchgeführten USA-Reise. Im Frühjahr 1927 weilte er als Gastprofessor an der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore und an der Columbia-Universität in New York. Der Plan, mit amerikanischen Autoren diesen Band zusammenzustellen, ließ sich schließlich verwirklichen. Es entstand ein Werk, „*dessen Inhalt Zeugnis ablegt von den vielseitigen und wissenschaftlich hochwertigen Forschungen unserer Mitglieder jenseits des Ozeans*“ (Walther et al. 1929). Dieser Band beinhaltet Beiträge von 21 amerikanischen Autoren aus ihren jeweiligen Arbeitsgebieten.

Es war für Walther eine Selbstverständlichkeit, dass die Leopoldina sich bereits im Vorfeld von Goethes 100. Todestag auf das Gedenken eines ihrer prominentesten Mitglieder einstellte. So war die 50. Sitzung der Akademie am 2. März 1929 eine dem naturkundlichen Lebenswerk des Dichters und Naturforschers gewidmete Festsitzung, die in der Aula der Universität in

Halle (Saale) begangen wurde. Auf dieser Sitzung wurde Walther gebeten, sein lang gehegtes Projekt „Goethe als Seher und Erforscher der Natur“ mit der Herausgabe eines Leopoldina-Sonderbands zu würdigen, der 1930 erschien. Neben dem Vorwort „Goethe und die Leopoldina“ verfasste Walther drei weitere Beiträge: „Goethe als Seher und Erforscher der Natur“, „Eine Alraune aus Goethes Hand“ und „Goethe und das Reich der Steine“. Das Ziel Walthers im zuletzt genannten Beitrag war es aufzuzeigen, *„... wie das Steinreich Goethe während seines langen Lebens immer wieder fesselte und vielfach Richtung und Inhalt seines Geistes bestimmte.“*

Vom Januar bis April 1931 unternahm Walther eine Mittelmeerreise. Nach seiner Rückkehr fand er in der Akademie ein vermutlich vom Sekretär angerichtetes und durch Bankzusammenbrüche verursachtes finanzielles Desaster vor, aus dem er selbst keinen Ausweg mehr fand. Er trat im Oktober 1931 von seinem Amt zurück und übergab dem Vizepräsidenten Daniel Vorländer (1867-1941) die Amtsgeschäfte. Zum 20. Präsidenten wurde Emil Abderhalden (1877-1950) gewählt. Ein persönliches Zerwürfnis zwischen den beiden Männern führte am 17. Januar 1935 zum Austritt des Altpräsidenten Johannes Walther aus der Leopoldina, ein bis heute einmaliger Vorgang in der Geschichte dieser Akademie (Kaasch & Kaasch 2002).



Abb. 9: Gemälde von Johannes Walther, das ihn als Präsident der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina zeigt (Archiv der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina; heute: Nationale Akademie der Wissenschaften).

Fig. 9: Painting of Johannes Walther, showing him as the President of the German Academy of Natural Scientists Leopoldina (Archive “Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina”; today: National Academy of Sciences).

## 5. Die letzten Jahre Walthers in Halle (Saale)

Nachdem er sich aller Ämter entledigt hatte, konnte Walther nun ohne Einschränkungen, sieht man von den Altersbeschwerden ab, zu seiner nach dem Reisen zweitliebsten Beschäftigung zurückkehren, dem Schreiben. Er nahm dabei auch Themen auf, von denen er offenkundig nur wenig verstand oder diesbezüglich nicht mehr auf der Höhe der Zeit war. Beispiele dafür sind: „Die Urheimat des nordischen Menschen“ (Walther 1926), „Das Rätsel der Wünschelrute“ (Walther 1933) und seine „Einführung in die deutsche Bodenkunde“ (Walther 1935). Mit „Mediterranis“ (Walther 1936) fand er jedoch zu alter Größe zurück. Der Begründer der „Biogeologie“, in der die „Lithogenese“ dominierte, nannte seine letzte Abhandlung „geobiologisch“, wohl um anzudeuten, dass er im Mittelpunkt seiner Untersuchung „über Gestaltung und Besiedlung des mediterranen Lebensraumes“ dessen erdgeschichtliche Entwicklung und die paläogeographischen Aspekte als Voraussetzung für das Gedeihen des Lebens ansah. Johannes Walther, der bedeutendste Hallesche Geowissenschaftler im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts, wies bereits 1936 darauf hin, dass die Vorkommen der afrikanischen Waldelefanten *Elephas antiquus*, auch als *Palaeoloxodon antiquus* bezeichnet, im Pleistozän Mitteldeutschlands die Folge des hier zeitweise im Eem herrschenden warmzeitlichen mediterranen Klimas waren. Heute belegen das massenhafte Vorkommen von ca. 70 Waldelefanten und die sie begleitenden Faunen und Floren im Deckgebirge der Braunkohle des Geiseltals diese These (Mania 2010).

Johannes Walther wurde im Jahre 1992 auf Anregung von Johannes Schroeder (TU Berlin) mit der in Halle (Saale) veranstalteten Jahrestagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in besonderer Weise geehrt. Es war eine Veranstaltung, die noch stark unter dem Eindruck der in den voraus gegangenen Jahren 1990/91 vollzogenen Wiedervereinigung der beiden deutschen Staaten stand. Unter den Vortragenden waren als Gäste eingeladen: G. Friedman, R. N. Ginsburg, W. Schlager und I. Seibold. Anlässlich seines 150. Geburtstages im Jahre 2010 wurde Johannes Walthers im Juni mit einem Kolloquium (Beiträge: R. Gaupp, E. Gischler und M. Schwab) gedacht, das anlässlich der

Jahrestagung des Thüringischen Geologischen Vereins in Jena stattfand (Tagungsleitung: H. Lützner). Die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg widmete Johannes Walther im Oktober und November 2010 schließlich eine Sonderausstellung im Universitätsmuseum (Kurator: N. Hauschke; vgl. Ausstellungsbroschüre von Hauschke et al. 2010b), zu dessen Eröffnung der Rektor der Martin-Luther-Universität, Herr Prof. Dr. U. Sträter, sowie der Leiter der Zentralen Kustodie, Herr Dr. R.-T. Speler, eingeladen hatten.

## 6. Danksagung

Wir danken Herrn Prof. Dr. Eberhard Gischler (Frankfurt am Main) für die kritische Durchsicht des Manuskripts und für hilfreiche Ratschläge. Herr cand. geol. Gregor Barth arrangierte die Abb. 5 und Frau cand. geol. Silvia Isaak las die Endfassung dieser Arbeit, wofür die Autoren den Genannten, beide Halle (Saale), ebenfalls herzlich danken.

## 7. Literatur

- Andrée, K. (1908): Über stetige und unterbrochene Meeressedimentation, ihre Ursachen sowie über deren Bedeutung für die Stratigraphie. – Neues Jahrbuch für Mineralogie etc., Beil.-Bd., 25: 366-421.
- Andrée, K. (1938): Rezente und fossile Sedimente. Erdgeschichte mit oder ohne Aktualitätslehre? – Geologische Rundschau, 29: 147-167.
- Barnes, B. (1927): Eine eozäne Wirbeltier-Fauna aus der Braunkohle des Geiseltals. – Jahrbuch des Halleschen Verbandes für die Erforschung der mitteldeutschen Bodenschätze, N. F., 6: 5-24.
- Bülow, K. v. (1962): Johannes Walther, der Begründer der Biogeologie. – Berichte der Geologischen Gesellschaft in der DDR, 6 (4): 373-482.
- Bülow, K. v. (1970): Der XIX. Präsident (1924-1931) Johannes Walther (1860-1937). – Nova Acta Leopoldina, 36 (Nr. 198): 369-391.
- Dorsch, J. (2005): Johannes Walthers ideas regarding the training of pre-college geology teachers. 2005 Salt Lake City Annual Meeting (October 16-19, 2005), Session No. 33, Geoscience Education I. – Geological Society of America, Abstracts with programs, 37 (7): S. 85.
- Duisberg, C. (1933): Meine Lebenserinnerungen. – In: Puttkamer, J. v. (Hrsg.), herausgegeben auf Grund von Aufzeichnungen, Briefen und Dokumenten. – 207 S.; Leipzig (Ph. Reclam).

- Friedman, G. M. (1986): Glimpses of pioneer sedimentologists Johannes Walther and A. W. Grabau: Correspondence 1911-1936. – 12th International Sedimentologic Congress, Canberra. – S. 111.
- Friedman, G. M. (1987): The desert-Walther: Johannes Walther (1860-1937). – Geological Society of America, 1987 Annual Meeting Abstracts, 19 (7): S. 668.
- Friedman, G. M. (1997): In Memory of Professor Amadeus William Grabau (1870-1946) on the Semi-Centennial of his Death. – Proceedings 30<sup>th</sup> International Geological Congress, 26: 157-164. – (J. Walther: 160-162).
- Fritsch, K. von (1901): Protokoll der Sitzung vom 7. October 1901. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 53: 59-66.
- Ginsburg, R. N., Gischler, E. & Schlager, W. (Hrsg.) (1994): Johannes Walther on reefs. Pioneering concepts of biogeology 1885-1910. – Geological Milestones, 2: IV + 141 S.; Miami (University of Miami).
- Gischler, E. & Glennie, K. W. (Hrsg.) (1997): Johannes Walther: The law of desert formation – present and past. Translation of the fourth revised edition of 1924. – Geological Milestones, 4: XVI + 273 S.; Miami (University of Miami).
- Grabau, A. W. (1913): Principles of Stratigraphy. – 185 S.; New York (Dover Publ. Comp.). – (Reprint 1966).
- Grumbt, E. (1975): Johannes Walther – ein Begründer der modernen Sedimentforschung. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 3 (10): 1255-1263.
- Hauschke, N. & Gischler, N. (2008): Johannes Walther (1860-1937) – Pionier der Riff-Forschung. – In: Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin, Leinfelder, R., Heiss, G., Moldrzyk, U. (Hrsg.): »abgetaucht«. Begleitbuch zur Sonderausstellung zum internationalen Jahr des Riffes 2008. – 210-219; Berlin (Museum für Naturkunde Berlin, Konradin Verlag).
- Hauschke, N., Isaak, S., Schimpf, L. & Gossel, W. (2010a): Johannes Walther (1860-1937) – Grenz-gänger zwischen erdgeschichtlicher Vergangenheit und Gegenwart. – Aufschluss, 61 (6): 18 S.
- Hauschke, N., Isaak, S., Schimpf, L., Seiffert, M. & Gossel, W. (2010b): Johannes Walther (1860-1937) zwischen Riff und Wüste. Spurensicherung in 3D anlässlich seines 150. Geburtstages. – Begleitheft zur Sonderausstellung: IV + 54 S.; Halle (Saale).
- Hesse, R., Forman, H. P., Forristall, G. Z., Heezen, B. Z., Hekel, H., Hoskins, R. H., Jones, E. J. W., Kaneps, A. G., Krashennikov, V., Macgregor, I., Okada, H. (1974): Walther's facies rule in pelagic realm – a large scale example from the Mesozoic-Cenozoic Pacific. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 125: 151-172.
- Hoffmeister, J. E. & Ladd, H. S. (1944): The antecedent-platform theory. – Journal of Geology, 52: 388-402.
- Hüssner, H. (1993): Der Aktualismus zur Zeit Johannes Walthers und aus heutiger Sicht. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft., 144: 255-263.
- Kaasch, M. & Kaasch, J. (2002): Zwischen Inflationsverlust und großdeutschem Anspruch – Die Leopoldina unter den Präsidenten Gutzmer und Walther von 1921 bis 1932. – In: Parthier, B. & Engelhardt, W. v. (Hrsg.): 350 Jahre Leopoldina – Anspruch und Wirklichkeit. Festschrift der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina 1652-2002. – 187-225; Halle (Saale).
- Mania, D. (2010): Quartärforschung im Tagebau Neumark-Nord, Geiseltal (Sachsen-Anhalt) und ihre bisherigen Ergebnisse. – In: Mania, D. u. a. (Hrsg.): Neumark-Nord – Ein interglaziales Ökosystem des mittelpaläolithischen Menschen. – Veröffentlichungen des Landesmuseums für Vorgeschichte in Halle, 62: 11-70.
- Middleton, G. V. (1973): Johannes Walther's Law of the Correlation of Facies. – Geological Society of America Bulletin, 84: 979-988.
- Mitteilungsblatt des Thüringischen Geologischen Vereins (2010): Veranstaltungen des TGV 2010. Jahreshauptversammlung: 20 Jahre TGV und 150. Geburtstag von Johannes Walther (H. Lütznert) und Einladung zur Jahreshauptversammlung vom 4. bis 6. Juni 2010 in Jena. – 35-42; Jena
- Okada, H. & Kenyon-Smith, A. (2009): The birth of sedimentology: Henry Clifton Sorby and Johannes Walther. – Geology Today, 25 (6): 211-218.
- Parthier, B. (1993): Johannes Walther und die Leopoldina. – Leopoldina, (3) 38: 267-270.
- Reichstein, M. (1998): Karl Freiherr von Fritsch (1838-1906): Wegbereiter des geologischen Profils an der Martin-Luther-Universität in Halle. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B 20: 135-146.
- Schaffer, F. X. (1924): Lehrbuch der Geologie, 2: Grundzüge der historischen Geologie. – 628 S.; Leipzig (F. Denticke).
- Schaffer, F. X. (1939): Johannes Walther. – Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft Wien, 30/31: 199-201.
- Schwab, M. (2003): 215 Jahre Geowissenschaften in der Neuen Residenz. Teil I: bis 1945. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B 25: 91-120.
- Seibold, I. (1987): Anfänge der deutschen Meeresgeologie – Johannes Walther zum Gedächtnis. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 138: 1-12.
- Seibold, I. (1992): Der Weg zur Biogeologie. Johannes Walther 1860-1937. Ein Forscherleben im Wandel der deutschen Universität. – 196 S.; Berlin, Heidelberg (Springer).

- Steiner, W. (1957): Johannes Walther (1860-1937). – Hallesches Monatsheft für Heimat und Kultur / Halle und Saalkreis, 4 (5): 227-228.
- Thüringischer Geologischer Verein (2010): Exkursionsführer/Tagungsband zur 20. Jahreshauptversammlung (Vortrags- und Exkursionsveranstaltung) vom 04. bis 06. Juni 2010 in Jena. 150. Geburtstag von Johannes Walther. Fazies der Trias in Ostthüringen. – 69 S.; Jena.
- Twenhofel, W. H. (1938): Memorial to Johannes Walther. – Proceedings of the Geological Society of America, 1937: 221-230.
- Vetter, H. (1931): Entwicklung und Lagerungsverhältnisse der Grabungen an der älteren Fundstelle der Grube Cecilie im Geiseltale. – In: Die Wirbeltierfundstellen im Geiseltal. – Den Teilnehmern der Tagung der Deutschen Paläontologischen Gesellschaft zu Halle im September 1931. – Kaiserliche Leopoldinische Deutsche Akademie der Naturforscher. – 29-35; Halle (Saale).
- Vetter, H. (1932): Entwicklung und Lagerungsverhältnisse der Grabungen an der älteren Fundstelle der Grube Cecilie im Geiseltale. – In: Abderhalden, E. (Hrsg.): Die Wirbeltierfundstellen im Geiseltal. – Nova Acta Leopoldina, N. F., 1 (1): 29-35.
- Voigt, E. (1933a): Die Lackfilm-Methode, ihre Bedeutung und Anwendung in der Paläontologie, Sedimentpetrographie und Bodenkunde. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 88 (4): 272-292.
- Voigt, E. (1933b): Die Übertragung fossiler Wirbeltierleichen auf Zellulose-Filme, eine neue Bergungsmethode für Wirbeltiere aus der Braunkohle. – Paläontologische Zeitschrift, 15: 72-78.
- Vysockij, B. P. (1965): Johannes Walther and his Role in the Progress of Geology. – Nauka. – 176 S.; Moskau. – [In Russisch]
- Walther, J. (1885): Die gesteinsbildenden Kalkalgen des Golfs von Neapel und die Entstehung structurloser Kalke. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 37: 229-357.
- Walther, J. (1887): Die Entstehung von Kantengerölen in der Galalawüste. – Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, 39: 133-136.
- Walther, J. (1888): Die Korallenriffe der Sinaihalbinsel. Geologische und biologische Beobachtungen. – Abhandlungen der mathematisch-physikalischen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, 24: 439-505.
- Walther, J. (1891a): Die Adamsbrücke und die Korallenriffe der Palkstraße. Sedimentation im tropischen Litoralgebiet. – Dr. A. Petermanns Mitteilungen aus Justus Perthes' Geographischer Anstalt, Ergänzungsband, 22 (102): 40 S.; Gotha (Justus Perthes).
- Walther, J. (1891b): Die Denudation in der Wüste und ihre geologische Bedeutung. Untersuchungen über die Bildung der Sedimente in den ägyptischen Wüsten. – Abhandlungen der mathematisch-physischen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, 16: I-III + 345-570; Leipzig (S. Hirzel).
- Walther, J. (1893/94): Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. Beobachtungen über die Bildung der Gesteine und ihrer organischen Einschlüsse. I. Theil: Bionomie des Meeres, II. Theil: Die Lebensweise der Meeresthiere, III. Theil: Lithogenesis der Gegenwart. – 1055 S.; Jena (Gustav Fischer).
- Walther, J. (1900): Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit. – 175 S.; Leipzig (Quelle & Meyer).
- Walther, J. (1902): Geologische Heimatskunde von Thüringen. – 253 S.; Jena (Gustav Fischer).
- Walther, J. (1905): Vorschule der Geologie. – 293 S.; Jena (Gustav Fischer).
- Walther, J. (1908): Geschichte der Erde und des Lebens. – 570 S.; Berlin (Veith & Co.).
- Walther, J. (1910a): Die Sedimente der Taubenbank im Golfe von Neapel. – Anhang zu den Phys.-math. Abhandlungen der königl. preuss. Akademie der Wissenschaften, 3: 49 S.
- Walther, J. (1910b): Lehrbuch der Geologie Deutschlands. Eine Einführung in die erklärende Landschaftskunde für Lehrende und Lernende. – 258 S.; Leipzig (Quelle & Meyer).
- Walther, J. (1911): Über die Bildung von Windkanten in der libyschen Wüste. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 63: 410-417.
- Walther, J. (1915): Laterit in West-Australien. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 67: 113-132.
- Walther, J. (1916): Das geologische Alter und die Bildung des Laterits. – Dr. A. Petermanns Geographische Mitteilungen aus Justus Perthes' Geographischer Anstalt, 62: 1-7 und 46-53.
- Walther, J. (1918): Geologie der Heimat. Grundlinien geologischer Anschauung. – 222 S.; Leipzig (Quelle & Meyer).
- Walther, J. (1926a): Die Urheimat des nordischen Menschen. – Hallesche Universitätsreden, 28: 3-24.
- Walther, J. (1926b): Die Methoden der Geologie als historischer und biologischer Wissenschaft. – In: Abderhalden, E. (Hrsg.): Handbücher der biologischen Arbeitsmethoden., Lieferung 185, Abt. X – 529-658; Berlin (Urban & Schwarzenberg).
- Walther, J. (1927): Allgemeine Paläontologie. Geologische Fragen in biologischer Betrachtung. (Teile 1-4). – 809 S.; Berlin (Bornträger).
- Walther, J. (Hrsg.) (1928a): Deutschland. Die Natürlichen Grundlagen seiner Kultur; Leipzig (Quelle & Meyer).
- Walther, J. (1928b): Führer durch die Lehr- und Schausammlungen des Geologisch-Palaeontologi-

- chen Instituts der Universität Halle, 2. Aufl. – 156 S.; Halle (Saale).
- Walther, J. (Hrsg.) (1930): Goethe als Seher und Erforscher der Natur. Untersuchungen über Goethes Stellung zu den Problemen der Natur. – VIII + 323 S.; Leipzig (Poeschel & Trepte).
- Walther, J. (1933): Das Rätsel der Wünschelrute. – 62 S.; Leipzig (Reclam).
- Walther, J. (1935): Einführung in die deutsche Bodenkunde. – 172 S.; Berlin (Springer).
- Walther, J. (1936): Mediterranis. – Petermanns Geographische Mitteilungen, Ergänzungsh., 225: 8-59.
- Walther, J. (1953): Im Banne Ernst Haeckels. Jena um die Jahrhundertwende. Aus dem Nachlass herausgegeben und eingeführt von Gerhard Heberer. – 152 S.; Göttingen (Musterschmidt, Wissenschaftlicher Verlag).
- Walther, J., Disselhorst, R. & Abderhalden, E. (Hrsg.) (1929): Amerika-Band. – Leopoldina, 4: XVIII + 375 S.
- Walther, J. & Schirlitz, P. (1886): Studien zur Geologie des Golfes von Neapel. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 38: 295-341.
- Walther, J. & Weigelt, J. (1931): Die eozäne Lebewelt in der Braunkohle des Geiseltals. – In: Die Wirbeltierfundstellen im Geiseltal. – Den Teilnehmern der Tagung der Deutschen Paläontologischen Gesellschaft zu Halle im September 1931. – Kaiserliche Leopoldinische Deutsche Akademie der Naturforscher. – 1-27.
- Walther, J. & Weigelt, J. (1932) Die eozäne Lebewelt in der Braunkohle des Geiseltals. – In: Abderhalden, E. (Hrsg.): Die Wirbeltierfundstellen im Geiseltal. – Nova Acta Leopoldina, N. F., 1 (1): 1-27.
- Weigelt, J. (1927): Rezente Wirbeltierleichen und ihre paläobiologische Bedeutung. – 227 S.; Leipzig (Max Weg). – (Reprint 1999; Dieter W. Berger, Bad Vilbel).
- Weigelt, J. (1930): Der Lebensgang von Johannes Walther. – In: Weigelt, J. (Hrsg.): Festschrift für Johannes Walther. – Leopoldina, 6: 3-10.
- Weigelt, J. (1937): Johannes Walther († 4. Mai 1937). – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 89: 674-656.
- Weigelt, J. (1938): Dem Andenken an Johannes Walther. – Hallescher Verband für die Erforschung der mitteldeutschen Bodenschätze und ihrer Verwertung, N. F., 16: 7-12.
- Weigelt, J. (1999): siehe Weigelt, J. (1927).
- Unveröffentlichte Personalakte „Johannes Walther“ der Universität Halle. – Abt. II, Abschn. D., No. 27 W, Bd. 1, 1906-1918. – (zitiert als: J. W. PA 16629).

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 19-32, 5 Abb., 1 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Interaktive Umweltbildung am Beispiel eines Gewässerlehrpfades an der Ulster

Bernhard Bartsch-Herzog & Christian Opp\*

Bernhard Bartsch-Herzog & Christian Opp (2011): Interaktive Umweltbildung am Beispiel eines Gewässerlehrpfades an der Ulster. [Interactive environmental education - An example of a water nature trail of the river Ulster.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 19-32, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Ober- und Mittellauf von Mittelgebirgsfließgewässern weisen meist eine attraktivere Naturlandschaft und geringere anthropogene Einflüsse auf als die entsprechenden Unterlaufabschnitte. Aufgrund zahlreicher Naturschutzgebiete weist das obere Ulster-Einzugsgebiet einige Besonderheiten; dazu gehört auch die Zugehörigkeit zum Biosphärenreservat Rhön. Diese Randbedingungen sind bei der Planung eines Lehrpfades zu berücksichtigen. Gleichzeitig resultiert daraus jedoch auch ein Potenzial, welches bei der Konzeption eines Gewässerlehrpfades zielgerichtet genutzt werden kann. Ausgehend von diesen Restriktionen und Chancen wird die Eignung der Ulster als Standort für Umweltbildungsmaßnahmen in Form eines Gewässerlehrpfades betrachtet. Im Mittelpunkt des Lehrpfades soll hierbei die Entwicklung einer persönlichen Beziehung zur natürlichen Umwelt stehen: Die wohl wichtigste Voraussetzung, um die Zielgruppe „Kinder“ für Natur zu sensibilisieren und umweltrelevante Verhaltensweisen zu fördern.

Aber wie können insbesondere Kinder (wieder) an die Natur herangeführt werden? Wie kann man sie nachhaltig für ihre Umwelt sensibilisieren und begeistern? Wie sind Kenntnis-Defizite an Wasserlehrpfaden zu kompensieren? Welche Voraussetzungen muss ein Lehrpfad erfüllen, damit nachhaltige Umweltsensibilisierung stattfinden kann? In Orientierung an diesen Fragestellungen wird ein Gewässerlehrpfadkonzept im Einzugsgebiet der Ulster (Werra-Einzugsgebiet) dargestellt. Hierbei lernen die BesucherInnen zunächst anhand der Leittierart Bachforelle (Bella) den Lebensraum Fließgewässer mit allen Sinnen kennen und bauen eine persönliche Beziehung zu Bella auf. Schließlich wird dieser persönliche Bezug genutzt, um umweltrelevantes Verhalten zu fördern und damit den Lebensraum Fließgewässer zu erhalten.

**Abstract:** Upper and middle reaches of upland streams mostly show more attractive natural settings and less anthropogenic influences than corresponding lower reaches. Because of numerous preserve areas, the upper Ulster drainage area shows some characteristics; one of these is belonging to “Biosphärenreservat Rhön” (Biosphere Reserve Rhoen). Those boundary conditions have to be taken in consideration when planning a nature trail. Concurrently there results a potential from this situation, which can be used purposefully for development of a nature trail. Based on the restrictions a look is taken at the Ulster’s suitability as a location for environmental education programs in the form of a nature trail. In doing so the development of a personal relationship to natural environment is the centre of attention: the most important requirement to sensitize the target group “children” for nature and supporting environmentally relevant behaviour.

But how can especially children be led back to nature (again)? How can you sensitize them and get them enthusiastic about nature with a lasting effect? How shall knowledge deficits be compensated at nature trails? With which requirements does a nature trail have to comply to realize a lasting environmental sensitization?

Focused on these questions, a nature trail concept in the Ulster drainage area (Werra drainage area) is presented. In this concept visitors get introduced to streams as a habitat using brown trout (Bella) as a leading species and develop a personal relationship to Bella. Finally this relationship is used for supporting environmentally relevant behaviour and preserve streams as a habitat.

**Schlüsselwörter:** Interaktive Umweltbildung, Umweltsensibilisierung, Lehrpfad, Naturerlebnis, Gewässerlehrpfad, Ulstertal, Neurodidaktik

**Keywords:** interactive environmental education, environmental awareness, nature trail, nature, water nature trail, Ulster valley, neuro-education

---

\* Anschriften der Autoren:

Dipl.-Geogr. Bernhard Bartsch-Herzog (bartsch.herzog@gmx.de), Rosselenweg 24, D-73730 Esslingen am Neckar;  
Prof. Dr. Christian Opp (opp@staff.uni-marburg.de), Phillips-Universität Marburg, Fachbereich Geographie,  
Deutschhausstraße 10, D-35037 Marburg.

## 1. Einleitung

Spaziergängerinnen und Spaziergängern Umweltinformationen mittels eines Lehrpfades bereitzustellen sowie Interaktionen mit der Naturlandschaft zu initiieren, macht sich mit zunehmender Naturferne bzw. Entbindung der Gesellschaft von den natürlichen Grundlagen mehr denn je erforderlich. Ende des 20. Jahrhunderts, Anfang des 21. Jahrhunderts stellen Lehrpfade ein beliebtes und gleichzeitig weit verbreitetes umweltpädagogisches Medium dar. Dabei erscheint es weniger wichtig, möglichst viele Lehrpfade in der Landschaft zu installieren. Vielmehr gilt es, deren Qualität objektiv zu hinterfragen und konzeptionelle Anpassungen vorzunehmen, um eine nachhaltig umweltorientierte gesellschaftliche Entwicklung voranzutreiben.

Obwohl Lehrpfade hierfür nur einen geringen Beitrag leisten können, bieten sie dennoch eine einfache Möglichkeit, Kinder der naturfernen Generation wieder verstärkt für Natur und Umwelt zu sensibilisieren. Doch wie ist dies möglich?

Im Folgenden wird die Entsinnlichung und Naturentfremdung der Gesellschaft aufgezeigt sowie auf welche Art und Weise nachhaltige Lernprozesse in der Natur und Naturerlebnisse im Allgemeinen arrangiert werden müssen. Daraus lassen sich allgemeine Prinzipien nachhaltigen Lernens ableiten, die schließlich in spezifizierter Weise in einem Lehrpfadkonzept Anwendung finden und exemplarisch an zwei Lehrpfadstationen aufgezeigt werden.

## 2. Entsinnlichung und Naturentfremdung

Unsere heutige Gesellschaft wird von einer immer stärker werdenden Mediendominanz überschattet! Fast jedes zweite Kind (zwischen sechs und dreizehn Jahren) ist in Besitz eines eigenen Fernsehers und verbringt mehr Zeit vor dem Gerät als mit Freunden, Lernen, Hausaufgaben, Spielen (egal ob drinnen oder draußen), Sport oder Lesen (Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest 2006: 9f). Etwa 82% der Sechs- bis Siebenjährigen können auf ihren Fernseher am wenigsten verzichten (Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest 2007: 18). Heutige Grundschulkindern haben bereits vor ihrem Eintritt in die Grundschule mehr Fernseh-

stunden hinter sich, als sie Grundschulstunden absolvieren werden. Immer mehr Bereiche der Wirklichkeit werden heute aus „zweiter Hand“ – also über Medien wahrgenommen (Herz 1994: 37). Wo und wann kommen Jugendliche noch in direkten Kontakt mit Natur und werden sich dessen bewusst? Heute wachsen die Jugendlichen in einer Welt auf, in der die Entfremdung von der Natur nahezu selbstverständlich ist (Sichler 1995: 49).

Egal ob durch Fernsehen oder das Internet - Natur wird von Kindern und Jugendlichen so wahrgenommen, wie sie in den Medien präsentiert wird. Wenn wir einmal reflektieren, welche Inhalte und Schlagzeilen uns entgegengebracht werden, so stellen wir fest, dass diese überwiegend negativ konnotiert sind. Das Bild einer heilen Welt begegnet uns weitaus seltener als das ökologischer Katastrophen und eines unumkehrbaren Klimawandels.

Diese medienübliche Form der Katastrophen- oder auch Zeigefingerpädagogik verängstigt die Rezipientinnen und Rezipienten und führt schließlich zu Frustration, Resignation und Ohnmacht, solange sie nicht mit positiven Erfahrungen, persönlichen und gesellschaftlichen Handlungsperspektiven verknüpft werden (Lude 2001: 212; Ude 1994: 178; Pofel et al. 1987: 107).

Um Resignation zu vermeiden, muss hinterfragt werden, wie Sensibilität für naturnahe Lebensräume geschaffen und gleichzeitig umweltschützende Verhaltensmaßnahmen gefördert werden können.

## 3. Von Naturerlebnissen zur Umweltsensibilität

Zahlreiche wissenschaftliche Studien belegen, dass keine signifikante Korrelation zwischen Umweltwissen und tatsächlichem Umweltverhalten existiert (Siebert 1998: 83; Bögeholz 1999: 16; de Haan et al. 1997: 162; de Haan 1998: 114; Weizsäcker 1994: 28; Pofel et al. 1997: 72; Degenhardt 2002: 13; de Han & Kuckartz 1995: 15). Stattdessen scheinen positive, durch Bezugspersonen unterstützte, kindliche Naturerfahrungen eine starke positive Wirkung auf das Sozialverhalten der Kinder und auf das zukünftige, umweltbewusste Handeln zu haben. So berichten Erwachsene, die ein hohes Engagement im Naturschutz zeigen, dass der Beginn ihres Interesses durch erkundende und ästhetische Naturerfahrungen

gen in der Kindheit, Anregungen zum Umweltschutzverhalten durch Eltern oder Freunde sowie handlungsrelevantes Umweltwissen entstanden ist (Bögeholz 1999: 45).

Soll das Ziel erreicht werden, eine stärkere Umweltsensibilität der Kinder und Jugendlichen zu erreichen und sie nachhaltig zu umweltschützendem Verhaltensweisen zu bewegen, sind genau diese positiven, kindlichen Naturerfahrungen im ‚Lernort Natur‘ zu arrangieren.

#### 4. Lernen in der Natur

Betrachtet man Lernprozesse in der freien Natur im Vergleich zu der Begrenztheit an Möglichkeiten in geschlossenen Räumen, so können verschiedene ökologische Probleme sehr viel einfacher erfahrbar gemacht und somit ein Persönlichkeitsbezug zum Problem aufgebaut werden. Individuelle Erfahrungen und der direkte, persönliche Kontakt mit ökologischen, sozialen und politischen Problemen ermöglichen es, sehr komplexe Zusammenhänge am eigenen Leib nachvollziehen zu können. Weiterhin unterstreicht der Lernort Natur – als Raum für ästhetische und emotionale Erlebnisse mit einer Vielfalt faszinierender Formen, Farben und Strukturen – die Attraktivität der natürlichen Umgebung (UNESCO-Verbindungsstelle für Umwelterziehung 1992: 76).

Dabei gilt es jedoch stets zu beachten, dass nicht nur die Vermittlung von reinem Wissen im Vordergrund steht. Stattdessen sollte versucht werden, durch den Naturzugang einen persönlichen Bezug zu eröffnen, um sich auf Phänomene der Natur einlassen zu können (Schenk 2000: 29).

Dies gilt es auch bei der Konzeption eines Lehrpfads zu beachten. Mit den Zielen, Natur erfahrbar zu machen und einen intensiven Naturkontakt zu ermöglichen, können zeitgleich Kenntnisse über natürliche und naturgefährdende Prozesse erworben und emotionale Bezüge zur Natur hergestellt werden, die wiederum die Bereitschaft zum Mitwirken im Naturschutz initiieren können (Hedewig 1993: 8).

Zwei weitere, den Lernprozess begleitende Komponenten, sprechen hierbei für einen Lehrpfad als Umweltbildungsangebot. Zum Einen kommen hierbei motorische Aspekte zum Tragen. Dies ist wichtig, da sich neben der Sensitivität der Sinnesorgane auch die allgemeine Bewegungsfähigkeit vieler Kinder und Jugendlichen im heutigen Lebensumfeld immer weniger entwickelt. So leiden bereits zehn Prozent der Erstklässler in

Bayern und Nordrhein-Westfalen unter krankhaften, motorischen Koordinationsstörungen (de Haan 2009: 37). Häufig gehen diese mit sensorischen Störungen einher. Ein Lehrpfad kann hierbei zumindest in geringem Maße beiden Entwicklungsstörungen entgegenwirken. Darüber hinaus fördert Bewegung Lernvorgänge im Allgemeinen. Der zweite methodische Aspekt, der Lehrpfaden als Umweltbildungsmedium zugute kommt, ist die soziale Komponente, denn auch gemeinsames Naturerleben, gemeinsame Abenteuer, sich miteinander austauschen und Zusammenhänge besprechen, kann den Lernprozess unterstützen (de Haan 2009: 37).

#### 5. Prinzipien nachhaltigen Lernens

Neben den bereits beschriebenen Grundlagen möglichst nachhaltiger und naturnaher Umweltbildungsmaßnahmen im Allgemeinen sollen nun sieben wesentliche Prinzipien des Arrangements von Lernprozessen im Vordergrund stehen.

##### 5.1. Neugier und Interesse wecken

Lernprozesse kann man nicht von außen initiieren. Jedes Individuum entscheidet selbst, was gelernt wird. Deshalb ist es besonders wichtig, solche Lernsituationen zu arrangieren, die zum Nachdenken anregen, Interesse wecken, Bewunderung hervorrufen und zum Nachforschen animieren. Somit steigt die intrinsische Motivation, sich mit einem Sachverhalt zu beschäftigen und problemorientiert tätig zu sein. Hieraus entstehen Erfolgssituationen, die durch einen entsprechenden Spannungsbogen die Kontinuität des Lernprozesses aufrecht erhalten.

Bestmögliche Lernerfolge werden durch eine abwechslungsreiche Lernumgebung, Interesse, Neugier, Spannung, Bewunderung und Erfolgssituationen im Lernprozess erzielt (Lang & Stark 2000: 60-70; Roth 2009: 66).

##### 5.2. Personifizierungsmaßnahmen zur Identifikation

In Anbetracht der Tatsache, dass ein fremder Lebensraum Kindern nicht auf abstrakte Weise zugänglich gemacht werden kann, ergibt sich die Frage nach einer geeigneten Methode, diesen auch für Kinder nachvollziehbar zu gestalten.

Wenn es gelingt, einen Zusammenhang so darzustellen, dass sich die Rezipientinnen und Rezipienten mit einem Sachverhalt identifizieren und sie anschließend durch zusätzliche Informati-

onen das eigene alltägliche Handeln reflektieren können, so wird dadurch ein hohes Maß an Betroffenheit ausgelöst und der abstrakte Lernprozess am eigenen Leib erfahrbar. Damit wird die Grundlage geschaffen, aus einer intrinsischen Motivation heraus, selbstreflektiert und -initiiert, umweltbewusst zu handeln. Die hierfür notwendige Identifikation kann durch ansprechende Logos, Namen oder Hinweise geschehen, sich in eine Situation oder auch in ein Objekt hineinzuversetzen (Ebers 1998: 40; Lang & Stark 2000: 70; Megerle 2003: 313f, 353).

### 5.3. Direkter Kontakt mit Phänomenen und Problemen

Direkte Erfahrungen vor Ort und die Auseinandersetzung mit den Phänomenen und Problemen der Wirklichkeit ermöglichen einen stärkeren Bezug zwischen Lernenden und Lerngegenstand, als dies über indirekte Informationen möglich ist. Dadurch wird man auf die Auswirkungen menschlichen Handelns vor der eigenen Haustür aufmerksam gemacht. Eine solche Betroffenheit ist durch eine rein mediale Darstellung von weit entfernten oder globalen Problemen nicht möglich. Ebenso ist der Effekt umweltrelevanter Verhaltensweisen vor der eigenen Haustür einfacher wahrnehmbar und die Wahrscheinlichkeit der Resignation aufgrund des geringen globalen Effekts kleiner. Zudem erleichtert körperliche Bewegung - durch die bessere Gehirndurchblutung - den Lernerfolg (Lang & Stark 2000: 61; Lude 2001: 212; Ude 1994: 178).

### 5.4. Die Bedeutung multisensorischer Lernwege

Betrachtet man das – eingangs beschriebene – Phänomen der zunehmend medienzentrierten und gleichzeitig naturdistanzierten, kindlichen und jugendlichen Entwicklung im Hinblick auf den Gebrauch verschiedener Eingangskanäle, so wird schnell deutlich, dass insbesondere die visuelle Wahrnehmung bei dieser Altersgruppe im Vordergrund steht. Während sich Erwachsene besonders auf ihren optischen Sinn verlassen, nutzen Kleinkinder alle Sinneskanäle gleichermaßen, um ihre Umwelt in vollem Umfang zu begreifen. Dieser ganzheitliche Lernprozess ermöglicht eine intensivere und nachhaltigere Informationsaufnahme, tritt jedoch sowohl im gesellschaftlichen als auch individuellen Entwicklungsprozess immer weiter in den Hintergrund, woraus neben der Entsinnlichung auch eine Naturentfremdung resultiert. Aus diesem Grund gilt es, Möglichkei-

ten ganzheitlichen Naturerlebens zu arrangieren. Hierzu zählen neben den verschiedenen Sinnesindrücken gleichermaßen emotionale Erfahrungen (Schenk 1998: 30).

### 5.5. Die emotionale Begleitung von Lernprozessen

Die verschiedenen Sinneseindrücke lernender Individuen können nicht isoliert betrachtet werden, denn das menschliche Gehirn transferiert nicht einzig und allein über die Augen wahrgenommene, sensorische Reize zu einer Vorstellung von Wirklichkeit. Zeitgleich fließen Informationen aller Eingangskanäle sowie Gefühle, Emotionen, Erfahrungen, Erinnerungen und Erwartungen in die bewusste und unbewusste Gehirnaktivität ein. Diese komplexen Prozesse sind notwendig, um die Bedeutung der Umwelt für die eigene Person zu erfahren und somit etwas als gleichgültig oder schützenswert zu betrachten und Betroffenheit auszulösen (Megerle 2003: 31). Emotionen werden hierbei als Türöffner für Lernprozesse verstanden. Sie intensivieren und beschleunigen Lernvorgänge weit über ein rein kognitiv mögliches Maß hinaus, sodass das entstandene Wissen nachhaltig im Gedächtnis verankert bleibt. Studien von Spitzer (2002 & 2003, In: Herrmann 2009: 172-178), Markowitsch (2002, In: Brand & Markowitsch 2009: 77) und Roth (2003, In: Roth 2009: 66) unterstreichen die Bedeutung der emotionalen Begleitung von Lernprozessen. Durch die gezielte Nutzung emotionaler Komponenten ist neben der wesentlich besseren Informationsaufnahme ebenso die Möglichkeit gegeben, Betroffenheit bezüglich eines Umweltproblems auszulösen und die Motivation für eigenes, umweltbewusstes Handeln zu entwickeln (Rottenbach 1995: 203).

### 5.6. Aktivität

Das Prinzip der Aktivität impliziert die bereits beschriebenen Aspekte multisensorischen und emotionalen Lernens. Durch entsprechende Anregungen sowohl zur körperlichen als auch geistigen Aktivität in Form von Beobachtungen, Erkundungen, Untersuchungen, Diskussionen oder eigenständigen Problemlösungen können individuelle Lernprozesse optimal gefördert werden. Neben der reinen Wissensaufnahme stehen hierbei insbesondere aktive und direkte Naturerfahrungen im Vordergrund. Durch die Beteiligung von Sinneseindrücken, Emotionen, Gefühlen und kognitiven Leistungen wird ein ganzheitlicher und somit nachhaltiger Lernpro-

zess in Gang gebracht, der in hohem Maß die Aufmerksamkeit und Neugier der Lernenden auf sich zieht. Dabei gilt zu beachten, dass sich bei den Kindern Erfolgssituationen einstellen (Lang & Stark 2000: 60).

### 5.7. Der Bezug zur Lebenswirklichkeit der Lernenden

Betrachtet man Lernen aus neurobiologischer Perspektive, stellt man unweigerlich fest, dass nicht nur der Lern-, sondern bereits der Wahrnehmungsprozess in Abhängigkeit von Vorerfahrungen und Erwartungen selektiv stattfindet. Neue Informationen können also nur an bereits vorhandenen neuronalen Netzen im Gehirn anknüpfen. Werden diese ohne jeglichen Bezug zum Vorwissen und zur Lebenswirklichkeit aufgenommen, bleiben sie oberflächlich und werden schnell wieder vergessen. Wenn sich Wissen nachhaltig in den Köpfen und Herzen der Menschen verankern soll, so muss es sowohl emotionale Zugangsweisen enthalten, als auch situiert gelernt werden (Siebert 1998: 81). Es muss in die lebensweltlichen Kontexte eingebunden sein und an Vorkenntnisse und Vorerfahrungen anknüpfen. Wissen ist dabei nicht als zu vermittelnder Stoff, sondern als kognitive Leistung der Person zu verstehen, denn wir benötigen kein reines Faktenwissen, sondern Wissen mit Bezug zu unserer alltäglichen Lebenswirklichkeit (Siebert 1998: 81). Da jedoch die Auswirkungen des eigenen Verhaltens auf die Umwelt nicht sinnlich wahrnehmbar sind, müssen die Informationen von vertrauenswürdigen Personen glaubwürdig und nachvollziehbar bereitgestellt werden (Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt 2002: 21).

Betrachtet man nun die sieben beschriebenen Prinzipien im Zusammenhang, wird deutlich, dass ganzheitliche Erfahrungen des Naturerlebens in ihrer Gesamtheit ein Bild von der Wirklichkeit darstellen. Menschliches Verhalten wird nicht primär rational durch Wissen gesteuert, sondern vielmehr aus dem Bauch heraus, das bedeutet auf emotionaler Ebene. Aus diesem Grund sind emotionale Gefühle möglichst in einen handlungsorientierten Lernprozess zu integrieren. Dabei spielen nicht nur positive, sondern vor allem reale Emotionen eine Rolle, um eine persönliche Haltung zu menschlichen Verhaltensweisen in der Natur zu erreichen (Corleis 2000: 32ff). Das Ziel eines absolut ganzheitlichen Lernvorgangs ist unerreichbar, sollte aber dennoch in Annäherung an eine niedrige Ganzheit-

lichkeitsebene angestrebt und als grobe Leitlinie angesehen werden. Dafür kommen drei methodische Zugänge in Frage: sinnliches Naturerleben, ein Spiel, welches zum Naturerleben führt und ästhetisches Naturerleben (Corleis 2000: 34f). Die Art und Weise wie Naturerleben erfolgt, sollte nach de Haan & Kuckartz (1996: 115), in jedem Fall auf direktem Weg stattfinden, d. h. in direktem Kontakt zwischen Mensch und Natur.

Somit seien die wichtigsten methodischen Voraussetzungen des Lernprozesses beschrieben. Bevor diese nun jedoch in die Tat umgesetzt werden, sollten weiterhin die Interessen der Lernenden Berücksichtigung finden, um möglichst adressatengerecht vorzugehen und nachhaltige, individuelle Lernprozesse zu arrangieren. Aber was wünschen sich die Rezipientinnen und Rezipienten in Bezug auf Umweltbildung?

Die breite Masse der Teilnehmerinnen und Teilnehmer präferiert Umweltbildungsangebote in der näheren Umgebung ihres Wohnortes, so dass sie weder lange Fahrten auf sich nehmen müssen, noch gezwungen sind, dort zu übernachten. Dabei sind kurze und produktive Veranstaltungen verständlicherweise wesentlich beliebter (Giesel et al. 2002: 134f). Über 74 % befürworten eine fächerübergreifende Konzeption. Ebenso groß sind außerdem das Interesse zielgruppenspezifischer Angebote und der Bezug zu lokalen Umweltproblemen, das Angebot praktischer Tipps, Bewusstseinsbildung und Möglichkeiten zur Diskussion (Giesel et al. 2002: 134-137).

## 6. Von den Prinzipien zum Lehrpfad

Mit dem Ziel einen ansprechenden Umweltbildungslehrpfad im Ulstertal zu konzipieren, sind selbstverständlich die entsprechenden örtlichen Besonderheiten zu berücksichtigen. Hierzu zählt neben Naturschutz-, Landschaftsschutz-, Vogelschutz- und Flora-Fauna-Habitat-Gebieten insbesondere die Zonierung des Biosphärenreservates Rhön. Die gesamte Ulster und ihre Zuflüsse gehören – mit Ausnahme eines 1,5 Kilometer langen Abschnittes vor der Mündung in die Werra – zum Biosphärenreservat Rhön (Biosphärenreservat Rhön 1996, Opp 2005). Betrachtet man nun das Ulstertal hinsichtlich seiner Umsetzungsmöglichkeiten für Umweltbildungsmaßnahmen aufgrund möglicher Reglementierungen durch die Zonierung des Biosphärenreservates, so stellt man fest, dass beinahe die gesamte Ulster durch eine Entwicklungszone verläuft, zumindest auf der Strecke von Wüstensachsen bis Wenigen-

taft. Nur in der Quellregion, einem kurzen Abschnitt bei Motzlar und in dem Bereich zwischen Wenigentaft und Pferdsdorf durchläuft sie Pflegebeziehungsweise Kernzonengebiet. Abgesehen von den wenigen Kernzonenabschnitten sind überall Umweltbildungsmaßnahmen auch in Form von Lehrpfaden erlaubt (Ständige Arbeitsgruppe der Biosphärenreservate in Deutschland 1995: 244f). Für die Konzeption eines Lehrpfades innerhalb des Biosphärenreservates Rhön kommt

somit der Bereich des oberen Ulstertals (die Quellbäche aufgrund ihrer Zugehörigkeit zum Kernzonengebiet ausgenommen) bis Wenigentaft in Frage.

Die Lage der Ulster im Biosphärenreservat Rhön eignet sich in besonderem Maße, um Umweltbildungsmaßnahmen durchzuführen, denn Umweltbildung wird in Biosphärenreservaten als ein wesentliches Ziel formuliert (Abb. 1)

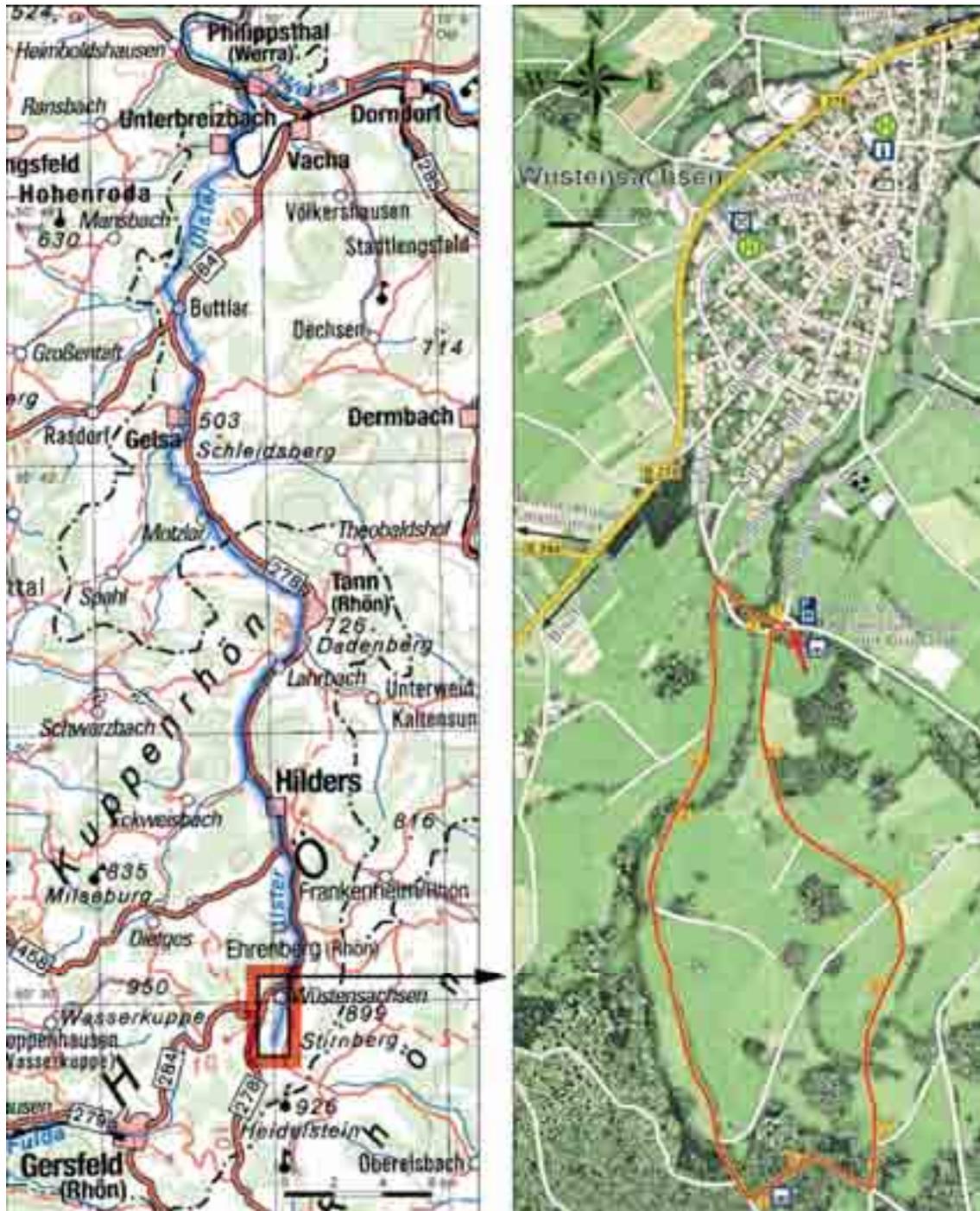


Abb.1: Das Ulster-Einzugsgebiet und die Lage des Lehrpfades.

## 7. Der geplante Lehrpfadstandort

Sobald die formalen Restriktionen im Einzelnen beachtet und einige geeignete Standorte ins Auge gefasst wurden, sind bereits vorhandene Umweltbildungsstandorte zu berücksichtigen, um Überangebote zu vermeiden und eine gleichmäßige Verteilung dieser anzustreben. Ohne im Folgenden die einzelnen Einrichtungen im Ulstertal näher zu erläutern, ergaben Recherchen vor Ort, dass ein Defizit in Ortsnähe der Siedlung Wüstensachsen/Ehrenberg auffällig ist. Strebt man eine bessere Verteilung und Verfügbarkeit an Umweltbildungsmöglichkeiten an, so müsste gerade dort die Umsetzung des Lehrpfades erfolgen. Somit wäre Umweltbildung für alle Bürgerinnen und Bürger auch in Wohnortnähe von Wüstensachsen möglich.

Betrachtet man nun die Ulsteraue in der Gemeinde Ehrenberg im Hinblick auf die Umsetzungsmöglichkeiten eines Gewässerlehrpfades und berücksichtigt gleichermaßen die Interessen der Rezipientinnen und Rezipienten, so scheint der Wandererparkplatz „Roter Rain“ am südlichen Ortsrand von Wüstensachsen – der größten Siedlung der Gemeinde Ehrenberg – besonders geeignet. An diesem Standort wurde von der hessischen Verwaltungsstelle des Biosphärenreservates Rhön ein Erlebnisspielplatz errichtet, welcher Ausgangspunkt von Familienwanderungen ist. Der Erlebnisspielplatz, die zahlreichen Bänke und Tische sowie der Parkplatz und die starke Frequentierung sind optimale Voraussetzungen für den Start- und Endpunkt eines Lehrpfad-Rundweges. Zudem können Touristen von der nahe gelegenen Touristeninformation in Wüstensachsen und Radwanderer des direkt anschließenden Ulstertal- und Rhönradweges auf den Lehrpfad aufmerksam gemacht werden. Auch an der nahe gelegenen Wasserkuppe – der am meisten von Besuchern frequentierten Lokalität in der Rhön (Jordan 2007) – könnten Informationsbroschüren auf einen Lehrpfad in Wüstensachsen hinweisen.

Ausgehend von dem Parkplatz „Roter Rain“ und dem Erlebnisspielplatz haben Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Verwaltungsstelle des Biosphärenreservates Rhön drei Rundwege angelegt. Einer dieser Rundwege misst etwa 3,5 Kilometer. Er orientiert sich in hohem Maße am Verlauf der Ulster. Durch die bereits bestehende Beschilderung kann bei der Nutzung dieses Weges auf ein Leitsystem entlang des Lehrpfades verzichtet werden. Darüber hinaus eignen sich Rundwege in besonderer Weise als Lehrpfad-

standorte. Zum Einen erhalten sie einen Spannungsbogen aufrecht und zum Anderen gelangt man somit zum Ausgangspunkt zurück. Dies verhindert Orientierungslosigkeit und das Problem, für den Rückweg den öffentlichen Personennahverkehrs nutzen beziehungsweise zum eigenen Fahrzeug zurückkehren zu müssen. Der Erlebnisspielplatz eignet sich in hohem Maße, um die Zielgruppe Kinder anzusprechen.

## 8. Das Lehrpfadkonzept

Kinder zeigen eine unglaubliche Ausdauer und Konzentration an geeigneten Lehrpfadstationen. Darüber hinaus gelten Naturerfahrungen in der Kindheit als Voraussetzung für die Motivation zu umweltgerechten Verhalten und der Mitarbeit in natur- und umweltschützenden Einrichtungen im Erwachsenenalter. Als prägende Phase gilt hierfür vor allem die spätere Kindheit - also vom Schuleintritt bis zur Vorpubertät (Bögeholz 1999: 19).



Abb. 2: „Bella“, die Bachforelle – das Lehrpfad-Logo.

Es ist besonders bedeutsam, dieser Altersgruppe Naturerfahrungen und eine direkte Auseinandersetzung mit der Natur zu arrangieren. Aus diesem Grund wurden Kinder der späten Kindheit als Zielgruppe für diesen Lehrpfad ausgewählt. Sie werden an einen fremden Lebensraum mit- samt der dort lebenden Organismen und deren Wechselbeziehungen herangeführt und für naturnahe Lebensräume sensibilisiert. Ziel ist es, durch die Verknüpfung zu ihrem Alltagshandeln, ein Bewusstsein zum Schutz des Lebensraumes zu entwickeln.

Um die eingangs beschriebenen multisensorischen, emotionalen, interaktiven und bedeutsa-

men Grundsätze umsetzen zu können, sind überwiegend praktische Aktivitäten in der Natur notwendig, sodass vor allem affektiv-emotional und kognitiv gelernt werden kann. Dafür eignen sich zumeist spielerische Verfahren, um Handlungsfähigkeit zu aktivieren und die Fähigkeit zu entwickeln, sich in umweltrelevante Situationen und andere Personen hineinzusetzen, einen Bezug zur Umwelt aufzubauen und eine entsprechende Handlungsnotwendigkeit zu aktivieren (Muff 2001: 53). Die entsprechenden Informationen und Anregungen sollen neugierig machen, mit vorhandenem Wissen verknüpfbar sein, einen Gebrauchswert haben und für Problemlösungen dienlich sein. Somit können die Besucherinnen und Besuchern betroffen und nachdenklich gemacht und deren Wertschätzung der Natur noch verstärkt werden (Megerle 2003: 244f, Lang & Stark 2000: 70).

Bevor handlungsorientiertes Wissen und Alltagshinweise wahr- und aufgenommen werden, ist es zunächst einmal notwendig, den Besucherinnen und Besuchern einen altersgerechten Zugang zum meist unbekanntem Lebensraum Bach zu ermöglichen. Entsprechend den Anforderungen von Lang & Stark (2000: 70) wurde dem Lehrpfad deshalb eine Leittierart (Bachforelle) mit dem Namen Bella zugrunde gelegt (Abb. 2). Bella begleitet in Form eines verniedlichten Logos den Lehrpfad. Darüber hinaus wurde ein prägnanter, ansprechender, objektiver und Interesse weckender Lehrpfadname gewählt: „Erlebe den Lebensraum der Bachforelle Bella“. Dieser Titel lässt richtig vermuten, dass an diesem Lehrpfad die Eigenaktivität der Besucherinnen und Besuchern im Mittelpunkt steht und lässt gleichzeitig offen, in welcher Form der Lebensraum Bach erlebt werden soll.

Infolge der Personifizierung durch das Logo und der vermenschlichten Bachforelle werden Bilder, Erwartungen, Neugier und Interesse bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmer im Kindesalter geweckt. Darüber hinaus wird ein Spannungsbogen aufgebaut, welcher durch die Konzeption des Lehrpfades als Rundweg in stärkerem Maße aufrechterhalten wird und nach Lang & Stark (2000: 70) einen größeren Lernerfolg erwarten lässt. Der Lehrpfad beinhaltet insgesamt 10 Stationen (Tab. 1).

Der empathische, kindgerechte Zugang erleichtert im Zusammenhang mit direkten, sinnlichen und emotionalen Naturerfahrungen einen direkten Bezug zur Lebenswirklichkeit und kann dadurch gezielt Betroffenheit der Teilnehmerinnen und Teilnehmer auslösen und diese zur

Umsetzung des erworbenen, handlungsorientierten Wissens animieren. Hierfür müssen jedoch die Zusammenhänge zwischen menschlichen Verhaltensweisen und deren Auswirkungen auf den Lebensraum Fließgewässer altersgemäß nachvollzogen werden können. Die Umsetzung der Konzeption erfolgt sukzessiv im Verlauf des Lehrpfades und soll im Folgenden exemplarisch an zwei Stationsbeispielen dargestellt werden: Beispiel einer Lehrpfadstation zu Beginn des Lehrpfades (Abb. 3).

#### *Was soll mit Station 1 erreicht werden?*

Die erste Station wird genutzt, um die Bachforelle ein wenig kennen zu lernen und ihre Ernährungs- und Lebensweise zu verstehen. Dabei wird besonderen Wert darauf gelegt, sich Zeit zu lassen und den neuen Raum zu erkunden, sich in ihm zu bewegen und genau wie die Forelle nach Nahrung zu suchen. Um dies zu erfahren, werden sich die Besucherinnen und Besuchern in die Bachforelle hineinversetzen. Dieser Vorgang ist für den folgenden Pfadabschnitt von Bedeutung. Wie einfach oder schwer es ist, Nahrung zu finden, wird jeder selbst feststellen und möglicherweise die Forelle um ihre Fähigkeiten bewundern. Sich selbst in der Rolle der Bachforelle zu sehen und Bewunderung zu empfinden, ist ein erster und wichtiger Schritt, um ein Schutzbedürfnis des Lebensraumes des Tieres zu entwickeln. Hierbei spielen natürlich sinnliche Erfahrungen eine wichtige Rolle, um den Lebensraum zu verstehen und weitere Emotionen zu entwickeln. Kaltes Wasser aus dem Oberlauf eines Fließgewässers, glatte und glitschige Steine im und am Bach, die Geräusche des plätschernden Wassers, welches selbst im Verlauf des kurzen Bachabschnittes seine Erscheinung ändert, viele verschiedene kleine Lebewesen, die man wahrscheinlich noch nie vorher zu Gesicht, geschweige denn zwischen die Finger bekommen hat... Das Umfeld gibt Raum für zahlreiche sinnliche Erfahrungen, die heute bei Kindern und Jugendlichen häufig zu kurz kommen, aber bedeutsam für die Entwicklung eines Kindes sind.

Durch den gegebenen Hinweis auch unter den Steinen nach Lebewesen zu suchen, werden allen Besucherinnen und Besuchern umfassende Naturerfahrungen und zugleich Erfolgserlebnisse ermöglicht, denn jede/r wird Lebewesen finden. Im Bachabschnitt wimmelt es vor Fliegenlarven und Bachflohkrebsen. Dieses Erfolgserlebnis, wirklich etwas gefunden zu haben, auch wenn man es nicht erwartet hätte, ist eine notwendige

Voraussetzung für eine weiterhin aktive Bereitschaft zur Umsetzung der Handlungsanweisungen und Beantwortung der Fragestellungen. Lang & Stark (2000: 60) ordnen die Relevanz an Erfolgssituationen bei Lehrpfaden insbesondere der ausgewählten Zielgruppe „späte Kindheit“ zu. Dadurch, dass man nun selbst etwas gefunden hat, will man natürlich erfahren, was genau man gefunden hat und wird somit die Abbildungen mit den beobachteten Lebewesen vergleichen. Somit beschäftigen sich die Besucherinnen und Besucher noch intensiver mit den gegebenen Informationen und lernen neben neuen Arten auch gleich deren Artnamen kennen. Der zusätzliche Aspekt der Nutzung von Luftnahrung kann zur Bewunderung der Leittierart führen.

Durch die Erfolgssituationen, dem ersten Kontakt mit dem Wasser, der Vermittlung von Artnamen und deren interspezifischen Verhältnisses, der Bildung von ersten Emotionen und sinnlichen Erfahrungen konnte ein Spannungsbogen aufgebaut werden. Somit sind bereits in der ersten Station neben persönlichen Erfahrungen wichtige Grundlagen für das Interesse an den folgenden Stationen geschaffen worden.

An den folgenden Stationen steht weiterhin der direkte Kontakt mit dem Lebensraum Wasser und der Aufbau einer persönlichen Bindung zu Bella im Vordergrund. Durch Einbezug eines unterirdischen Röhrensystems am Erlebnisspielplatz „Roter Rain“ können auf sehr emotionalem Weg die Gefühlseindrücke einer Bachforelle in verrohrten Gewässerabschnitten nachempfunden werden. Zusammen mit der Suche nach geeigneten Versteckmöglichkeiten kann dadurch direkt erfahren werden, was ein naturnahes Gewässer ausmacht und was getan werden muss, um es zu erhalten. Das Schutzinteresse wird beispielsweise durch die Bewunderung und die Steigerung der Wertschätzung während eines Weitsprungvergleichs der eigenen Fähigkeiten mit denen einer Bachforelle geschaffen. Darüber hinaus werden sukzessive Grundlagen für das Verständnis der Zusammenhänge nachfolgender Stationen aufgebaut.

*Was soll mit Station 9 erreicht werden?*

Zunächst wird ein Bezug der Station zum Standort und dem Ort Wüstensachsen aufgebaut. Durch den Abstand zu den Häusern sowie weiteren Ortschaften im Ulstertal und dem Bezug zur

eigenen Wohnung zu Hause wird das Bewusstsein entwickelt, dass alle Wohnhäuser mit Trinkwasser versorgt werden.

Inhaltlich sollen an dieser Station insbesondere die Zusammenhänge von Grundwasser und oberirdischem Abfluss sowie die Herkunft unseres Trinkwassers geklärt werden. Hierbei werden die Erkenntnisse vorheriger Stationen – wie beispielsweise die Abbildung des versickernden Wassers bei Station 3 – erweitert (vgl. Abb. 5).

Auf Grundlage des bereits Gelernten wird aufgebaut und ein weiterer entscheidender Faktor ergänzt: das Wissen um den sinkenden Grundwasserspiegel bei steigendem Wasserverbrauch. Dieser Effekt ist für die Besucherinnen und Besuchern insofern von Bedeutung, dass sie begreifen, selbst etwas tun zu können, um den Lebensraum zu erhalten. Sie selbst haben eine Beziehung zu Bella aufgebaut und sehen sich nun mit der Tatsache konfrontiert, dass sie persönlich meist unbewusst auf ihren Lebensraum Einfluss nehmen. Somit wird ein wichtiger, umweltrelevanter Handlungsimpuls gegeben, etwas zum Schutz der Bachforelle beizutragen.

Nun sind die Resultate jedes Einzelnen gering, aber wenn die Botschaft des Wassersparens viele Haushalte erreicht, können somit zumindest die Lebensbedingungen der Bachforellen für einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden. Diese Station soll dazu beitragen, Handlungsmöglichkeiten zu eröffnen, eigene Handlungsmöglichkeiten zu erkennen und somit die Bedeutung des Wassersparens – als einen wesentlichen Bestandteil des Umweltschutzes – zu verinnerlichen. Dadurch kann zumindest durch kleine Schritte der Umweltbildung ein positiver Effekt für den Umweltschutz erreicht werden.

In weiteren Stationen wird ein grundsätzliches Verständnis des Lebensraumes Bach, bestehender Nahrungsbeziehungen sowie menschlicher Einflüsse durch Nutzung der Natur, des Trinkwassers und der Einleitung von Abwässern auf dieses Ökosystem geschaffen. Dabei wird auf emotionalem Weg zu Beginn des Lehrpfades ein Schutzbedürfnis gegenüber dem Naturraum aufgebaut, welches an den letzten Lehrpfadstationen genutzt wird, seitens der Besucherinnen und Besuchern eine intrinsische Motivation zum Umweltschutz zu wecken. Dabei erhalten sie an den Stationstafeln genügend Hinweise, die sie täglich umsetzen können und somit zum Umweltschutz beitragen.

Station	Thema	Ort	Lage	Ziele und Inhalte
Eingangsstation	Lehrpfadübersicht	Parkplatz Roter Rain, direkt an einem Erlebnisspielplatz mit Grillstelle, neben einer Tafel bereits vorhandener Rundwanderwege.	N 50° 29,475' / E 10° 00,067'	Allgemeine Lehrpfadinformationen, Hinweise zur Begehung und Möglichkeiten zu begleiteten Führungen, Informationen zur Homepage sowie zu weiteren Umweltbildungseinrichtungen im Ulstertal.
1	Die Nahrung der Bachforelle	Erlebnisspielplatz an der Holzhängebrücke über die Ulster, reich strukturierte Gewässersohle unterschiedlicher Körnung, geringe Wassertiefe.	N 50° 29,471' / E 10° 00,028'	Sinnliche Erfahrungen, Kennenlernen der Nahrung einer Bachforelle, Erfolgserlebnisse schaffen.
2	Dunkle Tunnel gibt's auch im Bach!	Erlebnisspielplatz, direkt vor einem Tunnelsystem	N 50° 29,463' / E 10° 00,040'	Emotionen wecken, in die Leittierart hineinversetzen.
3	Woher kommt all das Wasser?	Geräuschbehafteter Zulauf eines kleinen Nebenarmes in die Ulster, große Steine und natürliche Stufen erleichtern den Zugang zum Gewässer.	N 50° 29,303' / E 9° 59,917'	Eigenaktivität und Beobachtungen ermöglichen, Vermittlung von Grundlagen des Wasserkreislaufs.
4	Der Bachflohkrebs muss auch etwas fressen, aber was?	Brücke über die Ulster, Erlenbewuchs	N 50° 29,241' / E 9° 59,867'	Ermutigung zu weiteren Naturerfahrungen durch Beobachtungen und eigenständige Untersuchungen, Einführung in das Nahrungsnetzwerk des Ökosystems.
5	Versteck Dich!	Naturnaher Gewässerabschnitt in einem Buchenmischwald, mit einem Tisch, einer Bank und einer Holzbrücke über die Ulster mit Blick auf einen 1 Meter hohen Wasserfall.	N 50° 28,785' / E 10° 00,016'	Kenntnisse zum Leben der Bachforelle und Sensibilisierung für naturnahe Lebensräume.
6	Bella wandert, so wie Du!	Auf einem ebenen und weichen Abschnitt des Rundweges im Wald, kurz nach einem steilen Anstieg, etwa neun Meter vor einem separat stehenden, markanten Baum.	N 50° 28,781' / E 10° 00,080'	Bewunderung für Bachforellen hervorrufen und Kenntnisse vertiefen.
7	Wasser schenkt Leben!	Weide am Waldrand mit Blick ins Ulstertal.	N 50° 28,840' / E 10° 00,242'	Erkennen der Bedeutung des Wassers für das Leben auf der Erde, des täglichen Wasserverbrauchs des Menschen und des enormen Wasserverbrauchs der Industrie.
8	Woher kommt das ganze Leitungswasser für den Menschen?	Weide am Wegrund, im Schatten eines Ahornbaumes mit Blick auf Wüstensachsen.	N 50° 28,999' / E 10° 00,244'	Trinkwassergewinnung, Zusammenhänge von Grundwasser und oberirdischem Abfluss, Bewusstseinsbildung zum Wassersparen.
9	Abwässer verändern Bellas Lebensraum!	Weggabelung mit einer Bank und Blick auf den Ritterhof, unter einer alten Esche.	N 50° 29,128' / E 10° 00,276'	Verständnis wecken, warum es wichtig ist, Wasser zu sparen und die Abwässer wenig zu belasten. Anregungen zum Wassersparen mit nach Hause nehmen.
10	Die Bedeutung der Bachforelle für den Menschen.	Fischzuchtbecken der Forellenzucht Keidel	N 50° 29,315' / E 10° 00,025'	Erkennen der Bedeutung der Bachforelle für den Menschen, Anregungen zum Naturschutz und zur Besichtigung Keidels' Forellenhof

Tab. 1: Themen, Ort, Lage und Ziele der Lehrpfadstationen.

1



## Die Nahrung der Bachforelle

Genau wie wir müssen Bachforellen Nahrung zu sich nehmen. Wir können Pflanzen und Tiere essen. Bachforellen sind auf tierische Kost angewiesen. Welche Tiere könnten der Bachforelle als Nahrungsgrundlage dienen?



Die Bachforelle - Salmo trutta trutta (aufgenommen von Andreas Hartl)

Nimm Dir Zeit und erkunde den Lebensraum der Bachforelle! Auch Bella muss ihre Nahrung mühevoll suchen! Suche nun selbst im angrenzenden Bach nach Lebewesen, die von ihr gefressen werden können!

**Hinweis:** Häufig verstecken sich die kleinen Tiere unter Steinen! Am besten findest Du sie, wenn Du die Schuhe ausziehst und ins Wasser gehst! Bella muss ihre Nahrung auch vom Wasser aus finden!

Und welche Tiere hast Du gefunden?

Die Bachforelle ernährt sich hauptsächlich von Köcher- und Eintagsfliegenlarven. Am liebsten jedoch von Bachflohkrebsen.

Mit etwas Glück hast Du das ein oder andere Lebewesen entdeckt und kannst es auf einem der Bilder wieder erkennen.



Eintagsfliegenlarven (aufgenommen von Andreas Hartl)



Köcherfliegenlarven (aufgenommen von Andreas Hartl)



Bachflohkrebs (aufgenommen von Andreas Hartl)

Eine ausgewachsene Bachforelle springt auch gern aus dem Wasser heraus, um fliegende Insekten zu fangen!

Abb. 3: Tafel der Station 1.

## Abwässer verändern Bellas Lebensraum!

9



Wenn Du an der Tafel vorbei schaust, siehst Du ein Haus. Alle Häuser werden nicht nur mit Trinkwasser versorgt, sie produzieren auch Abwasser, also Wasser, das in den Abfluss fließt (aus Toilette, Dusche, Waschbecken...). Was passiert mit unserem verschmutzten Wasser?

Alle Abwässer gelangen in die Kanalisation und dann zu den Kläranlagen. Dort wird das Wasser gereinigt und wieder in die Flüsse geleitet. Richtig sauber ist dieses Wasser jedoch nicht! Es verändert natürliche Gewässer! Dadurch verändert sich auch Bellas Lebensraum!



Bakterien beim Blau einer Lachgrube  
(aufgenommen von Andreas Hart)

Bella braucht sehr sauberes Wasser zum Leben! Schmutziges Wasser mag sie nicht!



Um Bellas Lebensraum zu erhalten, sollten umweltschonende Wasch- und Reinigungsmittel verwendet werden! Außerdem hilft Wassersparen Bellas Lebensraum zu erhalten! Hier ein paar Hinweise, wie auch Du Wasser sparen kannst.

### 1. Duschen statt baden!

Für ein Duschbad benötigen wir nur etwa 30-50 Liter Wasser. Bei einem Vollbad dagegen 150-200 Liter Wasser!

### 2. Wasser abstellen!

Beim Einseifen unter der Dusche und beim Zahneputzen Wasser abstellen!

### 3. Nach dem Gebrauch den Wasserhahn immer fest zudrehen!

Durch einen tropfenden Wasserhahn gehen bis zu 45l Wasser pro Tag verloren!

### 4. Beim kleinen Geschäft auf der Toilette nur kurz spülen!

Hierfür haben die meisten Toiletten eine Wasser-Stopp Taste!

### 5. Regenwasser für die Pflanzen!

Pflanzen gedeihen besser, wenn man sie mit Regenwasser gießt. So spart man außerdem Trinkwasser!

Abb. 4: Tafel der Station 9.

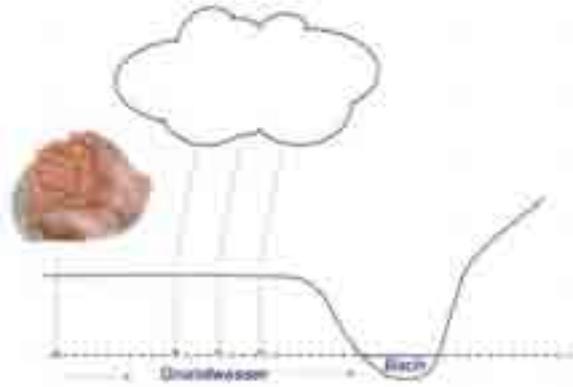


Abb. 5: Versickerndes Wasser (Abbildung aus Station 3).

## 9. Fazit

Mit dem Ziel, bestehende Lehrpfadmodelle (vgl. Jost & Opp 2005: 775 sowie, 2006: 95ff) konzeptionell zu überdenken und in der Neukonzeption aktuelle neurowissenschaftliche und neurodidaktische Forschungsergebnisse zu integrieren, wurden sieben Prinzipien nachhaltigen Lernens formuliert und in das Konzept des Ulster-Lehrpfades integriert. Durch dieses Arrangement von Lernsituationen und der Verknüpfung mit relevanten Umweltinformationen sowie den Zusammenhängen menschlichen Verhaltensweisen und deren Auswirkung auf den Lebensraum Fließgewässer vor der eigenen Haustür, resultieren nicht nur individuelle, sinnliche Naturerfahrungen, sondern ebenso ein stärkeres Bewusstsein zur natürlichen Umgebung. Der persönliche Bezug ist dabei der erste Schritt, um diesen Lebensraum als „schön“ und „schützenswert“ einzustufen, eine positive Einstellungen gegenüber der Natur zu erlangen, Begeisterung für die Natur zu wecken und umweltfreundliches Verhalten und Eigenengagement im Natur- und Umweltschutz zu ermöglichen. Dadurch kann es gelingen, auch die Kinder der naturfremden Generation wieder für ihre Umwelt zu sensibilisieren und zu begeistern.

## 10. Literatur

Biosphärenreservat Rhön (Hrsg.) (1996): Rahmenkonzept für das Biosphärenreservat Rhön – Zusammenfassung. – In: MAB-Mitteilung, 38: 53-60.  
 Bögeholz, S. (1999): Qualitäten primärer Naturerfahrung und ihr Zusammenhang mit Umweltwissen und Umwelthandeln. Schriftenreihe „Ökologie und Erziehungswissenschaft“ der Arbeitsgruppe „Um-

weltbildung“ der Deutschen Gesellschaft für Erziehungswissenschaft,5; Opladen (Leske + Budrich).  
 Brand, M. & Markowitsch, H. J. (2009): Lernen und Gedächtnis aus neurowissenschaftlicher Perspektive. Konsequenzen für die Gestaltung des Schulunterrichts – In: Herrmann, U. (Hrsg.): Neurodidaktik. Grundlagen und Vorschläge für gehirngerechtes Lehren und Lernen (2. Auflage): 69-85, Weinheim/Basel (Beltz Verlag).  
 Corleis, F. (2000): Die Bedeutung von Naturerlebnissen in der Schule: Naturerlebnispädagogik? – Lüneburg (Verlag edition erlebnispädagogik).  
 Degenhardt, L. (2002): Nachhaltige Entwicklung und Lebensstile. In: Bolscho, D. & Michelsen, G. (Hrsg.): Umweltbewusstsein unter dem Leitbild Nachhaltige Entwicklung: 13-45; Opladen (Leske + Budrich Verlag).  
 de Haan, G., Jungk, D., Kutt, K., Michelsen, G., Nitschke, C., Schnurbel, U. & Seybold, H. (1997): Umweltbildung als Innovation. Bilanzierungen und Empfehlungen zu Modellversuchen und Forschungsvorhaben; Berlin-Heidelberg (Springer).  
 de Haan, G. & Kuckartz, U. (1995): Phänomene des Umweltbewusstseins – In: Greenpeace (Hrsg.): Neue Wege in der Umweltbildung. Beiträge zu einem handlungsorientierten und sozialen Lernen: 12-31; Göttingen (Verlag die Werkstatt).  
 de Haan, G. & Kuckartz, U. (1996): Umweltbewusstsein. Denken und Handeln in Umweltkrisen; Opladen (Westdeutscher Verlag).  
 de Haan, G. (1998): Bildung für nachhaltige Entwicklung? Sustainable Development im Kontext pädagogischer Umbrüche und Werturteile. Eine Skizze – In: Beyer, A. (Hrsg.): Nachhaltigkeit und Umweltbildung: 109-148; Hamburg (Krämer Verlag).  
 de Haan, G. (2009): Potenziale der Umweltbildung zwischen Bildungsreform und virtuellen Welten – In: Brickwedde, F. & Bittner, A. (Hrsg.): Kindheit und Jugend im Wandel! Umweltbildung im Wandel? 14. internationalen Sommerakademie St. Marienthal: 37-42; Berlin (Erich Schmidt Verlag).  
 Ebers, S. (1998): Es wird konkret: Planung eines Naturerlebnispfades – In: Ebers, S., Laux, L. & Kochanek, H.-M.: Vom Lehrpfad zum Erlebnispfad. – Handbuch für Naturerlebnispfade: 36-47; Wetzlar (NZH-Verlag).  
 Giesel, K., de Haan, G. & Rode, H. (2002) Umweltbildung in Deutschland. Stand und Trends im außerschulischen Bereich. – Berlin, Heidelberg (Springer).  
 Hedewig, R. (1993): Der Naturlehrpfad. Ziele, Themen, Inhalte. – Wetzlar (Naturschutz-Zentrum Hessen).  
 Herrmann, U. (2009): Gehirnforschung und die neurodidaktische Revision schulisch organisierten Lehrens und Lernens. Aspekte und Chancen einer gemeinsamen interdisziplinären Erfolgsgeschichte – In: Herrmann, U. (Hrsg.): Neurodidaktik. Grundlagen und Vorschläge für gehirngerechtes Lehren

- und Lernen (2. Auflage): 148-195; Weinheim/Basel (Beltz Verlag).
- Herz, O. (1994): Die Bedingungen des Aufwachsens von Kindern und Jugendlichen in der heutigen Zeit – In: Arbeitsgemeinschaft Umweltbildung (Hrsg.): Fürs Überleben handeln lernen. Dokumentation des Symposiums zur Umweltbildung vom 13.9.-15.9.1993 in Mainz: 31-42; Münchweiler (Warda-Druck).
- Jordan, A. (2007): Touristisches Potenzial des Biosphärenreservats Rhön – untersucht an den Standorten Milseburg und Wasserkuppe. – Unveröff. Diplomarbeit FB Geographie, Universität Marburg.
- Jost, I. & Opp, Ch. (2005): Zur Vermittlung von Kenntnissen über Böden eines Bodenlehrpfades. Beispiele, Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes unterschiedlicher Medien. – In: Mitt. Dt. Bodenkundl. Gesellsch., 107 (2): 775-776.
- Jost, I. & Opp, Ch. (2006): Konzeption eines Bodenlehrpfades auf Grundlage bodenkundlicher Untersuchungen im Forstrevier Münchhausen/Burgwald. – In: Geol. Jb. Hessen, 133: 95-108.
- Lang, C. & Stark, W. (2000): Schritt für Schritt NaturErleben. Ein Wegweiser zu Einrichtung moderner Lehrpfade; Wien (Forum Umweltbildung).
- Lude, A. (2001): Naturerfahrung & Naturschutzbewusstsein. Eine empirische Studie; Innsbruck-Wien-München (Studien Verlag).
- Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest (2006): KIM-Studie 2006. Kinder und Medien, Computer und Internet. Basisuntersuchung zum Medienumgang 6- bis 13-Jähriger in Deutschland. Stuttgart (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest).
- Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest (2007): JIM 2007. Jugend, Information, (Multi-)Media. Basisstudie zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland. Stuttgart (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest).
- Megerle, H. (2003): Naturerlebnispfade – Neue Medien der Umweltbildung und des landschaftsbezogenen Tourismus? Bestandsanalyse, Evaluation und Entwicklung von Qualitätsstandards – In: Eberle, D., Förster, H., Kohlhepp, G. & Pfeffer, K.-H.: Tübinger Geographische Studien, 124; Tübingen (Im Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Tübingen).
- Muff, A. (2001): Erlebnispädagogik und ökologische Verantwortung. Erleben und Handeln im Spannungsfeld von Naturnutzung und Naturschutz. – 2. Auflage Butzbach-Griedel (Afra Verlag).
- Opp, Ch. (2005): Geographische Beiträge zur abiotischen Ausstattung des Biosphärenreservats Rhön. – In: Beiträge Region und Nachhaltigkeit, 2/2: 71-83.
- Poferl, A., Schilling, K. & Brand, K.-W. (1997): Umweltbewusstsein und Alltagshandeln. Eine empirische Untersuchung sozial-kultureller Orientierungen; Opladen (Leske & Budrich Verlag).
- Roth, G. (2009): Warum sind Lehren und Lernen so schwierig? – In: Herrmann, U. (Hrsg.): Neurodidaktik. Grundlagen und Vorschläge für gehirnrechtliches Lehren und Lernen (2. Auflage): 58-68, Weinheim/Basel (Beltz Verlag).
- Rottenbach, H. (1995): Lernen in Umweltcamps: Wahrnehmen, Erleben und Handeln – In: Greenpeace (Hrsg.): Neue Wege in der Umweltbildung. Beiträge zu einem handlungsorientierten und sozialen Lernen: 201-220; Göttingen (Verlag die Werkstatt).
- Schenk, I. (2000): Kinder haften für ihre Eltern – Generationsübergreifend „Wege zur Naturerziehung“ gehen. – In: Naturschutz-Zentrum Hessen (Hrsg.): Generationsübergreifendes Lernen in der Umweltbildung. Impulse für eine lebendige Umsetzung der Agenda 21: 21-34; Gießen (NZH-Verlag).
- Sichler, R. (1995): Die Entfremdung des Menschen von der Natur. – In: Dröschel, A. (Hrsg.): Kinder – Umwelt – Zukunft: 40-52; Münster/New York (Waxmann Verlag).
- Siebert, H. (1998): Empirische Untersuchungen zum Wertewandel und Umweltbewusstsein. – In: Beyersdorf, M., Michelsen, G. & Siebert, H. (Hrsg.): Umweltbildung. Theoretische Konzepte, empirische Erkenntnisse, praktische Erfahrungen: 74-83; Neuwied/Kriftel (Luchterhand Verlag).
- Ständige Arbeitsgruppe der Biosphärenreservate in Deutschland (1995): Biosphärenreservate in Deutschland. Leitlinien für Schutz, Pflege und Entwicklung; Berlin/Heidelberg (Springer).
- Ude, M. (1994): Der Natur auf der Spur. – In: Arbeitsgemeinschaft Umweltbildung (Hrsg.): Fürs Überleben handeln lernen. Dokumentation des Symposiums zur Umweltbildung vom 13.9. – 15.9.1993 in Mainz: 177-183; Münchweiler (Warda-Druck).
- Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt Berlin (2002): Vom grauen Appell zum bunten Erlebnisversprechen. Kommunikation und Umwelt im Tourismus. – In: Umweltdachverband (2002): Grenzgänge. Umweltbildung und Ökotourismus: 18-23; Berlin (Forum Umweltbildung).
- UNESCO-Verbindungsstelle für Umwelterziehung (1992): Evaluierung von Maßnahmen der Umwelterziehung, 1: Fortbildung an der evangelischen Akademie; Berlin (Umweltbundesamt).
- Weizsäcker, E. U. von (1994): Umweltkrise und Generationenvertrag. – In: Arbeitsgemeinschaft Umweltbildung (Hrsg.): Fürs Überleben handeln lernen. Dokumentation des Symposiums zur Umweltbildung vom 13.9. – 15.9.1993 in Mainz: 14-30; Münchweiler (Warda-Druck).

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 33-48, 10 Abb., 2 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden auf Bodenwasserhaushalt und Pflanzenproduktion in Trockengebieten

Sören Dammann, Tobias Meinel, Vladimir I. Beljaev & Manfred Frühauf\*

Dammann, S., Meinel, T., Beljaev, V. I. & Frühauf, M. (2011): Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden auf Bodenwasserhaushalt und Pflanzenproduktion in Trockengebieten. [Effects of different tillage methods on soil water regime and crop production in semi-arid environments.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 33-48, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Um die Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden auf den Bodenwasserhaushalt und die Entwicklung von Kulturpflanzen in Trockengebieten zu untersuchen, wurden in der südsibirischen Kulundasteppe (Region Altai) und im Mitteldeutschen Trockengebiet (südliches Sachsen-Anhalt) insgesamt fünf Versuchsflächen angelegt. Die Niederschlagsverhältnisse lagen dabei zwischen 340 und 405 mm im russischen sowie 480 und 560 mm im mitteldeutschen Untersuchungsgebiet.

Auf den russischen Versuchsflächen konnten deutliche Zusammenhänge zwischen Klima, Bodenwasservorrat und Ertrag festgestellt werden. So zeichnete sich an allen drei Untersuchungsstandorten ab, dass der Bodenwassergehalt umso höher ist, je weniger Bearbeitungsgänge durchgeführt werden. Außerdem wurde deutlich, dass insbesondere im Bereich der Trockensteppe die Aussaatmenge einen entscheidenden Einfluss auf Feldaufgang bzw. Ertrag hatte. Die Ergebnisse der mitteldeutschen Versuchsflächen zeigten, dass die Bearbeitungsintensität einen erkennbaren Einfluss auf den Bodenwasservorrat hatte. Auf dem Versuchsfeld „Leipzig“ zeigte sich, dass die Bearbeitungsmethode mit der geringsten Intensität die höchsten Feuchtigkeitswerte aufwies. Auch auf dem Versuchsfeld „Barnstädt“ konnte nachgewiesen werden, dass es unter Direktsaat zu einer deutlich schnelleren und länger anhaltenden Infiltration von Niederschlagswasser auch in tiefere Bodenschichten kam als unter Pflug. Das zusätzlich zur Verfügung stehende Wasser nutzten die Pflanzen effizienter und konnten letztendlich auch höhere Erträge erzielen.

**Abstract:** To study the impacts of different tillage methods on soil water regimes, and crop development, five test sites were established in the South Sibirian Kulunda steppe (Altai Krai) and the Central German dry region (southern Saxony-Anhalt). Local precipitation varies between 340-405 mm and 480-560 mm in the Russian and Central German study areas, respectively.

At the Russian test sites evidence emerged of significant correlations between climate, soil water content and yield. All test sites showed increases in soil water content with decreasing frequencies of tillage operations. Moreover, it became apparent that sowing rates had an important influence on plant emergence and yield especially in the dry steppe region.

The results of the Central German test sites showed a noticeable impact of tillage intensity on soil water content. At the test site “Leipzig”, for example, the highest soil moisture values were measured on the plots of lowest tillage intensity. Data for the test site “Barnstädt” showed that no-till management led to a noticeably faster and longer lasting infiltration of precipitation into the soil (including deeper soil layers) than under plough fillage. As a result, plants used this additional available water more efficiently, thereby producing higher yields.

**Schlüsselwörter:** Region Altai, Bodenbearbeitung, Bodenwasserhaushalt, Bodenfeuchte, Deutschland, Direkt-saat, Kastanozeme, Mulchsaat, Pflug, Russische Föderation, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schwarzerden, Trockengebiete, Steppe

---

\* Anschriften der Autoren:

Sören Dammann (soeren.dammann@geo.uni-halle.de), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, FG Geoökologie, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle (Saale);

Dr. Tobias Meinel (dr.tobias.meinel@amazone.de), BBG Bodenbearbeitungsgeräte GmbH & Co. KG, Rippachtalstraße 10, D-04249 Leipzig;

Prof. Dr. Vladimir I. Beljaev (belyaev@asau.ru), Staatliche Agraruniversität des Altaj, Pr. Krasnoarmejskij 98, 656099 g. Barnaul.

Prof. Dr. Manfred Frühauf (manfred.fruehauf@geo.uni-halle.de), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, FG Geoökologie, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle (Saale).

**Keywords:** Altai Krai, tillage, soil water regime, soil moisture, Germany, no-tillage, Kastanozems, mulch drilling, plough, Russian Federation, Saxony, Saxony-Anhalt, Chernozems, dry regions, steppe

## 1. Problematik und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund abnehmender fossiler Energieträger einerseits, steigender Weltbevölkerung und damit einhergehender steigender Nachfrage nach Nahrungsmitteln, gewinnt die Ressource Boden als wesentlichste Produktionsgrundlage der Landwirtschaft eine immer größere Bedeutung (FAO 1993, Gommers 1993). Andererseits nehmen weltweit die Schäden aufgrund von Bodendegradation durch unangepasste Landwirtschaft, gleichzeitig aber auch der Bodenverbrauch durch Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung zu (WBGU 1994). Zusätzlich ergeben sich durch die Erscheinungsformen und Folgen des Klimawandels neue Anforderungen an bestehende Nutzungskonzepte in der Landwirtschaft (Brinkman & Sombroek 1996, Mendelsohn & Dinar 2009). So besteht die Notwendigkeit, die vorhandenen Ressourcen effektiver zu nutzen und hierbei nach neuen Nutzungsstrategien, aber auch technologischen Lösungen zu suchen und gleichzeitig die klimatischen und pedologischen Voraussetzungen besser zu berücksichtigen (IFRI 2009).

Von besonderer Bedeutung im globalen Maßstab sind hierbei neben den nordamerikanischen Präriegebieten die eurasischen Steppengebiete, da sie aufgrund der bodenkundlichen Gunst und der hinreichenden klimatischen Verhältnisse für großflächige ackerbauliche Nutzung im Regenfeldaufbau sehr gut prädestiniert sind (Spaar & Schuhmann 2000). Allerdings sind diese traditionellen Weizenanbauggebiete gegenwärtig durch zum Teil sehr starke Bodendegradation infolge von Deflation, Verdichtungen und Humusabbau gekennzeichnet mit dem damit verbundenem Verlust günstiger Bodenwasser- und Nährstoffeigenschaften (Meinel 2002, Dammann 2005).

Bezüglich der Zusammenhänge Bodenbearbeitung/Klima/Bodenwasserhaushalt/Ertrag weisen einige landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebie-

te Deutschlands hinsichtlich der Folgen des Klimawandels ebenfalls Symptome von zunehmendem Trockenstress auf (LAU 2008, Franke et al. 2009). Hierzu gehören vor allem Gebiete im Mitteldeutschen Trockengebiet in Sachsen-Anhalt und Thüringen. Jüngste Untersuchungen zeigen hier deutlich abnehmende Jahres-, insbesondere aber Sommerniederschläge bei ohnehin geringen Niederschlägen von 450-500 mm (Fabig 2007, LAU 2008).

Die für die Ableitung neuer Nutzungsstrategien notwendigen wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Wirkungen von Landtechnikgeräten auf Boden und Bodenwasserhaushalt sowie deren Rückwirkung auf den Ertrag bilden daher das Grundanliegen eines am Lehrstuhl für Geoökologie der MLU seit 2008 durchgeführten Forschungsprojektes zur „Entwicklung von nachhaltigen Ackerbaukonzeptionen für Trockengebiete“, das gemeinsam mit der Agraruniversität Barnaul (Russland) und dem Landtechnikhersteller Amazonen-Werke (Hasbergen-Gaste, Deutschland) realisiert wird.

Dabei kommt der Entwicklung und dem Test von Ackerbaukonzeptionen mit verschiedenen Bodenbearbeitungsgeräten sowie der Analyse deren Auswirkungen auf Boden und Ertrag eine besondere Bedeutung zu.

In diesem Beitrag sollen aus den bisherigen Projektarbeiten Ergebnisse zu den Wechselwirkungen von Klima und Bodenbearbeitung auf den Bodenwasserhaushalt der verschiedenen Untersuchungsstandorte vorgestellt werden.

## 2. Untersuchungsgebiete

Zur Untersuchung der Problematik wurden zunächst zwei Untersuchungsgebiete ausgewählt: die südsibirische Kulundasteppe und das Mitteldeutsche Trockengebiet (Abb. 1).

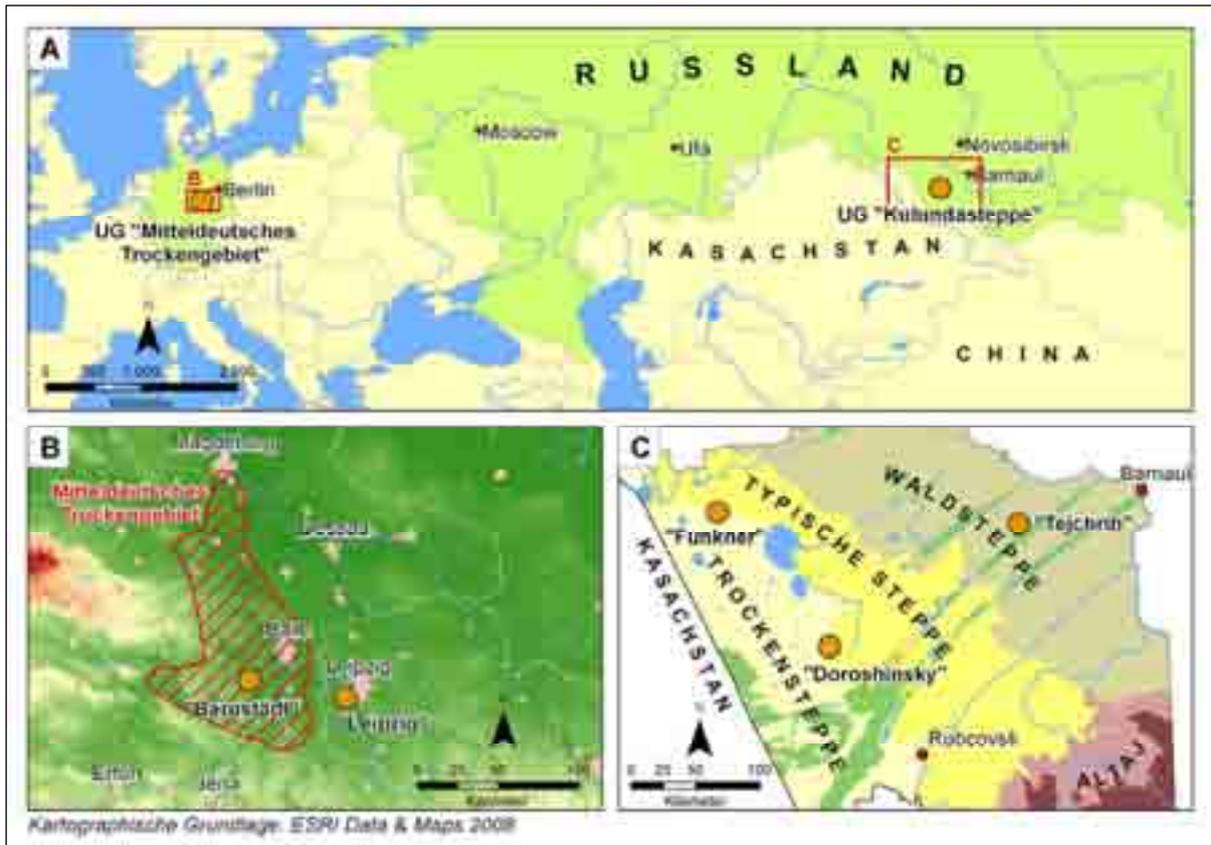


Abb. 1. A: Übersicht der Untersuchungsgebiete; B: Lage der Versuchsfelder im UG "Mitteldeutsches Trockengebiet"; C: Lage der Versuchsfelder im UG „Kulundasteppe“.

Die Kulundasteppe bildet den östlichen Ausläufer der eurasischen Steppengebiete. In diesem Untersuchungsgebiet wurden auf drei landwirtschaftlichen Betrieben Feldversuche durchgeführt. Dabei befindet sich ein Betrieb („Tejchrib“) naturräumlich in der Waldsteppenzeone im Rebrichinskij Rajon (Abb. 1), wo jährlich durchschnittlich 405 mm Niederschlag fallen. Auf dem Versuchsfeld ist ein Gewöhnlicher Tschernozem (toniger Schluff) mit einem durchschnittlichen Humusgehalt von 5,3 % im Ah-Horizont zu finden, der ca. 31 cm mächtig ist.

Ein weiterer Betrieb („Funkner“) befindet sich im Deutschnationalen Rajon in der nordwestlichen Kulundasteppe. Er liegt naturräumlich im Übergang der Trockensteppe zur Typischen Steppe. Hier fallen durchschnittlich 340 mm Niederschlag im Jahr. Hauptbodentypen sind hier Dunkle Kastanozeme (toniger Schluff) mit einem durchschnittlichen Humusgehalt von 3,5 % im Oberboden.

Der dritte Betrieb („Dorožinskij“) liegt im Rodinskij Rajon in der zentralen Kulundasteppe. Naturräumlich ist der Standort mit einem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 385

mm ebenfalls im Übergang der Trockensteppe zur Typischen Steppe einzuordnen. Hauptbodentypen sind ebenfalls Dunkle Kastanozeme (sandig-lehmiger Schluff) mit einem durchschnittlichen Humusgehalt von 3,6 %.

In Mitteldeutschland wurden zwei Versuchstandorte angelegt (vgl. Abb. 1). Die eine Versuchfläche befindet sich auf der Querfurter Platte ca. 20 km südwestlich von Halle in Sachsen-Anhalt und gehört zum Agrarunternehmen Barnstädt. Das Gebiet liegt im Kern des Mitteldeutschen Trockengebiets mit durchschnittlich 480 mm Niederschlag im Jahr. Auf dem Versuchsfeld ist eine Löss-Schwarzerde (toniger Schluff) mit einem durchschnittlichen Humusgehalt von 3,2 % entwickelt.

Die zweite Versuchfläche des Betriebes Kitzen befindet sich im Südwesten von Leipzig. Mit durchschnittlich 557 mm Niederschlag im Jahr liegt der Standort bereits außerhalb des Mitteldeutschen Trockengebiets. Trotzdem wurde er in das Monitoringprogramm aufgenommen, da auf dem Feld im Rahmen der Zusammenarbeit des Agrarbetriebs mit den Amazonen-Werken bereits seit 1999 Versuche zu Bodenbearbeitungsverfahren

ren durchgeführt werden und daraus Rückschlüsse auf die langjährige Wirkung dieser Methoden auf den Bodenwasserhaushalt gezogen werden können. Bodenkundlich ist der Standort durch eine Parabraunerde (schwach toniger Schluff) mit einem durchschnittlichen Humusgehalt von 2,5 % im Oberboden geprägt.

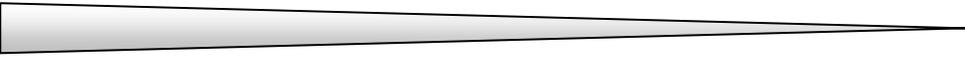
Alle Versuchsstandorte liegen auf ebenen oder sehr schwach geneigten Flächen, sodass laterale Stoff- und Wasserverlagerungsprozesse aufgrund der Geländemorphologie ausgeschlossen werden können. Zudem handelt es sich um grundwasserferne Standorte, sodass Bodenwasserbewegungen durch kapillaren Aufstieg ausgeschlossen sind.

### 3. Methodik

Hauptziel der Untersuchungen war es, verschiedene technologische Bodenbearbeitungsvarianten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Bodeneigen-

schaften, Bodenwasserhaushalt und Ertragslage miteinander zu vergleichen. Dabei wird immer mindestens eine Variante mit konventioneller Bodenbearbeitung durchgeführt, wie sie in den jeweiligen Regionen üblicherweise angewendet werden, und verschiedenen konservierenden Bearbeitungstechnologien gegenübergestellt.

So beschränkten sich die Versuche in Mitteldeutschland auf den Vergleich der verschiedenen Technologien in Abhängigkeit der Bearbeitungsintensität (vgl. Tab. 1). Dabei kam als intensivste Variante der Pflug mit einer Bearbeitungstiefe bis 23 cm zum Einsatz. Darüber hinaus wurden Varianten mit krumentiefer und mitteltiefer (in „Barnstädt“ flacher) Mulchsaat mit einer Grubber-Scheibeneggen-Kombination sowie flacher Mulchsaat mit einer Kurzscheibenegge angelegt. Nur auf dem Versuchsfeld „Barnstädt“ wurde zusätzlich auf einer fünften Variante auf Bodenbearbeitung vollständig verzichtet und Direktsaat als Anbauverfahren gewählt.

Variante	1	2	3	4	5
Bodenbearbeitungsverfahren	konventionell <i>krumentiefe Lockerung</i>	konservierend <i>krumentiefe Lockerung</i>	konservierend <i>flache / mitteltiefe Lockerung</i>	konservierend <i>flache Lockerung</i>	konservierend <i>ohne Bodenbearbeitung</i>
Versuchsfelder	Barnstädt				
	Leipzig				
Stoppelbearbeitung	Kurzscheibenegge (4 cm)				-
Grundbodenbearbeitung	Pflug (23 cm)	Grubber-Scheibeneggen-Kombination (BAR: 18 cm LEI: 20 cm)	Grubber-Scheibeneggen-Kombination (BAR: 10 cm LEI: 15 cm)	Kurzscheibenegge (10 cm)	-
Bearbeitungsintensität					
Aussaart	mit passiver Saatbettbereitung				Direktsaat ohne Saatbettbereitung

Tab. 1: Versuchsaufbau in Mitteldeutschland.

Dagegen wurden auf den russischen Versuchsfeldern auch die Unterschiede zwischen konventionellen russischen und konservierenden Technologien in Abhängigkeit verschiedener Aussaatstärken untersucht (vgl. Tab. 2). Als konventionelle Variante erfolgte die Aussaat in den beiden

Trockensteppe-Betrieben mit einer russischen Sämaschine mit Gänsefußscharen (SZS) ohne jegliche vorhergehende Bodenbearbeitung. Diese Variante wurde mit einer konservierenden Variante ohne und mit einer Variante mit Saatbettbereitung verglichen. Bei beiden Varianten variiert

ten die Aussaatmengen von 90-130 kg/ha (Betrieb „Funkner“) bzw. 100-150 kg/ha (Betrieb „Dorožinskij“). Die Aussaat erfolgte dabei mit einer Amazone-Sämaschine mit Meißelscharen. Bei dem Waldsteppe-Betrieb wurden 4 Ackerbaukonzepte getestet, die in zwei Aussaatstärken variierten. Die konventionelle Anbaumethode bestand dabei aus einer Grundbodenbearbeitung und einer Saatbettbereitung. Die Aussaat erfolgte dabei mit einer russischen Scheibendrilla (SZP). Die konservierenden Methoden unterschieden sich in der Anzahl der vorhergehenden Bearbeitungsgänge. Hier kam ebenfalls eine Amazone-Direktsaatmaschine mit Meißelscharen zum Einsatz.

Zur Überprüfung des Einflusses der Bodenbearbeitungstechnik auf den Bodenwasserhaushalt erfolgte auf den Versuchsflächen eine regelmäßige Analyse des Bodenwassergehalts (14-Tage-Intervall) in fünf verschiedenen Tiefen mit Hilfe von mobilen FDR-Sonden. Dabei fanden die

Messungen in Deutschland an 8 (Barnstädt) bzw. 4 Messpunkten (Leipzig) je Variante statt, während auf den russischen Versuchsflächen aus logistischen Gründen nur eine Einfachmessung je Variante in 10 Tiefen vorgenommen werden konnte. Zusätzlich wurden auf dem Versuchsfeld „Barnstädt“ unter der Pflug- und Direktsaatvariante stationäre FDR-Sonden in drei Tiefen installiert, die die Bodenfeuchte in einem 6-h-Intervall kontinuierlich aufzeichneten.

Ferner galt es über Laboranalyse die pedologischen Kennwerte der einzelnen Horizonte wie Humusgehalt, Korngrößenverteilung und Carbonatgehalt zu ermitteln sowie die Aufnahme der pflanzenbaulichen Parameter Feldaufgang, Wuchshöhe und Ertragszahlen durchzuführen. Zur Ermittlung der klimatischen Parameter auf den deutschen Versuchsfeldern wurden in unmittelbarer Nähe Klimastationen installiert.

Variante		1	2	3	4	5	6	7	8
Grundbodenbearbeitung	TS	-	-	-	-	-	-	-	
	WS	-	-	-	-	Grubber	Grubber	Grubber	Grubber
Saatbettbereitung	TS	-	Catros (KSE)	Catros (KSE)	Catros (KSE)	-	-	-	
	WS	-	-	Catros (KSE)	Catros (KSE)	Catros (KSE)	Catros (KSE)	Kultivator	Grubber
Aussaat	TS	SZS (RUS)	Condor (DE)	Condor (DE)					
	WS	DMC (DE)	DMC (DE)	DMC (DE)	DMC (DE)	DMC (DE)	DMC (DE)	SZP (RUS)	SZP (RUS)
Aussaatmenge (kg/ha)	TS	130/150	130/150	110/125	90/100	130/150	110/125	90/100	
	WS	200	175	175	200	200	175	200	175

TS: Trockensteppe; WS: Waldsteppe; KSE: Kurzscheibenegge; RUS: russ. Modell; DE: Amazone-Modell

Tab. 2: Versuchsaufbau Kulundasteppe.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Südsibirische Steppengebiete

Auf den russischen Versuchsflächen konnten deutliche Zusammenhänge zwischen Klima, Bodenwasservorrat und Ertrag festgestellt werden. Betrachtet über den gesamten Vegetationszeitraum zeichnete sich ab, dass der Bodenwassergehalt umso höher ist, je weniger Bearbeitungsgänge durchgeführt werden. Besonders deutlich wird dies auf dem Versuchsfeld

„Funkner“ (vgl. Abb. 2). Die Varianten ohne Bodenbearbeitung (Var. 5-7) konnten hier im für die Pflanzenentwicklung wichtigem Zeitraum der Ährenausbildung den Bodenwasservorrat bis zu 8 Tage länger speichern. Teilweise wurde sogar mehr Bodenwasser gespeichert als durch Transpiration der Pflanzen bzw. Evaporation verloren ging, sodass der Bodenwasservorrat hier erhöht werden konnte.

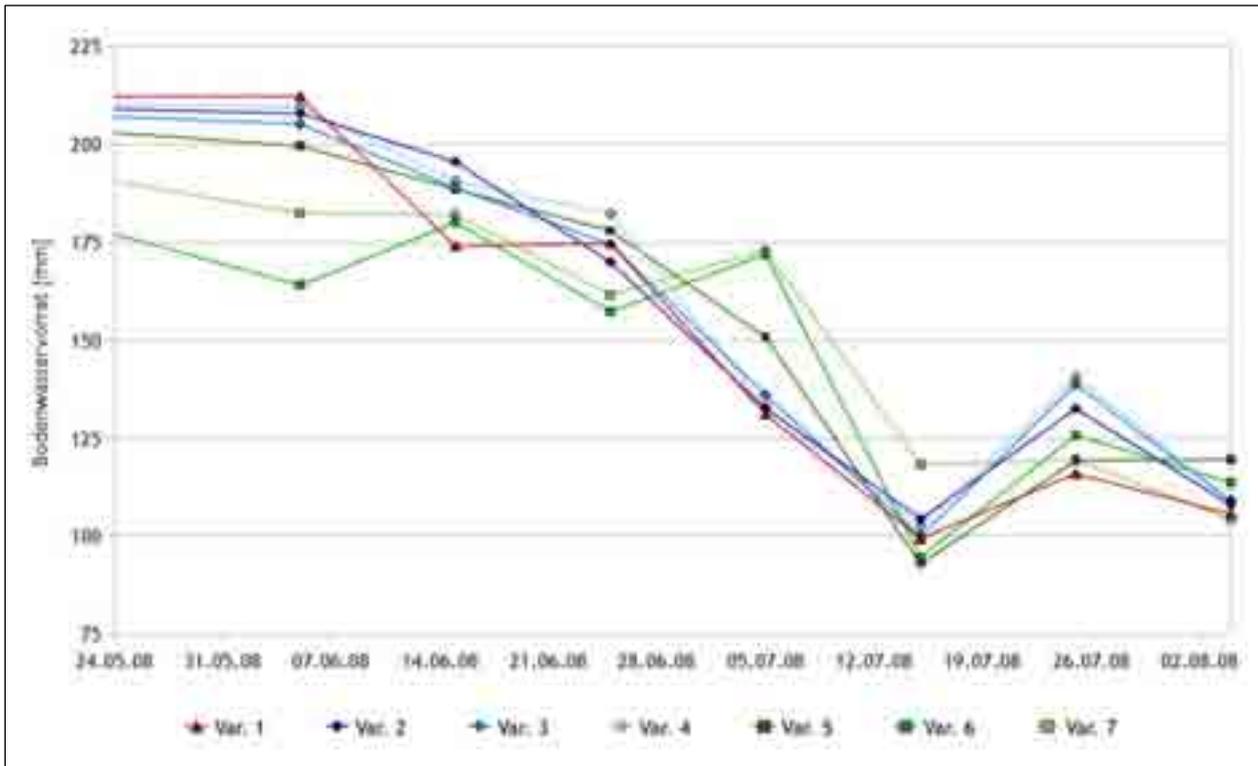


Abb. 2: Versuchsfeld „Funkner“ – Bodenfeuchtedynamik während der Vegetationsperiode.

Bei diesem Betrieb konnten auf den untersuchten Direktsaatvarianten mit durchschnittlich 14,2 dt/ha auch ein höherer Ertrag erwirtschaftet werden als auf den restlichen Varianten (vgl. Abb. 3). Dem gegenüber erzielte die konventionelle Technik, mit Ausnahme der Variante 4, den geringsten Ertrag (13,2 dt/ha). Obwohl bei dieser Variante mit 269 Pflanzen/m<sup>2</sup> die meisten pro-

duktiven Pflanzen wuchsen, konnten diese aufgrund des geringsten Einzelkorngewichts (0,66 g) und der geringsten Körnermenge je Ähre (18,1 St.) keine höheren Erträge erzielen. Demgegenüber zeigten sich bei den Direktsaatvarianten mit durchschnittlich 177 produktiven Pflanzen je Quadratmeter, 0,92 g Einzelkorngewicht und 24,5 Körnern je Ähre deutlich höhere Erträge.

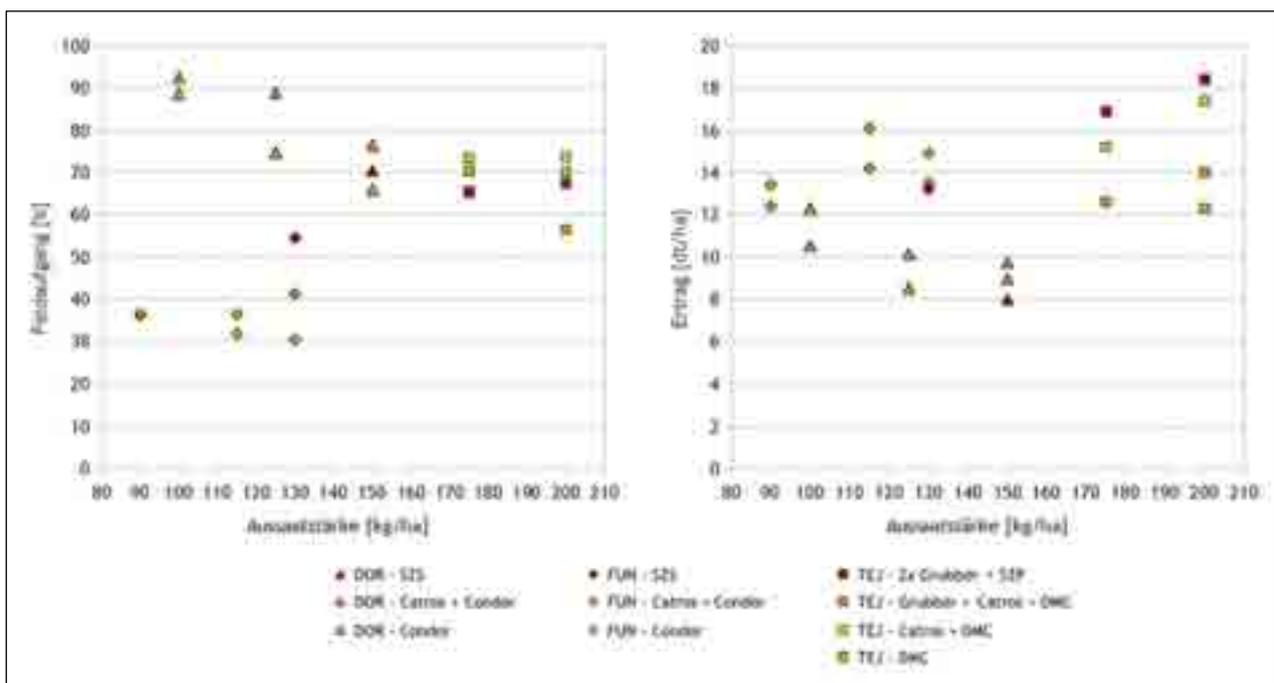


Abb. 3: Russland – Feldaufgang und Erträge in Abhängigkeit der Aussaatstärke.

Am Farmbetrieb „Dorožinskij“ zeigte sich, dass unter den vorherrschenden sehr variablen Niederschlagsbedingungen insbesondere die Aussaatstärke eine wichtige Rolle hinsichtlich der Ertragseffizienz spielt (vgl. Abb. 3). So weist die betriebsübliche Anbaumethode mit 70,4 % gegenüber einem durchschnittlichen Feldaufgang von 86 % bei den Varianten 2-4 (mit Saatbettbereitung) und 76,5 % bei den Varianten 5-7 (Direktsaat) den schlechtesten Feldaufgang auf. Dabei wird deutlich, dass mit abnehmender Aussaatstärke bessere Feldaufgänge erzielt werden. Die Rolle der Aussaatstärke spiegelt sich aber ebenfalls in den Ertragszahlen wider (vgl. Abb. 3). So erzielten die Varianten 4 und 7 mit einer Aussaatmenge von 100 kg/ha die höchsten Erträge. Im Vergleich zur betriebsüblichen Anbaumethode (8 dt/ha) erbrachten sowohl die Varianten mit Saatbettbereitung mit durchschnittlich 10,1 dt/ha als auch die Varianten ohne Saatbettbereitung mit durchschnittlich 9,9 dt/ha deutlich bessere Erträge.

Am Farmbetrieb „Tejchrib“ wird hingegen ein anderes Bild deutlich: Der positive Einfluss geringer Aussaatmengen auf Feldaufgang und Ertrag ist hier nicht erkennbar. Der Feldaufgang wird hierbei insbesondere durch die Bearbeitungsmethode beeinflusst. Mit den Varianten ohne Grundbodenbearbeitung konnten dabei mit durchschnittlich 70,1 % (Varianten 1-2) bzw. 73,5 % (Varianten 3-4) die besseren Feldaufgänge erzielt werden. Demgegenüber haben die

Varianten 5-6 mit durchschnittlich 60,7 % sowie die Varianten 7-8 mit durchschnittlich 66,5 % deutlich schlechtere Feldaufgänge zu verzeichnen (vgl. Abb. 3). Bei den Erträgen konnten mit Ausnahme der Variante 1 bei einer Aussaatmenge von 200 kg/ha deutlich höhere Ergebnisse erzielt werden (vgl. Abb. 3). Trotz der schlechteren Feldaufgänge brachten somit die beiden betriebsüblichen Varianten 7 und 8 mit durchschnittlich 17,7 dt/ha die besten Erträge. Ungeachtet überdurchschnittlicher Bodenwassergehalte konnten die Pflanzen der Varianten 1-2 aber an diesen Standorten das „Plus“ an Wasser nicht für die Ausbildung hoher Erträge nutzen, obwohl mehr als 43 % dieses Wassers pflanzenverfügbar war.

Die Ergebnisse zur Bodenfeuchtedynamik verdeutlichen, dass der Boden auf den Varianten ohne Grundbodenbearbeitung (1-4) in den oberen 20 cm zum Zeitpunkt der Aussaat um knapp 10 mm mehr Bodenwasser verfügte als auf den Varianten 5-8 (vgl. Abb. 4). So stand letztendlich den Pflanzen der beiden Varianten ohne jegliche Bodenbearbeitung (Varianten 1 2) mit durchschnittlich 217 mm während der gesamten Vegetationsperiode der höchste Bodenwasservorrat zur Verfügung. Die Pflanzen der Varianten 5-6 mit Grubber und Scheibenegge als Grundbodenbearbeitung bzw. Saatbettbereitung konnten demgegenüber nur durchschnittlich 198 mm Wasser für ihre Entwicklung nutzen. Ihnen standen somit je Quadratmeter 19 l weniger Wasser zur Verfügung!

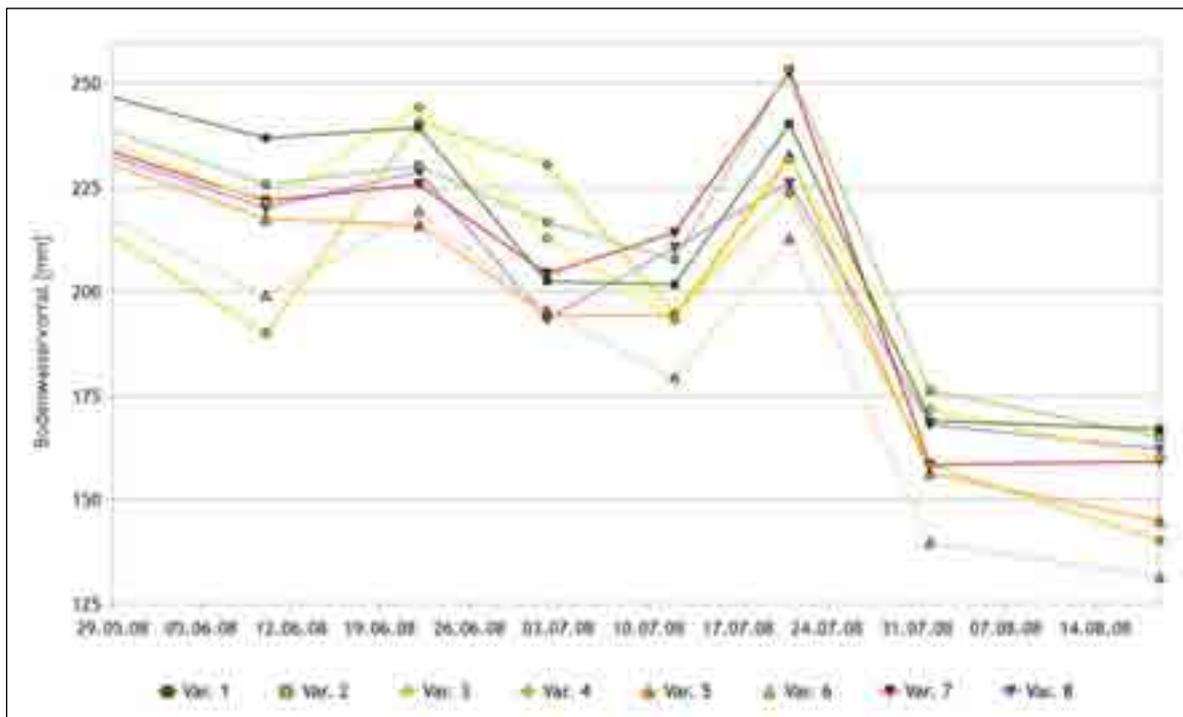


Abb. 4: Versuchsfeld „Tejchrib“ – Bodenfeuchtedynamik während der Vegetationsperiode.

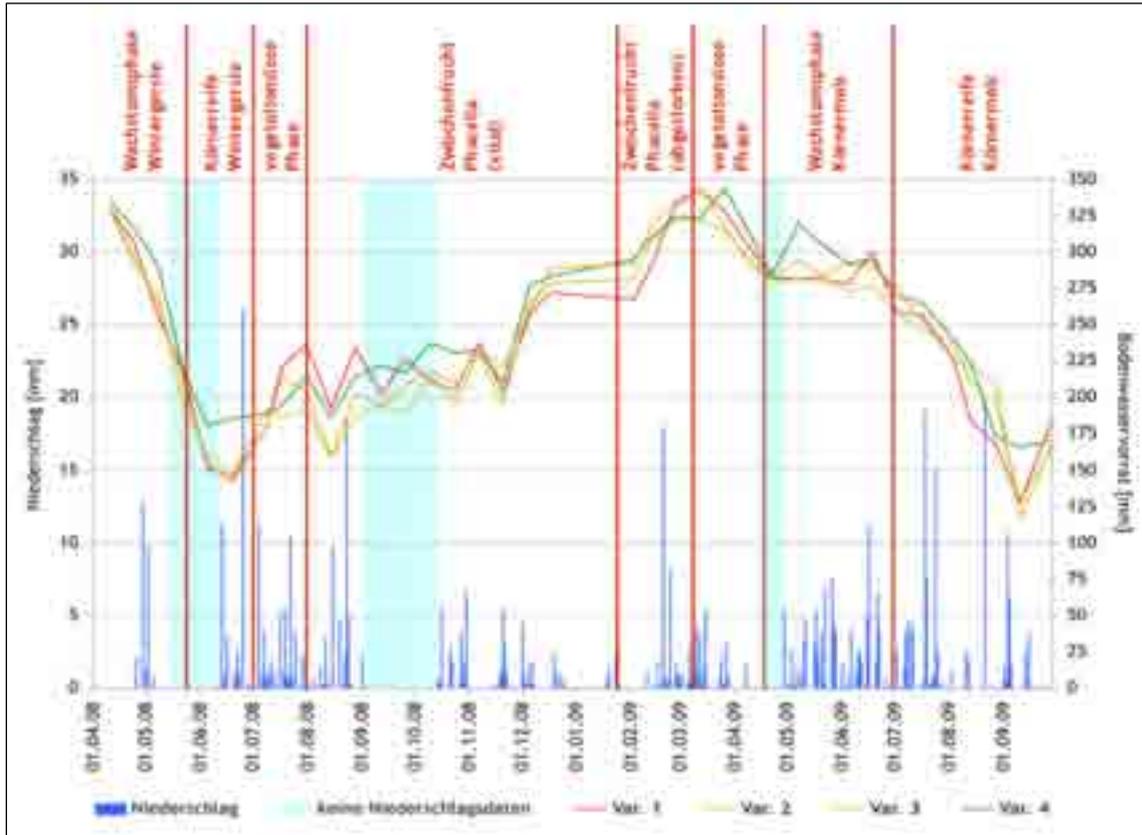


Abb. 5: Versuchsfeld „Leipzig“ – Bodenfeuchtedynamik während des Messzeitraums.

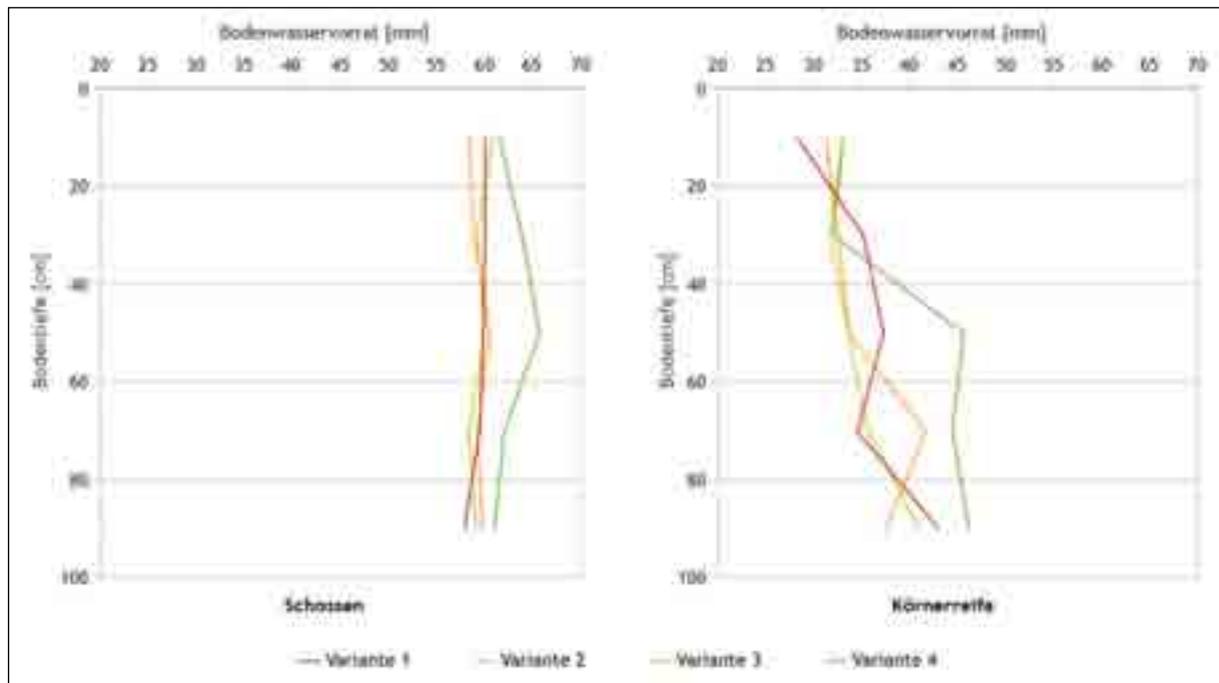


Abb. 6: Versuchsfeld „Leipzig“ – Bodenwassertiefenverteilung während Schossen und Körnerreife der Wintergerste.

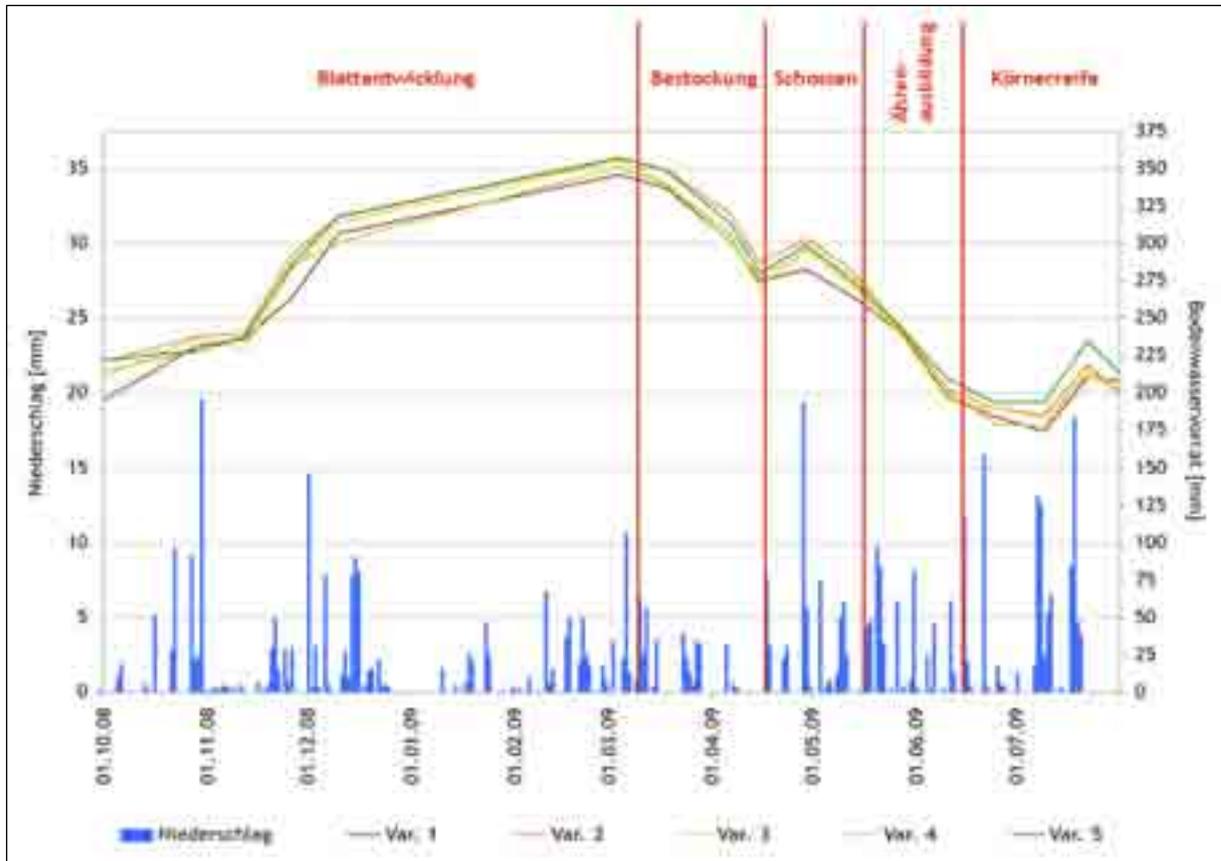


Abb. 7: Versuchsfeld „Barnstädt“ – Bodenfeuchtedynamik während der Vegetationsperiode.

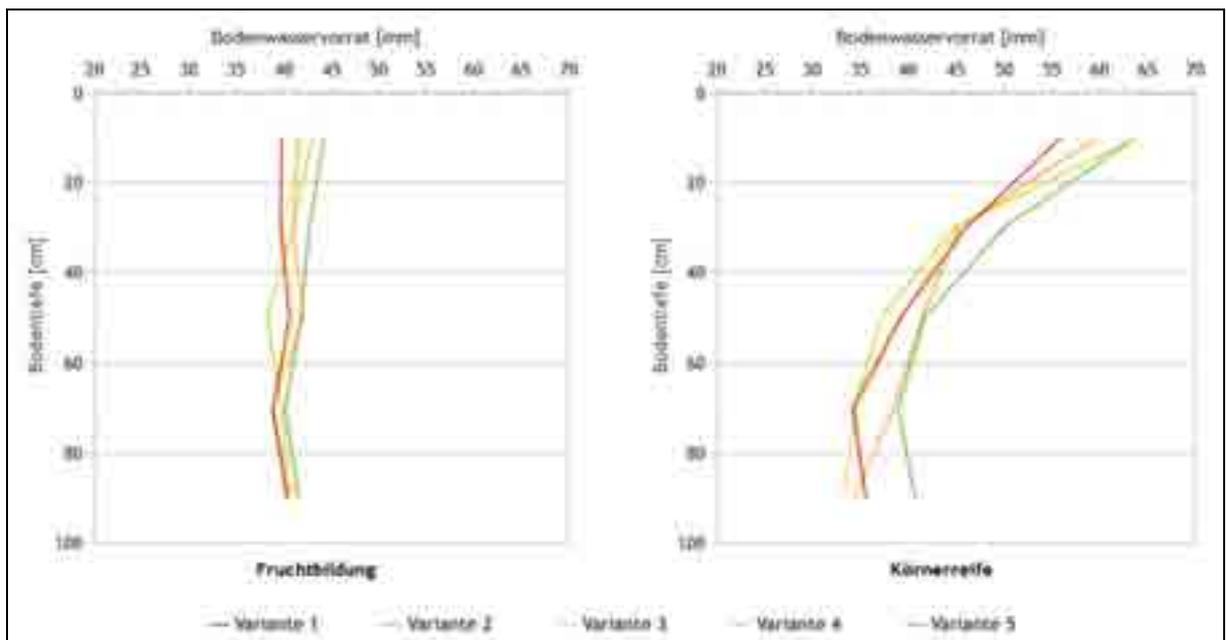


Abb. 8: Versuchsfeld „Barnstädt“ – Bodenwassertiefenverteilung während Fruchtbildung und Körnerreife des Winterweizens.

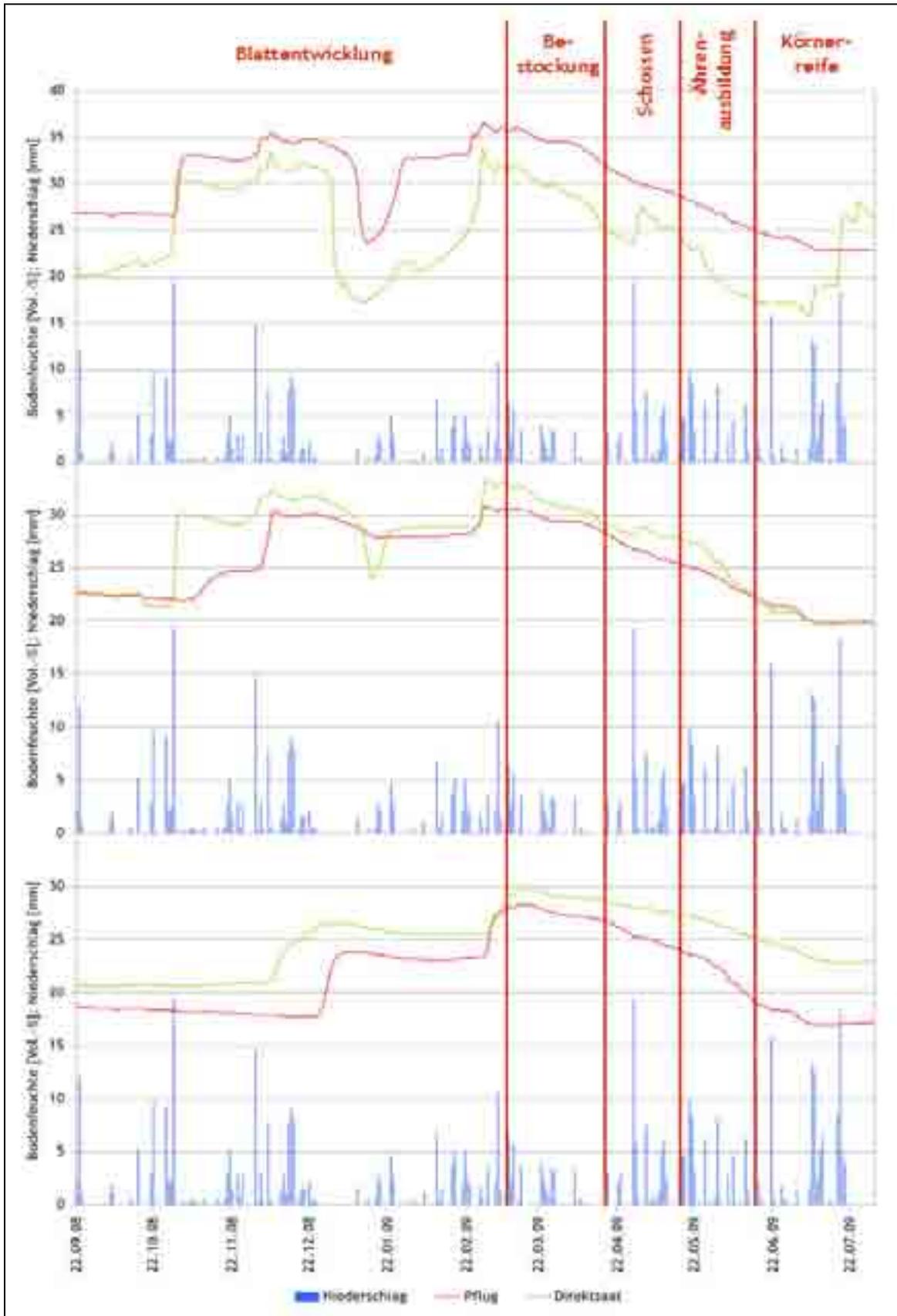


Abb. 9: Versuchsfeld „Barnstädt“ – Bodenfeuchtedynamik in 20 cm (Direktsaat) bzw. 35 cm (Pflug; oben), 50 cm (Mitte) und 90 cm Tiefe (unten).

## 4.2 Mitteldeutsches Trockengebiet

Aufgrund der langjährigen Bearbeitungsversuche am Standort Leipzig werden anhand der vorliegenden und ermittelten Werte noch deutlichere Zusammenhänge zwischen Bodenbearbeitung und Bodenwassergehalt erkennbar. Betrachtet man den gesamten Messzeitraum, zeigt sich, dass Variante 4 (Kurzscheibenege) eine wesentlich günstigere Wirkung auf den Bodenwassergehalt hat als die übrigen Varianten (vgl. Abb. 5). Dies lässt sich auch während der einzelnen Wachstumsphasen der Wintergerste erkennen (vgl. Abb. 6). Insbesondere während der Körnerreife steht den Pflanzen auf der Variante 4 in den tieferen Bodenschichten (und somit der Hauptwurzelmasse) somit deutlich mehr Wasser zur Verfügung als in den restlichen Varianten.

Auch am Standort „Barnstädt“ kann man, obwohl das Versuchsfeld erst 2008 angelegt wurde, bereits erste Zusammenhänge zwischen Bearbeitungsform und Bodenwasserhaushalt erkennen. Betrachtet man die Messergebnisse der mobilen FDR-Sonden aller Varianten (vgl. Abb. 7 & Abb. 8), zeigt sich, dass die Direktsaat während der Fruchtbildung und insbesondere während der Körnerreife einen deutlich positiven Einfluss auf die Bodenfeuchte innerhalb der oberen 100 cm hat als bei den restlichen Varianten.

Aus Abbildung 9 wird zudem erkennbar, dass im November nach einem größeren Niederschlagsereignis in die oberen 20 bzw. 35 cm, sowohl bei der Direktsaat als auch bei der Pflug-Variante, Wasser in den Oberboden infiltriert. Anfang Mai bzw. Mitte Juli wird demgegenüber deutlich, dass das Niederschlagswasser in 35 cm Tiefe der Pflug-Variante jedoch nicht mehr ankommt. Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen Pflug- und Direktsaat-Variante ist in diesem Zusammenhang auch der offensichtlich größere Bodenwasservorrat in 90 cm Tiefe auf der Direktsaatvariante insbesondere in den späten phänologischen Entwicklungsphasen.

Dies spiegelt sich letztendlich auch in den pflanzenbaulichen Parametern wider (vgl. Abb. 10): Die Direktsaatvariante weist so einen deutlich schlechteren Feldaufgang (78 %) auf als die restlichen Varianten (durchschnittlich 87,2 %). Damit ist im Endeffekt auch eine geringere Bestandsdichte verbunden (444 Halme/m<sup>2</sup> stehen durchschnittlich 512 Halme/m<sup>2</sup> gegenüber). Dieser scheinbare Nachteil wird aller-

dings während der Ausbildung der Körner mehr als ausgeglichen, sodass schließlich mit 82,6 dt/ha der höchste Ertrag erzielt werden konnte. Die Pflug-Variante schnitt mit 73,6 dt/ha deutlich schlechter ab.

## 5. Diskussion

### 5.1 Südsibirische Steppengebiete

Aus den Befunden auf den russischen Untersuchungsstandorten wird offensichtlich, dass die Bearbeitungsmethode bzw. die Anzahl der Bearbeitungsgänge einen Zusammenhang zu dem gespeicherten Bodenwasser erkennen lässt. Dies gilt sowohl für die Trockensteppe als auch für die niederschlagsreichere Waldsteppe.

So stand den Pflanzen am Farmbetrieb „Funkner“ auf den Flächen ohne vorhergehende Bodenbearbeitung während einer Phase des höchsten Wasserbedarfs (zwischen Schossen und Blüte) längere Zeit mehr Wasser zur Verfügung. Diese Aussagen bestätigen Erfahrungen von Köller & Linke (2001), die zeigen, dass Direktsaatbestände etwa 10-14 Tage später den permanenten Welkepunkt erreichen als gepflügte Flächen. Durch die längere Verfügbarkeit von Bodenwasser konnten bei diesem Betrieb auf den Direktsaatvarianten letztlich auch höhere Erträge erwirtschaftet werden als auf den anderen Varianten. Hauptgrund hierfür ist, dass hier während der Ausbildung der Ähren mehr Wasser verfügbar war, um größere und mehr Körner je Pflanze zu entwickeln. Bei den Varianten mit konventioneller Technik, aber auch bei denjenigen mit vorhergehender Bodenbearbeitung, stand anfänglich allerdings mehr Wasser zur Verfügung. Zusätzlich erwärmt sich der Boden aufgrund der geringeren Bodenbedeckung durch Ernterückstände schneller, sodass es durch die Bodenbearbeitung zu einer stärkeren Mineralisierung mit der Folge, dass mehr Stickstoff im Boden gebildet wurde, kam. Alle diese Ursachen führten letztendlich bei den Weizenpflanzen zu einer stärkeren Bestockung und folglich zu einem schnelleren Verbrauch des Bodenwasservorrats. Durch den späteren Wassermangel kam es dann jedoch zu einer gravierenden Beeinträchtigung bei der Ähren- und Kornausbildung. Diese Erkenntnisse stimmen ebenfalls mit Beobachtungen von Bischoff (2009) überein, der feststellte, dass bei ausgeglichener Wasserver-

sorgung der Weizen weniger Stroh und dafür mehr Korn produziert.

Ein weiterer deutlicher Zusammenhang zwischen den klimatischen Besonderheiten dieses Naturraums, der Bewirtschaftungsform und dem Bodenwasserhaushalt konnte an dem zweiten Betrieb in der Trockensteppe („Dorožinskij“) beobachtet werden. Dieser Naturraum ist insbesondere durch eine große Variabilität der Niederschläge gekennzeichnet. Dies zeigte sich während der Vegetationsperiode Mai-August 2008, als am Untersuchungsstandort nur 74 mm Niederschlag fielen. Im Mai wurde hierbei gar kein Niederschlag gemessen. Durchschnittlich fallen in diesem Zeitraum 157 mm, also mehr als doppelt so viel. So war das Jahr 2008 in diesem Zeitraum ein außerordentlich trockenes Jahr, sodass speziell der Speicherung der im Winter fallenden Niederschläge im Boden eine wichtige Rolle zukommt.

Unter diesen Bedingungen zeigte sich zudem, dass auch die Aussaatstärke selbst für die Ertragsgestaltung von großer Bedeutung ist. Je geringer die Aussaatstärke ist, desto weniger Pflanzen müssen sich das ohnehin wenige Bodenwasser für das Wachstum teilen. Die Wasserkonkurrenz hat hier somit einen entscheidenden Einfluss auf die spätere Entwicklung der Pflanzen. Dies zeigt sich sowohl an besseren Feldaufgängen als auch an höheren Erträgen bei geringeren Aussaatmengen. Die kleinere Anzahl an ährentragenden Halmen führt daher zu weniger Stroh bzw. Biomasse und einer somit verbundenen geringeren unproduktiven Verdunstung, sodass letztendlich größere Tausendkorngewichte und mehr Körner je Ähre gebildet werden können.

Auffällig sind ebenfalls die geringen Feldaufgänge bei der Variante 1 (konventionelle Technologie). Bei der häufig eingesetzten russischen Direktsämaschine SZS kommen Gänsefußschare zum Einsatz, die den Boden großflächig schneiden, sodass hier im Prinzip eine Bodenbearbeitung in Kombination mit dem Drillvorgang stattfindet und man von einer Direktsaat im engeren Sinne nicht mehr sprechen kann. Dabei wird der feuchtere Boden nach oben geholt und ist somit einer schnelleren Verdunstung initiiert, in deren Folge dem Saatkorn zur Keimung weniger Wasser zur Verfügung steht und daher auch weniger Pflanzen auflaufen. Zusätzlich sind die Schare bei diesem Verfahren starr gelagert, sodass leichte Bodenebenenheiten nicht ausgeglichen werden können und es zu einer heterogenen Tiefenablage der

Saatkörner kommt, was sich letzten Endes ebenfalls in weniger auflaufenden Pflanzen widerspiegelt. Dies konnten die Pflanzen aufgrund der schlechten Niederschlagsverhältnisse nicht mehr ausgleichen, sodass auf dieser Variante letztendlich auch nur der geringste Ertrag erzielt werden konnte.

Wie die Ergebnisse auf dem Waldsteppenstandort „Tejchrib“ des Weiteren zeigen, tritt bei höheren Niederschlägen die Wasserkonkurrenz als limitierender Faktor der Pflanzenentwicklung zurück. Die Aussaatstärke hat dann kaum noch Einfluss auf den späteren Ertrag. Entscheidend ist hier die Anzahl der Bearbeitungsgänge vor der Aussaat. Wird auf den Grundbodenbearbeitungsgang verzichtet, werden höhere Feldaufgänge erzielt. Dies zeigt, dass dieser zusätzliche Bearbeitungsgang vor der Aussaat zu einer höheren Verdunstung im Oberboden führt, sodass dem Saatgut bei der Aussaat weniger Wasser für die Keimung zur Verfügung steht. So stand letztendlich den Pflanzen auf den Varianten ohne jegliche Bodenbearbeitung während der Vegetationsperiode das meiste Wasser zur Verfügung, während mit jedem zusätzlichen Bearbeitungsgang weniger Wasser im Boden verblieb.

Es wird damit auf dem Versuchsfeld „Tejchrib“ ein Zusammenhang zwischen den Erträgen und den Aussaatmengen deutlich, der allerdings aufgrund der geringen Datenmenge nicht statistisch quantifiziert werden konnte: hohe Aussaatstärken erzielten auch höhere Erträge. Dies lässt auch den Schluss zu, dass mit zunehmenden Niederschlägen der Einfluss der Aussaatmenge auf die Erträge abnimmt. Trotz höherer Wasserkonkurrenz durch die größere Anzahl an Pflanzen scheint der Bodenwasservorrat dadurch hinreichend groß gewesen zu sein, um bessere Erträge erzielen zu können.

Zum Standort „Tejchrib“ ist allerdings zu bemerken, dass hier eine mangelhafte Unkrautbekämpfung durchgeführt wurde. Da besonders bei Direktsaat der Unkrautdruck aufgrund der fehlenden Bodenbearbeitung hoch ist, wirkt sich dies hier deutlich aus. Das Überangebot an Bodenwasser auf den Direktsaat-Varianten im Vergleich zu den anderen Varianten wird durch den hohen Unkrautbesatz und der damit verbundenen höheren Wasser- und Nährstoffkonkurrenz überlagert, sodass dadurch keine höheren Erträge erzielt werden konnten. Letztendlich wirkt sich hier in diesem Sachzusammenhang auch die Aussaatstärke gravierender aus: Mit höheren Aussaatmengen kann hier schneller ein

Bestandsschluss erreicht werden. Somit sind Unkräuter einer stärkeren Konkurrenz gegen die Weizenpflanzen ausgesetzt, woraus letztlich ein geringerer Unkrautbesatz und somit höhere Erträge ermöglicht werden.

## 5.2 Mitteldeutsches Trockengebiet

Auf dem langjährigen Bearbeitungsversuch in Leipzig wird erkennbar, dass auch die Intensität der Bodenbearbeitung einen Einfluss auf die Speicherung des Bodenwassers hat. Die geringe Arbeitstiefe aber auch die weniger starke Durchmischung der Kurzscheibenegge im Vergleich zur Grubber-Scheibeneggen-Kombination bewirken einen höheren Besatz an Bodenorganismen wie z.B. Regenwürmer auf der Variante 4.

Eine wichtige Voraussetzung für eine schnelle und effiziente Infiltration von Niederschlagswasser in tiefere Bodenschichten stellt die Kontinuität von Grobporen dar. Durch die sehr tiefe und dauerhaft wendende Bodenbearbeitung des Pfluges sind die Poren hier im Oberboden jedoch durch eine geringe Kontinuitäten gekennzeichnet (Wilkins 1994). Demgegenüber findet man auf konservierend bearbeiteten Flächen eine höhere Anzahl und höhere Kontinuität der Bioporen (Regenwurmgänge und Wurzelröhren) vor (Beisecker 1994, Peigné et al. 2009). Je mehr Bioporen vorhanden sind, desto zügiger infiltrieren Starkniederschläge und desto geringer sind unproduktive Wasserverluste durch Oberflächenverdunstung (Bischoff & Hofmann 2009). Im Ergebnis dessen steht den Pflanzen in den phänologisch wichtigen Phasen der Ährenbildung und Körnerreife mehr Wasser im Unterboden zur Verfügung als auf der Pflug-Variante.

Insbesondere unter Direktsaat führt somit die hohe Anzahl und Kontinuität der Bioporen zu einer deutlich schnelleren Infiltration, was sich sehr gut auf dem Versuchsfeld „Barnstädt“ beobachten lässt. Da das Feld bereits vor Anlage der Versuchsvarianten mehr als 5 Jahre pfluglos bewirtschaftet wurde, sind auch an diesem Standort trotz der erst einjährigen Versuchsdauer schon erste positive Effekte auf Bodenstruktur und -gefüge bemerkbar.

Somit wird deutlich, dass die Direktsaat-Variante eine wesentlich bessere Infiltrationseigenschaft besitzt als die Pflug-Variante. Während im Herbst der Einfluss der Verdunstung vernachlässigbar ist und sowohl bei Pflug als auch bei Direktsaat Niederschlagswasser infiltrierte, wird dieser Unterschied mit zunehmenden

Temperaturen deutlich größer. So kann das Niederschlagswasser aufgrund der geringeren Kontinuität der Grobporen weitaus schlechter in tiefere Bodenschichten transportiert werden, sodass es hier unproduktiv verdunstet bzw. oberirdisch abfließt, bevor es in größere Tiefen gelangen kann. Dagegen kann auf der Direktsaatvariante aufgrund der durchgängigen Grobporen das Niederschlagswasser schnell auch in den Untergrund infiltrieren. Als Folge wird bei der Direktsaat somit mehr Bodenwasser auch in tieferen Schichten gespeichert.

Mangelnde Infiltrabilität kann allerdings auch Folge von Verschlammung sein (Ehlers 1996). So beobachtete Groß (1994) unter Direktsaat eine höhere Aggregatstabilität als unter Pflug. Dies ist zum Einen auf einen höheren Bodenorganismenbesatz bei abnehmender Bearbeitungsintensität zurückzuführen (Köller & Linke 2001), deren Ausscheidungen für eine Verkittung kleiner Bodenaggregate und einer damit verbundenen erhöhten Aggregatstabilität sorgen. Verantwortlich hierfür ist im Wesentlichen die verstärkte Bildung von organomineralischen Verbindungen, bei denen organische und mineralische Teilchen sehr stark miteinander verknüpft sind und somit zur Gefügestabilisierung, Bindung von organischer Substanz und einer damit verbundenen besseren Wasserspeicherfähigkeit beitragen. Zum Anderen kommt es auf konservierend bearbeiteten Böden in der Oberkrume zu einer stärkeren Humusakkumulation (Ermich & Hofmann 1991, Beisecker 1994, Dou & Hons 2006), während durch die dauerhaft wendende Bearbeitung des Pflugs der Humus über den gesamten Pflug-Horizont gleichmäßig verteilt ist. Diese Beobachtung konnte auch auf dem Versuchsfeld „Leipzig“ gemacht werden (Voßhenrich 2007): Unter Pflug ist bis in 30 cm Tiefe ein  $C_{org}$ -Gehalt von 1,18-1,2 % gemessen worden, während unter der Kurzscheibeneggen-Variante in den oberen 10 cm ein  $C_{org}$ -Gehalt von 1,45 % gemessen wurde, der kontinuierlich bis 30 cm auf 1,04 % abnimmt. Der höhere Humusgehalt unter Minimalbodenbearbeitung wirkt aber ebenfalls Gefüge stabilisierend, sodass einer Verschlammung besser entgegen gewirkt werden kann (Ermich & Hofmann 1991). So beschreibt Grube (2002), dass nach einem einmaligen starken simulierten Niederschlagsereignis bei der Pflug-Variante eine ähnliche Versickerungsleistung wie bei der Direktsaat gegeben ist, jedoch bei einem zweiten und dritten Ereignis gleicher Stärke eine schlechtere Infiltration

auftritt. Infolge der Instabilität der oberflächennahen Aggregate und einer nicht vorhandenen Bodenbedeckung kommt es hier zu einer Verschlammung der Ackeroberfläche.

Der gleiche Effekt konnte ursächlich auch bei der Analyse der Bodenfeuchtedynamik auf dem Versuchsfeld „Barnstädt“ erkannt werden: Der Boden an der Geländeoberfläche weist mit 34,7-35,2 % Grobschluffanteil und der Bodenart „schwach bis mittel toniger Schluff“ (Ut2-Ut3) eine mittlere bis starke Verschlammungsneigung auf (nach Ad-Hoc-AG Boden 2005). Während nach dem ersten größeren Niederschlagsereignis (30.10.2008) nach der Grundbodenbearbeitung sowohl bei Pflug als auch bei Direktsaat eine Infiltration des Niederschlagswassers registriert werden konnte, ist bereits bei dem nächsten Ereignis in nahezu gleicher Höhe (28.04.2009) unter Pflug eine Infiltration bis 30 cm Tiefe aufgrund der verschlammenden Wirkung der bis dahin aufgetretenen Niederschläge nicht mehr nachweisbar.

Die Speicherung von mehr Wasser im Unterboden wirkt sich letztendlich auch auf die spätere Entwicklung der Pflanzen aus. Auf der Direktsaat-Variante laufen während der ersten Wochen nach der Aussaat deutlich weniger Pflanzen auf als auf den restlichen Varianten (vgl. Abb. 10). Dies ist auf die Saatechnik sowie vorhergehende Bodenbearbeitung zurückzuführen: Während auf der Direktsaat-Variante die Saatkörner in den unbearbeiteten Boden und

einer daraus folgenden hohen Bodenbedeckung aus Ernterückständen gedreht wurden, erfolgte die Aussaat auf den restlichen Varianten mit einer Sämaschine mit kombinierter Saatbettbereitung. Dadurch konnte auch vorhandenes Stroh noch weiter in den Boden eingearbeitet werden. Durch die geringere Strohaufgabe und auch eine damit verbundene bessere Erwärmung des Bodens haben die Saatkörner hier einen besseren Bodenschluss, sodass höhere Feldaufgänge auf diesen Varianten erzielt werden können. Aus den geringeren Feldaufgängen unter Direktsaat resultieren allerdings wieder Effekte, wie sie bereits in den Steppengebieten Russlands beobachtet werden konnten: Auf der Direktsaat-Variante stand weniger Pflanzen mehr Bodenwasser zur Verfügung, sodass sich hier auch größere Körner entwickelten. Ermich & Hofmann (1991) konnten ebenfalls im Mitteldeutschen Trockengebiet beobachten, dass verminderte Feldaufgangswert häufig entweder durch erhöhte Bestockung oder über Ertragsstrukturmerkmale wie Kornzahl je Ähre und Tausendkorngewicht kompensiert werden. Insbesondere während der Ährenausbildung und der Reifephase der Körner nutzten die Pflanzen auch das in tieferen Bodenschichten vorhandene Wasser für ihre Entwicklung effizienter. Im Resultat dessen wurde mit der Direktsaat 0,9 t mehr Weizen je Hektar geerntet als mit dem Pflug.

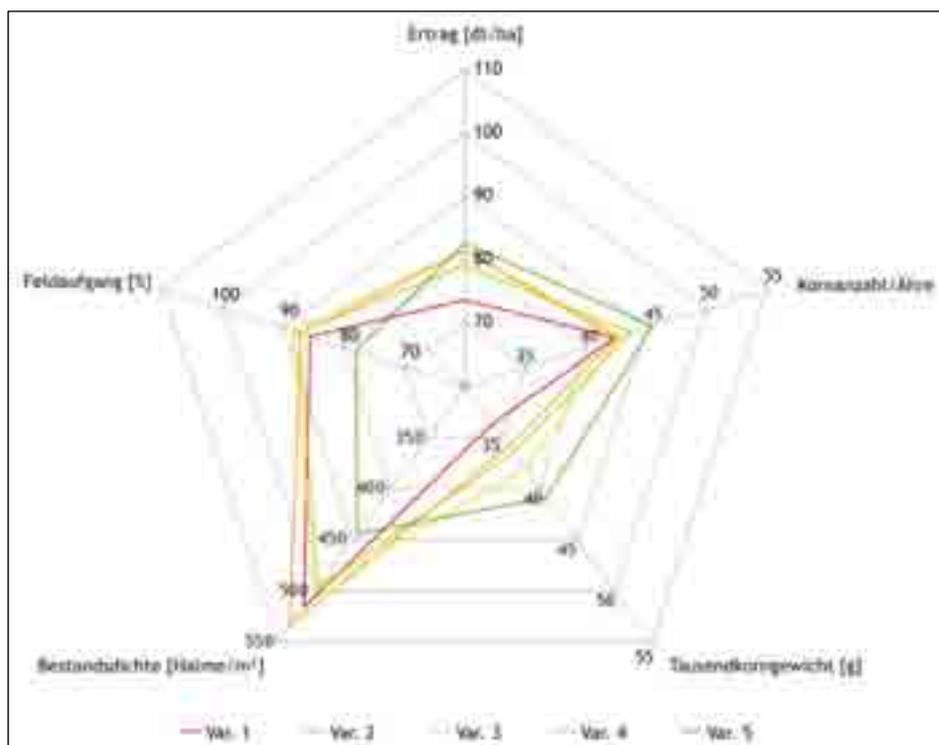


Abb. 10: Versuchsfeld „Barnstädt“ – Pflanzenbauliche Parameter.

## 6. Schlussfolgerungen

Für den Ackerbau in Trockengebieten ist die Speicherung der Winterniederschläge aufgrund der hohen Variabilität der Sommerniederschläge und deren Verdunstungsverluste eine wichtige Aufgabe. So sind für eine effiziente Speicherung und Nutzung des Bodenwassers besonders im Unterboden angepasste Nutzungsstrategien unumgänglich. Dazu gehört auch der Verzicht auf die Verwendung des Pfluges, um zum einen die Kontinuität und Anzahl der biogenen Grobporen zu erhöhen und so wesentlich zu einer höheren Infiltration beizutragen. Zum anderen wird dadurch unproduktive Verdunstung von der Ackeroberfläche minimiert und die Ausbildung eines stabilen Bodengefüges gefördert, was wiederum die Verschlammungsgefahr herabsetzt.

Als weiterer Bestandteil ist eine Minimierung der Bodenbearbeitungsgänge bis hin zum völligen Verzicht auf Bodenbearbeitung zu sehen, da jeder zusätzliche Bodenbearbeitungsgang für zusätzliche Verdunstung sorgt und somit dem ohnehin geringen Bodenwasservorrat einen wichtigen Teil entzieht.

## 7. Danksagung

Das Forschungsprojekt wird durch die Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG gefördert. Wir möchten an dieser Stelle Herrn G. Pflöck vom Agrarunternehmen Barnstädt e.G. für die tatkräftige Unterstützung bei der Organisation der Versuche am Standort Barnstädt danken. Weiterhin gilt ein besonderer Dank den studentischen Hilfskräften, die mit viel Engagement bei der Probenahme und Durchführung der Bodenfeuchtemessungen sowohl in Deutschland als auch in Russland zur Erhebung der Daten entscheidend beitrugen.

## 8. Literatur

- Ad-Hoc-AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Aufl.; Hannover (Schweizerbart).
- Beisecker, R. (1994): Einfluß langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens. – *Bodenökologie und Bodengenese*, 12, Berlin.
- Bischoff, J. (2009): Konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat in einer vierfeldrigen Fruchtfolge: Stroh schützt den Boden vor Austrocknung. – *Landwirtschaft ohne Pflug*, 4: 18-23.
- Bischoff, J. & Hofmann, B. (2009): Bodenbearbeitung auf Löß- und Sandstandorten: Sandboden reagiert anders als Löß. – *Landwirtschaft ohne Pflug*, 2: 27-31.
- Brinkman, R. & Sombroek, W. G. (1996): The Effects of Global Change on Soil Conditions in Relation to Plant Growth and Food Production. – In: Bazzaz, F. A. & Sombroek, W. G. (Hrsg.): *Global Climate Change and Agricultural Production*: 49-64; Chichester.
- Dammann, S. (2005): Ursachen und Auswirkungen der Ovragebildung in der südsibirischen Kulundasteppe und ihre Wechselwirkungen zur Naturraumausstattung sowie der Landnutzung. – Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Halle (Saale). – (Unveröffentlicht)
- Dou, F. & Hons, F. M. (2006): Tillage and Nitrogen Effects on Soil Organic Matter Fractions in Wheat-based Systems. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 1896-1905.
- Ehlers, W. (1996): *Wasser in Boden und Pflanze*; Stuttgart (Ulmer).
- Ermich, D. & Hofmann, B. (1991): Einfluß langjährig nichtwendender Bodenbearbeitung im Vergleich zur Pflugkultur auf Bodengefügeeigenschaften und das Pflanzenwachstum im mitteldeutschen Trockengebiet. – In: VDI Gesellschaft Agrartechnik (Hrsg.): *Land- und verfahrenstechnische Aspekte zur Gesundung der Böden – umweltschonend und kostensparend*: 166-182; Halle (Saale).
- Fabig, I. (2007): Die Niederschlags- und Starkregentwicklung der letzten 100 Jahre im Mitteldeutschen Trockengebiet als Indikatoren möglicher Klimaänderungen. – Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Halle (Saale).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1993): *World Soil Resources: An explanatory note on the FAO World Soil Resources Map at 1:25 000 000 scale*. *World Soil Resources Reports*, 66 Rev.1; Rom.
- Franke, J., Goldberg, V. & Bernhofer, C. (2009): Sachsen im Klimawandel – Ein Statusbericht. – In: *Wiss. Zeitschr. TU Dresden*, 58 (3-4): 32-38.
- Gommes, R. (1993): Current Climate and Population Constraints on World Agriculture. – In: Kaiser, H. M. & Drennen, T. E. (Hrsg.): *Agricultural Dimensions of Global Climate Change*: 67-86; Delray Beach.
- Groß, U. (1994): Wirkung der Bodenbearbeitungsintensität auf Aggregat- und Oberflächenstabilität. – In: Tebrügge, F. & Dreier, M. (Hrsg.): *Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf den Boden*: 83-90; Gießen.
- Grube, J. (2002): Beurteilung von konservierenden Bodenbearbeitungssystemen zur Bewirtschaftung peripherer Ackerbaustandorte: unter Berücksichtigung verfahrenstechnischer, ökonomischer, ökologischer sowie pflanzenbaulicher und bodenphysikalischer Parameter; Göttingen.

- International Food Policy Research Institute (IFPRI) (Hrsg.) (2009): *Climate Change: Impact on Agriculture and Costs of Adaptation*; Washington.
- Köller, K. & Linke, C. (2001): *Erfolgreicher Ackerbau ohne Pflug*, 2. Aufl.; Frankfurt am Main (DLG-Verlag).
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) (Hrsg.) (2008): *Regionale Klimadiagnose für Sachsen-Anhalt: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt REKLI – Sachsen-Anhalt II. Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt*, 5; Halle (Saale).
- Meinel, T. (2002): *Die geoökologischen Folgewirkungen der Steppenumbrüche in den 50er Jahren in Westsibirien. – Dissertation*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Halle (Saale).
- Mendelsohn, R. & Dinar, A. (2009): *Climate Change and Agriculture: An Economic Analysis of Global Impacts, Adaptation and Distributional Effects*; Cheltenham, Northampton.
- Peigné, J., Cannavaciolo, M., Gautronneau, Y., Aveline, A., Giteau, J. L. & Cluzeau, D. (2009): *Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. – Soil & Tillage Research*, 104: 207-214.
- Spaar, D. & Schuhmann, P. [Hrsg.] (2000): *Natürliche Grundlagen der Pflanzenproduktion in den Ländern der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten und des Baltikums*; Bergen/Dumme.
- Voßhenrich, H.-H. (2007): *Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt unter verschiedenen Bodenbearbeitungsmethoden auf dem Versuchsfeld "Leipzig"*; Leipzig (Unveröff.).
- Wilkens, K. (1994): *Einfluß langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf das Makrogefüge des Bodens. – In: Tebrügge, F. & Dreier, M. (Hrsg.): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf den Boden: 117-128*; Gießen.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (1994): *Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden*; Bonn.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 49-56, 3 Abb.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Simulation einer sensorgestützten Präzisionsbewässerung von Standorten im Südtiroler Obstanbau

Sven Grashey-Jansen\*

Grashey-Jansen, S. (2011): Simulation einer sensorgestützten Präzisionsbewässerung von Standorten im Südtiroler Obstanbau. [Simulation of a sensor-based precision irrigation of orchards in South Tyrol.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 49-56, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Die Folgen des Klimawandels machen einen bewussteren Umgang mit den Wasserressourcen notwendig. Insbesondere in Agrarregionen, welche nur unter hohem Bewässerungseinsatz wirtschaftlich rentable Erträge liefern, kann durch eine bedarfsorientierte und teilflächenspezifische Bewässerung eine bedeutende Wassereinsparung ohne Ertragseinbußen erreicht werden. Mehrjährige bodenhydrologische Untersuchungen in den bewässerten Obstanbauregionen Südtirols haben ergeben, dass die pedologischen Standortunterschiede einen bedeutenden, bisher aber meist unbeachteten, Einfluss auf die lokalen Variationen der Bodenwasserdynamik und der für die Pflanzen verfügbare Wassermenge haben.

Numerische und agenten-basierte Simulationsversuche haben gezeigt, dass eine dynamisch gesteuerte Bewässerung durch den Einsatz bodenspezifisch kalibrierter Feuchtesensoren eine optimierte Wasserzufuhr ermöglicht. Durch eine verkürzte Bewässerungsdauer mit variablen Intensitäten, welche sich an bodenphysikalischen Kennwerten orientieren, können deutliche Wassereinsparungen erzielt werden.

Einer geplanten Validierung an Bodensäulen im Labor und Optimierung dieses Simulationsansatzes soll eine Praxisprüfung im Freigelände folgen.

**Abstract:** In many climatic regions, the availability of water in soils determines to a large extent their agricultural productiveness. Especially in irrigated agricultural areas information about the actual soil water dynamics can deliver valuable data to optimize the irrigation practice with regard to volume and duration of irrigation.

South Tyrol is a region where these questions are discussed currently. Intensive orcharding is practised there within an area of about 18.000 hectares. Because of the local climatic situation irrigation is considered necessary and has been practised for a long time. However, at many locations much more water is used for irrigation than the apple trees actually need. Regarding the aspects of climatic change and the decrease of water resources, the term "precision irrigation" is being increasingly discussed. Such a precision irrigation must be based on objective and quantitative criteria, which focus primarily on the physical soil properties and hydrologic balances.

One solution would be to have sensors near the plants' roots controlling the water inflow depending on the particular demand. Such a dense soil-hydrological measuring network should be composed ideally of micro-sensors, which are distributed in the investigated soil section and thereby collect data of relevant parameters in the pedosphere using high temporal resolution and transmitting the information to a central logger-unit.

This contribution will present a simulation-based approach of a precision irrigation-system with particular consideration of pedo-specific properties.

**Schlüsselwörter:** Bodenfeuchtesensorik, Simulation, Bewässerungssteuerung, Pedotransferfunktionen

**Keywords:** soil moisture sensors, simulation, irrigation control, pedotransfer functions

---

\* Anschrift des Autors:

Sven Grashey-Jansen (sven.jansen@geo.uni-augsburg.de), Universität Augsburg, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Physische Geographie & Quantitative Methoden, Universitätsstraße 10, D-86135 Augsburg.

## 1. Einleitung

Die Wasserverfügbarkeit im Boden entscheidet in vielen Klimaregionen der Erde maßgebend über deren landwirtschaftliche Ertragsfähigkeit. Rund ein Fünftel des Agrarlandes der Erde müssen aufgrund mangelnder Niederschläge künstlich bewässert werden, so dass die Bewässerung in vielen Regionen der Erde einen unverzichtbaren Produktionsfaktor darstellt. Die Heterogenität der Böden bleibt dabei meist unberücksichtigt (Grashey-Jansen 2007a, 2007b).

Der vorliegende Beitrag will einige Ergebnisse aus mehrjährigen Untersuchungen zur Bodenwasserdynamik unter Bewässerungseinfluss in Südtirol zusammenfassen und dabei Möglichkeiten der Bewässerungsoptimierung anhand eines simulativen Ansatzes aufzeigen.

Die Region Südtirol in Italien ist mit ca. 18.000ha Anbaufläche und einer jährlichen Produktionsrate von bis zu 900.000t das größte zusammenhängende Kernobstbaugebiet in Europa. Der Übergang vom mediterranen zum mitteleuropäisch-kontinentalen Klima gewährleistet prinzipiell sehr gute klimatische Voraussetzungen für einen intensiv und großflächig betriebenen Obstbau. Die jährlichen Niederschlagsmittel variieren lokal und liegen bei 450mm bis 550mm im inneralpiner Trockental Vinschgau und knapp 650mm im Mittleren Etschtal zwischen Meran und Bozen, so dass intensiv betriebene Obstbau nur unter einer Zusatzbewässerung rentable Erträge liefert (Grashey-Jansen & Schröder 2009). Zwar werden inzwischen Bewässerungsstrategien verfolgt, welche auf Bodenfeuchtemessungen basieren. Doch sind diese aufgrund des nichtlinearen und bodenartspezifischen Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und Wasserspannung selten zielführend. Infolgedessen kommt es häufig zu Wassergaben, welche deutlich über die tatsächliche Notwendigkeit und den Bedarf der Kulturpflanzen hinausgehen. Vor allem im Bereich grundwassernaher Standorte sind bereits Erscheinungsformen der Überbewässerung beobachtet worden (Thalheimer 2005, Grashey-Jansen 2008a).

Das Wasser zur Beregnung wird insbesondere im Mittleren Etschtal aus Tiefbrunnen entnommen. Aufgrund des hohen Wasserverbrauches, sind zeitweise Absenkungen im Grundwasserspiegel registriert worden. Eine zentrale Aufgabe der regionalen Landwirtschaft wird es in den kommenden Jahren sein, den Wasserverbrauch auf ein minimal notwendiges Maß zu reduzieren.

Daher wird es auch aus Gründen der Kostenbegrenzung in Zukunft notwendig werden, den Bewässerungsbedarf und die Menge der einzelnen Wassergaben objektiv nach messbaren Parametern festzulegen. Der Terminus "Precision irrigation" als teilflächenspezifische Bewässerung ist definiert als eine exakte Wasserapplikation in Abstimmung auf die räumlichen und zeitlichen Variationen der Bodeneigenschaften und in Abhängigkeit der verschiedenen phänologischen Entwicklungsphasen, während der Vegetationsperiode (Al-Karadsheh et al. 2003, Schoengold et al. 2004, Al-Kufaishi et al. 2006, Rain et al. 2007).

Nicht nur das regionale Bewusstsein, sondern auch die Empfehlungen und Vorschriften der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie ziehen einen Handlungszwang nach sich, so dass in Südtirol und im gesamten europäischen Raum vermehrt Überlegungen getroffen werden, welche in die Richtung einer Bewässerungsoptimierung auf Basis messbarer Kriterien abzielen.

## 2. Datengrundlage und Methodik

### 2.1 Voruntersuchungen

Durch umfangreiche bodenkundliche und bodenhydrologische Untersuchungen an 15 repräsentativen Standorten konnte im Zeitraum von 2003 bis 2009 eine solide Datenbasis zur quantitativen Beschreibung der Bodenwasserdynamik unter Bewässerungseinfluss gewonnen werden (Grashey-Jansen 2008b). Neben Profilaufnahmen und Laboranalysen, stand dabei vor allem die simultane Erfassung tiefendifferenzierter Saugspannungen, Grundwasserspiegelschwankungen und Bewässerungseinheiten sowie relevanter klimatischer Parameter (Niederschläge, Boden- und Lufttemperaturen, Wind und Luftfeuchtigkeit) im Vordergrund. Die hohe zeitliche Auflösung (stündlich) ermöglichte den effizienten Einsatz statistischer Verfahren zur Daten- und Zeitreihenanalyse.

Längerfristige Variationen und markante Anomaliephasen im Gesamtverlauf der tensiometrischen Zeitreihen wurden durch die Anwendung numerischer Tiefpassfilter beschrieben. Die Anwendung numerischer Hochpassfilter erlaubte eine optimierte Analyse der hochfrequenten Variabilitäten. Bivariate und partielle Korrelationsrechnungen dienten einer initialen Überprüfung und Quantifizierung vermuteter Zusammenhänge zwischen den Saugspannungen und den erfassten Einflussgrößen. Die Berechnung (par-

tieller) Autokorrelationsfunktionen gestattete die Identifikation standort- und tiefenspezifischer Trägheitsmäße und Wiederholungsmuster. Um die natürlichen Zeitverzögerungen sowie die damit verbundenen Abhängigkeiten und Reaktionsgeschwindigkeiten im bodenhydrologischen Prozessgeschehen quantifizieren zu können, wurden für alle Korrelationspaare die entsprechenden Zeitversätze durch Kreuzkorrelationen berechnet. Hauptkomponentenanalysen dienen durch die Informationsverdichtung und Mustererkennung dazu grundlegende Typen der Saugspannungsvariabilitäten zu extrahieren. Letztendlich konnten dann im Zuge schrittweiser Regressionsverfahren aus der Gesamtmenge der erfassten Parameter diejenigen Einflussgrößen ermittelt werden, welche als Prädiktoren einen signifikanten Erklärungsanteil zur Variation der Zielgröße Saugspannung beitragen.

## 2.2 Simulationsansatz der sensorgestützten Bewässerungsoptimierung

Der bio- und bodenphysikalische Zusammenhang zwischen der Saugspannung des Wassers in der Bodenmatrix und dem Wasserversorgungsstatus der Pflanzen legt eine kontinuierliche und tiefendifferenzierte Saugspannungserfassung für die Umsetzung einer bedarfsorientierten Bewässerung nahe, die im Idealfall sensorgestützt erfolgt.

Der Einsatz von Sensoren zur Bewässerungssteuerung ist in der landwirtschaftlichen Praxis jedoch an verschiedene Restriktionen geknüpft. Die minimalinvasive Installation einer wartungsarmen Sensorik ist vorteilhaft, weil sie den laufenden Betrieb nicht stört und in hoher raumzeitlicher Auflösung Messwerte liefert. Im Bereich der Bodenfeuchtemessung hat sich daher in den letzten Jahren die Verwendung von Mikrosensoren etabliert. Eine auf Feuchtesensoren basierende Bewässerungssteuerung kann jedoch nur unter Einbeziehung entscheidender bodenphysikalischer Parameter effizient arbeiten. Hierbei nimmt die mineralische Korngrößenzusammensetzung (neben der spezifischen Lagerungsdichte und dem Gehalt an organischer Substanz) eine zentrale Stellung ein, weil sie den Bodenwasserhaushalt und seine raumzeitliche Dynamik entscheidend beeinflusst. Ohne Berücksichtigung dieses Parameters ist ein Rückschluss auf die korrespondierenden Matrixpotentiale im Boden und damit eine bedarfsorientierte Bewässerung nicht möglich. Sensortechnisch ist eine minimalinvasive Messung der Matrixpotentiale nur unter einem unverhältnismäßig hohen Kostenaufwand mit war-

tungsintensiven Mikro-Tensiometern zu realisieren.

Der hier vorgestellte Simulationsansatz basiert daher auf stromsparenden low-cost Bodenfeuchtesensoren, welche den volumetrischen Wassergehalt in porösen Medien über Spannungsänderungen kapazitiv an der Sonde messen. Die korrespondierenden pF-Werte im Boden werden in der Simulation über regressionsbasierte Pedotransferfunktionen berechnet, welche für alle 34 Bodenarten der deutschen bodenkundlichen Systematik erstellt wurden (Grashey-Jansen & Timpf 2010). Über diese spezifischen Pedotransferfunktionen wird eine simultane Wiedergabe der Saugspannungen und damit eine objektive und quantitativ basierte Abschätzung der Bewässerungsnotwendigkeit möglich.

Die Sensoren werden unmittelbar an den jeweiligen oberen und unteren Horizontgrenzen positioniert. Diese Sensorknoten sind mit einer Kontrolleinheit an der Bodenoberfläche verbunden (Abbildung 1). Die Bodenfeuchtwerte zwischen diesen Sensorknoten (innerhalb der homogenen Einzelhorizonte) werden zentimeterweise über ein lineares Interpolationsverfahren berechnet, so dass letztlich für jeden Zentimeter im Gesamtprofil zeitgleich gemessene und simulierte Bodenfeuchtwerte vorliegen. Basierend auf diesen Feuchtwerten wird über die bodenartspezifischen Pedotransferfunktionen der korrespondierende Vertikalverlauf der Wasserspannungen im Bodenprofil berechnet.

Der Bewässerungsbeginn wird durch das Überschreiten kritischer Saugspannungswerte (für den Obstbau ab 550hPa; vgl. Quast 1986) im Hauptdurchwurzelungsbereich von den betroffenen Tiefenbereichen signalisiert. Diese Signalgebung kann dabei sowohl durch die physischen Sensorknoten als auch aus den virtuellen Zwischenbereichen erfolgen. Die Wiedergabe der raumzeitlichen Dynamik der descendenten Wasserbewegung im Bodenprofil erfolgt durch die Berechnung der relevanten Teilpotentiale sowie der hydraulischen Gradienten  $\text{grad}\psi_h$  und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten  $k(\Psi)$ . Die Berechnung von  $k(\Psi)$  basiert dabei auf dem Ansatz von Mualem (1976) und dem Vorhersagemodell von Genuchten (1980). Es wird von einem idealisierten Kolbenfluss des Wassers im Boden ausgegangen, der das Bodenprofil kaskadenartig bis zum Erreichen der bodenartspezifischen Feldkapazität zentimeterweise aufsättigt.  $K(\Psi)$  ermöglicht über die Berechnung des Wasserflusses  $q$  eine quantitative Beschreibung der Zeitdauer, welche das Wasser auf seinem Fließ-

weg durch die jeweils betrachtete Tiefenlage  $dx$  im vertikalen Bodenprofil im Laufe des Aufsättigungsprozesses benötigt. Der dafür notwendige hydraulische Potentialgradient wird für den mittleren Wassergehalt des jeweiligen und dem aktuellen Wassergehalt des nächst tieferen Zentimeters berechnet.

$$q = k(\psi) \cdot \text{grad}\psi_h \quad [1]$$

Die Berechnung von  $q$  entspricht damit der maximal möglichen Bewässerungsintensität, bei der es noch zu keinem Wasserstau kommen kann.

Hierbei wird im Modell vereinfachend davon ausgegangen, dass die Wasserspannungen in den tieferen Bodenbereichen nach Aktivierung des Bewässerungsvorganges und dem Einsetzen der damit verbundenen Infiltration bis zum Befeuchtungsmoment nicht weiter ansteigen, sondern stagnieren. Im Bereich der Horizontübergänge muss dabei auf die Pedotransferfunktionen der nächstfolgenden Bodenart vorgegriffen werden, um den zugehörigen hydraulischen Gradienten zu berechnen.

Die simulierte Abwärtsbewegung des Bewässerungswassers im Boden von einem Zentimeter in der Tiefe  $d_{x1}$  zum nächsten in der Tiefe  $d_{x2}$  erfolgt nach einem eigens entwickelten Kaskadenmodell, welches in das Gesamtmodell integriert ist. Dabei wird in einem ersten Schritt das jeweils aktuell auffüllbare Wasserspeichervolumen  $wc_{fill}$  pro Zentimeter Bodentiefe im Zeitverlauf berechnet:

$$wc_{fill} = (wc_{sat} - wc_{act}) \cdot 0,1 \quad [2]$$

mit:

$wc_{fill}$  = auffüllbare Wassermenge [mm]

$wc_{sat}$  = Wassergehalt bei Feldkapazität (pF 1,8) [mm]

$wc_{act}$  = aktueller Wassergehalt [mm]

Mit  $q$  und  $wc_{fill}$  kann die Zeitdauer  $it$  berechnet werden, welche zum Auffüllen des betrachteten Zentimeters benötigt wird, wenn sich das Wasser mit der Intensität  $q$  durch den Boden bewegt:

$$it = \frac{wc_{fill}}{q} \quad [3]$$

Die Berechnung der Zeit, welche zum Durchsickern durch den inzwischen aufgesättigten Zentimeter  $d_x$  bis zum Erreichen von dessen Basis und damit dem Erreichen vom darunterliegenden Zentimeter  $d_{x+1}$  verstreicht, wird hier als Perkola-

tionszeit  $t_p$  bezeichnet. Die Größe  $t_p$  kann letztlich aus der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der entsprechenden Bodenart abgeleitet werden, da der Wert des hydraulischen Gradienten innerhalb von  $d_x$  nach seiner zeitweiligen Vollaufsättigung stets 1 beträgt.

Die Bestimmung der Gesamtdauer  $tt$  für die Versickerung des Bewässerungswassers erfolgt kumulativ:

$$\begin{aligned} tt_{d_{x2}} &= tt_{d_{x1}} + it_{d_{x2}} + tp_{d_{x2}} \\ \rightarrow tt_{d_{x3}} &= tt_{d_{x2}} + it_{d_{x3}} + tp_{d_{x3}} \\ \rightarrow \rightarrow tt_{d_{x4}} &= tt_{d_{x3}} + it_{d_{x4}} + tp_{d_{x4}} \quad [4] \\ \rightarrow \rightarrow \rightarrow tt_{d_{x5}} &= tt_{d_{x4}} + it_{d_{x5}} + tp_{d_{x5}} \\ \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow &\dots \end{aligned}$$

Die Bewässerung endet sobald das gesamte Bodenprofil seine maximale Feldkapazität bis in den Hauptdurchwurzelungsbereich hinein erreicht hat.

Die numerischen Teilsimulationen wurden in der freien Programmiersprache R geschrieben und entwickelt. Die eigentliche Simulation erfolgt mit dem ebenfalls freien Simulationstool SeSAM (Shell for Simulated Agent Systems), welches javabasiert mit einer visuellen Programmierumgebung arbeitet. In dieser Multi-Agenten-Simulation werden die Einzelsensoren durch "Agenten" repräsentiert, wobei jeder Agent mit Eigenschaften, Informationen und Fähigkeiten ausgestattet ist. Durch das "Verhalten" jedes einzelnen Agenten und der Interaktion mit benachbarten Agenten können die Wirkungsgefüge im Bodenwasserhaushalt beschrieben und damit der Bewässerungsablauf als ein emergentes Phänomen simuliert werden (Grashey-Jansen & Timpf 2010).

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Die Felduntersuchungen haben gezeigt, dass in der Untersuchungsregion eine große pedologische Standortheterogenität vorliegt. Den Analysen und Berechnungen nach erweist sich die Saugspannung als ein sehr tiefenabhängiger Parameter, der bis in 45cm Bodentiefe (= Hauptdurchwurzelungsbereich der Obstbäume) einer deutlichen Steuerung durch atmosphärische Einflussgrößen unterliegt. Im Bereich grundwassernaher Standorte konnten die Grundwasserflurabstände und kapillare Aufstiegsprozesse als ein signifikanter

Steuerungsparameter nachgewiesen werden, so dass stellenweise eine ganzheitliche Wasserversorgung der Obstbäume ohne jegliche Zusatzbewässerung denkbar ist (Grashey-Jansen 2008a, 2008b).

Die Bodenwasserdynamik wird dabei maßgebend von der Heterogenität pedologischer Eigenschaften gesteuert, wobei die Zusammensetzung und Verteilung der mineralischen Korngrößen eine zentrale Rolle spielt. Die Saugspannung als messbare Zielgröße erwies sich im Rahmen der Voruntersuchungen als ein gut geeigneter Parameter zur quantitativen Beschreibung der Bodenwasserdynamik unter Bewässerungseinfluss.

Um die Bewässerungspraxis für die Region in ökonomischer und ökologischer Hinsicht zu optimieren, ist eine Bewässerungsplanung auf objektiver Basis essentiell. Dabei dürfen atmosphärische Parameter und der Einfluss des Grundwassers nicht überbewertet werden, sondern die Beachtung der pedologischen Verhältnisse muss in den Vordergrund gestellt werden. Nur mit ihrer Kenntnis lässt sich die Wirksamkeit atmosphärischer und hydrologischer Einflussgrößen effektiv abschätzen, um damit essentielle Informationen für eine bedarfsgerechte Bewässerung zu liefern.

### 3.2 Simulationsergebnisse

Als Simulationsergebnis wird vom Modell ein Bewässerungsplan ausgegeben. Die Bewässerung erfolgt dabei weder statisch noch intermittierend, sondern kontinuierlich dynamisch. Dies bedeutet, dass das Verhältnis zwischen ausgebrachter Wassermenge und der zugehörigen Bewässerungsdauer kontrollierten Variationen unterliegt. Diese dynamische Bewässerungsweise ermöglicht eine sukzessive Wasserzufuhr in das Bodenprofil unter Anpassung an die bodenhydrologischen Eigenschaften.

Die folgenden Ergebnisse basieren auf dem in Abbildung 1 gezeigten Bodenprofilaufbau, der sich horizontweise aus den drei verschiedenen Bodenarten Mittelsand (mS: 0-17cm), schwach schluffigem Sand (Su2: 18-30cm) und sandig-lehmigem Schluff (Uls: 31-45cm) zusammensetzt.

Abbildung 2 zeigt die vertikale Verteilung der simulierten, volumetrischen Bodenwassergehalte (a) und der korrespondierenden Saugspannungen (b) zum Zeitpunkt des Bewässerungsbeginns, welche das Modell aus den Pedotransferfunktionen synchron berechnet. Als Schwellenwert wurde im Beispiel eine kritische Saugspannung

von 500hPa für den Hauptdurchwurzelungsbereich (beginnend bei ca. 15cm) festgelegt.

Die horizontspezifische Verteilung der volumetrischen Wassergehalte kommt dabei deutlich zum Ausdruck (Abbildung 2a). Dagegen zeigen die korrespondierenden Saugspannungen (Abbildung 2b) aufgrund des sich bereits eingestellten Potentialausgleichs einen erwartungsgemäß wesentlich ausgeglicheneren Vertikalverlauf.

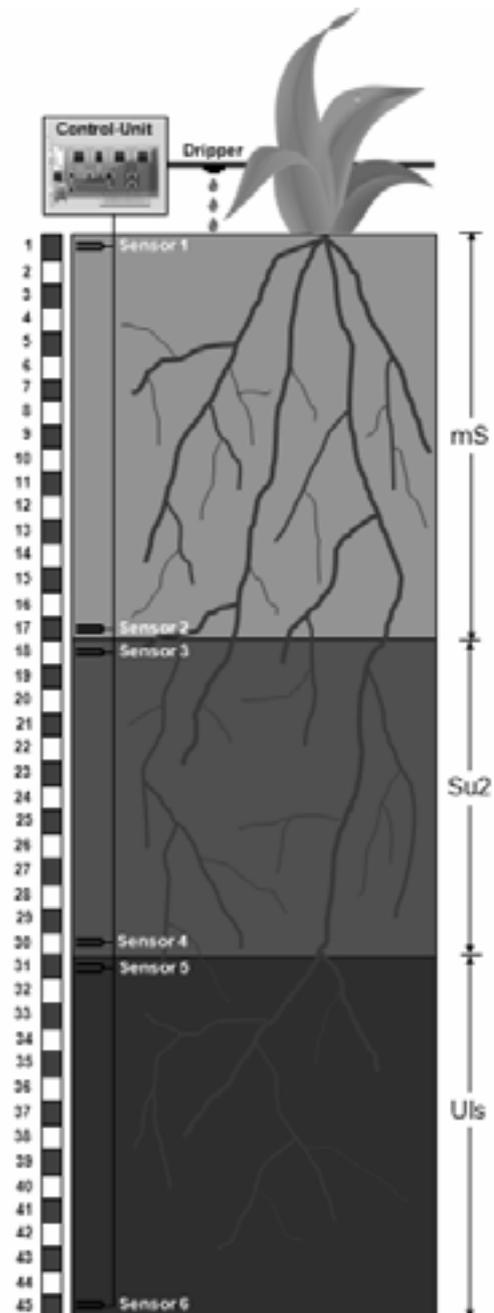


Abb. 1: Anordnung der Bodenfeuchtesensoren an den Horizontgrenzen in einem heterogenen Beispielprofil.

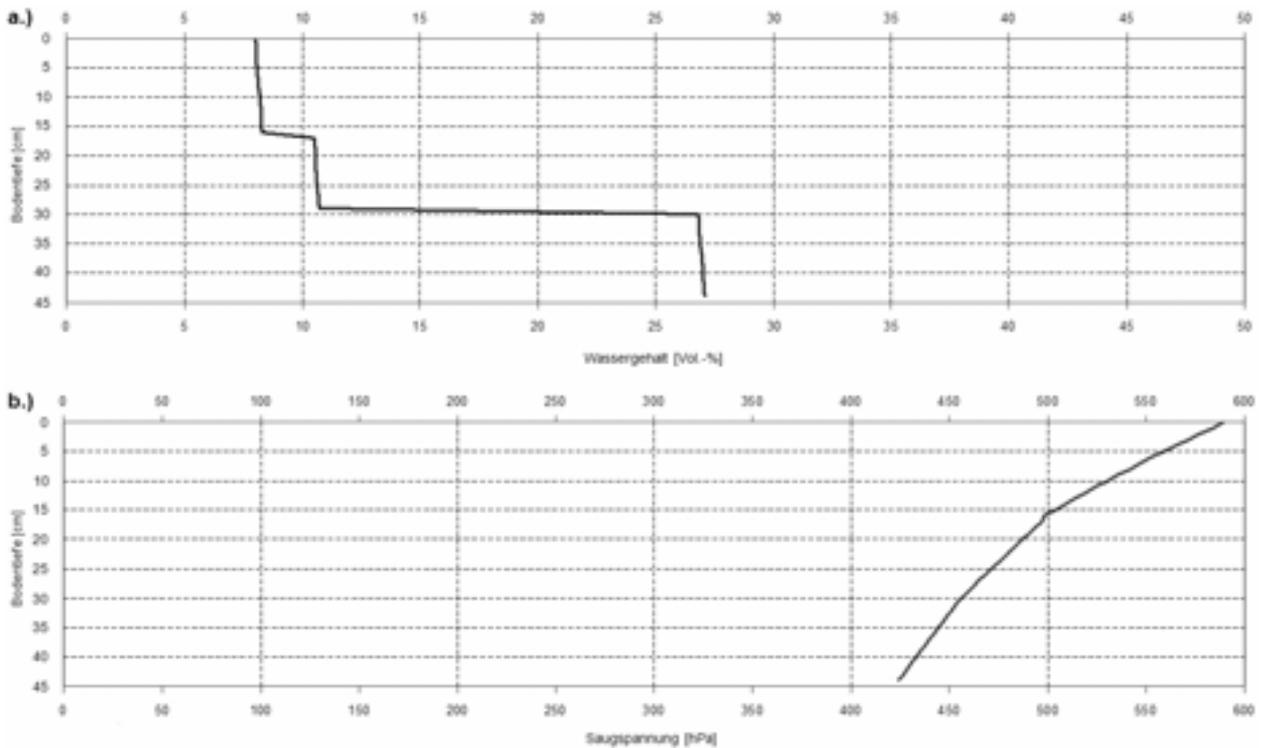


Abb. 2 a: Vertikalverteilung des volumetrischen Wassergehaltes im Bodenprofil.  
 b: Vertikalverteilung der zeitgleich korrespondierenden Saugspannungen im Bodenprofil.

Basierend auf dieser bodenhydrologischen Ausgangssituation wird von den simulierten Sensoren der Bewässerungsplan berechnet (Abbildung 3). Daraus wird ersichtlich, dass die Bewässerungsintensität über den gesamten Bewässerungszeitraum variiert, weil jede Bodentiefe die Wassermenge erhält, die auch ihrem maximal möglichen Speichervolumen bei Feldkapazität entspricht. Aufgrund dieses dynamischen Bewässerungsvorgangs, wird dem Bodenprofil das notwendige Wasser sukzessive in Anpassung an seine (sich im Zeitverlauf ändernden) bodenhydrologischen Eigenschaften zugeführt. Der Bewässerungsplan setzt sich somit aus einzelnen Slots unterschiedli-

cher Bewässerungsdauer und Wassermenge zusammen (= dynamische Intensität). Im gezeigten Beispiel beträgt die gesamte Bewässerungsdauer 78,7 Minuten, um das Bodenprofil bis in 45cm Tiefe mit einer aufsummierten künstlichen Niederschlagshöhe von 44,15mm bis auf seine Feldkapazität aufzusättigen. Die kurze Bewässerungsdauer erklärt sich durch die hohen Ausgangssaugspannungen im gesamten Bodenprofil und den damit verbundenen hohen hydraulischen Gradienten im Bereich der jeweiligen Infiltrationsfronten, welche die Wasserbewegung zusätzlich antreiben.

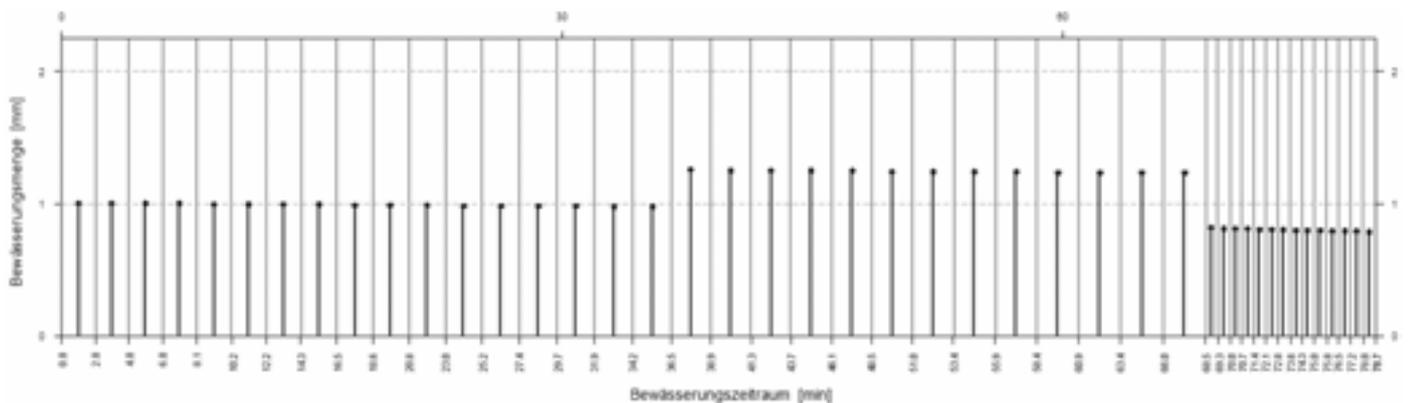


Abb. 3: Bewässerungsplan als Simulationsergebnis für eine sensorgestützte Präzisionsbewässerung. Die Länge der Zeitfenster (= Slots; begrenzt durch dünne Linien) sowie die innerhalb der Slots ausgebrachten Wassermengen (dicke Linien mit Punktsignatur im Maximalbereich) unterliegen dabei dynamischen Variationen.

## 4. Diskussion

Der Simulationsansatz zeigt, dass eine Bewässerungssteuerung durch den Einsatz weniger, aber pedospezifisch kalibrierter Feuchtesensoren effizient erfolgen kann. Im Gegensatz zu der herkömmlichen Bewässerungspraxis, welche meist fixierten Zeitplänen mit pauschalen Wassergaben und dabei eher subjektiven Kriterien folgt, liefert die Simulation eine dynamische Bewässerungssteuerung. Diese basiert auf den bodenphysikalischen Eigenschaften des Standortes und nutzt die Saugspannung als Führungsgröße für ein bedarfsorientiertes Bewässerungsschema.

Die Wasserersparnis gegenüber der traditionellen Bewässerungsweise ist aufgrund der großen pedologischen Standortheterogenität für die Untersuchungsregion nur schwer abschätzbar. Ausgehend von einer künstlichen Niederschlagsdichte von 6mm/h und einem 9-stündigen Bewässerungszeitraum bei der herkömmlichen Oberkronenberechnung (Grashey-Jansen 2008b) ergibt sich im Vergleich zu dem hier vorgestellten Beispiel eine Wassereinsparung von rund 10Liter/m<sup>2</sup> (= 1000Liter/ha) je Bewässerungsgang. Zudem reduziert der verkürzte Bewässerungszeitraum der dynamischen Variante Wasserverluste durch Winddrift, Evaporation und Interzeption, welche jedoch aufgrund der Abhängigkeit von der Witterung und dem phänologischen Stadium bisher noch nicht quantifizierbar sind.

Bezüglich der simulierten Bodenwasserdynamik muss davon ausgegangen werden, dass die reale Fließgeschwindigkeit noch höher liegt, weil das Wasser die Matrix „umfließen“ muss (Ehlers & Goss 2004). Das heißt die tatsächliche Fließstrecke, welche innerhalb dieser Zeit zurückgelegt wird ist länger als es der Modelldistanz von einem Zentimeter entspricht. Dieser Effekt (wie auch der Einfluss von Makroporenflüssen) kann bisher noch nicht zielführend simuliert werden.

Die Validierung des Modells im Feld- und Laborversuch ist in Vorbereitung, wobei zunächst eine pedospezifische Kalibrierung der Sensorknoten im Vordergrund steht. Nach einer erfolgreichen Validierung dieses Simulationsansatzes an Bodensäulen im Labor und der Praxisprüfung im freien Gelände, wird eine große Problematik im Bereich der technischen Umsetzung liegen. Der technische und finanzielle Aufwand für eine

sensorbasierte, dynamische Präzisionsbewässerung ist deswegen bislang noch nicht abschätzbar.

## 5. Schlussfolgerungen

Um die Bewässerungspraxis für die vorgestellte Region in ökonomischer und ökologischer Hinsicht zu optimieren, ist eine Bewässerung auf objektiver Basis essentiell. Dabei dürfen die atmosphärischen Parameter und auch die Grundwassernähe als objektive Kriterien nicht überbewertet werden, sondern die Beachtung der pedologischen Verhältnisse muss in den Vordergrund rücken. Die Bewässerungspraxis kann deutlich optimiert und bedarfsorientiert gestaltet werden, wenn ihr kein administrativ und subjektiv gesteuerter Bewässerungszeitplan zugrunde liegt, sondern die Bewässerungsnotwendigkeit an der tatsächlich pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge gemessen wird. Die Saugspannung im Boden ist dabei eine optimale Führungsgröße.

Eine sensorgestützte und zeitgleich minimalinvasive Erfassung der Matrixpotentiale ist technisch bisher nur schwer und unter sehr hohem Kostenaufwand realisierbar, weshalb der Einsatz von stromsparenden und kostengünstigen Bodenfeuchtesensoren zielführender erscheint.

Die Steuerung der Bewässerung mithilfe von pedospezifisch kalibrierten Feuchtesensoren, deren Messwerte simultan durch entsprechende Transferfunktionen in die korrespondierenden Saugspannungen umgerechnet werden hat, sich im Modellversuch als effizient erwiesen. Die Einbindung dieses Systems in ein Sensornetzwerk ist ein denkbarer Ansatz für eine teilflächenspezifische und bedarfsorientierte Bewässerung. Angaben zur potentiellen Wassereinsparung konnten bereits abgeschätzt werden.

Zur Optimierung des Modells sollen in einem weiteren Simulationsschritt exogene Parameter in das Modell integriert werden, um dem Einfluss von Niederschlägen, Luft- und Bodentemperaturen, relativen Luftfeuchten und Grundwasserspiegelständen gerecht zu werden. Auch die Berücksichtigung phänologischer Variationen im Jahresgang, welche den Wasserbedarf der Obstbäume und den Wasserentzug aus dem Hauptdurchwurzelungsbereich maßgebend steuern (Noga & Lenz 1982, Mager 1988), sind im aktuellen Modellstatus noch unzureichend berücksichtigt. Desweiteren soll die zusätzliche Einbindung variierender Lagerungsdichten und Humusgehalte als ergän-

zende Bodenparameter, welche den Wassergehalt beeinflussen, durch eine Modifizierung der bereits erstellten Pedotransferfunktionen umgesetzt werden. Auch der Einfluss von Makroporenflüssen sowie die Wasserbewegung in Sekundärporen, wie sie beispielsweise in tonreicheren Substraten infolge von Quellungs- und Schrumpfungsprozessen eine Rolle spielt, sollen quantitativ eingebunden werden.

Durch die genannte Ergänzung und Optimierung der Berechnungsstrukturen kann der bestehende Simulationsansatz noch verbessert und somit an die realen Bedingungen und Prozeduren angenähert werden, um einen effektiven Beitrag zur Präzisionsbewässerung liefern zu können.

## 6. Literatur

- Al-Karadsheh, E. W., Sourell, H. & Sommer, C. (2003): Neue Berechnungsstrategien: Precision irrigation; Teilflächenspezifische Berechnung. – *Der Kartoffelanbau*, 54: 105-107.
- Al-Kufaishi, S. A., Blackmore, B. S. & Sourell, H. (2006): The feasibility of using variable rate water application under a central pivot irrigation system. – *Irrigation and Drainage Systems*, 20: 317-327.
- Ehlers, W. & Goss, M. (2004): *Water Dynamics in Plant Production*: 288 S.; Cambridge (CABI).
- Grashey-Jansen, S. (2007a): Boden und Bewässerung im Obstbau. – *ObstbauWeinbau*, 44: 253-256.
- Grashey-Jansen, S. (2007b): Der Einfluss des Bodens auf die Wasserversorgung von Apfelbäumen. Ein Beispiel aus Südtirol. – *Obstbau*, 32: 626-629.
- Grashey-Jansen, S. (2008a): Zur Bodenwasserdynamik eines bewässerten Standortes im Südtiroler Erwerbsobstbau. – *WasserWirtschaft*, 98: 61-65.
- Grashey-Jansen, S. (2008b): Zur raumzeitlichen Differenzierung der Bodenwasserdynamik auf obstbaulich genutzten Standorten in Südtirol unter Bewässerungseinfluss. – 271 S.; Augsburg (Institut für Geographie).
- Grashey-Jansen, S. & Schröder, L. (2009): Zur Physiogeographie des Vinschgaus. – *er Schlern*, 83: 52-65.
- Grashey-Jansen, S. & Timpf, S. (2010): Soil Hydrology of Irrigated Orchards and Agent-Based Simulation of a Soil Dependent Precision Irrigation System. – *Journal of Adv. Sci. Lett.*, 3: 1-14.
- Mager, A. (1988): Einfluss verschiedener Klimafaktoren auf den Wasserverbrauch von Apfelbäumen in Abhängigkeit von Nährstoffversorgung, Erziehungsmaßnahmen und Fruchtbehang: 134 S.; Bonn (Universität Bonn).
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. – *Water Res. Research*, 12: 513-522.
- Noga, G. & Lenz, F. (1982): Transpiration von Äpfeln während der Licht- und Dunkelperiode in Abhängigkeit von verschiedenen Klimafaktoren. – *Gartenbauwiss.*, 47: 274-278.
- Quast, P. (1986): *Düngung, Bewässerung und Bodenpflege im Obstbau*. – 231 S.; Stuttgart.
- Raine, S. R., Meyer, W. S., Rattan, D. W., Hutson, J. L. & Cook, F. J. (2007): Soil water and solute movement under precision irrigation: knowledge gaps for managing sustainable root zones. – *Irrig. Sci.*, 26: 91-100.
- Schoengold, K., Sunding, D. L. & Moreno, G. (2004): Agricultural Water Demand and the Gains from Precision Irrigation Technology. – *Giannini Foundation of Agricultural Economics. ARE Update*, 7: 5-8.
- Thalheimer, M. (2005): Zur Dynamik des Bodenwassers an einem grundwassernahen Obstbau-Standort im Etschtal (Südtirol/Italien). – *Laimburg Journal*, 2: 50-57.
- Van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.

**Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 57-68, 6 Abb., 3 Tab.**  
Halle (Saale), Mai 2011

## **Saisonale Variabilität des Einflusses von Karsttributären auf die hydrologische Entwicklung der Altmühl (Bayern)**

Eva Olmo Gil, Martin Trappe & Michael Becht\*

Olmo Gil, E., Trappe, M. & Becht, M. (2011): Saisonale Variabilität des Einflusses von Karsttributären auf die hydrologische Entwicklung der Altmühl (Bayern). [Seasonal variability influence of karst tributaries to the hydrological behaviour of Altmühl River (Bavaria).] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 57-68, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Im Bereich des Karstgebietes der Südlichen Frankenalb wurde der Einfluss der Schüttung verschiedener Karstquellen auf das hydrologische Verhalten der Altmühl untersucht. Jedoch lassen sich in Karstgebieten aufgrund der karsttypischen Besonderheiten keine einfachen N-Q- Beziehungen für die jeweiligen Quelleinzugsgebiete angeben. Daher wurden nur Schüttungsaufzeichnungen der Karstquellen als Inputdaten für die Modellierung des Abflussverhaltens der Altmühl herangezogen.

Mit Hilfe des ATV-DVWK-Gewässergütemodells wurden in mehreren Szenarien die Auswirkungen und die Bedeutung der Schüttung von Karstquellen und einigen Nebengewässern auf den Abfluss der Altmühl dargestellt. Insbesondere in den Sommermonaten tragen die Karstquellen erheblich zum Abfluss der Altmühl bei, während im Winter das Wasser überwiegend aus dem mittelfränkischen Vorland stammt.

**Abstract:** The influence of several karst springs and tributaries to the hydrological behaviour of a surface river was examined for the example of the Altmühl River (South Franconian Alb, Bavaria). Simple relations between precipitation and discharge of karst springs are uncommon for karst areas. Instead discharge hydrographs of the different karst springs were used for modelling of the hydrological properties of the surface river.

To evaluate the importance of the hydrological characteristics of karst springs and other tributaries to the Altmühl discharge the ATV-DVWK water quality model was applied. Especially during summer karst springs show a high contribution to the water quantity of the Altmühl River whereas in winter most water comes from the upper catchment, which is located outside the South Franconian Alb in the Mid-Franconian foreland.

**Schlüsselwörter:** Abflussmodellierung, ATV-DVWK-Gewässergütemodell, Hydrologie, Karsthydrologie

**Keywords:** runoff modelling, ATV-DVWK water quality model, hydrology, karst hydrology

---

\* Anschriften der Autoren:

Eva Olmo Gil (evaolmogil@ku-eichstaett.de), Martin Trappe, Michael Becht, Lehrstuhl für Physische Geographie, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Ostenstr. 18, D-85072 Eichstätt.

## 1. Einführung

Beziehungen zwischen Niederschlag (N) und Abfluss (Q) sind entscheidend für das Verständnis von Stoffeintrag und hydrologischen Austauschbeziehungen im Einzugsgebiet eines Flusses. Einzugsgebiete in Karstregionen bilden hierbei keine Ausnahme, doch die charakteristische Karsthydrologie mit verschiedenen unterirdischen Fließwegen und Strömungsmustern weist recht variable Niederschlags-Abfluss-Beziehungen auf (Trappe et al. 2010). Karstquellen zeigen nach Niederschlägen häufig unterschiedliche Schüttungsmuster in Bezug auf Niederschlagsereignisse (z.B. Glaser 1998, Valdes et al. 2007, Bonacci 2007, Fleury et al. 2007, Geyer et al. 2008, Moussu et al. 2009). Zur Untersuchung des Aquiferverhaltens und des Schüttungsverhaltens von Karstquellen sind daher längerfristige Datenreihen zu Niederschlag, Evapotranspiration, Witterungsentwicklung und der Quellschüttung ebenso nötig wie detaillierte Informationen zur Geomorphologie und Geologie des Einzugsgebietes der jeweiligen Quelle.

Zur Kennzeichnung der hydrologischen Auswirkung verschiedener Karstquellen und kleinerer Nebengewässer (Karsttributäre), die ebenso das Karstgebiet entwässern, auf den anschließenden Vorfluter müssen die jeweiligen Niederschlags-Abfluss-Beziehungen, die sich im Quellschüttungsverhalten widerspiegeln, berücksichtigt werden. Aufgrund des häufig abweichenden Verhaltens der einzelnen Quellen stellt sich das Problem, dass einerseits der Aufwand bei der Datenaufnahme für die jeweiligen Quelleinzugsgebiete erheblich zunimmt, andererseits sich der Arbeitsschwerpunkt von dem zu beobachteten Vorfluter entfernt. Insofern ist das Ziel der vorliegenden Arbeit quantitative Abflussbeziehungen eines Vorfluters zu seinen Karsttributären aufzuzeigen. Hierbei sollen mehrere Fragestellungen beantwortet werden:

1. Unterscheidet sich das hydrologische Verhalten eines Vorfluters von dem seiner Karsttributäre bzw. Karstquellen?
2. Wie variiert der hydrologische Einfluss des Karstgebietes auf den Vorfluter im Jahresverlauf bzw. bei unterschiedlichen Abflusssituationen?

Als Beispiel für die hydrologische Bedeutung der Zuflüsse für Oberflächengewässer in Karstgebieten wurde die Altmühl im Bereich der Südlichen Frankenalb mit ihren Karstquellen und Nebenbächen gewählt. Ein seit mehreren Jahren laufendes Messprogramm des Lehrstuhls

Physische Geographie der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt erfasst dabei die hydrologischen Rahmenbedingungen des Karstes der Südlichen Frankenalb und die Auswirkungen auf den Hauptvorfluter, die Altmühl. Hierbei ist das übergeordnete Ziel die Quantifizierung des Einflusses der Karsttributäre bzw. Karstquellen auf die Wasserqualität der Altmühl während verschiedener Witterungsszenarien.

Zukünftig wird sich damit die Frage nach dem jahreszeitlich unterschiedlichen Nährstoffeintrag in den Vorfluter Altmühl besser beantworten lassen, da diese Nährstoffe für die Geschwindigkeit einer alljährlichen Algenblütenentwicklung in der Altmühl verantwortlich sind.

## 2. Geographische, geologische und hydrologische Rahmenbedingungen des Untersuchungsgebietes

Geomorphologisch präsentiert sich die Südliche Frankenalb als eine leicht nach Süden geneigte, seicht-wellige Hochfläche, die von tief eingeschnittenen Tälern durchzogen wird. Im Norden grenzt sie sich mit dem Steilabfall der Jura-Schichtstufe gegen das schwach hügelige mittelfränkische Vorland ab. Das Donautal bildet im Süden die Grenze. Die Südliche Frankenalb ist Teil des schwäbisch-fränkischen Karstgebietes, das aus Kalksteinen und Dolomiten des Malm (Oberjura) aufgebaut ist. Die Basis dieser verkarsteten Karbonatgesteine bilden die wasserundurchlässigen Schichten des Doggers oder Mittleren Juras (Doppler et al. 2002). Die Region wird von kleineren Nebenflüssen der Donau entwässert, die weitgehend von Karstquellen gespeist werden. Zentraler Fluss ist die Altmühl, die die Region kreuzt (Abb. 1).

Hydrogeologisch zeigt sich in den Karbonatgesteinen ein Richtung Süden mächtiger werdender Karstaquifer, der im Liegenden von den Schichten des Doggers (Mittlerer Jura) weitgehend abgedichtet wird. Im Norden der Südlichen Frankenalb bestimmt die seichte Karstzone (Glaser 1998, Büttner et al. 2002) bei oberhalb der Talsohle gelegenen Dogger das Schüttungsverhalten der meisten Karstquellen, die rasch und heftig auf Niederschläge reagieren. Im Gegensatz dazu reagiert die Tiefe Karstzone im Süden deutlich gedämpfter oder je nach hydrologischen Randbedingungen gar nicht. Trappe et al. (2010) beschrieben anhand des Quellschüttungsmusters von Karstquellen der Südlichen

Frankenalb die Überlagerung von kurzfristigen Oberflächeneinflüssen (Schneesmelz- und Starkregenereignisse), die auf das Vorhandensein bevorzugter unterirdischer Fließwege im Einzugsgebiet hinweisen, und dem für die jeweilige Karstzone typischen jahreszeitlich bedingten Schüttungsverhaltens. Vor allem im Übergangsbereich zwischen seichtem und tiefem Karst, der zwischen Treuchtlingen und Eichstätt nördlich des Altmühltals verläuft, sind diese Wechselwirkungen im Quellschüttungsverhalten nachweisbar.

Die Altmühl stellt sich als ein polytropher, mäßig bis kritisch belasteter Fluss dar (Forstner et al. 2001). Ihr oberes Einzugsgebiet befindet sich im vorwiegend landwirtschaftlich geprägten Mittelfranken, von wo sie auch ihre Nährstoffbelastung ererbt. Nach dem Eintritt in die Südliche

Frankenalb bei Treuchtlingen ( $MQ=5,73m^3/s$ ) nimmt der Fluss Wasser der verschiedenen Karsttributäre auf (vgl. Tab. 1), am Pegel Eichstätt weist die Altmühl einen deutlich erhöhten Abfluss auf ( $MQ=9,93m^3/s$ ). Daten zur Schüttung von Karstquellen bzw. den Abflüssen kleinerer Zuflüsse liegen in unterschiedlichem, zumeist jedoch geringem Umfang vor (Unveröffentlichte Daten des Quellkatasters des WWA Ingolstadt, Zielhofer 2004). Sowohl für die Konzentration oder Verdünnung von Nährstoffen als auch für Abfluss und Fließgeschwindigkeit der Altmühl ist die Bestimmung des hydrologischen Verhaltens der in diesen Vorfluterschüttenden Karstquellen und kleineren Karsttributäre während verschiedener von entscheidender Bedeutung.



Abb. 1: Überblick zum Untersuchungsgebiet der Mittleren Altmühl, der Nebengewässer und ausgewählter Karstquellen (Bereich Treuchtlingen – Eichstätt).

	Zeitraum	Anzahl Daten	NQ [m <sup>3</sup> /s]	MNQ [m <sup>3</sup> /s]	MQ [m <sup>3</sup> /s]	MHQ [m <sup>3</sup> /s]	HQ [m <sup>3</sup> /s]	Quelle
<b>Pegel Treuchtlingen</b>	1941-2008	24837	0,28	1,16	5,73	53,5	183	HND Bayern
<b>Pegel Eichstätt</b>	1941-2008	24837	1,02	2,78	9,93	64,7	169	HND Bayern
<b>Schambach</b>	1990-2008	6575	0,01	0,03	0,42	2,79	7,76	HND Bayern
<b>Möhrenbach</b>	2007-2009	94	0,13	0,20	0,78	---	---	Eigene Daten
<b>Gailach</b>	2007-2009	149	0,20	0,27	0,76	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Attenbrunn</b>	2006-2008	69	0,03	0,07	0,09	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Obereichstätt</b>	2006-2009	253	0,40	0,66	0,95	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Kapellbuck</b>	2005-2009	345	0,03	0,05	0,11	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Almosmühle</b>	2005-2009	738	0,01	0,01	0,04	---	---	Eigene Daten

Tab.1: Gewässerkundliche Hauptzahlen der Altmühl (Pegel Treuchtlingen, Eichstätt), ihrer Nebengewässer und ausgewählter Karstquellen für den Bereich Treuchtlingen – Eichstätt. Aufgrund der zu kurzen eigenen Beobachtungszeiträume wurde auf die Angabe von Hochwasserdaten verzichtet (Quelle: LFU Bayern und eigene Daten).

### 3. Material und Methoden

Neben einer Datenrecherche zu bereits vorliegenden Daten wurde im Jahre 2006 ein umfangreiches und noch laufendes Dauermessprogramm zur Dokumentation der hydrologischen und chemischen Variabilität einzelner Positionen entlang der Altmühl zwischen Treuchtlingen und Eichstätt sowie verschiedener Tributäre (Oberflächengewässer und Karstquellen) begonnen. Zusätzlich zu den umfangreichen Beprobungen der Gewässer wurden insbesondere Abflussmessungen an den verschiedenen Karstquellen und Nebengewässern durchgeführt. Abhängig von der Größe der Gewässer wurden zur Abflussbestimmung ein hydrometrischer Kleinflügel bzw. der elektromagnetische Sensor FlowSense der Fa. SEBA Hydrometrie, der Tauchstab nach JENS und Verdünnungsmessungen nach punktueller Tracerinjektion (NaCl) eingesetzt. Da nach Brummeisl et al. (2007) Karstquellen oftmals wenig geeignet zur Einrichtung von aufzeichnenden Pegeln sind, musste an diesen Positionen auf ständige Einzelmessungen zurückgegriffen werden. Diese Messungen wurden ein- bis zwei mal wöchentlich vorgenommen, im Falle von niederschlags- oder schneesmelzbedingten Schüttungsvariationen wurde das Messintervall für den Zeitraum des Abflussereignisses auf tägliche Messungen verkürzt. Kurzfristige Schüttungsschwankungen unterhalb des Messintervalls können zwar bei der Datenauswertung nicht berücksichtigt werden, sie fallen jedoch bei einer jahreszeitlichen Betrachtungsweise kaum ins Gewicht. Daten der bereits existierenden Pegelpositionen Treuchtlingen, Eichstätt (beide Altmühl) und Schambach wurden vom Landesamt

für Umwelt Bayern zur Verfügung gestellt, die verwendeten Niederschlagsdaten ausgewählter Klimastationen stammen vom Agrarmeteorologischen Messnetz Bayern ([www.lfl.bayern.de](http://www.lfl.bayern.de)).

Zur Charakterisierung der Auswirkungen und der Bedeutung der Schüttung der Karstquellen und der Nebengewässer auf den Abfluss der Altmühl wurden hydrologische Modellbilanzen erstellt. Weiterhin wurde das ATV-DVWK-Gewässergütemodell für Fließgewässer zur Abflusssimulation der Altmühl verwendet (ATV-DVWK 2002). Ziel des Modells ist die Beschreibung eines Gewässers hinsichtlich seiner räumlichen Variation und zeitlichen Dynamik von Abfluss und Gewässergüte sowie die quantitative Simulation von Reaktionen des Gewässers auf unterschiedliche Rahmenbedingungen (z.B. Schüttung verschiedener Zuflüsse). Das Modell wurde von Forstner et al. (2001) mit Hilfe morphologischer Daten, vermessener Flussquerprofile und ermittelter Fließzeiten auf die Situation an der Altmühl angepasst. Es bezieht neben dem Wassertransfer auch Wechselwirkungen mit Grundwasser ein. Neben dem Modul zur Abflusssimulation liegen weitere Bausteine zur Gütesimulation vor (ATV-DVWK-AG 2002). Letztere wurden in vorliegender Arbeit nicht berücksichtigt, werden jedoch zukünftig bei der gewässerökologischen Modellierung eingesetzt werden. Somit erfolgte in vorliegender Arbeit nur eine Beschränkung auf die Modellierung der Abflusses. Für verschiedene Abflussverhältnisse des Jahres 2008 (Hoch- und Niedrigwasser) wurde der Einfluss der Karstquellen und Karsttributäre auf den Abfluss der Altmühl überprüft, da kaum Abweichungen von den mittleren, langjährigen Mitteln beobachtet wurden (vgl. Tab. 1). Ledig-

lich im März 2008 traten an der Altmühl zwei kleinere Hochwasserspitzen auf, die sich über das Verhalten der Karsttributäre und Karstquellen zeigten.

## 4. Resultate

### 4.1. Karstquellen und Karsttributäre der Altmühl

Das Karstsystem der Südlichen Frankenalb weist komplexe Zusammenhänge zwischen den Niederschlägen in den Einzugsgebieten und dem jeweiligen Schüttungsverhalten der verschiedenen Karsttributäre bzw. der Karstquellen auf. Generell lassen sich die Beziehungen zwischen Niederschlag und Schüttung über die geologische Struktur des Gebietes beschreiben. Apel (1971) und

Glaser (1998) erklärten das hydrogeologische Verhalten der verschiedenen Karstquellen mit deren Lage im seichten bzw. tiefen Karst. Karstquellen des seichten Karstes (z. B. des Schambachtales, vgl. Schober 2009) weisen eine sehr rasche und deutliche Reaktion auf Niederschlagsereignisse auf. Demgegenüber zeigen sich im tiefen Karst (Quellen entlang oder südlich des Altmühltals gelegen) erheblich abgeschwächte Abflusspeaks und nur ein saisonaler Gang der Schüttung (vgl. Abb. 2). Im Extremfall können auch keine Schüttungsreaktionen nach Niederschlägen beobachtet werden. Prinzipiell bestätigen die eigenen Ergebnisse dieses Bild. Im Detail können sich jedoch erhebliche Abweichungen zeigen, die für den Einzelfall der jeweiligen Karstquelle überprüft werden müssen.

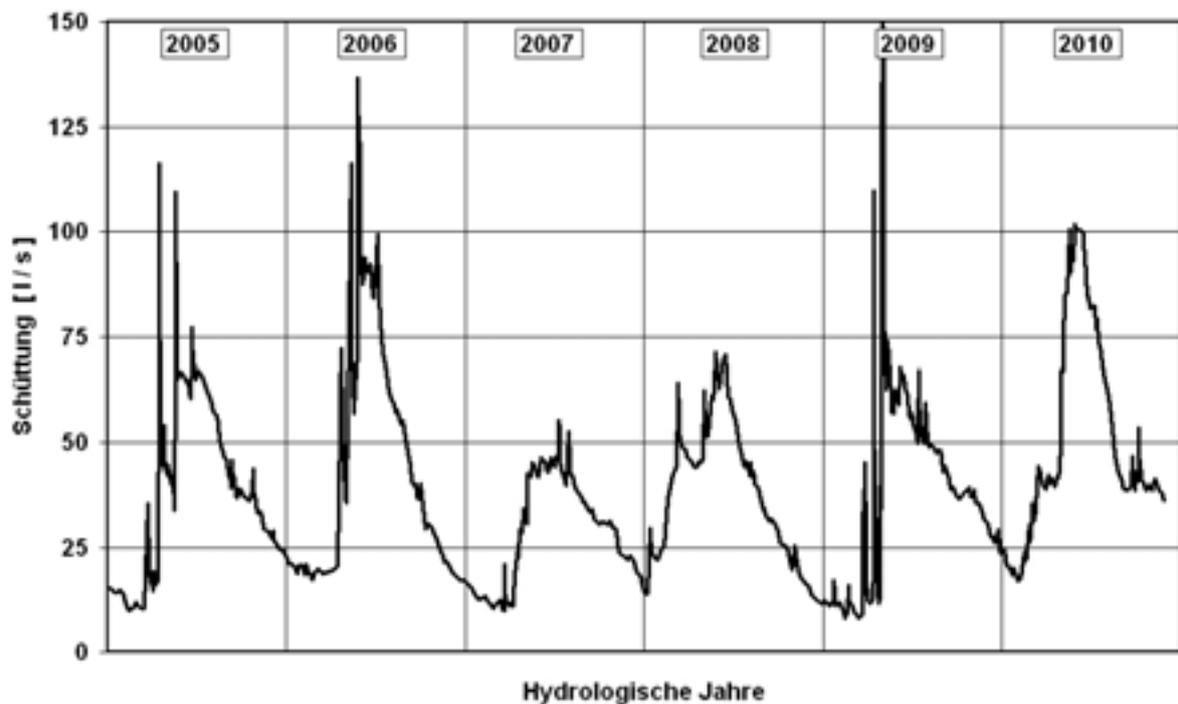


Abb. 2: Quellschüttung der Karstquelle Almosmühle östlich von Eichstätt für den Zeitraum 2005 bis 2010.

Nach Glaser (1998) kann die Karstquelle Almosmühle aufgrund der geologischen Struktur ihres Einzugsgebietes und der hydrogeologischen Rahmenbedingungen als eine typische Karstquelle des tiefen Karstes angesehen werden. Sie weist einen charakteristischen Jahresverlauf ihrer Schüttung mit einer etwa 2-3 monatigen Verzögerung des Basisabflusses auf. Die Schüttung ist jeweils im Frühjahr deutlich erhöht (ca. 60-100 l/s), im Herbst bis zum frühen Winter fallen die Werte bis auf 10-20 l/s ab (Trappe 2009). Diesem Jahresgang sind nur in den Frühjahresmonaten bei hohem Füllungsstand des Karstsystems kurz-

zeitige Abflusspeaks aufgesetzt, die auf Starkregen- bzw. Schneeschmelzeereignisse zurückzuführen sind. In diesen Fällen zeigt sich über die Schüttung die karstbedingte Differenzierung zwischen kluftgebundenen Wegsamkeiten (Conduitflow) und dem langsam strömenden Karstwasser in den Poren der Dolomite im Einzugsgebiet der Quelle (Matrixflow), weiterhin scheinen bei hohem Füllungsstand des Karstsystems zusätzliche Fließwege aktiviert zu werden. Im Sommer und Herbst lassen sich normalerweise keine Reaktionen auf Niederschlagsereignisse erkennen (Abb. 2), eine Ausnahme bilden die

kurzzeitigen sommerlichen Schüttungspeaks nach Starkregenereignissen im August 2005 und August 2010. Aufgrund des sich überlagernden Einflusses von Witterungsevents und normalen jahreszeitlich bedingten Schüttungsschwankungen ordneten Trappe et al (2010) diese Effekte als Charakteristikum einer Übergangszone zwischen seichtem und tiefem Karst am Nordrand des Altmühltals zu. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich auch für die Karstquelle Obereichstätt angeben. Letztendlich stellt sich jedoch jede Karstquelle als Individuum in Bezug auf Schüttung und den hydrogeologischen Rahmenbedingungen ihres Einzugsgebietes dar.

Die verschiedenen Nebenbäche der Altmühl zeigen je nach Größe des Einzugsgebietes, Anzahl und Schüttungsanteil der beteiligten Karstquellen ein ähnliches Bild, bei dem die Individualität jeder einzelnen Karstquelle jedoch nur abgeschwächt erkennbar ist. Die Schüttungsmuster dieser Karsttributäre gehorchen eher dem von Glaser (1998) beschriebenen jeweiligen hydrologischen Verhalten im seichten bzw. tiefen Karst.

Damit ergibt sich das Problem, dass bei einer Abflussmodellierung des Hauptvorfluters Altmühl die Niederschlags-Abfluss-Beziehungen der verschiedenen Teileinzugsgebiete aus dem Karstbereich separat betrachtet werden müssen. Um diese arbeitsintensive Untersuchung der Teileinzugsgebiete zu vermeiden wurde auf die Entwicklung derartiger Niederschlags-Abfluss-Beziehungen für jede Karstquelle bzw. jeden Karsttributär verzichtet. Alternativ bietet sich die Verwendung der aufgezeichneten Schüttungslinien der Karstquellen bzw. der Abflüsse der Karsttributäre als Eingangsgrößen für die Betrachtung der Altmühl an.

## 4.2. Altmühl

Die Altmühl weist alljährlich einen charakteristischen Verlauf mit Hochwässern jeweils im Spätwinter bis Frühjahr und Niedrigwassersituationen im Herbst auf. Je nach klimatischen Rahmenbedingungen können einzelne Abflusspeaks bereits Ende Herbst bzw. im frühen Winter auftreten, eher selten kommen Hochwässer auch im Hochsommer vor. Abb. 3e und 4 zeigen die Niederschlags- und Abflusssituation für das hydrologische Jahr 2008. Als Mengendifferenzen der

Abflüsse am Pegel Eichstätt und Treuchtlingen ergeben sich Abflusswerte, die dem Karsteinzugsgebiet im nordwestlichen Bereich der Südlichen Frankenalb zwischen Treuchtlingen und Eichstätt zuzuordnen sind (Abb. 4). Hierbei zeigt sich dessen besondere karstspezifische Ausprägung darin, dass trotz ähnlicher Niederschlagsbedingungen zwischen mittelfränkischem Vorland und der Südlichen Frankenalb auch im Winterhalbjahr erhöhte Abflusswerte auftreten, große Abflusspeaks aufgrund der dämpfenden Wirkung des Karstes jedoch nicht zu beobachten sind. Berechnet man die relativen Anteile des allochthonen Wassers (Pegel Treuchtlingen), das dem mittelfränkischen Vorland der Südlichen Frankenalb entstammt, bzw. des autochthonen Wassers aus der Karstregion (Abflussdifferenz der Pegel Eichstätt und Treuchtlingen), so zeigt sich für die Altmühl am Pegel Eichstätt für Januar bis April die verringerte Wasserzufuhr aus dem Karst (Abb. 4). Folglich lief in dieser Zeit eine Hochwasserwelle aus vorwiegend allochthonem Wasser durch das Altmühltal. Andererseits ist der Karstanteil in der Folgezeit (Mai bis September 2008) vergleichsweise hoch, da sich in dieser Zeit die verzögerten Karstquellschüttungen auswirken. Die Leerung der Karstspeicher führt anschließend auch zu einem Rückgang des Karstanteils zum Ende des Jahres.

Um den Beitrag einzelner Karstquellen und Karsttributäre zum Abfluss der Altmühl zu quantifizieren wurden für vier verschiedene Abflusssituationen (Mittelwert Januar/Februar 2008, Hochwassersituation an der Altmühl am 6.3.2008, Mittelwerte April/Mai bzw. August/September 2008) deren Schüttungsdaten mit dem Abfluss am Pegel Eichstätt verglichen (Tab. 2 und 3, Abb. 5). Bei dieser Berechnung wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass weder Verluste noch Zugewinne an Wasser zwischen Treuchtlingen und Eichstätt zu verzeichnen sind. Somit wurde ein möglicher unterirdischer, talabwärts fließender Wasserstrom in den Schottern und Sanden des Altmühltals bei der Kalkulation nicht berücksichtigt. Es zeigte sich jedoch, dass für alle betrachteten Abflusssituationen zusätzliche Mengen an Wasser benötigt werden, um den Abfluss am Pegel Eichstätt darstellen zu können (Tab. 2).

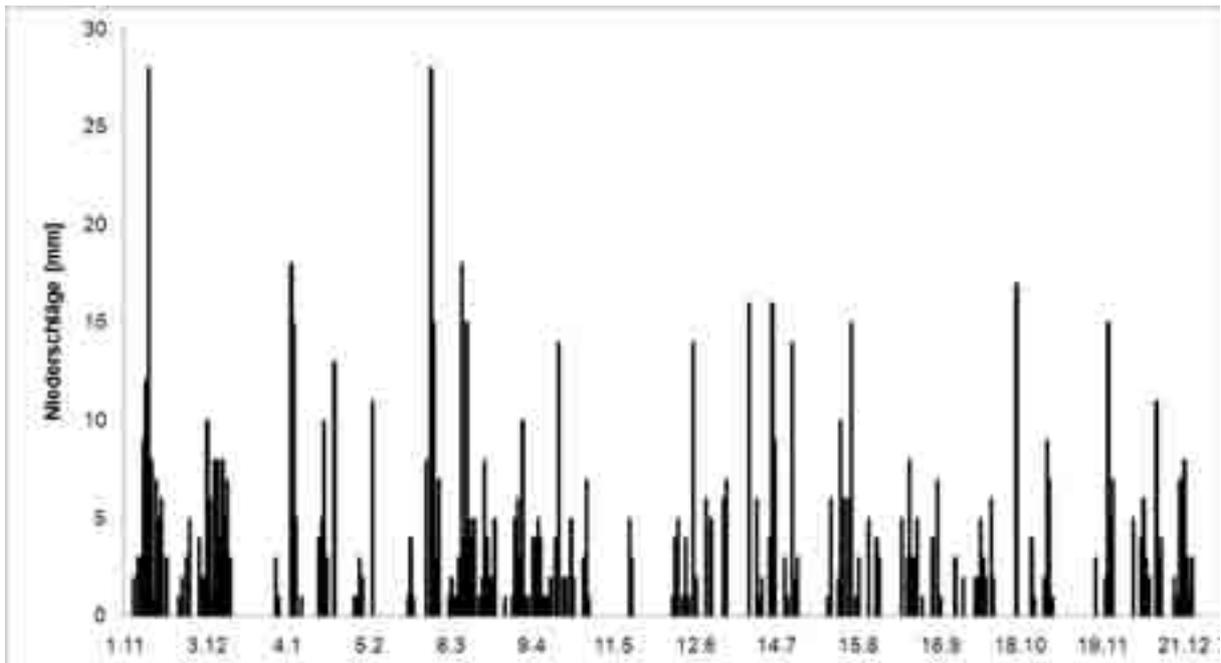


Abb. 3: Tagesniederschläge der Kläranlage Treuchtlingen für das hydrologische Jahr 2008 (Quelle: Jahresbericht 2008, Kläranlage Treuchtlingen, unveröffentlicht).

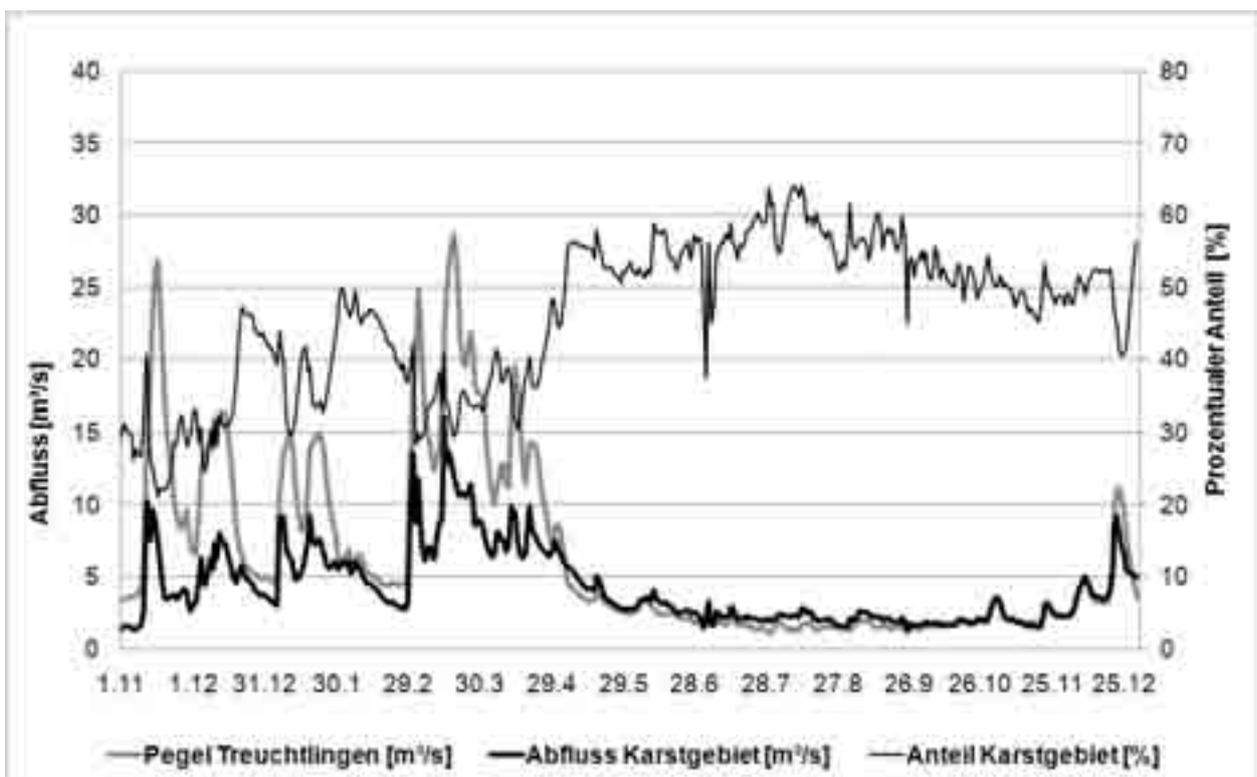


Abb. 4: Abflussdaten der Altmühl für die Pegel Treuchtlingen und Eichstätt im hydrologischen Jahr 2008 sowie Variationen des Abflussanteils aus dem Karsteinzugsgebiet zwischen Treuchtlingen und Eichstätt (bezogen auf die Pegelposition Eichstätt). Bei der Differenzberechnung des Karstabflusses wurde eine mittlere halbtägige Fließzeit zwischen den Pegeln Treuchtlingen und Eichstätt berücksichtigt. Datenquelle: LFU Bayern.

Dieses Wasser stammt aus diffusen Zutritten und kleineren Karstquellen, deren Anteil jedoch

gegenüber den Hauptquellen zurücktritt. Obwohl die meisten der bekannten Karstquellen im Ver-

laufe des durchgeführten Messprogrammes erfasst wurden, so existieren dennoch einige diffuse Quellaustritte und Hungerbunnen, die nur an wenigen Tagen im Jahr schütten. Der Einfach-

heit halber wurden in Tab. 2 und 3 nur die Anteile der Hauptquellen berücksichtigt, wogegen die kleineren Karstquellen in der diffus zugeführten Abflusskomponente verschwinden.

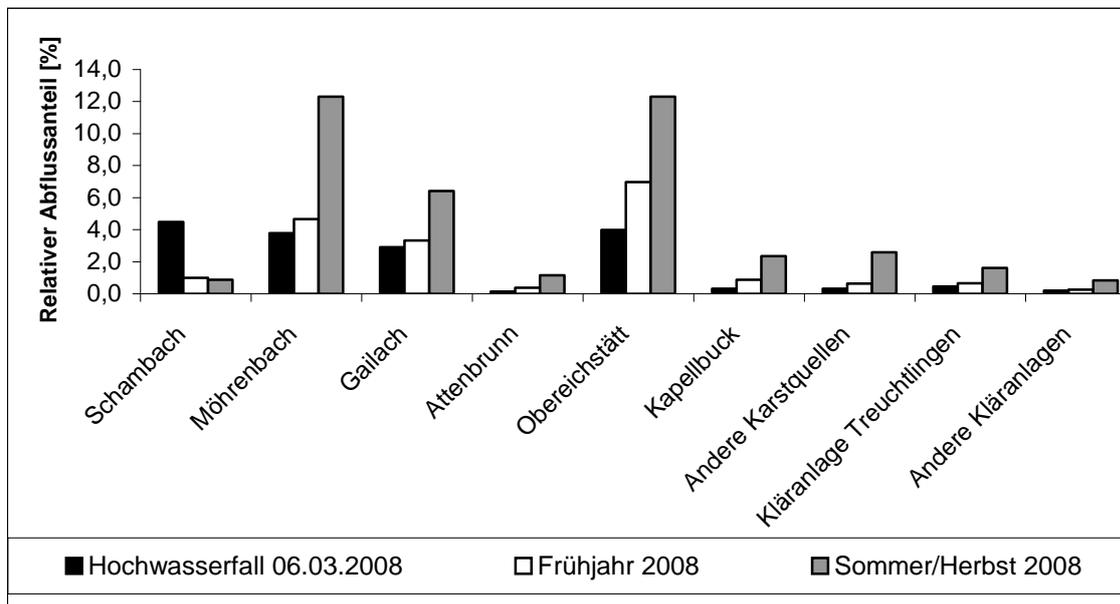


Abb. 5: Berechnete Anteile der verschiedenen Karsttributäre und Karstquellen am Abfluss der Altmühl für verschiedene Abfluss-Szenarien (Bezugsgrundlage: Abflussbilanz zwischen den Pegeln Eichstätt und Treuchtlingen), Quelle: LFU Bayern.

	01/02 2008	HW 06.03.2008	04/05 2008	08/09 2008
	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)
<b>Pegel Eichstätt</b>	13,24	31,00	14,44	3,62
<b>Pegel Treuchtlingen</b>	8,00	19,60	8,26	1,54
<b>Karst-Nebengewässer</b>	2,07	3,23	2,09	0,66
<b>Große Karstquellen</b>	1,48	2,42	2,02	1,13
<b>Kläranlagen</b>	0,15	0,15	0,15	0,10
<b>Diffuse Zu-/Abgänge</b>	1,54	5,60	1,92	0,19

Tab. 2: Abflüsse der Altmühlpegel Treuchtlingen und Eichstätt sowie verschiedener Karsttributäre der Altmühl für verschiedene Abfluss-Szenarien (Januar/Februar 2008, Hochwasserereignis 6.3.2008, April/Mai 2008, August/September 2008).

	01/02 2008	HW 06.03 2008	04/05 2008	08/09 2008
	[%]	[%]	[%]	[%]
<b>Oberlauf Altmühl</b>	60,4	63,2	57,2	42,5
<b>Karst-Nebengewässer</b>	15,6	10,4	14,5	18,2
<b>Große Karstquellen</b>	11,3	7,8	14,0	31,2
<b>Kläranlagen</b>	1,1	0,5	1,0	2,8
<b>Diffuse Zu-/Abgänge</b>	11,6	18,1	13,3	5,3
<b>Summe</b>	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 3: Berechnete Anteile der verschiedenen Karsttributäre am Abfluss der Altmühl für die verschiedenen Abfluss-Szenarien (siehe Tab. 2). Bezugsgrundlage ist die Pegelposition Eichstätt.

Es zeigt sich, dass bei Berechnung der Anteile verschiedener Tributäre, die der Altmühl zugeführt werden, jahreszeitliche Schwankungen zu beobachten sind. Wie bereits Abb. 4 zeigte, wird der Anteil allochthonen Wassers aus Mittelfranken im Sommer und Herbst durch den verstärkten Karstwasseranteil reduziert. Hier spielen insbesondere die Hauptquellen im Karst eine Rolle (Tab. 2 und 3). Es ist ein relativ großer Anteil diffus in das Altmühltal zugeführten Wassers nachweisbar, der die Schüttung der bekannten kleineren Karstquellen erheblich übersteigt. Insbesondere in der ersten Jahreshälfte ist diese Komponente bedeutsam, während der Anteil im Spätsommer und Herbst zurückgeht. Mehr noch ist in Trockenheitsphasen auch mit diffusen Verlusten von Altmühlwasser im Bereich des Karstgebietes der Südlichen Frankenalb zu rechnen, sodass der bilanzierte Wert diffuser Zu-/Abgänge für August/September 2008 einen Wert nahe Null erreicht (Tab. 2).

Abb. 5 zeigt einen unterschiedlichen Einfluss der verschiedenen Karstquellen und Nebengewässer auf die Altmühl für die verschiedenen Szenarien. (Bezugsbasis ist der Karstwasseranteil am Altmühlpegel Eichstätt). Während die seichten Karstquellen, die die Schambach speisen, im Hochwasserfall bzw. im Frühjahr erhebliche Mengen an Wasser der Altmühl zuführen, so ist ihr Einfluss im Sommer und Herbst eher unbedeutend. Demgegenüber spielen die anderen beiden Karsttributäre (Möhrenbach, Gailach) sowie die Hauptquellen im Bereich des tiefen Karstes (Karstquellen Attenbrunn, Obereichstätt, Kapellbuck) für die Wasserführung der Altmühl insbesondere im Sommer und Herbst die entscheidende Rolle.

Mit Hilfe des ATV-DVWK-Gewässergütemodells (ATV-DVWK 2002) wurde der Altmühlabfluss modelliert, wobei als Inputdaten keine Niederschlagsdaten eingingen, sondern die jeweiligen Schüttungen der verschiedenen Karstquellen und Karsttributäre.

Für den Hochwasserfall 6. März 2008 stammt der größte Anteil des Wassers aus dem Oberlauf der Altmühl NW von Treuchtlingen (Abb. 6). Somit wird der Abfluss der Altmühl durch allochthones Wasser aus dem mittelfränkischen Vorland der Südlichen Frankenalb dominiert. Gemäß Tab. 3 ist die Wasserzufuhr über Karstquellen und Karsttributäre aus dem Gebiet zwischen Treuchtlingen und Eichstätt demgegenüber gering. Erhöhte Niederschläge Ende Februar/Anfang März 2008 und die einsetzende Schneeschmelze führten trotzdem zu erhöhten

Schüttungen der Karstquellen und Karsttributäre (Abb. 3 und Tab. 2).

Übliche Frühjahrsituationen werden über die Daten Januar/Februar bzw. April/Mai 2008 dargestellt. Bei angenähert ähnlichen Abflusswerten für den Pegel Treuchtlingen unterscheidet sich das hydrologische Verhalten der Altmühl in ihrem weiteren Verlauf durch das Karstgebiet bis nach Eichstätt (Abb. 6). Durch die 2-3 monatige Verzögerung der winterlichen Schüttungserhöhung der Karstquellen des tiefen Karstes ist der Anteil zugeführten Karstquellwassers im April/Mai erhöht (Tab. 3). Prinzipiell gilt Gleiches auch für die Karsttributäre Gailach und Möhrenbach des tiefen Karstes, die aus dem seichten Karst kommende Schambach zeigte ihr winterliches Abflussmaximum eher in den Monaten Januar bis Mitte April 2008.

Das spätsommerliche Abfluss-Szenarium der Altmühl wirkt scheinbar unspektakulär (Abb. 6). Tatsächlich ist der Anteil des aus dem Karstgebiet stammenden Wassers gemäß Tab. 3 jedoch deutlich erhöht. Zwar geht die Schüttung von Karstquellen und Karsttributären in diesen Monaten ebenso zurück (wiederum mit Zeitverzug), hat jedoch noch nicht Basisabflussbedingungen erreicht (vgl. Abb. 2). Im Vergleich zu den minimalen Mengen allochthonen Wassers aus Mittelfranken (Basisabfluss) ist die Schüttung von Karstwasser noch relativ hoch (Tab. 3).

Somit unterstreicht die Modellierung des Altmühlabflusses (Abb. 6) nochmals die Bedeutung der verschiedenen Karsttributäre und Karstquellen des Karstgebietes zwischen Treuchtlingen und Eichstätt auf das Abflussverhalten der Altmühl. Im Vergleich zum Gesamtabfluss der Altmühl ist die Karstwasserkomponente umso bedeutender je niedriger die Abflüsse der Altmühl sind. Bei höheren Anteilen allochthonen Wassers aus Mittelfranken nimmt der Anteil des Karstwassers am Altmühlabfluss ab. Trotzdem zeigt sich über den Verlauf des Modellabflusses der Einfluss der größeren Tributäre und Quellen im Karstgebiet zwischen Treuchtlingen und Eichstätt. Die jeweilige Bedeutung aller anderen kleineren Karstquellen ist dagegen geringer einzustufen. Würde man die Anteile diffuser Zuflüsse zur Altmühl jedoch unberücksichtigt lassen (nicht dargestellt), so ergäben sich erhebliche Differenzen zwischen den modellierten Abflüssen am Pegel Eichstätt im Vergleich zu den tatsächlich beobachteten Daten. Insofern stellt diese diffuse Zufuhr aus dem Karstgebiet in der Summe eine nicht unerhebliche Komponente dar.

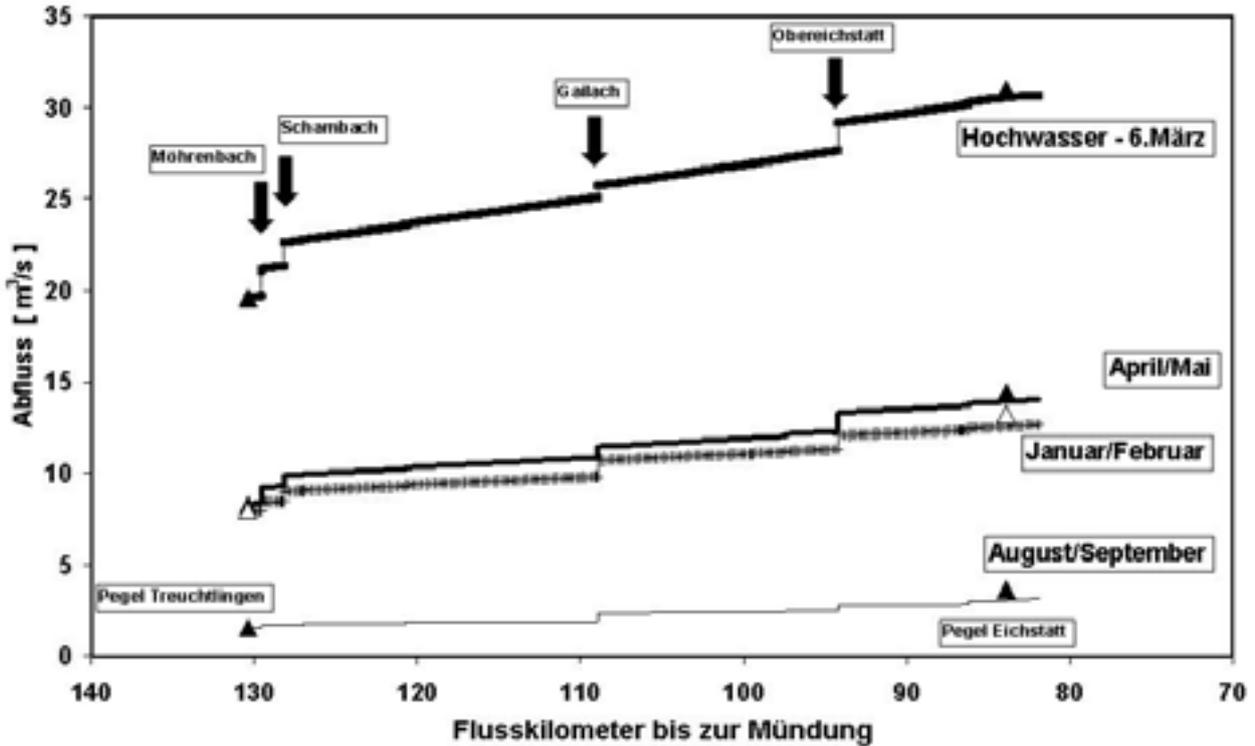


Abb. 6: Abflussmodellierung der Altmühl für verschiedene Abfluss-Szenarien im Jahre 2008 mit Hilfe des ATV-DVWK-Gewässergütemodells unter Verwendung der Schüttungen einzelner Karstquellen und kleinerer Nebengewässer. Diffuse Zuflüsse und Verluste wurden bei der Berechnung gemäß Tab. 2 berücksichtigt. Die Dreiecke geben die tatsächlichen Abflussdaten an den Pegeln Treuchtlingen bzw. Eichstätt wieder (Quelle: LFU Bayern).

## 7. Schlussfolgerungen und erste Diskussion

Für den Karst der Südlichen Frankenalb kann ein komplexer Zusammenhang zwischen den Niederschlägen in den verschiedenen Einzugsgebieten und dem jeweiligen Schüttungsverhalten von Karstquellen bzw. kleineren Karsttributären festgehalten werden. Einerseits reagieren je nach Jahreszeit die Karstquellen in unterschiedlichem Maße auf Niederschläge. Vergleichbare Verhaltensmuster wurden bereits von Glaser (1998) für diverse Quellen der Südlichen Frankenalb und von Armbruster & Selg (2006) für die Blautopfquelle in Baden-Württemberg beschrieben. Andererseits variieren aufgrund der hydrologischen Besonderheiten im Karst die Niederschlags-Abfluss-Beziehungen der verschiedenen Einzugsgebiete von Karstquellen und Karsttributären derart, dass es sinnvoller erscheint, anstelle einer Vielzahl unterschiedlicher und ungleich zu gewichtender Beziehungsmuster der einzelnen Karstquellen zu ihren jeweiligen Einzugsgebieten, die beobachteten quellspezifischen Schüttungsdaten zur Modellierung des Abflusses der Altmühl heranzuziehen. Es wurde daher darauf

verzichtet, für jede Karstquelle eigene Niederschlags-Abfluss-Beziehungen zu entwickeln. Auch die Studien zu Interaktionen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser aus Karstgebieten (Soulsby et al. 2007, Bailly-Comte et al. 2009, Musgrove et al. 2010) verzichteten auf separate hydrologische Detailbetrachtungen einzelner Teileinzugsgebiete und konzentrierten sich auf die unterschiedlichen Beiträge von Grundwasser zu Oberflächengewässern in verschiedenen hydrologischen Situationen (Hochwasser und Basisabfluss).

Beim Vergleich der Schüttungssummen der Karsttributäre mit dem aus Pegeldaten der Altmühl errechneten Abflussanteil des Karstgebietes zwischen Treuchtlingen und Eichstätt ergaben sich Hinweise auf saisonal bedingte Schwankungen von nicht-quellgebundenen Zuflüssen der Altmühl bei ihrem Lauf durch die Karstregion (Tab. 2 und 3). Obwohl Abflussbilanzen für Karstgebiete generell als problematisch angesehen werden müssen, können jedoch die berechneten Daten auch Hinweise auf diffuse Zuflüsse bzw. gar Verluste liefern. Diese Daten wurden bei der Abflussmodellierung der Altmühl entsprechend berücksichtigt.

Im Winter und Frühjahr 2008 überwogen die Anteile an allochthonem Wasser aus dem mittelfränkischen Vorland der südlichen Frankenalb, während im Sommer und Herbst 2008 die Karsttributäre und Karstquellen für die Wasserführung der Altmühl die entscheidende Rolle spielten. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen von Soulsby et al. (2007), die für den Basisabfluss schottischer Oberflächengewässer eine Abhängigkeit der Alkalinität zur Geologie der Einzugsgebiete feststellten. Andererseits zeigen diverse Untersuchungen, dass sich im Falle ansteigender Karstwasserspiegel (Hochwasser im Karst) Karstquellen hydrologisch und chemisch ähnlich verhalten (Trappe 2007, Bailly-Comte et al. 2009, Musgrove et al. 2010). Leider konnten im vorliegenden Datenbestand trotz der verzögerten Schüttungsreaktionen der Karstquellen keine eindeutigen Hinweise des Einflusses von Hochwasserabflüssen im Karst auf den Hauptvorfluter Altmühl erkannt werden ohne dass gleichzeitig eine Zunahme allochthonen Wassers aus Mittelfranken auftrat.

Da die Arbeiten zur Abfluss- und Gewässergütemodellierung der Altmühl derzeit noch laufen, repräsentieren die gezeigten Daten zunächst nur einen vorläufigen Zwischenstand, ebenso müssen die vorgestellten Ergebnisse durch die Einbeziehung weiterer Laufabschnitte der Altmühl und größerer Zeitspannen überprüft werden. Insbesondere bei Betrachtung weiterer Aspekte (z. B. der Gewässergüte), bei denen der Abfluss als eine entscheidende Komponente zu berücksichtigen ist, erscheint jedoch der aufgezeigte Ansatz unter Verwendung von Quellschüttungsdaten ohne Berücksichtigung der jeweils zugrunde liegenden Niederschlagsdaten hilfreich. Letztendlich bestätigt sich derzeit noch die Feststellung von Bailly-Comte et al. (2009), dass die Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen in Karstaquiferen noch nicht gänzlich verstanden werden.

## 8. Literatur

- Apel, R. (1971): Hydrogeologische Untersuchungen im Malmkarst der Südlichen und Mittleren Frankenalb. – *Geologica Bavarica*, 64: 268-355.
- Armbruster, V. & Selg, M. (2006): Der Abfluss des Blautopfs im Spiegel der Grundwasserneubildung (Oberjura-Karst, Süddeutschland). – *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten*, C 98: 1-16.
- ATV-DVWK-AG (2002) (Hrsg.): Handbuch ATV-DVWK-Gewässergütemodell, Version GB-4.2; Hennef.
- Bailly-Comte, V., Jorde, H. & Pistre, S. (2009): Conceptualization and classification of groundwater-surface water hydrodynamic interactions in karst watersheds: Case of the karst watershed of the Coulazou River (Southern France). – *Journal of Hydrology*, 376 (3-4): 456-462.
- Bonacci, O. (2007): Analysis of long-term (1878-2004) mean annual discharges of the karst spring Fontaine de Vaucluse (France). – Symposium "Time in Karst", 14.-18.3.2007, Postojna. – KWI Special Publication, 12: 151-156.
- Brummeisl, C., Schober, S. & Trappe, M. (2007): Possibilities and problems of discharge measurements in karst areas – examples from the South Franconian Alb (Germany). – Short Paper 15th Karstological School, Postojna: 5-8.
- Büttner, G., Diepolder, G., Dobner, A., Fritzer, T., Pukowitz, C., Sittles, E., Spörlein, T. & Wagner, B. (2002): Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte 1:100.000, Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 10 Ingolstadt. – Bayerisches Geologisches Landesamt: 127 S.; München.
- Doppler, G., Fiebig, M. & Meyer, R. K. F. (2002): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:100.000, Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 10 Ingolstadt. – Bayerisches Geologisches Landesamt: 172 S.; München.
- Fleury, P., Plagnes, V. & Balakowicz, M. (2007): Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France). – *Journal of Hydrology*, 345: 38-49.
- Forstner, S., Kaul, U. & Vennebusch, K. (2001): Abwasserentsorgung der Karstflächen zur Altmühl. Gewässergütesimulation im Bereich Treuchtlingen / Dietfurt. – LFU Augsburg: 15 S. – (Unveröffentlichter Bericht).
- Geyer, T., Birk, S., Liedl, R., & Sauter, M. (2008): Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. – *Journal of Hydrology*, 348: 452-463.
- Glaser, S. (1998): Der Grundwasserhaushalt in verschiedenen Faziesbereichen des Malm der Südlichen und Mittleren Frankenalb. – *GSF-Bericht 2/98*: 135 S.; Neuherberg.
- Musgrove, M., Stern, L. A. & Banner, J. L. (2010): Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area, central Texas: Implications for surface water and groundwater interaction in a karst area. – *Journal of Hydrology*, 388 (1-2): 144-156.
- Schober, S. (2009): Die Verletzlichkeit von Karstwasser im Seichten Karst der Südlichen Frankenalb. – Dissertation, Mathematisch-Geographische Fakultät der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt: 201 S.; Eichstätt.
- Soulsby, C., Tetzlaff, D., van den Bedem, N., Malcolm, I. A., Bacon, P. J. & Youngson, A. F. (2007): Inferring groundwater influences on surface water in montane catchments from hydrochemical sur-

- veys of springs and streamwaters. – *Journal of Hydrology*, 333 (2-4): 199-213.
- Trappe, M. (2007): Möglichkeiten und Probleme von Abflussmessungen in Karstgebieten. – in: VdHK (Hrsg.): Tagungsband „Untertage Alpin“ – Berchtesgaden, 9.-11.11.2007: 67-68; München.
- Trappe, M. (2009): Sedimentpetrographie, Gliederung und Genese von Karstsedimenten, dargestellt am Beispiel der Südlichen Frankenalb. – Habilitationsschrift, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt: 216 S. – (Unveröffentlicht).
- Trappe, M., Schober, S. & Brummeisl, C. (2010): Hydrological Observations in the transition zone between Shallow and Deep Karst of the Southern Franconian Alb (Germany). – *The Geological Society of America, Abstracts with Programs (Joint Meeting Northeastern & Southeastern, Baltimore 14-16 March 2010)*, 42 (1): 155.
- Valdes, D., Dupont, J.-P., Massei, N., Laignel, B. & Rodet, J. (2006): Investigation of karst hydrodynamics and organization using autocorrelations and T- $\Delta$ C curves. – *Journal of Hydrology*, 329: 432-443.
- Zielhofer, C. (2004): Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung im Karst der Mittleren Altmühlalb. – Dissertation Universität Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätter Geographische Arbeiten, 13: 238 S.; Eichstätt.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 69-82, 6 Abb., 3 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Zustand, Leitbild, Defizite, Maßnahmenvorschläge und Probleme bei der Renaturierung des Oberflächenwasserkörpers (OWK) Wenkbach

Heiko Trier & Christian Opp\*

Trier, H. & Opp, Chr. (2011): Zustand, Leitbild, Defizite, Maßnahmenvorschläge und Probleme bei der Renaturierung des Oberflächenwasserkörpers (OWK) Wenkbach. [Status, general master plan, deficits, proposals for measures and problems during the renaturation of the River Wenkbach.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 69-82 Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Der Oberflächenwasserkörper (OWK) Wenkbach repräsentiert ein kleines Fließgewässer, dessen Zustand weit von der Zielvorgabe der EG-WRRL abweicht. Entsprechend den Vorgaben der EG-WRRL muss der OWK Wenkbach als ein erheblich veränderter Wasserkörper bezeichnet werden. Daraus ergibt sich ein Verbesserungsbedarf, der mittels Renaturierung umgesetzt werden kann. Der Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen gingen die Einbeziehung vorhandener Grundlageninformationen zur biologisch-chemischen Gewässergüte, zur morphologischen Gewässerstruktur sowie der allgemeinen Einzugsgebietscharakteristik und eigens durchgeführte Erhebungen zur biologisch-chemischen Gewässergüte, zur morphologischen Gewässerstruktur, zur ökologischen Durchgängigkeit sowie zur Landnutzung und Vegetation im Einzugsgebiet voraus.

Die Maßnahmenvorschläge wurden gezielt für die Verbesserung des gewässermorphologischen Zustands mit dem Ziel der Initiierung eigendynamischer Entwicklungen für die bis jetzt per Gewässerstrukturgütekartierung schlechter bewerteten Unterläufe von Wenk- und Walkerbach erarbeitet.

Durch den Vergleich des ökologischen Ist-Zustands des Wasserkörpers mit den Leitbildcharakteren für diesen Gewässertyp, konnten die bestehenden ökologischen Defizite beider Bäche heraus gearbeitet werden. Unter Berücksichtigung der Defizite sowie der im Einzugsgebiet bestehenden Restriktionen war es möglich, die Entwicklungsziele verschiedener Maßnahmenvorschläge aufzuzeigen. Im Zuge dieser Maßnahmenvorschläge wurden sieben konkrete Renaturierungsmaßnahmen erarbeitet und Handlungsempfehlen für die Beseitigung von 32 Wanderhindernissen sowie für die zukünftige Gewässerunterhaltung ausgesprochen. Zwei davon werden exemplarisch dargestellt. Abschließend findet eine Erörterung der während der Renaturierungsplanung auftretenden, allgemein repräsentativen Probleme und Schwierigkeiten statt.

**Abstract:** The hydrological surface water body Wenkbach represents a small river. Its status quo conditions are far from EU Water Directive aims. The consequence is a strong need of improvements, which can be realized with the help of renaturation measures. Proposals for appropriate actions were given on the basis of existing data for water quality, river structure quality and water basin data, as well as on our surveys of the water quality, the river structure quality, the stream flow, land use and vegetation. These proposals are supposed to improve the hydro-morphological structure with the help of self-regulation processes at the highly degraded river structure quality within the downstream sections of both the Wenkbach and the Walgerbach Rivers. The comparison between the ecological status quo and the general master plan ("Leitbild") allows the identification of ecological deficits for both rivers. Development targets for different renaturation measures were detected under consideration of the existing deficits and restrictions within the water basin. Seven concrete renaturation measures were suggested. Recommendations were given for the clearance of 32 migration barriers and for the future river management. Two examples are discussed in detail. Finally, apparent problems and difficulties that have occurred during the planning phase of the renaturation process are discussed.

---

\* Anschriften der Autoren:

Dipl.-Geol. Heiko Trier (reirtokieh@gmx.de), Phillips-Universität Marburg, Fachbereich Geographie, Deutschhausstr. 10, D-35037 Marburg;

Prof. Dr. Christian Opp (opp@staff.uni-marburg.de), Phillips-Universität Marburg, Fachbereich Geographie, Deutschhausstr. 10, D-35037 Marburg.

**Schlüsselwörter:** Biologische Qualitätskomponenten, EG-WRRL, biologisch-chemische Gewässergüte, Gewässerstrukturgüte, Leitbilder, ökologische Durchgängigkeit, Renaturierung, strukturverbessernde Maßnahmen

**Keywords:** status, general master plan, deficits, proposals for measures and problems during the renaturation of River Wenkbach

## 1. Einleitung, Problemstellung und Untersuchungsgebiet

Für die Aufrechterhaltung der ökologischen Funktionsfähigkeit von Fließgewässern sind deren Dynamik und Strukturvielfalt entscheidende Steuergrößen des gesamten Fließgewässerökosystems. Die natürliche Dynamik und Strukturvielfalt der Gewässer wurde in den vergangenen Jahrhunderten, insbesondere aber im 19. und 20. Jh., durch direkte und indirekte anthropogene Eingriffe bei den meisten mitteleuropäischen Bächen und Flüssen stark eingeschränkt bis zerstört (Opp 1998). Ursache dafür war der fast flächendeckende Gewässerausbau der letzten 150 Jahre (VDG 2004). Das Problem einer mangelhaften biologisch-chemischen Gewässergüte wurde in den 1980er Jahren durch die Verbesserung der Reinigungskapazitäten der Kläranlagen weitestgehend beseitigt. Die große Mehrzahl deutscher Fließgewässer weist inzwischen die Gewässergüteklasse II auf, welche das gewässerschutzpolitische Ziel hinsichtlich der Wasserqualität von Fließgewässern darstellt (DVWK 240/1996). Weitere wichtige Voraussetzungen für einen guten ökologischen Zustand unserer Fließgewässer sind eine ökologisch funktionsfähige Gewässermorphologie sowie deren lineare Durchgängigkeit für wandernde Arten der Gewässerbiozönose (Gebler 2005). Hinsichtlich dieser beiden Faktoren bestehen flächendeckend noch enorme Defizite sowie ein sich daraus ableitender, dringender Handlungsbedarf (Jürging 2005), so auch im Untersuchungsgebiet, beim Oberflächenwasserkörper (OWK) Wenkbach.

Das Einzugsgebiet des OWK Wenkbach setzt sich aus den beiden Teileinzugsgebieten von Wenkbach und Walgerbach zusammen und liegt im Süden des Landkreises Marburg-Biedenkopf (Hessen), im Übergangsbereich zwischen den naturräumlichen Haupteinheitengruppen des Westerwaldes und des Westhessischen Berg- und Senkenlandes (Klausing 1974). Das Relief im Einzugsgebiet weist zwei charakteristische Grundeigenschaften auf. Zum einen, eine Geländeabflachung entlang einer von Nordwesten nach Südosten verlaufenden Achse sowie zum anderen der Hügellandcharakter im flächenmäßig weitaus

größeren Nordosten und einen Ebenen- bzw. Flachlandbereich im Südosten, im Auental der Lahn. Die Ober- und Mittelläufe beider Bäche weisen einen ausgesprochenen heterogenen geologischen Bau auf: konglomeratische Grauwacken und Schiefer, Tonschiefer und schuttreiche periglaziäre Umlagerungsdecken aus Lösssand und Lösslehm bilden das anstehende Gestein. Der Bereich der Unterläufe, im Sohllental der Lahn gelegen, ist geprägt durch anstehende holozäne Terrassenkiese, -sande und -lehme (MGG 1990). Zwischen der Lahnaue und den Krenal- und Oberlaufabschnitten ist ein markanter Wandel der Bodendecke zu beobachten. Die Böden der Lahnaue sind großflächig Vegon und Gley-Vegon aus Auenschluff und/oder -ton über Auenlehm und/oder -ton verbreitet. Grundwassermerkmale sind zwar in den Profilen noch gut dokumentiert, allerdings resultieren sie überwiegend aus Grundwasserschwankungen vor der Eindeichung der Lahn in den 1930er Jahren.

Entlang der Unterläufe von Wenk- und Walgerbach kommen flächenhaft überwiegend tiefgründige und ertragreiche Parabraunerden und Pseudogley-Parabraunerden aus Lösslehm bestimmten Fließerden über Fließschutten und -kiesen vor. In den Oberläufen des Einzugsgebietes treten mit geringer werdenden Lösslehmanteilen Lösssand-Fließerden und Fließschutte auf, in denen sich Braunerden sehr unterschiedlicher Mächtigkeit entwickelt haben.

Die ursprüngliche Vegetation im Einzugsgebiet sowie im gesamten mittleren Lahntal ist nirgends mehr erhalten. Sie wurde im Verlaufe der Umwandlung des Naturraums in eine Kulturlandschaft durch den Menschen ausgeräumt (Blume 1957). Die Oberflächengewässer werden deshalb lediglich durch einen etwa 1,5 m breiten Uferstreifen aus Brennesseln, Gräsern, Ackerrunkräutern und ein paar vereinzelt Weiden und Erlen begleitet. Die landwirtschaftliche Nutzung ist im Bereich der ertragsreichen Böden der Unterläufe besonders intensiv. Der Großteil dieser Flächen wird ackerbaulich genutzt, der Rest der Flächen als Dauergrünland bewirtschaftet. Brachflächen oder Flächen die der freien Sukzession überlassen werden, fehlen hier vollständig. Der landwirtschaftliche Nutzungsgrad

nimmt in Richtung der Mittel- und Oberläufe deutlich ab. Die Krenal- und Epirithralabschnitte von Wenkbach und Walgerbach sind überwiegend mit Wirtschaftswald bedeckt (Gemeinde Weimar 2004).

Größtenteils sind Wenk- und Walgerbach aber als landwirtschaftlich stark beeinflusste und innerörtlich stark ausgebaute Fließgewässer zu bewerten und müssen deshalb gemäß EG-WRRL als erheblich veränderter Wasserkörper eingestuft werden. In ihrem Verlauf durchfließen Wenk- und Walgerbach die Ortslagen Germershausen, Oberweimar, Wenkbach, Willershausen, Kehna und Niederwalgern. Hinsichtlich des ökologischen Zustandes müssen die Unterläufe beider Bäche deutlich schlechter bewertet werden als die Mittel- und Oberläufe. Während in den Mittel- und Oberläufen weitestgehend eine verhältnismäßig gute Gewässerstruktur vorzufinden ist, sind die Unterläufe des OWK durch einen stark linearisierten und sehr strukturarmen Gewässerverlauf gekennzeichnet (Abb. 1 und 2). Aufgrund ihres insbesondere gewässerstrukturell schlechten Zustandes kann davon ausgegangen werden, dass die Unterläufe von Wenk- und Walgerbach für wandernde Arten als ökologische Gesamtbarriere zwischen den Mittel- und Oberläufen und der Lahn fungieren.



Abb. 1: Wenkbach Unterlauf, mit strukturarmen, verkrauteten Trapezprofil. Foto: H. Trier (2009).

Das Einzugsgebiet des gesamten OWK Wenkbach hat eine Größe von 20,77 km<sup>2</sup> und ist gemäß EG-WRRL dem Bearbeitungsgebiet „Mittlerer Lahn Teil IV“ zuzuordnen. Die Lauflänge des Wenkbaches beträgt 7,05 km und die des Walgerbaches 7,85 km. Das Abflussverhalten ist durch relativ große Schwankungen im Jahresverlauf gekennzeichnet. Die Abflussmenge des

Wasserkörpers beträgt im Bereich der Mündung bei MQ 107,3 Liter pro Sekunde und bei MNQ 4,9 Liter pro Sekunde (HLUG 2008).

In den Sommermonaten fallen große Teile des Wasserkörpers im Bereich der Oberläufe trocken. Beide Bäche gehören zum Fischgewässertyp der oberen Forellenregion.



Abb. 2: Walgerbach Unterlauf, tief eingeschnitten, mit sehr geringer Laufkrümmung und zu schmaler Uferzone. Foto H. Trier (2009).

Nach den Zielvorgaben der EG-WRRL sollen alle OWK einen guten ökologischen Zustand bis zum Jahre 2015 erreichen. Entsprechend Artikel 4 der EG-WRRL gilt für erheblich veränderte Wasserkörper eine leicht abgestufte Zielvorgabe, d.h. ein gutes ökologisches Potential und ein guter chemischer Zustand. Der gute ökologische Zustand eines Fließgewässers gilt nach Anhang V der EG-WRRL als erreicht, wenn die Werte der biologischen Qualitätskomponenten zwar geringe, anthropogen bedingte Veränderungen aufweisen, aber nur geringfügig vom Zustand bei Abwesenheit störender Eingriffe abweichen (Meier 2000). Die biologischen Qualitätskomponenten setzen sich aus den Gruppen Makrophyten, Phytobenthos, Phytoplankton, Ichthyozönose und Makrozoobenthon zusammen und werden seit 2006 durch Monitoringprogramme ökologisch überwacht (Korn et al. 2005). Die Umsetzung der EG-WRRL ist an einen bestimmten zeitlichen Rahmen gebunden (Tab.1).

Die Aufstellung der Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme musste demnach bis Ende 2009 durch die zuständigen Behörden (in Hessen die jeweiligen Regierungspräsidien) abgeschlossen sein. Bis zum Jahre 2012 hat die Umsetzung dieser Maßnahmen stattzufinden (Patt et al. 2004). Die Ziele der EG-WRRL sollen bis zum Jahre 2015 erreicht sein. Nach Art. 4 Abs. 4

und 5 der EG-WRRL ist jedoch eine Fristverlängerung zur Erreichung der Umweltziele sowie der Festlegung weniger strenger Umweltziele vorgesehen. Auf Antrag und unter bestimmten Voraussetzungen kann eine Fristverlängerung um zweimal sechs Jahre und somit ein Aufschub bis 2021

bzw. 2027 beantragt werden. Der jeweils sechs-jährige Turnus sieht eine dreijährige Aufstellung von Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen sowie eine anschließende dreijährige Umsetzungsphase vor (Hintermeier 2005).

Planungsphasen der EU-WRRL	2000	2003	2004	2006	2006-2009	2010	2012	2015	2021/2027
EG-WRRL (2000/60/EG)									
Umsetzung in nationales Recht									
Ernennung zuständige Behörde									
Bestandsaufnahme									
Beginn Monitoringprogramme									
Aufstellung Bewirtschaftungspläne									
Aufstellung Maßnahmenprogramme									
Deckungsgleicher Wasserpreis									
Umsetzung der Maßnahmen									
Zielerreichung der WRRL									
Fristverlängerungen									

Tab. 1: Zeitplan der verschiedenen Planungsphasen zur Umsetzung der EE-WRRL, Eigene Darstellung, zusammengestellt nach Patt et al. (2004) und Hintermeier (2005).

## 2. Ziele, Material und Methoden

Aufgrund der vorab bekannten Probleme im Untersuchungsgebiet war der Schwerpunkt der Untersuchungen vor allem auf die Verbesserung der morphologischen Gewässerstruktur der Unterläufe von Wenk- und Walgerbach ausgerichtet, denn mögliche Entwicklungskonzepte sollten sich prioritär mit der „Beseitigung“ der zuvor genannten ökologischen Barriere beschäftigen (Abb. 1 und 2). Die Wiederherstellung der linearen ökologischen Durchgängigkeit, von der Mündung in Richtung der Oberläufe, war ebenfalls ein prioritäres Entwicklungsziel. Der Untersuchungsansatz entsprach dabei der von vielen Autoren empfohlenen Vorgehensweise (Abb. 3) (Schrenk 2005, vgl. Gunkel 1997).

In einem ersten Schritt erfolgte die Ermittlung des ökologischen „Ist“-Zustands des Gewässers. Dies geschah durch die Nutzung vorhandener Ergebnisse der Gewässergüte- und der Gewässerstrukturgütekartierung, welche durch das Hessische Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV) in den Jahren 1996 und 1999 erfasst wurde. Darüber hinaus erfolgten Aufnahmen von Daten zur biologisch-chemischen Gewässergüte, zur morphologischen Gewässerstruktur, zur ökologischen Durchgän-

gigkeit sowie zur Landnutzung und Vegetationsausbildung in den Jahren 2008 und 2009. Des Weiteren erfolgte eine Kartierung aller linearen, ökologischen Wanderhindernisse mit einer Höhe > 10 cm. Ebenfalls wurden eine Landnutzungskartierung in erster und zweiter Reihe zum Gewässer sowie verschiedene Vegetationsaufnahmen an den Ufern und im Gewässerumfeld sowie an ausgewählten Standorten, nach Braun Blanquet (1964) sowie (Pfeffer 2006) durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wurden für den OWK Wenkbach zwei fließgewässertypologische Leitbilder hergeleitet. Dabei wurden die im Bachgebiet vorherrschenden Gesteinsarten sowie Reliefmerkmale des Einzugsgebietes in die Leitbildfindung einbezogen (Methode nach LAWA sowie Sommerhäuser & Timm 1999). Demnach musste für die Unterläufe beider Bäche ein anderes Leitbild als für die Mittel- und Oberläufe entwickelt werden. Zur Unterstützung der Aussagekraft der als Bewertungsgrundlage dienenden Leitbilder wurden im Verlauf von Wenk- und Walgerbach mehrere Referenzabschnitte kartiert. Die Kennzeichnung der Referenzabschnitte diente der Abstimmung des Leitbildcharakters auf die lokalen Gegebenheiten im Einzugsgebiet von Wenk- und Walgerbach. Jedes Gebiet, so auch das Einzugsgebiet von Wenk- und Walgerbach,

weist bestimmte Restriktionen auf, welche eigen-dynamischen Fließgewässerentwicklungen sowie Renaturierungen entgegenstehen. Bevor also eine Definition von Entwicklungszielen stattfinden konnte, mussten deshalb auch die im Einzugsgebiet bestehenden Restriktionen ermittelt werden.

Durch den Vergleich des ökologischen Ist-Zustandes mit den ermittelten Leitbildern, konnten die im Einzugsgebiet bestehenden Defizite nun deutlich sichtbar gemacht werden.



Abb. 3: Untersuchungsansatz, die grauen Felder markieren die Schwerpunktbereiche der Untersuchung, Eigene Darstellung, zusammengestellt nach Gunkel (1997).

Schließlich wurden Maßnahmen- und Handlungsempfehlungen aufgestellt, welche es ermöglichen, die zuvor definierten Entwicklungsziele zu verwirklichen, um den ökologischen Zustand von Wenk- und Walgerbach zu verbessern. In diesem Sinne wurden sieben konkrete Renaturierungsmaßnahmen (Fallbeispiele) erarbeitet sowie Handlungsempfehlungen für die zukünftige Gewässerunterhaltung ausgesprochen. Leider existieren keine entsprechenden Referenzgewässer in der Umgebung. Insofern musste die Leitbildfindung aus den Merkmalen der Naturausstattung des Einzugsgebietes rekonstruiert werden. Die textliche und kartographische Darstellung der Maßnahmen erfolgte anhand eines gleichbleibenden Schemas. Für die zu renaturierenden Abschnitte erfolgte eine Standortbeschreibung unter Berücksichtigung der Faktoren Geologischer Bau und Relief, Boden, Vegetation und Landnutzung,

Schutzgebiete, biozönotischer Fließgewässertyp und des ökologischen Zustandes der betroffenen Fließgewässerabschnitte. Darüber hinaus wurde eine ausführliche Umsetzungsbeschreibung der Renaturierungsmaßnahmen erarbeitet, unter Hinzunahme dafür angefertigter Planzeichnungen, bestehend aus Lageplänen mit Höhenangaben, Bestands- und Entwicklungsplänen, den zentralen Querschnitten und einer Übersicht der strukturverbessernden Maßnahmen. Die Erstellung der Planzeichnungen beruht auf eigens durchgeführten Geländnivellierungen der betroffenen Flächen in den Monaten August bis Oktober 2008. Die digitale Bearbeitung der Planungsunterlagen erfolgte mit der Software Adobe Photoshop 6.0 und CorelDRAW X4. Zur Verbesserung der linearen Durchgängigkeit beider Bäche wurden konkrete Handlungsempfehlungen mit dem Ziel der Beseitigung der linearen Wan-

derhindernisse ausgesprochen. Um den ökologischen Wert der einzelnen Renaturierungen zu bestimmen, wurde für jede Maßnahme ein Biotopwertverfahren gemäß hessischer Kompensationsverordnung (KV, Stand 2005) durchgeführt.

Die verschiedenen Arbeitsphasen wurden fortwährend durch sogenannte Expertengespräche mit Vertretern der Oberen Wasserbehörde des RP Gießen, mit der Umweltberaterin der Gemeinde Weimar, dem Inhaber der Planungsgruppe Müller aus Fronhausen/Lahn sowie mit Vertretern des ASV Marburg und des Abwasserzweckverbands Marburg begleitet.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Ökologischer Gewässerzustand

Im Einzugsgebiet von Wenk- und Walgerbach wird die biologisch-chemische Gewässergüte vor allem durch diffuse Einträge anorganischer Nähr-

stoffe negativ beeinflusst. Neben Abwassereinleitungen gelangen besonders Phosphor- und Stickstoffverbindungen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen in die Gewässer. Dennoch wurden im Zuge der Gewässergütekartierung 78 % der kartierten Abschnitte mit der Gewässergüteklasse II und 22 % sogar mit der Gewässergüteklasse I-II bewertet. Die Bereiche im landwirtschaftlich intensiv genutzten Aental der Lahn wurden ausschließlich mit der Gewässergüteklasse II bewertet.

Die Bewertung der übrigen ökologischen Parameter fiel jedoch deutlich schlechter aus. Insgesamt 76% der kartierten Gewässerabschnitte wurden mit der Gewässerstrukturgüteklasse 4 oder schlechter bewertet. 16% konnten als „Sonderfall“, meist aufgrund von innerörtlichen Verrohrungsstrecken, überhaupt nicht bewertet werden (Abb. 4).

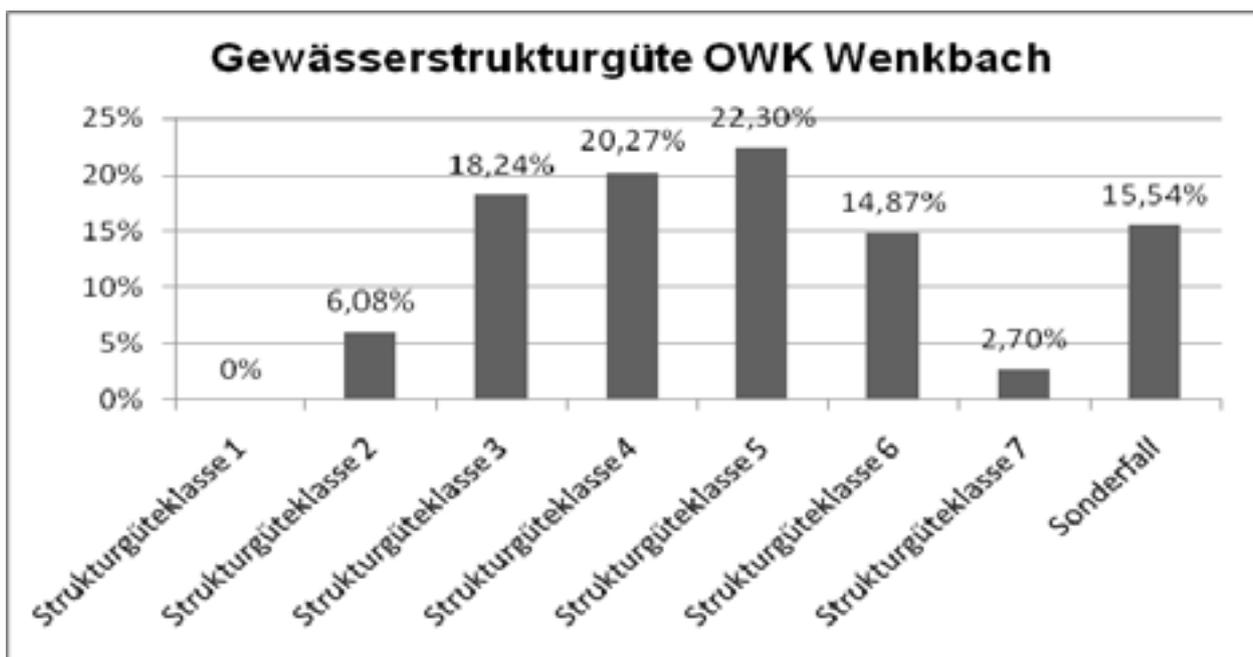


Abb. 4: Verteilung der Gewässerstrukturgüteklassen für den gesamten Oberflächenwasserkörper Wenkbach. Eigene Darstellung, zusammengestellt nach [www.gesis.hessen.de/irj/GESIS\\_Internet?cid=c4cd0f5d6a005b8bc8e-fae86119be11a](http://www.gesis.hessen.de/irj/GESIS_Internet?cid=c4cd0f5d6a005b8bc8e-fae86119be11a).

Die lineare, ökologische Durchgängigkeit wird von insgesamt 32 Wanderbarrieren unterbrochen (Tab. 2). Man könnte fast sagen, dass Wenk- und Walgerbach zusammen aus 33, im Mittel etwa 400 m langen Teilabschnitten bestehen, welche

durch ökologische Barrieren voneinander isoliert sind. Die häufigste Ursache dieser Wanderhindernisse sind Sohlabstürze verschiedener Ursachen.

Ursache	Wenkbach	Walgerbach	Summe
Sohlabstürze unterschiedl. Ursache	1	8	9
Sohlabstürze nach Wegeverrohrung	2	1	3
Treibgutverkläusungen	4	5	9
Steinschüttungen	2	2	4
Verrohrungsstrecken	3	2	5
Querbauwerke unterschiedl. Gestalt	0	2	2
<b>Gesamtanzahl</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>32</b>

Tab. 2: Zuordnung der kartierten Wanderhindernisse zu Ursachengruppen.

Vegetationsformen der Potentiell Natürlichen Vegetation kommen im Untersuchungsgebiet nur noch inselhaft und sehr selten vor. An ihre Stelle ist eine landwirtschaftlich intensivst genutzte Kulturlandschaft getreten.

Die Monitoringprogramme zur Überwachung der biologischen Qualitätskomponenten belegen ebenfalls den diesbezüglichen schlechten Zustand (Tab. 3) (HMULV 2008a).

Biologische Qualitätskomponenten	Bewertung
Makrophyten	n. b.
Fischfauna	unbefriedigend (4)
Phytoplankton	n. b.
Makrozoobenthos	schlecht (5)
Kieselalgen	mäßig (3)

Tab. 3: Bewertung der Monitoring-Ergebnisse der biologischen Qualitätskomponenten für den OWK Wenkbach, Eigene Darstellung, zusammengestellt nach HMULV (2008); n. b. nicht bestimmt.

Die Komponenten Makrophyten und Phytoplankton werden bei diesem Gewässertyp grundsätzlich nicht untersucht. Ansonsten hat das Makrozoobenthos (Gruppe der Fischnährtiere) am schlechtesten abgeschnitten.

### 3.2 Leitbilder, Defizite und Entwicklungsziele

Entsprechend der Zuordnung zur hydrogeologischen Großformation des Rheinischen Schiefergebirges bzw. des Nordhessischen Bundsandsteins (HLUG 2001) müssen die Ober- und Mittelläufe dem biozönotischen Fließgewässertyp 5 „grobmaterialreiche, silikatisch geprägte Mittelgebirgsbäche“ und die Unterläufe dem Typ 5.1 „feinmaterialreich, silikatisch geprägte Mittelgebirgsbäche“ nach Pottgieser & Sommerhäuser (2004 und 2006) zugeordnet werden. Gemäß dem Leitbild wäre im Schwerpunktgebiet der Unterläufe, unter natürlichen Bedingungen ein leicht gestreckter bis gewundener bzw. schwach mäandrierender Gewässerverlauf mit sandigen und kiesigen Substraten zu erwarten. Das Profil des Bachbettes müsste relativ flach ausgebildet sein.

Verstärkte Seitenerosion im Prallhangbereich und Uferabbrüche, sowie sandige und kiesige Uferbänke müssten in regelmäßigen Abständen das Gewässerbild prägen. Stehendes und sich im Gewässer befindliches Totholz spielen unter natürlichen Bedingungen eine wichtige Rolle in diesem Gewässertyp. Weiterführende Informationen zu den Leitbildcharakteren finden sich in der Literatur von Pottgieser & Sommerhäuser (2004 und 2006).

Aufgrund der Schwerpunktsetzung dieser Untersuchungen soll im Folgenden prioritär auf die Defizite hinsichtlich der Gewässermorphologie und der ökologischen Durchgängigkeit im Bereich der Unterläufe eingegangen werden. Beim Vergleich des Ist-Zustandes mit dem Leitbildcharakter wurde deutlich, dass die Unterläufe hinsichtlich aller Parameter der Gewässerstrukturgütekartierung erhebliche Defizite aufweisen. Aufgrund einer ausgeprägten Tiefenerosion, einem sehr schmalen Querprofil und einem fast linienförmigen Gewässerverlauf wurde das Gewässerbett vollständig von der angrenzenden Aue abgetrennt. Natürliche oder zumindest naturnahe

Gewässerrandstreifen (Entwicklungskorridore) fehlen aufgrund der landwirtschaftlichen Nutzung flächendeckend. Zahlreiche Verrohrungen und Sohlabstürze fungieren als Wanderbarrieren und unterbinden dadurch die ökologische Durchgängigkeit. Natürliche Strukturzeiger wie Störsteine, Wurzelstubben, Uferabbrüche, Uferbänke oder Totholz fehlen ebenfalls vollständig. Außerdem konnten während der Feldarbeiten im Gelände immer wieder Erosions- und Akkumulationsformen lokalisiert werden, die auf einen erheblichen Eintrag von Sedimenten und Nährstoffen infolge von Bodenerosion durch Wind und vor allem Wasser hinweisen.

Unter Berücksichtigung der Leitbilder, der im Einzugsgebiet bestehenden Defizite sowie Restriktionen wurden folgende nur sehr allgemein formulierten Entwicklungsziele abgeleitet:

- Wiederherstellung der linearen ökologischen Durchgängigkeit
- Verbesserung der morphologischen Gewässerstruktur der Unterläufe
- Herstellung minimal-ökologischer Gewässerstrukturen im Bereich des innerörtlichen Wenkbachabschnittes

### 3.3 Maßnahmenvorschläge

Von den nachstehend aufgeführten Fallbeispielen, sollen hier nur zwei der insgesamt sieben Renaturierungsmaßnahmen (d und f) beispielhaft dargestellt werden.

- a.) Schaffung einer Verlaufsverzweigung durch Abgrabung und naturnahe Gestaltung eines periodisch wasserführenden Nebengerinnes auf einer Länge von 240 m.
- b.) Schaffung einer örtlichen Gewässeraufweitung durch Abgrabung des linksseitigen Böschungsbereiches auf einer Länge von 220 m.
- c.) Schaffung einer örtlichen Gewässeraufweitung durch Abgrabung des linksseitigen Böschungsbereiches auf einer Länge von 50 m und Anlage zweier naturnaher Blänken.
- d.) Anlage eines Umgehungsgerinnes im Bereich des Wehres der Walgerner Mühle (Abb. 5), bei gleichzeitiger Schaffung eines temporären Stillgewässers unterhalb des Wehres.
- e.) Schaffung einer örtlichen Gewässeraufweitung durch Abgrabung des rechtsseitigen Uferbereiches auf einer

Länge von 400 m, bei gleichzeitiger Förderung einer schwach mäandrierenden Verlaufsentwicklung durch den Einbau von initialen Strömungslenkern.

- f.) Gewährleistung minimal-ökologischer Gewässerstrukturen innerhalb der Ortslage von Wenkbach durch die Herstellung und naturnahe Gestaltung eines Kastenprofils (Abb. 6).
- g.) Anlage eines insgesamt 1030 m langen Gehölzstreifens aus heimischen und standortgerechten Arten, zur Unterstützung des Biotopverbunds zwischen Wenk- und Walgerbach sowie den geplanten Maßnahmenvorschlägen.

Bei der Wehranlage der Walgerner Mühle handelt es sich um ein marodes Fallwehr. Unterhalb des Wehres hat eine Auskolkung stattgefunden, deren Ausmaß mittlerweile einen Durchmesser von etwa 2,5 m angenommen hat. Die Mühle wird wasserrechtlich schon seit mehreren Jahren nicht mehr genutzt. Das Wasserrecht ist lt. Auskunft der oberen Wasserbehörde des RP Gießen bereits erloschen. Der ehemals linksseitig vom Walgerbach verlaufende Mühlgraben ist seit längerem trocken gefallen und verbuscht zunehmend. Der ehemalige Mühlgraben soll als zukünftiges Bachbett des Nebengerinnes dienen und dementsprechend profiliert werden. Nach etwa 70 m soll das Nebengerinne wieder dem ursprünglichen Gewässerbett zugeführt werden. Der zwischen Ober- und Unterwasser bestehende Höhenunterschied ist so auszugleichen, dass sich Abschnitte mit stärkerem Gefälle auf wenige Bereiche beschränken (Patt et al. 2004). Die Abschnitte mit stärkerem Gefälle sollten in Form einer rauen Rampe profiliert werden, um eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 0,4 – 0,6 m/s nicht zu überschreiten (vgl. auch Patt et al. 2004). Der Aushub der Abgrabung soll nachträglich etwa 15-20 m unterhalb des Wehres in das bestehende Gewässerbett eingebracht werden, um dort eine Aufstauung zu erreichen. Damit das Wasser bei Mittel- und Niedrigwasserabflüssen vollständig in das Nebengerinne fließen kann, muss die Wehrkrone des bestehenden Wehres um maximal 10-15 cm erhöht werden. Die Höhe der Wehrkrone ist dabei so zu wählen, dass diese bei höheren Abflüssen (MHQ, HQ) überspült wird sowie ein Teil des Wassers in den direkten Bereich unterhalb des Wehres gelangt und dort für temporäre Wasserstände im Bereich der Auskolkung sorgt.

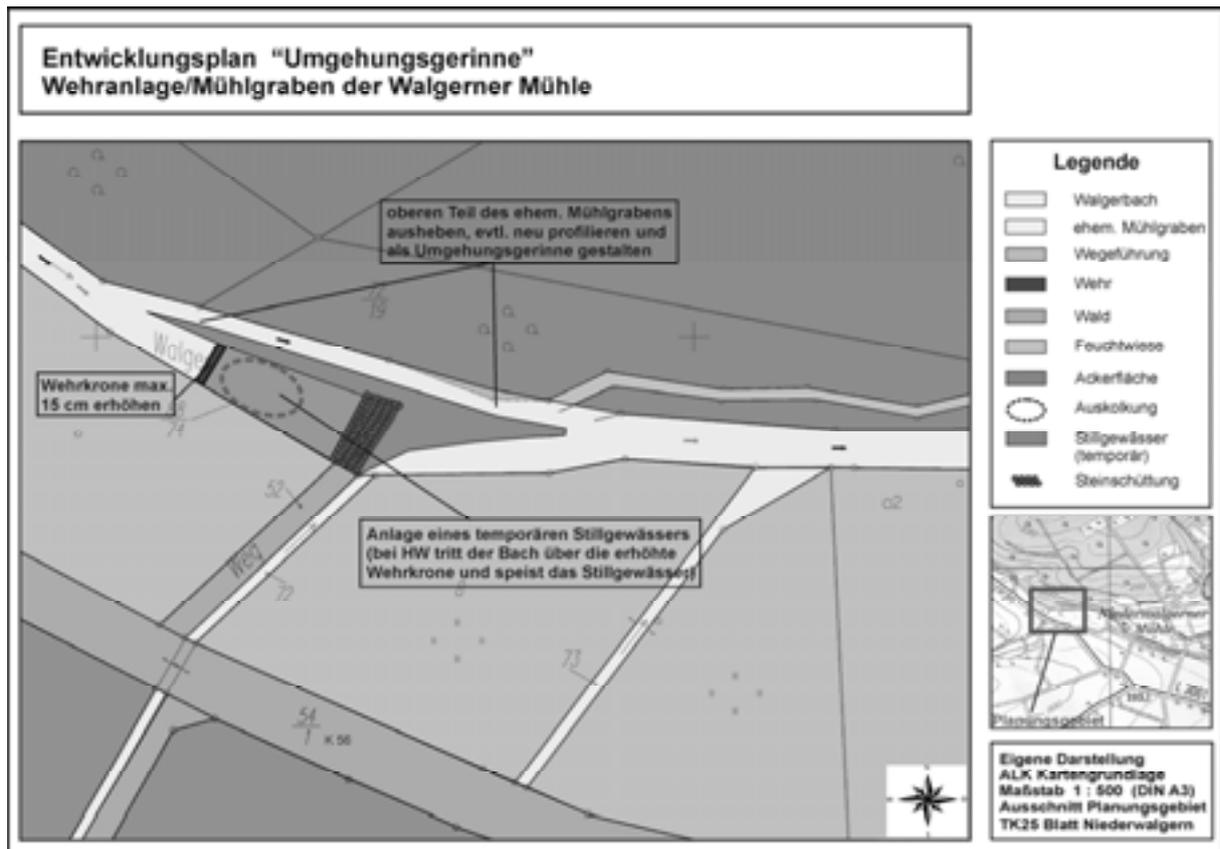


Abb. 5: Entwicklungsplan Walgener Mühle, Datengrundlage: ALK.

Vorrangiges Entwicklungsziel dieser Maßnahme ist die Wiederherstellung der linearen, ökologischen Durchgängigkeit. Das dazu geplante Nebengerinne soll der wandernden Fließgewässerbiozönose, besonders aber der Fischfauna, eine Auf- und Abwanderung ermöglichen. Auf die Entfernung bzw. auf den Rückbau der Wehranlage wird bewusst verzichtet. Die Entfernung des Wehres hätte eine rückschreitende Tiefenerosion und somit ein Absinken des Grundwasserspiegels oberhalb des Wehres zur Folge. Ein weiteres Entwicklungsziel dieser Maßnahme ist die Neuanlage eines temporären Kleingewässers im Bereich der Auskolkung unterhalb des Wehres. Bei Mittel- und Niedrigwasser-Abflüssen stauen sich die Wassermassen an der erhöhten Wehrkrone auf und fließen vollständig über das neu angelegte Nebengerinne ab. Bei höheren Wasserständen (MHQ, HQ) wird allerdings ein Teil der Wassermassen über die Wehrkrone treten und in den Bereich der Auskolkung unterhalb des Wehres gelangen. Der abgelagerte Aushub etwa 15-20 m unterhalb der Auskolkung wird für eine Aufstauung des Wassers sorgen und ein temporär wasserführendes Stillgewässer entstehen lassen. Durch das Entfernen nicht-standortgerechter

Gehölze, dem Auslichten zu dichter Bestände und der Neuanpflanzung standorttypischer Ufer- und Auengehölze, insbesondere Hainbuchen und Stieleichen, soll eine sukzessive Vegetationsentwicklung hin zu einem bachbegleitenden Stieleichen-Hainbuchen Auenwald initialisiert werden.

Der Planungsraum dieser Maßnahme befindet sich am südwestlichen Ortsrand von Wenkbach und erstreckt sich auf einer Länge von 85 m und einer mittleren Breite von 2,5 m beidseitig des Wenkbaches. Der Wenkbach verläuft innerhalb des Planungsraumes tief eingeschnitten ohne besondere Gewässerbett- und Uferstrukturen. Das Querprofil ist verhältnismäßig schmal ausgebildet. Natürliche Strukturzeiger wie Totholz, Wurzelstubben oder Störsteine fehlen vollständig. Aufgrund des hier sehr geringen Gefälles ist die Fließgeschwindigkeit äußerst niedrig. Im Bereich des Planungsraumes soll der beidseitige Böschungsbereich auf einer Länge von 64 m und einer durchschnittlichen Breite von jeweils 2,5 m (ab Mitte der Gewässersohle) abgegraben werden. Der beidseitige Böschungsbereich ist dabei so zu profilieren, dass aus dem derzeitigen schmalen Kerbprofil ein ausgedehntes Kastenprofil mit Biokorridor- und Fließgewässerentwicklungs-

funktion entsteht. Auf der gesamten Länge des Planungsraumes soll linksseitig in einem Abstand von 0,40 m zur angrenzenden Straße ein etwa 0,40 m breiter Gittersteinsatz ins Erdreich eingelassen werden, um eine ausreichende Ufersicherung zu gewährleisten. Linksseitig ist vorgesehen, ins Gewässerbett eine Röhrichtwalze mit etwa 0,40 m Durchmesser und einer mittleren Entfernung zum Böschungsrand von 0,60 m einzubringen, die in regelmäßigen Abständen mit Eichen-

pfählen zu sichern ist. Der Bereich zwischen Röhrichtwalze und linksseitigem Böschungsrand ist bis zu einer mittleren Höhe von 0,20 m mit Erdmaterial aufzufüllen. Am rechten Rand der Ebene des Kastenprofils soll eine durchschnittlich 0,80 m breite Steinschüttung mit Steinen unterschiedlicher Größe eingebracht werden. Die Steine sind dabei so zu setzen, dass genügend naturnahe Hohlräume und Unterstände entstehen.

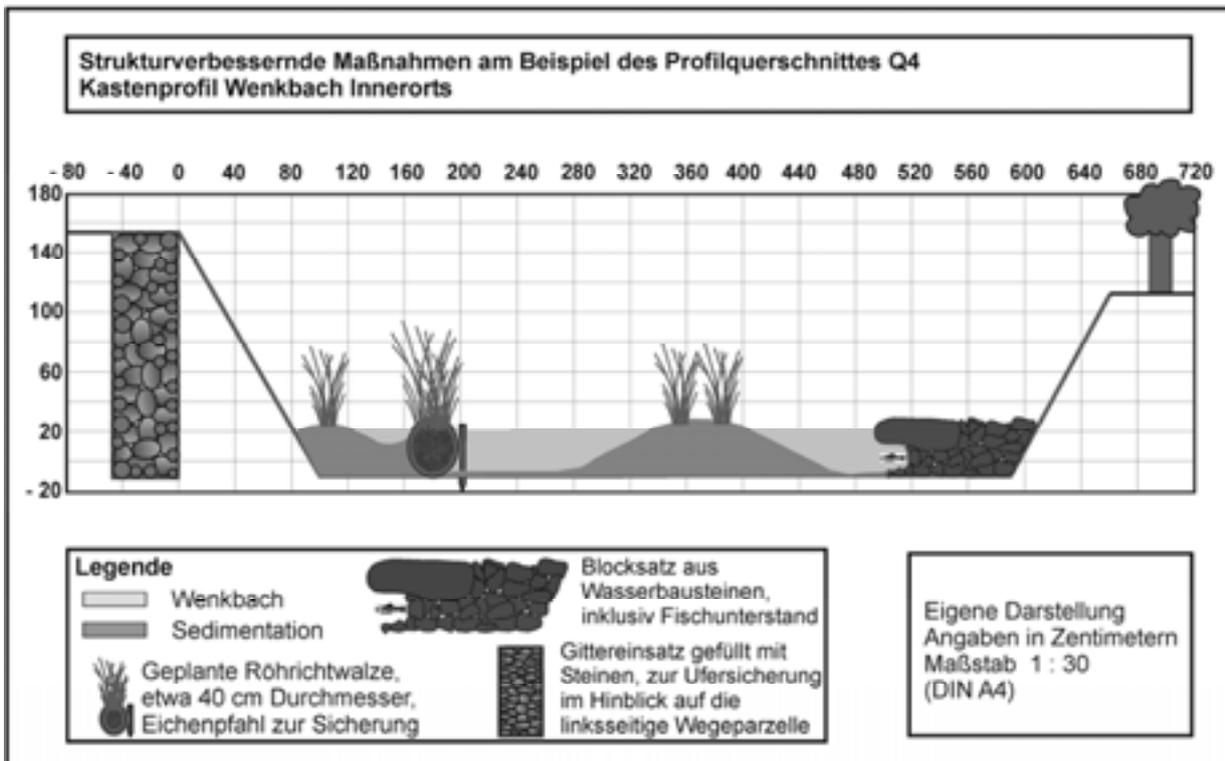


Abb. 6: Strukturverbessernde Maßnahmen Wenkbach, Innerorts, Datengrundlage: Geländeneivellement.

Entwicklungsziel dieser Maßnahme ist die Gewährleistung minimal-ökologischer Fließgewässerstrukturen durch Herstellung eines ausgedehnten Kastenprofils mit pendelndem Stromstrich und unterschiedlichen Strömungsbildern. Aufgrund der geringen Wassermassen (im Vergleich zur Breite des Kastenprofils) steht dem Wenkbach im Abgrabungsraum eine ausreichend breite Gewässersohle zur Verfügung, um die Laufentwicklung innerhalb des Kastenprofils nach Hochwasserereignissen immer wieder neu zu gestalten. Die Übersicht der strukturverbessernden Maßnahmen (Abb. 6) stellt daher nur eine potentiell mögliche Momentaufnahme dar. Als zusätzlicher Effekt der Gewässeraufweitung wird sich eigendynamisch eine leichte Anhebung der Gewässersohle einstellen. Der besonders steile Böschungswinkel wurde gewählt, um eine zukünftige Uferauflandung zu verhindern (vgl.

Patt et al. 2004). Eigendynamische Laufentwicklungen des Wenkbaches werden nach Umsetzung der Maßnahme nur noch innerhalb des Kastenprofils stattfinden (vgl. auch Gebler 2005). Damit verbessert sich zugleich die Biokorridorfunktion.

Das Besondere an dieser Maßnahmenplanung ist, dass deren Umsetzung ohne zusätzlichen Raumanspruch erfolgen kann. Der Planungsraum befindet sich ausschließlich in der bereits zur Verfügung stehenden Gewässerparzelle.

## 4. Diskussion

### 4.1 Diskussion hinsichtlich der Zielvorgaben der EG-WRRL

Entsprechend der Vorgaben der EG-WRRL und der Ergebnisse des Monitoring der biologischen Qualitätskomponenten muss der ökologische

Gesamtzustand des OWK als „schlecht“ bezeichnet werden. Grund dafür ist die „schlechte“ Bewertung des Makrozoobentos (Tab. 3). Das Makrozoobenthos, auch „Gruppe der Fischnährtiere“ genannt, spielt u.a. eine entscheidende Rolle bei der (Neu-)Etablierung einer naturnahen Fischfauna. Aber auch die anderen untersuchten Qualitätskomponenten haben durchweg eine unbefriedigende Bewertung erhalten (Tab. 3). Dementsprechend erfüllt der OWK Wenkbach die Zielvorgaben der EG-WRRL unter den bestehenden Bedingungen in keinsten Weise. Weder die Forderung nach einem guten ökologischen Zustand noch die Forderung nach einem guten ökologischen Potential des Wasserkörpers kann gegenwärtig gewährleistet werden. Auch nach Umsetzung der im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen geplanten Maßnahmen zur Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit sowie zur Verbesserung der Gewässerstrukturgüte der Unterläufe, ist die Zielerreichung eines „guten ökologischen Gesamtzustandes“ nicht zu erwarten. Durch die Umsetzung der Maßnahmen können die lineare ökologische Durchgängigkeit zwar vorübergehend wiederhergestellt und auch erhebliche Verbesserungen der Gewässerstrukturgüte in den Unterläufen erzielt werden; dennoch wären zur Zielerreichung der EG-WRRL weitere Maßnahmen notwendig.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Monitoringprogramme wurden durch das RP Gießen Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme erstellt, um die Zielerreichung eines „guten ökologischen Zustandes“ voranzutreiben. Die Bewirtschaftungsplanung Mittelhrein Süd sieht für den OWK Wenkbach unterschiedliche Maßnahmen hinsichtlich der Beeinflussung der Gewässermorphologie und der ökologischen Durchgängigkeit vor. In den Unterläufen beider Bäche ist auf einer Länge von insgesamt 2,2 km der Ankauf bzw. das Bereitstellen von Flächen als Entwicklungskorridore, in den Mittelläufen beider Bäche ist das Bereitstellen von Flächen auf einer Länge von 1 km vorgesehen. Gleichzeitig ist im Bereich dieser Flächen die „Entwicklung naturnaher Gewässer“ geplant (HMULV 2008a). Eine weitere Maßnahme des Bewirtschaftungsplanes ist die Förderung des natürlichen Rückhalts im Mittellauf des Wenkbaches oberhalb der Ortslage von Wenkbach (HMULV 2008a). Eine Erfüllung der Zielvorgaben ist jedoch, auch nach Umsetzung der Maßnahmen der Bewirtschaftungsplanung, bis 2015 nicht zu erwarten. Daher wird eine Fristverlängerung zumindest bis 2021 notwendig sein, um die Ziele der EG-WRRL

erfüllen zu können. Diese Einschätzung wurde auch durch das RP Gießen (Hessen) bestätigt.

#### 4.2 Diskussion hinsichtlich aufgetretener Probleme bei der Renaturierungsplanung

Im Folgenden sollen die Probleme und Schwierigkeiten aufgezeigt werden, die bei der Bearbeitung des Diplomthemas entstanden sind und gleichzeitig repräsentativen Charakter für die Entwicklungsplanung kleinerer Flüsse und Bäche besitzen.

Die zwei grundlegendsten Probleme bestehen zum einen in dem großen Unterschied zwischen dem ökologischen Ist-Zustand des Gewässers und dem „ökologisch guten Zustand“ sowie zum anderen in der Tatsache, dass in den meisten Fällen die angrenzenden Flächen nicht zur Verfügung stehen. Das bedeutet, dass jeglicher Gewässerentwicklung bzw. Renaturierung ein meist sehr kostenaufwendiger Erwerb von Flächen vorangehen muss. Auch diese Einschätzung wurde von der Oberen Wasserbehörde des RP Gießen (Hessen) bestätigt.

Bei den meisten Fließgewässern dieses Gewässertyps kommt es innerhalb von Kulturlandschaften häufig zu den unerwünschten Phänomenen einer stark ausgeprägten Tiefenerosion sowie zu einem sehr schmal ausgebildeten Querprofil. Im Hinblick auf die Beseitigung der ökologischen Wanderhindernisse ergibt sich daraus ein weiteres Problem. Selbst bei ordnungsgemäßem Rückbau dieser Barrieren werden in naher Zukunft erneut Querbarrieren im zu engen Querprofil entstehen. Zunächst bildet sich eine Treibgutverkläuserung, die bei längerer Verweildauer im Gewässer zu einem Sohlabsturz unterhalb der Verkläuserung führen wird und somit eine erneute Wanderbarriere darstellt. Eine längerfristige Lösung für dieses Problem kann nur bei gleichzeitiger Aufweitung des Gewässerquerprofils und einer Anhebung der Gewässersohle erreicht werden. Denn ohne diese beiden Maßnahmen werden aus ökologisch grundsätzlich wertvollen Strukturzeigern, Hindernisse welche die lineare Passierbarkeit des Gewässers beeinträchtigen können.

Der Rückbau von innerörtlichen Verrohrungsstrecken, welche ebenfalls ein ökologisches Wanderhindernis im Gewässer darstellen, lässt sich aus Kostengründen in den meisten Fällen nicht verwirklichen. Doch auf Vorschläge hinsichtlich der Herstellung von minimal-ökologischen Gewässerstrukturen innerhalb der Verrohrungsstrecken reagierten die Gewässerun-

terhaltungspflichtigen mit großer Ablehnung. Zum Beispiel besteht die Möglichkeit, durch den Einbau von Holzlamellen in Verrohrungsstrecken, quer zur Fließrichtung, eben diese minimal ökologischen Gewässerstrukturen zu gewährleisten. Eingebaute Lamellen bewirken zum einen eine Sedimentation auf der Verrohrungssohle und zum anderen die Entstehung von strömungsberuhigten Verweilzonen für wandernde Arten der Gewässerbiozönose. Unter diesen Bedingungen und in Verbindung mit einer absturzf freien Verrohrungsstrecke kann zumindest für einige der wandernden Arten die lineare Durchgängigkeit gesichert werden (vgl. Madson & Tent 2000). Die Ablehnung dieser Maßnahmen wurde auf Seiten der Gewässerunterhaltungspflichtigen mit der Angst vor einer erschwerten Gewässerunterhaltung, einem verstärkten Rückstau sowie befürchteten Überflutungen oberhalb der Verrohrungen begründet.

Ebenfalls als problematisch erweist sich die Tatsache, dass die verbindlichen Pflegemaßnahmen nach bereits durchgeführten Renaturierungen in vielen Fällen nur ungenügend oder überhaupt nicht durchgeführt werden. Dieses Phänomen konnte im Untersuchungsgebiet deutlich nachgewiesen werden. Dadurch entsteht die Gefahr, dass die Renaturierungsziele teilweise oder vollständig verfehlt werden.

Eine weitere grundlegende Schwierigkeit ergibt sich aus dem bereits angesprochenen zeitlichen Ablauf der EG-WRRL, d.h. aus dem 6-jährigen Turnus zur Aufstellung von Maßnahmenprogrammen und zur Umsetzung dergleichen (Tab. 1). Diese zeitlich sehr kurze Phase benachteiligt Initialmaßnahmen zur Förderung der eigendynamischen Komponente deutlich gegenüber aktiv durchgeführten Renaturierungen. Initialmaßnahmen, wie z.B. das zur Verfügung stellen von Entwicklungskorridoren bei gleichzeitigem Einbau von Strömungslenkern, benötigen in der Regel eine wesentlich längere Zeitspanne als 3 bzw. 6 Jahre bevor sie greifen und ökologische Erfolge liefern können. Nur aktive Renaturierungen können in der vorgegebenen Zeitspanne auch wirklich Erfolge zeigen. Jedoch wird gerade den Initialmaßnahmen in der Literatur der ökologisch wesentlich höhere Wert zugesprochen (Gebler 2005, vgl. auch Patt et al. 2004). Diesem Sachverhalt wird in der Literatur bisher kaum Beachtung geschenkt.

Nicht unerwähnt dürften auch die erheblichen Finanzierungsprobleme auf Seite der Städte und Gemeinden bleiben, welche sich im Hinblick auf die Zielvorgaben der EG-WRRL ergeben. Sicher-

lich existieren zahlreiche Fördermöglichkeiten, um die Ausgaben für die Renaturierungen und die Flächenankäufe zu minimieren, doch alle Fördermöglichkeiten decken nur einen Teil der tatsächlich entstehenden Kosten. Eine gute Informationsgrundlage hinsichtlich in Hessen bestehender Fördermöglichkeiten stellt die „Förderfibel WRRL“ dar (HMULV 2008b).

## 5. Fazit

Die Aufnahme und Bewertung des ökologischen Zustandes des OWK Wenkbach hat gezeigt, dass es sich um einen anthropogen stark beeinflussten Wasserkörper handelt. Aufgrund dessen ist der OWK Wenkbach gemäß Artikel 4 der EG-WRRL als erheblich veränderter Wasserkörper zu bezeichnen. Für diese gelten etwas herabgesetzte Zielvorgaben. Anstelle des guten ökologischen Zustandes ist bei erheblich veränderten Wasserkörpern das gute ökologische Potential die anzustrebende Zielvorgabe.

Der Gewässerausbau der vergangenen Jahrzehnte hat seine Spuren besonders sichtbar in den Unterläufen von Wenk- und Walgerbach hinterlassen, so dass diese als ökologische Gesamtbarriere zwischen der Lahn und den Mittel- und Oberläufen beider Bäche fungieren. Wichtigste Voraussetzung zur (Wieder-)Etablierung einer naturnahen Gewässerbiozönose ist sicherlich die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit, besonders in den Unter- und Mittelläufen beider Bäche. Die alleinige Beseitigung der ökologischen Wanderhindernisse wird allerdings nicht für eine Neubesiedlung durch eine naturnahen Gewässerbiozönose ausreichen; zu groß sind die bestehenden Defizite hinsichtlich des gewässermorphologischen Zustandes. Dabei tritt in den Unterläufen beider Bäche ein zusätzliches Problem auf. Aufgrund des hohen Grades des Gewässerausbaus und seiner Folgen, sind eigendynamische Gewässerentwicklungen hier zukünftig nicht zu erwarten. Die im Rahmen der Untersuchungen ausgearbeiteten Maßnahmenvorschläge für kurzfristig wirksame Renaturierungen versuchen diesem Problem gerecht zu werden.

Ohne Zweifel sind nach Umsetzung aller sieben Maßnahmenvorschläge sowie der Bewirtschaftungs- und Maßnahmenprogramme durch das RP Gießen noch weitere Maßnahmen notwendig, um die Gewässerfunktionsfähigkeit grundlegend zu verbessern. Eine Zielerreichung der EG-WRRL ist für den OWK Wenkbach bis zum Jahre 2015 nicht zu erwarten. Eine Fristver-

längerung bis zum Jahre 2021, wenn nicht sogar bis 2027, wird unumgänglich sein.

## 6. Danksagung

Ohne das Interesse und die Unterstützung durch das RP Gießen, insbesondere durch Herrn Dipl.-Ing. H. Diehl, durch Frau H. Rupp (Umweltberaterin der Gemeinde Weimar/Lahn), die Planungsgruppe Müller (Fronhausen/Lahn) sowie unseren Messhilfen hätte die vorliegende Studie nicht erarbeitet werden können. Ihnen gilt unser herzliches Dankeschön.

## 7. Literatur

- Blume H. (1957): Marburg-Gießener Lahntal – 348; In: Meynen E., Schmithüsen J. (Hrsg.) (1957): Handbuch der naturräumlichen Gliederung, 4. & 5. Lieferung: 541-542; Remagen.
- DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.) (1996): Fluss und Landschaft – Ökologische Entwicklungskonzepte. – Schriftenreihe des DVWK, 240.
- EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL; RL 2000/60/EG): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- Gebler R.-J. (2005): Entwicklung naturnaher Bäche und Flüsse – Maßnahmen zur Strukturverbesserung – Grundlagen und Beispiele aus der Praxis; Walzbachtal.
- Gemeinde Weimar (Hrsg.) (2004): Landschaftsplan der Gemeinde Weimar (Lahn); Aufgestellt durch das Ingenieurbüro Zillinger, Consulting Team Mitte; Gießen.
- Gunkel G. (1997): Renaturierung anthropogen genutzter Gewässer – Ein Zielkonflikt? – In: Dembinski M., Werder U. (Hrsg.) (1997): Renaturierung von Fließgewässern und Auen. – VSÖ Publikation: 17-52; Hamburg.
- Hintermeier K.-H. (2005): Europäische Wasserrahmenrichtlinie – Stand, Kommunikation, aktuelle Aufgaben und Perspektiven. – In: Ohlig C. (Hrsg.) (2005): Gewässerentwicklung in der Kulturlandschaft, Schriften der DWhG, 7: 85-90; Siegburg.
- HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2001): Umweltatlas Hessen – Online Ausgabe; <http://atlas.umwelt.hessen.de> (Zugriff am 14.02.2009).
- HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2008): Stammdatenblatt Wasserkörper Wenkbach DEHE\_258332.1; [http://mapro.intern.hlug.de:9080/fismapro/dispatch/editWasserkoeper?wkld=DEHE\\_258332.1\\_Wenkbach](http://mapro.intern.hlug.de:9080/fismapro/dispatch/editWasserkoeper?wkld=DEHE_258332.1_Wenkbach) (Zugriff am 05. 11. 2008).
- HMULV – Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2008a): Bewirtschaftungsplan Hessen 2009, 1. Auflage; <http://interweb1.hmulpv.hessen.de/umwelt/wasser/wrrl/oeffentlichkeitsbeteiligung/aktivitaeten/offenlegungbwpl/entwbwpl/> (Zugriff am 28. 01.2009).
- HMULV – Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2008b): Förderprogramme zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie in Hessen (Förderfibel WRRL), 1. ergänzte Auflage; [http://interweb1.hmulpv.hessen.de/imperia/md/content/internet/wrrl/2\\_umsetzung/foerderfibel\\_080515.pdf](http://interweb1.hmulpv.hessen.de/imperia/md/content/internet/wrrl/2_umsetzung/foerderfibel_080515.pdf) (Zugriff am 18.03.2009).
- Jürging, P. (2005): Natürliche Fließgewässer und Auen. – In: Jürging P., Patt H. (Hrsg.) (2005): Fließgewässer- und Auenentwicklung – Grundlagen und Erfahrungen. – 5-46; Berlin, Heidelberg.
- Klausing, O. (1974): Die Naturräume Hessens – mit einer Karte der naturräumlichen Gliederung (1:200000). – Hessische Landesanstalt für Umwelt; Wiesbaden.
- Korn, N., Jessel, B., Hasch, B., Mühlhngaus, R. (2005): Flussauen und Wasserrahmenrichtlinie – Bedeutung der Flussauen für die Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie. – In: BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2005): Naturschutz und Biologische Vielfalt, 27; Bonn.
- Madsen, B. L., Tent, L. (2000): Lebendige Bäche und Flüsse – Praxistipps zur Gewässerunterhaltung und Revitalisierung. – In: Edmund Siemers-Stiftung (Hrsg.) (2000): Lebendige Bäche und Flüsse, 1. Auflage; Hamburg.
- Meier, K. (2000): Derzeitiger ökologischer Zustand der Fließgewässer im Vergleich mit den Zustandszielen der Wasserrahmenrichtlinien. – In: BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2000): Renaturierung von Bächen, Flüssen und Strömen, Angewandte Landschaftsökologie, 37; Bonn, Bad Godesberg.
- MGG – Marburger Geographische Gesellschaft (1990): Geologische Karte von Marburg und Umgebung – 1:50000.
- Opp, Ch. (1998): Geographische Beiträge zur Analyse von Bodendegradationen und ihrer Diagnose in der Landschaft. (Bodenkundlich-geoökologische und geographisch-landschaftsökologische Beiträge zur Umweltforschung). – Leipziger Geowissenschaften, 8: 187 S.; Leipzig.
- Patt, H., Jürging, P., Kraus, W. (2004): Naturnaher Wasserbau – Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern, 2. Auflage; Berlin, Heidelberg.
- Pfeffer, K.-H. (2006): Arbeitsmethoden der Physischen Geographie. – Wissenschaftliche Buchgesellschaft; Darmstadt.
- Pottgieser, T., Sommerhäuser, M. (2004): Fließgewässertypologie Deutschland: Die Gewässertypen

- und ihre Steckbriefe als Beitrag zur Umsetzung der EU-WRRL. – In: Steinberg, C., Calmano, W., Wilken, R.-D., Klapper, H. (Hrsg.) (2004): Handbuch Angewandte Limnologie, 19 Lfg. 7/04: 1-16; Landsberg.
- Pottgiesser, T., Sommerhäuser, M. (2006): Erste Überarbeitung der Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen als Beitrag zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie.
- [www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/downloads/Typ5.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/downloads/Typ5.pdf) (Zugriff am 14.02.2009).
- [www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/downloads/Typ5\\_1.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/downloads/Typ5_1.pdf) (Zugriff am 14.02.2009).
- Schrenk, G. (2005): Planungsstufen der Fließgewässerentwicklung. – In: Jürging, P., Patt, H. (Hrsg.) (2005): Fließgewässer- und Auenentwicklung – Grundlagen und Erfahrungen: 191-217; Berlin, Heidelberg.
- Sommerhäuser, M., Timm, T. (1999): Limnologische Leitbilder zur regionalen Gewässertypologie. – In: Zumbroich, T., Müller, A., Friedrich, G. (Hrsg.) (1999): Strukturgüte von Fließgewässern – Grundlagen und Kartierung, 1. Auflage: 73-96; Berlin, Heidelberg.
- VDG – Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. (Hrsg.) (2004): Ökologische Bewertung von Fließgewässern, Schriftenreihe des VDG, 64, 3. Auflage; Bonn.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 83-96, 14 Abb., 1 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Untersuchungen zu Totholzablagerungen und deren Einfluss auf die Gerinnemorphologie in einem Hochgebirgsbach

Antje Eitelmann & David Morche\*

Eitelmann, A. & Morche, D. (2011): Untersuchungen zu Totholzablagerungen und deren Einfluss auf die Gerinnemorphologie in einem Hochgebirgsbach. [Investigations on large woody debris and effects on the channel morphology in a high-mountain stream.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 83-96, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Grobes Totholz spielt eine wichtige Rolle für die Geomorphologie eines Fließgewässersystems. Durch die Ausbildung von Steps und Pools und die Wirkung als Geschiebefänger wird Einfluss auf das System genommen. Auch wenn der Großteil der Totholzablagerungen keine unmittelbare Beeinflussung ausübt, so können doch große Mengen an Sediment zurückgehalten werden, auch bei einer geringen Persistenz der Holzablagerungen. Die Untersuchung von grobem Totholz sollte daher bei fluvialgeomorphologischen Kartierungen eine stärkere Beachtung finden.

**Abstract:** Large woody debris (LWD) effects channel bed geomorphology in flowing water systems. LWD can create a step and pool morphology. Bed load material can be stopped upstream of LWD accumulations and build intermediate sediment stores on the riverbed. The persistence of LWD accumulations and sediment storing is variable and should be considered in future investigations.

**Schlüsselwörter:** Gerinnemorphologie, Totholz, Partnach, Reintal

**Keywords:** channel morphology, large woody debris, Partnach River, Reintal

---

\* Anschriften der Autoren:

Antje Eitelmann (antje.eitelmann@web.de), Daimlerstr. 21, D-71116 Gärtringen;

Dr. David Morche (david.morche@geo.uni-halle.de), Institut für Geowissenschaften und Geographie,  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06110 Halle (Saale).

## 1. Einleitung

Im Zuge des Projektes „Materialtransfer in alpinen Fließgewässersystemen – Mobilität und funktionelle Kopplung“, einem Teil des Bündelprojektes „Sedimentkaskaden in alpinen Geosystemen“ (SEDAG), wurden Ausmaße und Folgen der Prozesse untersucht, welche die Reliefentwicklung maßgeblich beeinflussen. Da der Sedimenttransfer und fluvialgeomorphologische Gegebenheiten auch durch in Fließgewässern vorkommenden groben Totholzes (engl. large woody debris [LWD]) beeinflusst werden können (Mutz 2000, Braudrick & Grant 2001, Hassan & Woodsmith 2004), wurde dessen Kartierung in einem totholzreichen Gerinneabschnitt im Untersuchungsgebiet Reintal durchgeführt (Abbildung 1).

„Als Totholz bezeichnet man die im Gerinne liegenden ‚toten‘ Äste und Stämme der umgebenden Gehölzvegetation.“ (Huette, M. 2000).

Bereits zu Beginn der Siebziger Jahre wurden im amerikanischen Raum Untersuchungen von Totholzablagerungen (engl. *Large Woody Debris [LWD]*) und dessen Auswirkungen auf die Gewässermorphologie durchgeführt, ein Großteil der heute vorhandenen Publikationen stammt jedoch aus den letzten zwanzig Jahren (Hogan 1987, Fetherston et al. 1995, Downs & Simon 2001, Haschenburger & Rice 2004). Da Totholzablagerungen durch intensives Management in den meisten mitteleuropäischen kaum eine Rolle spielten, fand diese Thematik kaum Beachtung (Hering et al. 2000). In den letzten Jahren wurden aber auch im deutschsprachigen Raum vermehrt Untersuchungen dazu durchgeführt. Dabei wurde in einem Großteil der Arbeiten, neben dem Einfluss des Totholzes auf die Gewässermorphologie, die Beeinflussung der Gewässerökologie mit Fauna und Flora beschrieben (Hering & Reich 1997, Gerhard & Reich 2000, Hering et al. 2000, Mutz 2000, Kail 2004).

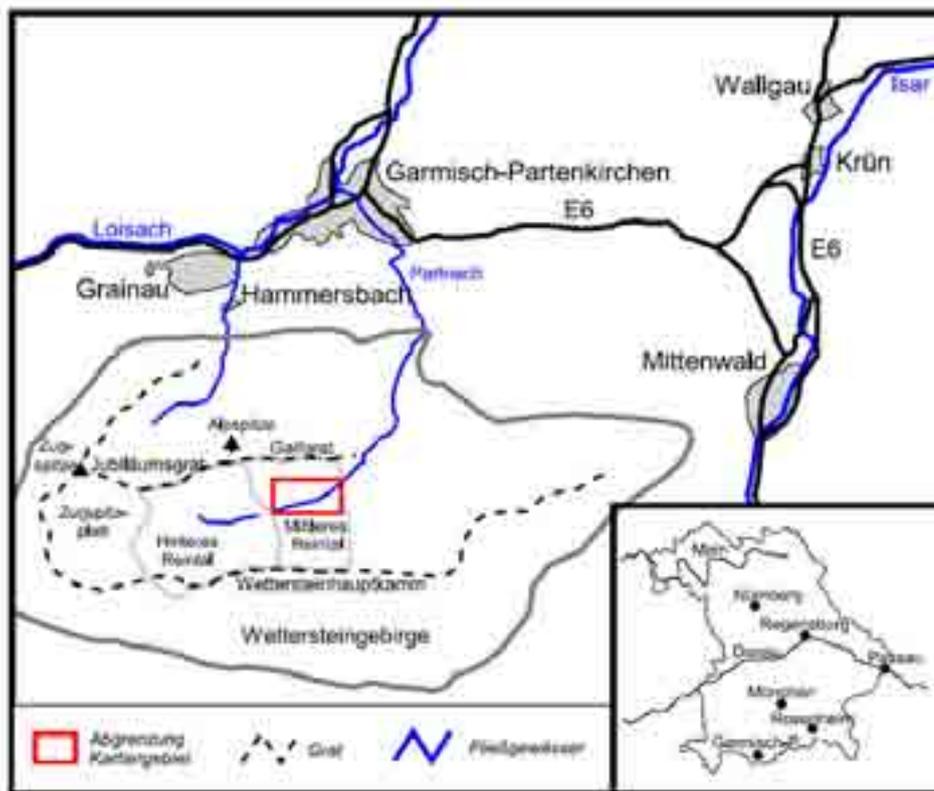


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebiets.

„Large Woody Debris (LWD) is known to influence the morphology and the ecology of small streams in many ways.“ (Mutz 2000: 107). Im Reintal (Oberbayern) wurde die Art und Weise dieses Einflusses anhand von Step-Pool-Systemen und der Wirkung des Totholzes als

Geschiebefänger untersucht. Des Weiteren beschäftigt sich der vorliegende Artikel mit der räumlichen Verteilung der groben Totholzablagerungen. Die Kartierungen für die Untersuchung wurden in den Jahren 2002, 2004 und 2005 durchgeführt.

## 2. Methodik

### 2.1 Menge und Verteilung des Totholzes

Damit Totholz bei der Kartierung als grobes Totholz charakterisiert werden kann, wurden

bestimmte Voraussetzungen definiert. So wurden in dem Gewässerabschnitt alle Totholzablagerungen kartiert, welche einem Mindestdurchmesser von 0,10 m und eine Mindestlänge von 1,00 m aufwiesen (u.a. nach Hogan 1987, Fetherston et al. 1995, Marcus et al. 2002).



Abb. 2: Einfache Totholzakkumulation, Blick in Fließrichtung (Foto: Antje Eitelmann, 17.08.2004).



Abb. 3: Komplexe Totholzakkumulation, Blick in Fließrichtung (Foto: Antje Eitelmann, 21.07.2004).

Neben einzelnen Stämmen wurden außerdem Totholzakkumulationen (engl. jams) aufgenommen. Dabei unterscheidet man zwischen 2 Ausprägungen (Abbildungen 2 und 3): einfache Totholzansammlungen bestehen aus mindestens 2 Einzelstämmen, welche zwar gemeinsam an einer Position liegen, jedoch keinen gemeinsamen Einfluss, zum Beispiel auf die Morphologie, ausüben. Komplexe Totholzakkumulationen

bestehen aus mehr als 2 Einzelstämmen, welche oftmals durch weiteres organisches Material, wie Blätter oder Zweige, miteinander verbunden sind und als Komplex auf ihre Umgebung wirken. Bei Einzelbäumen und den Stämmen von einfachen Totholzakkumulationen wurden die Länge und der mittlere Stammdurchmesser vermessen. Letzterer wurde nach Hogan (1987) über die Durchmesser der beiden Stammenden ermittelt.

Aus diesen Werten konnte später das Stammvolumen berechnet werden. Dagegen wurden bei den komplexen Holzakkumulationen die mittlere Höhe (h), die mittlere Breite (w) und die mittlere Länge (l) bestimmt (Piégay et al. 1999), um anhand der Formel

$$V = h * w * l \quad (1)$$

ebenfalls das Holzvolumen zu errechnen. Soweit bestimmbar wurde untersucht, durch welche

Ereignisse die Totholzstämme in das Gerinne der Partnach gelangt sind. Dabei lassen sich natürliche Ursachen wie Hochwasserereignisse oder Uferabbrüche und anthropogene Ursachen unterscheiden. Des Weiteren wurden die Lage der Totholzablagerung im Kartiergebiet sowie die Ursache seiner Mobilitätseinschränkung notiert. Hierbei kann nach Braudrick & Grant (2001) und Faustini & Jones (2003) eine hohe Bedeutung von Gesteinsblöcken erwartet werden.

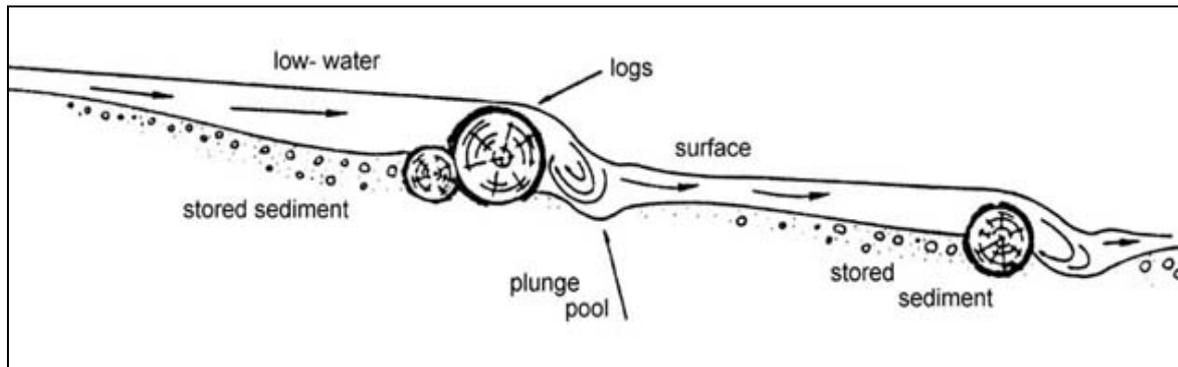


Abb. 4: Durch Totholz verursachte Wasserspiegelsprünge im Längsverlauf (Keller & Swanson 1979: 376, in Kail 2004).

## 2.2 Bildung von Steps und Pools

Steps und Pools können durch verschiedene Strömungshindernisse gebildet werden, so z.B. durch Blöcke oder Geschiebecluster, welchen in einem Gebirgsfluss wie der Partnach häufig vorkommen. Bei der Kartierung wurden nur Steps und Pools aufgenommen, welche durch das Vorhandensein von Totholz entstanden sind. Bildet ein Totholzstamm ein Strömungshindernis, wird das mitgeführte Geschiebe oberhalb des Holzes abgelagert (Wallerstein & Thorne 2004) (Abbildung 4). Die Sohle gleicht sich sukzessive an die Höhe des Stammes an und bildet eine Stufe, nach Mutz (2000) und Bunte & Abt (2001) wird dabei vor allem grobes Material zurückgehalten. Die Höhe eines Steps kann laut Curran & Wohl (2003) vom Durchmesser des Totholzes abhängen. Strömt das Wasser über den Step, stürzt es die meist geringe Höhendifferenz zur Sohle unterhalb des Stammes herab. Durch die entstehenden Turbulenzen entsteht hier ein Pool, da die Sohle durch das herabstürzende Wasser und wegen fehlender Materialnachlieferung ausgeschürft wird. Nach Kail (2004) spricht

man in diesem Fall von einem Absturz-Pool (engl. plunge pool) (Abb. 5). Da im Reintal andere Poolformen keine größere Rolle spielen, wird auf solche hier nicht weiter eingegangen, ergänzend sind sie bei Robinson & Beschta (1990) aufgeführt. Nach Buffington et al. (2002) und Kail (2003) sind Größe und Stabilität eines Pools abhängig von der Baumgröße. In Pools häuft sich vor allem feines Material an (Mutz 2000, Bunte & Abt 2001, Schmidt & Ergenzinger 1992). In Fließgewässern, die Fischen als Habitat dienen, haben die Pools eine wichtige Lebensraumfunktion, so dienen sie bspw. bei Niedrigwasser als Zufluchtsort (Gurnell et al. 1995, in Kail 2004).

Nach Curran & Wohl (2003) wird die Höhe eines Steps von der Sohle bis zur Oberkante des Totholzes gemessen, des weiteren werden die Breite des Steps sowie die Ausdehnung und die tiefste Stelle des Pools notiert (Curran & Wohl 2003, Kail 2003). Bei der einführenden Kartierung 2002 wurden die ausgebildeten Steps noch nicht vermessen, sie werden in den vergleichenden Auswertungen nicht berücksichtigt.



Abb. 5: Überflossenes Totholz mit Absturz-Pool unterhalb, Blick in Fließrichtung (Foto: Antje Eitelmann, 17.08.2004).

## 2.3 Wirkung des Totholzes als Geschiebefänger

Eine bedeutende Eigenschaft von grobem Totholz ist die Wirkung als Geschiebefänger. Zur Akkumulation von Gesteinsmaterial kommt es zum einen an von Totholz gebildeten Steps, zum anderen an Stämmen beziehungsweise Totholzakkumulationen, die ein Hindernis für die Strömung und das mitgeführte Geschiebe bilden.

### 2.3.1 Masse des akkumulierten Materials

Um eine Vorstellung von den Größenordnungen des vom Totholz akkumulierten Materials zu bekommen, wurde bei der Kartierung 2005 die Masse des abgelagerten Geschiebes untersucht. Dazu musste das Material als geometrische Form betrachtet werden, welche in ihrer Höhe, Breite und Länge vermessen wurde. Nach der Berechnung der Flächen konnte das Volumen des Körpers berechnet werden, beispielsweise über die Volumenberechnung eines Pyramidenstumpfes:

$$V = h/3 * (A_G + \sqrt{A_G A_D} + A_D) \quad (2).$$

Dabei ist  $A_G$  die Grundfläche und  $A_D$  die Deckfläche des Körpers.

Das ermittelte Volumen wurde für die Auswertungen anhand der Formel

$$M = V * 2 \text{ t/m}^3 \quad (3)$$

in die Masse der Geschiebeakkumulation umgewandelt.

### 2.3.2 Granulometrische und morphometrische Analyse des akkumulierten Materials

Um zu prüfen, inwieweit sich Totholz auf die Korngrößenverteilung im abgelagerten Geschiebe auswirkt, wurde bei der Kartierung im Sommer 2004 an neun ausgewählten Standorten eine Partikelzählung nach der 100-Partikel-Methode nach Wolman (1954, in Bunte & Abt 2001) durchgeführt, davon siebenmal an einem Step-Pool-System, einmal oberhalb und unterhalb eines Steps, an dem sich kein Pool gebildet hat und einmal oberhalb und unterhalb einer Totholzakкумуляtion, die weder einen Step noch einen Pool ausgebildet hat, aber als Sedimentfänger fungiert. Dabei wurden an jedem Standort je 25 Partikel oberhalb (Stepbereich) und unterhalb (Poolbereich) des Totholzes entnommen und nach Cailleux (1952) in ihrer a-, b- und c-Achse vermessen. Die Mengenverteilung der einzelnen Kornklassen wurde nach Müller (1964) anhand einer Kornsummenkurve dargestellt, aus dieser lassen sich wichtige Parameter (zum Beispiel die Percentile, der Mittelwert und die Schiefe) für die Auswertung der granulometrischen Analyse (nach Folk & Ward 1957) ableiten. Nach Bunte & Abt (2001) sowie Mutz (2000) ist zu erwarten, dass oberhalb des Totholzes vor allem grobes Material, im Poolbereich dagegen überwiegend feines Material angehäuft ist.

Für die morphometrische Analyse wurden außerdem die Zurundung und die Abplattung nach Cailleux (1952) sowie die Partikelform (Sneed & Folk 1958) bestimmt.

### 3. Ergebnisse & Schlussfolgerungen

#### 3.1 Menge und Verteilung des Totholzes

Das mittlere Reintal weist einen hohen Anteil an grobem Totholz auf. Bei der ersten Kartierung im Sommer 2002 konnten 82 Holzablagerungen aufgenommen werden, bis auf 15 Stück konnten alle bei der folgenden Aufnahme im Sommer 2004 wiedergefunden werden. Insgesamt konnten bei dieser zweiten Kartierung 153 Tothölzer vermerkt werden. Bei der dritten und letzten Kartierung im September 2005 wurden 158 Totholzablagerungen aufgenommen. Davon konnte aber nur ein Totholzstamm von der Aufnahme von 2002 wiedergefunden werden. Nach den ersten beiden Kartierungen konnte davon ausgegangen werden, dass die Persistenz des Totholzes im Reintal sehr hoch ist, da fast alle Ablagerungen von 2002 wiedergefunden wurden und es sich dabei teilweise um sehr alte Stämme handelte. Nach dem Hochwasser im August 2005 ist im Reintal zwar ungefähr die gleiche Menge an Totholz vorhanden wie im Vorjahr, es wurde jedoch nahezu vollständig ausgetauscht. Die Stabilität der Holzablagerungen im System ist also stark abhängig von dem Auftreten von Hochwasserereignissen und deren Größe. Zwischen den beiden ersten Kartierungen trat zwar ebenfalls ein Hochwasser auf (Tabelle 1), hierbei

wurden jedoch nur einige kleine Einzelstämme ausgeräumt.

Jahr	Hochwasserzeitpunkt	HQ [m <sup>3</sup> /s]	Kartierungszeitpunkt
2002	12.08.	12,8	20.08. - 22.08.
2003	14.06.	13,3	-
2004	20.07.	7,7	16.07. - 19.08.
2005	23.08.	50	24.09. - 29.09.

Tab. 1: Hochwasserstände und Zeiträume der Totholzkartierungen im Reintal.

Bei allen Kartierungen machen Einzelbäume mit mehr als 70% den Großteil der Tothölzer aus, komplexe Holzakkumulationen hatten eine Häufigkeit von rund 5% (Abb. 6).

Die Kartierstrecke besteht zum großen Teil aus gekrümmten Abschnitten, auf denen der Hauptteil der Totholzablagerungen zu finden ist. Die Vermutung, dass sich Totholz vor allem in den gebogenen Flussabschnitten ablagert, wurde statistisch überprüft. Der durchgeführte Chi-Quadrat-Test hatte ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 1$  Prozent. Es konnte bestätigt werden, dass es sich bei dem beobachteten Wert nicht um einen Zufallswert handelt, der aufgestellten These kann somit zugestimmt werden.

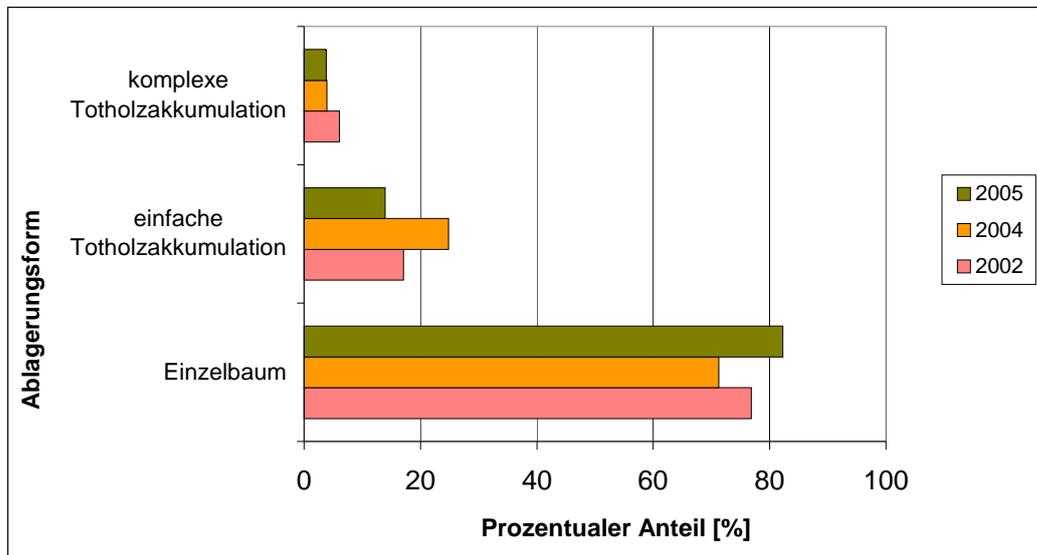


Abb. 6: Prozentualer Anteil der Ablagerungsform des aufgenommenen Totholzes.

Ein Großteil des Totholzes im Reintal ist durch fluvialen Transport von seinem ursprünglichen Standort an den jetzigen Depositionsstandort gelangt, die Ursache für den Eintrag in das Ge-

rinne ist nicht mehr nachvollziehbar. Macht der fluviale Transport 2002 nur 45 Prozent aus, sind es 2004 schon 57 Prozent. Nach dem starken Hochwasser im Sommer 2005 kann bei 75 Pro-

zent der aufgenommenen Tothölzer nur der fluviale Transport als Totholzlieferndes Medium angegeben werden. Eine weitere wichtige Totholzquelle für das Gerinne sind die sogenannten „Sturzbäume“ (LAWA 2000: 55), welche durch Rutschung, Kriechen oder Uferabbruch in das Gerinne gestürzt sind und nicht weiter transportiert wurden. Diese Bäume sind durch ihre Wurzel oft noch teilweise mit dem Ufer verbunden. Bei den ersten beiden Kartierungen wurde über ein Drittel der Tothölzer als Sturzbäume eingestuft, 2005 waren es in etwa noch 20 Prozent. Bei der Kartierung 2004 konnten außerdem vier Tothölzer kartiert werden, die durch anthropogenen Einfluss in das Gerinne gelangt sind. Bei 3 Totholzablagerungen handelt es sich um Stämme, welche von einer anthropogen angelegten Uferstabilisierung stammen. Des Weiteren konnte ein Stamm vermerkt werden, in dem Kerben zu sehen sind, welche vermutlich mit einer Axt eingeschlagen wurden (Abbildung 7).

Da es sich dabei um einen alten ausgebleichenen Baum ohne Rinde und Äste handelt, ist davon auszugehen, dass er aus der Zeit des Triftens stammt, welches im Reintal zwischen Ende des 18. Jahrhunderts und der 1960er Jahren durchgeführt wurde. Dabei wurden zersägte Stämme in die Partnach geworfen und talwärts geschwemmt. Um Verwechslungen auszuschließen schlugen die jeweiligen Besitzer ein Zeichen in das Holz, die sogenannte „Hausmarch“ (Rock 1951: 310).



Abb. 7: In ein Totholz eingeschlagene Hausmarch (Foto: A. Eitelmann, 19.08.2004).

Das in dem Untersuchungsgebiet aufgenommene Totholz wird durch verschiedene Ursachen an dem Ort seiner Ablagerung gehalten. Auffällig ist der hohe Anteil an Totholz, welches in Vergesellschaftung mit Blöcken auftritt, dieses macht bei allen Kartierungen in etwa die Hälfte aller Aufnahmen aus. Ein weiter hoher Teil der Totholzablagerungen liegt auf der Sohle bzw. auf Schotterflächen, wo es vermutlich wegen zu geringer Wassertiefe nicht weitertransportiert werden konnte. Die hierbei kritische Wassertiefe entspricht nach Braudrick & Grant (2001) ungefähr der Hälfte des Holzdurchmessers. Bei Hochwasser besteht die Möglichkeit der erneuten Mobilisierung des LWD.

### 3.2 Bildung von Steps und Pools

Bei der Kartierung im Sommer 2004 konnten im Untersuchungsgebiet 22 Totholzablagerungen mit Stepbildung aufgenommen werden. 14 LWD davon wurden bereits 2002 mitkartiert, bis auf eine Ausnahme war auch hier schon bei allen ein Step ausgebildet. Diese Ausnahme lag bei der ersten Aufnahme noch oberhalb der Sohle, so dass das Wasser darunter durchfließen konnte, bis zur Kartierung 2004 wurde jedoch ein Step ausgebildet (Abbildungen 8 und 9). Abbildung 9 macht deutlich, wie viel Geschiebe von einem Step zurückgehalten werden kann. Das akkumulierte Material stammt überwiegend von dem Hochwasser vom 14./15.06.2003. Alle Ablagerungen mit einer Stepbildung, welche bei der Kartierung 2002 aufgenommen wurden, sind auch zwei Jahre später noch vorhanden. 2005 konnten 14 zusätzliche Totholzablagerungen kartiert werden, an welchen eine Stepbildung zu beobachten war. Dabei handelte es sich ausschließlich um neu abgelagerte Stämme. Steps der zwei vorangegangenen Kartierungen wurden zerstört und nicht wiedergefunden.

Die Steps haben eine Breite zwischen 0,5 m und 7 m, sowohl bei den Stämmen von 2004 als auch bei jenen von 2005 war der überwiegende Teil (86 Prozent) kleiner als 3 m. Die Steps haben eine Höhe zwischen 0,14 m und 1,05, der Mittelwert liegt in beiden Jahren bei 0,46 m. Es wurden vor allem Steps mit einer Höhe zwischen 0,2 m und 0,6 m ausgebildet. Der von Curran & Wohl (2003) beschriebene Zusammenhang zwischen dem Stammdurchmesser und der Stephöhe konnte nicht nachgewiesen werden.



Abb. 8: Totholz bei der Kartierung 2002, Blick in Fließrichtung (Foto: Petra Hesse, 20.08.2002).



Abb. 9: Totholz bei der Kartierung 2004, Blick in Fließrichtung (Foto: Antje Eitelmann, 13.08.2004).

Von den 30 Pools der Kartierung von 2004 konnte 2005 kein einziger mehr wiedergefunden werden, stattdessen konnten 11 neue Pools aufgenommen werden. Dabei handelt es sich ausschließlich um Absturzpools. Die 2004 vermessenen Pools haben Flächen bis maximal 11 m<sup>2</sup>, der größte Pool 2005 ist dagegen nur 3,52 m<sup>2</sup> groß. Hier spielt vermutlich der Zeitfaktor eine Rolle, da dem System noch nicht die Zeit zur Verfügung stand um größere Poolflächen auszu-schürfen. Die durchschnittliche maximale Tiefe der Pools betrug 2004 0,45 m und 2005 0,41 m. Da bei der letzten Kartierung nur drei Pooltiefen messbar waren, wurden bei der Auswertung die Werte der letzten beiden Aufnahmen zusammen-

gefasst. Dabei konnte bei nur 20 Prozent der Fälle ein Zusammenhang zwischen der Pooltiefe und der Poolfläche ermittelt werden, eine Abhängigkeit der Pooltiefe von der Stephöhe war nur in 19 Prozent der Fälle nachweisbar. Ein geringer Zusammenhang konnte außerdem zwischen der Pooltiefe und dem mittleren Durchmesser des poolbildenden Stammes festgestellt werden (Abbildung 10). Die erklärte Varianz beträgt in diesem Fall rund 25 Prozent der Gesamtvarianz, betrachtet man die Werte von 2004 separat, beträgt sie etwa 32 Prozent. In dieser Untersuchung konnten somit keine statistisch signifikanten Ergebnisse erzielt werden.

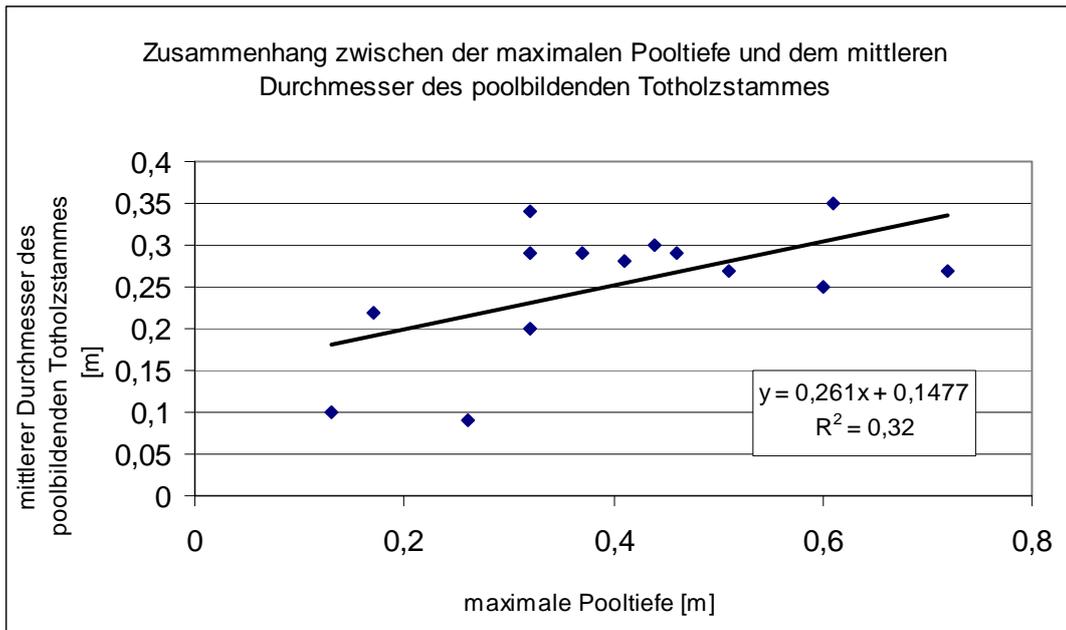


Abb. 10: Linearer Zusammenhang zwischen der maximalen Pooltiefe und dem mittleren Durchmesser des poolbildenden Totholzstammes (Datenaufnahme 2004, n = 14).

### 3.3 Wirkung des Totholzes als Geschiebefänger

#### 3.3.1 Masse des akkumulierten Materials

Die Masse des akkumulierten Materials wurde an 21 Standorten ermittelt, dabei wurden Werte zwischen 0,04 t und 25,1 t berechnet, wobei letzterer Wert eine Ausnahme bildet, der Mittelwert liegt bei 3,5 t. Mehr als drei Viertel der untersuchten Gesteinsablagerungen wurden von Einzelbäumen beziehungsweise einem Stamm einer einfachen Totholzakkumulation zurückgehalten, nur 20 Prozent wurden an komplexen Holzakkumulationen angehäuft (Abbildung 11).

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurden die Einzelbäume und die einfachen Totholzakkumulationen zusammengefasst, da sie auf eine ähnliche Weise auf ihre Umgebung wirken. Dabei konnte bei 13 Prozent der Werte ein Zusammenhang zwischen der Stammlänge und der Masse des akkumulierten Materials festgestellt werden, eine Beziehung zwischen dem Stammdurchmesser und der Masse des Geschiebes war nicht ableitbar, ebenso wenig wie zwischen dem Durchmesser des Totholzstammes und der mittleren Höhe des abgelagerten Materials. Ein größerer Zusammenhang konnte dagegen zwischen dem Holzvolumen komplexer Totholzakkumulationen und der Masse der Geschiebes festgestellt werden, die erklärte Varianz beträgt hier 94

Prozent der Gesamtvarianz. Dazu muss gesagt werden, dass für diese Untersuchung nur vier Werte zur Verfügung standen. Je mächtiger eine komplexe Totholzakkumulation ist, umso größer ist also auch die Masse des zurückgehaltenen Materials. Eine Analyse der Abhängigkeit des akkumulierten Materials und dem Holzvolumen der Einzelbäume brachte keine signifikanten Ergebnisse.

Die Höhe der Masse des Materials wurde anschließend separat für jene Ablagerungen betrachtet, welche eine Step ausgebildet haben und auf Zusammenhänge mit der Stepbreite untersucht. Der Anteil der erklärten Varianz beträgt in diesem Fall rund 39 Prozent der Gesamtvarianz. Nach dem starken Hochwasser im August 2005 gab es einen hohen Anteil an frischen Totholzstämmen im Untersuchungsgebiet, an denen neben Ästen und Zweigen auch noch grüne Nadeln vorhanden waren. Es konnte festgestellt werden, dass von Bäumen, die ihre Nadeln noch besaßen, mehr Geschiebe zurückgehalten werden konnte, als von Stämmen ohne Nadeln. So beträgt der Mittelwert der Masse des Materials bei den frischen Totholzstämmen circa 5,8 t, bei den älteren Holzablagerungen dagegen nur 1,8 t. Hier wäre eine erneute Kartierung empfehlenswert, um zu überprüfen, wie sich die Masse des akkumulierten Materials mit dem allmählichen Verlust der Nadeln verändert hat.

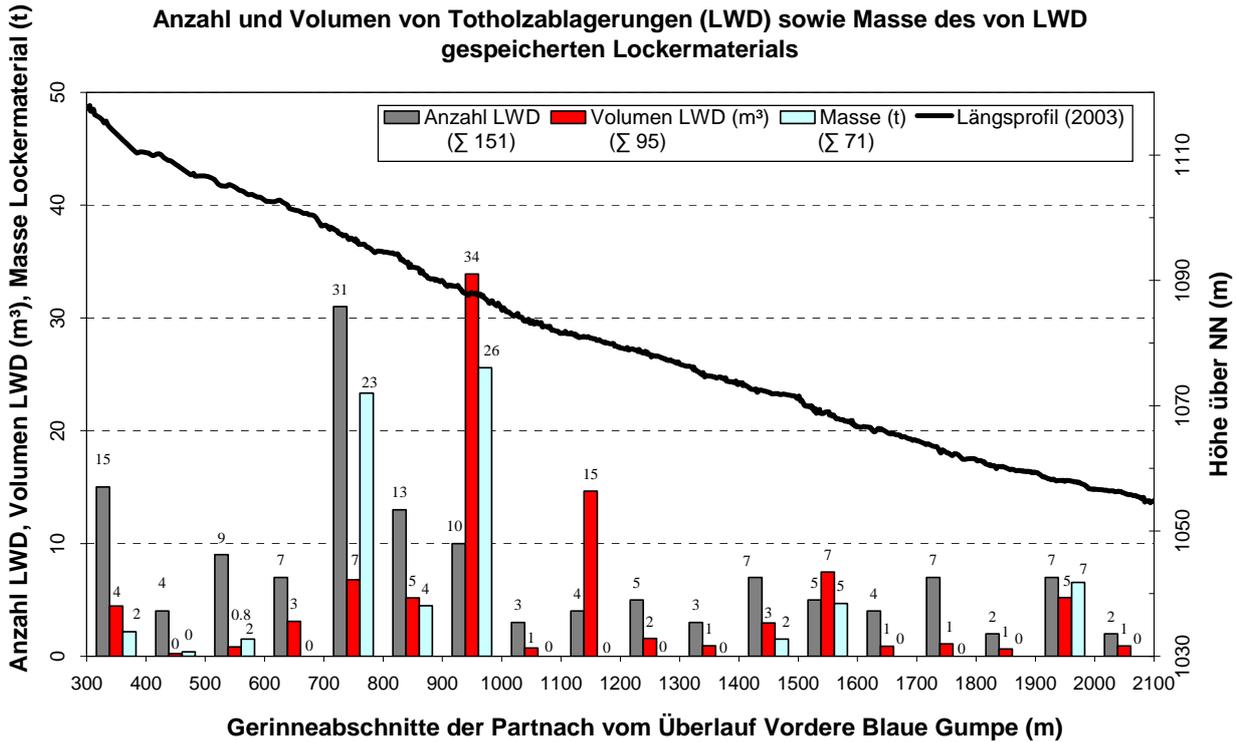


Abb. 11: Totholzvolumen und Masse des akkumulierten Materials im Längsprofil.

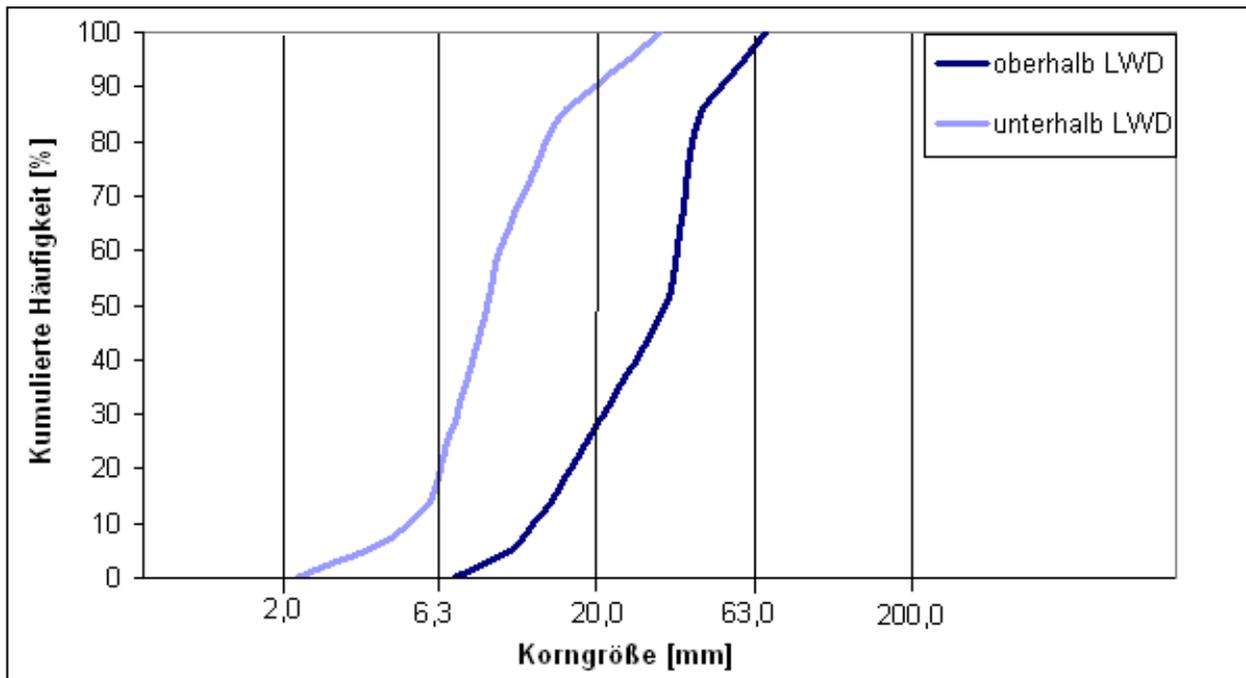


Abb. 12: Kornsummenkurven.

### 3.3.2 Granulometrische und morphometrische Analyse des akkumulierten Materials

Bei der granulometrischen Analyse der Partikelproben hat sich ergeben, dass sich unterhalb des

Totholzes vor allem feines Material ansammelt, oberhalb dagegen gröberes. Dieses Ergebnis zeigt sich, wenn man die charakteristischen Percentile  $D_{16}$ ,  $D_{50}$  &  $D_{84}$  der Kornsummenkurven miteinander vergleicht (Beispiel Abbildung 12). Ihre

Werte sind im Poolbereich stets kleiner als jene im Stepbereich. Sowohl im Bereich oberhalb der Holzablagerung, als auch unterhalb des Stammes gehört der Großteil der abgelagerten Partikel zur Kiesfraktion. Oberhalb des LWD handelt es sich dabei eher um grobe Kiese, Partikel der mittleren Kiesfraktion sind zwar bei fünf Probestandorten vorhanden, jedoch nur in geringen Prozentsätzen. Steine konnten dagegen an allen Standorten vermerkt werden. In den Poolbereichen sind Steine nicht so stark vertreten, sie konnten zwar an sechs Probestandorten aufgenommen werden, bilden aber nur einen geringen Anteil an dem abgelagerten Geschiebe. Auch Feinkiese machen einen nur kleinen Prozentsatz des Materials aus. Hier wurden vor allem Partikel der mittleren und groben Kiesfraktion aufgenommen. Die Ablagerung von feinerem Material im Bereich unterhalb des Totholzes wird durch die einzelnen Mittelwerte bestätigt, diese sind (in mm angegeben) ohne Ausnahme kleiner als in den Bereichen oberhalb des LWD. Das Ergebnis des Schiefheitsgrades deckt sich im Allgemeinen mit dem des Vergleichs der Perzentile. Die Verteilung der Poolproben ist stärker positiv schief als die des Stepbereiches, das heißt hier besteht ein höherer Anteil an feinem Material.

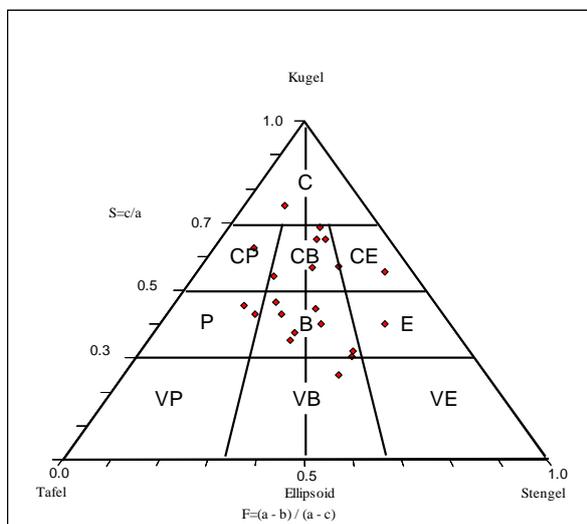


Abb. 13: Kornformdreieck nach SNEED & Folk (1958) einer Probe oberhalb der Totholzablagerung (C – kugelig, CP – kompakt-tafelförmig, CB – kompakt-ellipsoid, CE – kompakt-stengelig, P – tafelförmig, B – ellipsoid, E – stengelig, VP – sehr tafelförmig, VB – sehr ellipsoid, VE – sehr stengelig).

Die morphometrische Analyse wurde nur an den Partikeln der Kiesfraktion durchgeführt. Der durchschnittliche Zurundungsindex ist bei acht Proben im Poolbereich größer, die hier abgelager-

ten Partikel sind somit stärker gerundet als jene im Stepbereich. Die Zurundungswerte der Proben unterhalb des LWD steigen allgemein im Verlauf der Kartierstrecke an, der niedrigste Wert wurde mit 166,4 im oberen Drittel der Kartierstrecke ermittelt, die höchste durchschnittliche Zurundung gab es mit 212,4 im weiteren Flussverlauf kurz vor Ende des Untersuchungsgebietes. Dieses sogenannte Downstream fining wurde schon während früherer morphometrischer Analysen im Reintal von Morche & Schmidt (2005) festgestellt. Es ist mit der zunehmenden Transportstrecke zu erklären, welche die Partikel zurückgelegt haben, diese unterlagen dabei einer größeren Beanspruchung als jene Partikel weiter oberhalb im Flussverlauf. Der durchschnittliche Abplattungsindex liegt sowohl im Pool-, als auch im Stepbereich zwischen 1,7 und 1,9, bei sechs Proben hat er dabei jeweils den gleichen Wert. Ein Entwicklungstrend, wie bei dem Zurundungsindex der Partikel unterhalb des Totholzes, ist bei der Abplattung nicht zu beobachten.

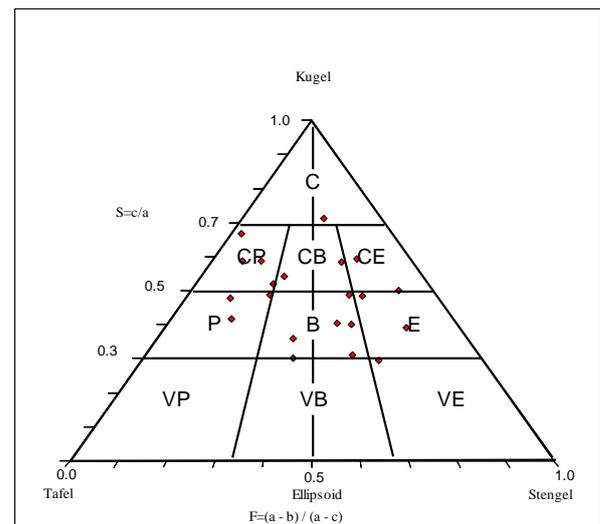


Abb. 14: Kornformdreieck nach Sneed & Folk (1958) einer Probe unterhalb der Totholzablagerung (C – kugelig, CP – kompakt-tafelförmig, CB – kompakt-ellipsoid, CE – kompakt-stengelig, P – tafelförmig, B – ellipsoid, E – stengelig, VP – sehr tafelförmig, VB – sehr ellipsoid, VE – sehr stengelig).

Mittels eines Kornformdreiecks nach Sneed & Folk (1958) wurde die Partikelform der Kiese bestimmt (Beispiel Abbildungen 13 und 14). In den Ablagerungen im Bereich oberhalb des Totholzes dominieren ellipsoide und kompakt-ellipsoide Partikel, in jeder Probe bildete mindestens eine der beiden Kornformen die Mehrheit oder war an einem sekundären Maximum beteiligt. Ein primäres Maximum wird hier nur einmal

von kugeligen und zweimal von stengeligen Partikeln gebildet. Im Poolbereich dominieren neben den ellipsoiden und kompakt-ellipsoiden Partikeln keine weiteren Kornformen. Kompakt-tafelförmige Partikel stellen bei fünf Proben im Stepbereich einen höheren prozentualen Anteil als unterhalb des Totholzes, stengelige an acht Standorten. Laut Gintz (1995) wird stengelförmiges Geschiebe vergleichsweise weiter transportiert als andere Kornformen. Für diese These spricht, dass stengelige Partikel ihren höchsten Anteil oberhalb des LWD bei der Probe kurz vor Verlassen des Kartiergebietes im unteren Flussverlauf erreichen, 55 Prozent der Partikel haben hier diese Form. Dennoch gehören sie, wie die kompakt-tafelförmigen Körner, zu den Formen, welche eher vom Totholzstamm am Weitertransport gehindert und oberhalb davon abgelagert werden. Zu den Kornformen, welche mit höherem Anteil im Poolbereich der jeweiligen Standorte aufzufinden waren, gehören kugelige, kompakt-ellipsoide und ellipsoide Partikel. Da die beiden letztgenannten in den meisten Fällen gleichzeitig oberhalb der Totholzablagerung das Maximum bilden, kann man in diesem Fall nicht von einem bevorzugten Weitertransport, bzw. Rückhalt im Stepbereich sprechen. Kugelige Partikel treten im Gegensatz zum Stepbereich regelmäßig im Poolbereich auf, sie werden von dem Totholz nicht so stark in ihrem Transport behindert wie andere Kornformen.

#### 4. Fazit

Das mittlere Reintal weist eine große Menge an grobem Totholz auf. Nachdem sich die Anzahl der Totholzablagerungen von 2002 auf 2004 fast verdoppelt hat, konnte bei der dritten Kartierung im Sommer 2005 in etwa die gleiche Menge an Holz aufgenommen wurde, dabei handelte es sich jedoch um neues LWD. Das Totholz der ersten beiden Aufnahmen wurde 2005 während des Augusthochwassers aus dem Untersuchungsgebiet heraus transportiert.

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich Totholz bevorzugt auf gekrümmten Gerinnabschnitten ablagert, auf gerade verlaufenden Teilstrecken konnte nicht soviel LWD aufgenommen werden. Auffallend ist außerdem die häufige Vergesellschaftung der Totholzablagerungen mit Blöcken, durch die sie in ihrem Transport behindert werden. Eine weitere wichtige Rolle bei der Ablagerung von grobem Totholz spielt die Wassertiefe.

Bei allen Kartierungen konnten Steps aufgenommen werden, deren Breite und Höhe vermessen wurden. Der von anderen Autoren beschriebene Zusammenhang zwischen dem Stammdurchmesser und der Stephöhe konnte nicht nachgewiesen werden. Bei der Auswertung des Absturz-Pools konnten eine geringe Abhängigkeit der Pooltiefe von der Poolfläche, dem mittleren Durchmesser des poolbildenden Totholzstammes und der Stephöhe ermittelt werden. Auch diese Ergebnisse sind nicht so signifikant wie bei anderen Verfassern. Eine mögliche Ursache dafür, dass im Reintal keine so signifikanten Abhängigkeiten ermittelt werden konnten, kann die geringe Zeit sein, die dem System zur Verfügung steht um sich einzustellen, bevor erneute Veränderungen auftreten.

Die granulometrische und morphometrische Analyse hat ergeben, dass an allen beprobten Standorten im Poolbereich mehr feines, gerundeteres Material angehäuft ist als in dem Bereich oberhalb des LWD. Ein Einfluss des Totholzes auf den Sedimenttransport konnte somit eindeutig nachgewiesen werden. Das Ergebnis zeigt außerdem, dass die Poolbereiche nicht vollständig von der Sedimentzufuhr abgeschlossen sind, da sonst auch das Feinmaterial oberhalb des Holzes akkumuliert wäre. Sande und Kiese wären in diesem Fall allmählich aus der Sohle gelöst und wegtransportiert worden, so dass sich ein Erosionspflaster mit groben Material gebildet hätte (Bunte & Abt 2001).

Etwa 30 Prozent der Totholzablagerungen fungiert als Geschiebefänger, an 21 Standorten konnte die Masse des akkumulierten Materials ermittelt werden. Dabei konnte ein geringer Zusammenhang zwischen der Länge des Totholzstammes und der Masse des zurückgehaltenen Geschiebes festgestellt werden. Bei komplexen Totholzakkumulationen ist die Masse des Materials abhängig von dem Holzvolumen. Dabei spielt es eine wichtige Rolle, ob es sich um frisches Totholz mit noch vorhandenen Nadeln handelt, da hier der Sedimentrückhalt erhöht ist.

Im Untersuchungsgebiet dominieren neben den ellipsoiden die kompakt-ellipsoiden Partikel, deren häufiges Auftreten auch bei Morche & Schmidt (2005) festgestellt wurde. Beide Partikelformen bilden im Allgemeinen das Kornformenmaximum im Step- als auch im Poolbereich. Stengelige und kompakt-tafelförmige Partikel werden vorzugsweise von dem Totholz zurückgehalten, kugelige Partikel werden dagegen eher weitertransportiert und im Poolbereich abgelagert.

Der Einfluss von grobem Totholz auf die Geomorphologie eines Fließgewässersystems konnte anhand der Ergebnisse eindeutig nachgewiesen werden.

## 5. Danksagung

Das Projekt wurde unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG; Az. SCHM 475/121-3). Die Ergebnisse der Totholzkartierungen von 2002 und 2004 stammen aus der Diplomarbeit von Antje Krause (heute Eitelmann, 2005).

Für ihre Unterstützung bei den Kartierungen und teilweise darüber hinaus sei Maik Unbenannt, Petra Hesse, Wolf-Rüdiger Eitelmann und Markus Witzsche gedankt.

## 6. Literatur

- Braudrick, C. A. & Grant, G. E. (2001): Transport and deposition of large woody debris in streams: A flume experiment. – *Geomorphology*, 41: 263-283.
- Buffington, J. M., Lisle, T. E., Woodsmith, R. D. & Hilton, S. (2002): Controls on the size and occurrence of pools in coarse-grained forest rivers. – *River Research and Applications*, 18: 507-531.
- Bunte, K. & Abt, S. (2001): Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. – USDA Rocky Mountains Research Station General Technical Report, RMRS-GTR - 74.
- Cailleux, A. (1952): Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie. – *Geolog. Rundschau*, 40: 11-19.
- Curran, J.H. & Wohl, E. E. (2003): Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. – *Geomorphology*, 51: 141-157.
- Downs, P. W. & Simon, A. (2001): Fluvial geomorphological analysis of the recruitment of large woody debris in the Yalobusha River Network, Central Mississippi, USA. – *Geomorphology*, 37: 65-91.
- Faustini, J. M. & Jones, J. A. (2003): Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in step, boulder-rich mountain streams, Western Cascades, Oregon. – *Geomorphology*, 51: 187-205.
- Fetherston, K. L., Naiman, R. J. & Bilby, R. E. (1995): Large woody debris, physical process, and riparian forest development in montane river networks of the Pacific Northwest. – *Geomorphology*, 13: 133-144.
- Folk, R. L. & Ward, W. C. (1957): Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. – *Journal of Sedimentary Petrology*, 1: 3-26.
- Gerhard, M. & Reich, M. (2000): Restoration of streams with large wood: Effects of accumulated and built-in wood on channel morphology, habitat diversity and aquatic fauna. – *International Review of Hydrobiology*, 85: 123-137.
- Gintz, D. (1995): Transportdistanzen und räumliche Verteilung von Grobgeschieben in Abhängigkeit von Geschiebeeigenschaften und Gerinnemorphologie – Tracerversuche im Lainbach/ Obb. – *Berliner Geographische Abhandlungen, Beihefte*; Berlin.
- Haschenburger, J. K. & Rice, S. P. (2004): Changes in woody debris and bed material texture in a gravel-bed channel. – *Geomorphology*, 60: 241-267.
- Hassan, M. A. & Woodsmith, R. D. (2004): Bed load transport in an obstruction-formed pool in a forest, gravel-bed stream. – *Geomorphology*, 58: 203-221.
- Hering, D. & Reich, M. (1997): Bedeutung von Totholz für Morphologie, Besiedlung und Renaturierung mitteleuropäischer Fließgewässer. – *Natur und Landschaft*, 9: 383-387.
- Hering, D., Kail, J., Eckert, S., Gerhard, M., Meyer, E. I., Mutz, M., Reich, M. & Weiss, I. (2000): Coarse woody debris quantity and distribution in Central European Streams. – *International Review of Hydrobiology*, 85: 5-23.
- Hering, D., Mutz, M. & Reich, M. (2000): Woody debris research in Germany – An introduction. – *International Review of Hydrobiology*, 85: 1-3.
- Hogan, D. L. (1987): The influence of large organic debris on channel recovery on the Queen Charlotte Islands, British Columbia, Canada. Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim (Proceedings of the Corvallis Symposium, August, 1987). IAHS Publ., 165: 343-353.
- Huette, M. (2000): Ökologie und Wasserbau: ökologische Grundlagen von Gewässerverbauungen und Wasserkraftnutzung; Berlin, Wien.
- Kail, J. (2003): Influence of large woody debris on the morphology of six central European streams. – *Geomorphology*, 51: 207-223.
- Kail, J. (2004): Totholz in Fließgewässern. – <http://www.totholz.de>. Internet-Recherche vom 10. 11. 2004.
- Krause, A. (2005): Räumliche Muster und zeitliche Variabilität der Totholzverteilung im Reintal (Oberbayern). – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Halle (Saale).
- LAWA (2002): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland – Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer; Schwerin.
- Marcus, W. A.; Marston, R. A., Colvard Jr., C. R. & Gray, R. D. (2002): Mapping the spatial and temporal distributions of woody debris in streams of the Greater Yellowstone Ecosystem, USA. – *Geomorphology*, 44: 323-335.
- Morche, D. & Schmidt, K.-H. (2005): Particle size and particle shape analyses of unconsolidated material from sediment sources and sinks in a small Alpine catchment (Reintal, Bavarian Alps, Germany). –

- Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement-Band, 138: 67-79.
- Müller, G. (1964): Methoden der Sediment-Untersuchung. – Sediment-Petrologie, Teil 1; Stuttgart.
- Mutz, M. (2000): Influences of woody debris on flow patterns and channel morphology in a low energy, sand-bed stream reach. – International Review of Hydrobiology, 85: 107-121.
- Piégay, H., Thévenet, A. & Citterio, A. (1999): Input, storage and distribution of large woody debris along a mountain river continuum, the Drôme River, France. – Catena, 35: 19-39.
- Rock, E. (1951): Werdenfelser Land – In früherer Zeit; Garmisch-Partenkirchen.
- Schmidt, K.-H. & Ergenzinger, P. J. (1992): Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods – studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. – Earth Surface Processes and Landforms, 17: 147-165.
- Sneed, E. D. & Folk, R. L. (1958): Pebbles in the lower Colorado River, Texas – A study in particle morphogenesis. – Journal of Geology, 66: 114-150.
- Wallerstein, N. P. & Thorne, C. R. (2004): Influence of large woody debris on morphological evolution of incised, sand-bed channels. – Geomorphology, 57: 53-73.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 97-112, 9 Abb., 3 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Die flächenhafte Ausweisung von Bodenfeuchteregimes – Eine Methode im Rahmen des pre-processing für die Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes

Peter Chiffard, Michael Köchling, Jens Didszun & Harald Zepp<sup>\*</sup>

Chiffard, P., Köchling, M., Didszun, J. & Zepp, H. (2011): Die flächenhafte Ausweisung von Bodenfeuchteregimes – Eine Methode im Rahmen des pre-processing für die Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes. [The spatial classification of soil moisture regimes – A method within the pre-processing for the regional water balance modeling.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 97-112, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** In dem Einzugsgebiet „Obere Brachtpe“ (2,6 km<sup>2</sup>, Sauerland, Deutschland) wurden mit einer konventionellen Bohrstock-Kartierung (319 Bodenprofile) die verschiedenen Böden mit ihren spezifischen pedohydrologischen Eigenschaften erfasst und darauf aufbauend das Klassifikationskonzept zur Ableitung von Bodenfeuchteregime-Typen nach Zepp (1995) angewendet. Anhand dieser Informationen konnte die vorherrschende Wasserbewegungsrichtung und folglich verschiedene Abflussprozessflächen ausgewiesen werden. Um dieses Raumgliederungskonzept hinsichtlich der Frage, ob es zum pre-processing für die Modellierung des Landschaftswasserhaushalts beitragen kann, zu verifizieren, wurden zwei Niederschlags-Abfluss-Ereignisse tracerhydrologisch untersucht. Die Resultate zeigen, dass sich das Klassifikationskonzept nach Zepp (1995) zur hydrologischen Raumgliederung eines Einzugsgebietes gut eignet, es wird aber auch deutlich, dass neben den Bodeneigenschaften insbesondere die Lage der schnell reagierenden Flächen (Sättigungsflächen) innerhalb des Einzugsgebietes und deren Konnektivität mit dem Vorfluter entscheidend für den Beitrag schneller Abflusskomponenten sind. Besteht eine direkte Verbindung zwischen Sättigungsflächen und Vorfluter, so ist eine schnelle Abflussreaktion und ein hoher Anteil an Ereigniswasser zu erwarten.

**Abstract:** In the catchment “Obere Brachtpe” (2,6 km<sup>2</sup>, Sauerland, Germany) the soils and their specific pedohydrological characteristics were investigated using a conventional drilling rig (319 drills). Based on the results the classification concept for deducing the soil moisture types by Zepp (1995) was applied so that the dominant flow directions and dominant runoff process areas could be detected. The question if this classification concept could be used as tool for the pre-processing within the runoff modelling was verified by the tracer hydrological investigation of two rainfall runoff-events. The results confirm that the classification concept by Zepp (1995) is an applicable tool for the spatial delineation of a catchment in hydrological response units. On the other hand it became apparent that in addition to the soil properties, the location of saturated areas within the catchment and their connectivity to the channel are especially important for the contribution of accelerated runoff components. If there exists a direct connection between the saturated areas and the channel a fast runoff reaction and a high portion of event water can be estimated.

**Schlüsselwörter:** Bodenwasser, Bodenfeuchteregime, Abflussbildung, Obere Brachtpe

**Keywords:** pedohydrology, soil moisture regimes, tracer hydrology, runoff

---

<sup>\*</sup> Anschriften der Autoren:

Dr. Peter Chiffard (peter.chiffard@wkl.ac.at), WasserKluster Lunz GmbH, Dr. Carl Kupelwieser Promenade 5, A-3293 Lunz am See;

Dipl.-Geogr. Michael Köchling, Horstmarer Str. 13, D-44239 Dortmund;

Prof. Dr. Harald Zepp, Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Universitätsstr. 150, D-44780 Bochum.

## 1. Einführung und Problemstellung

Die flächendifferenzierte Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes ist eine komplexe Aufgabe, die auf der Landschaftsskala eine vereinfachte Behandlung der Bodenwasserdynamik verlangt. Letztere steuert in Abhängigkeit der bodenphysikalischen Eigenschaften eine Vielzahl anderer hydrologischer Prozesse wie die Aufteilung in oberirdischen und unterirdischen Abfluss oder auch generell die Verfügbarkeit von Wasser für die Vegetation (Gutknecht 1996, Zepp & Herget 2001, Peschke 2001, Castillo et al. 2003, Zehe et al. 2005). Abflussbildung und Wasserspeicherung sind abhängig vom Systemzustand (Bodenfeuchte, Wasserstände bei Ereignisbeginn) und den Bodeneigenschaften (Durchlässigkeit, Speicherkapazität, Infiltrationskapazität) (Peschke 2001). Es ist aber messtechnisch nicht möglich, zeitlich variable, flächendeckende Eingangsdaten zum Bodenfeuchtezustand in die Simulationsmodelle einzuspeisen. Daher gab es aufgrund der bedeutenden Rolle des Bodens im Wasserkreislauf in der Vergangenheit zahlreiche Versuche, bodenhydrologische Raumgliederungen sinnvoll in die Modellierung einzubinden. Wenn bekannt ist, welche vertikale und laterale Abflussbildungsprozesse auf einer Raumeinheit unter den entsprechenden Bedingungen dominieren, so ist eine erhebliche, wissenschaftlich begründete Modellreduktion möglich (Kirnbauer et al. 2009). Generell wird bei der Raumgliederung ein Einzugsgebiet in Einheiten aufgegliedert, die hinsichtlich ihrer hydrologischen Eigenschaft homogen sind, sogenannte „Hydrological Response Units“ (Becker & Pfützner 1987, Flügel 1996, Uhlenbrook 1999, Tilch et al. 2006).

Einen wesentlichen Bestandteil bildet der Boden bei dem Raumgliederungskonzept von Peschke et al. (1998), dem Wissensbasierten System FLAB (Flächen gleicher Abflussbildung). Beim pre-processing werden die Bodentypen bereits nach ihrer hydrologischen Wirkung differenziert und z.B. in Böden mit Staunässe (Pseudogley, Stagnogley) oder grundwasserbeeinflusste Böden (Gley) unterteilt.

Eine ausschließlich auf die Bodeneigenschaften – und nicht auf das Integral der Wasserhaushaltsinformation der Bodentypen – bezogene räumliche Differenzierung hinsichtlich der dominanten Abflussprozesse stellt die von Boormann et al. (1995) entwickelte HOST-Klassifikation dar (Hydrology Of Soil Types). In dieser werden die Böden Großbritanniens basie-

rend auf den vorhandenen Bodenkarten (Maßstab 1:250000) und den verfügbaren Daten zu bodenphysikalischen sowie hydrologischen Eigenschaften beschrieben und deren räumliche Verbreitung dargestellt. Die Klassifikation orientiert sich in erster Linie an der Unterteilung zwischen vertikalem und lateralem Bodenwasserfluss.

Das von Naef et al. (2007) in der Schweiz entwickelte Raumgliederungskonzept basiert auf umfangreichen Beregnungsversuchen, die insbesondere die hydrologischen Prozesse im Umsatzraum Boden betrachten (siehe auch Scherrer & Naef 2003, Scherrer et al. 2006, Schmocker-Fackel et al. 2006). Die Autoren definieren in Abhängigkeit zu verschiedenen Geofaktoren 9 grundsätzliche Abflusstypen. Ebenfalls auf der Grundlage von zahlreichen Versuchen mit künstlichem Niederschlag wurde von Markart et al. (2004) eine Kartieranleitung entwickelt, mit der die Abflussdisposition von typischen alpinen Vegetations-Bodeneinheiten im alpinen Raum bestimmt und regionalisiert werden kann.

Ein übertragbares Konzept zur bodenhydrologisch orientierten Raumgliederung stellt die Identifizierung von Bodenfeuchteregeime-Typen nach Zepp (1991, 1995) dar. Er knüpft an die landschaftsökologisch begründeten Bodenfeuchteregeime-Typen durch Neef et al. (1961) an. Die Bodenfeuchteregeime-Typen werden in einem ersten Schritt semiquantitativ in Abhängigkeit der Parameter Bodenart, Landnutzungstyp, klimatische Wasserbilanz und Feuchteregeime-Grundtyp ermittelt. Letzterer wird anhand einer Entscheidungsleiter bestimmt, die die Böden nach Hangnähe, Überflutung, Grundwasser, Stauwasser und Bodenartenschichtung typisiert und insgesamt zu 24 unterschiedlichen Feuchteregeime-Grundtypen führt (Zepp 1995). Liegen für typische Kombinationen aus Boden und Vegetation/Landnutzung Messreihen der Wasserspannung in verschiedenen Tiefen vor, können die Bodenfeuchteregeime-Grundtypen quantifiziert werden, indem die zeitliche Feuchteverteilung nach einem allgemein anwendbaren Klassifikationsansatz generalisiert wird. Liegen keine Geländemessungen vor, so können Schätztabellen (Zepp 1999) angewendet werden. Auf der Grundlage dieser bodenhydrologischen Standortcharakterisierung kann aus dem Bodenfeuchteregeime-Grundtyp ein Rückschluss auf die vorherrschende Richtung des Bodenwassers genommen und aus den Feuchteverteilungsklassen die Intensität des dominanten Abflussbildungsprozesses abgeleitet werden. Anwendung fand dieses Konzept in der Arbeit von

Thimm & Zepp (2005), die es für eine Optimierung der Landnutzung an standörtliche Gegebenheiten bei Verhältnissen im subtropischen Südosten Chinas eingesetzt haben. Auf Mitteleuropa bezogen liegt eine großmaßstäbige Studie von Burak (1988, zitiert in Zepp 1999:325) und die Übertragung des Prinzips in den kleinen Maßstab als Bestandteil der prozessorientierten landschaftsökologischen Raumgliederung Deutschlands (Burak 2005) vor.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, im Untersuchungsgebiet „Obere Brachtpe“ die verschiedenen Böden mit ihren spezifischen pedohydrologischen Eigenschaften zu erfassen und darauf aufbauend das Klassifikationskonzept zur Ableitung von Bodenfeuchteregime-Typen nach Zepp (1995) anzuwenden. Es soll der Frage nachgegangen werden, welchen Beitrag dieses Raumgliederungskonzept zu einem pre-processing für die Modellierung des Landschaftswasserhaushalts leisten kann.

## 2. Lage und naturräumliche Charakteristika des hydrologisch-landschaftsökologischen Untersuchungsgebietes „Obere Brachtpe“

Vom Lehrstuhl für Angewandte Physische Geographie der Ruhr-Universität Bochum wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hydrolo-

gie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik und dem Ruhrverband Essen zwischen 1999 und 2008 die zwei hydrologisch-landschaftsökologischen Untersuchungsgebiete „Obere Brachtpe“ (2,6 km<sup>2</sup>) und „Bohläse“ (0,7 km<sup>2</sup>) im südlichen Sauerland (Nordrhein-Westfalen, Deutschland) betrieben. Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen fanden im Gebiet „Obere Brachtpe“ statt, das sich über einen Höhenbereich von 379 m bis 515 m ü. NN erstreckt (Abb. 1). Die Jahresmitteltemperatur beträgt 9,1° C, der Jahresniederschlag liegt im Mittel bei 1227,8 mm (Deutscher Wetterdienst 2004). Der mittlere Abfluss beträgt am Gebietsauslass, Pegel Husten, 942 mm (Zeitraum 2000 bis 2005) (Ruhr-Verband Essen 2005). Den geologischen Untergrund bilden überwiegend Ton- und Siltschiefer des Unter- und Mitteldevons, stellenweise treten feinkörnige Sandsteineinlagerungen hinzu (Grabert & Hilden 1972). Die Morphologie des Untersuchungsgebietes „Obere Brachtpe“ wird im südlichen Teileinzugsgebiet Silberkuhle durch einen mittelseigenen (5-10°), ca. 1300 m langen Hang, geprägt. Im Gegensatz dazu stehen die nördlich anschließenden Teileinzugsgebiete Tillkausen, Hähnen und Wälder, die Hangneigungen bis zu 30° aufweisen. Mit einem Flächenanteil von 51 % überwiegt im Einzugsgebiet die Grünlandnutzung, während 30 % von Nadelwäldern eingenommen wird.

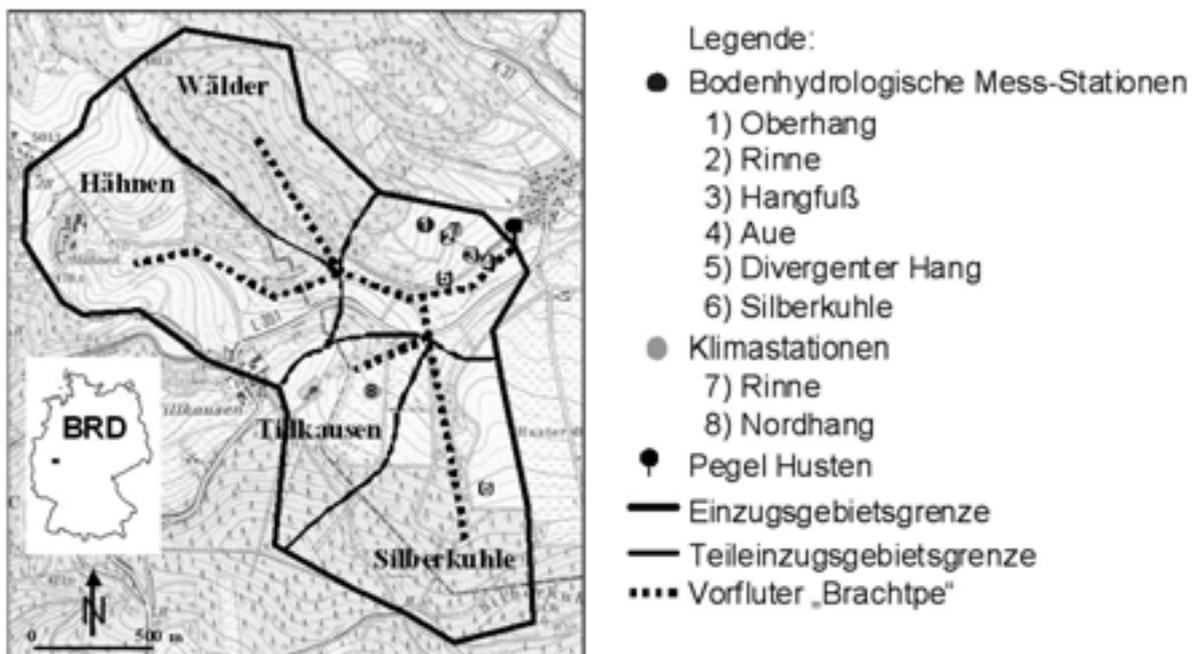


Abb. 1: Einzugsgebiet „Obere Brachtpe“ mit den Teileinzugsgebieten und Messeinrichtungen (Chiffard 2006).

### 3. Material und Methoden

#### 3.1. Kontinuierliche hydrometrische Messungen

Im Untersuchungsgebiet „Obere Brachtpe“ standen für das zeitlich hoch aufgelöste Monitoring der Wasserspannung sechs bodenhydrologische Mess-Stationen zur Verfügung (Abb. 1). Die Standorte der bodenhydrologischen Mess-Stationen sind nach spezifischen Boden-Relief-Landnutzungs-Komplexen ausgewählt worden und am Messhang „Husten“ (Stationen Nr. 1-4; Abb. 1) nach dem Catena-Prinzip angeordnet. Der Messhang ist ein etwa 300 m langer konvergenter Hang, mit Neigungen von 0° bis 15° und einem ca. 60 m breiten, vorgelagerten, flachen Talgrund. Je nach Bodenaufbau sind die Stationen mit Druckaufnehmertensiometern in 4 bis 6 Messtiefen (20 bis 200 cm) ausgestattet. Die Wasserspannung wurde über Loggerbetrieb automatisch im 10 min-Intervall aufgezeichnet. Mit gleichem Intervall stehen der Freilandniederschlag, gemessen an der Mess-Station Rinne mit einer Kippwaage in 1 m Höhe, zur Verfügung. Der Vorfluterabfluss wird am Pegel Husten im 15 min-Intervall mit einer pneumatischen Pegelstation erfasst.

#### 3.2. Pedohydrologische Feld- und Labormethoden

Die Geländeaufnahme des Bodens erfolgte flächenhaft durch eine konventionelle Bohrstock-Kartierung (Pürkhauer) im Maßstab 1:5000 nach dem Catena-Prinzip (Schlichting, Blume & Stahr 1995). Die Anzahl der Bohrpunkte beträgt 319 Bohrungen. An jedem Bohrpunkt wurden jeweils Standortdaten und Profildaten erhoben (Tab. 1). Die allgemeinen Standortdaten dienen der Aufnahme der Geländesituation am Bohrstandort und umfassen hauptsächlich Reliefparameter sowie Nutzungs- und Vegetationsarten. Profildaten sind horizontbezogene Daten der Standorteinheit mit den Eigenschaften der jeweiligen Bodenschicht und werden am Bohrgut nach den Vorgaben der AG Boden (1994) erhoben. Sie umfassen ausgewählte bodenphysikalische Merkmale, mit denen die hydrologischen Eigenschaften der Böden beschrieben werden können und die für eine Regionalisierung der Bodenfeuchtereime-Typen nach Zepp (1995) die Datengrundlage bilden. Über verschiedene Transferfunktionen (AG Boden 1994, Zepp 1991) ließen sich aus den Profildaten Kennwerte der Wasserbindung oder Feuchteverteilungsklassen (Zepp 1991) ableiten.

Profildaten/horizontbezogene Daten	abgeleitete Bodenparameter
- Horizontgrenzen	- Bodentyp
- Bodenart	- Bodenform
- Humusgehalt	- Bodenartenschichtung
- Skelettgehalt	- nFKWe
- Lagerungsdichte	- FK
- hydromorphe Merkmale	- LK
- Bodenfeuchte	- Totwasser
- (Durchwurzelung)	- Wasserdurchlässigkeit (kf)
- Farbe	- Bodenfeuchtereime-Grundtyp
- Carbonatgehalt	- Bodenfeuchtereime
- Gründigkeit	- Staunäsetiefe
- oberflächennaher Untergrund/Ausgangsgestein	- Staunäsegrad
	- Grundwasserstand

Tab. 1: Ermittelte und abgeleitete Profildaten.

Zur Absicherung der Bodenansprachen am Bohrgut konnte auf Daten von 6 Leitprofilgruppen zurückgegriffen werden, durch die es möglich war, die wichtigsten Bodenformen repräsentativ zu erfassen. Bei diesen Leitprofilen

(Schürfgruben) wurden an gestörten Bodenproben im Labor der Skelettgehalt, die Bodenart (DIN 19683, Blatt 2), der pH-Wert und der Kohlenstoff-Gesamtgehalt (Schlichting, Blume & Stahr 1995) bestimmt.

### 3.3. Bestimmung der Bodenfeuchte-regime-Typen

Das Bodenfeuchteregime wird durch den Bodenfeuchteregime-Grundtyp (Tab. 2) und das Quantitative Bodenfeuchteregime charakterisiert (Tab. 3) (Zepp 1995). Die Grundtypen sind qualitative Beurteilungen des vorherrschenden Charakters der Bodenwasserdynamik. Sie drücken aus, ob Stau- oder Grundwasser den Wasserhaushalt beeinflusst und welche Richtung die Wasserflüsse im und auf dem Boden nehmen. Eine Quantifizierung des Feuchteregimes erfolgt

über die Angabe klassifizierter Häufigkeitsverteilungen (Feuchteverteilungsklassen; Abb. 2) unter Bildung der Minima, Maxima, Median und Quartilswerte der Bodenwasserspannung getrennt in 30 cm und 90 cm Tiefe für die Vegetationsperiode (April bis Oktober). Die Feuchteverteilungsklassen können mit Hilfe der Klassenkennzeichnung in Tabelle 3 verbal beschrieben werden. Sie stehen nicht für Feuchtezustände zu bestimmten Zeitpunkten, sondern integrieren die Bodenfeuchte während einer Vegetationsperiode.

Grundtypen	Abkürzungen
Perkolations-Typ	PE
Stauwasser-Typ	ST
Grundwasser-Typ	GR
Kombinierter Grund- und Stauwassertyp	GS
Hangwasser-Typ	HA
Kombinierter Grundwasser- und Überflutungstyp	GÜ
Abfluss-Typ	AB

Tab. 2: Bodenfeuchteregime-Grundtypen (nach ZEPP 1995).

Kategorie	Klassen-Kennzeichnung	Kurzzeichen
nass	<i>permanent nass oder wassergesättigt, extremer Luftmangel</i>	N
	<i>überwiegend nass oder sehr feucht, meist eingeschränkte Sauerstoffversorgung</i>	NsF1
	<i>überwiegend nass oder sehr feucht, kurzfristig trocken</i>	NsF2
feucht	<i>überwiegend feucht, zeitweise nass oder sehr feucht</i>	F
	<i>überwiegend feucht, zeitweise nass oder sehr feucht, kurzfristig frisch und mäßig frisch; zeitlich wechselnde Wasserbindung</i>	Fw
mäßig feucht	<i>überwiegend feucht bis mäßig feucht, selten sehr frisch, selten frisch; stark wechselnde Wasserbindung</i>	FmF
frisch	<i>überwiegend frisch, zeitweise sehr feucht oder nass, wechselnde Wasserbindung</i>	FRw
	<i>überwiegend mäßig frisch, zeitweise feucht bis sehr feucht, kurzfristig trocken, sehr unausgeglichene Feuchteverteilung</i>	mFRw
	<i>überwiegend mäßig frisch, zeitweise sehr feucht bis frisch, ausgeglichene Feuchteverhältnisse</i>	mFR
mäßig frisch/ trocken	<i>überwiegend mäßig frisch und trocken, zeitweise frisch bis feucht; zeitlich wechselnde Wasserspannung, Trockengefährdet</i>	mFRTw
	<i>überwiegend mäßig frisch und trocken, kurzfristig mäßig feucht; trockengefährdet</i>	mFRT

Tab. 3: Verbale Kennzeichnung der Bodenfeuchteregime (nach Zepp 1999).

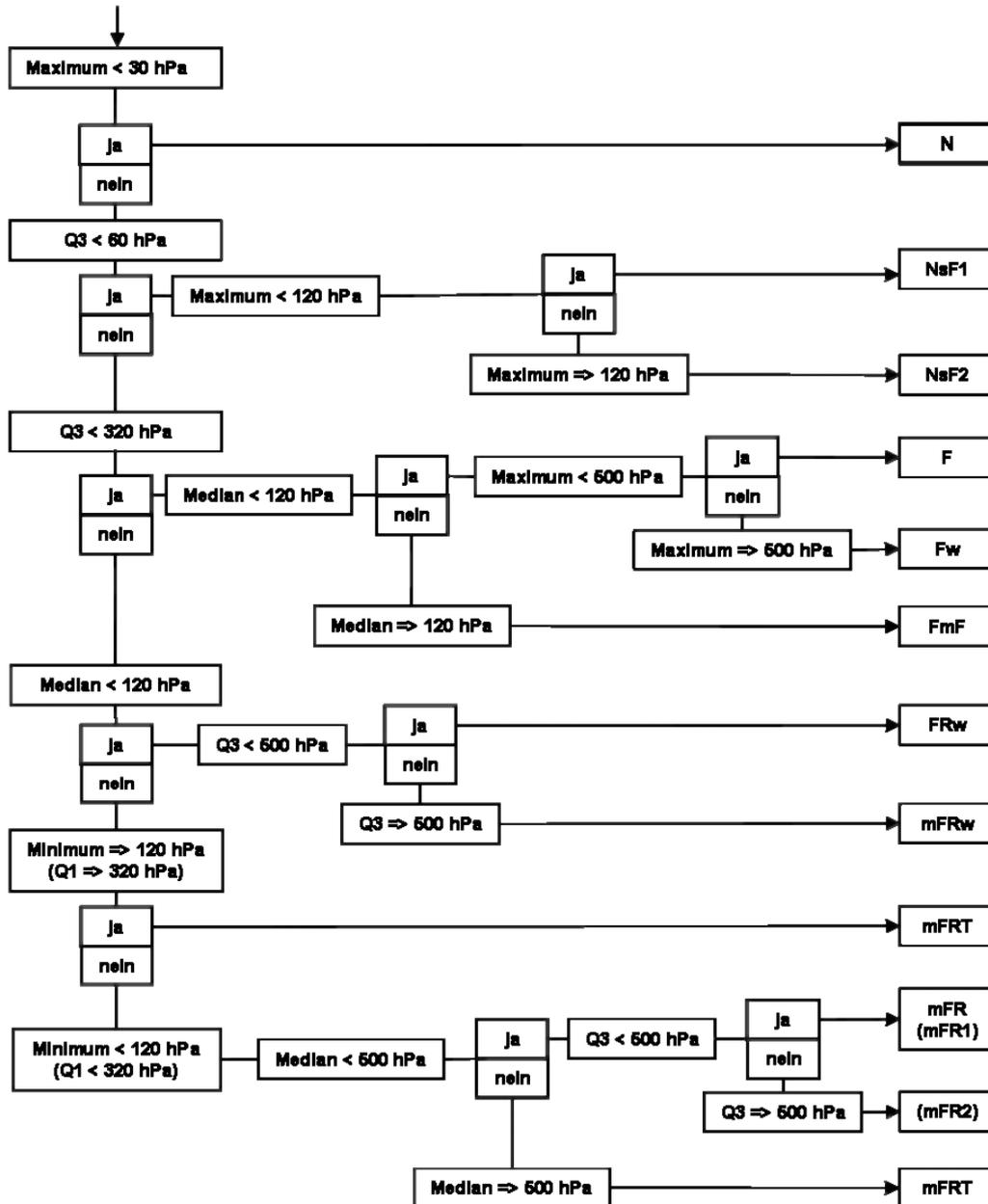


Abb. 2: Entscheidungsleiter zur Ermittlung der Feuchteverteilungsklassen auf Grundlage von Wasserspannungen (Zepp 1995) (Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tabelle 3).

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Bodenverbreitung und Pedohydrologie

Insgesamt können 13 verschiedene Bodentypen für das Untersuchungsgebiet ausgewiesen werden (Abb. 3). Innerhalb der terrestrischen Böden nimmt die Klasse der Braunerden 69 % der Flächen ein, während die Stauwasserböden mit 19 % Anteil die am zweithäufigsten verbreiteten Böden darstellen. Sehr geringe Flächenanteile

weisen die Semiterrestrischen Böden mit 4 % und die Moore mit 1 % auf.

Die pedohydrologischen Eigenschaften der Lockersyroseme und Ranker sind sehr ähnlich. Beide weisen eine sehr geringe Wasserkapazität auf, wodurch das infiltrierte Niederschlagswasser sehr rasch in den tieferen Untergrund versickern kann. Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) ist mit 28 mm (Lockersyrosem) und 63 mm (Ranker) im Vergleich zu den anderen Böden im Einzugsgebiet

gering. Während die Lockersyroseme ausschließlich auf anthropogenen Aufschüttungen im

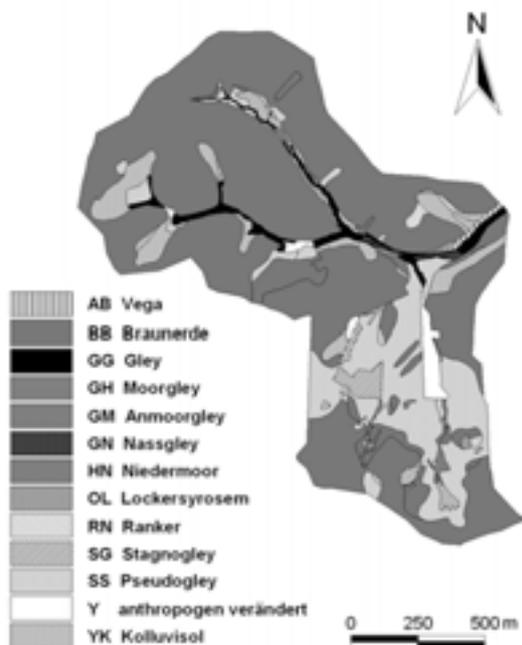


Abb. 3: Böden im Einzugsgebiet „Obere Brachtpe“ (Köchling 2003).

Umfeld stillgelegter Erzstollen im südlichen Einzugsgebiet zu finden sind, treten die Ranker vereinzelt an Hangschultern und -rücken auf (Abb. 3).

Bei den Braunerden kann aufgrund des unterschiedlichen Ausgangssubstrates zwischen der Braunerde aus devonischen Tonschiefern, der Braunerde aus Sandsteinen und der Braunerde aus periglazialen Deckschichten differenziert werden. Letztere ist sehr weit verbreitet und nimmt etwa 60 % der Fläche des Einzugsgebietes ein. Periglaziale Deckschichten lassen sich generell – beginnend im Hangenden – in die Ober-, Haupt-, Mittel- und Basislage gliedern (AG Boden 1994, Völkel et al. 2002, Scholten 2003). Während die locker gelagerte Hauptlage problemlos stärkere Niederschläge aufnehmen kann, folgt mit der Basislage eine Schicht, die sich durch eine geringere Wasserleitfähigkeit sowie in Richtung des Hanggefälles eingeregeltetes Skelett charakterisiert und somit das vertikal gerichtete Sickerwasser bei ausreichender Hangneigung ganz oder teilweise lateral ablenken kann (Semmel 1994, Körner 1996, Kleber & Schellenberger 1999, Sauer et al. 2001, Chiffard et al. 2008). Braunerden aus periglazialen Deckschichten weisen im Untersuchungsgebiet eine nFKWe von 64 mm bis 249 mm auf. Die Braunerden aus devonischen Tonschiefern und aus Sandsteinen nehmen innerhalb des Einzugsgebietes nur einen

Flächenanteil von etwa 8 % ein. Im Gegensatz zu den Braunerden aus periglazialen Deckschichten sind sie meist flachgründiger und besitzen eine nFKWe von 137 mm. Das Sickerwasser kann ungehindert in den Untergrund versickern.

Stauwasserböden (Stagnogleye und Pseudogleye) treten vor allem im südlichen Untersuchungsgebiet, in Hangmulden und an Unterhängen auf. Die Einteilung in Stauzone und Staukörper entspricht weitgehend dem Schichtaufbau der periglazialen Deckschichten, wobei die Hauptlage den Stauwasserleiter bildet und die stärker verdichtete Basislage als Staukörper fungiert. Durch die meist geringe Tiefenlage der Staukörper (im Durchschnitt ab 40 cm Tiefe), die den effektiven Wurzelraum begrenzen, ist bei den Pseudogleyen die durchschnittliche nFKWe mit 99 mm gering.

An Unterhängen und in Hangmulden finden sich vor allem Kolluvisole. Deren nFKWe-Werte sind mit durchschnittlich 220 mm als hoch einzustufen, was auf ihre Tiefgründigkeit und die meist lockere Lagerung zurückzuführen ist. Für Sickerwasser stellen die M-Horizonte mit ihren guten Infiltrationseigenschaften (kf-Wert: 30 – 38 cm/d) kein Hindernis dar.

In der Aue des Brachtpetals sind Gleye weit verbreitet. Da die Gründigkeit und der effektive Wurzelraum durch die reduktiven Gr-Horizonte nach unten begrenzt werden, schwankt die nFKWe in einem sehr weiten Bereich von 42 – 223 mm. Die Anmoorgleye sind im Untersuchungsgebiet sehr flachgründig und haben mit durchschnittlich 54 mm eine geringe nFKWe. Am Nordhang der Silberkuhle sind in Quellmulden und Hangsenken kleinflächig Niedermoore und Niedermoorgleye verbreitet. Die nFKWe liegt bei 175 mm bzw. 122 mm. In dem breiten Talgrund der Brachtpe im östlichen Untersuchungsgebiet finden sich Gley-Vegen aus tonig-schluffigen Auensedimenten mit einer nFKWe zwischen 123 mm und 247 mm.

## 4.2 Ableitung von Bodenfeuchteregime-Typen

Ein wesentlicher Schritt für eine bodenhydrologische Raumgliederung besteht darin, aus den dargestellten Bodeninformationen Aussagen zum allgemeinen Standortwasserhaushalt und dem Bodenwasser zu erlangen. Das Bodenfeuchteregime wird von der Verteilung und Menge der Niederschläge, der Durchlässigkeit und dem Speichervermögen des Bodens sowie vom Hang- und Grundwasser gesteuert (Zepp 1991). Die

Bodenfeuchteregime-Typisierung setzt sich dabei aus dem Bodenfeuchteregime-Grundtyp und dem Quantitativen Feuchteregime zusammen.

### Bodenfeuchteregime-Grundtyp

Im Untersuchungsgebiet lassen sich sechs Bodenfeuchteregime-Grundtypen ausweisen, dessen Beziehungen zu den Bodentypen im Folgenden genauer erläutert werden (Abb. 4).

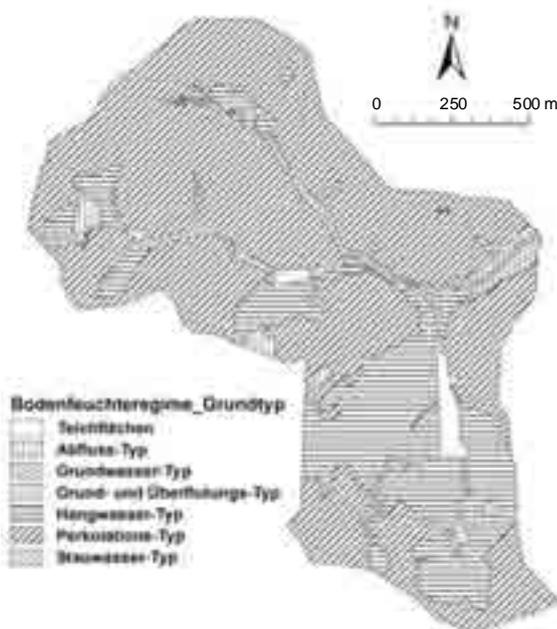


Abb. 4: Bodenfeuchteregime-Grundtyp im Einzugsgebiet „Obere Brachtpe“.

Ist der Wurzelraum weder durch Grundwasser noch durch zeitweiliges Stauwasser beeinflusst, liegt der Perkulations-Typ vor, dessen Standorte durch eine ungehinderte Versickerung des Wassers in den Tiefenbereich gekennzeichnet sind (Zepp 1999). Dieser Typ ist großflächig im Untersuchungsgebiet verbreitet und umfasst die Bodentypen Rohböden (Ranker), Kolluvisole und die Braunerden. Wird das Wachstum der Pflanzen und der Stoffhaushalt an einem Standort nachhaltig durch Grundwasser geprägt, ist der Bodenfeuchteregime-Grundtyp der Grundwasser-Typ, der die Bodentypen Gley und Gley-Vega umfasst. Kommt es wie bei den Nass-, Anmoorgleyen im Nahbereich des Gewässers zu Überflutungen, wird vom kombinierten Grund- und Überflutungstyp gesprochen. Der Hangwasser- bzw. Stauwasser-Typ ist dadurch gekennzeichnet, dass der Wurzelraum der Standorte zeitweiliger Stauvernässung (Hangvernässung) mit Sauerstoffmangel unterliegt. Beim Hangwasser-Typ kommt es infolge der Hanglage (Hangneigung  $> 2^\circ$ ) zu

einem temporär lateralen, ökologisch bedeutsamen Wasserzug im Wurzelraum. Aufgrund des Reliefs des Untersuchungsgebietes (großer Anteil an Hangneigungen über  $2^\circ$ ) ist der Stauwasser-Typ nur als Einzelstandort verbreitet, wogegen der Hangwasser-Typ in großen Bereichen im südlichen Untersuchungsgebiet auftritt und Pseudogleye sowie Stagnogleye aus periglazialen Deckschichten umfasst. Fließt auftretendes Niederschlagswasser ohne größere Verzögerung oberflächlich ab oder versickert ohne Zeitverzug in größere Tiefen, handelt es sich um den Abfluss-Typ, dessen Hydrodynamik an versiegelte Flächen im Siedlungsbereich oder feinmaterialfreies Substrat (Aufschüttungen) wie Lockersyrose gebunden ist.

### Quantitative Feuchteregime

Mit dem Quantitativen Feuchteregime wird die wechselnde Bodenfeuchte während der Vegetationsperiode (April bis Oktober) näher charakterisiert und über Daten aus Saugspannungsmessungen an den Stationen am Messhang „Husten“ (Abb. 1) mittels einer Entscheidungsleiter (Abb. 2) vorgenommen. Die Messstationen umfassen Perkulations-Typen in unterschiedlicher Hangposition (Stationen Oberhang, und Rinne), den Hangwasser-Typ (Station Hangfuss) und den Grundwasser-Typ bzw. Überflutungstyp mit einem Grundwasserflurabstand von 0–4 dm (Station Aue). Aufgrund der Einbautiefe der Tensiometer in 20 cm und 80 cm Tiefe, wurden diese Tiefenbereiche zur Ableitung des Quantitativen Feuchteregimes verwendet und nicht wie methodisch erforderlich in 30 cm und 90 cm (vgl. Kap. 3.3). Das Klassifizierungssystem sollte – aufgrund der Reglerfunktion des Reliefs – nicht ohne Anpassungen für einen Mittelgebirgsraum angewendet werden. Deshalb wurden die Werte der Schätztabellen je nach Nutzungsart und Reliefsituation modifiziert. Unterhangbereiche wurden z. B. feuchter als ebene Standorte eingestuft, Wälder trockener als Grünlandstandorte.

Die Verteilung der quantitativen Feuchteregime im Untersuchungsgebiet wird in Abbildung 5 dargestellt, wobei die Bodenfeuchteregime im Ober- und Unterboden zur besseren Darstellung in Kategorien zusammengefasst wurden.

Alle Feuchteregime zeigen einen Tiefenverlauf, bei dem die Feuchte mit der Tiefe zunimmt. Während die Oberböden bei häufig wechselnden Wasserspannungen überwiegend feucht und frisch sind, besitzen die Unterböden ausgeglichene Feuchteregime und umfassen die drei

Kategorien: nass, feucht sowie mäßig feucht. Nasse Oberböden finden sich im Bereich der Tiefenlinien mit hoch anstehendem Grundwasser, an Standorten mit Stagnogleyen oder in vermoorten Rinnen. Als weitere Ursachen für die feuchten Regime sind, neben der hohen positiven klimatischen Wasserbilanz und den Reliefpositionen, die tonig-schluffigen Bodenarten zu nennen, die arm an weiten Grobporen im Wurzelraum sind. Innerhalb der grundwasserbeeinflussten Standorte bestimmen die Grundwasserflurabstände entscheidend das Feuchteregime. So herrschen bei geringen Flurabständen (0-4 dm) nasse bis sehr feuchte (NsF) Regime im Oberboden vor, der Unterboden ist wassergesättigt. Dagegen haben Grundwasserflurabstände zwischen 8-13 dm wechselfeuchte Ober- und nass bis sehr feuchte Unterböden (Fw/NsF1). Bei noch tieferen Grundwasserflurabständen (13-20 dm) herrscht ein homogenes feuchtes Regime (F/F) vor.

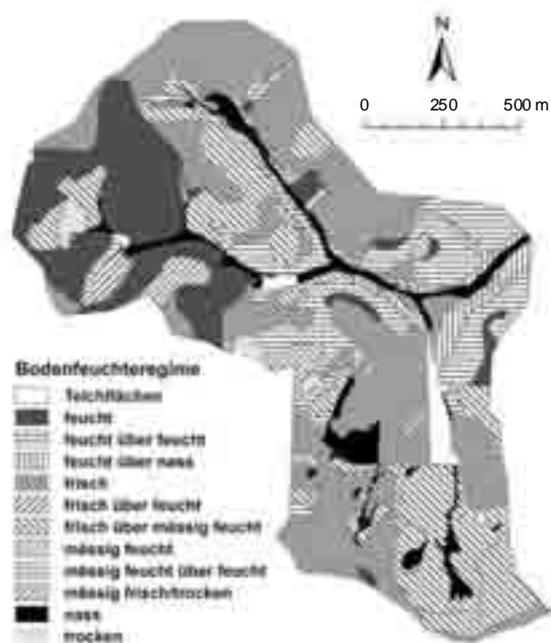


Abb. 5: Bodenfeuchteregime im Einzugsgebiet „Obere Brachtpe“.

Die ausgeglichenen Regime bei einem Großteil der Perkolations-Typen (feucht/feucht) können mit einer relativ ungestörten Porenkontinuität im effektiven Wurzelraum erklärt werden (Zepp 1995). Unterschiede bestehen zwischen Grünland-Standorten (z.B. Station Oberhang) und Wald-Standorten, da letztere aufgrund höherer Transpiration trockener als Grünlandstandorte eingestuft werden und aus einem wechselfrischen Oberboden und einem feucht bis mäßig feuchtem Unterboden (FRw/FmF) bestehen. In Abhängig-

keit vom Relief werden Perkolationsstypen in Hangfußlagen und Hangrinnen sowohl bei Wald- als auch bei Grünlandnutzung feuchter als flachgründigere Oberhanglagen eingestuft (feuchter bis mäßig feuchter bzw. wechselfeuchter Oberboden und ein feuchter bis nasser (Grünland) Unterboden).

Bei den flachgründigen Rankern mit ihrem sehr geringen Wasserspeichervermögen, den versiegelten Siedlungsflächen, bei denen nur geringe Wasseranteile in Rissen und Fugen versickern können, und den Lockersyrosem (beide Abfluss-Typ) treten trockene Regime auf.

Die Feuchteregime der stauwasserbeeinflussten Böden (Hangwasser- bzw. Stauwasser-Typ) mit Pseudogleye und Stagnogleye haben einen deutlich ausgeprägten Wechsel zwischen Nass- und Trockenphasen sowie einen starken Feuchteunterschied zwischen Ober- und Unterboden (Zepp 1995). Da für diesen Bodenfeuchteregime-Grundtyp für Grünland- und Wald-Nutzungen keine Schätztabellen vorliegen, werden anhand von Plausibilitätsüberlegungen die Ergebnisse der Schätztable für Acker-Nutzung modifiziert. Als Ausgangswert werden Stauwasserböden ohne bindigen Sd-Horizont und mit einem Stauwasserleiter von > 70 cm mit einem mäßig frischen Oberboden und einem feucht bis mäßig feuchten Unterboden (mFR/FmF) eingestuft. Die spezifischen Anpassungen gehen davon aus, dass je geringmächtiger der Stauwasserleiter ist, desto größer ist der Wechsel zwischen Austrocknung und Vernässung, da mit abnehmender Mächtigkeit das hydrologische Puffervermögen der Standorte eingeschränkt wird (Zepp 1995, Scheffer & Schachtschabel 2002). Daher wird bei einem Stauwasserleiter bzw. effektiven Wurzelraum von 35 cm bis 70 cm im Oberboden ein wechselndes, mäßig frisches Feuchteregime (mFRw) angenommen. Bei flachgründigen Böden herrschen dagegen überwiegend mäßig frische und trockene Regime (mFRTw) im Oberboden vor. Bindige Sd-Horizonte im Liegenden dagegen führen zu feuchteren Regimen, so dass der Oberboden wechselfeucht und der Unterboden feucht (Fw/F) ausgeprägt ist (Zepp 1995). Der Einfluss des Reliefs auf den Wasserhaushalt und die Bodenfeuchte wird ebenfalls durch Korrekturen berücksichtigt. Bei ebenen Lagen wird der Wasserabzug durch die schlechte Leitfähigkeit der Böden gehemmt (Scheffer & Schachtschabel 2002, Blume 1968), so dass die Oberböden als wechselfeucht (Fw) sowie wechselnd, mäßig frisch (mFRw) charakterisiert werden. In flachen Mulden und Rinnen werden die Feuchteregime

im Oberboden als wechsel-frisch oder wechsel-feucht bzw. wechselnd, mäßig frisch über feuchtem bzw. feucht bis mäßig feuchtem Unterboden (FRw/F, FRw, Fw/F und mFRw/FmF) eingestuft. Ebenfalls feuchter (Fw/F) eingestuft werden Standorte am Hangfuß oder an Unterhängen, bei denen es zu Zuzugswasser kommt, welches lateral über den Staukörper fließt (Blume 1968). Stagnogleye sind ganzjährig oberflächennah vernässte Böden mit nur kurzen Trockenphasen und einem nassen Feuchteregime (NsF) (vgl. Schweikle 1971).

### 4.3 Bestimmung von Arealen dominanter Abflussbildungsprozessen

Anhand der Klassifikation der Bodenfeuchteregime-Typen kann der Versuch unternommen werden, flächendetaillierte Aussagen über dominante Abflussbildungsprozesse zu gewinnen. Die Art der Wasserflüsse (Grund-, Stau-, Hang-, Sickerwasser bzw. oberflächlich abfließendes Wasser) am Standort kann durch den Bodenfeuchteregime-Grundtyp direkt abgeleitet werden. Anhand dieser Informationen können durch Deduktion die vorherrschende Wasserbewegungsrichtung (lateral, vertikal), Reliefsituation (Tiefenbereich, Hangneigung) und Bodenaufbau (Bodenartenschichtung bzw. Staukörper) gefolgert werden (Burak 2005). Kombiniert man den Bodenfeuchteregime-Grundtyp mit dem Quantitativen Bodenfeuchteregime, so lassen sich auch Abschätzungen über mögliche Sättigungsflächenabflüsse treffen, da die charakterisierte Bodenfeuchte als Zustandsgröße für den Speicher Boden (hydrologischer Puffer) benutzt werden kann.

Für den Hangwasser-Typ muss eine Hangneigung von  $> 2^\circ$  mit einem dichten, wasserundurchlässigen Staukörper im Unterboden vorliegen, der zu lateralen Wasserflüssen führt. Daraus kann interpretiert werden, dass sich an der Grenze zum Staukörper die Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) stark verschlechtert und vermehrt der Abflussbildungsprozess Zwischenabfluss entsteht (Abb. 6). Stagnogleye haben als stark stauernässte Böden ein nasses Bodenfeuchteregime im Oberboden, so dass es an diesen Standorten neben Zwischenabfluss zu potenziellen Sättigungsflächen infolge von Wassersättigung des Oberbodens kommt.

Bei dem Grundwasser- und kombinierten Grundwasser- und Überflutungs-Typ steht das Grundwasser oberflächennah an, was für Tallagen und für die Hangrinnen am Nordhang der

Silberkuhle typisch ist. Als Wasserbewegungsrichtungen sind

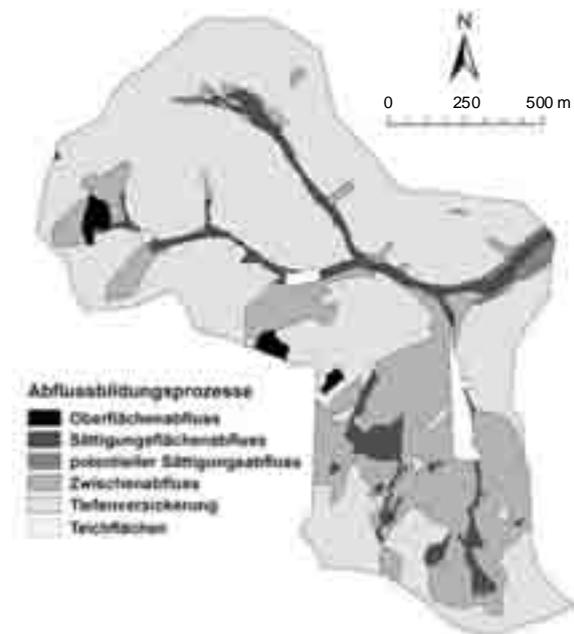


Abb. 6: Flächen dominanter Abflussbildungsprozesse im Einzugsgebiet „Obere Brachtpe“.

der kapillare Aufstieg von Grundwasser in den Wurzelraum und laterale Wasserflüsse innerhalb des Bodenprofils (v. a. Gr-Horizont, aber auch teilweise im Go-Horizont) zu nennen. Da das Quantitative Bodenfeuchteregime durch den hochstehenden Grundwasserspiegel als nass eingestuft wurde, sind solche Flächen Areale für Sättigungsflächenabfluss. Ebenso muss in den sich anschließenden feuchten Auenbereichen mit potenziellem Sättigungsflächenabfluss bzw. mit return flow gerechnet werden.

Für den Perkolations-Typ lässt sich feststellen, dass vertikale Wasserbewegungen überwiegen, die zu einer nahezu ungehinderten Wasserversickerung in den tieferen Untergrund führen. Tiefenversickerung kann als vorherrschender Abflussbildungsprozess identifiziert werden. In größeren Bodentiefen sind laterale Ablenkungen wahrscheinlich, die z. B. bei Braunerden aus periglazialen Deckschichten am Übergang zur Basislage auftreten können, da diese zu einer verlangsamten Versickerung des Bodenwassers führen (Koch 2000). Die Basislagen sind an diesen Standorten jedoch nicht derart dicht gelagert, dass sie zu lang anhaltendem Stauwasser und der Ausbildung hydromorpher Merkmale führen.

Beim Abfluss-Typ dominiert bei einer versiegelten Fläche (Nutzung: Siedlung) der Oberflächenabfluss, der ca. 75 % der Niederschläge

oberflächlich abführt (Wessolek & Facklam 1997). Bei den Aufschüttungen aus Sandsteinen an der Silberkuhle (Lockersyroseme) kann auf eine vertikale Bodenwasserrichtung, infolge von ungehinderter Tiefenversickerung geschlossen werden. Im Unterschied zum Perkolations-Typ kann beim Abfluss-Typ eine laterale bodeninnere Ablenkung des Bodenwassers weitgehend ausgeschlossen werden.

#### 4.4 Verifizierung der flächendetaillierten Ausweisung von Abflussbildungsprozessen

Die Frage, ob die ausgewiesenen Abflussprozessflächen auch die entsprechenden Abflussreaktionen und -beiträge während eines Niederschlagsereignisses zeigen, kann durch die von Didszun (2004) durchgeführten tracerhydrologischen Experimente im Untersuchungsgebiet verifiziert werden. Während eines Starkregenereignisses am 19. Juli 2001, das eine Niederschlagshöhe von 20,8 mm und eine maximale Intensität von 11,6 mm/10 min aufweist, wurden die Wasserstände der einzelnen Teileinzugsgebiete gemessen (Abb. 7), natürliche Tracer (Silikat) (Abb. 8) sowie das Sauerstoff-18-Isotop (Abb. 9) für eine Ganglienseparation zeitlich hoch aufgelöst beprobt.

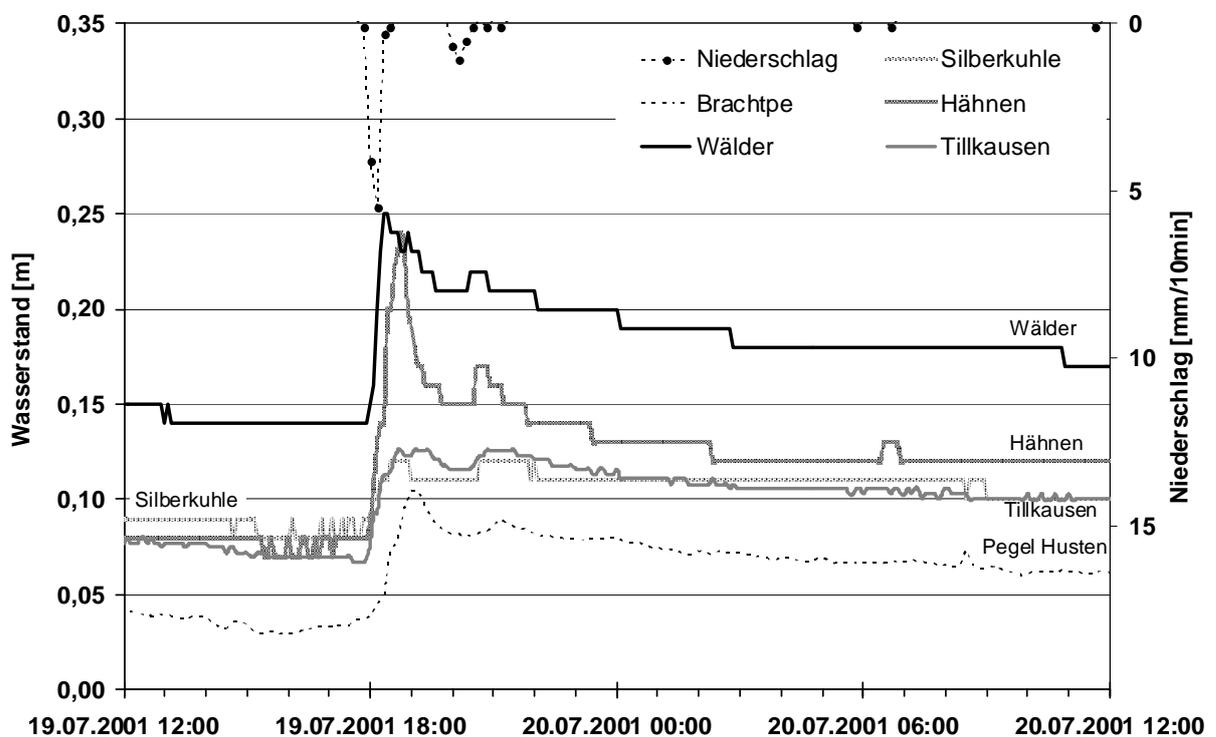


Abb. 7: Wasserstandsreaktionen und Niederschläge während des Starkregenereignisses am 19. Juli 2001 (Didszun 2004).

Der Vergleich der Wasserstände der einzelnen Teileinzugsgebiete zeigt, dass alle Gebiete innerhalb von 5 bis 10 Minuten reagieren, jedoch Unterschiede zwischen den Wasserstandsmaxima zu erkennen sind (Abb. 7). Zwar ist die Form der Ganglinien (z.B. Größe und Steilheit des Anstieges) aufgrund des nicht definierten Gerinnequerschnittes schwer zu interpretieren, dennoch lassen sich die Zeiten der Wasserstandsmaxima sowie der Verlauf der Ganglinien vergleichen. Im Gebiet Wälder wird der Peak

am frühesten erreicht, während er in den Gebieten Hähnen, Tillkausen und Silberkuhle etwa 15-25 min später eintritt. Die extrem schnelle Abflussreaktion im Gebiet Wälder ist darauf zurückzuführen, dass die schnell beitragenden Flächen zum einen sehr gerinnenah liegen und zum anderen die Konzentrationszeiten relativ kurz sind. Der rasche Rückgang des Oberflächenabflussanteiles (Abb. 8) bei gleichzeitig langsamen Rückgang des Wasserstandes (Abb. 7) dürfte auf eine verzögerte Nachlieferung

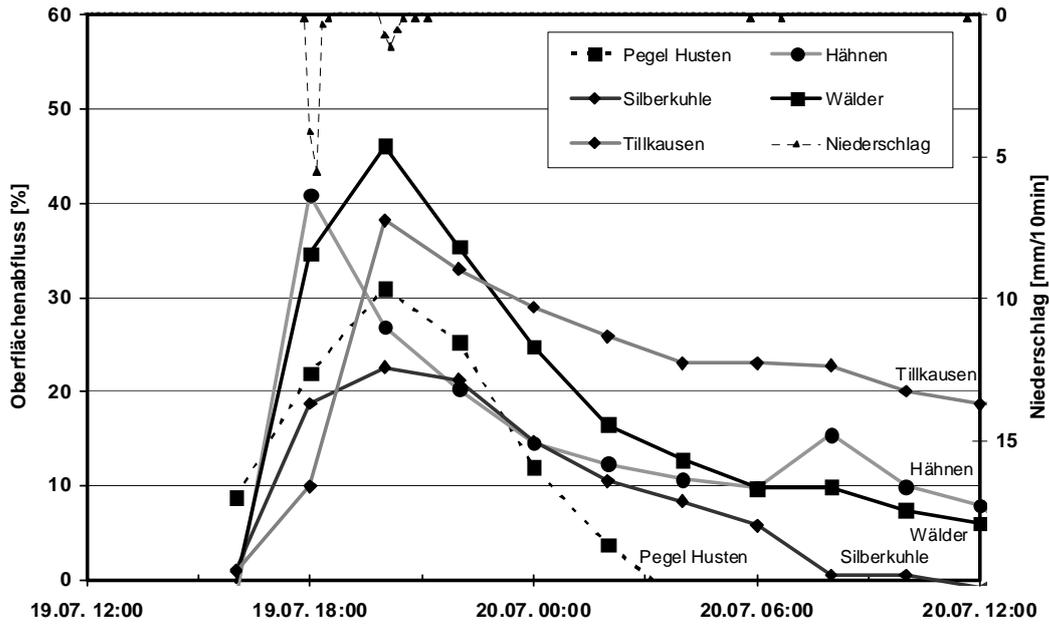


Abb. 8: Anteile des Oberflächenabflusses errechnet über Ganglinienseparation mit Silikat während des Starkregenereignisses im Juli 2001 (Didszun 2004).

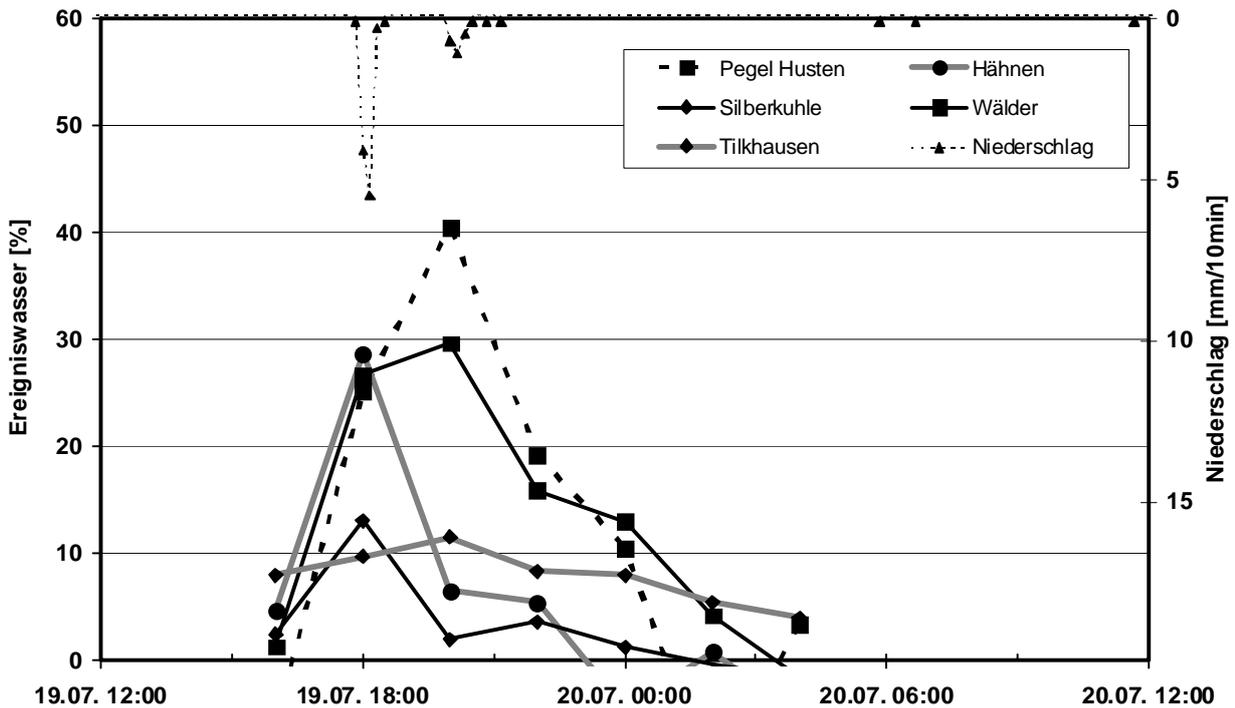


Abb. 9: Anteile des Ereigniswassers errechnet über den Verlauf des Sauerstoff-18-Isotopes während des Starkregenereignisses im Juli 2001 (für den Teilraum Tilkhausen ist keine plausible Separation möglich) (Didszun 2004).

von unterirdischem Wasser aus den Hangeinzugsgebieten (Prozessfläche: Zwischenabfluss) hindeuten. Gleichzeitig geht der Anteil an Ereigniswasser nach dem Wasserstandspeak langsamer zurück als in den anderen Gebieten, was darauf

hindeutet, dass die gerinnenahen Sättigungsflächen noch längere Zeit Ereigniswasser nachliefern (Abb. 9).

Im Teilgebiet Hähnen wird die Abflussreaktion dagegen einerseits durch die Fischteiche be-

einflusst, auch wenn dieser Einfluss schwer zu quantifizieren ist, andererseits liegen die potenziell beitragenden Flächen im Mittel weiter vom Gebietsauslass entfernt als z.B. im Teilgebiet Wälder, so dass die Konzentrationszeit vergrößert wird. Der rasche Rückgang des Wasserstandes deutet auf eine kurze Dauer der schnellen Oberflächenabflussanteile hin (Abb. 7 und 8). Gleichzeitig geht der Ereigniswasseranteil im Gebiet Hähnen nach dem Peak rasch zurück, was durch Abfluss aus Drainagen begünstigt werden kann (Abb. 9).

Im Gegensatz dazu stehen die Teilgebiete Silberkuhle und Tillkausen, deren Peaks deutlich flacher sind, was neben dem breiteren Gerinneschnitt (Abb. 7) auch auf den geringen Anteil an Oberflächenabfluss zurückzuführen ist. Bedeutsam ist aber vielmehr der Wasserstand nach dem Peak, der lange Zeit auf einem hohen Niveau verbleibt und auf einen verzögerten Beitrag an unterirdischem Abfluss hinweist. Dies wird durch den raschen Rückgang des Ereigniswasseranteils bestätigt (Abb. 9). Obwohl der Flächenanteil an beitragenden Prozessflächen (Sättigungsabfluss, Zwischenabfluss aus Stauwasserböden) im Gegensatz zu den anderen Teilgebieten sehr hoch ist, bleibt der Anteil an Oberflächenabfluss und Ereigniswasser eher gering. Dies ist auf die größere Entfernung dieser Flächen zum Vorfluter zurückzuführen und auf den Umstand, dass sie nur über ein stark verästeltes, z. T. anthropogen überprägtes Gerinnenetz angeschlossen sind. Zudem sind die durchschnittlichen Hangneigungen geringer als z. B. im Teilgebiet Wälder, so dass indirekt von geringeren Fließgeschwindigkeiten des ober- und unterirdischen Abflusses ausgegangen werden kann.

## 5. Schlussfolgerungen

Die Erfassung der räumlichen Verbreitung der Böden im Untersuchungsgebiet „Obere Brachtpe“ zeigt, dass im südlichen Teil (Nordhang der Silberkuhle) ein vielfältiges Bodenmosaik mit einem hohen Anteil an Stauwasserböden erkennbar ist, während im übrigen Gebiet Braunerden große Flächen einnehmen. Auffällig ist, dass die Verbreitung der Stauwasserböden mit dem Vorhandensein einer dichten Fließerde im Untergrund korreliert. Auf 64 % der Flächen, die in der Geologischen Karte als „dichte Fließerde“ ausgewiesen werden, stehen Stauwasserböden an. Dies lässt den Schluss zu, dass eine Abhängigkeit einzelner Bodenhorizonte von bestimmten geolo-

gischen Schichten bestehen muss (Koch 2000). Der Einfluss des Reliefs auf die Pedogenese macht sich ebenfalls bemerkbar. In Hangrinnen kommt es vermehrt zur Konzentration von Zwischenabfluss, so dass dort die Braunerden z. T. pseudovergleyt sind.

Die Anwendung der Klassifizierungsmethode von Zepp (1995) hat gezeigt, dass es möglich ist, aus flächenhaft kartierbaren Bodendaten eine Regionalisierung der Bodenfeuchteregime-Typen durchzuführen. Durch den Einsatz von Geographischen Informationssystemen und Digitalen Geländemodellen können Reliefeinflüsse auf die Bodenfeuchte bei der Klassifizierung des Feuchteregimes berücksichtigt werden. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Einstufung der Feuchteregime von Pseudogleyen. Zum einen fehlen Schätzrahmen für Grünland-Standorte, so dass bei diesen Stauwasserböden die Angaben von Ackerstandorten angepasst werden müssen, zum anderen sind die Pseudogleye Böden mit stark schwankenden Bodenfeuchtezuständen.

Darüber hinaus kann die Klassifikation der Bodenfeuchteregime-Typen nach Zepp (1995) als Grundlageninformation über den Einfluss der Bodeneigenschaften auf Abflussbildungsprozesse verwendet werden und für eine pedologisch basierte hydrologische Raumgliederung wichtige Vorinformationen liefern. In Verbindung mit den tracerhydrologischen Untersuchungen ist es möglich, die Abflussreaktionen der auf Basis der pedohydrologischen Eigenschaften ausgewiesenen Prozessflächen zu verifizieren. Dabei wird deutlich, dass neben den Bodeneigenschaften insbesondere die Lage der schnell reagierenden Flächen (Sättigungsflächen) innerhalb des Einzugsgebietes und deren Konnektivität mit dem Vorfluter entscheidend für den Beitrag schneller Abflusskomponenten sind. Besteht eine direkte Verbindung zwischen Sättigungsflächen und Vorfluter, so ist eine schnelle Abflussreaktion und ein hoher Anteil an Ereigniswasser zu erwarten.

Mit der Ausweisung von Abflussprozessflächen kann nicht nur qualitativ beurteilt werden, wie stark die Flächen eines Einzugsgebietes zum Hochwasser beitragen (Scherrer 2007), sondern es kann auch die Komplexität der flächendetailierten Abflussmodelle reduziert werden. Dies haben Kirnbauer et al. (2009) erfolgreich im alpinen Löhnersbacheinzugsgebiet umgesetzt, indem sie auf der Basis einer prozessorientierten Raumgliederung, in die insbesondere der Untergrund als Gliederungsmerkmal einging, ein Abflussmodell entwickelt haben. Dieses differen-

ziert im Wesentlichen zwischen schnellen und langsamen Prozessen, wobei erstere physikalisch und rasterbasiert modelliert wurden, während für die langsamen Prozessen einfache konzeptionelle Speicherroutinen genutzt wurden. Ein weiterer Vorteil von Abflussprozesskarten ist zudem, dass anhand dieser die räumliche Verteilung der flächendetailliert simulierten Abflusskomponenten verifiziert werden kann.

Eine ähnliche Methode, aus bodenhydrologischen Daten und Bodenkarten bodenbedingte Abflusscharakteristika abzuleiten, verfolgt Ott mit dem HYDBOS-Modelltypen (Ott 1999). Das Modell basiert darauf, hydrologisch ähnliche Boden-Strukturmodelltypen (HYDBOS-Typen) zu definieren, die als Konzeptmodelle die verschiedenen Komponenten der Wasserbewegung im Boden und im Untergrund pauschal beschreiben (Ott 1999). Bei dieser Methode handelt es sich um den Versuch, die in Großbritannien erarbeitete „Hydrology of soil types“ (Host) – Klassifizierung auf deutsche Verhältnisse zu übertragen (Boorman et al. 1995). Im Vergleich dazu birgt die Klassifikation der Bodenfeuchteregime-Typen nach Zepp (1995) den Vorteil, dass die Bodenfeuchteregime quantitativ belegt werden können, da bereits ein Regelwerk zur Verknüpfung qualitativer Ableitung und statistischer Auswertungen vorhanden ist. Dies ist insbesondere für eine Beschreibung von Zustandsgrößen im Hinblick auf die zeitliche Variabilität von Abflussbildungsprozessen in Abhängigkeit der Bodenvorfeuchte von besonderer Bedeutung. So kann über das quantitative Bodenfeuchteregime eine Tendenz angegeben werden, ob einzelne Raumeinheiten als eher feucht oder trocken einzustufen sind. Eine Anpassung des Klassifikationskonzeptes an Mittelgebirgsregionen hinsichtlich der Ableitung von Abflussbildungsprozessen innerhalb des Prozesses Tiefenversickerung ist anzustreben, da insbesondere bei den Braunerden aus periglazialen Deckschichten der laterale Zwischenabfluss von Bedeutung sein kann, auch wenn keine eindeutigen hydromorphen Merkmale im Bodenprofil erkennbar sind. Eine Differenzierung dieser Areale könnte anhand der Abhängigkeit von mittlerer Deckschichtenmächtigkeit und Hangneigung erfolgen, wie es von Tilch et al. (2002) für die Ausweisung von Hydrotopen in dem von periglazialen Deckschichten geprägten Brugga-Einzugsgebiet (Südschwarzwald) eingesetzt wird. Je nach Hangneigung und Lage im Hang (z. B. Unter- oder Oberhang) variieren die Mächtigkeiten der einzelnen Lagen. In Zusammenhang mit Informationen zum Ausgangsge-

stein können Aussagen zur dominanten Richtung des infiltrierten Niederschlages gemacht werden und somit spezifischer zwischen Arealen mit Tiefenversickerung und Zwischenabfluss differenziert werden.

## 6. Literatur

- AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 392 S.
- Becker, A. & Pfützner, B. (1987): System approach and subroutines for river basin modelling. – *Acta Hydrophys.*, 31 (3/4).
- Blume, H. P. (1968): Stauwasserböden. – *Arbeiten der Universität Hohenheim*, 42: 242 S.
- Boorman, D.B., Hollis, J. M. & Lilly, A. (1995): Hydrology of soil types: a hydrologically-based classification of the soils of United Kingdom. – UK Institute of Hydrology, Report No. 126: 137 S.
- Burak, A. (2005): Eine prozessorientierte landschaftsökologische Gliederung Deutschlands. – *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, 254: 249 S. und Karte.
- Burak, A. (1988): Landschaftsökologische Kartierung und Bewertung des biotischen Ertragspotentials auf dem Gutshof „Hungerburg“, Bitburg. – Unveröff. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum.
- Castillo, V. M., Gómez-Plaza, A. & Martínez-Mena, M. (2003): The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. – *Journal of Hydrology*, 284: 114-130.
- Chiffard, P. (2006): Der Einfluss des Reliefs, der Hangsedimente und der Bodenvorfeuchte auf die Abflussbildung im Mittelgebirge. Experimentelle Prozess-Studien im Sauerland. – *Bochumer Geographische Arbeiten*, 76: 162 S.
- Chiffard, P., Didszun, J. & Zepp, H. (2008): Skalenübergreifende Prozess-Studien zur Abflussbildung in Gebieten mit periglazialen Deckschichten (Sauerland, Deutschland). – *Grundwasser*, 13 (1): 27-41, doi: 10.1007/s00767-007-0058-1.
- Deutscher Wetterdienst (2004): Langjährige Klimadaten der Stationen Reichshof-Eckenhagen, Bergneustadt-Hüngrighausen und Attendorn-Listertalsperre; Offenbach
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1973): DIN 19683 Blatt 2. Physikalische Laboruntersuchungen: Bestimmung der Korngröße nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat. – 1 S.
- Didszun, J. (2004): Experimentelle Untersuchungen zur Skalenabhängigkeit der Abflussbildung. – *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, 19: 221 S.
- Flügel, W.-A. (1996): Hydrological Response Units (HRUs) as modelling entities for hydrological river basin simulation and their methodological potential for modelling complex environmental proc-

- ess systems – Results from the Sieg catchment. – *Die Erde*, 127: 43-62.
- Grabert, H. & Hilden, H. D. (1972): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000. Blatt 5012 Eckenhagen mit Erläuterungen. – Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld.
- Gutknecht, D. (1996): Abflussentstehung an Hängen – Beobachtungen und Konzeptionen. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 48 (5/6): 134-144.
- Kirnbauer, R., Haas, P., Chiffard, P., Tilch, N., Zillgens, B., Johst, M. & Steidl, R. (2009): Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone. Beobachtung – Messung – Modellierung. – *Wiener Mitteilungen*, 213: 232 S.
- Kleber, A. & Schellenberger, A. (1999): Hydrogeologische Verhältnisse eines Quelleinzugsgebietes im Frankenwald. – In: Beierkuhnlein, C. & Gollan, T. (Hrsg.): *Ökologie silikatischer Waldquellen in Mitteleuropa*. – *Bayreuther Forum Ökologie*, 71:17-25.
- Koch, U. (2000): Bodenkarte zur Standorterkundung im Erfassungsmaßstab 1:5000 mit Erläuterungen. – Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld
- Köchling, M. (2003): Bodenhydrologische Kartierung und Aufbau eines bodenhydrologischen Informationssystems für das Forschungsgebiet Obere Brachtpe (Sauerland), Band 1: Text und Band 2: Karten. – 118 S., Diplomarbeit am Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum (unveröffl.)
- Körner, J. (1996): Abflussbildung, Interflow und Stoffbilanz im Schönbuch Waldgebiet.- *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C, Band 27*.- 211 S. u. Anhang
- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G. & Stern, R. (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflusses auf alpinen Boden-Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen, Version 1.0. – Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Dokumentation, 3: 89 S.
- Neef, E., Schmidt, G. & Lauckner, M. (1961): Landschaftsökologische Untersuchungen an verschiedenen Physiotopten in Nordwestsachsen. – *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Math.-Nat. Klasse*, 47 (1): 112 S.
- Naef, F., Margreth, M., Schmocker-Fackel, P. & Scherrer, S. (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten - ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. – *Wasser, Energie, Luft*, 99 (3): 267-272.
- Ott, M. (1999): Die Umsetzung digitaler Bodenkartierungen in einem Niederschlag-Abfluss-Modell für das Südliche Donaugebiet Bayerns. – In: Koehler, G. (Hrsg.): *Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete*. – *Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Uni Kaiserslautern, Berichte*, 9 :179-192.
- Peschke, G. (2001): Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung. – *Geographische Rundschau*, 5: 18-23.
- Peschke, G., Etzenberg, C., Müller, G., Töpfer, J. & Zimmermann, S. (1998): Das wissenschaftliche System FLAB - ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. – *Schriftenreihe des Internationalen Hochschulinstitutes Zittau*, 10: 122 S.
- Ruhrverband Essen (2005): Abflusskennwerte Pegel Husten. – Unveröffl. Mitteilung.
- Sauer, D., Scholten, T. & Felix-Henningsen, P. (2001): Verbreitung und Eigenschaften periglaziärer Lagen im östlichen Westerwald in Anhängigkeit von Gestein, Exposition und Relief. – *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 96/II: 661-552.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (2002/15): *Lehrbuch der Bodenkunde*. – 593 S.
- Scherrer, S. (2007): Hochwasserabschätzung als Synthese von Statistik, Historie und Abflussprozessen. – *Wiener Mitteilungen*, 206:195-208.
- Scherrer, S. & Naef, F. (2003): A decision scheme to indicate dominant flow processes on temperate grassland. – *Hydrological Processes*, 17: 391-401.
- Scherrer, S., Naef, F., Faeh, A. O. & Cordery, I. (2006): Formation of runoff at the hill-slope scale during intense precipitation. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (2): 907-922.
- Schlichting, E., Blume, H.-P. & Stahr, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum*. – 295 S.
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F. & Scherrer, S. (2006): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (2): 891-906.
- Scholten, T. (2003): Beitrag zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und Eigenschaften periglaziärer Lagen in deutschen Mittelgebirgen. – *Relief, Boden, Paläoklima*, 19: 149 S.
- Schweikle, V. (1971): Die Stellung der Stagnogleye in der Bodengesellschaft der Schwarzwaldhochfläche. – *Diss. FB Agrarbiologie, Uni Hohenheim*.
- Semmel, A. (1994): Zur umweltgeologischen Bedeutung von Hangsedimenten in deutschen Mittelgebirgen. – *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, 145: 225-232.
- Thimm, A. & Zepp, H. (2005): GIS-Modellierung prozessbasierter landschaftsökologischer Raumeinheiten. – In: Strobl, J., Blaschke, T. & Griesebner, G. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik, 2005, Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg*: 730-735.
- Tilch, N., Uhlenbrook, S. & Leibundgut, C. (2002): Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung von Hydrotopen in von periglazialen Hangschutt geprägten Gebieten. – *Grundwasser*, 4: 206-216.
- Tilch, N., Zillgens, B., Uhlenbrook, S., Leibundgut, C., Kirnbauer, R. & Merz, B. (2006): GIS-gestützte Ausweisung von hydrologischen Umsatzräumen und Prozessen im Löhnersbach-Einzugsgebiet

- (Nördliche Grauwackenzone, Salzburger Land). – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 58 (9-10): 141-151.
- Uhlenbrook, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, 10: 201 S.
- Völkel, J., Zepp, H., Kleber, A. (2002): Periglaziale Deckschichten in Mittelgebirgen – ein offenes Forschungsfeld. – Berichte zur deutschen Landeskunde, 76 (2/3): 101–114.
- Wessolek, G. & Fackllam, M. (1997): Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. – Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 160 (1):41-46.
- Zehe, E., Becker, R., Bárdossy, A. & Plate, E. (2005): Uncertainty of simulated catchment runoff response in the presence of threshold processes: Role of initial soil moisture and precipitation. – Journal of Hydrology, 315: 183-202.
- Zepp, H. (1991): Eine quantitative, landschaftsökologisch begründete Klassifikation von Bodenfeuchteregime-Typen für Mitteleuropa. – Erdkunde, 45: 1-17.
- Zepp, H. (1995): Klassifikation und Regionalisierung von Bodenfeuchteregime-Typen. – Relief, Boden, Paläoklima, 9: 224 S.
- Zepp, H. (1999): Bodenwasser und Grundwasser. – In: Zepp, H. & Müller, M. J. (Hrsg.): Landschaftsökologische Erfassungsstandards. Ein Methodenbuch. – Forschungen zur deutschen Landeskunde, 244: 129-163.
- Zepp, H. & Herget, J. (2001): Bodenwasser – Grundlagen, Einflussfaktoren und geoökologische Bezüge. – Geographische Rundschau, 53 (5): 10-17.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 113-128, 3 Abb., 3 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Hochwasser und Murgänge in kleinen alpinen Einzugsgebieten – Bedingungen, Ereignisdatenzusammenhang und menschliche „Ohnmacht“

Guntmar Fleischer\*

Fleischer, G. (2011): Hochwasser und Murgänge in kleinen alpinen Einzugsgebieten – Bedingungen, Ereignisdatenzusammenhang und menschliche „Ohnmacht“. [Floods and debris flows in small alpine catchments – terms, compilation of event-data and human "powerlessness".] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 113-128, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Die zugrunde liegende Untersuchung befasst sich mit Hochwassern und Muren als geomorphologische Prozesse im Hochgebirge, insbesondere was deren Auftreten und Genese in kleinen alpinen Einzugsgebieten angeht, im Allgemeinen sowie der Möglichkeit einer geordneten Zusammenschau von Ereignis- und Prozessdaten im Ostalpenraum ab Beginn des 20. Jahrhunderts im Besonderen. Darin eingeschlossen ist eine Betrachtung der tatsächlichen ‚Ohnmacht‘ des im Gebirge siedelnden Menschen hinsichtlich seiner eigenen negativ empfundenen Betroffenheit durch derartige Naturgewalten.

**Abstract:** The study deals with floods and debris flows as geomorphologic processes in high mountain ranges, especially their appearance and genesis in small alpine catchments. Included is a consideration of the possible organized synopsis of event and process data in the area of Eastern Alps since the beginning of the 20<sup>th</sup> Century. Additionally, the real ‘powerlessness’ risks of settling people in such regions concerning their negatively sensed consternation for such natural disasters, is discussed.

**Schlüsselwörter:** Hochwasser, Hochwasserklassifizierung, Muren, kleine Einzugsgebiete, human induzierte Gefahr, Datensammlung

**Keywords:** flood, flood classification, debris flows, small catchments, human induced risk, data compilation

---

\* Anschrift des Autors:

Guntmar Fleischer (g.fleischer@hotmail.de), Schillerstraße 7, D-07987 Mohlsdorf.

## 1. Einleitung

„Kaum eine andere Naturgewalt vernichtet so viele volkswirtschaftliche Werte; kaum gibt es einen sprechenderen Ausdruck für das Zerstörungswerk im Gebirge als die Wildwasser“ (Denck, 1912: 34).

So war es früher – und so ist es heute. Hydrologisch bedingte Prozessabläufe nehmen seit jeher den ersten Platz bei der Gefährdung menschlichen Hab und Guts durch Naturgewalten ein (Dyck & Peschke 1995: 430, Plate et al. 1993: 10), was insbesondere auf Hochgebirge, jene mit hoher Reliefenergie und dem bekannten Potential niederschlagsfördernder Wirkung ausgestatteten Lebensräume, zutrifft. Hier offenbaren derartige Geschehnisse in der Regel eminent bemerkenswertere Magnituden und Intensitäten als im flacheren Land (Oberndorfer et al. 2007: 2, Fliri 1975: 38), zumal sich das Wasser infolge reger Verwitterungstätigkeit und damit verbundener fortlaufender Bereitstellung mobilen Feststoffmaterials in vielfältiger Weise zusätzlicher Waffen zu bedienen vermag (Matznetter 1958: 67f). Dabei ist das prinzipielle Auftreten derartiger Prozesse dort nichts Außergewöhnliches, ja sogar etwas völlig Normales im verzahnten Regelkreis der Natur (Wasserkreislauf, Gebirgsabtrag). Unter diesem Aspekt bzw. in dieser Schnittstelle sind auch Hochwasser, als eine noch genauer zu definierende Erscheinungsform des Abflusses, sowie Muren, als Übergangsform zwischen fluvialen Austrag und Massenbewegungen, zu sehen. Ihr episodisches und unberechenbares Auftreten aber verbreitet seit Menschengedenken Furcht und Schrecken vor diesen empfundenen „Exzesse[n] der Natur“ (Gutknecht 1994: 56). Ihr Übriges schaffen in heutiger Zeit die Medien, die uns immer wieder mit Schreckensmeldungen über derartige Ereignisse konfrontieren und nicht selten dabei ein Gefühl ausgelieferter Ohnmacht demgegenüber vermitteln.

## 2. Hochwasser

Hochwasser repräsentieren im rein quantitativen Sinne einen messbaren Wasserstandsanstieg bzw. einen zeitlich begrenzten Wasserstand, der gegenüber den vorherigen und nachfolgenden (üblichen) Werten messbar erhöht ist (z.B. in Abflussvolumen oder Abflusshöhe). Da sich die

zugrunde liegende Arbeit vornehmlich mit natürlichen, in der Hauptsache fluvial gebundenen Hochwassern meist kleinerer Einzugsgebiete im alpinen Gebirgsraum befasst, soll diese abstrakte Definition noch um eine rein hydrologisch-geomorphologische ergänzt werden: Demnach können Hochwasser als „durch die Speichereigenschaften des Einzugsgebiets transformierter Niederschlag“ (Patt 2001: 11) angesehen werden, der aufgrund seiner individuellen Erscheinungsweise eine besondere Betrachtung verdient. Dabei soll darauf hingewiesen werden, dass diese letzte begriffliche Festsetzung in ihrer Validität weitgehend auf den Fokus der als Gegenstand geäußerten Objekte bestimmter Art im Gebirge (s.o.) beschränkt ist. Für andere Ereignistypen, z.B. marine Hochwasser oder solche infolge von Vulkanausbrüchen, darauf soll hier mit Nachdruck hingewiesen sein, ist diese ‚Definition‘ nicht zutreffend!

Generell sind die betrachteten Hochwasser (in der Regel kurzzeitige) Ereignisse des hydrologischen Kreislaufs, die dominiert werden von intensivem Oberflächenabfluss (Ostrowski & Leichtfuß 1996: 24). Ihnen ist dabei eigen, dass sie, im Gegensatz zu anderen elementaren Naturereignissen (teils auch begrifflich gekoppelt als ‚Elementarereignisse‘ bezeichnet, vgl. z.B. Matznetter 1958: 67ff, Fink 1986: 24), nicht nur lokal Wirksamkeit, sondern durch den mobilen Charakter flüssigen Wassers über weite Teile der Erdoberfläche hin Auswirkungen zeigen können (Matznetter 1958: 75).

### 2.1 Möglichkeiten des Zustandekommens von Hochwasser

Dem Umstand Tribut zollend, dass die fachliterarische Einteilung von Hochwassern hinsichtlich ihres genetischen Zustandekommens bisweilen abenteuerlich abstrus, mitunter gar widersprüchlich ist (vgl. z.B. Patt 2001: 6, Engel 1990: 6, Ostrowski & Leichtfuß 1996: 23, Dyck & Peschke 1995: 431, Kron 2006: 124, Rudolf & Simmer 2006: 263), soll hier eine eigene Übersicht mitgeliefert werden, welchen differenzierten Möglichkeiten die betrachteten Hochwasser im alpinen Raum ihr Zustandekommen potentiell verdanken können.

Die Übersicht gliedert sich zweckmäßig in einen rein genetischen Teil und einen mit konkreten Lokalbezügen, die unabhängig voneinander zu konsultieren sind (Tab. 1).

<b>Möglichkeiten des Zustandekommens von Hochwasser</b>	
<i>rein genetische Betrachtung ohne Lokalbezug</i>	<i>lokal-genetische Betrachtung</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ereignisbezogen (Niederschlag) <ul style="list-style-type: none"> <li>- infolge langanhaltenden Niederschlags</li> <li>- infolge kurzen, aber heftigen Starkniederschlags</li> <li>- kombiniert (auch orographischer Stau)</li> </ul> </li> <li>● ereignisbezogen (Schwall), z.B. durch <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stürze und Rutschungen in größere Gewässer</li> <li>- abrupte Damm- bzw. Ausbrüche</li> </ul> </li> <li>● infolge ablativer Prozesse (Strahlung, warmer Niederschlag)</li> <li>● infolge Dämmung <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dämmwirkung allochthon induziert (z.B. keine Schwallwirkung induzierende Rutschung in einen Gewässerlauf)</li> <li>- autochthone Dämmung (z.B. Eisstau)</li> <li>- kombiniert (Verklauung)</li> </ul> </li> <li>● Überlaufereignisse (Becken, Seen)</li> <li>● Wasserspiegelanstiege (Grundwasser / größere Gewässer)</li> <li>● anthropogen <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauwerks- oder Anlagenversagen (z.B. nicht ereignisbedingter Stauanlagenbruch, Leitungsversagen)</li> <li>- nutzungsbedingt (z.B. durch Speicherdegradation im Einzugsgebiet)</li> </ul> </li> <li>● kombinierte Ereignisse, z.B. Dammbruch infolge heftigen Niederschlags oder Verklauung an zu eng bemessenen Bauwerken; geogen induzierter Rohrbruch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● fluvial, jahreszeitlich bedingt und hydrologisch unauffällig</li> <li>● fluvial, jahreszeitlich bedingt und vom langjährigen Mittel abweichend <ul style="list-style-type: none"> <li>- unter Erwartung (Scheitel, Fülle)</li> <li>- über Erwartung (Scheitel, Fülle), <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ infolge schneller Schmelze (Temperatur)</li> <li>▪ infolge zeitlich konzentrierten Niederschlags</li> <li>▪ infolge starken Niederschlags zusätzlich zur Schmelze</li> </ul> </li> <li>- über Erwartung (Dauer), infolge mächtiger Schneedecke bzw. längeren Niederschlags als normal</li> </ul> </li> <li>● fluvial, singuläres Ereignis <ul style="list-style-type: none"> <li>- niederschlagsbürtig <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ infolge langanhaltenden Niederschlags (i.d.R. zyklonal)</li> <li>▪ infolge kurzen, aber heftigen Starkniederschlags (i.d.R. konvektiv)</li> </ul> </li> <li>- infolge ablativer Prozesse (mittelbar niederschlagsbürtig)</li> <li>- infolge Dämmung (bspw. durch Bergsturz, Gletschervorschub)</li> <li>- infolge Dammbruch</li> <li>- infolge Eisrückstau</li> </ul> </li> <li>● fluvial, singulär, nicht natürlich (anthropogen induziert) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauwerksversagen</li> <li>- nicht mittelbar, z.B. Flächenspeicherdegradation</li> </ul> </li> <li>● diffus (Unterteilung wie fluvial singulär und anthropogen)</li> <li>● limnisch und singulär (Seespiegeltransgression)</li> </ul>

Tab. 1: Möglichkeiten des Zustandekommens von Hochwassern in kleinen alpinen Einzugsgebieten (eigener Entwurf).

Besondere Dramatik entfachen Hochwasserwellen meist dann, wenn sie durch gravitative Prozesse oder Versagen von Bauwerken plötzlich und vollkommen unerwartet (noch unmittelbarer als reißen Fluten aus Niederschlag) eintreten.

## 2.2 Entstehung natürlicher, niederschlagsbürtiger fluvialer Hochwasser

Die Untersuchung beschäftigt sich, wie schon erwähnt, vornehmlich mit natürlichen, meist singulären, fluvialen Hochwasserereignissen im Gebirgsraum, die in der überwiegenden Zahl der Fälle infolge von Niederschlag entfesselt werden.

Entsprechend steht bei der Betrachtung der genetischen Ursachen für ein Ereignis diese Form von Hochwasser im Fokus.

Grundsätzlich sind für die Bildung eines Hochwasserabflusses bzw. für die Festlegung der Größe eines Abflussscheitels folgende Faktoren maßgebend (modifiziert und ergänzt nach Engel 1990: 7):

1. die Größenordnung (Menge, Dauer und Intensität) sowie jahreszeitliche und räumliche Verteilung von Niederschlägen,
2. die Mächtigkeit & räumliche Verteilung (inkl. Exposition) einer ggf. vorhandenen

Schneedecke sowie deren witterungs- und lageabhängige Schmelzrate,

3. die Größe und Anlage (Topographie, Gewässernetzeigenschaften) des Einzugsgebiets,

4. dessen Zustand hinsichtlich Infiltrationskapazität (u.a. abhängig von Niederschlagsvorgeschichte, Bodenart und -eigenschaften, Frost), vorhandener bzw. verfügbarer und nicht verhin- derter (z.B. etwa eingedeichte Auen) Speicher und deren aktueller Speicherkapazität,

5. der Zustand des Einzugsgebiets und des Gerinnes einschließlich seiner Vorländer und sonstiger überflutbarer Bereiche bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit / Gerinnebettgeometrie.

Zur Entstehung eines Hochwassers ist es schließlich vonnöten, dass mindestens einer der o.g. fünf Punkte sich in der Regel in Größenordnung in für ein normales Abflussgeschehen suboptimalem Zustand präsentiert. Zumeist trifft diese Prämisse auf die Punkte 1 und 2 zu. Bei suboptimalen Voraussetzungen die Punkte 3-5 betreffend (erhöhte Abflussbereitschaft), genügt jedoch nicht selten schon ein leichtes Abweichen von üblichen Abläufen die Punkte 1 und 2 anbelangend.

Dabei sind die Oberflächenrauheit (5), die Qualität der Speicher sowie das Infiltrationsvermögen (4) und in geringem Maße auch die Topographie und Gewässernetzform (3) (meist nur lokal) eines Einzugsgebiets direkt oder indirekt vom Menschen beeinflussbar.

Die lokale Höhe eines entstehenden Hochwasserscheitels wird schlussendlich durch die Abflussmenge, die Größe des möglichen Durchflussquerschnitts, die Anlage des Gewässernetzes und den Zustand des Gerinnebetts (Rauheit) bestimmt (Engel 1990: 8, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2002a: 22). Erstere, die Abflussmenge, wird dabei, neben bereits genannten Faktoren wie Niederschlag (Typ, räumliche und zeitliche Verteilung), Schneedecke (Retentionswirkung, Exposition) oder Gewässernetzmorphologie (relative Lage bei Niederschlagszug, Wellenüberlagerung wegen Einzugsgebietsform, Speichervermögen bis Ausuferung) insbesondere von den Komponenten Boden & Gesteinsuntergrund (Infiltrationskapazität, Aufnahme- und Speichervermögen), Vegetation (Interzeption, Evapotranspiration, Verbesserung der Infiltration) und Gelände (Muldenrückhalt, Qualitätsfestlegung anderer Speicher sowie Abflussverzögerung infolge Rauigkeit) determiniert.

### 3. Muren

Wie schon Becht & Rieger (1997a: 34) zu Recht befanden, ermangelt es vor allem in internationalen Publikationen bis heute einer klaren und eindeutigen Definition des Begriffs Mure. Eine Diskussion hierüber soll hier jedoch nicht stattfinden. Die für die Alpen typischen Murgänge gibt Rickenmann (2002: 23) als „ein Gemisch aus den drei Hauptkomponenten Wasser, Feinmaterial und groben Steinen“ an. Muren können damit als „eine Mischform zwischen Hochwassern, Erdbeben und Felsstürzen“ (Rickenmann 2002: 23; vgl. auch Rickenmann 2001a: 161, ders. 2001b: 4) mit teils enormer Schleppekraft angesehen werden (vgl. Abb. 1). Alle möglichen, mehr oder minder kürzeren oder ausführlichen (z.B. korngrößenpezifizierenden, Geschwindigkeiten einschließenden, lokalitätsbezogenen) und / oder zusammenfassenden Übergangsformen sind daneben jedoch ebenso zu finden (vgl. z.B. Costa 1984: 268, Bunza 1976: 61, Näf & McArdell 2004: 48, Rickenmann 1995: 4, ders. 2001a: 161, Haerberli et al. 1991: 77, Takahashi 1980: 136, Kerschner 1999: 78f, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2002b: 75). Charakteristisch ist Muren gegenüber Hochwassern und anderen geschiebeführenden Abflussereignissen dabei, dass die Feststofffracht mehr oder weniger gleichmäßig über den Abflussquerschnitt verteilt ist (Kerschner 1999: 78, Haerberli et al. 1991: 80). Das Spektrum des Feststoffanteils variiert dabei zwischen 25 % und 86 % (Volumen) bzw. 35 % bis 90 % (Gewicht) (Costa 1984: 274), was ihre Bedeutung als Sedimenttransportmittel zwischen Gebirge und Vorflut im Kontext des globalen Kreislaufs unterstreicht (Wichmann & Becht 2004: 370, Haas et al. 2004: 37 & 42). Der Maximalabfluss „tritt in der Regel im Bereich der Murenfront auf“ (Rickenmann 2001b: 9, ders. 2002: 24) und kann nach ebd. & ebd. in den Alpen Werte zwischen 100 und 1.000 m<sup>3</sup>/s erreichen, womit er etwa 10- bis 100mal größer ausfallen kann als ein vergleichbarer Hochwasserabfluss im selben Wildbachgerinne, wobei extremste Unterschiede vor allem in kleineren Einzugsgebieten zu erwarten sind.

Die Höhe einer Murenfront wurde im alpinen Raum bisher mit bis zu 10 m angegeben (Rickenmann 2001b: 9). Eigen ist den in seinen Größenordnungen vom Dezimeterbereich bis hin zu ‚Megaereignissen‘ reichenden und potentielle Zeitdauern von Sekunden bis viele Stunden umfassenden Murgangphänomenen überdies ihr oft wellenförmiges, schubartiges Abgangsverhal-

ten (‚Murschübe‘), das neben variierenden Wasseranteilen hervorgerufen werden kann durch hydrodynamische Inhomogenitäten vor allem in Gerinnen, durch laterale Materialeinträge, auch infolge von Uferunterschneidung, und eventuell dadurch ausgelösten Verkläunungen (Kerschner 1999: 77ff). Als Auslösebedingung für einen Murgang wird neben singulären Ereignissen wie Ausbruchsflutwellen aller Art oder raschen Schmelzen im Wesentlichen eine kritische Kombination von Niederschlagsintensität und -summe genannt (Rickenmann 1995: 5, Haeberli et al. 1991: 81, Becht & Rieger 1997a: 35). Zusätzlich, so versteht sich, bedingt das System gleichsam

einen hinreichenden Ladungszustand an Lockermaterial (Aulitzky 1989: 10f, Rieger & Becht 1997: 126, Rieger 1999: 41, Stiny 1910: 13). „Als wichtigste Substrateigenschaft für die Beurteilung der lokalen Bruchgefahr wird dabei die Korngrößenzusammensetzung angesehen“ (Hagg / Becht 2000: 80), die sich entscheidend auf die Scherfestigkeit und damit auf die Stabilität eines Hanges auswirkt. Insgesamt entstehen Muren am ehesten dort, „wo im Hinblick auf die Substratzusammensetzung ein Optimum zwischen Wasserleit- und -speichervermögen besteht“ (Rieger 1999: 44, vgl. Abb. 2).

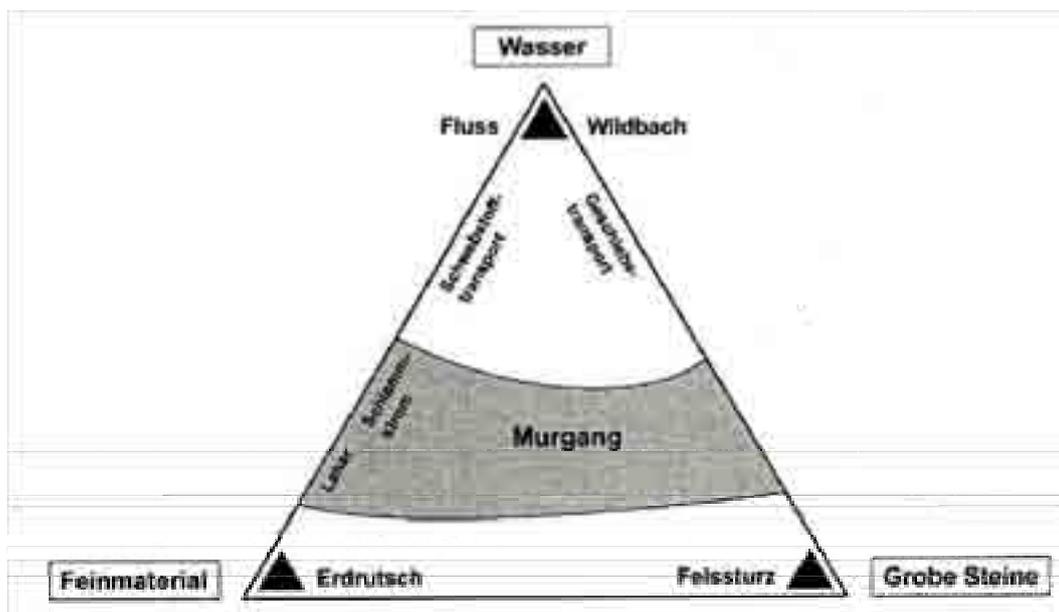


Abb. 1: Materielle Stellung von Murgängen (aus Rickenmann 2001b: 4).

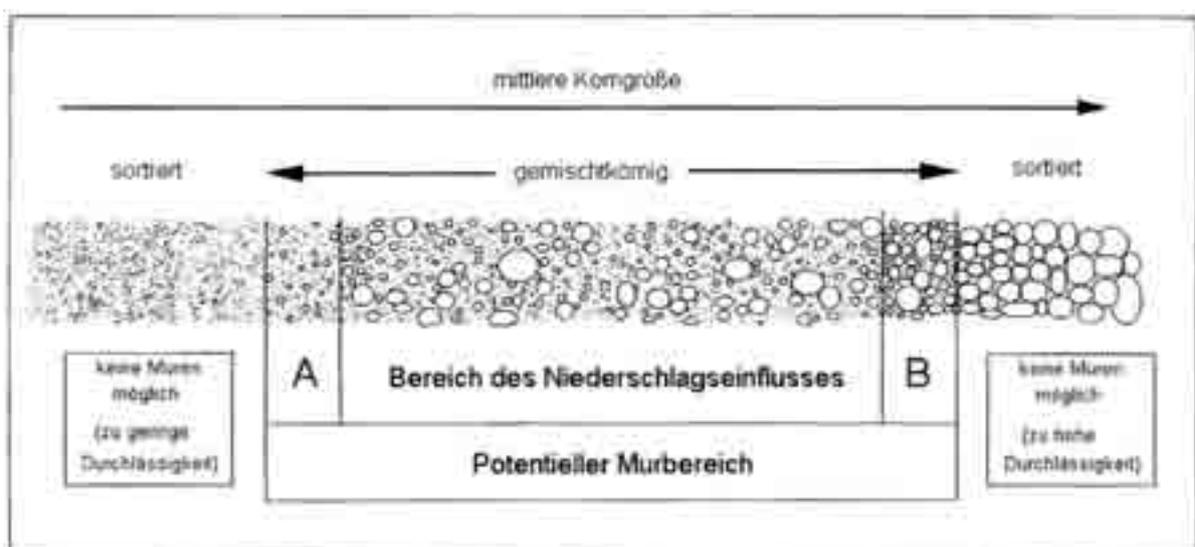


Abb. 2: Spektrum potentiellen Murmaterials nach Korngrößen und deren Verteilungsverhältnissen. Die Bereiche A und B kennzeichnen Grenzbedingungen (aus Hagg & Becht 2000: 90).

Nach Haerberli et al. (1991: 84) weisen Muren im Vergleich zu Wildbachhochwassern eine zwei- bis zehnmal größere Abflusstiefe auf. Zudem zeigen sie wesentlich höhere Viskositäten und bedingen daher erheblich steilere Gefälle für ihr Auftreten. Eine nützliche Übersicht zur Unterscheidung und gegenseitigen Abgrenzung der Prozessgeschehnisse Hochwasser und Mure liefert Costa (1984: 287ff, vgl. Tab. 2).

Eine geomorphologische Gliederung der Mure kann nach Becht / Rieger (1997b: 521) und Rieger (1999: 3) in das *hydrologische Einzugsge-*

*biet*, die *Initiierungszone*, in der der Murbruch stattfindet, die *Transitzone* (Transportgebiet) und das *Akkumulationsgebiet* vorgenommen werden, wobei Letzteres mit wachsendem Einzugsgebiet ebenfalls zunimmt.

Die aktuell übliche Klassifizierung verschiedener Murtypen zeigt Tab. 3. Ältere, wesentlich umfangreichere und feingliedrigere Einteilungen (z.B. Stiny 1910) konnten sich international nicht durchsetzen, obgleich noch heute vor allem im deutschsprachigen Raum immer noch nicht selten darauf zurückgegriffen wird.

	<b>Muren</b>	<b>Hochwasser</b>
<b>Feststoffanteil</b>	70-90 %	max. 40 %
<b>Dichte</b>	1,8-2,6 g/cm <sup>3</sup>	1.01-1,3 g/cm <sup>3</sup>
<b>Deposition</b>	als Ganzes, Murbrei bleibt relativ kompakt und teils unabhängig von vorheriger Bewegungsgeschwindigkeit stehen; gleichzeitig bedeutet Abnahme der Geschwindigkeit nicht automatisch Deposition	selektiv in Abhängigkeit von Korngröße und Fließgeschwindigkeit
<b>Sortierung</b>	schlecht	gut
<b>Schichtung</b>	schlecht	gut

Tab. 2: Unterscheidungskriterien zwischen Muren und Hochwassern (erweitert nach Costa 1984: 287ff).

<b>Typ Hangmure (slope type starting zone)</b>	<b>Typ Talmure (valley type starting zone)</b>
<b>Typ 1:</b> Die Anrisszone liegt in einem steilen, meist schwach konsolidierten, teilweise tiefgründigen Schutthang. Die Ausbildung des Anbruchs erfolgt häufig durch rückschreitende Erosion.	<b>Typ 3:</b> Die Anrisszone liegt in einem schuttgefüllten Felscouloir. Die Begrenzung zur Sohle wie auch zu den Seiten hin besteht aus Fels.
<b>Typ 2:</b> Die Anrisszone liegt im Kontaktbereich einer Felswand mit einer steilen Schutthalde. Das Wasser ist meist in der Felswand in einer Rinne konzentriert und versickert größtenteils in der Schutthalde. Der Murgang entsteht im Gerinne in kurzer Distanz vor dem Felsen.	<b>Typ 4:</b> Größere Zwischendeponien von Bachschutt werden plötzlich mobilisiert (theoretischer Gefälle-Grenzwert bei 27 %).

Tab. 3: Aktuelle Klassifizierung verschiedener Murtypen nach ihren Anrisszonen (nach Zimmermann 1990a: 389, Haerberli et al. 1991: 80f, Rickenmann & Zimmermann 1993: 180f).

#### 4. Wildbäche und kleine Einzugsgebiete

Während Wildbäche durch die DIN 19663 als „oberirdische Gewässer mit zumindest streckenweise großem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung“ nomenklatorisch fixiert sind, ist dies der ihnen eigene Umstand meist kleinerer Einzugsgebiete leider wiederum nicht. Gutknecht (1994: 50)

bezieht kleine Einzugsgebiete mit weniger als 50 km<sup>2</sup>, Kerschner (1995: 47) sowie Januskovecz (1989: 46) und Aulitzky (1984: 19) mit weniger als 100 km<sup>2</sup>, Uhlenbrook & Steinbrich (2002: 13) mit weniger als 300 km<sup>2</sup>. Becht & Rieger (1997a: 38) bezeichnen Einzugsgebiete >50 km<sup>2</sup> dagegen schon als groß; Becht (1995: 60f) hingegen betitelt bereits Gebiete >10 km<sup>2</sup> als groß und weist Wildbacheinzugsgebieten Größen in Hektardimension zu, während Üblagger (1986: 20) in Anlehnung an die Mehrzahl o.g. Autoren wieder-

um als Relation angibt, Wildbacheinzugsgebiete seien *selten größer* als 100 km<sup>2</sup>. Es scheint hier also völlig unzuweckmäßig, numerische Quantitäten zu dogmatisieren. Fest steht dagegen, dass, wie die o.g. Definition nach DIN schon ausdrückt, das Abflussverhalten von Wildbächen stark variabel ist und in guter Näherung als direkte Funktion eingegebenen Niederschlags in ihr Einzugsgebiet bzw. dessen Schmelzprodukte betrachtet werden kann (vgl. auch Penck 1912: 37f; Hampel 1968: 46). Ihr großes Gefahrenpotential bzw. ihre Vulnerabilitätspotenz für anthropogenes und Naturgut resultiert dabei genau aus dieser Tatsache: Sie sind unberechenbar und die Vehemenz ihres Auftretens durch die primäre Niederschlagsbürtigkeit vom Menschen nicht kontrollierbar. Nach Kronfellner-Krauss (1982: 12) sind die Schwankungen dabei umso größer, je kleiner und steiler die Einzugsgebiete bzw. die Wildbäche selbst sind. Unterschieden werden können dabei episodische bzw. periodische (nur nach Schneeschmelze, langanhaltendem oder Starkregen wasserführend) und permanent fließende Wildbäche (kaum Trockenfallen, aber dennoch starke Variabilität; vgl. Karl & Mangelsdorf 1976: 92). Besondere Gefahr geht dabei neben dem herabstürzenden Wasser vor allem von den von ihnen unregelmäßig mitgeführten Feststoffen aus. Aber auch die beeinträchtigenden Wirkungen eines solchen Geschehens auf den Naturraum durch seine erosive Tätigkeit sind zumeist gravierend; sie reichen von geringen Veränderungen im Gerinne über Ufererosion bis hin zu damit einhergehenden Hangrutschungen durch Unterschneidung (Gutknecht 1994: 55), die allesamt wiederum frisches Material für neuerliche Zerstörungskraft und Verkläuerungen liefern, die nicht selten in einer so induzierten Murgipfeln. Wildbachsysteme sind damit insgesamt durch „fluviale, hangfluviale, Hangspül-, subterran-aquale, glazigene, kryogene und gravitative Prozesse“ (Fiebinger 1999: 68) an Formbildungsprozessen in den Alpen beteiligt. Etwa 80 % der Geschiebefracht von Wildbachereignissen wird dabei im unmittelbaren Gerinnebereich (Sohle / Böschung) mobilisiert (Quelle des Materials: Eigenerosion, Rutsch- und Sturzprozesse inklusive Lawinen und Hangmuren sowie fluvialer Eintrag; vgl. Hegg et al. 2001b: 90). Die Schleppspannung ist dabei abhängig vom Gefälle (Geschwindigkeit) und der Abflusstiefe sowie von der Abflussmenge, dem Fließquerschnitt und der Rauigkeit der Sohle (ebd.). Erfolgt diese Mobilisierungstätigkeit aufgrund eminent schnell ansteigender Abflüsse plötzlich flächendeckend im

Gerinne, so kommt es bei entsprechender Verfügbarkeit von Feststoffen oftmals zum Übergang der Wasserfracht in einen Murgang.

Eine latente Gefahr resultiert bei Wildbächen ohnehin bereits aus ihrer typischen Anlagecharakteristik: Kleine Einzugsgebiete sind schon allein statistisch höher gelegen, dazu mit hoher Reliefenergie ausgestattet, empfangen relativ mehr Niederschlag und ermangeln zumeist vielfältigen Retentionspotentialen (vor allem Böden und Vegetation; Januskovecz 1989: 46).

Neuere Untergliederungen der Wildbachtypen (auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll) speziell für die Ostalpen liefern Karl & Mangelsdorf (1975: 400ff & 1976: 93ff). Daneben existiert eine umfassende zweiteilige Wildbachgliederung von Aulitzky (1984: 19ff) sowie eine weitere überblicksartige Klassifikation von Aulitzky (1985: 339).

## 5. Ereignisdatenzusammenhang

### 5.1 Methoden und Problemdiskussion

In der Vergangenheit wurde der Versuch unternommen, eine möglichst umfangreiche Zusammenschau von Ereignisdaten (Hochwasser und Muren, ausgenommen der Großereignisse 1999, 2002 und 2005, für die bereits genügend Material frei im Netz verfügbar ist) für den Ostalpenraum für den Zeitraum seit Beginn des 20. Jahrhunderts zu erstellen. Zur Informationserlangung wurden dafür verschiedenste Quellen (Fachliteratur, Lokalzeitungen, amtliche Akten, Erhebungen und Statistiken, Internet etc.) analysiert. Vor allem aufgrund behördlicher bzw. institutioneller Hindernisse verschiedenster Art im Raum Österreich kann diese jedoch bis heute keinen Anspruch auf Vollständigkeit stellen. Dazu gesellten sich weitere Stoppersteine genereller und quellengebundener Natur, die die Datenbeschaffung an sich bzw. die Auswertung der gegebenen Überlieferungen teils erheblich erschwerten, einschränkten, die Validität der Beschreibungen verwischen ließen oder als generelle Fakten nicht optimaler Zustände bzw. von Forschungserschwerern angeprangert werden müssen oder zumindest Erwähnung finden sollen. Dazu gehören bspw.:

- Viele Berichtersteller sind mit den lokalen Gegebenheiten der Ereignisgebiete bestens vertraut und verwenden deshalb gern Lokalbezeichnungen (z.B. Weg-, Alm-, Hütten- oder Hangnamen, die mitunter selbst die wohl leistungsfähigste Internetsuchmaschine ‚google‘ nicht kennt), ohne diese in einer kartographischen

Darstellung dem ortsunkundigen Leser in ihrer Lage und Relevanz zum Thema aufzuschlüsseln.

- Damit in Verbindung steht, dass die Berichterstattung meist auf ein sehr beschränktes Areal bzw. nur einen gewissen Interessenbereich (Gemeindegebiet o.ä.) fokussiert zu sein scheint und damit bei größeren bzw. überregionalen Ereignissen diese selten in ihrer Gänze betrachtet werden.

- Problematisch ist auch die Berichterstattung, wenn keine stichhaltigen Aufnahmen (Bilder, Messdaten o.ä.) vorliegen und die Datenaufnahme sich deshalb auf Augenzeugenberichte stützt. Verwischungen infolge mangelnder Sachkenntnis und vor allem Übertreibung sind hier Tür und Tor geöffnet. Dies gilt insbesondere für ältere Überlieferungen. Weiterhin bestehen in diesem Zusammenhang nicht selten nomenklatorische bzw. terminologische Probleme.

- Generell werden Ereignisse in kleineren Einzugsgebieten scheinbar kaum großartig beachtet (bestenfalls nüchtern amtlich aufgenommen); Berichterstattungen darüber entstehen meist eher zufällig aus dem sporadischen und unregelmäßigen Vorortsein interessierten, dann aber zumeist auch fachkundigen Personals, oder, wenn das Ereignis exorbitante Magnituden aufweist und entsprechendes Öffentlichkeits- und Forschungsinteresse generiert (beides jedoch hat erfahrungsgemäß Beschreibungen von hoher Qualität zur Folge).

- Demgegenüber steht der Fakt, dass dann oftmals viele Ereigniseigenschaften und ihre Spuren im Nachhinein in unwegsamem Gelände mühsam aufgenommen werden müssen, was nicht selten wertvolle Hinweise erosionsbedingt schon wieder schwinden lässt. Zusätzlich bergen die Differenziertheiten der oftmals komplexen (entlegenen) Lokalitäten vor allem in der gebotenen Kürze der Zeit methodische Unsicherheiten (vgl. Wetzel 1994: 161 & 2001: 361).

- Ist anthropogenes Gut in die Ereignisse involviert bzw. davon betroffen, bleiben durch die sich unverzüglich anschließenden Aufräumarbeiten kaum Zeitspannen zur Untersuchung.

- Kleine Einzugsgebiete sind noch viel zu lückenhaft und wenig systematisch mit Messinstrumenten ausgestattet. Sind (ältere) Einrichtungen vorhanden, so sind außer der Information, dass sich ein Ereignis abspielte, mitunter keine weiteren Angaben erfahrbare. Somit fehlen auch wichtige Referenzdaten bzw. für die sinnvolle Betrachtung unentbehrliche Informationen über Zustände vor dem Ereignis.

- Nicht nur deshalb beziehen sich veröffentlichte Dokumentationen über Ereignisse in der großen Mehrheit der Fälle auf größere Einzugsgebiete (wohl auch, weil dort mehr Schadenspotential vorhanden ist und somit breiteres Öffentlichkeitsinteresse besteht).

- Generell scheint ein Trend zu bestehen, nur Schadereignisse zu dokumentieren bzw. bei Berichten den Fokus des Verlusts diverser Güter in vorderster Front zu rücken. Hydrologische Fragestellungen geraten zunehmend in den Hintergrund (selbst Fachzeitschriften Hydrologischer Institutionen – bei denen mit abnehmendem Alter obendrein einen verbreitet zunehmender Hang zur schnöden Populärwissenschaftlichkeit beobachtbar ist – sind hiervon nicht auszuschließen!).

- In diesem Zusammenhang muss auch kritisch angesprochen werden, dass, wenn hydrologische Werte und Parameter schon präsentiert werden, diese erschreckend häufig als nackte Zahlen ohne jedwede Referenzwerte oder Bezüge zu Normalzuständen eingefügt sind.

- Hinzu kommt, dass in vielen Fällen gar nicht die hydrologischen Ereignisse an sich im Mittelpunkt der Veröffentlichungen und damit zugänglicher Ereignisquellen stehen. Nicht selten werden diese lediglich als Plattform genutzt über die Sinnhaftigkeit bestimmter Wegebaukonzepte zu diskutieren (z.B. Pestal 1995), neuartige Modellierungsweisen von Niederschlagskarten bzw. Mess- oder Beobachtungssysteme vorzustellen (z.B. Wiesenegger 1998) oder aber auf der Grundlage großangelegter Schadensstatistiken medienwirksam Versäumnisse bestimmter Entscheidungsinstitutionen zu kritisieren.

- Abschließend muss bemerkt werden, dass in vorhandenen printmedialen Quellen mitunter Widersprüche zwischen Textbeschreibungen und Abbildungen / Tabellen vorlagen, sodass mangels Zweitquellen keine reliablen Aussagen möglich waren. Zudem fiel auf, dass in diversen Darstellungen Flussläufe unterschiedlich benannt und sogar verschiedentlich verzeichnet sind. Selbst die offizielle Gewässerkarte des Hydrographischen Dienstes in Österreich widerspricht sich in Teilen mit den sonst so zuverlässigen Karten des ADAC.

- Schlussendlich fällt auch ins Gewicht, dass vor allem ältere Quellen durch die Irrungen und Wirrungen der beiden Weltkriege unwiderprüflich verloren gingen.

## 5.2 Datensätze

Für den deutschen Alpenraum liegen bezüglich wildbachbürtigen Hochwasser- und Murereignis-

sen im Bayerischen Landesamt für Umwelt umfangreiche und detaillierte (Roh-) Datensätze vor. Sie wurden in mehrjähriger Arbeit Anfang des neuen Jahrtausends von Mitarbeitern des Lehrstuhls für Physische Geographie der KU Eichstätt innerhalb des Projekts HANG (Historische Analyse von NaturGefahren) im Auftrag des damaligen Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz eruiert und weisen über 8.000 Hochwasser- und Murereignisse (davon der überwiegende Großteil im 20. Jahrhundert) auf (Becht et al. 2006). Hinzu kommen weitere Informationen vor allem neuerer Printmedien.

Für den österreichischen Alpenraum waren gebündelte Informationen ungleich schwieriger zu erlangen. Hauptgrund hierfür war (ist) der laufende Prozess der Erstellung einer ähnlichen, quasi analogen landesweiten Chronik an der Universität für Bodenkultur in Wien (Institut für Alpine Naturgefahren) im staatlichen Auftrag, weshalb Hydrographische (Landes-) Dienste, Wildbach- und Lawinverbauungen, Ministerien, die genannte Universität an sich usw. entsprechende Informationen nur ‚ungern‘ an Dritte weitergaben (weitergeben). Hier konnten lediglich punktuelle Erfolge verzeichnet werden. Demgegenüber ist der Fundus an fachwissenschaftlichen Veröffentlichungen (oder zumindest mit selbigem Anspruch, s.o.) überaus groß. Einer Vielzahl an Artikeln über einzelne Ereignisse stehen vor allem die einmal räumlich umfassende, dafür zeitlich beschränkte (1971-1973) Schrift von Jeglitsch (1976), und zum anderen die räumlich beschränkte (Tirol, Oberpinzgau, Vorarlberg und Trentino), dafür jedoch zeitlich umfassende Chronik von Fliri (1998) gegenüber. Letztere kann für die Folgejahre durch das Internetportal des Tirolatlas ergänzt werden (<http://tirolatlas.uibk.ac.at/topics/chronicle/query.py/index>).

Für den Schweizer Ostalpenraum (Teil des Kantons Graubünden östlich der Linie Alpenrhein – Hinterrhein plus gedachte Südverlängerung bis zum Comer See) liegt u.a. eine Veröffentlichungsreihe der Abteilung Forstliche Hydrologie der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) vor, die Unwetterereignisse im schweizerischen Bundesgebiet seit 1972 als annuelle chronikartige Kompilation darstellt (Zeller 1977, Zeller & Röthlisberger 1979-1988, Röthlisberger 1989-1999, Hegg et al. 2000, 2001a, 2002 & 2003, Fraefel & Hegg 2004, Fraefel et al. 2005, Hilker et al. 2007a & b sowie 2008). Die Reihe wird ergänzt durch eine Veröffentlichung von Röthlisberger (1991b), die (schon

beginnend im 6. Jahrhundert) restliche Informationen zu den Geschehnissen vor allem vor 1972 liefert. Die Erhebungen ab diesem Datum basieren auf der kontinuierlichen Auswertung von rund 550 schweizerischen Zeitungen sowie weiteren Befragungen vor Ort und, wo möglich, auch detaillierten Untersuchungen an den Orten des Geschehens. Nachteilig ist hier jedoch häufig die Ermangelung an konkreten hydrologischen Parametern, wobei auch Erwähnung finden muss, dass im Schweizer Raum nach Auskunft diverser Stellen das behördliche Sammeln von Ereignisdaten keinerlei Priorität genießt. Neben den genannten Quellen existiert eine nicht zu verachtende Anzahl von Fachveröffentlichungen; dies jedoch in der Regel nur landesweite Großereignisse betreffend (z.B. anlässlich der verheerenden Sommerunwetter 1987).

Für den südtiroler Alpenraum wiederum liegt, ähnlich dem deutschen, eine amtliche Datenbank über registrierte Wildbachereignisse (1900 - 2007) vor, die auf Anfrage von der Abteilung 30 (Wasserschutzbauten) der Landesregierung der Autonomen Provinz Bozen wissenschaftlichen Recherchen gern zur Verfügung gestellt wird. Unter Überwindung sprachlicher Hürden sind zudem printmediale Quellen weiterführend.

Insgesamt konnten Nachweise für weit über 16.000 Ereignisse zusammengetragen werden, die in unterschiedlichster Form mit Zusatzinformationen behaftet sind.

## 6. Rückblick: Naturereignisse oder hausgemachte Gefahren?

Fluviale Hochwasser sind, genauso wie Murgänge, primär natürliche Ereignisse (Uhlenbrock & Leibundgut 1997: 13), welche, wie o.g., als Zusammenspiel diverser Faktoren und Umstände infolge bestimmter Niederschlagsereignisse auftreten. Es ist jedoch auch nicht von der Hand zu weisen, dass jene Naturgewalten aus der Schadensperspektive (Vernässung, Verschmutzung, Zerstörung, Erosion, Beeinflussung von Leben) gesehen, die heutzutage oftmals Hauptbeurteilungskriterium in jener Hinsicht zu sein scheint, immer auch zu einem gewissen Teil Menschenwerk sind, denn Schäden in diesem Sinne entstehen nur dort, wo entsprechend Schadenspotential vorhanden ist (Kron 2005: 126ff, Kerschner 1995: 47, Becht 1991: 50, Wichmann et al. 2002: 131, Aulitzky 1994: 109, vgl. Abb. 3) – und dies existiert (materiell) nur im Zusam-

menhang mit anthropogenen Wirtschafts- oder Siedlungsinteressen und wächst mit zunehmendem Populationsdruck, steigendem Lebensstandard und zunehmender infrastruktureller Erschließung früher bewusst gemiedener Bereiche (de Jong 1997: 1, Stiny 1910: 97f).

Der Ursprung der Gefahr für die Menschheit mitsamt ihrem Hab und Gut bzw. ihre Vulnerabilität ist dabei eine historisch begründete. Sie ist seit altersher dadurch gegeben, dass sich der Mensch im Zuge der Essentialität von Wasser für sein Leben und der oft vielversprechenden Bodengüte überhaupt in potentiellen Überflutungsbereichen, z.B. Auen bzw. Alluvialebenen, angesiedelt hat (Lambert 1988: 206; Ostrowski &

Leichtfuß 1996: 33, Fink 1986: 27), zunächst (neben dem Faktor der Bodengüte), um das lebensspendende Nass nicht über zu weite Distanzen zu den dürstenden Kehlen befördern zu müssen, später auch um seine Kraft für den Antrieb bzw. die Kühlung diverser Werkseinrichtungen zu nutzen bzw. die Flussläufe in die infrastrukturelle Nutzung einzubeziehen (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2002a: 60), nicht zuletzt aber auch deshalb, weil bspw. durch wiederholte Wasserübertritte geprägte Talabschnitte schlicht und einfach leicht bebaubar und nutzbar sind (weil eben und zumeist fruchtbar) und vielen Menschen zudem als ästhetisch reizvoll erscheinen.



Abb. 3: Durch alpine Wildbachtätigkeit (Mure) zerstörte Siedlungsteile, die gefahrenignorant direkt am Unterlauf (auf dem Schwemmkegel) des Wildbachs errichtet wurden (Quelle: [http://www.vol.be.ch/site/fr/m\\_ccfw\\_big-picture.htm?picurl=naturgefahren-murgaenge-murgang-brienz-glyssibach.jpg](http://www.vol.be.ch/site/fr/m_ccfw_big-picture.htm?picurl=naturgefahren-murgaenge-murgang-brienz-glyssibach.jpg), 12.11.08).

Nach Patt (2001: 8) ist eine auf Vorhersage aufbauende, organisierte Hochwasserwarnung mit umfangreichen Schutzmaßnahmen „nur dann sinnvoll, wenn Vorwarnzeiten von >12 h erreicht werden können“. Befindet sich eine Siedlung jedoch direkt am Laufe eines Fließgewässers mit

nur wenigen Hektar (vielleicht sogar sehr steilem) Einzugsgebiet, so kann ein singuläres, diese Fläche treffendes Starkniederschlagsereignis für jene Behausungsagglomeration und ihre Bewohner eine enorme Katastrophe bedeuten, da in diesem Fall extreme Abflüsse zu erwarten sind.

Durch etwaige derart risikobehaftete Siedlung trägt der Mensch selbst Schuld an seiner direkten Hochwassergefährdung (vgl. auch Aulitzky 1984: 13, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2002b: 39, Güntschl 1970: 44, Stiny 1910: 96ff). Gerade in Gebirgsräumen wählte dieser spätestens seit Beginn des 19. Jahrhunderts aber häufig bewusst Wildbachschwemmkegel und -murkegel als Siedlungsraum (Hegg et al. 2001b: 85, Haeberli et al. 1991: 87, Haeberli & Naef 1988: 332, Rickenmann 2005: 201, Kienholz 1998: 7, Stiny 1910: 101), statt (weiterhin ausschließlich) die breiten Talebenen als Bauplatz zu nutzen und begab sich damit direkt an den Unterlauf eben solcher kleinen Einzugsgebiete. Er tat dies – von der demographischen Expansion seiner Spezies abgesehen –, weil, auch verbunden mit zunehmender maßloser Abholzung von Gebirgswäldern, in den Talebenen unverbauter Flüsse immer häufiger bedrohliche Hochwasser zu bemerken waren und er deshalb verstärkt Schutz auf höheren Geländeabschnitten suchte und auch die dortigen Wiesen sich als fruchtbare, mitunter im Gegensatz zu den oft schweren Auenböden leichter bewirtschaftbare Gründe herausstellten (Lambert 1988: 207, Stiny 1910: 101), meist wohlwissend, dass auch hier entsprechende Gefahren drohen, die statistisch jedoch mit weit aus geringerer Häufigkeit auftraten und daher nicht selten verharmlosend und für beherrschbar gehalten in Kauf genommen und entsprechend unterschätzt wurden (Plate 1996: 521, Kron 2005: 127, Näf & McArdell 2004: 48, Rickenmann 2005: 201, Wichmann et al. 2002: 131, Becht & Rieger 1997b: 516, Becht 1995: 1). Diese Unterschätzung von Gefahren trifft auf Hochwasser gleichermaßen zu wie auch auf Muren. Besonders dramatisch wirkt sich dabei der Umstand aus, dass gerade bei auf große Rekurrenzintervalle folgenden Prozessen häufig die größten Materialumsätze erfolgen, die entsprechend verheerende Auswirkungen haben (Becht 1995: 1, Stiny 1910: 105).

Die Zunahme von verheerenden Hochwasser- und Wildbachschäden in den letzten Jahrzehnten ist daher fast ausschließlich auf die unbedachte Siedlungs- und Erschließungstätigkeit in den unmittelbar gefährdeten Bereichen zurückzuführen (die selbst bei Vorhandensein von wegweisenden Gefahrenzonenplänen unter Missachtung der staatlichen Regulierung erfolgte; vgl. Aulitzky 1988: 124ff). Gerade Österreich, mit einem Hochgebirgsanteil von 2/3 der Gesamtlandesfläche und über 4.000 tätigen Wildbachgebieten (Gschwendtner 1966: 76f), sieht sich dieser Frage

der fehlgeleiteten Raumordnungspolitik immer häufiger gegenübergestellt. Allein aufgrund dieser mangelhaften staatlichen Regulierung und des wohl weit verbreiteten Vertrauens auf die helfende öffentliche Hand im Schadensfall (oder auf die Beherrschbarkeit der Natur?) wurde bspw. beim August-Hochwasser in Sölden im Ötztal im Jahre 1987 eine knappe Hundertschaft an zu über zwei Dritteln zum Neubaubestand der letzten Jahre im Ort zählenden Häusern im Keller- und Erdgeschossbereich überflutet und eingeschlammt (Kerschner 1995: 50, Muhar 1988: 191, Aulitzky 1988: 124). Ähnliches berichtet bspw. auch Petraschek (1989: 6f). Das letzte große Hochwasser der Ötztaler Ache aus dem Jahr 1960 schien aus dem Bewusstsein der Menschen bereits wieder verdrängt. Dort, wo aufgrund der Gefahrenzonenpläne der Wildbach- und Lawinerverbauung Siedlungsaktivitäten an Hangbereichen oder auf Schwemm- bzw. Schuttkegeln unterbunden werden, weicht man offensichtlich der Nachfrage rücksichtslos dankend frönend auf die Talsohle aus, „für die es bei gleicher Gefährdung keine konkreten Baubeschränkungen gibt“ (Muhar 1988: 193). Auf Ähnliches wies im Übrigen bereits Stiny (1910: 98) hin, der ebenfalls mahnte, dass aufgrund „zunehmender Volksdichte“ der Erlös aus Grundstücksverkäufen die Gemeinden derart lockt, dass selbst jahrhundertlang gemiedene und aufgrund der latenten Bedrohung nicht einmal landwirtschaftlich genutzte Flächen inmitten von Wildbachausläufen leichtsinnig unter Inkaufnahme der Gefahr der Bebauung und damit der potentiellen Zerstörungsgefahr preisgegeben werden (vgl. auch Aulitzky 1994: 129). Die empfundene Zunahme der anthropogenen Betroffenheit durch hydrologische Naturkatastrophen scheint daher nicht verwunderlich.

Doch nicht nur siedlungstechnische Eingriffe der letzten Jahre in das Prozesssystem Hochgebirge, speziell Wildbacheinzugsgebiete, entfesseln (empfundene) hydrologische Katastrophen größeren Ausmaßes. Die schädlichen Grundveränderungen dieses Ausschnittes der Erdoberfläche gehen bis ins 14. und 15. Jahrhundert zurück. Nach einigen verheerenden Bränden löste in dieser Zeit das Stein- das Holzhaus ab, für deren Ziegel- und Kalkherstellung ungeheure Mengen Holz benötigt wurden. Im Laufe des Spätmittelalters verschwanden so rund ein Drittel der natürlichen Bergwaldbestände in den Alpen und die natürliche Baumgrenze sank um 200 bis 300 m (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2002b: 45) – eine ungeheure Menge Wald, derer

die Wildbachsysteme bis heute im Hinblick auf Abfluss- und Hochwasserdämpfung schmerzlich ermangeln! Ein besonders bekanntes Beispiel einer rodungsbedingten Generierung von unheilbringender Wildbachtätigkeit in den Ostalpen ist dabei der Schesatobel bei Bludenz in Vorarlberg. „Vor 200 Jahren noch ein kleines Bächlein, das man leicht mit einem Schritt überqueren konnte“ (Aulitzky 1994: 109) und von dem kaum Verheerungen bekannt waren, züchtete der Mensch daraus durch Kahlschlag der Waldbestände im Einzugsgebiet im Jahre 1796 aufgrund vermögensrechtlicher Streitigkeiten zweier Gemeinden eines der berühmtesten Wildwasser Österreichs, das fortan begann immer tiefer schreitend und weiter in seine Flanken hineinschneidend sich seiner fluvioglazialen Feststoffe inklusive Bodenaufgaben im Einzugsgebiet im Zuge immer bedrohlicherer Fluten und Murgänge mit großer Regelmäßigkeit zu entledigen (seit 1802 etwa 40 Mio. m<sup>3</sup> Austrag, vgl. ebd.: 109f). Seit Ende der Eiszeit hatte der Waldbestand dies verhindert (die Stupidität gänzlich untermauernd wurde der aktive Schwemmkegel im Laufe des 20. Jahrhunderts schließlich mit 192 Einfamilienhäusern bebaut).

Dazu kommen spätestens seit den letzten Jahrzehnten, um nur noch einen Aspekt anzuführen, verstärkte touristische Aktivitäten, von denen hier nur ein Beispiel erlaubt sei, das mitunter direkt in den Wasser- und damit Feststoffhaushalt von Wildbächen eingreift: künstliche Beschneigungsanlagen. Das notwendige Wasser dazu wird häufig direkt (permanent fließenden) Wildbächen entnommen. Der dann in dieser Jahreszeit ohnehin schon geringe Feststoffaustrag wird dadurch erheblich beeinträchtigt: Die Lockersedimente bleiben zurück. Im folgenden Sommer sind die Feststoffherde des Gerinnes damit zumeist prall gefüllt; dazu kommen die ungeheuren Mengen zusätzlichen Schmelzwassers durch die tauenden Kunstschneefelder, was in Verbindung mit (im Sommer nicht unüblichen) Starkniederschlägen zumeist in – künstlich generierten – Katastrophenereignissen mündet.

Zu all diesen vom Menschen recht gegenständig unmittelbar gestaltfähigen Problematiken wird sich in Zukunft immer mehr noch der Aspekt des Klimawandels durch den anthropogen induzierten Treibhauseffekt gesellen. Eine Zunahme winterlicher Niederschläge mit all deren potenzierenden Auswirkungen auf das Hochwasser- und auch Murgeschehen (mehr zeitlich konzentrierter Niederschlag in Gebiete mit ohnehin mangelhaften Retentionsmöglichkeiten zur

vegetativen Ruhezeit sowie frühjährliche enge Kumulation der Schmelzereignisse durch steigende Temperaturen) gilt als sicher (Beierkuhnlein & Foken 2008: 86). Dabei wird durch die global zunehmende Temperatur auch die Frostgrenze in den Alpen um einige hundert Meter ansteigen, „mit der Konsequenz, daß im Winter der Niederschlag in den tieferen Lagen nicht mehr als Schnee, sondern als Regen fallen wird“ (Seidel 1998: 211), womit eine Zunahme der Hochwassersituationen im Winter abzusehen ist. Dazu kommen wohl noch vermehrte sommerliche Starkniederschläge.

Von besonderer Bedeutung hinsichtlich des Auftretens von Murgängen wird sich in diesem Zusammenhang – neben der angenommenen Zunahme bzw. Verstärkung sommerlicher Starkniederschläge – vor allem die von der humanen Spezies beschleunigte fortschreitende Permafrost- und Gletscherdegradation in den Alpen erweisen. Die Möglichkeit einer damit verbundenen Zunahme der Murganghäufigkeit und -stärke wird spätestens seit den beginnenden 1990er Jahren diskutiert und versucht zu quantifizieren (bereits Richter 1987 bspw. erwog zuvor im Zuge der Kausalforschung bezüglich der Katastrophenereignisse des Jahres 1987 schon die Möglichkeit der Beteiligung einer Klimamodifikation an den sich empfundenermaßen immer gravierender gestaltenden Auswirkungen hydrologisch bedingter Unwetterkatastrophen). Die Bedeutung einer solchen o.g. Entwicklung für das Muraufreten ist dabei nach Zimmermann (1990b: 100f) mittels verschiedener Zusammenhänge durchaus gegeben, denn:

Permafrost bewirkt im Hang eine deutliche Stabilisierung des Kornverbandes. Ein Wegfallen dieser Stütze hätte automatisch eine erhöhte Disposition zur Murinitiation zur Folge.

Dasselbe Resultat wäre durch das Abschmelzen kleinerer Gletscher bzw. Firnflächen zu erwarten, da das unter ihnen lagernde Material wenig verfestigt und damit instabil gelagert ist.

Da der Auftauprozess von der Oberfläche her einsetzt und in die Tiefe gehend fortschreitet, kann es in der nun leicht mobilen Auftauschicht zu einem Wasserstau über dem noch gefrorenen Untergrund kommen, deren Grenzschicht zudem leicht als Gleithorizont fungieren kann.

Generell murbegünstigend wirken sich zudem, wie schon teils angeklungen, Reduzierungen der Hochgebirgsvegetation durch Holzeinschlag, Überweidung und Wildverbiss sowie Monokulturanbau aus, deren Zunahme bis heute nicht vollständig Einhalt geboten wurde (Üblogger

1986: 22). Zudem sind weite Teile des Waldbestandes Österreichs durch Luftverschmutzung beschädigt und können ihre ereignisabschwächenden Rückhaltefunktionen nur noch eingeschränkt bis gar nicht mehr umsetzen (Aulitzky 1989: 7).

Kurzum: Gegen Naturgewalten an sich vermag der Mensch nur wenig bis gar nichts zu unternehmen. Bezüglich der hier thematisierten Prozesse der Hochwasser und Murgänge trägt er infolge suboptimaler Siedlungstätigkeit und teils unangepasster sowie klimaunfreundlicher Wirtschaftsweisen zum großen Teil jedoch selbst Schuld an seiner eigenen (vermehrten) schadhafte(n) Betroffenheit. Er scheint dabei zudem vergessen zu haben, dass nicht der intermediäre Zustand der Ruhe, den er aus anthropozentrischer Sicht als ‚normal‘ zu bezeichnen beliebt, jene Normalität auch tatsächlich repräsentiert. Das ereignisfreie Intervall wird stets nur eine Zwischenzeit der Ruhe inmitten der immanenten Prozesse der das Antlitz der Erde seit jeher formenden exogenen Dynamik sein.

„Murgänge sind ja die rücksichtslosen Vollstreckungsorgane des Gesetzes, daß die stolzen Berggipfel zertrümmert und ihre Reste weit über die Ebenen hinausgetragen werden müssen. Unleugbar weit größer als auf die Murtätigkeit ist die schädliche Einwirkung menschlicher Mißwirtschaft auf die echten Hochwasserbäche.“ (Stiny 1910: 103)

## 7. Literatur

- Aulitzky, H. (1984): Vorläufige, zweiteilige Wildbachklassifikation. – In: Wildbach- und Lawinenverbau, 48: 7-60; Wien.
- Aulitzky, H. (1985): Die naturräumliche Verteilung der Wildbachtypen und der Erosion in Österreich. – In: Allgemeine Forstzeitung 96, S. 338-341; Wien.
- Aulitzky, H. (1988): Sommerhochwässer 1987 – In: Tirol – Naturkatastrophen oder fehlende Vorbeugung? – In: Österreichische Wasserwirtschaft, 40: 122-128.
- Aulitzky, H. (1989): The debris flows of Austria. – In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 40: 6-13.
- Aulitzky, H. (1994): Musterbeispiele vermeidbarer Erosions-, Hochwasser- und Lawinenschäden. – In: Österreichische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Veröffentlichungen der Kommission für Humanökologie, 5 (Gefährdung und Schutz der Alpen): 105-147; Wien, Graz.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002a): Hochwasser – Naturereignis und Gefahr. Spektrum Wasser 1, 2., aktualisierte Auflage; München.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002b): Wildbäche – Faszination und Gefahr. – Spektrum Wasser, 3; München.
- Becht, M., Copien, C. & Frank, C. (2006): Abschlussbericht zum Projekt HANG. – online-Dokument ([http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/gefahren\\_im\\_alpenraum/doc/hang\\_kurz.pdf](http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/gefahren_im_alpenraum/doc/hang_kurz.pdf))
- Becht, M. (1991): Auswirkungen und Ursachen von Katastrophenhochwassern in kleinen, alpinen Einzugsgebieten. – Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl., 89: 49-61.
- Becht, M. (1995): Untersuchungen zur aktuellen Reliefentwicklung in alpinen Einzugsgebieten. – Münchener Geographische Abhandlungen, A 47.
- Becht, M. & Rieger, D. (1997a): Debris flows on alpine slopes (eastern Alps). – In: Géomorphologie: relief, processus, environnement, 1: 33-41; Paris.
- Becht, M. & Rieger, D. (1997b): Spatial and temporal distribution of debris flow occurrence on slopes in the Eastern Alps. – In: Chen, C. (Hrsg.): Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. – Proceedings of 1. International Conference. – 516-529; New York.
- Beierkuhnlein, C. & Foken, T. (2008): Klimawandel in Bayern. – Bayreuther Forum Ökologie, 113.
- Bunza, G. (1976): Systematik und Analyse alpiner Massenbewegungen. – In: Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, 11: 1-84.
- Costa, J.E. (1984): Physical geomorphology of debris flows. – In: Costa, J. E. & Fleisher, P. J. (Hrsg.): Developments and applications of geomorphology. – 269-317; Berlin.
- De Jong, C. (1997): Water, Bedload Dynamics and Extreme Events in Alpine Catchments. – Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung e.V. (Hrsg.): Deutsche IDNDR-Reihe, 8; Bonn.
- Dyck, S. & Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie; Berlin.
- Engel, H. (1990): Hochwasser. Begriff, Entstehung, Hochwasser am Rhein. – In: Beiträge zur Rheinkunde, 42: 5-27.
- Fiebinger, G. (1999): Geomorphologische Prozesse in Wildbach-Einzugsgebieten im Überblick. – Relief, Boden, Paläoklima, 14: 67-75.
- Fink, M.H. (1986): Hochwässer. – In: Österreichische Raumordnungskonferenz (Hrsg.): Raumordnung und Naturgefahren, 50: 24-29 (mit Vorbetrachtung S. 15-16); Wien.
- Fliri, F. (1975): Mensch und Naturkatastrophen in den Alpen. – In: Interpraevent, 1975 (2): 37-49; Klagenfurt.
- Fliri, F. (1998): Naturchronik von Tirol; Innsbruck.
- Fraefel, M. & Hegg, C. (2004): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2003. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 96: 103-109; Baden.

- Fraefel, M., Jeisy, M. & Hegg, C. (2005): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2004. – In: Wasser, Energie, Luft – Eau, énergie, air, 97: 69-74; Baden.
- Gschwendner, A. (1966): Die Wildbachschäden im Jahre 1965. – Österreichische Wasserwirtschaft, 18: 76-80.
- Güntschl, E. (1970): Hochwasserkatastrophen in Österreich seit 1945. – In: Österreichische Gesellschaft für Raumforschung und Raumplanung, 11: Hochwasserschutz und Raumordnung: 1-68; Wien.
- Gutknecht, D. (1994): Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 46: 50-57.
- Haas, F., Heckmann, T., Wichmann, V. & Becht, M. (2004): Change of fluvial transport rates after a high magnitude debris flow event in a drainage basin in the Northern Limestone Alps, Germany. – In: IAHS Publ., 228: 37-43; Wallingford.
- Haerberli, W. & Naef, F. (1988): Murgänge im Hochgebirge. Ereignisse 1987 im Puschlav und Obergoms. – Die Alpen, 64: 331-343.
- Haerberli, W., Rickenmann, D. & Zimmermann, T. (1991): Murgänge. – In: Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, 4 & Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie, 14: S. 77-88; Bern.
- Hagg, W. & Becht, M. (2000): Einflüsse von Niederschlag und Substrat auf die Auslösung von Hangmuren in Beispielgebieten der Ostalpen. – Zeitschrift für Geomorphologie, 123: 79-92.
- Hampel, R. (1968): Niederschlag und Abfluß in Wildbächen. – Österreichische Wasserwirtschaft, 20: 46-51.
- Hegg, C., Badoux, A., Bassi, A. & Schmid, F. (2001): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2000. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 93: 117-129; Baden. – (= Hegg et al. 2001a)
- Hegg, C., Badoux, A., Frick, E. & Schmid, F. (2002): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2001. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 94: 99-105; Baden.
- Hegg, C., Badoux, A., Graf, C. & Röthlisberger, G. (2000): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1999. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 92: 59-68; Baden.
- Hegg, C., Fraefel, M., Frick, E., Schmid, F. & Badoux, A. (2003): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2002. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 95: 63-70; Baden.
- Hegg, C., Rickenmann, D. & Forster, F. (2001): Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten. – Bulletin Angewandte Geologie, 6: 85-97. – (= Hegg et al. 2001b)
- Hilker, N., Badoux, A. & Hegg, C. (2007): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2006. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 99: 137-145; Baden. – (= Hilker et al. 2007b)
- Hilker, N., Badoux, A. & Hegg, C. (2008): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2007. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 100: 115-123; Baden.
- Hilker, N., Jeisy, M., Badoux, A. & Hegg, C. (2007): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2005. – In: Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 99: 31-41; Baden. – (= Hilker et al. 2007a)
- Januskovecz, A. (1989): Zeitungsberichterstattung über Naturkatastrophen. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur (Institut für forstliche Betriebswirtschaft und Forstwirtschaftspolitik); Wien.
- Jegličsch, F. (1976): Hochwasser, Muren, Rutschungen und Felsstürze in Österreich 1971-73. – Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 114.
- Karl, J. & Mangelsdorf, J. (1975): Die Wildbäche der Ostalpen. – In: Interpraevent, 1975 (1): 397-406; Klagenfurt.
- Karl, J. & Mangelsdorf, J. (1976): Die Wildbachtypen der Ostalpen. – Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, 11: 87-102; München.
- Kerschner, H. (1995): Naturereignisse – Naturgefahren – Hochwasser und Wildbäche im alpinen Lebensraum. – Geographische Rundschau, 47: 46-51.
- Kerschner, H. (1999): Muren als geomorphologische Phänomene. – Relief, Boden, Paläoklima, 14: 77-95.
- Kienholz, H. (1998): Wildbäche – ausgewählte Aspekte und ein Beispiel. – In: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Informationsberichte, 2/98: Das Wildbachsystem. Prozesse – Bewertung – Maßnahmen. Fachkolloquium. – 7-25; München.
- Kron, W. (2005): Hochwasser. – In: Münchener Rückversicherungsgesellschaft (Hrsg.): Wetterkatastrophen und Klimawandel. – 122-131; München.
- Kronfellner-Krauss, G. (1982): Über den Geschiebe- und Feststofftransport in Wildbächen. – Österreichische Wasserwirtschaft, 34: 12-21.
- Lambert, A. (1988): Hochwasser im Alpenraum. Pulsschläge der Erosion. – Geowissenschaften, 6: 206-211.
- Matznetter, J. (1958): Das alpine Elementarereignis – Wesen und Begriff. – Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Wien, 100 (I/II): 67-76.
- Muhar, A. (1988): Hochwasser-Schäden 1987 und Siedlungsentwicklung im Tiroler Ötztal. – Österreichische Wasserwirtschaft, 40: 188-194.
- Näf, D. & McArdell, B.W. (2004): Murgänge. – Die Alpen, 11: 48-51.
- Oberndorfer, S., Fuchs, S., Rickmann, D. & Andrecs, P. (2007): Vulnerabilitätsanalyse und monetäre Schadensbewertung von Wildbacheignissen in Österreich. – BFW-Bericht, 139; Wien.
- Ostrowski, M. & Leichtfuß, A. (1995): Entstehung von Hochwasser. – Darmstädter Wasserbau-Mitteilungen, 40: 23-34.
- Patt, H. (2001): Hochwasser-Handbuch; Berlin, Heidelberg.

- Penck, W. (1912): Naturgewalten im Hochgebirge; Stuttgart.
- Pestal, E. (1975): Die Kärntner Murkatastrophe und ihre Lehren für den Forstwegebau. – *Holzkurier*, 1975 (23): 1-4; Leopoldsdorf, Wien.
- Petraschek, A. (1989): Die Hochwasser 1868 und 1987. In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 81: 1-8; Baden.
- Plate, E., Kron, W. & Seiert, S. (1993): Beitrag der deutschen Wissenschaft zur „International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR)“ – Zusammenfassende Übersicht. – In: Plate, E., Clausen, L., Dehaar, U., Kleeberg, H.-B., Klein, G., Mattheß, G., Roth, R. & Schmincke, U. (Hrsg.): *Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung*. – Bericht des Wissenschaftlichen Beirats der DFG für das Deutsche Komitee für die „International Decade for Natural Disaster Reduction“ (IDNDR). – 1-71; Weinheim.
- Plate, E. (1996): Handhabung des Hochwasserrisikos. – *Geowissenschaften*, 14: 517-522.
- Richter, M. (1987): Die Starkregen und Massenumlagerungen des Juli-Unwetters 1987 im Tessin und Veltlin. – *Erdkunde*, 41: 261-274.
- Rickenmann, D. (1995): Beurteilung von Murgängen. – *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 48: 1104-1108.
- Rickenmann, D. (2001a): Zum Fließverhalten von Murgängen. – *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, 33: 161-169.
- Rickenmann, D. (2001b): Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung. – *Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*, 124: 51-77; Aachen.
- Rickenmann, D. (2002): Über Murgänge in den Alpen. – *Wasser und Boden*, 54 (4): 23-26.
- Rickenmann, D. (2005): Schlammlawinen. Die braune Flut. In: *Spektrum* (Hrsg.): *Entfesselte Elemente – der Mensch und die Natur*. – 196-201; Gütersloh, München.
- Rickenmann, D. & Zimmermann, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. – *Geomorphology*, 8: 175-189.
- Rieger, D. (1999): Bewertung der naturräumlichen Rahmenbedingungen für die Entstehung von Hangmuren – Möglichkeiten zur Modellierung des Murpotentials. – *Münchener Geographische Abhandlungen*, A 51.
- Rieger, D. & Becht, M. (1997): Untersuchungen zur räumlichen Verteilung von Muren an alpinen Hängen mit Hilfe eines GIS in Testgebieten der Ostalpen. – In: Blümel, W. D. (Hrsg.): *Beiträge zur Geomorphologie*. – *Stuttgarter Geographische Studien*, 126: 121-137.
- Röthlisberger, G. (1989): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1988. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 81: 17-24; Baden.
- Röthlisberger, G. (1990): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1989. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 82: 52-55; Baden.
- Röthlisberger, G. (1991a) Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1990. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 83: 65-70; Baden.
- Röthlisberger, G. (1991b): *Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz*. – *Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft*, 330; Birmensdorf.
- Röthlisberger, G. (1992): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1991. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 84: 37-41; Baden.
- Röthlisberger, G. (1993): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1992. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 85: 59-65; Baden.
- Röthlisberger, G. (1994): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1993. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 86: 1-8; Baden.
- Röthlisberger, G. (1995): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1994. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 87: 1-9; Baden.
- Röthlisberger, G. (1996): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1995. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 88: 13-22; Baden.
- Röthlisberger, G. (1997): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1996. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 89: 1-7; Baden.
- Röthlisberger, G. (1998): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1997. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 90: 17-24; Baden.
- Röthlisberger, G. (1999): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1998. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 91: 17-23; Baden.
- Rudolf, B. & Simmer, C. (2006): *Niederschlag, Starkregen und Hochwasser*. – In: WERFER, G. (Hrsg.): *Expedition Erde*. – 256-265; Bremen.
- Seidel, W. (1998): *Klimaänderungen: Ursache und Auswirkungen*. – In: Bayerischer Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): *Informationsberichte*, 2/1998: *Das Wildbachsystem. Prozesse – Bewertung – Maßnahmen*. *Fachkolloquium*. – 205-212; München.
- Stiný, J. (1910): *Die Muren. Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen*; Innsbruck.
- Takahashi, T. (1980): Evaluation of the factors relevant to the indication of debris flow. In: *Proceedings of the International Symposium on Landslides*, 3: 136-140; New Delhi.
- Üblogger, G. (1986): *Wildbäche und Muren*. – In: *Raumordnung und Naturgefahren*. – *ÖROK Schriftenreihe*, 50: 19-24; Wien.
- Uhlenbrook, S. & Leibundgut, C. (1997): *Abflussbildung bei Hochwasser*. – *Wasser und Boden*, 49 (9): 13-22.
- Uhlenbrook, S. & Steinbrich, A. (2002): *Einflussgrößen auf die Hochwasserbildung im regionalen Maßstab*. – *Wasser und Boden*, 54 (109): 8-15.

- Wetzel, K.-F. (1994): Abflussbildung während sommerlicher Niederschläge in einem kleinen Einzugsgebiet der nördlichen Kalkalpen. – *Erdkunde*, 48: 161-173.
- Wetzel, K.-F. (2001): Die Prozesse der Abflussbildung in kleinen Hangeinzugsgebieten der Nördlichen Kalkalpen bei unterschiedlichen Niederschlägen. – *Die Erde*, 132: 361-379.
- Wichmann, V. & Becht, M. (2004): Spatial modelling of debris flows in an alpine drainage basin. – In: *IAHS Publ.*, 288: 370-376; Wallingford.
- Wichmann, V., Mittelsten-Scheid, T. & Becht, M. (2002): Gefahrenpotential durch Muren: Möglichkeiten und Grenzen einer Quantifizierung. – In: Baumhauer, R. & Schütt, B. (Hrsg.): *AK Geomorphologie 2000 in Trier*, Beiträge der 26. Jahrestagung. – *Trierer Geographische Studien*, 25: 131-142.
- Wiesenegger, H. (1998): Hochwasserereignisse im Juli 1997 im Land Salzburg und Erfahrungen mit dem Hydrologischen Informationssystem zur Hochwasservorhersage HYDRIS. – *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 76: 10-22.
- Zeller, J. (1977): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1977. – Separatdruck aus: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 128 (12): 931-937.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1979): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1978. – Separatdruck aus: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 71: 103-108; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1980): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1979. In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air* 72, S. 127-134; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1981): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1980. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 73: 87-91; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1982): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1981. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 74: 123-127; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1983a): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1982. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 75: 115-120; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1983b): Unwetterschäden in der Schweiz von 1972 bis 1981. – In: *Wasser, Energie – Luft – eau, énergie, air*, 75: 149-160; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1984): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1983. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 76: 191-197; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1985): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1984. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 77: 65-70; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1986): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1985. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 78: 91-96; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1987): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1986. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 79: 265-270; Baden.
- Zeller, J. & Röthlisberger, G. (1988): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. – In: *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 80: 29-42; Baden.
- Zimmermann, M. (1990a): Debris flow 1987 in Switzerland: geomorphological and meteorological aspects. – *IAHS Publ.*, 194: 387-393; Wallingford.
- Zimmermann, M. (1990b): Periglaziale Murgänge. – *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Zürich*, 108: 89-107.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 129-141, 9 Abb.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Auswertung von Grundwasserstandsdaten auf dem Weinberg Campus der Martin-Luther-Universität Halle in Heide-Süd

Wolfgang Gossel, Ronny Lähne, Julia Rienäcker, Gunnar Krauss & Peter Wycisk\*

Gossel, W., Lähne, R., Rienäcker, J., Krauss, G. & Wycisk, P. (2011): Auswertung von Grundwasserstandsdaten auf dem Weinberg Campus der Martin-Luther-Universität Halle in Heide-Süd. [Analysis of groundwater level measurements at the Weinberg Campus, Martin Luther University Halle in Heide-Süd.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 129-141, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Die hydrodynamische Situation in der Stadt Halle ist wegen der Heterogenität der Aquiferstrukturen in Locker- und Festgesteinsgebieten sehr komplex. Im Nordwesten der Stadt wurde ein dichtes Netz von Beobachtungsmessstellen eingerichtet, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die Abgrenzung von Einzugsgebieten, zur Zeitreihenanalyse und für Kreuzkorrelationen zwischen Grundwasserstands- und Klimadaten genutzt wurde. Die Ergebnisse zeigen ein differenziertes Strömungsbild mit einem Abfluss zur Saale und indirektem unterirdischem Abfluss. Die Zeitreihenanalyse wurde anhand der stündlich gemessenen Grundwasserstände einer Messstelle durchgeführt und zeigt sowohl die Jahresperiode als auch kurzfristigere Perioden von 9 und 11 Tagen. Der Vergleich zwischen Grundwasserständen und der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz zeigt eine signifikante Zeitverzögerung von 9 Tagen und 60 Tagen zwischen beiden Ganmlinien, die als lokale Reaktionszeit und Reaktionszeit des Einzugsgebiets gedeutet werden können.

**Abstract:** The hydrodynamical situation of the town of Halle is very complex due to different aquifers both in hard rocks and unconsolidated rocks. To the northwest of the city a dense net of observation wells was established used in an investigation of groundwater levels for the outline of catchment areas, time series analysis and cross correlations between groundwater levels and climatic data to clarify their dependencies. The results show a differentiation in the catchment with a direct flow to the river Saale and an indirect subsurface discharge. The time series analysis of one well that was observed hourly shows annual periodicity as well as some subordinate short periods of 9 and 11 days. The comparison of groundwater levels and at cumulated climatic water balance outlines a time shift of 9 days and 60 days between both “hydrographs”, interpreted as the reaction of the local conditions and of the catchment.

**Schlüsselwörter:** Zeitreihenanalyse, Rotliegend-Grundwasserleiter, Kreuzkorrelation, Grundwasserströmungsverhältnisse

**Keywords:** Time series analysis, Rotliegend aquifer, cross-correlation, groundwater flow patterns

---

\* Anschriften der Autoren:

PD Dr. Wolfgang Gossel (wolfgang.gossel@geo.uni-halle.de), FG Hydro- und Umweltgeologie, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale);

Dipl.-Geol. Ronny Lähne (ronny.laehne@geo.uni-halle.de), FG Hydro- und Umweltgeologie, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale);

BSc Julia Rienäcker (julia.rienaecker@student.uni-halle.de), FG Hydro- und Umweltgeologie, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale);

Dr. Gunnar Krauss (gunnar.krauss@halle.de), Umweltamt der Stadt Halle (Saale), Untere Bodenschutzbehörde, Hansering 15, D-06108 Halle (Saale);

Prof. Dr. Peter Wycisk (peter.wycisk@geo.uni-halle.de), Institut für Geowissenschaften und Geographie, FG Hydro- und Umweltgeologie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale).

## 1. Einleitung

Die hydrogeologische Situation der Stadt Halle ist sehr komplex: Einerseits sind mehrere Lockergesteins- und Festgesteinsgrundwasserleiter zu unterscheiden, andererseits ist die heterogene Struktur dieser Grundwasserleiter durch die ungeklärten Strömungs- und Transportverhältnisse zwischen diesen Grundwasserleitern gekennzeichnet. Ein erster Ansatz für die Aufarbeitung der bekannten Daten bestand in der Erstellung von einem "Grundwasserbeobachtungs- und -schadstoffkataster" (G.E.O.S. 2000) im Auftrag der Stadt Halle. Es beinhaltete die Auswertung und Visualisierung von repräsentativen Bohrdaten in Form von Profilschnitten und die Auswahl von Grundwassermessstellen für ein regelmäßiges Grundwassermonitoring. In einem zweiten Schritt wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Umweltamt der Stadt Halle und der Martin-Luther-Universität ein erstes geologisches 3D Modell erstellt, das die Daten aus G.E.O.S. (2000) zur Grundlage nutzte und zusätzlich die geologische Karte (GLA Sachsen-Anhalt 1994) und ein digitales Höhenmodell im 40 m Raster basierend auf den Höhenlinien der topografischen Karte 1 : 10000 verwendete (Pohlert 2005, Schlesiener 2006). Im Rahmen von Qualifikationsarbeiten der Martin-Luther-Universität Halle, die in Zusammenarbeit mit dem Umweltamt der Stadt Halle durchgeführt wurden, wurden zusätzlich zum regelmäßigen Monitoring der Stadt Halle Messungen an Grundwassermessstellen im Umfeld des Heide-Campus der Universität durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war eine detaillierte Aufnahme der Grundwasserströmungsbedingungen im Bereich des südlichen Heide-Campus (s. Abb. 1). An der hier verlaufenden Halle-Störung grenzen eine Vielzahl Lockergesteins- und Festgesteinsgrundwasserleiter aneinander, so dass eine Klärung der hydrogeologischen Verhältnisse in diesem Bereich auch eine Erweiterung der Kenntnisse in anderen Teilen der Stadt mit sich bringt.

Die hydraulischen und hydrodynamischen Bedingungen sollten anhand von Wasserstandsmessungen des oberflächennahen Grundwassers aus verschiedenen Grundwasserleitern sowie Analysen von zeitlich hoch auflösenden Grundwasserganglinien untersucht werden. Im Vordergrund standen hierbei die Fragen nach statistisch signifikanten Zusammenhängen zwischen Klimadaten und Grundwasserdynamik, so z.B. auffällige Periodizitäten im Grundwassergang und zeitliche

Verzögerungen zwischen Klimatischer Wasserbilanz und Grundwasserspiegelreaktion.

Die genutzten Methoden (Fast-Fourier-Transformation (FFT), Kreuzkorrelationsanalyse, Periodenscanning) werden für die Analyse der vorhandenen klimatischen und hydrodynamischen Zeitreihen verwendet. Mit Hilfe der FFT und des Periodenscannings können Aussagen zur Periodizität innerhalb der Zeitreihen getroffen werden. Die analysierten Perioden werden anschließend bzgl. meteorologischer und hydrogeologischer Eigenschaften des Untersuchungsgebietes interpretiert. Durch die Kreuzkorrelation zwischen 2 Zeitreihen kann zudem der Zeitversatz der analysierten Zeitreihen ermittelt werden. Bei der Analyse der Kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der zugehörigen Grundwasserstandsganglinie kann zum einen die Phasenverschiebung zwischen Niederschlag und Grundwasserneubildung und zum anderen die Reaktionszeit des Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis ermittelt werden.

## 2. Geologische und hydrogeologische Grundlagen

Die geologischen Untersuchungen im Raum Halle haben eine lange Tradition, denn die Gründung der Stadt und ihr Name sind auf die Verfügbarkeit von salzhaltigen Quellen zurückzuführen. Diese Salzquellen lagen im Zentrum der Stadt (rund um den Marktplatz) und dienten seit etwa 4500 Jahren zur Siedesalzgewinnung (Kaufmann 1991).

In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Publikationen zur Beschreibung der Geologie der Stadt und des Umfeldes herausgegeben, z.B. Heckner et al. (1997). Von besonderem Interesse war dabei die heute als Halle-Störung (früher als Hallesche Marktplatzverwerfung) bezeichnete NW-SE verlaufende Störung, im Zuge derer auch die salzhaltigen Grundwässer an die Erdoberfläche traten. Die geologischen Einheiten von Sachsen-Anhalt werden in vier verschiedene Stockwerke unterteilt (Bachmann & Schwab 2008):

- Grundgebirgsstockwerk (Kambrium bis Karbon),
- Übergangsstockwerk (Karbon bis Perm),
- Tafelgebirgsstockwerk (Perm bis Kreide) und
- Lockergesteinsstockwerk (Tertiär und Quartär).

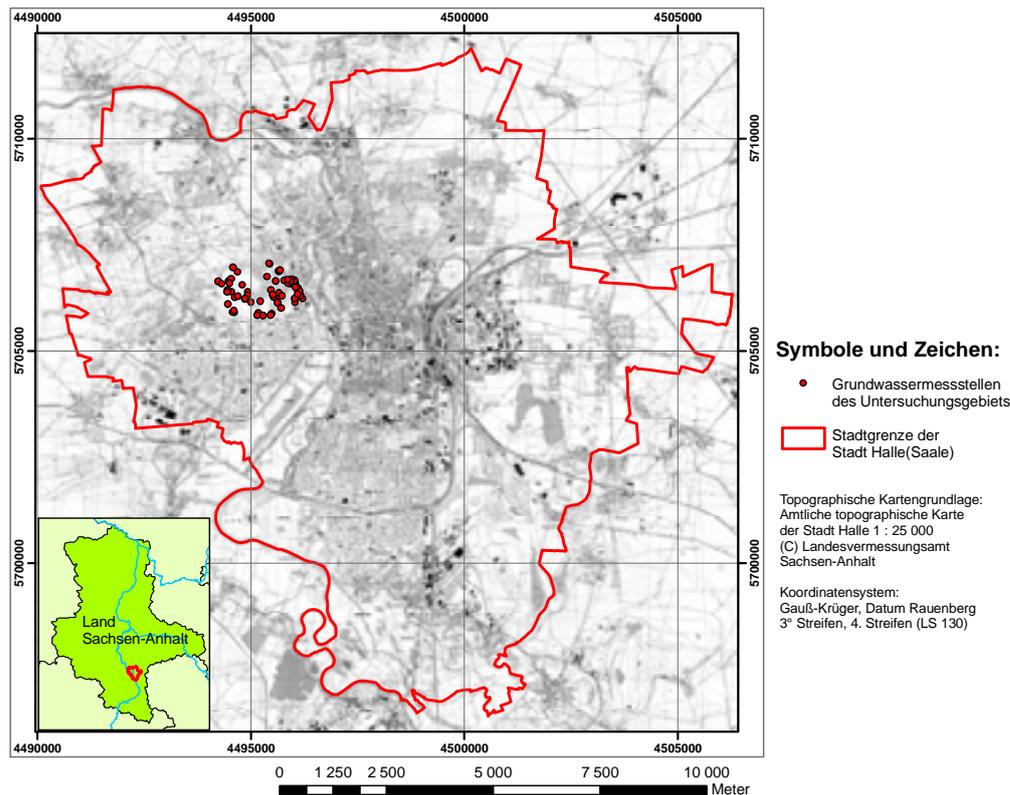


Abb. 1: Übersichtskarte des Gebiets.  
 Fig. 1: Overview map of the area.

Im Stadtgebiet von Halle sind vor allem die drei jüngeren Stockwerke flächendeckend ausgebildet.

Die Gliederung beginnt gemäß Katzung & Ehmke (1993) im Idealzustand mit dem Grundgebirgsstockwerk, bestehend aus unterschiedlich stark deformierten Gesteinen des Neoproterozoikums bis Unterkarbons, die zumeist aus Plutoniten und metamorphen Sedimenten aufgebaut sind.

Das Übergangs- oder Molassestockwerk entspricht den ungefalteten Lithologien des Jungpaläozoikums, welches das Grundgebirge an seiner Basis überlagert. Laut Bachmann & Schwab (2008) ist es zwischen dem Grundgebirgs- und dem Deckgebirgsstockwerk gelegen und überwiegend aus dem karbonischen und permischen Ablagerungsschutt der Varisziden aufgebaut. Diese sind mit den effusiven, rhyolithischen und andesitischen Gesteinen und Intrusionen granitischer Schmelzen verbunden (Bachmann & Schwab 2008).

Das vorletzte Stockwerk wird von Ablagerungen der Perioden Perm (Zechstein), Trias, Jura und Kreide gebildet (Bachmann & Schwab 2008). Auf Grund seiner vorherrschend flachen Lagerung wird es als Tafelgebirgsstockwerk bezeichnet.

Das oberste und jüngste Element der Gliederung wird als Lockergesteinsstockwerk bezeichnet (Katzung & Ehmke 1993). Es ist aus tertiären und quartären Sedimenten aufgebaut, zumeist als unverfestigtes, lockeres Deckgebirge ausgebildet und tektonisch nicht oder nur wenig deformiert (Bachmann & Schwab 2008). Den Hauptanteil bilden in Sachsen-Anhalt die Ablagerungen des Tertiärs (Knoth 1992). Einen Überblick über den Schichtaufbau im Stadtgebiet gibt Abb.2.

Im Untersuchungsgebiet sind alle Stockwerke mit Ausnahme des Grundgebirgsstockwerks in wechselnden Anteilen vorhanden. Die geologische Übersicht in Abb. 3 ist aus der geologischen Karte 1 : 50.000 (GLA Sachsen-Anhalt 1994) übernommen und zeigt, dass im Norden die permischen Schichten dominieren, die von Lockergesteinen des Tertiär und Quartär überdeckt sind.

Für die Hydraulik und Hydrodynamik im Untersuchungsgebiet spielen die Gesteine des Grundgebirgsstockwerks und des Übergangsstockwerks nur eine untergeordnete Rolle. Diese Festgesteine sind gering durchlässig und auch nicht durch Klüfte so stark zersetzt, dass sich daraus ein nennenswerter Kluftgrundwasserleiter ergeben würde.



qhL	Holozäne Auenlehme	su	Unterer Buntsandstein
qN	Niederterrasse (Warthe-Stadium)	z	Zechstein
teo	Mittel- und Obereozän	ro	Oberrotliegend
sm	Mittlerer Buntsandstein	ru	Unterrotliegend

Abb. 2: Ausschnitt des geologischen 3D Modells der Stadt Halle (Schlesier 2006).  
 Fig. 2: Clip of the geological 3D model of Halle town (Schlesier 2006).

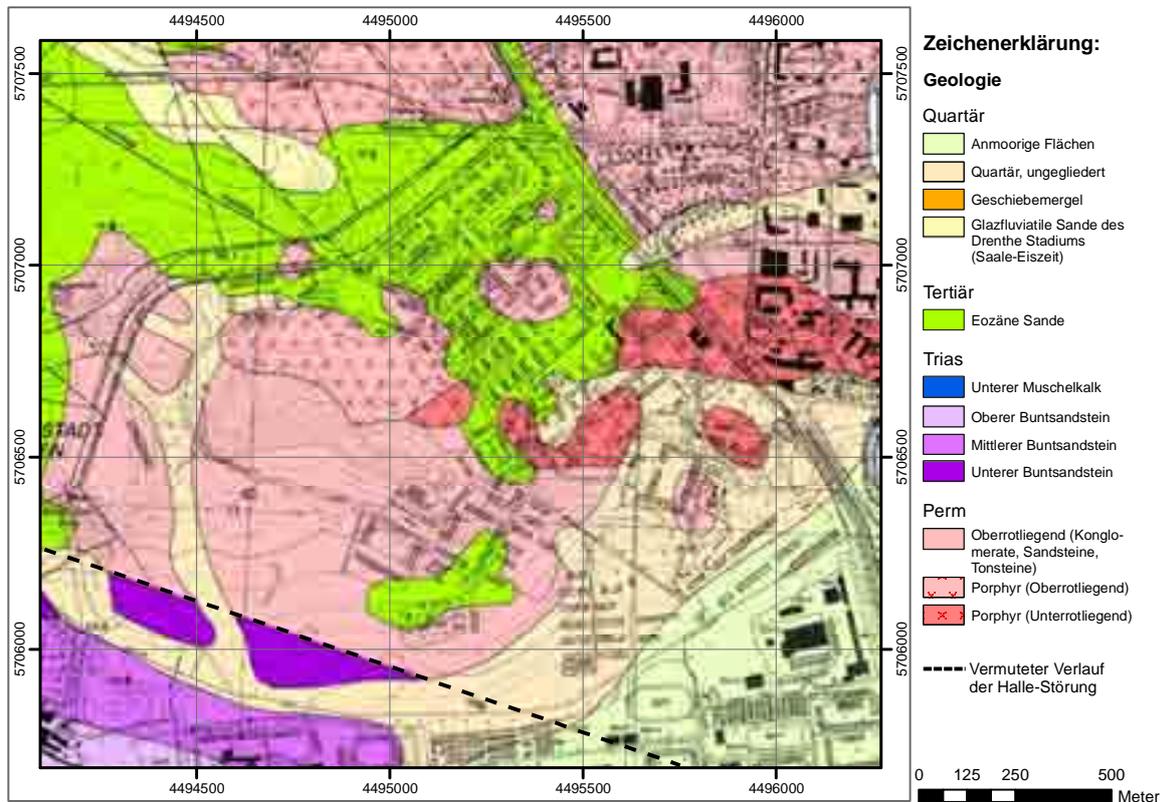


Abb. 3: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets auf Basis der geologischen Karte 1 : 50 000 (GLA Sachsen-Anhalt 1994).  
 Fig. 3: Geological map of the investigation area based on the geological map scale 1 : 50 000 (GLA Sachsen-Anhalt 1994).

Die Grundwasser leitenden Schichten des Rotliegenden sind nördlich der Halle-Störung verbreitet und umfassen die Unter- und Oberrotliegendablagerungen. Im Verbreitungsgebiet der Rotliegendkonglomerate und -vulkanite sind keine nutzbaren Grundwasservorkommen zu erwarten (Pretschold 1998). Ausschließlich im Rotliegendvulkanitkomplex herrscht eine geringe Kluftwasserführung (Jordan & Weder 1995). Auf Grund der geringen Wasserführung sowie des geringen Geschütztheitsgrades ist die hydrogeologische Bedeutung als gering einzuschätzen (Kater & Koch 2007).

Der Grundwasserleiter des Zechsteins tritt südlich bis südöstlich der Halle-Störung auf und ist gut wasserführend (Koch 2000). Die grundwasserleitenden Schichten (Platten- und Hauptdolomit) gehören vorrangig dem Leine- und Staßfurtzyklus an und bilden einen großräumigen, hydrodynamischen Komplex (Koch et al. 2006). Durchschnittlich weisen die Dolomite in Normallagerung 30 bis max. 65 m Mächtigkeit auf (Koch et al. 2006). Der Grundwasserdruckspiegel liegt bei 72 bis 74 m NHN, das entspricht etwa 25 m unter Geländeoberfläche (Koch 2000, Lauer et al. 1998) und zeigt damit deutlich gespannte Verhältnisse an. Die Zechsteinablagerungen sind vorwiegend in größeren Tiefen (> 400 m) verbreitet (Lauer et al. 1998).

Der Grundwasserleiter des Buntsandsteins ist der wirtschaftlich bedeutendste Aquifer des Festgesteinsbereichs im Raum Halle (Koch et al. 2006).

Im Hangenden des Zechsteins folgen die Schluffstein- bzw. Sandstein-/Schluffsteinfolgen des Unteren Buntsandsteins (Kater & Koch 2007). Dieser Schichtkomplex ist allgemein wenig wasserführend, da nur geringmächtige, klüftige Kalk- und Rogensteine eingeschaltet sind (Pretschold 1998).

Der Mittlere Buntsandstein bildet die wichtigsten Teilaquifere innerhalb der Trias (Kater & Koch 2007). Die gut klüftigen Sandstein-/Schluffsteinfolgen weisen im Halleschen Raum bei vollständiger Erhaltung bis zu 250 m Mächtigkeit auf und können in mehrere Grundwasserstockwerke gegliedert werden (Pretschold 1998). Nach Lauer et al. (1998) ermöglicht die Halle-Störung eine hydraulische Verbindung zwischen den einzelnen GWL-Stockwerken, lokal auch zum Unteren Buntsandstein und zum Zechstein. Dies hat eine z.T. starke Versalzung von Wässern des Unteren und Mittleren Buntsandsteins sowie des quartären Lockergesteinsgrundwasserleiters der Saaleaue zur Folge (Koch et al. 2006).

Es folgen die grundwasserhemmenden Schluff- und Tonmergelsteine des Oberen Buntsandsteins (Lauer et al. 1998). Die tonig ausgebildete Pelitröt-Folge trennt den Buntsandstein vom hangenden Grundwasserleiter des Muschelkalks ab (Kater & Koch 2007). Störungssysteme und Kluftzonen ermöglichen dennoch vereinzelt Verbindungen zum Muschelkalk-GWL (Lauer et al. 1998).

Die Kalksteine des Muschelkalks zählen zu den Kluftgrundwasserleitern und gelten nach Pretschold (1998) ebenfalls als gut wasserführend. Die ca. 140 m mächtigen Kalksteine des Unteren Muschelkalks (Wellenkalk) sind stark geklüftet und bilden einen der Hauptgrundwasserleiter im Raum Halle (Lauer et al. 1998). Die Wässer sind stark, vor allem durch  $\text{CaSO}_4$ , mineralisiert und gering geschützt (Kater & Koch 2007).

Als Resultat zahlreicher Flachbohrungen sind die wesentlichen hydrogeologischen Verbreitungsgebiete der Lockergesteinsgrundwasserleiter bekannt (Pretschold 1998). Als Lockergesteinsgrundwasserstockwerk werden die Grundwasserleiter des Tertiärs und Quartärs verstanden. Die hydrogeologischen Verhältnisse dieser Grundwasserleiter sind angesichts ihrer großflächigen Verbreitung sowie der oberflächennahen Lokalisierung sehr gut untersucht.

Die Auswertung der Schichtenverzeichnisse aller Messstellen sowie die Einsichtnahme in geologische und hydrogeologische Kartenwerke bestätigten die Vermutung, dass im Untersuchungsgebiet der Rotliegend-GWL und der quartäre Tal-GWL verbreitet sind. Obwohl diese von der hydrogeologischen Charakteristik zwei vollkommen verschiedene GWL-Typen darstellen, wird nicht von zwei gänzlich eigenständigen GWL ausgegangen.

### 3. Untersuchungsmethoden

Die hydrodynamischen Untersuchungen umfassen einerseits Messungen der Grundwasserstände in der Fläche und andererseits Messungen mit einer hohen zeitlichen Auflösung. Im Untersuchungsgebiet standen etwa 200 Grundwassermessstellen zur Verfügung, von denen ein großer Teil genutzt werden konnte (65), andere waren zur Schadenserfassung und -beobachtung an Altlasten sehr dicht gesetzt und in dieser sehr lokalen und großskaligen Auflösung wenig sinnvoll für die Erfassung des Strömungsverhaltens im Gebiet.

Die Daten wurden mit statistischen und geostatistischen Methoden ausgewertet. Hierfür wurden die Softwarepakete der Firmen SPSS (2008), Golden Software (2002) und ESRI (2008) eingesetzt.

Die Grundwasseroberflächen wurden zunächst über Messungen mit Licht- oder Akkustikloten an den zur Verfügung stehenden Grundwassermessstellen bestimmt. Die Verarbeitung der gemessenen Daten umfasste die Zuordnung der Messungen zu den Grundwasserleitern und die geostatistische Analyse und Interpolation.

Zur Analyse und Interpretation der zeitlich hoch auflösend gemessenen Grundwasserganglinie wurden die statistischen Methoden der Korrelation mit meteorologischen Daten und Zeitreihenanalysen eingesetzt. Dabei wurden neben der klassischen Periodizitätsanalyse nach dem Verfahren der Fast Fourier Transformation (FFT) auch das in Gossel (1999) beschriebene Periodenscanning eingesetzt. Hierbei werden nicht nur harmonische Bruchteile des gesamten Untersuchungszeitraums auf ihre Signifikanz getestet sondern die Periodizitäten mit einer beliebigen, vorher definierten Auflösung gescannt und die Kreuzkorrelationen zwischen synthetischen und gemessenen Ganglinien berechnet.

Für die Bewertung der Kreuzkorrelationen (z.B. zwischen Grundwasserstand und kumulierter Klimatischer Wasserbilanz) wurde auf eine Signifikanz von 95% getestet.

Die hydraulischen Durchlässigkeiten wurden durch Kurzzeit-Pumpversuche und Slug & Bail Tests ermittelt. Bei den Pumpversuchen, die im Rotliegenden angesetzt waren, betrug die Pumpzeit aufgrund der hohen Absenkungsraten bei sehr geringer Wasserförderung nur etwa 10 Minuten.

## 4. Datengrundlagen

An 65 Grundwassermessstellen wurden die Wasserstände des Grundwassers gemessen. Die Lage der Grundwasserbeobachtungsrohre ist Abb. 4 zu entnehmen. Innerhalb des Untersuchungsgebiets fanden mehrere Stichtagsmessungen statt (Rienäcker 2008, Böse 2008, Rumpf 2009), wobei jedoch hauptsächlich die Messwerte vom April 2010 zur Erstellung der Gleichpläne genutzt wurden.

Die hydraulische Durchlässigkeit des Rotliegenden wurde auf dem Campus an einer Grundwassermessstelle ermittelt.

Die Grundwasserstandsganglinie wurde an einer Messstelle im Rotliegenden automatisch aufgezeichnet. Beginn der stündlichen Messungen war am 29.02.04 und die Aufzeichnung erfolgt seitdem kontinuierlich. Für die folgenden Betrachtungen wurde der Zeitraum 29.02.04 bis 31.10.09 gewählt. Vom 06.01.09 bis 03.07.09 waren die Aufzeichnungen aus technischen Gründen unterbrochen.

Die meteorologischen Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst online und frei verfügbar von der Station Schkeuditz (ca. 20 km entfernt) zur Verfügung gestellt (DWD 2010). Die direkt neben der Grundwassermessstelle befindliche Wetterstation des Instituts für Geowissenschaften wurde erst im Jahr 2008 in Betrieb genommen, hat aber den Vorteil, dass die Parameter in 10 Minuten Abständen aufgezeichnet wurden. Dies ermöglichte die Verwendung dieser Daten lediglich für Korrelationsanalysen in kurzen Zeiträumen aber zeitlich mit einer sehr hohen Auflösung.

## 5. Ergebnisse

In Abb. 5 ist der resultierende Grundwassergleichplan dargestellt, der die vorzugsweise Fließrichtung von Nordwesten nach Südosten zeigt. Die Gradienten sind mit 0.015 – 0.02 recht hoch, bei einer hydraulischen Durchlässigkeit von  $2 \cdot 10^{-6}$  [m/s], die durch Slug & Bail Tests und Pumpversuche ermittelt wurde, ergeben sich jedoch trotz der hohen Gradienten geringe Fließgeschwindigkeiten von etwa  $3 \cdot 10^{-6}$  [m/s] bzw. 1 [cm/d]. Im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes werden die beiden konzentrischen Strukturen auf nutzungsbedingte Grundwasserentnahmen zurückgeführt.

Einzugsgebiete lassen sich aus dem Gleichplan nur schwer abgrenzen. Der Zustrom zur Grundwassermessstelle auf dem Campus ist etwa 1 km lang. Bei Festlegung einer Grundwasserscheide zwischen dem Abstrom zu den Brunnengalerien am Nordrand des Stadtteils Neustadt und dem Abstrom zur Saale und 1 km Abstrombreite kann die Einzugsgebietsgröße auf etwa 2 km<sup>2</sup> geschätzt werden. Leider kann insbesondere der nordwestliche Teil schlecht ermittelt werden, da hier keine Grundwassermessstellen existieren. Damit ist das Einzugsgebiet der Messstellen auf dem Universitäts-Campus als klein zu bezeichnen.

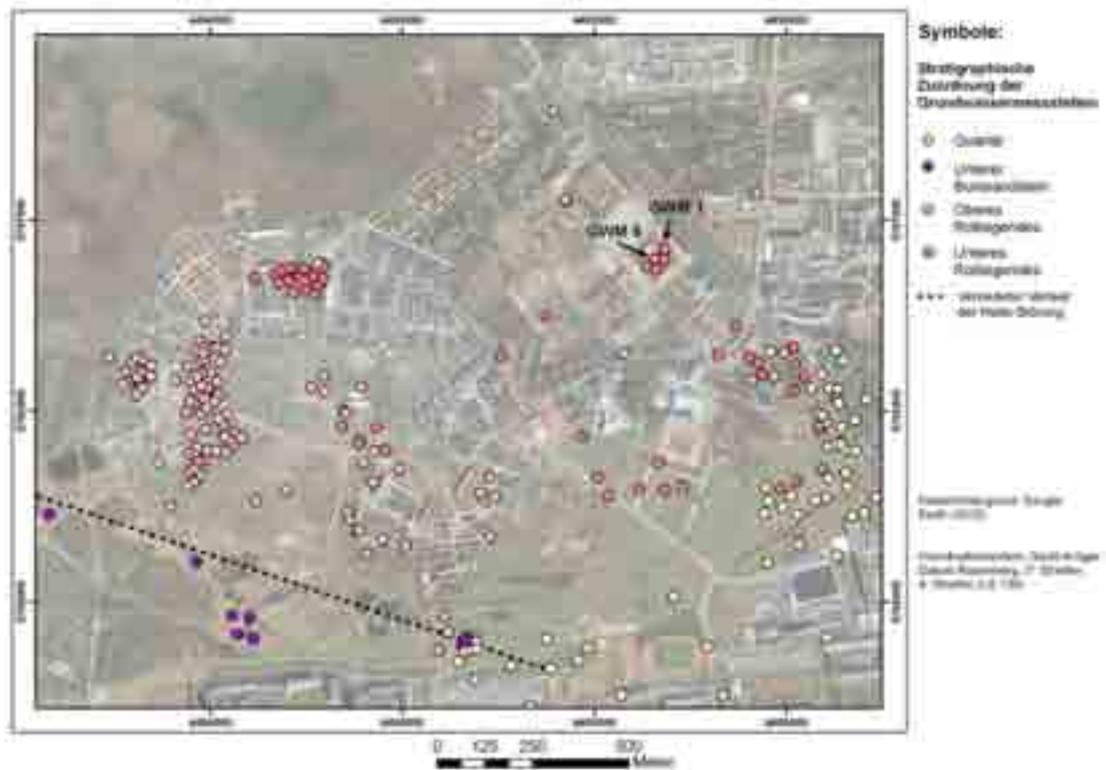


Abb. 4: Übersicht der Grundwassermessstellen mit stratigraphischer Zuordnung der Filterstrecken. Die Messstelle GWM 6 wurde für die Untersuchung der hydraulischen Leitfähigkeit des Rotliegenden genutzt. Stündliche Wasserstandmessungen wurden an GWM 1 automatisch aufgezeichnet.

Fig. 4: Overview of the groundwater observation wells with stratigraphy of the filters. The observation well GWM 6 was used for the investigation of the hydraulic conductivity of the Rotliegend. The hourly water level measurements were recorded automatically.

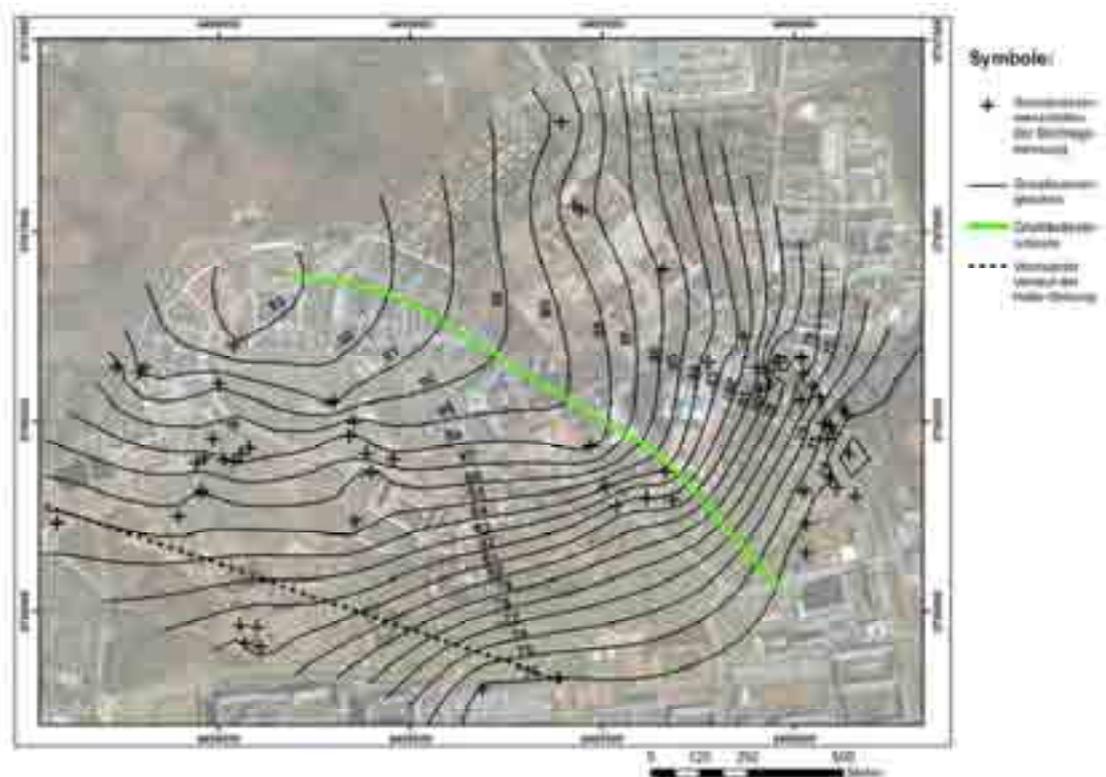


Abb. 5: Grundwassergleichenplan im Untersuchungsgebiet auf Grundlage der Stichtagsmessung im April 2010.

Fig. 5: Groundwater contours of the investigation area based on the measurement of April, 2010.

Eine Erstellung von Gleichenplänen verschiedener Grundwasserleiter ist in diesem Bereich der Stadt wenig sinnvoll, da die nördlichen Messstellen alle im Rotliegenden verfiltert sind und die Messstellen im Süden des Untersuchungsgebiets ihre Filterstrecken durch mehrere Meter mächtige und relativ gut durchlässige quartäre Schichten im oberflächennahen Bereich angesiedelt haben. Wie aus dem Grundwasser-gleichenplan zu entnehmen, entlasten die Grundwasserleiter des Rotliegenden im Süden und Osten des Untersuchungsgebiets. Die hydraulische Funktion der im südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets verlaufenden Halleschen Störung kann somit auf der vorliegenden Daten-grundlage nur als nicht hemmend angenommen werden.

### Statistische Auswertungen

An einer der Grundwassermessstellen auf dem Universitäts-Campus (GWM 1) wurde die in Abb. 8 dargestellte Ganglinie gemessen. Die stündlichen Aufzeichnungen wurden nur für die Zeitreihenanalyse genutzt. Für Kreuzkorrelationen mit Klimadaten wurden im Gesamtzeitraum tagesweise gemittelte und nur im Zeitraum

01.05.06 – 30.04.07 auch stündliche Daten ausgewertet. Die technisch bedingte Datenlücke 06.01.09 bis 03.07.09 wurde mit Hilfe statistischer Methoden geschlossen. Die Grundwasser-ganglinie zeigt einen leicht positiven Trend, der aber nicht signifikant ist.

Im Rahmen der statistischen Auswertungen der Zeitreihen wurden Kreuzkorrelationen, Fast-Fourier-Transformationen (FFT) und Periodenscannings (Gossel 1999) durchgeführt. Durch die FFT und das Periodenscanning können Periodizitäten innerhalb einer Zeitreihe analysiert werden, so konnte z.B. mit der FFT die Jahresperiodizität an der Messstelle GWM 1 dargestellt werden. Durch Kreuzkorrelationen werden standardmäßig zeitliche Versätze zwischen 2 verschiedenen Zeitreihen analysiert.

Die Periodizitätsanalyse ergab für die Methoden der FFT und des Periodenscannings leicht unterschiedliche Ergebnisse. Die FFT zeigte bei der Betrachtung des gesamten Beobachtungszeitraums nur eine signifikante Periode von etwa 365 Tagen. Auch die Auswahl eines kürzeren Zeitraums erbrachte keine zusätzlichen Ergebnisse wie aus dem Periodogramm in Abb. 6 zu entnehmen ist.

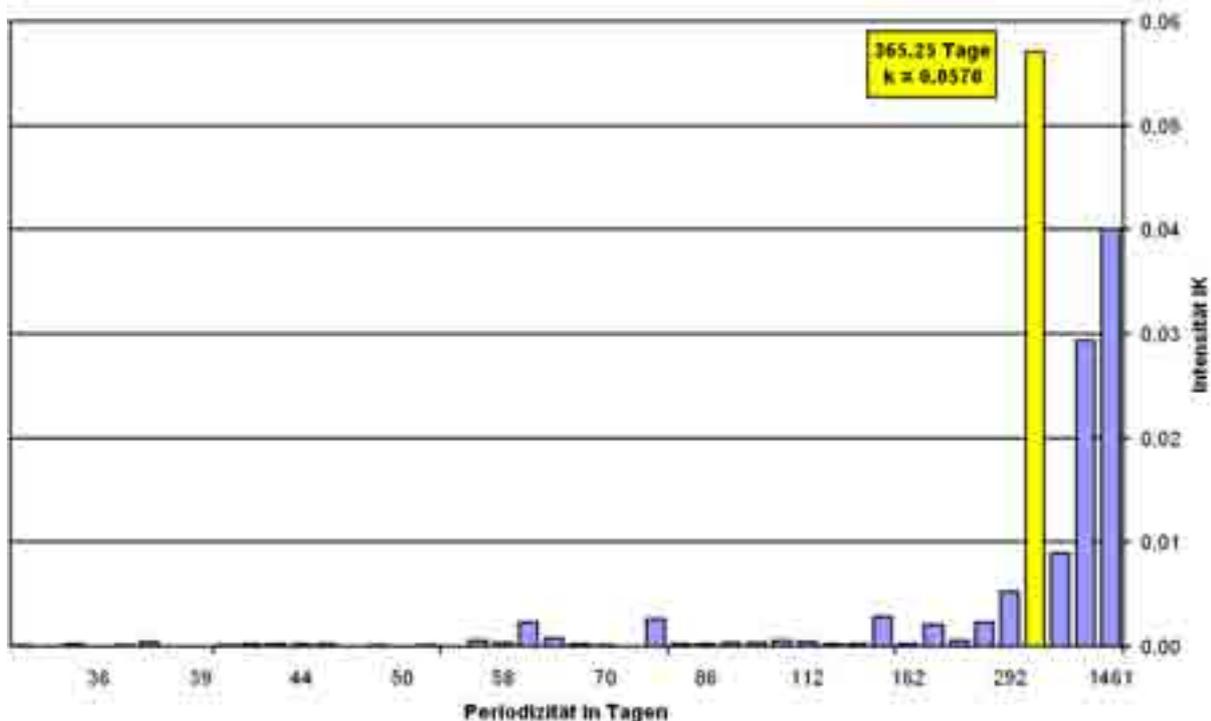


Abb. 6: Periodogramm der Grundwasserganglinie an GWM 1 für den Zeitraum 01.11.04 bis 31.10.08 (4 hydrologische Jahre).

Fig. 6: Periodogram of the groundwater hydrograph at GWM 1 for the time frame Nov 1, 2004 to Oct. 31, 2008 (4 hydrological years).

Mit Hilfe des Periodenscannings konnten demgegenüber mehrere kürzere Perioden im Grundwassergang festgestellt werden. Da bei dem Periodenscanning die Korrelationskoeffizienten der jeweiligen Periode berechnet werden (s. Abb. 7.), kann direkt die Signifikanz festge-

stellt werden. Bei einem 95 % Vertrauensintervall (Signifikanzgrenze 0.008) sind nicht nur die langen Perioden von 365 Tagen bzw. harmonischen Bruchteilen davon sondern auch vergleichsweise kurze Perioden von 9 und 11 Tagen zu verzeichnen.

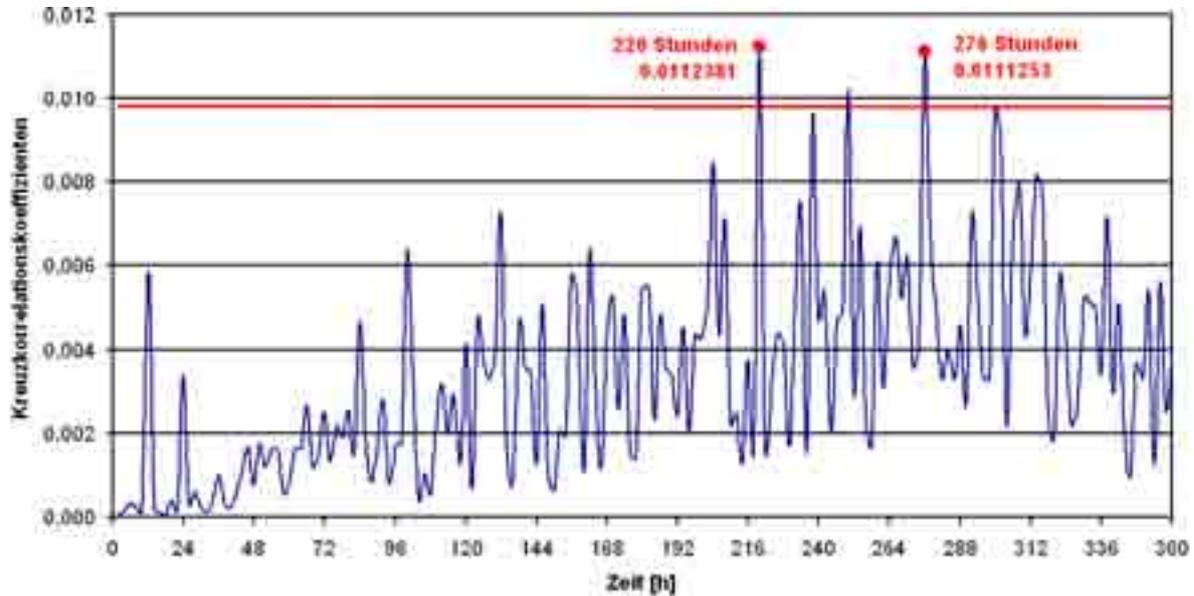


Abb. 7: Ergebnis des Periodenscans. Die Korrelationskoeffizienten auf der Ordinate geben einen Hinweis auf die Signifikanz (Grenze des 95% Vertrauensintervalls: 0.008).

Fig. 7: Result of the period scanning. The correlation coefficients on the y-axis indicate the significance (limit of the 95% confidence interval: 0.008).

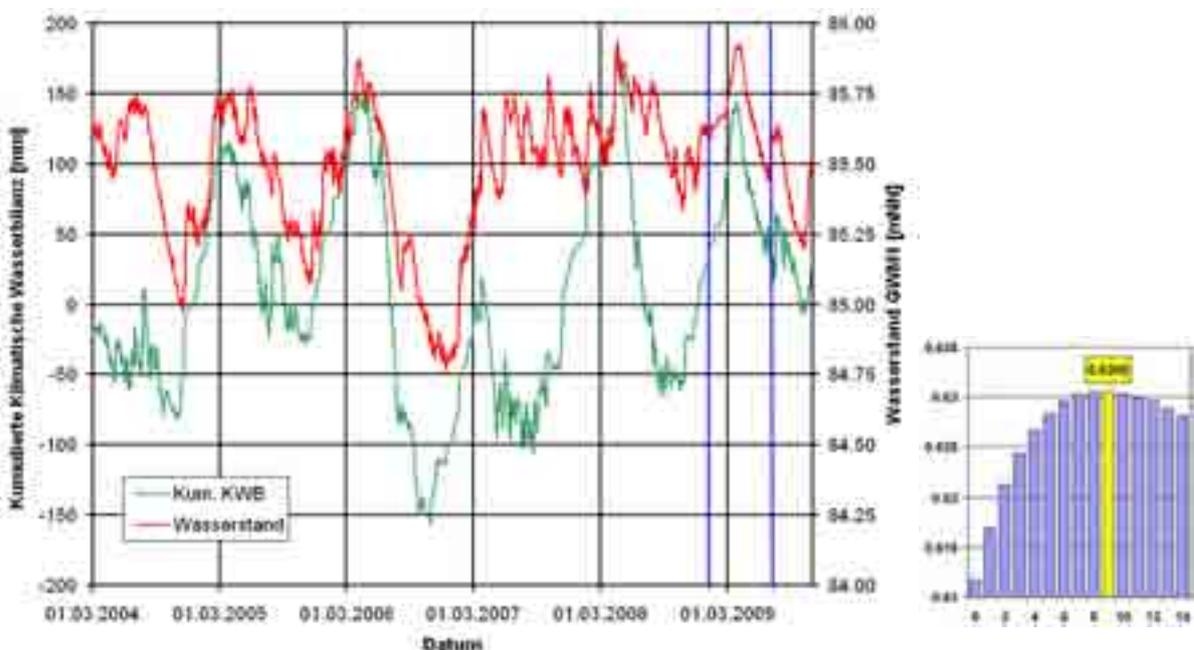


Abb. 8: Vergleich der Ganglinien der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserstände im Zeitraum 01.03.04 bis 31.10.09 auf Tagesbasis. A: Darstellung der Ganglinien; B: Kreuzkorrelogramm der beiden Ganglinien.

Fig. 8: Comparison of the hydrographs of the cumulated climatic water balance and the groundwater levels in the time frame Mar 1, 2004 to Oct 31, 2009 based on daily measurements. A: Visualization of the measurements, B: Cross-correlogram of both hydrographs.

Die kumulierte Klimatische Wasserbilanz (Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration) wurde nur in der trendbereinigten Form dargestellt, da aufgrund der dauerhaft negativen Jahreswasserbilanzen ein deutlich negativer Trend vorliegt, der den Vergleich unnötig verzerrt hätte.

Die Korrelationen zwischen der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserserganglinie auf Tagesbasis (Tagessummen der

Klimatischen Wasserbilanz bzw. Tagesmittelwerte des Grundwasserstandes) zeigen, dass bei einer Verschiebung um 9 Tage die Korrelation deutlich signifikant ist (s. Abb. 8b). Bei einer stündlichen Auflösung (s. Abb. 9a) zeigen sich zusätzlich hohe Korrelationen in dem betrachteten Zeitraum 01.05.06 bis 30.04.07 bei einer Zeitverschiebung von etwa 60 Stunden, allerdings liegt auch hier das Maximum bei 235 Stunden, also 9-10 Tagen (s. Abb. 9b).

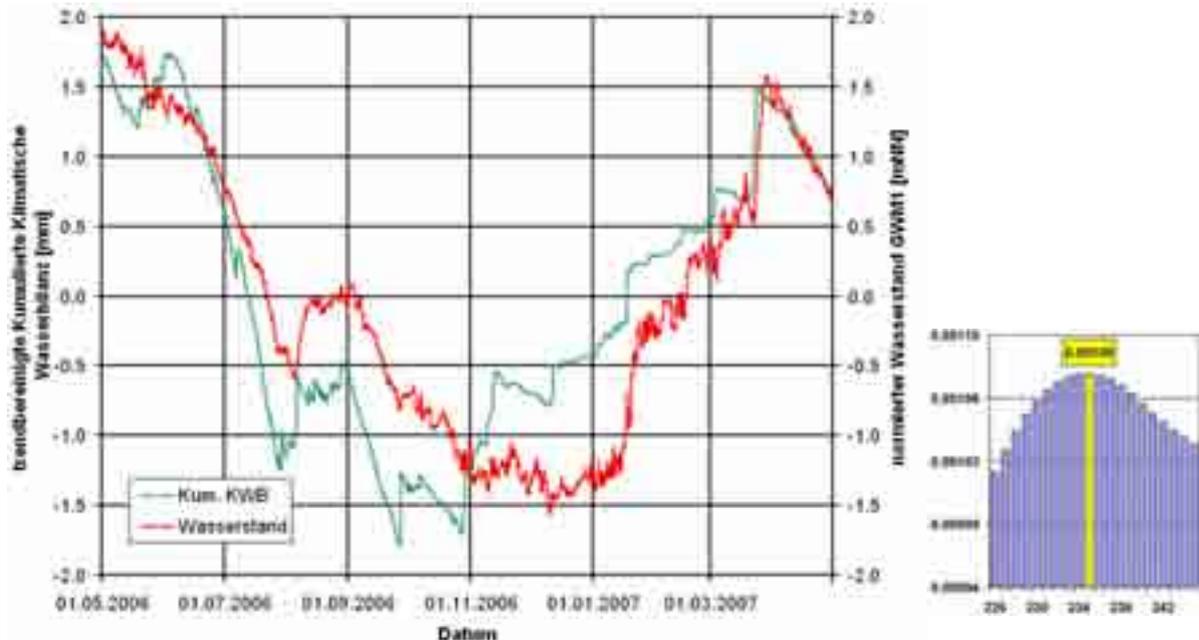


Abb. 9: Vergleich der Ganglinien der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserstände im Zeitraum 01.05.06 bis 30.04.07 auf Stundenbasis. A: Darstellung der Ganglinien; B: Kreuzkorrelogramm der beiden Ganglinien.

Fig. 9: Comparison of the hydrographs of the accumulated climatic water balance and the groundwater levels in the time frame May 1, 2006 to Apr 30, 2007 based on hourly measurements. A: Visualization of the measurements, B: Cross-correlogram of both hydrographs.

## 6. Interpretation und Diskussion

Die Stichtagsmessung fand am Ende eines sehr langen Winters mit einem außerordentlich hohen Schneefall statt. Dies führte zu sehr hohen Grundwasserständen, die z.T. etwa einen Meter höher lagen als in trockenen Zeiten. Ein Vergleich mit anderen hydrologischen Strömungszuständen ist deshalb nicht möglich, weil lediglich Stichtagsmessungen an einem Teil der Grundwassermessstellen durchgeführt wurden und immer am Ende des Frühjahrs mit ähnlichem Ergebnis wie dem vorliegenden oder Ende des Sommers bei minimalen Wasserständen gemessen wurde. Ein mittlerer Gleichplan kann auf diesem Wege nicht erzeugt werden. Der Vorteil des vorliegenden Plans liegt in der Nutzbarkeit für die Beein-

flussung von Bauten im Untersuchungsgebiet (Wohnhäuser und Universitätsgebäude). Flurnahe Schichtenwasserstände wurden durch die Messung wegen der Tiefenlage der Filterstrecken allerdings nicht erfasst.

Die Ergebnisse der Kreuzkorrelationen können so interpretiert werden, dass innerhalb von etwa 9 Tagen eine Reaktion des Grundwasserstandes auf die klimatischen Verhältnisse festgestellt werden kann. Diese Reaktionszeit weist auf die vergleichsweise träge Reaktion des Einzugsgebiets hin. Obwohl das Einzugsgebiet mit etwa 2 km<sup>2</sup> nicht groß ist und daher eine hohe Dynamik bei kurzen Reaktionszeiten aufweisen müsste, sind die sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten maßgeblich für eine verzögerte Reaktion. Zudem wirkt sich die von Wald geprägte

Landnutzung dämpfend und verzögernd auf die Dynamik aus.

Die kürzere Reaktionszeit von 60 Stunden, die sich aus der Kreuzkorrelation der stündlichen Messwerte ableiten lässt, zeigt eher die Reaktionszeit vor Ort an. Sie ist daher bei weitem nicht so ausgeprägt wie die Reaktion des Einzugsgebiets und lässt sich je nach gewähltem Zeitabschnitt besser oder schlechter statistisch nachweisen. Auch hier können die geringen hydraulischen Durchlässigkeiten zur Erklärung der starken Verzögerung herangezogen werden.

Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse sind besonders bei der Auswertung der kurzen Periodizitäten interessant. Während die 365-Tage-Periode trivial ist, lassen die kurzen Perioden von 9 bzw. 11 Tagen darauf schließen, dass eine Dominanz der meteorologischen Einflüsse zu verzeichnen ist. Diese weisen durch die Hoch- und Tiefdruckwechsel im Betrachtungszeitraum ebenfalls eine solche Periode auf, die auch signifikant ist. Leider besteht bei der Methode des Periodenscanning immer die Notwendigkeit, unabhängige Perioden zu finden, d.h. Perioden, die sich nicht als harmonischer Bruchteil einer sehr viel deutlicheren Periode darstellen lassen.

Die statistischen Methoden der Kreuzkorrelation und Zeitreihenanalyse sowie die geostatistischen Methoden erwiesen sich für hydraulische Untersuchungen als sehr effizient und können offensichtlich für eine Vielzahl von Aufgaben genutzt werden. Prognosen über Grundwasserstandsentwicklungen infolge von klimatischen Verhältnissen können gestellt werden. Bei besonderen klimatischen Verhältnissen können somit geeignete Maßnahmen in einem sinnvollen Zeitrahmen ergriffen werden. Numerische Grundwassermodellierungen sind daher für eine Reihe von Fragestellungen nicht notwendig.

Der Vergleich der Methoden zeigt die jeweiligen zu präferierenden Einsatzgebiete z.T. nur undeutlich an. Für die Vorhersage von Grundwasserständen aufgrund klimatischer Entwicklungen oder Ereignisse ist das Ergebnis der Kreuzkorrelationsanalyse sehr wesentlich. Es kann wahrscheinlich durch aktuelle Methoden wie z.B. genetic algorithms, adaptive oder selbst lernende Algorithmen noch verbessert werden.

Die eingesetzten Verfahren zur Zeitreihenanalyse sind sehr unterschiedlich zu bewerten. Die FFT ist zwar ein weit verbreitetes, gut bekanntes und effizientes Verfahren zur Zeitreihenanalyse, aber das Periodenscanning zeigt im vorliegenden Fall leichte Vorteile bei der Erkennung kurzer Periodizitäten. Die Ineffizienz des Berechnungs-

algorithmus wird durch aktuelle Rechnerarchitekturen wettgemacht, so dass der Erkenntnisgewinn die Nachteile überwiegt.

Bei den Interpolationsverfahren erwies sich die Standardmethode des Ordinary Kriging als völlig ausreichend für die Aufgabenstellung. Bei der Variogrammanalyse zeigte sich die Anpassung eines linearen Variogramms als beste Annäherung an das experimentelle Variogramm, was zu der Frage führt, ob evtl. ein Trend prägend für die Interpolation sein könnte. Ein Vergleich mit dem Ergebnis eines Universal Krigings erbrachte jedoch keine bemerkenswerten Differenzen.

## 7. Schlussfolgerungen

Die Beobachtung der Grundwasserstände in einem kleinen Festgesteinseinzugsgebiet ergibt sehr wesentliche Erkenntnisse insbesondere über die Prozesse der Grundwasserneubildung. Während die oberirdische Abflussbildung aus vielen Einzugsgebieten deutschlandweit mittlerweile gut abgeschätzt und in Modellen abgebildet werden kann (u.a. Dietrich et al. 2009, Luce et al. 2006), sind die Prozesse beim Grundwasser gerade in wenig ergiebigen und daher für die Trinkwasserversorgung unbedeutenden Festgesteinsgebieten wenig untersucht worden. Die hohe zeitliche Auflösung ist grundsätzlich gerade in kleinen Einzugsgebieten notwendig. Aufgrund der hydraulischen Durchlässigkeiten des Gesteins ergeben sich jedoch offensichtlich deutliche Unterschiede. Während die Reaktionszeiten in Karstgrundwasserleitern bei nur wenigen Stunden liegen (u.a. Sauter et al. 2006), sind es im vorliegenden Fall mehrere Tage. Die Messintervalle müssen (oder können) also den mehrjährigen Untersuchungen zufolge wesentlich verlängert werden, wenn sich die Einflüsse nicht wesentlich verändern. Zudem bieten die Kreuzkorrelationen mit den klimatischen Daten einen guten Anhaltspunkt für die zu erwartenden Grundwasserstände, wenn sie einmal für einen längeren Zeitraum detailliert aufgenommen wurden.

Die angewandten statistischen und geostatistischen Methoden eignen sich für eine Reihe von Fragestellungen, die weit über den als besonders wichtig angesehenen höchsten gemessenen Grundwasserstand hinausgehen. Sie müssen jedoch der Fragestellung entsprechend eingesetzt werden. Die Nutzung neuer Entwicklungen in der Informationstechnologie wird auch die Effizienz bei der Prognose und die Anzahl der Messparameter verringern können. Entsprechende weitere

Forschungsansätze sind in Planung. Selbstverständlich müssen dabei die der statistischen Betrachtung immanenten Beschränkungen der Aussagefähigkeit beachtet werden, z.B. dass bei gravierenden Eingriffen in potentielle Prozessparameter die statistischen Charakteristika ungültig werden, da sie auf einer Black-Box-Modellierung ohne Abbildung des Systemzusammenhangs aufbauen.

Bisher konnte mit den genutzten Methoden nicht geklärt werden, welche hydraulische Funktion die Hallesche Störung hat. Dies wird in Zukunft durch eine Erweiterung des Untersuchungsgebiets und durch häufigere Messungen im südlich anschließenden Stadtteil Neustadt mit weiteren Arbeiten verfolgt. Des Weiteren sind numerische Bodenwasserhaushaltsmodelle ange-dacht, um die erhaltenen Ergebnisse anschließend vergleichen und auswerten zu können.

## 8. Literatur

- Bachmann, G. H. & Schwab, M. (2008): Regionalgeologische Stellung. – Bachmann, G. H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M.: Geologie von Sachsen-Anhalt. – 689 S.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Blume, A. (2010): Oberflächennahe, geothermische Potentialkartierung für das Stadtgebiet Halle (Saale) auf Basis des geologischen 3D-Modells. – Unveröffentlichte Diplomkartierung, Martin-Luther-Universität. – 61 S.; Halle (Saale).
- Böse, N. (2008): Stichtagsmessungen ausgewählter Grundwassermessstellen in Halle (Saale). – Unveröffentlichte Projektarbeit, Martin-Luther-Universität – 12 S.; Halle (Saale).
- Dietrich, J., Schumann, A., Pfütznern, B., Walther, J., Wang, Y., Denhard, M. & Büttner, U. (2009): Ensemblevorhersagen im operationellen Hochwassermanagement. – HW, 53 (3): 140-145.
- DIN 38 402, Teil 13 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Allgemeine Angaben (Gruppe A) – Probenahme aus Grundwasserleitern (A 13). – Normenausschuß Wasserwesen (NAW), Deutsches Institut für Normung, Dezember 1985. – 14 S.
- DWD (2010): Wetterdaten der Station Schkeuditz.-  
[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesk-top?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocument-Path=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Um-welt%2FKlimadaten%2FKlDaten\\_\\_kostenfrei%2Fausgabe\\_tageswerte\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesk-top?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocument-Path=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Um-welt%2FKlimadaten%2FKlDaten__kostenfrei%2Fausgabe_tageswerte__node.html%3F__nnn%3Dtrue), zuletzt abgerufen 10.06.2010
- ESRI (2008): Using ArcGIS Geostatistical Analyst.- ESRI Press. – 300 S; Redlands, California.
- G.E.O.S. (1999): Grundwasserschadstoffbelastungskataster des Stadtgebietes Halle. – G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH; Freiberg. – (Unveröffentlicht)
- GLA Sachsen-Anhalt (1994): Geologische Karte Halle und Umgebung 1 : 50 000; Halle (Saale).
- Gossel, W. (1999): Hydrogeologie und Grundwasserhaushalt ausgewählter anthropogen wenig beeinflusster Grundwassereinzugsgebiete in Berlin. – Berliner geowiss. Abh. (A) 199: 170 S.; Berlin.
- Golden Software (2002): Surfer 8 User's Guide – Golden Software. – 640 S; Golden, Colorado.
- Jordan, H. & Weder, H.-J. (1988): Hydrogeologie. – Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1. Aufl. – 444 S.; Leipzig
- Heckner, J., Herold, U. & Strobel, G. (1997): Geologisch-ingenieurgeologische Beobachtungen im Nahbereich der Halleschen Störung / Stadt Halle (Saale). – Mitt. Geol. Sachsen-Anhalt, 3: 89-107; Halle (Saale).
- Kater, R. & Koch, T. (2007): Sachsen-Anhalts verdeckte Ströme – Das Grundwasser im Spannungsfeld von Wasserwirtschaft, Industrie und Bergbau in Vergangenheit und Gegenwart. – Mitt. Geol. Bergwesen Sachsen-Anhalt, 13 (1): 135 S.; Halle (Saale).
- Katzung, G. & Ehmke, G. (1993): Das Prätertiär Ostdeutschlands. Strukturstockwerke und ihre regionale Gliederung. – 193 S.; Köln (Verlag Sven von Loga).
- Kaufmann, D. (1991): Ein Blick in die Geschichte. – Die Dölauer Heide, Waldidyll in Großstadtnähe – 85-93; Halle (Saale). – (Magistrat der Stadt Halle)
- Knoth, W. (1992): Geologische Verhältnisse. – Geologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt 1:400.000 mit Erläuterungen, Landesamt f. Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt; Halle (Saale).
- Koch, T. (2000): Der Wiederaufschluss des Gutjahrbrunnens am Hallmarkt in Halle (Saale). – Hallesches Jahrb. Geowiss., B 22: 141-150; Halle (Saale).
- Koch, T., Fischer, I., Kater, R. & Papke, W. (2006): Salzgewinnung in Halle und ihre hydrogeologische Rahmen. – Mitt. Geol. Sachsen-Anhalt, 10: 19-29; Halle (Saale).
- Lauer, D., Lauer, M. & Zimmermann, G. (1998): Die Grundwasserabsenkung im Stadtgebiet Halle-Neustadt – geologische, hydrologische und technische Bedingungen. – Hallesches Jb. Geowiss., B, Beih. 4: 79-97; Halle (Saale).
- Luce, A., Haag, I. & Bremicker, M. (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. – HW 50 (2): 58-66.
- Pohlert, M. (2005): Digitale 3D-Kartierung der Stadt Halle/Saale. Voraussetzungen und strukturelles

- Konzept eines GIS-basierten Rauminformationssystems. – Unveröffentlichte Diplomkartierung, Martin-Luther-Universität. – 73 S.; Halle (Saale).
- Pretschold, H.-H. (1998): Weiterentwicklung der hydrogeologischen Modellvorstellungen im Stadtgebiet Halle mittels umweltgeologischer Untersuchungsergebnisse der Bohrungen Hy Hal 1-4/94. – Hallesches Jb. Geowiss., B, Beih. 4: 35-48; Halle (Saale).
- Preuß. Geol. Landesanstalt (Hrsg.) (1922): Geologische Karte Halle (Nord) an der Saale, Maßstab 1 : 25.000, Messtischblatt Nr. 4437, 2. Auflage; Berlin.
- Rienäcker, J. (2009): Grundwasserdynamik im Gebiet Heide-Süd (Sachsen-Anhalt). – Unveröffentlichte BSc-Arbeit, Martin-Luther-Universität. – 66 S.; Halle (Saale).
- Rumpf, D. (2009): Grundwasserdynamik im Gebiet Heide-Nord, Halle (Saale). – Unveröffentlichte BSc-Arbeit, Martin-Luther-Universität. – 36 S.; Halle (Saale).
- Sauter, M., Kovács, A., Geyer, T. & Teutsch, G. (2006): Modellierung der Hydraulik von Karstgrundwasserleitern – Eine Übersicht. – Grundwasser, 11 (3): 143-156; Berlin, Heidelberg.
- Schlesier, D. (2006): Geologische 3D-Kartierung des Stadtgebietes Halle (Saale). Multimediale Umsetzung und wissenschaftliche Visualisierung geologischer Daten. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Diplomkartierung, Martin-Luther-Universität. – 105 S.; Halle (Saale).
- SPSS (2010): SPSS 18.0 Statistics Base User's Guide. – [support.spss.com/ProductsExt/SPSS/ Documentation/SPSSforWindows/index.html](http://support.spss.com/ProductsExt/SPSS/Documentation/SPSSforWindows/index.html) (zuletzt abgerufen 10.06.2010), 640 S; Chicago.



Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 143-158, 5 Abb., 4 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Methoden und Ergebnisse einer Gliederung des Landes Sachsen-Anhalt in hydrologische Regionen

Tim G. Hoffmann, Dietmar Mehl & Christiana Mühlner\*

Hoffmann, T. G., Mehl, D. & Mühlner, Chr. (2011): Methode und Ergebnis einer Gliederung des Landes Sachsen-Anhalt in hydrologische Regionen. [Method and result of a classification of the State of Saxony-Anhalt in hydrological regions.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 143-158, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** In Fortsetzung vorangegangener, naturräumlicher Gliederungen des Landes-Sachsen-Anhalts wird mit dem objektiven Verfahren einer multivariaten Clusteranalyse eine Unterteilung des Bundeslandes in hydrologische Regionen vorgenommen. Basis der Unterteilung sind die Oberflächenwasserkörper entsprechend EU-Wasser-Rahmenrichtlinie und modellierte Komponenten des Wasserhaushaltes. Neben einer kurzen Erläuterung des Prinzips der Clusteranalyse wird die Vorgehensweise und Parameterwahl zur Erzeugung der Gliederung dargestellt. Einer anschließenden Betrachtung der Güte des Verfahrens folgt eine Auswertung nach Abflussregimen, die aus gemessenen Abflusszeitreihen der Pegel in den Regionen berechnet wurden. Nicht zuletzt werden die signifikanten Haupteigenschaften des Wasserhaushaltes für die hydrologischen Regionen übersichtlich beschrieben und verglichen.

**Abstract:** In continuation of former geographical classifications of the natural landscapes of Saxony-Anhalt a multivariate cluster analysis was performed as an objective method for the classification of the federal state into hydrological regions. The surface water bodies specified in the European Water Framework Directive and their modeled components of water balance were the basis of this division. The approach and parameter choice for the hydrological classification and a short explanation of the principles of the cluster analysis are given. Furthermore, the quality of the procedure was validated and runoff regimes were calculated from measured runoff time series of the gauging stations in the regions. Finally, significant main properties of the water balance are described clearly and compared to the hydrological regions.

**Schlüsselwörter:** Hydrologie, Abflussdynamik, Abflussregime, hydrologische Regionen, Clusteranalyse, Sachsen-Anhalt

**Keywords:** hydrology, runoff dynamics, flow regime, hydrologic regions, cluster analysis, Saxony-Anhalt

---

\* Anschriften der Autoren:

Dr. rer. nat. Tim G. Hoffmann (postmaster@institut-biota.de), biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, Nebelring 15, D-18246 Bützow;

Dr. rer. nat. Dr. agr. Dietmar Mehl (postmaster@institut-biota.de), biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, Nebelring 15, D-18246 Bützow;

Dipl.-Geogr. Christiana Mühlner (Poststelle@lhw.mlu.sachsen-anhalt.de), Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Willi-Brundert-Straße 14, D-06132 Halle (Saale).

## 1. Einleitung

Naturraum- bzw. Landschaftsgliederungen sind dem allgemeinen Zweck bestimmt, geographische Muster oder Strukturen von Landschaften ordnend und Areal abgrenzend zu systematisieren. Eine einzelne Landschaft bildet dabei ein einmaliges geographisches Individuum, das durch sein Inventar, durch den Kontrast, die Funktion und die Anordnung des Inventars, durch eine charakteristische Struktur und ein gleiches Wirkungsgefüge geprägt ist (Stüdemann 2008). Landschaften stellen eine chorische Verflechtung der topischen Grundbausteine dar; ihre Größe ist eine Frage des Betrachtungsmaßstabes und der charakteristischen Raum-Zeit-Struktur (Neef 1967), womit auch die Frage nach der Grenze einer Landschaft und damit des Überganges zu einer benachbarten Landschaft bestimmt ist.

Geographisch bzw. landschaftsökologisch orientierte Landschaftsgliederungen streben an, die landschaftliche Komplexität sachgerecht zu erfassen. Für Deutschland war es zunächst das „Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands“ (Meynen et al. 1962), das für einen solchen Anspruch steht. In den letzten Jahrzehnten sind in vielen Regionen und insbesondere auf der Ebene von Bundesländern neuere und räumlich detailliertere Gliederungen hinzugekommen. Grundsätzlich steht bei der großmaßstäblichen, landschaftsökologischen Erkundung die Analyse der Oberflächengestaltung im Vordergrund (Haase 1967). Das Relief wird dabei zum Ausgangspunkt einer physiognomisch orientierten, räumlichen Gliederung, so dass sich vor allem eine Betrachtung in morphogenetischer Hinsicht anbietet (Marcinek 1975).

Für praktische Fragen interessiert indes häufig nicht die landschaftliche Komplexität; vielmehr stehen angewandte Fragen im Vordergrund, die mit gesellschaftlichen Bedürfnissen oder Entwicklungen zusammenhängen (Mannsfeld 1984) und die stärker einzeldisziplinärer Natur sind. Solche und aktuelle Fragestellungen bilden beispielsweise Aufgaben des Gewässerschutzes, zumal vor dem gesetzlichen Hintergrund der im Jahr 2000 in Kraft getretenen Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), die erhöhte Anforderungen an wasserwirtschaftliches Planen und Handeln stellt.

Das Ziel der WRRL ist entsprechend Artikel 1 die Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Schutz der Binnenoberflächengewässer, der Übergangsgewässer, der Küstengewässer und des Grundwassers zwecks

- Vermeidung einer weiteren Verschlechterung sowie Schutz und Verbesserung des Zustands der aquatischen Ökosysteme und der direkt von ihnen abhängenden Landökosysteme und Feuchtgebiete im Hinblick auf deren Wasserhaushalt,
- Förderung einer nachhaltigen Wassernutzung auf der Grundlage eines langfristigen Schutzes der vorhandenen Ressourcen,
- Anstrebens eines stärkeren Schutzes und einer Verbesserung der aquatischen Umwelt, unter anderem durch spezifische Maßnahmen zur schrittweisen Reduzierung von Einleitungen, Emissionen und Verlusten von prioritären Stoffen und durch die Beendigung oder schrittweise Einstellung von Einleitungen, Emissionen und Verlusten von prioritär gefährlichen Stoffen;
- Sicherstellung einer schrittweisen Reduzierung der Verschmutzung des Grundwassers und Verhinderung seiner weiteren Verschmutzung und
- Beitrag zur Minderung der Auswirkungen von Überschwemmungen und Dürren.

Im Rahmen der „Entwicklung und Bereitstellung einer Bewertungsmethodik zur Beurteilung des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) gemäß EU-WRRL im Land Sachsen-Anhalt“ wurde im Auftrag des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt (Mehl et al. 2010, Hoffmann et al. 2010) eine Landesgliederung nach hydrologischen Regionen bzw. Abflussregionen als Teilergebnis erarbeitet, die nachfolgend vorgestellt werden soll. Dabei besteht das engere Ziel des genannten Vorhabens darin, methodische Grundlagen für eine Bewertung hydrologischer Merkmale als Teil der sogenannten „hydromorphologischen Qualitätskomponenten“ zur Einstufung des ökologischen Zustands der Oberflächengewässer nach Anhang V WRRL zu legen. Die WRRL schreibt in Anhang II verbindlich vor, dass Oberflächenwasser- sowie Grundwasserkörper nach einheitlichen Bezügen abgeleitet werden müssen. Berichtspflichtig bei der Umsetzung der WRRL hinsichtlich der Oberflächengewässer sind die Fließgewässer mit einem Eigeneinzugsgebiet von  $\geq 10 \text{ km}^2$  und die Standgewässer mit einer Flächengröße von  $\geq 0,5 \text{ km}^2$  (50 ha).

Im engeren Sinne entzieht sich der Begriff der hydrologischen Region einer konkreten Betrachtung (Dyck et al. 1980), da grundsätzlich verschiedenste Merkmale genutzt werden könnten, um zu differenzieren und zu typisieren. Als ein spezifisches Beispiel sei hier auf die Arbeit von Merz et al. (2006) zur raum-zeitlichen Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich mit dem Hintergrund einer räumlichen Gliederung dieses Hochwasserfaktors in jahreszeitlicher Abhängigkeit verwiesen. Dem landschaftsökologischen Gesamtansatz am nächsten kommen hingegen hydrologische Regionalgliederungen, bei denen das Abflussregime zugrundegelegt ist (z. B. Grimm 1968, Gamma 1992, HAD 2000, 2001, 2003). Eine solcherart bestimmte hydrologische Region ist durch ein typisches Abflussregime nach Größe und zeitlicher Schwankung des Abflusses gekennzeichnet. Innerhalb einer jeweiligen hydrologischen Region wird damit eine Ähnlichkeit wesentlicher (landschaftsbestimmter) hydrologischer Prozesse unterstellt. Die unterschiedlichen Abflussregime werden durch die Regimefaktoren bestimmt, wozu die Gebietseigenschaften sowie die hydrometeorologischen Faktoren zählen.

Bei der Ableitung hydrologischer Gebiets- bzw. Regionalgliederungen ist grundsätzlich zwischen genetischen und empirischen Methoden zu unterscheiden. Die genetische Methode zielt auf die Bestimmung der für die hydrologischen Prozesse maßgebenden Gebietseigenschaften. Sie baut auf der „regionalen Verteilung der Einflussfaktoren“ (Dyck et al. 1980) auf. Im Gegensatz dazu gliedern empirische Methoden Regionen nach ermittelten hydrologischen Kenngrößen wie z. B. Abflussdaten der Pegel. Bei derartigen Verfahren muss aus der „Gebietsreaktion“ auf die hydrologischen Prozesse und ihre Kennzeichen geschlossen werden. Unter Nutzung von Vergleichsdaten und Erfahrungswerten können mittelbar auch wesentliche Gebietseigenschaften erkannt oder zumindest grundlegend unterschieden werden (Mehl 2004).

Als Abflussregime wird gemäß DIN 4049 Teil 1 der charakteristische und von den Eigenschaften des zugehörigen Einzugsgebietes abhängige Gang des Abflusses eines Gewässers bezeichnet. Dabei umfassen die Regimefaktoren alle diejenigen Eigenschaften, die für die Transformation des Niederschlages in den Gebietsabfluss und den resultierenden Gewässerdurchfluss verantwortlich zeichnen. Beim Niederschlags-Abfluss-Prozess lassen sich drei Hauptphasen unterscheiden (Dyck & Peschke 1983):

- (1) Die Abflussbildung in den Einzugsgebieten (Landphase)
- (2) Die Abflusskonzentration im Gewässernetz der Abflussbildungsgebiete (Flussbettphase)
- (3) Der Durchflussverlauf in den Wasserläufen (Wellenabflachungsphase)

Der (überschüssige) landschaftliche Abfluss sammelt sich unter normalen Bedingungen in den Oberflächengewässern eines Einzugsgebietes. Die Fließgewässer als linienhafte Landschaftselemente führen das Wasser ab, wobei die hohe landschaftsökologische Bedeutung des Abflussprozesses und des daran gekoppelten Stofftransportes in seiner grundsätzlich gerichteten, aber stets Raumeinheiten verbindenden Wirkung liegt (Mehl 2006). Ein Wasserüberschuss ist immer dann gegeben, wenn der Niederschlag summarisch die Verdunstung und die Speicherung übertrifft. Für die Einzugsgebiete der Fließgewässer gilt bei Zeitabschnitten von wenigen Jahren oder Einzeljahren die Bilanzgleichung:

$$R = P - ET - \Delta S \text{ in mm/a}$$

mit P – Niederschlag, ET – Evapotranspiration, R – Abfluss,  $\Delta S$  – Speicheränderung

Abflussregime basieren letztlich auf der Parametrisierung deterministischer und stochastischer Ausgangssignale des Geosystems „Einzugsgebiet“ und enthalten damit „zugleich Informationen über vom Prozess durchlaufene Teilsysteme bzw. Raum- oder Flächeneinheiten“ (Aurada 1984). Aus dem Vorstehenden folgt, dass hydrologische Gliederungen auf Grund ihrer systemhaften, einzugsgebietsbezogenen Grundlegung relativ scharfe Raumabgrenzungen ermöglichen und im Regelfall sogar erfordern.

## 2. Bestehende Raumgliederungen in Sachsen-Anhalt

Bisher publizierte Gliederungen Sachsen-Anhalts sind entsprechend des fachlichen Hintergrunds mehr oder minder komplexer Natur. Aufbauend auf „klassische“ Parameter wie Klima, Niederschlag, Geologie, Boden aber auch Geomorphologie entstanden so differenzierte naturräumliche Betrachtungen, die ihre Resonanz in thematischen Karten fanden. Schröder (1997) systematisiert das bis dato vorliegende Material verschiedenster Autoren und gibt einen umfassenden Überblick

über die natürliche Umwelt Sachsen-Anhalts mit folgenden Schwerpunkten:

- Geologie Sachsen-Anhalt (Akademie der Wissenschaften der DDR 1981)
- Variszikum in Sachsen-Anhalt (Schröder 1994; nach Möbus 1968)
- Eisrandlagen auf dem Territorium von Sachsen-Anhalt (Schröder 1994; nach Schulz 1962, Ruske & Wünsche 1964, Ruske 1964, Marcinek & Nitz 1973, Weisse 1974)
- Verbreitung der Lößderivate in Sachsen-Anhalt (Haase et al. 1970)
- Durchschnittliche jährliche Niederschlagssummen in Sachsen-Anhalt (Schröder 1994; nach Schlüter & August 1958, Veit 1987 und Meteorologischen Dienst der DDR)
- Beginn der Apfelblüte in Sachsen-Anhalt (Vollfrühlungseinzug) (Schlüter & August 1958)
- Beginn der Winterroggenernte in Sachsen-Anhalt (Hochsommereinzug) (Schlüter & August 1958)
- Mittlere Abflusshöhen in Sachsen-Anhalt für die Jahresreihe 1901-1950 (Institut für Wasserwirtschaft Berlin (1973), Atlas DDR 1981)
- Böden Sachsen-Anhalts (Akademie der Wissenschaften der DDR 1981)
- Naturräumliche Einheiten Sachsen-Anhalts (Schröder 1994)

Im Sinne einer chorischen Betrachtung (vgl. Neef 1967, Richter 1967, Haase 1973) grenzt Schröder (1997) naturräumliche Haupteinheiten wie beispielsweise den Harz, die Altmark oder den Drömling ab und untergliedert einige noch weitergehender.

Weitere Landschaftsgliederungen entstanden nach 1990 in den verschiedenen Fachbehörden Sachsen-Anhalts. Hierzu zählen unter anderem die Erläuterungen und eine Karte der potenziell natürlichen Vegetation (LAU 2000). Darin enthalten sind detaillierte Informationen und stellenweise Darstellungen zur Geologie, den Bodenschaften, Höhengliederung und Klima sowie zur Landschaftsgliederung Sachsen-Anhalts. Das Land Sachsen-Anhalt gliedert sich darin in fünf geographische Großlandschaften, welche von 46 regionalen Landschaftseinheiten untersetzt werden. Die Abgrenzungen erfolgten nach Ähnlichkeiten des Naturraums und der Flächennutzung. Ferner wurden Bergbaulandschaften und Stadt-

landschaften als separate Einheiten ausgegrenzt (LAU 2000).

Auch in den Tätigkeitsberichten des Landesamtes für Bergwesen und Geologie (ehemals Geologisches Landesamt) sind geologische, pedologische und regionalgeologische Gliederungen Sachsen-Anhalts enthalten (GLA 1993).

Ziel dieser Arbeit ist eine Fortschreibung der Tradition der geographischen Landesgliederungen für Sachsen-Anhalt. Neu ist dabei der Gegenstand der Betrachtungen und die Wahl der Methodik zur Bestimmung einer solchen Gliederung.

### 3. Methode und Datenbasis

Da die Gliederung des Landes Sachsen-Anhalts in hydrologische Regionen anhand einer objektiven und nachvollziehbaren Methode umgesetzt werden soll, wird eine agglomerative, hierarchische Clusteranalyse mit anschließender Korrektur durch eine Clusterzentrenanalyse durchgeführt.

#### 3.1 Prinzip einer Clusteranalyse

In der Clusteranalyse wird in einem iterativen Verfahren eine Gruppierung von Objekten mit ähnlichen Eigenschaftsausprägungen vorgenommen. Da die Anzahl der in Betracht gezogenen Eigenschaften theoretisch unbegrenzt ist, spricht man auch von einer multivariaten, statistischen Analyseverfahren. Man betrachtet die Objekte als Vektoren in einem  $n$ -dimensionalen Vektorraum. Die Anzahl der zur Analyse herangezogenen Eigenschaften bestimmt die Dimension dieses Vektorraumes, die einzelnen Eigenschaftsausprägungen jedes Objektes können als Koordinaten des entsprechenden Vektors aufgefasst werden. Versinnbildlicht man sich die Menge der Vektoren als Punktwolke in einem  $n$ -dimensionalen Koordinatensystem (Abb. 1), so kann die Clusterbildung als Zusammenfassung nahe beieinanderliegender Punkte oder als Herausarbeitung von Ballungen betrachtet werden. Entscheidend für das Endergebnis der Clusteranalyse ist neben der Vorgabe der Untersuchungsobjekte und Objekteigenschaften, die Wahl des Abstands- oder Ähnlichkeitsmaßes und des Agglomerationsverfahrens (Hoffmann & Rödel 2005). Weiterhin verlangt die Festlegung der Clusteranzahl und -benennungen ein hohes Maß an Expertenwissen.

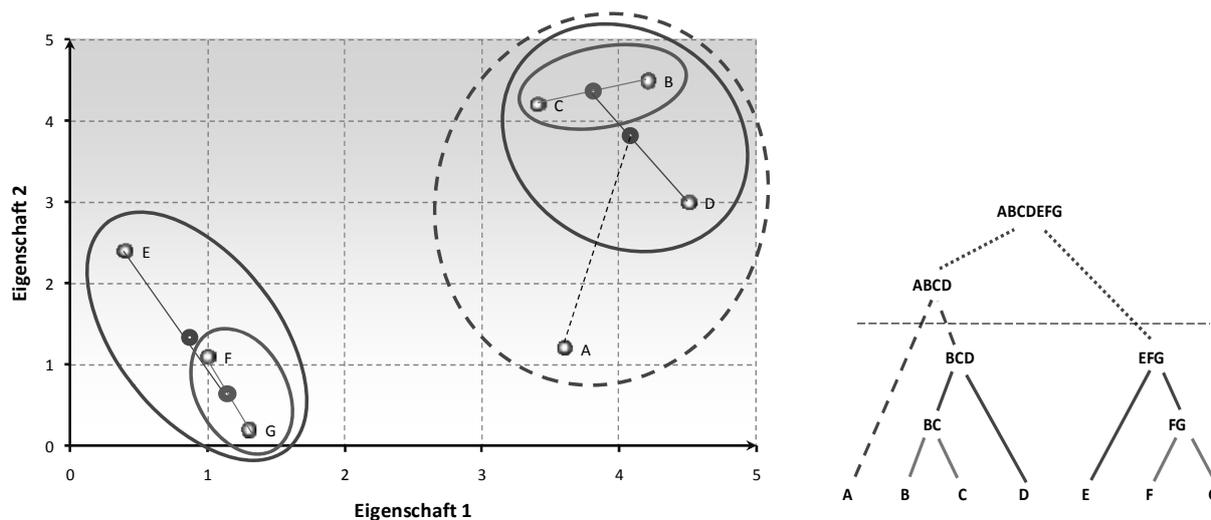


Abb. 1: Funktionsschema einer agglomerativen, hierarchischen Clusteranalyse mit 7 Objekten und 2 Objekteigenschaften.

Fig. 1: Functional diagram of a agglomerative, hierarchical cluster analysis with 7 objects and 2 object properties.

### 3.2 Untersuchungsobjekte

Vor der Herausarbeitung der Gliederung muss eine Parzellierung des Landes in atomare Raumeinheiten nahezu konstanter hydrologischer Eigenschaften gefunden werden. Diese Parzellierung sollte zumindest in Bezug auf das hydrologische Verhalten einer Landschaftsdiagnose in topischer Dimensionsstufe entsprechen. Die einzelnen hydrologischen Tope stellen die zu gruppierenden Objekte des Landschaftsraumes im Rahmen der agglomerativen Clusteranalyse dar.

Per Definition eignen sich hierfür am besten die eingangs erwähnten, in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie Artikel 2 Punkt 10 beschriebenen Oberflächenwasserkörper (OWK). Ein Oberflächenwasserkörper wird hier als „ein einheitlicher und bedeutender Abschnitt eines Oberflächengewässers“ (WRRL 2000) definiert. Bezug nehmend auf die vorauszusetzende Einheitlichkeit eines OWK, wurden in dieser Arbeit die vom Landesbetrieb für Hoch-

wasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) ausgewiesenen 348 Oberflächenwasserkörper, für die das Land Sachsen-Anhalt verantwortlich ist, untersucht. Da sich die landseitigen Abgrenzungen der OWK an den jeweiligen oberirdischen Wasserscheiden orientieren, weichen die Grenzen des Untersuchungsgebietes von denen des Landes Sachsen-Anhalt geringfügig ab.

Das hydrologische Geschehen einer Raumeinheit ist vom gesamten oberliegenden Einzugsgebiet abhängig. Um dem Rechnung zu tragen, erfolgte der Aufbau einer OWK-Hierarchie mit der Festlegung der ober- und unterliegenden Nachbarn und eine Ausweisung des Gesamteinzugsgebietes (Abb. 2). Oberflächenwasserkörper, deren oberliegendes Einzugsgebiet zum großen Teil außerhalb Sachsen-Anhalts liegt, wurden von der Clusteranalyse ausgeschlossen und bilden eine eigene Gruppe. Zu dieser Gruppe zählen insgesamt 15 OWK (Elbe, Saale, Mulde, Unstrut, Schwarze und Weiße Elster und Helme).

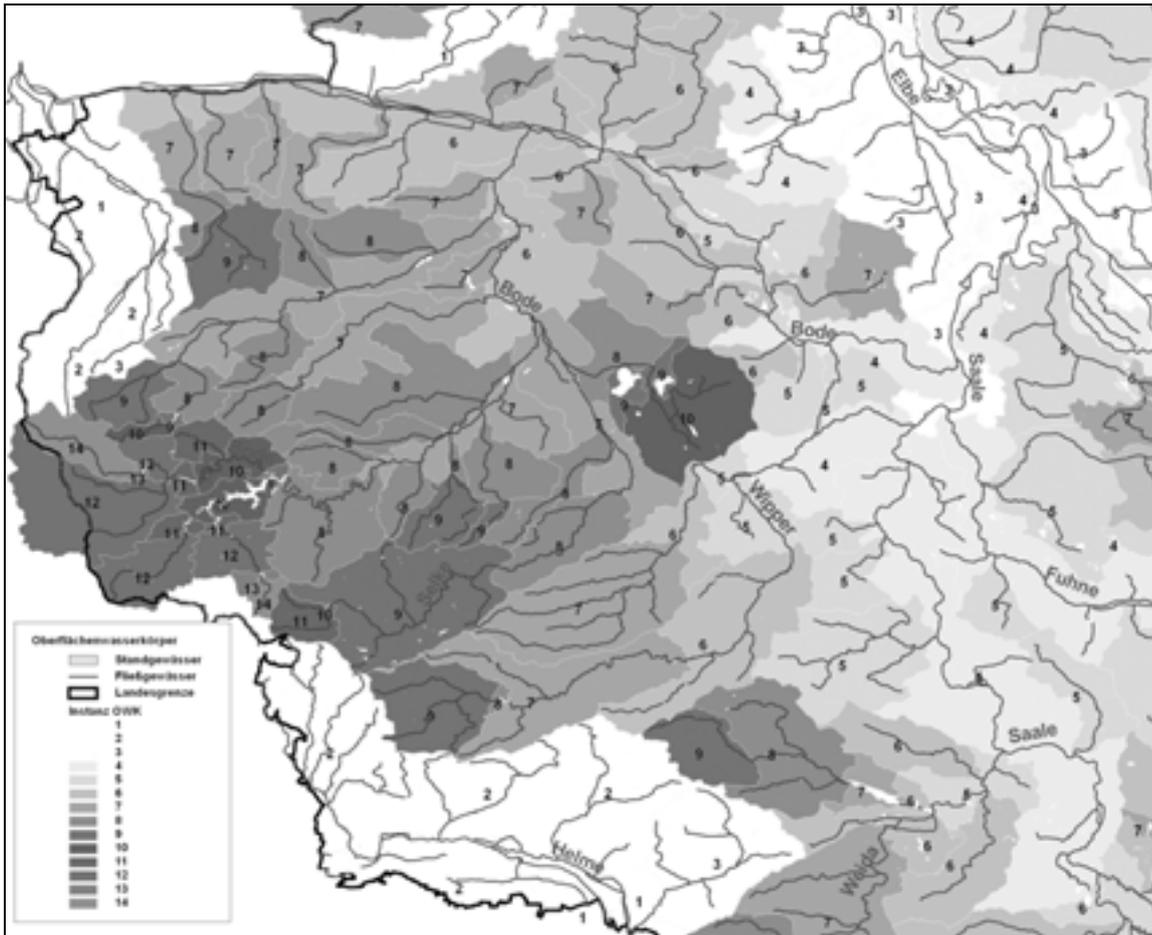


Abb. 2: Abgrenzung und Hierarchie der Oberflächenwasserkörper im Harz und Harzvorland mit Hierarchiestufe ausgehend von der Landesgrenze (Ziffer im Einzugsgebiet).

Fig. 2: Definition and hierarchy of the surface water bodies in the Harz Mountains and Harz foothills with hierarchical level, starting from the State border (number in the catchment area).

### 3.3 Gebietseigenschaften

Die für die Clusterbildung verwendeten Gebietseigenschaften müssen in unabhängiger, vollständiger, homogener und für das Gebiet repräsentativer Form für alle OWK vorliegen, denn nur dann kann der Anspruch der sachgerechten Erfassung der landschaftlichen raumzeitlichen Komplexität erfüllt werden. Der LHW betreibt ca. 130 Pegel mit Abflussmessung im Untersuchungsgebiet; aus folgenden Gründen kann aber nicht direkt auf die dort gewonnenen Informationen zurückgegriffen werden:

- Der an Pegeln gemessene Abfluss spiegelt die hydrologische Situation als eine räumliche Integration über alle Oberflächenwasserkörper im Eigeneinzugsgebiet des Pegels wider. Eine Regionalisierung als Differenzierung der Abflüsse einzelner OWK ist ohne Modellansatz nicht möglich (räumliche Inhomogenität).

- Der Zahl von 348 OWK stehen nur circa 130 räumlich ungleichmäßig verteilte Abflusspegel gegenüber (unvollständige Repräsentanz).
- Die Abflussmessreihen sind nur für unterschiedliche Zeiträume mit Unterbrechungen verfügbar (zeitliche Inhomogenität).
- Das gemessene Abflussverhalten erfasst die zum Gesamtwasserhaushalt beitragenden Komponenten wie Niederschlag, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss, Interflow oder Grundwasserabfluss nur als Bilanz an einem bestimmten Punkt im Gewässersystem. Die Anteile der einzelnen Komponenten lassen sich anhand der Messung nicht differenziert betrachten (sachliche Abhängigkeiten).

Als hinreichende Alternative für eine Verwendung der unzureichend vorliegenden, gemessenen

Parameter des Wasserhaushaltes bietet sich der Rückgriff auf modellierte Parameter an. Sachsen-Anhalt verfügt über eine Modellierung des Gebietswasserhaushalts für alle Oberflächenwasserkörper mit dem Niederschlags-Abfluss-Modell ArcEGMO (Pfützner 2009) auf Basis meteorologischer Eingangsgrößen und räumlich differenzierter Gebietseigenschaften. Für die Beschreibung der Gebietseigenschaften wurden Flächen-

daten wie Böden, Landnutzung, Oberflächenmorphologie, Grundwasserflurabstände, Abgrenzungen von Teileinzugsgebieten und Liniendaten wie Gewässerabschnitte und Punktdaten wie Klima- und Niederschlagsstationen und Wassernutzung in dem Modell integriert. Anschließend erfolgte eine Kalibrierung anhand gemessener Pegelabflüsse (Pfützner et al. 2008).

Kategorie	Parameter	Abkürzung
Geometrische Parameter	Einzugsgebietsfläche geographischer Rechtswert geographischer Hochwert	EG Fläche Rechtswert Hochwert
klimatische Parameter (kumulierte Menge im Gesamt-EG)	Niederschlag (Feb / Aug) potentielle Evapotranspiration (Feb / Aug)	Nied Feb/Aug PET Feb/Aug
Wasserhaushalts- und Abflusskomponenten (kumuliert Menge im Gesamt-EG)	reale Evapotranspiration (Feb / Aug) Oberflächenabfluss (Feb / Aug) anthropogen induzierter Oberflächenabfluss (Feb / Aug) Drainabfluss (Feb / Aug) Interflow (Feb / Aug) schneller Grundwasserabfluss (Feb / Aug) langsamer Grundwasserabfluss (Feb / Aug)	AET Feb/Aug RO Feb/Aug ROa Feb/Aug RDrain Feb/Aug RH Feb/Aug RG1 Feb/Aug RG2 Feb/Aug

Tab. 1: In der Clusteranalyse verwendete Parameter der OWK.

Für die Clusteranalyse werden neun modellierte Parameter, gemittelt über den Zeitraum 1997-2003 verwendet. Um räumlich unterschiedliche, jahreszeitliche Effekte des Abflussgeschehens abzubilden, werden keine Jahresmittelwerte, sondern die für diesen Raum signifikant unterschiedlichen Monatsmittelwerte vom Februar (als Monat hoher Winterabflüsse) und August (als Monat niedriger Sommerabflüsse) hinzugezogen. Die Flächengrößen der gesamten oberliegenden Einzugsgebiete und die Geokoordinaten der Flächenschwerpunkte der OWK ergänzen die Parameter des N-A-Modells (siehe Tab. 1). Es ist sonst davon auszugehen, dass das mit zunehmender Flächengröße wachsende ausgleichende Moment im Wasserhaushalt und die für eine Gruppierung notwendige räumlich zusammenhängende Lage der OWK durch die restlichen Größen nicht in ausreichendem Maße Beachtung finden würde.

Alle flächenbezogenen Werte werden für das gesamte oberliegende Einzugsgebiet einschließlich des Eigeneinzugsgebietes eines OWK kumuliert. Um Skaleneffekte durch unterschiedliche Einheiten und Dimensionen der Eingangsgrößen

zu vermeiden, werden alle Parameter z-standardisiert.

### 3.4 Abstandsmaß, Agglomerationsverfahren und Clusteranzahl

Als Abstandsmaß für die Festlegung des Übereinstimmungsgrades der OWK fiel die Wahl standardgemäß auf die Euklidische Distanz. Dieses Maß entspricht der Länge der kürzesten Verbindung zweier Punkte im Koordinatensystem. Um eine hohe Homogenität der Objekte innerhalb der Cluster und eine große Variabilität zwischen den Clustern zu erreichen, eignet sich für die Wahl des Agglomerationsverfahrens am besten die WARD-Methode (Ward 1963). Bei ihrer Anwendung wird immer das Objekt als nächstes zu einem Cluster hinzugefügt, dass die geringste Zunahme der durch die Fehlerquadratsumme ausgedrückten, inneren Varianz aller Cluster aufweist. Aufgrund der Veränderung der Gesamtvarianz innerhalb aller Cluster und einer Plausibilitätsprüfung der räumlichen Verteilung der gebildeten hydrologischen Regionen wird die

Abbruchbedingung des hierarchischen Clusterverfahrens auf 15 Cluster festgelegt.

### 3.5 Ergebnisoptimierung mit Clusterzentrenanalyse

Als Zentrum eines Clusters kann das theoretische Objekt mit dem Durchschnitt der Eigenschaftsausprägungen aller Objekte eines Clusters bezeichnet werden. Ein Zentrum repräsentiert damit den mittleren Zustand seines Clusters. Trotz der Festlegung der WARD-Methode als Agglomerationsverfahren ist es möglich, dass einem Cluster zugeordnete Objekte nach Abschluss des Verfahrens weiter vom Zentrum des eigenen Clusters entfernt sind, als vom Zentrum anderer Cluster. Um dies auszugleichen, wird eine Clusterzentrenanalyse mit den Zentren der hierarchischen Clusteranalyse als Startparameter durchgeführt und die Clusterzuordnung von 30 OWK optimiert.

Die im Anschluss an die Clusteranalyse mit der Abgrenzung von 15 Regionen ähnlicher hydrologischer Zustände durchgeführte Plausibilitätsprüfung bezüglich der Lageverteilung und die Bewertung der Güte des Verfahrens werden im nächsten Kapitel dargestellt.

## 4. Verfahrensgüte

Betrachtet man die räumliche Anordnung der Cluster (siehe Abb. 4), so ist festzustellen, dass für fast alle Cluster ein hohes Maß des räumlichen Zusammenhangs gegeben ist. So konzentriert sich z. B. Cluster 2 nahezu flächendeckend auf das Gebiet des Flämings und der Dübener Heide. Dies ist eine Voraussetzung für die Gliederung der Landschaftsoberfläche in Regionen. Lediglich die Cluster 3 (Auengebiete), 6 (Einzugsgebiete großer autochthoner Flüsse) und die zuvor abgetrennte Gruppe der OWK mit allochthonen Einzugsgebieten weisen erwartungsgemäß eine höhere räumliche Streuung auf.

Für eine Erfolgsbewertung werden des Weiteren die Mittelwerte, Streuungen und Anzahl der signifikanten Parameter herangezogen. Die Mittelwerte der untersuchten Parameter deuten auf eine ausreichende Differenzierung der 15 Cluster hin (Tab. 2). Jede Region unterscheidet sich von allen anderen in der Kombination der Parameter in hohem Maße. Es sind zudem bei den meisten Parametern unterschiedliche Werteausprägungen für die Monaten August und Februar festzustellen. Die Aufnahme einer jahreszeitlichen Diffe-

renzierung ist also gerechtfertigt und zieht keine Überparametrisierung nach sich. Die Anwendung der WARD-Methode hat zur Folge, dass keine unterbesetzten Regionen mit weniger als 5 OWK auftreten. Die Schwankungen der Clustermächtigkeit zwischen 5 und 83 sind mit Hilfe der Flächenverteilung großer Landschaftseinheiten in Sachsen-Anhalt (Mittelgebirge - Tiefland, städtischer - ländlicher Raum) zu erklären. Um die Ähnlichkeit der zusammengefassten Objekte eines Clusters bewerten zu können, wurden Homogenitätsmaße für die Cluster berechnet. Die Summe der Einzelstandardabweichungen aller z-standardisierten Parameter und der Quotient der Streuung innerhalb eines Clusters und der Streuung der Clustermittelwerte stellt ein solches Homogenitätskriterium dar (Hartung & Elpelt 2009). Die Grundgesamtheit aller OWK des Landes Sachsen-Anhalt weist für die z-standardisierten 21 Parameter in der Summe notwendigerweise eine Standardabweichung von 21,0 auf. Die Standardabweichungssummen der einzelnen Cluster schwanken zwischen 3,18 und 1,98 (Tab. 2) und sind wesentlich kleiner als die Summe der Standardabweichungen der Clusterzentren mit 26,58. Der Quotient innere Streuung zu äußerer Streuung liegt bei 0,12 bis 0,45. Die Homogenität innerhalb der Cluster ist somit als sehr hoch bis befriedigend hoch einzuschätzen. Signifikante Unterschiede von Clustereigenschaften bezüglich der Grundgesamtheit können mittels Einstichproben-t-Tests nachgewiesen werden. Die angenommene Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt hierfür 5%. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme des Clusters 6, bei allen Clustern mindestens 13 der 21 Parameter in ihrer Verteilung signifikant von der Grundgesamtheit abweichen. Cluster 6 weist nur 3 signifikant anders verteilte Parameter auf. Die Präsenz dieses Clusters ist jedoch durch die extrem hohe Trennschärfe bei der Eigenschaft „Flächengröße des EG“ zu rechtfertigen.

## 5. Ergebnis der Gliederung in hydrologische Regionen

Mit der Benennung der Cluster wird der Prozess der Abgrenzung von hydrologischen Regionen abgeschlossen. Die von 1-15 nummerierten Gruppen (Tabelle 2) werden zu verbal benannten hydrologischen Regionen (Tabelle 3). Die Namensgebung orientierte sich an den Maßgaben der „Grammatikalischen Struktur [...] einer begrifflichen Fassung der Kategorie Landschaft“

(Stüdemann 2008, S. 44). Hierzu wurde einem lagedefinierendem ersten Namensteil (z. B. „Hochharz“) immer ein an signifikanten Eigenschaftsausprägungen orientierter zweiter Na-

mensteil (z. B. „mit sehr hohem Niederschlag“) nachgestellt.

Clusternummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Anzahl OWK	83	37	16	52	36	6	22	5	15	16	11	14	6	7	7
Summe Standardabweichungen	7,8	8,31	10,55	7,42	7,41	11,56	6,34	3,18	6,74	7,15	8,85	10,06	11,96	11,98	9,92
Anzahl signifikanter Parameter ( $\alpha=0,05$ )	18	18	15	19	20	3	17	18	16	13	18	13	16	18	15
EG-Fläche (km <sup>2</sup> )	94,4	116,8	44,4	109	166,8	2160	110,3	11,5	50,5	112,5	53,6	126,2	155,1	87,7	53,6
Rechtswert (1000m)	4455	4528	4497	4494	4485	4468	4442	4475	4446	4478	4506	4433	4420	4412	4413
Hochwert (1000m)	5753	5757	5795	5707	5834	5787	5843	5784	5794	5846	5657	5725	5732	5737	5745
Nied Feb 97-03	39,5	44,4	39,6	36,4	43,1	47,3	49,3	33,3	46,5	43,5	41,2	66	90,1	113,8	79,7
Nied Aug 97-03	57,8	64	60,7	55,5	59,8	59,9	61,2	58,4	58,5	59,2	65,5	64,1	77,4	94	77,9
PET Feb 97-03	14,9	13,7	13,5	15,2	12,4	13,8	12,1	14,2	14,1	12,2	15,1	13,7	12,2	12,1	13,9
PET Aug 97-03	95,8	98	96,2	99,5	94	94	92,8	96,7	94,5	93,5	100,8	91,9	89	87,3	91,2
AET Feb 97-03	14,5	13,5	13,4	14,8	12,3	13,5	12	12,7	13,9	12,1	14,5	13,4	11,9	12	13,7
AET Aug 97-03	57,9	65,9	70	53	67,5	62,6	66,7	52,7	68,4	62,5	58,8	66,7	70,4	77,2	68,7
RO Feb 97-03	0,12	0,12	1,97	0,22	0,12	0,45	0,05	0,67	0,08	0,04	0,27	2,3	5,37	2,73	0,77
RO Aug 97-03	0,03	0,04	0,08	0,06	0	0,01	0	0	0,02	0	2,12	0,02	0,07	0,09	0,07
ROa Feb 97-03	1	0,73	0,97	1,14	0,5	1,08	0,83	5,39	0,53	0,83	1,35	0,85	2,22	1,52	1,57
ROa Aug 97-03	1,18	0,86	1,29	1,46	0,55	1,11	0,81	8,13	0,51	0,89	1,79	0,6	1,43	0,99	1,28
RDRAIN Feb 97-03	1,66	4,27	10,82	1,82	6,77	5,68	5,73	2	2,56	17,29	6,53	5,99	4,15	0,5	1,2
RDRAIN Aug 97-03	0,13	0,94	1,39	0,13	1,08	0,74	0,94	0,34	0,22	3,72	1,03	0,15	0,32	0,05	0,24
RH Aug 97-03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,12	0,04	0,01	0,04	0,02	0,28	0,11	0,69	1,76	0,89
RH Feb 97-03	0,71	0,2	0,09	0,2	0,15	1,86	0,26	0,03	0,44	0,12	1,24	7,27	14,73	15,67	9,4
RG1 Feb 97-03	6,85	3,68	5,46	2,19	7,75	11,61	3,87	2,18	7,65	3,94	1,82	37,4	53,16	85,38	48,26
RG1 Aug 97-03	0,65	0,87	0,65	0,44	1,15	1,38	1,27	0,64	1,31	0,89	0,83	1,6	5,51	15,74	7,78
RG2 Feb 97-03	4,2	13,5	6,6	6,1	12,4	7,9	24,8	3	12,5	8,7	5,5	2,4	4,6	2,9	7,2
RG2 Aug 97-03	-2,6	-1,3	-14	-2,4	-6,9	-3,2	-0,2	-5,5	-1,9	-4	-0,1	-2,7	-1,6	-0,2	-0,7

Tab. 2: Mittelwerte der Clusterparameter; Bedeutung der Graustufen: hell - niedrige Werte; dunkel - hohe Werte (Wasserhaushaltsparameter in mm/Monat).

## 5.1 Eigenschaften der Regionen

Die mittleren Eigenschaftsausprägungen der Regionen können der Tabelle 3 entnommen werden. Leere Felder zeigen nicht signifikante oder mittlere Zustände. Der mittlere Zustand bezieht sich in diesem Fall auf den Landesdurchschnitt der entsprechenden Größe. Werte für Winter (Wi) und Sommer (So) werden, wenn erforderlich getrennt ausgewiesen. Im Fettdruck dargestellte Eigenschaftsausprägungen weichen besonders deutlich vom Mittelwert ab, kennzeichnen die Regionen und sind für deren Namensgebung verwendet worden.

## 5.2 Mittlere langjährige Abflussdynamik

In Hinblick auf die mittlere langjährige Dynamik des innerjährlichen Abflussganges der Einzugsgebiete unter ökologischen Gesichtspunkten haben bereits Mehl & Thiele (1998) die Anwen-

dung einer normierten Vergleichs- und damit Typisierungsmöglichkeit für Mecklenburg-Vorpommern vorgestellt. Der dort verwendete, von Pardé entwickelte Abflusskoeffizient ergibt graphisch aufgetragen als Verhältnis des mittleren langjährigen Abflusses jedes Monats (MQ(m)) zum Zwölftel des mittleren langjährigen Jahresabflusses (MQ) für alle Monate eine anschauliche, mittlere relative Abflusskurve über das Jahr (Pardé 1964). Für 14 der 16 mit Pegelmessstationen ausgestatteten hydrologischen Regionen werden die mittleren Abflussregime aus Pardé'schen Abflusskoeffizienten und dazugehörigen einfachen Standardabweichungsintervalle für die Zeitreihen von 1975-2005 errechnet und zur Gebietsbeschreibung herangezogen (Abb. 3). In Tabelle 4 wird die Einordnung der Regime bezüglich ihrer Dynamik und Abflussgenese dargestellt.

Nr	Name der hydrologischen Region	Niederschlag Wi/So	pot. Evapotr. Wi/So	reale Evapotr. Wi/So	oberfl. Abfluss Wi/So	anthrop. oberfl. Abfluss Wi/So	Drainabfluss Wi/So	schnell. GW-Abfl. Wi/So	langs. GW-Abfl. Wi/So
0	<b>Eigeneinzugsgebiete der Ströme und großen Flüsse</b> mit allochthon geprägtem Abfluss								
1	<b>Nordöstliches Harzvorland und Magdeburger Börde</b> mit hoher Winterevapotranspiration	gering	hoch	hoch ----- gering			gering	etwas geringer	etwas geringer
2	<b>Fläming und Dübener Heide</b> mit hoher Grundwasserneubildung	etwas höher	etwas höher	etwas höher		etwas geringer	etwas höher		hoch ----- etwas höher
3	<b>Auengebiete</b> mit geringer Grundwasserneubildung	etwas geringer		hoch ----- hoch	hoch		hoch	etwas geringer	etwas geringer ----- sehr gering
4	<b>Östliches Harzvorland</b> mit geringem Niederschlag	gering	sehr hoch	hoch ----- gering		etwas höher	gering	etwas geringer	
5	<b>Nördliches Sachsen-Anhalt</b> mit mittlerem Drainabfluss		gering	gering ----- etwas höher		gering	hoch	etwas geringer	etwas höher ----- etwas geringer
6	<b>Eigeneinzugsgebiete großer autochthoner Flüsse</b> mit ausgeglichenem Abflussregime		gering						
7	<b>Westliche Altmark</b> mit hoher Grundwasserneubildung		gering	sehr gering ----- etwas höher	etwas geringer	etwas geringer	etwas höher		sehr hoch ----- hoch
8	<b>Magdeburger Gebiet</b> mit stark anthropogen induziertem Abfluss	gering ----- etwas geringer	etwas höher	etwas geringer ----- gering		sehr hoch	gering	gering	gering ----- etwas geringer
9	<b>Ohre-Aller-Hügelland</b> mit hoher Evapotranspiration	etwas geringer	etwas geringer	etwas höher ----- hoch	etwas geringer	gering	gering		etwas höher
10	<b>Nördliches Sachsen-Anhalt</b> mit hohem Drainabfluss		gering	etwas höher -----			sehr hoch	etwas geringer	
11	<b>Südliches Sachsen-Anhalt</b> mit hoher potenzieller Evapotranspiration	etwas höher	sehr hoch	etwas höher	sehr hoch	etwas höher	etwas höher		etwas höher
12	<b>Unterharz</b> mit mittlerem Abfluss und zeitigem Frühjahrsabflussmaximum	hoch ----- etwas höher	gering	etwas höher	hoch	etwas geringer	etwas höher ----- etwas geringer	hoch	gering
13	<b>Mittelharz</b> mit hohem Abfluss und zeitigem Frühjahrsabflussmaximum	sehr hoch ----- hoch	gering ----- sehr gering	sehr gering ----- hoch	sehr hoch	hoch	etwas gering	sehr hoch	gering
14	<b>Hochharz</b> mit sehr hohem Niederschlag und spätem Frühjahrsabflussmaximum	sehr hoch	gering ----- sehr gering	sehr gering ----- sehr hoch	hoch	etwas höher	gering	sehr hoch	gering ----- etwas höher
15	<b>Nördlicher Harzrand</b> mit hohem Niederschlag und mittlerem Frühjahrsabflussmaximum	hoch	gering	hoch		etwas höher	gering	sehr hoch	etwas höher

Tab. 3: Namen und Eigenschaften der hydrologischen Regionen.

Nr	Name der hydrologischen Region	Abflussdynamik	Nr	Name der hydrologischen Region	Abflussdynamik
0	<b>Eigeneinzugsgebiete der Ströme und großen Flüsse</b> mit allochthon geprägtem Abfluss	dynamisch pluvial-nival	9	<b>Ohre-Aller-Hügelland</b> mit hoher Evapotranspiration	stark dynamisch pluvial
1	<b>Nordöstliches Harzvorland und Magdeburger Börde</b> mit hoher Winterevapotranspiration	dynamisch pluvial	10	<b>Nördliches Sachsen-Anhalt</b> mit hohem Drainabfluss	stark dynamisch pluvial
2	<b>Fläming und Dübener Heide</b> mit hoher Grundwasserneubildung	dynamisch pluvial	11	<b>Südliches Sachsen-Anhalt</b> mit hoher potenzieller Evapotranspiration	ausgeglichen pluvial
4	<b>Östliches Harzvorland</b> mit geringem Niederschlag	schwach dynamisch pluvial	12	<b>Unterharz</b> mit mittlerem Abfluss und zeitigem Frühjahrsabflussmaximum	stark dynamisch nival-pluvial
5	<b>Nördliches Sachsen-Anhalt</b> mit mittlerem Drainabfluss	dynamisch pluvial	13	<b>Mittelharz</b> mit hohem Abfluss und zeitigem Frühjahrsabflussmaximum	stark dynamisch nival-pluvial
6	<b>Eigeneinzugsgebiete großer autochthoner Flüsse</b> mit ausgeglichener Abflussregime	schwach dynamisch pluvial-nival	14	<b>Hochharz</b> mit sehr hohem Niederschlag und spätem Frühjahrsabflussmaximum	stark dynamisch nival-pluvial
7	<b>Westliche Altmark</b> mit hoher Grundwasserneubildung	dynamisch pluvial	15	<b>Nördlicher Harzrand</b> mit hohem Niederschlag und mittlerem Frühjahrsabflussmaximum	stark dynamisch nival-pluvial

Tab. 4: Klassifikation der mittleren Regime nach dem System von Pardé.

### 5.3 Karte der hydrologischen Regionen

Als Endergebnis der Analyse kann die Kartendarstellung in Abb. 4 betrachtet werden. In ihr sind neben einer genauen Wiedergabe der Grenzverläufe der hydrologischen Regionen, die Abweichungen der Abflussregime der Pegel von dem des Referenzpegels in ihrer räumlichen Verteilung aufgezeigt. Als Referenzregime wird das Regime ausgewählt, das den geringsten euklidischen Abstand aus allen Monatswerten zum Mittelwert aller Regime einer Region aufweist.

## 6. Diskussion und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren bietet die Möglichkeit, die räumlich und zeitlich differenzierten Prozessgrößen des Wasserhaushaltes klassifiziert abzubilden. Als Kernpunkt der Methode kann die Objektivität der Clusteranalyse und somit eines erprobten multivariaten, statistischen Verfahrens betrachtet werden. Die Objektivität gewährleistet zum einen die ergebnistreue Wiederholbarkeit und die Übertragbarkeit auf andere Räume und Zeiten und zum anderen die Unabhängigkeit von subjektiven Eindrücken des jeweiligen Bearbeiters.

Natürlich kann eine Gliederung des Landes in hydrologische Regionen nur in dem Maße die realen Zustände exakt abbilden, inwieweit die Eingangsdaten dies tun. Da jedoch bei der Ermittlung von Mengenangaben einzelner Komponenten des Wasserhaushaltes, ob gemessen oder modellhaft bestimmt, wegen der Komplexität des Systems Unsicherheiten auftreten, werden diese auch in der darauf aufbauenden Gliederung des Landes Sachsen-Anhalt zu finden sein. Die als Eingangsdaten verwendeten Modellergebnisse des Abflusskomponentenmodells von Sachsen-Anhalt sind die zu diesem Zeitpunkt aktuellsten flächendeckend vorliegenden Angaben. Die lange Entwicklungs- und Anwendungszeit des zugrunde liegenden Modells ArcEGMO rechtfertigt ein hohes Vertrauen in diese Daten.

Die Zuverlässigkeit der Clustermethode an sich wurde im Kapitel 4 nachgewiesen. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Fehler in Form hoher interner Variabilitäten in den meisten Regionen gering ist. Unabhängig davon birgt die mesoskalige Dimensionsstufe mit der zwangsweise vorhandenen Generalisierung ein bekanntes Fehlerpotenzial. Die Ebene der Oberflächenwasserkörper der WRRL beinhaltet trotz des gesetzlich formulierten Anspruches der Einheitlichkeit, eine innere Heterogenität. Damit müssen auch die

auf solche Raumeinheiten aufbauenden Regionen dieselbe Heterogenität aufweisen. Dies ist jedoch ein allgemeines geographisches Problem und tritt in allen raum- und zeitabbildenden Verfahren auf.

Die Aussagekraft der Gliederung für die gewählte Betrachtungsebene wird dadurch nicht geschmälert.

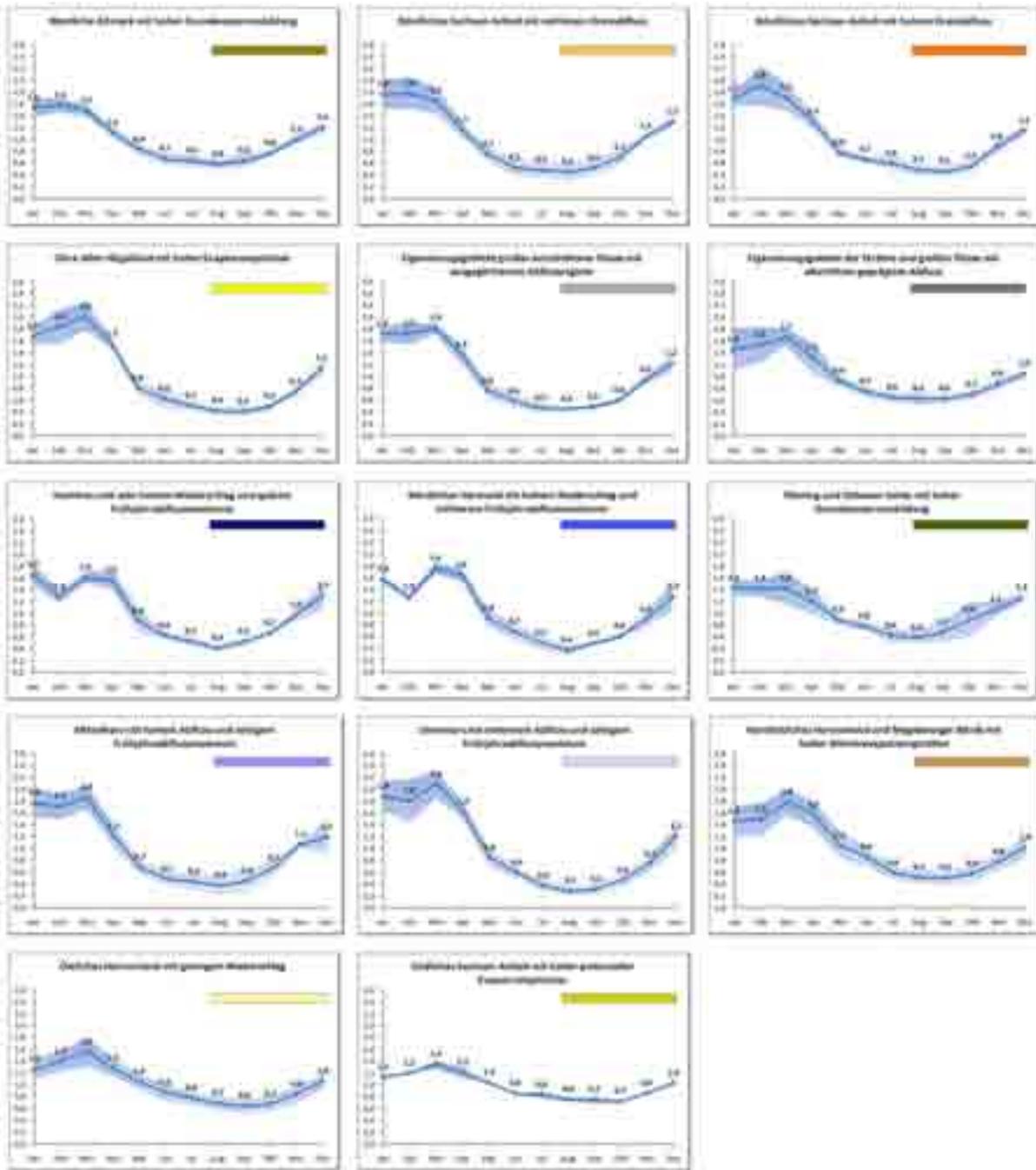


Abb. 3: Mittlere Abflussregime nach Pardé (1964) und deren einfache Standardabweichungen für die hydrologischen Regionen mit Abflusspegeln.  
 Fig. 3: Mean flow regime for Pardé (1964) and the standard deviations for the hydrological regions with runoff gauges.

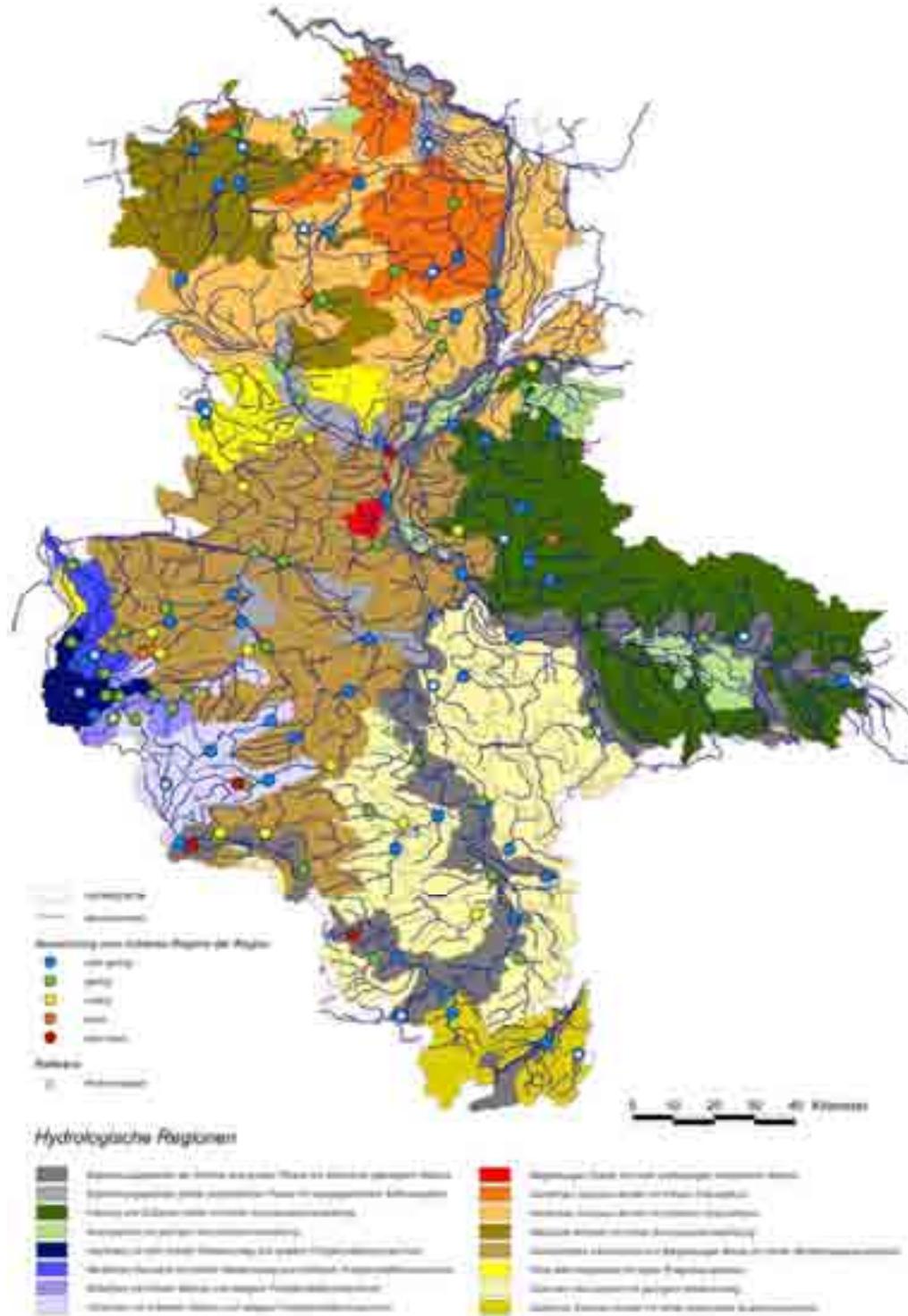


Abb. 4: Hydrologische Regionen und Abweichungen der Pegelregime vom mittleren Regime.  
Fig. 4: Hydrological regions and deviations of the gauged flow regimes from the mean regime.

Als ein großer Vorteil der Methode ist anzusehen, dass sie auf einer Abgrenzung von oberirdischen Einzugsgebieten basiert. Anders als in anderen geographischen Gliederungsvarianten, in denen zwei Regionen im Allgemeinen durch Grenzsäume mit allmählichem Übergang getrennt

werden, ist hier der Grenzverlauf durch Wasserscheiden markiert. Diese sind tatsächlich in der Umwelt auftretende scharfe Trennlinien, die auch reale Geosysteme des oberirdischen Abflusses trennen. Wie gut die gefundenen Abgrenzungen der hydrologischen Regionen dennoch mit den als

Säume zu verstehenden Grenzverläufen der Gliederung der Landschaftseinheiten korrespondieren, ist anhand der Abb. 5 abzulesen.

Die gewonnene Partitionierung in hydrologische Regionen spiegelt die landschaftliche Gliederung des Landes Sachsen-Anhalt in hohem Maße wider. Die großen Landschaftseinheiten Harz, Harzvorland, Magdeburger Börde, Altmark, Elbaue oder Fläming besitzen zum Teil noch feiner differenzierte Entsprechungen in der Menge der hydrologischen Regionen. Bei einem Vergleich muss jedoch beachtet werden, dass in einer Landschaftseinheit Räume mit gleichen oder ähnlichen Ausprägungen verschiedener Geokomponenten wie Boden, Bau, Relief, Bios oder Hydrologie zusammengefasst werden. Dadurch sind die stellenweise unterschiedlichen Grenzen der Raumeinheiten zu erklären.

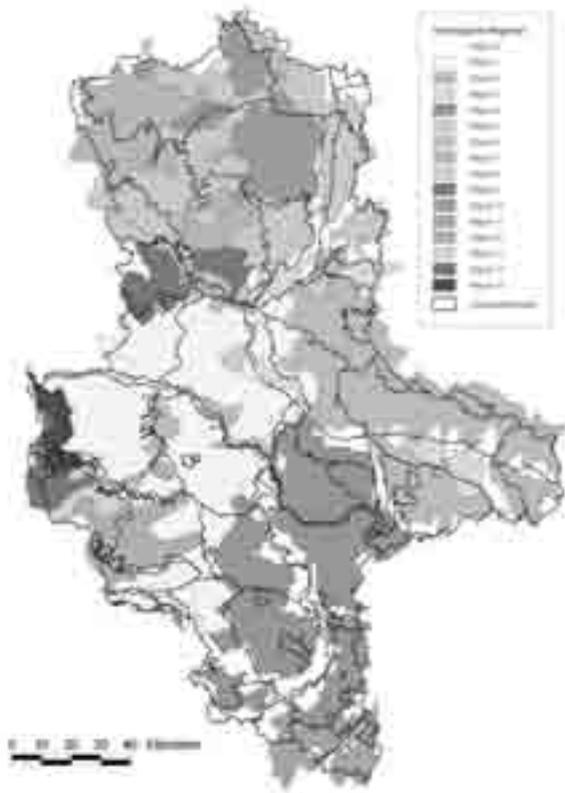


Abb. 5: Lagevergleich Hydrologische Regionen und Landschaftseinheiten von Sachsen-Anhalt (Quelle: LAU 2000).

Fig. 5: Location comparison of hydrological regions and landscape units of Saxony-Anhalt (Source: LAU 2000).

Hervorzuheben ist zuletzt, dass die Homogenität der hydrologischen Regionen auch relativ homogene Abflussganglinien der entsprechenden Pegel nach sich zieht. Die trotzdem vorhandenen Abweichungen haben eine Hauptursache: Die

anthropogenen Eingriffe werden als Eingangsdaten für die Bildung der hydrologischen Regionen zu wenig berücksichtigt. Eingriffe treten zum einen punktuell, wie zum Beispiel bei Wasserentnahmen, -einleitungen, Aufstauungen oder beim Bau künstlicher Standgewässer auf. Zum anderen greift der Mensch entlang der Gewässer mit Gewässerausbau sowie Auenverlusten in den Wasserhaushalt ein. Zum Dritten finden Eingriffe in der gesamten Einzugsgebietsfläche in Form von verschiedenartigsten Landnutzungsänderungen statt. Mit der Integration einer zu entwickelnden Bewertungsgröße, die die Natürlichkeit des Wasserhaushaltes abbildet, wären Verbesserungen bei der Übereinstimmung der Abflussregime an verschiedenen Pegeln zu erzielen. Mit dieser Bewertungsgröße wäre außerdem die Ausweisung des natürlichsten Regimes einer hydrologischen Region möglich. Bis dahin kann aber das mittlere Regime für jede der 16 Regionen bestimmt werden und als Referenzregime der hydrologischen Region fungieren (siehe Abb. 4).

Die Bewertungsgröße der Natürlichkeit eines hydrologischen Regimes wurde in einem Projekt des LHW entwickelt (Biota 2010). Im Rahmen dieses Projektes wurde auch dargestellt, inwieweit ein oder einige Pegel den natürlichen Abfluss und die Abflussdynamik eines Gebietes repräsentieren können.

Ein Skalenwechsel bei den zugrunde liegenden Raumeinheiten von der Ebene der Oberflächenwasserkörpergebiete zur Ebene der feiner gegliederten Einzugsgebiete mit 10-stelligen LAWA-Gebietskennzahlen wurde beispielsweise für Brandenburg durchgeführt. Dieser Wechsel erzeugt eine noch genauere Raumgliederung der Regionen und somit ein noch besseres Abbild der hydrologischen Situation des Landes.

## 7. Anmerkung

Das der Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Landes Sachsen-Anhalt finanziert (Auftraggeber: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt).

## 8. Literatur

Akademie der Wissenschaften der DDR (1981): Atlas Deutsche Demokratische Republik. Gotha, Haak: 53 S.

- Aurada, K. D. (1984): Die systemtheoretische Interpretation des Stabilitätsbegriffs in der Landschaftsdiagnose und -prognose. – In: Richter, H. & Aurada, K. D. (Hrsg.): Umweltforschung. Zur Analyse und Diagnose der Landschaft. – 7-12; Gotha (Hermann Haack Geographisch-Kartographische Anstalt).
- Biota (2010): Entwicklung und Bereitstellung einer Bewertungs-methodik zur Beurteilung des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) gemäß EU-WRRL im Land Sachsen-Anhalt - im Auftrag des Landesbetriebs für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), URL: [http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Master-Bibliothek/Landesbetriebe/LHW/neu\\_PDF/5.1/Dokumente\\_GLD/Endbericht\\_HYDREG\\_2010.pdf](http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Master-Bibliothek/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/5.1/Dokumente_GLD/Endbericht_HYDREG_2010.pdf). Datum: 1. Mai 2010.
- DIN 4049 Teil 1: Hydrologie – Begriffe, quantitativ. – Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Dyck, S. et al. (1980): Angewandte Hydrologie. Teil 2, 2. überarb. Aufl.: 544 S.; Berlin (VEB Verlag für das Bauwesen)
- Dyck, S. & Peschke, G. (1983): Grundlagen der Hydrologie. – 388 S.; Berlin (Verlag für Bauwesen).
- Gamma, P. (1992): Beitrag zu einer hydrologischen Gliederung der Schweiz – GIS-basierte Gewinnung von Einzugsgebietsparametern und deren multivariate Klassifikation mit TWINSPAN. – Dipl.-Arb., Universität Bern, Geographisches Institut. – 150 S.
- GLA Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt [Hrsg.] (1993): Tätigkeitsbericht 1991/1992. Überblick zu Geologie und Boden Sachsen-Anhalts; Halle.
- Grimm, F. (1968): Das Abflußverhalten in Europa – Typen und regionale Gliederung. – Wiss. Veröff. d. Deutschen Instituts für Länderkunde, N. F., 25/26: 18-180.
- Haase, G. (1967): Zur Methodik großmaßstäbiger landschaftsökologischer und naturräumlicher Erkundung. – Wissenschaftliche Abhandlungen der Geographischen Gesellschaft der DDR, 5: 35-128.
- Haase, G. (1973): Zur Ausgliederung von Raumeinheiten der chorischen und regionalen Dimension – dargestellt an Beispielen der Bodengeographie. – Petermanns Geogr. Mitt., 117 (2): 81-90.
- Haase, G., Lieberoth, I. & Ruske, R. (1970): Periglazial Löss Paläolithikum im Jungpleistozän der Deutschen Demokratischen Republik. – 99-112; Gotha (Haak).
- HAD (2000, 2001, 2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. – Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]; Bonn/Berlin. – [2000 (1. Lieferung), 2001 (2. Lieferung), 2003 (3. Lieferung)].
- Hartung, J. & Elpelt, B. (2009): Statistik : Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 15. Aufl. – 1100 S.; München, Wien (Oldenbourg).
- Hoffmann, T. G., Mehl, D., Weiland, M. & Mühlner, C. (2010): HYDREG – Ein Verfahren zur Natürlichkeitsbewertung des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper gemäß EU-WRRL. 2. Methoden und Ergebnisse. – KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 3 (9): 474-484.
- Hoffmann, T. & Rödel, R. (2004): Leitfaden für die Statistische Auswertung geographischer Daten. – Greifswalder Geographische Mitteilungen, 33: 110 S.
- Institut für Wasserwirtschaft Berlin (1973): Gewässerkundliches Jahrbuch der DDR (1973); Berlin.
- LAU Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt [Hrsg.] (2000): Karte der potentiell natürlichen Vegetation von Sachsen-Anhalt. Erläuterungen zur Naturschutz-Fachkarte M 1:200.000. – Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Sonderheft, 1/2000.
- Mannsfeld, K. (1984): Die naturräumliche Ordnung als Grundlage für die Landschaftsdiagnose im mittleren Maßstab. – In: Richter, H. & Aurada, K. D. (Hrsg.): Umweltforschung. Zur Analyse und Diagnose der Landschaft: 63-79; Gotha (Hermann Haack Geographisch-Kartographische Anstalt).
- Marcinek, J. (1975): Versuch einer Gliederung der DDR auf morphogenetischer Grundlage. – Petermanns Geographische Mitteilungen, 3: 209-213.
- Marcinek, J. & Nitz, B. (1973): Das Tiefland der deutschen demokratischen Republik – Leitlinien seiner Oberflächengestaltung. – 288 S.;Gotha.
- Mehl, D & Thiele, V. (1998): Fließgewässer- und Talraumtypen des Norddeutschen Tieflandes am Beispiel der Naturräume Mecklenburg-Vorpommerns. – 261 S.; Berlin (Parey Buchverlag im Blackwell Wissenschaftsverlag).
- Mehl, D. (2004): Grundlagen hydrologischer Regionalisierung: Beitrag zur Kennzeichnung der hydrologischen Verhältnisse in den Flußgebieten Mecklenburgs und Vorpommerns. – Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät: 156 S. + Anlagen.
- Mehl, D. (2006): Erreichtes und Probleme bei der Einfügung der Fließgewässer in das Verfahren der übergreifenden Naturraumerkundung. – Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung, 45 (3/4): 91-116.
- Mehl, D., Hoffmann, T. G., Weiland, M. & Mühlner, C. (2010): HYDREG – Ein Verfahren zur Natürlichkeitsbewertung des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper gemäß EU-WRRL. 1. Hintergrund, Zielstellung und Grundlagen. – KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 3 (6): 300-304.
- Merz, R., Blöschl, G. & Parajka, J. (2006): Raumzeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 50 (1): 2-11.
- Möbus, G. (1968): Tektogenese und Magmatismus im Gebiet der DDR. – Geologie, 17 (6/7): 631-646.

- Neef, E. (1967): Die theoretischen Grundlagen der Landschaftslehre. – 152 S.; Gotha, Leipzig (Hermann Haack, Geographisch-Kartographische Anstalt).
- Pardé, M. (1964): Fleuves et Rivières, 4. Auflage; Paris.
- Pfützner, B., Klöcking, B. & Halbing, F. (2008): Modellgestützte Ermittlung von Abflusskomponenten für das Land Sachsen-Anhalt. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 52 (2): 48-55.
- Pfützner, B. (2009): Beschreibung von ArcEGMO © - Offizielle Homepage des Modellierungssystems, URL: <http://www.arcegmo.de>, Datum: 27. Mai 2009.
- Richter, H. (1967): Naturräumliche Ordnung. – Wiss. Abh. d. Geogr. Ges. d. DDR., 5.
- Ruske, R. (1964): Das Pleistozän zwischen Halle/S., Bernburg und Dessau. – Geologie, 13 (5): 570-597.
- Ruske, R. & Wünsche, M. (1964): Zur Gliederung des Pleistozäns im Raum der unteren Unstrut. – Geologie, 13: 211-222.
- Schlüter, O. & August, O. (Hrsg.) (1958): Atlas des Saale- und mittleren Elbegebietes, Zweite, völlig neu bearb. Aufl. d. Werkes Mitteldeutscher Heimatatlas; Leipzig (Verlag Enzyklopädie).
- Schröder, H. (1994): Die Entstehung des Reliefs in der Umgebung der Saale nördlich von Halle. – Arbeiten a. d. Naturpark „Unteres Saaletal“, 1: 24-33.
- Schröder, H. (1997): Die natürliche Umwelt Sachsen-Anhalts. – 33-95. – In: Oelke, E. (Hrsg.): Sachsen-Anhalt. – 423 S.; Gotha (Perthes Länderprofile).
- Schulz, W. (1962): Gliederung des Pleistozäns in der Umgebung von Halle (Saale). – Geologie, Beiheft, 36 (11): 1-69.
- Stüdemann, O. (2008): Aspekte der Geoökologie. – 425 S.; Berlin (Weißensee-Verlag).
- Veit, U. et al. (1987): Klimadaten der DDR – ein Handbuch für die Praxis, Reihe B, 14; Potsdam.
- Ward, J. H. (1963): Hierarchical grouping to optimize an objective function. – Journal of the American Statistical Association, 58: 236-244.
- Weisse, R. (1974): Drei warthezeitlichen Oberflächenformen und ihre Genese in der mittleren und nördlichen Altmark. – In: Geogr. Ber., 71 (2): 109-120.
- Wittenberg, H., Matz, R. & Rhode, C. (2003): Oberirdisches und unterirdisches Einzugsgebiet – Bedeutung für den Wasserhaushalt. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 4 (2): 29-32.
- WRRL: 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 (Wasserrahmenrichtlinie), Amtsblatt der EG Nr. L 327/1 vom 22.12.2000

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 159-164, 1 Abb.  
Halle (Saale), Mai 2011

## **A well-preserved specimen of the trilobite *Macroblepharum africanum* from the Wissenbach Shale (Devonian: Emsian–Eifelian transitional beds), Upper Harz Mountains (Lower Saxony, Germany)**

Carsten Brauckmann & Elke Gröning\*

Brauckmann, C. & Gröning, E. (2011): A well-preserved specimen of the trilobite *Macroblepharum africanum* from the Wissenbach Shale (Devonian: Emsian–Eifelian transitional beds), Upper Harz Mountains (Lower Saxony, Germany). [Ein gut erhaltenes Exemplar des Trilobiten *Macroblepharum africanum* aus dem Wissenbach-Schiefer (Devon: Übergangsbereich Emsium/Eifelium) aus dem Ober-Harz (Niedersachsen, Deutschland)]. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 159-164, Halle (Saale).

**Abstract:** A nearly complete specimen of *Macroblepharum africanum clausthalense* n. ssp., previously determined as *M. africanum* n. ssp. A (G. Alberti, 1969), is described. The specimen was collected from the Wissenbach Shale of the Emsian–Eifelian transitional beds at the Hut-Taler Widerwaage SE of Clausthal-Zellerfeld in the Upper Harz Mountains (Lower Saxony, Germany). Diagnostic characters are the very broad, pear-shaped glabella, the totally suppressed preglabellar field, and the smooth surface detail.

**Kurzfassung:** Ein nahezu vollständig erhaltenes Exemplar von *Macroblepharum africanum clausthalense* n. ssp. [früher als *M. africanum* n. ssp. A (G. Alberti, 1969) bezeichnet] wird vorgestellt. Es stammt aus dem Wissenbach-Schiefer aus dem Übergangsbereich Emsium/Eifelium an der Hut-Taler Widerwaage SE von Clausthal-Zellerfeld im Ober-Harz (Niedersachsen, Deutschland). Die wichtigsten diagnostischen Merkmale sind die sehr breite, birnenförmige Glabella, die völlige Unterdrückung des Präglabellar-Feldes und die glatte Panzer-Oberfläche.

**Keywords:** Trilobita, Proetida, *Macroblepharum africanum clausthalense* n. ssp., Wissenbach Shale, Devonian, Emsian–Eifelian transitional beds, Upper Harz Mountains

**Schlüsselwörter:** Trilobita, Proetida, *Macroblepharum africanum clausthalense* n. ssp., Wissenbach-Schiefer, Devon, Übergang Emsium/Eifelium, Ober-Harz

---

\* Address of the authors:

Prof. Dr. Carsten Brauckmann (Carsten.Brauckmann@tu-clausthal.de), Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Leibnizstraße 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld;

Dr. Elke Gröning (Elke.Groening@tu-clausthal.de), Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Leibnizstraße 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld.

## 1. Introduction

During an examination of fossil collections deposited in the Institut für Geologie und Paläontologie of the TU Clausthal, the authors discovered a nearly complete, but previously overlooked, specimen of a new trilobite taxon. This specimen has previously been determined as *Macroblepharum africanum* n. ssp. A (G. Alberti, 1969). As noted on the accompanying label, it was collected by “Kortmann” (without collecting date) in the Wissenbach Shale at the Hut-Taler Widerwaage SE of Clausthal-Zellerfeld.

The Proetidae in the Wissenbach Shale of the Upper Harz Mountains are dominated by *Cyrtosymboloides barrandei* (F. A. Roemer, 1850) which frequently had been confused with “*Macroblepharum africanum* n. ssp. A” and thus with *M. africanum claustralense* n. ssp. The latter is a rather rare component within this trilobite fauna. As pointed out by G. Alberti (1969: 167) this taxon was indeed originally distinguished under open nomenclature by an almost complete carapace from the collection of F. A. Roemer. However, the specimen does not display better diagnostic characters, and the additional specimens are only represented by more or less incompletely preserved tagmata (mainly cephalata or cranidia).

The newly discovered specimen permits a more detailed description and a definition of a separate new subspecies presented below.

## 2. Biostratigraphy and biofacies

In the Upper Harz Mountains, the sequence of Wissenbach Shale is evidently distributed within two different biostratigraphic units. Though previously dated as later Eifelian [based on specimens of *Nowakia* sp. A. aff. *holynensis* Bouček, 1964; see G. Alberti 1970b], the main part (mined for a historically long time to produce roof slates in the Upper Harz Mountains) can now largely be correlated with the Late Dalejan in Bohemia by several index fossils (Ammonoidea, Trilobita, Tentaculita, etc.). It is now regarded as an equivalent of the Late Emsian–Early Eifelian transition (Bouček 1964; Lütke 1979; Chlupáč 1982: 368; Schubert 1995, 1996), and includes typical trilobite species such as *Macroblepharum africanum claustralense* n. ssp. and *Cyrtosymboloides barrandei*. It is undoubtedly contemporaneous with the Wissenbach Shale of the type region in northern Hesse.

The section which is exposed, for example in the Schalke Syncline, overlies the *Calceola* Shale and is thus distinctly younger and should be characterized by a new lithostratigraphical name.

The biofacies of the “actual” Wissenbach Shale as exposed at the Hut-Taler Widerwaage and at the Ziegenberger Teich in the Upper Harz Mountains has recently been discussed in detail by Schubert (1996).

## 3. Systematics

**Order Proetida Fortey & Owens, 1975**

**Family Proetidae Hawle & Corda, 1847**

**Subfamily Cornuproetinae Richter & Richter & Struve, 1959**

(non Richter & Richter, 1956, as usually cited; see Lütke 1980)

***Macroblepharum* G. Alberti, 1964**

**Type species:** *Cornuproetus* (*Macroblepharum*) *africanus* G. Alberti, 1964.

**Diagnosis:** see G. Alberti (1970a: 45-46).

**Discussion:** Jell & Adrain (2003: 481) placed *Macroblepharum* as well as *Cornuproetus* and Cornuproetinae in total within the Tropicocoryphidae Přibyl, 1964. As shown by Lütke (1980: 103-104 and fig. 26), the Cornuproetinae and the Tropicocoryphinae have different origins: The Cornuproetinae have their root within the stem-group of the Proetinae + Dechenellinae + Cyphoproetinae, whereas the Tropicocoryphinae are phylogenetically more closely related to the Eremiproetinae + Proetidellinae. Thus, the analysis by Lütke (1980) clearly implies a polyphyletic origin for the Tropicocoryphidae sensu Jell & Adrain (2003). Like most current European trilobite specialists, we prefer to separate the Tropicocoryphidae from the Proetidae and Cornuproetinae.

***Macroblepharum africanum* (G. Alberti, 1964)**

**Diagnosis:** see G. Alberti (1969: 162).

**Subspecies** (following G. Alberti 1981: 25): *Macroblepharum africanum africanum* (G. Alberti, 1964); *Macroblepharum africanum iunius* (G. Alberti, 1981); *Macroblepharum africanum ribatelfatanum* G. Alberti, 1970; *Macroblepharum africanum tumidum* (Šnajdr, 1976) (as ranked by G. Alberti 1981: 25); *Macroblepharum africanum claustralense* n. ssp.

„*Cornuproetus (Macroblepharum) africanus termieri* G. Alberti, 1969” was mentioned as a subspecies of “*Cornuproetus (Macroblepharum) africanus*” in G. Alberti (1981: 25). However, in the same publication, G. Alberti (1981: 28) subsequently transferred the taxon to *Cyrtosymboloides* as a separate species. Šnajdr (1980: 275-

276) described a separate subspecies, *Macroblepharum africanum cap* Šnajdr, 1980, from the Třebotov Limestone (Dalejan = Late Emsian, late Early Devonian) of Hostim in Bohemia, which has not been mentioned under the subspecies of *M. africanum* by G. Alberti (1981: 25).

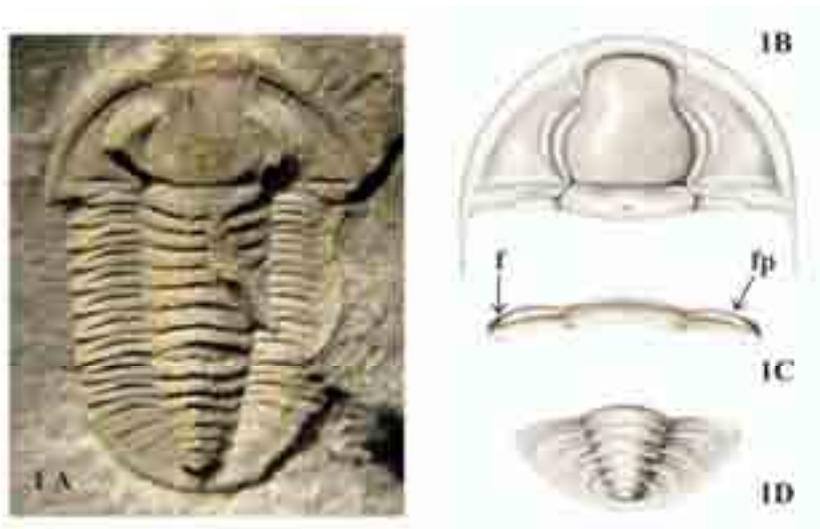


Fig. 1: *Macroblepharum africanum clausthalense* n. ssp., nearly complete specimen No. TU Cl P Tr 243, Wissenbach Shale, Emsian–Eifelian transitional beds (Early–Middle Devonian), Hut-Taler Widerwaage, SE Clausthal-Zellerfeld, Upper Harz Mountains, Lower Saxony, Germany; total length 13.4 mm. – 1A: Photograph, dorsal view. – 1B: Reconstruction of cephalon (genal spines completed according to the specimen figured by G. Alberti 1983: pl. 5, fig. 50). – 1C: Reconstruction of thoracic segment with facet (f) and fulcral point (fp). – 1D: Reconstruction of pygidium.

Fig. 1: *Macroblepharum africanum clausthalense* n. ssp., fast vollständiger Panzer Nr. TU Cl P Tr 243, Wissenbach-Schiefer, Übergangs-Bereich Emsium–Eifelium (Unter- bis Mittel-Devon), Hut-Taler Widerwaage, SE Clausthal-Zellerfeld, Ober-Harz, Niedersachsen, Deutschland; Gesamt-Länge 13.4 mm. – 1A: Foto, Dorsal-Ansicht. – 1B: Rekonstruktion des Cephalons (Wangenstacheln ergänzt nach dem von G. Alberti 1983: Taf. 5, Fig. 50 abgebildeten Exemplar). – 1C: Rekonstruktion eines Thorax-Segmentes mit Facette (f) und Fulcral-Punkt (fp). – 1D: Rekonstruktion des Pygidiums.

### ***Macroblepharum africanum clausthalense* n. ssp.**

Synonymy (selected):

1850 *Proëtus Barrandei* (sic!) F.A. Roemer: 20 [non pl. 3, fig. 33, = *Cyrtosymboloides barrandei*].

1969 *Cornuproetus (Macroblepharum) africanus* n. ssp. A. – G. Alberti: 167, pl. 13, fig. 11.

1970a *Cornuproetus (Macroblepharum) africanus* n. ssp. A. – G. Alberti: 47, 48.

1981 *Cornuproetus (Macroblepharum) africanus* n. ssp. A. – G. Alberti: 25.

1983 *Macroblepharum africanum* n. ssp. A. – G. Alberti: 27, pl. 5, fig. 50.

**Etymology:** clausthalensis, clausthalense (adjective); the material of the new subspecies was collected in the region of Clausthal-Zellerfeld.

**Holotype:** Specimen no. TU Cl P Tr 243, “Kortmann collection,” in the collection of the Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.

**Locus typicus:** Hut-Taler Widerwaage, SE Clausthal-Zellerfeld, Upper Harz Mountains, Lower Saxony, Germany.

**Stratum typicum:** Wissenbach Shale, Emsian–Eifelian transitional beds (Early–Middle Devonian), *Nowakia maureri* zone (Zagora, 1962) to *N. holyocera* subzone (G. Alberti, 1980) in the tentaculitid zonation according to G. Alberti (1983).

**Distribution:** Restricted to the Wissenbach Shale of the Clausthal region of the Upper Harz

Mountains: Hut-Taler Widerwaage, Ziegenberger Teich; both SE of Clausthal-Zellerfeld.

**Diagnosis:** A subspecies of *Macroblepharum africanum* with the following combination of characters: Glabella very broad, pear-shaped; preglabellar field totally suppressed; dorsal side of anterior cranial border without visible terrace lines; surface smooth.

### Morphology

**Preservation:** The specimen is preserved as a somewhat flattened external mould of a nearly complete carapace; only the genal spines are lacking. It is a little bit shortened in the sagittal line and therefore appears too broad. During the collecting process, the specimen was evidently broken into two pieces along a line from the anterior margin in front of the glabella across the cranidium and the six anterior thoracic segments to the right side of the thorax. Both pieces have been glued together without major damage. Due to the preservation and flattening, only a description of the dorsal view is possible.

### Measurements (mm):

Total length 13.4 mm.

Cephalon: Total length (except genal spines) 5.21; glabellar length (except occipital ring) 3.57; length of occipital ring 0.97; length  $\alpha$ - $\beta$  0.82; length  $\beta$ - $\gamma$  0.89; length of palpebral lobe ( $\gamma$ - $\varepsilon$ ) 2.31; total length of eye 2.35; total width of cephalon 9.46; width of glabella between  $\gamma$ - $\gamma$  2.35; maximum width of glabella 3.46; width  $\beta$ - $\beta$  3.20; width  $\gamma$ - $\gamma$  2.60; width  $\delta$ - $\delta$  4.24; width  $\varepsilon$ - $\varepsilon$  3.54; width  $\omega$ - $\omega$  7.15.

Thorax: Total length 5.21; maximum width 8.04; width of axis 3.72.

Pygidium: Total length 2.98; total width 6.33; length of axis 2.61; maximum width of axis 2.46.

**Cephalon:** Shape broadly rounded, as long as the thorax, distinctly larger than pygidium. Glabella broadly pear-shaped in dorsal view ("cornuproetid"), with rather short and truncated anterior lobe, moderate constriction between  $\gamma$ - $\gamma$  and broad posterior lobe with the maximum width between  $\delta$ - $\delta$ . Glabellar furrows (1p-3p) very faint, obsolescent. Occipital ring transversally extended, moderately long (sag.), with small occipital node shortly posterior to its centre, occipital furrow without lateral branches. Dorsal furrow weakly incised. Preglabellar field completely suppressed; anterior border broad (sag.), slightly convex in sagittal section. Facial suture: section  $\alpha$ - $\beta$  short, strongly divergent;  $\beta$

broadly rounded; section  $\beta$ - $\gamma$  slightly sigmoidal, strongly convergent; palpebral lobe very long (exsag.), but rather narrow (tr.), with the maximum width at  $\delta$ ;  $\delta$  extremely broadly rounded, situated distinctly distant of the longitudinal projection of  $\beta$ ;  $\varepsilon$  distinctly marked by a very narrow curvature, situated even slightly distant to the longitudinal projection of  $\beta$ ;  $\zeta$  absent, no straight section  $\varepsilon$ - $\zeta$ ;  $\omega$  situated nearly at two-thirds of the posterior margin. Due to the course of facial suture, fixigenae quite narrow. Librigenae: Broad, eye very long, quite narrow, ocellae small, numerous; genal field broad, without eye furrow; border furrow and posterior border furrow narrow, distinctly incised; genal border broad, convex; no terrace lines visible. Genal spines (not preserved in this specimen, but known from additional material) moderately long, narrow, sharply pointed. Surface without visible ornament.

**Thorax:** Conspicuously serial, composed of 9 segments; distinctly broader than long; width of axis 0.45 of total width; dorsal furrows distinctly marked; maximum width of pleurae 0.6 of width of axis; pleurae distally pointed; pleural furrows narrow, deeply incised; important characters of functional morphology, in particular of possible enrollment, visible: facets at anterior parts of the pleural tips flattened, beginning at short, pointed fulcral point close to middle of anterior pleural margin (Fig. 1C).

**Pygidium:** Short, length less than half total width; shape slightly triangular, with broadly rounded margin; axis relatively long, broadly conical in dorsal view, with 6 visible rings, posterior part with space for one additional ring; ring furrows narrow, distinctly incised in the anterior part, but continuously shallower to the posterior part; dorsal furrow distinctly marked; pleural fields with four pairs of ribs; posterior part with place for at least one additional rib; pleural furrows well developed, rib furrows less clearly developed; border furrow very faint; border moderately broad. Surface without visible ornament.

**Discussion:** As clearly pointed out by G. Alberti (1969), the *Macroblepharum* specimens from the Wissenbach Shale in the Upper Harz Mountains are close to *M. africanum* (G. Alberti, 1964). This can be confirmed emphatically by the virtually complete specimen described herein. Details displayed in this specimen further allow to introduce and define a separate new

subspecies named *Macrolepharum africanum clausthalense* n. ssp.

The fact that only the cranium is known from several subspecies, a detailed comparison has to be restricted to this part of the carapace. The main common characters are: (1) the very broad, typically pear-shaped glabella; (2) the broad anterior border of the cranium; and (3) the very narrow or even completely suppressed preglabellar field.

*Macrolepharum africanum africanum* (G. Alberti, 1964) differs by: (1) the less truncated frontal lobe of the glabella; (2) markedly broader palpebral lobes; and (3) the presence of 4 to 5 terrace lines in the distalmost part (2/5) of the anterior border.

*Macrolepharum africanum ribatelfatanum* (G. Alberti, 1970) can be distinguished by (1) the much more convex anterior border which is covered by terrace lines in the distal half; (2) the markedly incised border furrow; and (3) the distinct ornamentation of the glabellar surface which consists of delicate ridges.

*Macrolepharum africanum iunius* (G. Alberti, 1981) is clearly characterized by the conspicuous ornamentation which – similar to *Sculptoproetus* – consists of a combination of densely arranged and moderately coarse tubercles and ridges.

*Macrolepharum africanum tumidum* (Šnajdr, 1976) differs by (1) its even larger palpebral lobes; (2) the more conical glabella with long and narrow frontal lobe; and (3) the presence of a recognizable ornamentation.

*Macrolepharum africanum cap* Šnajdr, 1976 is distinguished by (1) the more violin-shaped outline of the glabella; (2) the presence of coarse terrace lines across the entire anterior border; and (3) the presence of undulated and concentrically arranged striae as well as sparsely distributed large granules of circular to oval shape on the glabellar surface.

Although removed from *Macrolepharum africanum* by G. Alberti (1970: 28) and transferred to *Cyrtosymboloides* as a separate species, we include “*M. africanum*” *termieri* (G. Alberti, 1969) in this comparison. This taxon differs by (1) the presence of terrace lines across the entire anterior border; (2) the more conical shape of the glabella; and (3) the distinct tuberculation of the glabellar surface.

H. Alberti (1968: pl. 11, fig. 10) published a photograph of an isolated and partially preserved cranium which he determined as “*Cornuproetus* (*Macrolepharum*?) cf. *africanum*”. The

specimen was collected from limestone strata of early Eifelian age in the Mittleres Sau-Tal, western slope of a hill called Kleiner Knollen, E of Herzberg and NNW of Bad Lauterberg in the Lower Harz Mountains. This specimen differs markedly from *M. africanum* ssp. A by the distinctly broader (tr.) frontal lobe of the glabella, which is only slightly narrower than the posterior lobe at  $\delta$ .

The previously established species of *Macrolepharum* merit the following comparisons with species from the Rhenish Massif:

*Macrolepharum germanicum* (G. Alberti, 1967) is known from the Ballersbach Limestone (Eifelian) of the Marburg area (Rhenish Massif). It differs mainly by (1) the less truncated frontal lobe of the glabella (with less marked constriction between  $\gamma$ - $\gamma$ ); (2) the presence of a preglabellar field; and (3) the relatively narrow anterior border. Additionally, G. Alberti (1967, 1969) emphasized the larger dimensions of *M. germanicum*, which appears to reach nearly twice of the length of *M. africanum* (total specimen).

*Macrolepharum pmuelleri* Basse in Basse & Heidelberger, 2002 from the late Emsian in the Lahn Syncline (Rhenish Massif) differs by (1) the longer and much narrower glabella with anteriorly clearly rounded frontal lobe and poorly marked constriction between  $\gamma$ - $\gamma$ ; (2) the presence of a narrow preglabellar field; and (3) the narrower and more convex anterior border. The same differences can be noted for *M. sp. n.* aff. *M. pmuelleri* Basse in Basse & Heidelberger, 2002.

Other species of *Macrolepharum* differ in more distinct morphological characters so that a detailed comparison is not provided herein.

Within the Wissenbach Shale of the Upper Harz Mountains, *Macrolepharum africanum clausthalense* n. ssp. is associated with *Cyrtosymboloides barrandei* (F. A. Roemer, 1850). Both taxa have often been confused, but the latter is clearly distinguished by (1) its much shorter and narrower palpebral lobes; and (2) the presence of only 8 thoracic segments. For further differences between these two species see G. Alberti (1969: 302-303).

#### 4. Acknowledgements

We thank Dipl.-Geol. Jan-Michael Ilger (Technische Universität Clausthal) for preparing the photograph, John W. Tilsley (Sheffield, United

Kingdom) for improvement of the language, and Prof. Dr. Gerd Geyer (Bayerisches Landesamt für Umwelt, Geologischer Dienst, Hof) for various help.

## 5. References

- Alberti, G. (1964): Neue Trilobiten aus dem marokkanischen und deutschen Unter- und Mitteldevon. – *Senckenbergiana lethaea*, 45 (1-4): 115-133.
- Alberti, G.K.B. (1967): Neue obersilurische sowie unter- und mitteldevonische Trilobiten aus Marokko, Deutschland und einigen anderen europäischen Gebieten. 2. – *Senckenbergiana lethaea*, 48 (6): 481-509.
- Alberti, G.K.B. (1969): Trilobiten des jüngeren Siluriums sowie des Unter- und Mitteldevons. I. – *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 520: 1-629.
- Alberti, G.K.B. (1970a): Trilobiten des jüngeren Siluriums sowie des Unter- und Mitteldevons. II. – *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 525: 1-233.
- Alberti, G. (1970b): Tentaculiten (Nowakiidae) aus den Wissenbacher Schiefer (Eifelium) an der Hut-Taler Widerwaage (Bl. Riefensbeek, Oberharz). – *Senckenbergiana lethaea*, 51 (4): 371-375.
- Alberti, G.K.B. (1980): Neue Daten zur Grenze Unter-/Mittel-Devon, vornehmlich aufgrund der Tentaculiten und Trilobiten im Tafelalt (SE-Marokko). – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Monatshefte*, 1980 (10): 581-594.
- Alberti, G.K.B. (1981): Trilobiten des jüngeren Siluriums sowie des Unter- und Mittel-Devons. III. – *Senckenbergiana lethaea*, 62 (1): 1-75.
- Alberti, G.K.B. (1983): Trilobiten des jüngeren Siluriums sowie des Unter- und Mittel-Devons. IV. – *Senckenbergiana lethaea*, 64 (1): 1-87.
- Alberti, H. (1968): Trilobiten (Proetidae, Otarionidae, Phacopidae) aus dem Devon des Harzes und des Rheinischen Schiefergebirges (Beitrag I). – *Beihfte zum Geologischen Jahrbuch*, 73: 1-147; Hannover.
- Basse, M. & Heidelberger, D. (2002): Devonische Gastropoda und Trilobita aus der Lahn-Mulde (Rheinisches Schiefergebirge). – *Jahrbuch des Nassauischen Vereins für Naturkunde*, 123: 67-103.
- Bouček, B. (1964): The tentaculites of Bohemia. Their morphology, taxonomy, ecology, phylogeny and biostratigraphy. – 215 pp; Prague (Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences).
- Chlupáč, I. (1982): The Bohemian Lower Devonian stages. – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 55: 345-400.
- Fortey, R.A. & Owens, R.M. (1975): Proetida – a new order of trilobites. – *Fossils and Strata*, 4: 227-239; Oslo.
- Hawle, I. & Corda, A.J.C. (1847): *Prodrom einer Monographie der böhmischen Trilobiten*. – *Abhandlungen der Königlich-Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften*, 5. Folge, 5 (2): 117-292.
- Jell, P.A., & Adrain, J.M. (2003): Available generic names of trilobites. – *Memoirs of the Queensland Museum*, 48 (2): 331-551.
- Lütke, F. (1979): Biostratigraphical significance of the Devonian Dacryoconarida. – *Special Papers in Palaeontology*, 23: 281-289; London.
- Lütke, F. (1980): Zur Evolution der altpaläozoischen Proetina (Trilobita). – *Senckenbergiana lethaea*, 61 (1/2): 73-144.
- Příbyl, A. (1946): Příspěvek k poznání českých proetidů (Trilobitae). – *Rozpravy II. Třídy české Akademie*, 55 (10): 1-37; Prague [for 1945].
- Richter, R., Richter, E. & Struve, W. (1959): Cornuproetinae. – In: Moore, R.C. (ed.): *Treatise on Invertebrate Paleontology – Part O. Arthropoda 1. Protarthropoda. Trilobitomorpha: O385-O387, Lawrence/Kansas (Geological Society of America & University of Kansas Press)*.
- Römer [= Roemer], F.A. (1850): Beiträge zur Kenntniss des nordwestlichen Harzgebirges [1. Abtheilung]. – *Palaeontographica*, 3 (1): I-XI, 1-65; Cassel.
- Schubert, M. (1995): Cyrtocone Tentaculitida aus den Wissenbach-Schiefern des Oberharzer Diabaszug. – In: Königshof, P. & Schindler, E. (eds.): *Beiträge zur Geologie und Paläontologie aus unterschiedlichen Regionen des Paläozoikums*. – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg* 188: 11-19.
- Schubert, M. (1996): Die dysaerobe Biofazies der Wissenbacher Schiefer (Rheinisches Schiefergebirge, Harz, Devon). – *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie*, 68: I-VIII, 1-131.
- Šnajdr, M. (1976): New proetid trilobites from the Silurian and Devonian of Bohemia. – *Věstník Ústředního ústavu geologického*, 51: 51-55
- Šnajdr, M. (1980): Bohemian Silurian and Devonian Proetidae (Trilobita). – *Rozpravy Ústředního ústavu geologického*, 45: 1-324.
- Zagora, K. (1962): Zur biostratigraphischen Bedeutung der Tentaculiten im thüringischen Unter- und Mitteldevon. – *Geologie*, 11 (5): 548-556.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 165-170, 2 Abb.  
Halle (Saale), Mai 2011

## **„Zahntürkis“ an einem Mandibelfragment von *Propalaeotherium isselanum* aus dem eozänen Geiseltal bei Halle (Saale), Deutschland**

Meinolf Hellmund\*

Hellmund, M. (2011): „Zahntürkis“ an einem Mandibelfragment von *Propalaeotherium isselanum* aus dem eozänen Geiseltal bei Halle (Saale), Deutschland. [„Zahntürkis“ covering a fragmentary mandible of *Propalaeotherium isselanum* from the Eocene Geiseltal near Halle (Saale), Germany.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 165-170, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Es wird der erste Beleg für die Bildung von „Zahntürkis“ (Vivianit) an einem Mandibelfragment von *Propalaeotherium isselanum* aus der oberen Mittelkohle des Geiseltales (höheres Mitteleozän) vorgestellt und mit Funden anderer Provenienzen aus unterschiedlich alten stratigraphischen Ablagerungen verglichen. Der vermutliche Ablauf der Bildung von Vivianit wird für den Fund aus dem Geiseltal beschrieben.

**Abstract:** A first record of "Zahntürkis" (Vivianit) is proofed from a fragment of a mandible of *Propalaeotherium isselanum* found in the Upper middle coal (Upper middle Eocene) of the Geiseltal. The fragment is compared to other similar finds coming from very different stratigraphic sites. The putative genesis of Vivianit in the Geiseltal specimen is explained.

**Schlüsselwörter:** „Zahntürkis“, Vivianit, Geiseltal, *Propalaeotherium*, Mitteleozän

**Key words:** "Zahntürkis", Vivianit, Geiseltal, *Propalaeotherium*, Middle Eocene

---

\* Anschrift des Autors:

Dr. Meinolf Hellmund (meinolf.hellmund@zns.uni-halle.de), Zentralmagazin Naturwissenschaftlicher Sammlungen, Geiseltalmuseum, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Domstr. 5, D-06108 Halle (Saale).

## 1. Einleitung

Im Zusammenhang mit der Datenerfassung von odontologischem Material (Oberschädel, Unterkiefer und Mandibeln von *Propalaeotherien*) aus dem Geiseltal fiel unter etwa 500 diesbezüglich bearbeiteten Objekten ein Mandibelfragment auf, das sich durch einen teilweise hellbläulich bis gräulichen Mineralüberzug auszeichnet.

Es handelt sich hierbei offenbar um „Zahntürkis“. In der Mineralogie wird dieses Mineral in der Regel als Vivianit bezeichnet. Es handelt sich um ein wasserhaltiges Eisenphosphatmineral [ $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \times 8 \text{H}_2\text{O}$ ], das in seinem Farbspektrum von hellblau bis tiefdunkelblau oder auch türkis reicht.

## 2. Beschreibung des Objektes und des Befundes

Das in Rede stehende Objekt ist ein Mandibelfragment dext. eines adulten Individuums von *Propalaeotherium isselanum*, mit den beiden Alveolenresten des P4, dem M1 und M2 sowie den Wurzelstümpfen des M3. Der disto-linguale Kronenanteil des M1 ist abgebrochen und fehlt. Der Usurgrad ist bei beiden Molaren derart intensiv, so dass das Kronenrelief völlig verschlissen wurde und das darunter befindliche Dentin flä-

chenhaft entblößt und teilweise ausgeschürft ist (Abb. 1). Es sind also nur noch die „Wände“ erhalten, die die Zahnkronen rund herum begrenzen. Ein effektives Zerschneiden von Pflanzenkost (Laubblätter) war damit nur noch eingeschränkt möglich.

Gesamtlänge des Objektes ca. 7,00 cm.

Länge des M 1 = 11,00 mm; max. Breite = 8,00 mm

Länge des M 2 = 12,00 mm; max. Breite = 9,50 mm

Auf der lingualen Seite des Fragmentes (= Ramus horizontalis) ist etwa auf  $\frac{2}{3}$  der erhaltenen Länge ein hellblau bis gräulich glänzender Mineralüberzug erkennbar (Abb. 2), der sich durch eine sehr geringe Ritzhärte auszeichnet. In der Mohs'schen Ritzhärte-Skala entspricht dies etwa der „Härte 2“ (= mit dem Fingernagel ritzbar). Auf der labialen Seite ist im vorderen Drittel des Ramus horizontalis ebenfalls ein hellblauer „Überzug“ feststellbar. Offenbar ist dieser im hinteren Teil, d. h. im Bereich hinter einer geklebten Bruchstelle, mechanisch entfernt worden und jetzt nur noch rudimentär vorhanden.

Das hellbläuliche Mineral überzieht auch das Dentin der beiden Molaren und erfasst ebenso die jeweils aus dem Kieferknochen herausragenden oberen Wurzelpartien der M1 und M2, sowie die Wurzelstümpfe (Abbruchreste) des M3.



Abb. 1: Mandibelfragment dext. eines adulten Individuums von *Propalaeotherium isselanum*, mit den beiden Alveolenresten des P4, dem M1 und M2 sowie den Wurzelstümpfen des M3. Der disto-linguale Kronenanteil des M1 ist abgebrochen und fehlt (okklusale Ansicht). Die usierten Zähne und zum Teil auch deren Wurzeln weisen einen Überzug aus Zahntürkis (Vivianit) auf (Maßstab = 2 cm, Foto: M. Hellmund).

Fig. 1: Fragment dext. of a mandibula from an adult individual of *Propalaeotherium isselanum*, with both alveolar rests of P4, M1 and M2, respectively the root-stumps of M3. The disto-lingual part of the crown in M1 is broken and lost (occlusal view). Both the worn teeth and the roots display a coating of "Zahntürkis" (Vivianit) (scale bar = 2 cm, Photo: M. Hellmund).



Abb. 2: Dasselbe Objekt wie in Abb. 1, hier in linguale Ansicht. Der Ramus horizontalis mit den beiden Molaren ist auf etwa 2/3 der erhaltenen Länge von einem hellblauen bis gräulich glänzenden Mineralüberzug („Zahntürkis“/Vivianit) bedeckt (Maßstab = 2 cm, Foto: M. Hellmund).

Fig. 2: Same specimen as in Fig. 1, here in lingual view. The Ramus horizontalis with the two molars is coated for two thirds of its length by a light blue, greyish and bright mineral, the so called "Zahntürkis" (Vivianit) (scale bar = 2 cm, Photo: M. Hellmund).

### 3. Fundort innerhalb der Fossilagerstätte Geiseltal

Das Objekt stammt aus der Wirbeltierfundstelle NS XXXVII (Ausgrabungszeitraum 1963-1966) und wurde in der Oberen Mittelkohle im Jahre 1964 geborgen, die Fundstelle gehört in das höhere Mitteleozän (MP 13), Oberes Geiseltalium.

Inventarnummer GMH: XXXVII – 110 – 1964.  
NS = Tagebau Neumark – Süd

### 4. Weitere Beispiele von oder in „Zahntürkis“ erhaltenen Objekten unterschiedlicher Provenienzen

„Zahntürkis“ bzw. Vivianit ist als sekundär gebildetes „Fossilisationsmittel“ in der Paläontologie bekannt und kommt sowohl bei Wirbeltieren (Knochen, Zähne) als auch bei wirbellosen Organismen (Schalen von Mollusken) vor und das völlig unabhängig vom stratigraphischen Alter des einbettenden Sedimentes. Die Genese ist lediglich abhängig von den jeweils notwendigen geochemischen Parametern.

Meistens handelt es sich um dünne, z. T. aber auch etwas blättrig erscheinende rauhe Überzüge, die hellblau bis tief dunkelblau gefärbt sein können (Hellmund & Hellmund 1985: Abb. 1, 3) und eine geringe Ritzhärte („Mohshärte 2“) aufweisen.

An dem zuletzt genannten Objekt, einem (?) subfossil / rezenten Oberarmknochen eines Pferdes aus einem Kanalaushub in Troisdorf bei Bonn, ist es innerhalb der aufgebrochenen Substantia spongiosa sogar zur Bildung von idiomorphen, prismatischen, monoklinen Kristallen bzw. Kristallaggregaten gekommen (Hellmund & Hellmund 1985: Abb. 2, 4, 5-8). Ein Phänomen, das in jedem Falle für das Auskristallisieren des Minerals sowohl Platz als auch Zeit erfordert hat.

Selten sind auch ganze Skelette, Knochenhöhlräume und Knochen sowie Panzerplatten (s. u.) in Vivianit umgewandelt worden. Ein Beispiel hierfür ist eine Gruppe von 22 Adlerkopfechsen der Gattung *Aetosaurus* aus dem mittleren Keuper (Stubensandstein) von Stuttgart-Kaltental (Ziegler 1986: Abb. 152), die von Fraas (1877) beschrieben wurde. Ein einzelnes Individuum dieser Echsen misst ca. 80 cm Körperlänge.

Im Zusammenhang mit odontologischen Untersuchungen an Gebissen des Paarhufers *Elomeryx borbonicus* fand sich in der Sammlung der

„Faculté des Sciences de la Terre, Université de Lyon, in Villeurbanne“ eine linke Mandibel eines juvenilen Individuums mit den Milchzähnen D2 bis D4 (Inv. Nr. FSL 8740). An diesem Objekt ist nahezu der gesamte Ramus horizontalis bzw. ein Teil des Ramus ascendens von einer tief dunkelblauen, blättrig rauhen Vivianitkruste überzogen (Hellmund, eigene Beobachtung, August 1987). Das Objekt ist in Hellmund (1991: 41, 75, Tab. 8) erwähnt, wird aber hier wegen seiner odontologischen Bedeutung herausgestellt. Das Fundstück stammt aus St. Henri / St. André bei Marseille (Frankreich), stratigraphisch gehört es in das höhere Mitteloligozän (MP 26).

Bei einem weiteren Objekt handelt es sich um ein nicht näher bestimmtes, ca. 3 cm x 2 cm messendes Knochenfragment (Inv. Nr. MGB 9222), das im „Museo Municipal de Geologia“ in Barcelona (Spanien) aufbewahrt wird.

Das Knochenstück ist hell- bis mittelblau von seiner Farbe und offenbar weitgehend in Vivianit umgewandelt (Hellmund, eigene Beobachtung, August 1987). Der Fundort ist Tarrega (Ebrobecken, Spanien). Tarrega wird der Mammal-Paleogene Zone (MP 23) zugeordnet, was etwa dem Mitteloligozän entspricht (Schmidt-Kittler 1987) [ed.], (Aguilar et al. 1997) [eds.].

Im Zusammenhang mit Vivianitvorkommen erwähnen Brauns & Chudoba (1979: 108) bzw. Ramdohr & Strunz (1980: 643) fossile Muscheln aus Kertsch auf der Krim sowie fossile Knochen aus Torfmooren, die einen derben Überzug haben, der auch als „Blaueisenerde“ bezeichnet wird.

Steinbach (1982) referiert den Fund eines Pferdes aus einem Altbergbau (1933) aus der Gegend von Přeborn (Tschechische Republik), in dessen Unterkiefer sich „schön ausgebildete“ Vivianitkristalle fanden. Ein klassisches Beispiel eines in Zahntürkis erhaltenen Großsäugermolaren ist in Steinbach (1982: 183, Fig. oben rechts) abgebildet.

Ein weiteres Beispiel stammt aus dem Harz, wo bei Erneuerungsarbeiten an der Kleinbahnstrecke zwischen den Stationen Stiege und Albrechtshaus im Jahre 1984 Bahnarbeiter in 1,3 m Tiefe auf Knochenfragmente von Rind und Pferd stießen. Die Knochenteile waren vollständig hellblau verfärbt und sechs in der Nähe liegende Pferde Zähne hatten das gleiche Aussehen. Im Zusammenhang damit fand sich auch Keramik, die eine Datierung in das 10. bis 12. Jahrhundert zuließ. Die Markhöhlen der Extremitätenknochen sowie die Pulpahöhlen der Zähne waren mit langgestreckten dunkelblauen Kristal-

len von einer Länge bis zu 3 mm gefüllt (<http://de.wikipedia.org/wiki/Vivianit>).

Mann et al. (1998) berichten über eine blaue Inkrustation auf menschlichen Skelettresten von seinerzeit in Vietnam vermissten U.S. Soldaten, die im Rahmen der Rückführung in die USA, nach 28 Jahren dort festgestellt wurde. Die blaue Inkrustation erwies sich aufgrund verschiedener Untersuchungsmethoden wie Rasterelektronenmikroskopie und Röntgendiffraktometrie als Vivianit. Dieses Beispiel ist insofern ungewöhnlich, als es aus dem Bereich der „Forensischen Wissenschaft“ kommt. Es belegt, dass die Bildung von Vivianit z. B. auf menschlichen Knochen in einer Zeitspanne von etwa 30 Jahren geschehen kann. Dem Mineral Vivianit kommt hier also eine Bedeutung für die Beurteilung und das Verständnis von taphonomischen Prozessen zu, die die jüngste Vergangenheit betreffen.

Gelegentlich findet sich Vivianit auch in vorgeschichtlichen, tonigen Brunnensedimentfüllungen, z. B. im mehr als 7000 Jahre alten jungsteinzeitlichen Brunnen mit Verfüllung von Erkelenz-Kückhoven, Nordrhein-Westfalen (Hellmund, eigene Beobachtung, 1991).

Die dargestellten Beispiele stammen aus den unterschiedlichsten stratigraphischen Niveaus wie dem oberen Keuper, dem höheren Mitteleozän, dem Mitteloligozän bzw. dem höheren Mitteloligozän und aus dem Holozän.

Hieran wird deutlich, dass die Bildung von Vivianit völlig unabhängig vom geologischen Alter ist.

## 5. Zur Entstehung des Vivianit-Überzuges am Objekt aus der oberen Mittelkohle

Nach Ramdohr & Strunz (1980: 642 – 643) bildet sich Vivianit zunächst unter Abschluß von Luftsauerstoff und ist zuerst farblos. Er färbt sich erst an der Luft blau unter Höheroxidierung des Eisens von  $Fe^{2+}$  zu  $Fe^{3+}$ .

Vivianit ist ein Sekundärmineral, das im Zusammenhang mit sulfidischen Erzlagertstätten, nahe der Erdoberfläche, aber auch aus der Umwandlung von Phosphaten entsteht. Letzterer Fall trifft für das Geiseltal zu.

Vivianit als unregelmäßiger hellblauer Überzug auf erdigem Material (Abraum der Grube Neumark-Süd) bzw. in Form von hellblauen, kugeligen Konkretionen (mit Durchmessern von etwa 0,40 - 1,00 cm) kam im Geiseltal auch an

der Grenze zwischen dem obersten klastisch ausgebildeten Tertiär und den Pleistozänablagerungen vor (Krumbiegel 1971 und mündliche Mitteilung 2010 über eine Beobachtung aus dem Jahre 1955). Entsprechendes Belegmaterial dazu ist in der Geiseltalsammlung vorhanden.

Die Phosphatkomponente, die durch aufsteigende Wässer transportiert wurde, stammte offenbar aus Wirbeltierknochen. Trafen diese Wässer mit eisenhaltigen Lösungen aus dem Pleistozänmaterial zusammen, dann konnte es zur Vivianitbildung kommen.

Die Vivianitbildung am Kieferfragment und den Zähnen des *Propalaeotherium* dürfte sich innerhalb des Sedimentes (hier: Torf und akkumulierte, mehr oder weniger zersetzte Biomasse) frühdiagenetisch bei niedrigem, d. h. niedrigem pH-Wert an den organisch gebildeten Hartsubstanzen wie Knochen und Zähnen, die aus Hydroxylapatit [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ] bestehen, vollzogen haben. Die hierfür notwendige Phosphatkomponente stammte also aus dem Knochen bzw. den Zähnen selbst, während die Eisenkomponente in Form einer im Einbettmedium zirkulierenden wässrigen Lösung hinzugeführt wurde.  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen und  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen wurden dabei gegeneinander ausgetauscht.

## 6. Synonymie

Das Mineral Vivianit erhielt seinen Namen 1817 durch A. G. Werner, der es zu Ehren des Entdeckers und Erstbeschreibers John Henry Vivian (1785-1855), einem englischen Mineralogen, so benannte.

Es existieren außerdem zahlreiche synonyme Bezeichnungen wie Zahntürkis, Eisenblau, Blau-eisenerde, Eisen-Phyllit, Glaukosiderit, Mullinit, Natürliches Berlinblau und Phosphorsaures Eisen für dieses Mineral.

## 7. Röntgendiffraktometrische Analyse

Der Versuch, die auf makroskopischen Merkmalen beruhende Bestimmung des Zähtürkis (Vivianit) auch analytisch zu untermauern, gelang leider nicht. Dies lässt sich aber insofern erklären, als der in Rede stehende Mineralüberzug offenbar derart geringfügig in seiner Stärke ist, dass die entsprechenden Substanzen bei der angewendeten Untersuchungsmethode unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Für den Hydroxylapatit (= Kno-

chenssubstanz des Kieferfragmentes) ist dies naturgemäß anders, er ist reichlich vorhanden und demzufolge auch nachweisbar.

## 8. Dank

Meinem Kustoskollegen Herrn Dr. N. Hauschke (Institut für Geowissenschaften und Geographie, MLU Halle-Wittenberg) danke ich für die redaktionelle Betreuung der Arbeit, Herrn Dr. G. Krumbiegel, Halle (Saale) für seine Gutachtertätigkeit. Herr Dr. Th. Witzke (Institut für Geowissenschaften und Geographie, MLU Halle-Wittenberg) führte die röntgendiffraktometrische Untersuchung durch, wofür ich ihm meinen verbindlichen Dank ausspreche.

## 9. Literatur

- Aguilar, J.-P., Legendre, S. & Michaux, J. [eds.] (1997): Actes du Congrès Biochrom'97, Mém. Trav. E. P. H. E., Inst. Montpellier, 21: 1-818.
- Brauns, R. & Chudoba, K. F. (1979): Spezielle Mineralogie. – 193 S.; Berlin, New York (W. de Gruyter).
- Fraas, O. (1877): *Aetosaurus ferratus* Fr. – Die gepanzerte Vogel-Echse aus dem Stubensandstein bei Stuttgart. – Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ., 33: 21 S.
- Hellmund, M. (1991): Revision der europäischen Species der Gattung *Elomeryx* MARSH 1894 (Anthracotheriidae, Artiodactyla, Mammalia) – Odontologische Untersuchungen. – Palaeontographica, Abt. A, 220: Lfg. 1-3: 101 S.; Stuttgart.
- Hellmund, M. & Hellmund, W. (1985): Ein „blauer“ Knochen – Vivianitfund in Altenrath. – Troisdorfer Jahreshefte, 15: 117-120; Troisdorf (Merkur Druckerei).
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Vivianit>
- Krumbiegel, G. (1971): Mineralbildungen in der Braunkohle des Geiseltales bei Halle. – 308-309. – In: Vollstädt, H.: Einheimische Minerale, 2. Aufl. – 342 S.; Dresden (Verlag Th. Steinkopf).
- Mann, R. W., Feather, M. E., Tumosa, Ch. S., Holland, Th. D. & Schneider, K. M. (1998): A blue encrustation found on skeletal remains of Americans missing in action in Vietnam. – Forensic Science International, 97 (2): 79-86.
- Ramdohr, P. & Strunz, H. (1980): Klockmann's Lehrbuch der Mineralogie, 16. Aufl. – 876 S.; Stuttgart (F. Enke Verlag).
- Schmidt-Kittler, N. [ed.] (1987): International Symposium on Mammalian Biostratigraphy and Palaeoecology of the European Paleogene – Mainz, February 18th - 21st 1987. – Münchner Geowiss. Abh. (A), 10: 312 S.

Steinbach, G. (1982) [Hrsg.]: Mineralien. – 287 S.;  
München (Mosaik Verlag GmbH).

Ziegler, B. (1986): Der Schwäbische Lindwurm –  
Funde aus der Urzeit im Museum am Löwentor. –  
172 S.; Stuttgart (K. Theiss Verlag).

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 171-190, 10 Abb., 2 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Vergleichende osteologische Untersuchungen am postcranialen Skelett von *Propalaeochoerus pusillus* (Suoidea) aus der untermiozänen Karstspaltenfüllung Tomerdingen (SW-Deutschland)

Meinolf Hellmund & Elmar P. J. Heizmann\*

Hellmund, M. & Heizmann, E. P. J. (2011): Vergleichende osteologische Untersuchungen am postcranialen Skelett von *Propalaeochoerus pusillus* (Suoidea) aus der untermiozänen Karstspaltenfüllung Tomerdingen (SW-Deutschland). [Comparing osteological studies on the postcranial skeleton of *Propalaeochoerus pusillus* (Suoidea) from a fissure filling of Lower Miocene age.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 171-190, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Das postcraniale Skelettmaterial von *Propalaeochoerus pusillus* aus der untermiozänen (MN1) Spaltenfüllung Tomerdingen (Deutschland, Baden-Württemberg) wird untersucht und mit demjenigen des rezenten *Sus scrofa* (Suidae) und des *Tayassu tajacu/pecari* (Tayassuidae) verglichen. *Propalaeochoerus pusillus* war bereits odontologisch beschrieben und charakterisiert worden (Hellmund 1992).

Überraschender Weise zeigt das Extremitätenskelett von *P. pusillus* im Unterschied zur Bezaehlung kaum tayassuide Anpassungen, sondern erweist sich als weitgehend plesiomorph. Dies äußert sich in einer fehlenden Verwachsung von Radius/Ulna und der Metacarpalia bzw. Metatarsalia III und IV. Offenbar zeichnet sich hier ein diachroner, „mosaikartiger“ Entwicklungsmodus ab. Die Gebisse, insbesondere die Canini und die Molaren aus Tomerdingen sind unzweifelhaft „tayassuid“ und der „modernen“, rezenten Konfiguration weitgehend entsprechend ausgebildet, während das Skelett primitiv, generalisiert und undifferenziert „suid“ ist. Inwieweit diese Gebissmorphologie einen phylogenetischen Zusammenhang mit den Tayassuidae begründet oder ob es sich dabei um eine frühe Parallelentwicklung handelt, kann an Hand der vorgenommenen Vergleiche nicht entschieden werden. Es erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoll, *Propalaeochoerus* vorerst in die Überfamilie Suoidea einzuordnen und die Zuweisung in eine der Familien Suidae, Palaeochoeridae oder Tayassuidae noch bzw. wieder offen zu lassen.

Einer der wenigen sonst noch bekannten Extremitätenfunde aus dem Unter-/Mittel-Miozän Mitteleuropas stammt von Steinheim am Albuch (MN7). Es handelt sich um ein Autopodium von *Conohyus simorreensis*, dessen Seitenmetapodien noch weniger reduziert sind als bei *Propalaeochoerus* und damit die Zuordnung dieses Genus zu den Suidae bestätigen.

Inwieweit sich die tayassuide Morphologie von Zygo- und Autopodium in der Alten Welt oder in der Neuen Welt (z. B. in den südlichen USA, in Mittelamerika oder im nördlichen Südamerika) herausgebildet hat, muss beim gegenwärtigen Kenntnisstand ebenso dahingestellt bleiben.

**Abstract:** The postcranial skeleton of *Propalaeochoerus pusillus* of the Lower Miocene (MN1) fissure filling Tomerdingen (Schwäbische Alb, Südwestdeutschland) is investigated thoroughly and compared with the recent *Sus scrofa* (Suidae) and *Tayassu tajacu / pecari* (Tayassuidae). An odontological description and characterization of *Propalaeochoerus pusillus* had already be done by Hellmund (1992). Remarkably, the limb bones of *Propalaeochoerus pusillus* did not reveal any tayassuid characters in contrast to the dentitions. The manner of the bones is mostly plesiomorphic in displaying a lack of a fusion of radius and ulna, respectively, of the metacarpals and metatarsals III and IV.

Such points to a diachron and mosaic-like evolutionary mode. The teeth, e. g. canines and molars, originating from Tomerdingen are clearly “tayassuid” and correspond to the recent morphology of Tayassuids, whereas the skeleton is primitive, generalized and undifferentiated “suid”. How far the mentionend dentition speaks for a phylogenetic connection with the Tayassuidae or displays an early parallel evolutionary trend cannot be judged at the present state of knowledge.

---

\* Anschriften der Verfasser:

Dr. Meinolf Hellmund (meinolf.hellmund@zns.uni-halle.de), Zentralmagazin Naturwissenschaftlicher Sammlungen, Geiseltalmuseum, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Domstr. 5, D-06108 Halle (Saale);  
Dr. Elmar P. J. Heizmann (heizmann.smns@naturkundemuseum-bw.de), Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart, Rosenstein 1, D-70191 Stuttgart.

Therefore it is appropriate to place *Propalaeochoerus pusillus* in the Superfamily Suoidea and leave an attribution to the Family Suidae, Palaeochoeridae or Tayassuidae open.

There is a further and extremely rare find from the Lower Middle Miocene coming from Steinheim am Albuch (Baden-Württemberg, Deutschland) (MN7), dealing with the autopodials of *Conohyus simorreensis*, whose lateral metapodials are more less reduced as is the case in *Propalaeochoerus pusillus*. Therefore an attribution to the Family Suidae is clearly indicated.

The question how far the tayassuid morphology of the zygodium and the autopodials evolved in the Old or in the New World (e. g. in the South of the USA, in Middle America or in the northern part of South America) remains open.

**Résumé:** Le matériel postcranial de *Propalaeochoerus pusillus* provenant d'une fissure karstique à Tomerdingen (Allemagne, Bade-Württemberg) est étudié. Les os sont comparés à ceux des espèces récentes de *Sus scrofa* (Suidae) et de *Tayassu tajacu* (Tayassuidae). L'odontologie de *Propalaeochoerus pusillus* avait déjà été décrite et caractérisée par Hellmund (1992).

C'est étonnant qu'à la différence de la dentition le squelet des extrémités de *P. pusillus* ne montre presque pas d'adaptations tayassuidées, mais se révèle plésiomorphe. Cela est indiqué par la séparation complète de radius et ulna ainsi que des métacarpiens et métatarsiens III et IV. Il semble que cela démontre un mode d'évolution diachronique ou "en mosaïque". Sans doute les dentitions de Tomerdingen, surtout les canines et les molaires, sont de type tayassuide et comparable à la configuration moderne des Tayassuidés récentes, tandis que le squelet montre des caractères primitifs généralisés du type suide non différencié. Les comparaisons faites ne permettent pas de décider, si la morphologie de la dentition reflète une connexion phylogénétique avec les Tayassuidés ou s'il s'agit d'une évolution parallèle précoce. Dans ce contexte il nous semble d'être plus raisonnable de ranger *Propalaeochoerus* seulement parmi la superfamille des Suoidea que dans une des familles de Suidae, Palaeochoeridae ou Tayassuidae.

Peu de restes d'extrémités du Miocène inférieur ou moyen de l'Europe centrale appartiennent à des Suoidea sont connus: Un autopode de *Conohyus simorreensis* provient de Steinheim am Albuch (MN7). Les métapodes latérales de cette espèce sont moins réduits que chez *Propalaeochoerus* et confirment l'appartenance de ce genre aux Suidae.

Basé sur l'état des connaissances actuelles on ne peut pas décider si la morphologie tayassuide de zygo- et autopode s'est formée dans l'Ancien Monde ou dans le Nouveau Monde (p. e. au Sud des États Unis, en Amérique centrale ou en Amérique du Sud septentrional).

**Schlüsselwörter:** Mammalia, Suoidea, Osteologie, Untermiozän, Karstspalte

**Key words:** mammals, Suoidea, osteology, Lower Miocene, fissure filling

## 1. Einleitung

Untermiozäne Vertreter der Suoidea haben in der Vergangenheit unterschiedliche systematische Zuordnungen erfahren (z. B. Ginsburg 1974, v. d. Made 1994, 1996, Heissig 2008). Am Beispiel von *Propalaeochoerus pusillus* (Ginsburg 1974) soll überprüft werden, ob die an der Bezahnung festgestellten tayassuiden Merkmale (Hellmund 1992) auch an dessen postcranialen Skelett verifizierbar sind. Belege zu letzterem sind im Allgemeinen selten. Eine Ausnahme bilden Karstspaltenfüllungen, da es hier oft zu größeren Konzentrationen von Bezahnungen und Skelettelementen kommt. Im Falle der nachfolgend behandelten Spaltenfüllung Tomerdingen (Schwäbische Alb, Südwestdeutschland) kommt hinzu, dass wegen der dort vorhandenen eingeschränkten Artenzahl eine problemlose Zuordnung der Postcranialelemente möglich ist, wie sich dies auch schon am Beispiel der Gattung *Cainotherium* gezeigt hat (Heizmann

1992). Zusätzlich wird ein teilweise artikulierter Hinterfuß von *Conohyus simorreensis* wegen seiner besonders vollständigen Erhaltung in die Untersuchung einbezogen. Die relevanten Unterscheidungsmerkmale werden im Vergleich mit den rezenten Gattungen *Sus* und *Tayassu* herausgearbeitet.

## 2. Fundstellen

### 2.1 Tomerdingen

Bei der Fossilfundstätte Tomerdingen nordöstlich von Ulm, handelt es sich um eine Karstspaltenfüllung, die bereits im Jahre 1928 ausgebeutet wurde. Typisch für derartige Fundstellen sind die Anreicherung von isoliertem Zahn- bzw. disartikuliertem Knochenmaterial, wozu auch das Knochenmaterial und die Dentitionen von *Propalaeochoerus pusillus* zählen. Details zur geologischen Situation, sowie eine Liste der bekannt gewordenen Vertebraten, finden sich bei Seemann & Berckhemer (1930).

## 2.2 Steinheim am Albuch

Die auf der östlichen Schwäbischen Alb (Baden-Württemberg, Deutschland) in einem mittelmiozänen Meteorokrater gelegene Fossilfundstelle Steinheim am Albuch hat in ihren Seeablagerungen eine außergewöhnlich reiche, vielfältige und hervorragend erhaltene Fauna und Flora überliefert, die für die Säugerzone MN7 charakteristisch ist.

Postcraniale Skelettelemente von Vertretern der Familie Suidae sind in stratifizierten Fundstellen vergleichsweise rar oder fehlen ganz, so z. B. auch in der Fundstelle Ulm-Westtangente, die sonst umfangreiches Fundmaterial erbracht hat (Heizmann et al. 1989, Hellmund 1991). Insofern ist der teilweise artikulierte Hinterfuß eines *Conohyus simorreus* (Fam. Suidae) aus Steinheim am Albuch ein besonders bemerkenswertes Einzelstück (Heizmann & Reiff 2002).

## 3. Material und Bearbeitungsmethode

Das Vermessen der Knochen wurde mit einer mechanischen Uhrenschieblehre von Hand vorgenommen. Die Meßstrecken orientieren sich an der von v. d. Driesch (1976) empfohlenen Methode und sind damit „standardisiert“. Die jeweiligen Meßwerte sind dadurch mit den in analoger Weise vermessenen Knochen unmittelbar vergleichbar. Hinsichtlich der Terminologie und der topographischen Lagebezeichnung am Skelett wird Bezug auf Schmid (1972) genommen, die deutschen Bezeichnungen der Taxa sind Wandrey (1987) entlehnt.

Folgende Objekte haben Eingang in die Untersuchungen gefunden:

### fossil:

- **Sammlung „Tertiäre Säugetiere“ des Staatlichen Museums für Naturkunde, Stuttgart (SMNS):**

zahlreiche isolierte, postcraniale, teils fragmentäre Skelettelemente aus der untermiozänen (MN 1) Karstspaltenfüllung Tomerdingen, SMNS (Nr. 47241a – 47288h) (Maße siehe: 9. Anhang): Atlas (5), Vertebrae cervicales (7), Vertebrae thoracales (11), Vertebrae lumbales (8), Costae (46), Scapula (10), Humerus (22), Ulna (11), Radius (29), Scaphoideum (5), Lunatum (11), Triquetrum (3), Pisiforme (9), Capitatum (7), Hamatum (8), Metacarpale II (4), Metacarpale III (21), Metacarpale IV (16), Metacarpale V

(11), anteriore Grundphalanx III/IV (23), anteriore Mittelphalanx III/IV (23), anteriore Endphalanx III/IV (17), Sacrum (1), Pelvis (32), Femur (18), Patella (10), Tibia (33), Fibula (3), Calcaneus (30), Astragalus (25), Cuboid (15), Naviculare (13), Cuneiforme I (4), Cuneiforme III (5), Metatarsale II (18), Metatarsale III (12), Metatarsale IV (21), Metatarsale V (5), posteriore Grundphalanx III/IV (31), posteriore Mittelphalanx III/IV (24), posteriore Endphalanx III/IV (13);

teilweise artikulierter Hinterfuß eines *Conohyus simorreus* (Fam. Suidae) aus Steinheim am Albuch, Mittelmiozän (MN 7), SMNS Inv. Nr. 44391, s. Abb. 131, S. 130, Heizmann & Reiff (2002).

### rezent:

- **Osteologische Sammlung des Staatlichen Museums für Naturkunde, Stuttgart (SMNS):**

*Sus scrofa* (weibl.), postcraniales Skelett (mit Schädel), adult, nicht montiert, Inv. Nr. SMNS 32081

*Sus scrofa* (weibl.), postcraniales Skelett (ohne Schädel), nicht montiert, Inv. Nr. SMNS 38184

*Sus scrofa* (Geschlecht ?), postcraniales Skelett (ohne Schädel), nicht montiert, Inv. Nr. SMNS 32082

*Tayassu tajacu* (Halsbandpekari), (Geschlecht ?), postcraniales Skelett (ohne Schädel), adult (Epiphysenfugen geschlossen), nicht montiert, Zoo Valparaiso, Inv. Nr. SMNS 16853

*Tayassu tajacu* (Halsbandpekari), (männl.), postcraniales Skelett (mit Schädel), adult, nicht montiert, stark usierte Canini und M3, Brasilien, Inv. Nr. SMNS 16857

- **Sammlung des Institutes für Zoologie der Martin-Luther-Universität (ZNS), Halle (Saale) (IZH – M):**

*Tayassu pecari* (Weißbartpekari), (männl.), montiertes Skelett mit Schädel, subadult (im Zahnwechsel), Inv. Nr. (IZH-M 554)

## 4. Vergleichende osteologische Untersuchungen

Die Merkmale postcranialer Knochenelemente von *Sus scrofa*, *Tayassu tajacu* sowie *Propalaeochoerus pusillus* werden nachfolgend in einer tabellarischen Übersicht detailliert einander gegenübergestellt und die charakteristischen Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten herausgearbeitet (Tab. 1).

Knochentyp	<i>Sus scrofa</i> (rezent) (Fam. Suidae)	<i>Tayassu tajacu</i> (rezent) (Fam. Tayassuidae)	<i>Propalaeochoerus pusillus</i> Untermiozän (MN 1) Tomerdingen
Atlas	Alae gerade (!!) begrenzt, Konfiguration wie bei Tomerdingen	Alae wie bei Tomerdingen, Gelenkfacetten dorsal ein wenig über Alae ragend	bei Suidae Gelenkfacetten distal mit „densartigem“ Fortsatz, Alae sind konvexer, mit gerundetem Rand
Scapula	dorsaler Knochenring mittig erhöht senkrechte Fläche lateral vom posterioren Gelenk rundlich hoch	dorsaler Knochenring mittig erhöht senkrechte Fläche lateral vom posterioren Gelenk quergedehnt niedrig	dorsaler Knochenring mittig flach senkrechte Fläche lateral vom posterioren Gelenk quergedehnt niedrig
Humerus	Proc. coracoideus wulstförmig vorragend, kurz am Vorder rand der Gelenkfacette umbiegend mit Foramen supratrochleare am distalen Gelenkende	Proc. coracoideus körpervwärts gerichtet, schlank, mehr oder weniger unmittelbar am Vorder rand der Gelenkfacette umbiegend - dito - (bei hohem Alter Foramen bisweilen geschlossen)	Proc. coracoideus körpervwärts cranial vorragend, leicht nach innen gebogen, in deutlichem Abstand zur Gelenkfacette - dito -
	distales Gelenk gegenüber Schaft weniger nach körpervwärts verdreht Mittelgrat der distalen Gelenkrolle schräg laterad verlaufend	- dito - wie <i>Sus</i> - dito - wie <i>Sus</i>	distales Gelenk gegenüber Schaft stärker nach körpervwärts verdreht Mittelgrat der distalen Gelenkrolle wulstförmig, weit schräg laterad verlaufend
	Tuber weniger schräg laterad geneigt, fast parallel mit außen	Tuber weniger schräg nach laterad geneigt	medialer Tuber verläuft antero-posterior
	latero-distale Begrenzung der Fossa olecrani wenig abgespreizt	latero-distale Begrenzung der Fossa olecrani stark abgespreizt	latero-distale Begrenzung der Fossa olecrani stark abgespreizt
	Tuber majus (!!) antero-posterior ausgerichtet	Tuber majus (!!) medio-lateral ausgerichtet	- dito - wie <i>Tayassu</i>
Radius /Ulna	Abstand Tuber majus - Gelenkfläche weit nicht verwachsen, keine vollständige Anlagerung	Abstand Tuber majus - Gelenkfläche eng verwachsen	Abstand Tuber majus - Gelenkfläche weit nicht verwachsen, vollständige Anlagerung
Radius	proximales Gelenk steht schräg zum Schaft	proximales Gelenk steht senkrecht zum Schaft	proximales Gelenk steht schräg zum Schaft
	starkes Relief	wenig Relief	Gelenkfläche flach
	Abteilung der Gelenkflächen gerade	Abteilung der Gelenkflächen gerade	Abteilung der Gelenkflächen schräg (s. Humerus distal)
	proximales Lateralende weniger ausgezogen mediale Anlagerungsfläche für Ulna breit, kurz, lateral schmal gratförmig	proximales Lateralende stärker ausgezogen (auch bei juvenilen Individuen) verwachsen	proximales Lateralende stärker ausgezogen Anlagerungsfläche für Ulna über fast gesamte Länge, symmetrisch, in der Mitte geteilt
	distales Gelenkende, antero-posterior breit, starkes Relief	distales Gelenkende, antero-posterior schmal, wenig Relief	distales Gelenkende, antero-posterior schmal, wenig Relief

Ulna	proximales Olecranonende gerade Epiphyse hoch	proximales Olecranonende schräg Epiphyse hoch	proximales Olecranonende schräg Epiphyse kurz
	mediale Gelenkfläche zum Radius winzig klein	proximale Gelenkflächen zum Radius verwachsen	zwei große proximale Gelenkflächen zum Radius
	ausgeprägte Kante vom proximalen Gelenk nach posterodistal (= Medialseite)	Kante fehlt	Kante fehlt
	Schafquerschnitt scharfkantig dreieckig	Schafquerschnitt rundlich dreieckig	Schafquerschnitt rundlich dreieckig
Scapuloideum	ohne postero-proximale Fortsatz proximales Gelenk nicht mediad umbogen	mit postero-proximalem Fortsatz	ohne postero-proximale Fortsatz
	Vorderansicht: proximal breiter als distal	nach mediad umbogen	nicht mediad umbogen
Lunatum (Intermedium)	sehr hoch	distal breiter als proximal hoch	proximal breiter als distal niedrig
	distale Gelenkteilung in Vorderansicht mehr oder weniger symmetrisch	stark asymmetrisch	stark asymmetrisch
	proximale Gelenkfläche: posterior flach, antero-posterior gerade verlaufend	wenig aufgebogen, laterad abgeknickt	posterior aufgebogen, antero-posterior gerade verlaufend
	distale Gelenkfläche: Gelenk mit Capitatum steil, konkav	weniger steil, konvex	Gelenk mit Capitatum steil, konkav
	Gelenk mit Hamatum breit	schmal	sehr breit
	posteriore Ansicht: proximal gerade abgestutzt, distal eben	- dito -	proximal spitz; distal konkav
	laterale Ansicht: Tiefe länger	Tiefe kurz	Tiefe länger
	proximales Gelenk zum Ulnare (Triquetrum): in antero-posteriorer Achse	aufgebogen	stark aufgebogen
	distales Gelenk zum Ulnare nach rostral geneigt	- dito -	nach posterior geneigt
	Medialansicht: proximale Gelenkfläche zum Radiale kräftig	schwächer	schwach
Triquetrum (Ulnare, Pyramidale)	proximale Gelenkfläche: breit, posterior stark nach distal ausgezogen	schmäler, posterior stark nach distal ausgezogen	schmal, wenig nach distal ausgezogen
	Gelenkfläche des Pisiforme schmal, lang, steil stehend	- dito -	kurz, breit, flach stehend

	distale Gelenkfläche (= Gelenk zum Hamatum) antero-posterior lang, konkav	antero-posterior lang, konkav	fast eben
Pisiforme	Gelenk zum Lunatum (Intermedium), groß dreieckig hoch, konvex nach lateral, kurz breiter	klein, geteilt - dito -	klein, dreieckig niedrig, konvex langgestreckt schmal
	Gelenk zum Triquetrum (Ulnare): hoch, breit	hoch, schmal	rundlich
	postero-distal vom Gelenk Ausziehung nach distal	- dito -	Ausziehung fehlt
Trapezium Trapezoidium (= Carpale I / II)	-	-	-
Capitatum, Magnum (= Carpale III)	proximale Gelenkfläche: anterior breit, Radiale gelenkfläche nur wenig größer als Lunatumgelenkfläche (Intermedium)	- dito -	schmal (besonders im posterioren Anteil)
	weniger steil	- dito -	Gelenkfläche zum Lunatum sehr steil
	distale Gelenkfläche: anterior breit	- dito -	schmal
	posteriore Gelenkung zum Mc III steil stehend, zugehöriger Fortsatz kurz	Gelenkfläche deutlich flacher, Fortsatz kurz, stumpf	posteriore Gelenk wie Sus, Fortsatz stärker ausgezogen
	Vorderansicht breit, distaler Rand asymmetrisch	weniger breit asymmetrisch	weniger breit fast symmetrisch konkav
	Gelenkfläche zum Hamatum, antero-distal flach (eben)		
	posteriorer Fortsatz wenig nach distal ausgezogen, stumpf endend	- dito -	stark nach distal ausgezogen, spitz endend
	mediale Ansicht Gelenkung zum Carpale II (Trapezoidium), schmale proximale und distale Lippe	- dito -	kräftige posteriore und anteriore Gelenkfläche
Hamatum (Uncinatum, Unciforme)	proximale Gelenkfläche: Lunatum-Gelenkfläche schräg stehend	- dito -	steil stehend
	Gelenkfläche zum Triquetrum posterior nach distal abgebogen	nach posterior eingetieft	schwach eingetieft
	distale Gelenkfläche: nicht feststellbar	groß, „V“ förmig Rinne dazwischen tief medialer Gelenkteil nach medial vorspringend	- dito - kurz nicht nach medial vorspringend

	Vorder-/Lateralansicht:	posteriorer Fortsatz medial, stark ausgezogen	- dito - mässig gelegen stumpf
	posteriorer Distalrand konkav	- dito - konvex	- dito - konvex
	anterioren Distalrand mehr oder weniger waagrecht	- dito - konvex	- dito - konvex
	mediale Ansicht: posteriorer Fortsatz, hoch wulstig	hoch, sattelförmig stark reduziert	niedrig dreieckig mit Einbuchtung der Mediaalseite
Mc II	proximales Gelenk: dreieckig		
	distales Gelenk: Mittelgrat nur im posterioren Teil entwickelt, stark asymmetrisch	Mittelgrat, fehlend	wie bei <i>Sus</i>
Mc III	proximales Gelenk: mit langem, posteriorem nach proximal aufgebogenem Fortsatz	mit kurzem, horizontal gebogenem Fortsatz	mit langem nach distal gebogenem Fortsatz
	posteriore Gelenkfläche: nicht feststellbar	schräg stehend, sowohl nach anterior als auch nach posterior abgewinkelt	zum Mc IV, senkrecht stehend
	anteriore Gelenkfläche zum Mc IV wenig geneigt	steil stehend	schräg, eher wie bei <i>Sus</i>
	distale Trochlea: Mittelgrat über gesamte Gelenkfläche reichend	Mittelgrat über gesamte Gelenkfläche reichend	Mittelgrat nur auf dem hinteren Teil der Trochlea vorhanden
	Schaff unmittelbar über der Trochlea, grubig	nicht grubig	wie bei <i>Sus</i>
	medialer Teil der Trochlea weiter nach distal reichend als der laterale Teil	- dito -	Unterschied
Mc IV	Schaffquerschnitt, gerundet dreieckig	- dito -	dreieckig
	proximales Gelenkende: breit	- dito -	schmal
	posteriorer Fortsatz: horizontal, schmal, lang	nach distal kurz, spitz	nach proximal breit, lang
	anteriore Gelenkfläche: zum Mc III, steil stehend	- dito -	schräg
	proximal über Mc III übergreifend	- dito -	nicht übergreifend
	distal Gelenk wie Mc III	- dito -	- dito -
	anteriores Gelenk zum Mc III, nicht feststellbar	rundlich mit horizontalem Knick	dreieckig, senkrecht stehend

	Mc III - IV, vollständig getrennt	über die gesamte Länge eng aneinander (Rauigkeit)	wenn, dann nur im proximalen Teil aneinander liegend („Tendenz bzw. Trend“ zu taysassuitem Merkmal, s. auch Radius/Ulna)
Mc V	proximales Gelenkende: anterior steil stehende Facette zum Mc IV im rechten Winkel Facette für Hamatum, leicht sattelförmig	distale Trochlea (s. Mc III)	distale Trochlea (s. Mc III)
Pelvis (Acetabulum)	Fovea enger, rundlich	Fovea weit, rundlich	Fovea weit, nach lateral spitz endend
	ventraler Iliumansatz	- dito -	- dito -
	Muskelgrube medial	Muskelgrube ventral	Muskelgrube ventral
	Tuber, medial vom Acetabulum stark	Tuber, medial vom Acetabulum schwach	Tuber, medial vom Acetabulum sehr schwach, gratförmig
	Ilium zw. Acetabulum und Sacrumansatz mittel (d. h. dazwischen)	Ilium zw. Acetabulum und Sacrumansatz lang	Ilium zw. Acetabulum und Sacrumansatz kurz
Femur	Verdrehung proximales Gelenk gegen distales Gelenk stark	- dito - schwächer	?
	prox. Gelenk: Fovea capitis rinnenförmig klein (kurz)	prox. Gelenk: Fovea capitis oval, nicht eingetieft	prox. Gelenk: Fovea capitis rinnenförmig lang
	Caput quergelängt	- dito -	Caput mehr rundlich
	Abstand zw. Gelenk - Trochanter majus mittel	kurz	lang
	Trochanter majus, antero-posterior > lang	Trochanter majus, antero-posterior > lang	Trochanter majus, antero-posterior > kurz
	Hinterrand Trochanter majus stark wulstförmig, konkav	- dito - scharfkantig, konkav	- dito - wulstförmig, gerade
	dist. Gelenk (zur Tibia) schräg	dist. Gelenk (zur Tibia) fast schaft-parallel	dist. Gelenk (zur Tibia): vermittelnd (mehr <i>Sus</i> -ähnlich)
	anteriores Ende der Grube zw. den Tibiagelenken tief	- dito - seicht	- dito - seicht
Patella	längsoval, ohne distalen Fortsatz	längsgestreckt (cf. Ruminantia), mit ausgeprägtem distalen Fortsatz, insgesamt schlank	kurz, trapezförmig, distaler Fortsatz extrem kurz
	Gelenkfläche symmetrisch geteilt, Teilung schwach	- dito - Teilung scharf	Gelenkfläche asymmetrisch geteilt, Teilung vermittelnd

	mediale Gelenkfläche nicht ausgezogen	- dito - ausgezogen
	Patella im Verhältnis zur Breite hoch	- dito - mittel
Tibia	medialer Schafttrand, massiver als bei Tayassuidae konkav	medialer Schafttrand wenig massiv
	Ansatz f. Patellaschne, lang mediale Rinne am Gelenk	- dito - kurz (sehr ähnlich <i>T. tajacu</i> )
	schräger Längsgrat, posterior vom Gelenk ausgehend, schwach	- dito - schmal tief
	schmal, tief	- dito - stark (sehr ähnlich <i>T. tajacu</i> )
	distales Gelenk schmal, quergeböhnt	- dito - vermittelt
	Malleolus medialis, vermitelnd (breit)	- dito - spitz schlank
	laterale, distale Sehnenrinne lateral	- dito - lateral
	Vordergrat lang, abmählich in Schaft übergehend	- dito -, kurz, gegenüber Schaft bisweilen abgesetzt
Astragalus	kürzer als bei <i>P. pusillus</i>	lang (!), gestreckt durch die Verlängerung des Tibiagelenkes
	Calcaneusgelenk mit medialer Lippe	ohne Lippe
	Cuneiformgelenk (= distal), breit	schmaler
	Tibiagelenkrinne, breit	schmaler
	Facies articularis calcanei endet prox. in schwacher Eintiefung	starker Eintiefung
	proximales mediales Tibiagelenkende, ausgezogen	ausgezogen
Calcaneus	prox. Gelenkende hoch, breit	niedrig
	posterior breit	posterior schmal
	Sustentaculum tali, rundlich gewölbt	extrem schwach
	Astragalusgelenkfläche am Sustentaculum tali, mit medialem Knick (cf. Astragalus > Lippe)	rundlich konkav
	zwischen Astragalus und Fibulagelenk keine Rinne	deutlich, laterad durch Knochenbrücke begrenzte Rinne

	Cuboidgelenkfläche eher flach	stärker konkav	eher flach
	Rinne für Achillessehne, kurz	lang	kurz
	lateral-distal schwache Rinne	keine Rinne	deutliche Rinne
Cuboid	kurz niedrig	kurz niedrig	hoch schmal
	proximales Cuneiformgelenk groß	klein	winzig schmal, hoch
	posteriorer Fortsatz am Astragalusgelenk breit, hoch	breit, niedrig	wenig nach distal ausgezogen
	Calcaneusgelenk stark nach distal ausgezogen	- dito -	- dito -
	Calcaneusgelenk ohne Verbindung zum posterioren Astragalus- gelenkfortsatz	- dito - auf den posterioren Gelenkfortsatz hinaufgezogen	- dito -
	distales Metapodialgelenk lateral mit kleiner zusätzlicher Gelenkfläche (> Mt V)	ohne zusätzliche Gelenkfläche (Hinweis: Reduktion des Mt V)	distales Metapodialgelenk lateral mit kleiner zusätzlicher Gelenkfläche, (> Mt V offenkbar noch vorhanden) (plessomorph I)
	zwischen Metapodialgelenk (Mt IV) und posteriorem Fortsatz, enge Rinne	- dito -	breite Rinne
	distaler posteriorer Fortsatz, breit, hoch	breit, niedrig	schmal, hoch
Cuneiforme („proximales“)	proximale Gelenkfläche breit	schmal	breit
	lateral Anteil	wenig abgeknickt	vermittelt
	stark abgeknickt (fast senkrecht)		
	posteriorer Fortsatz stark, massig	fehlend	stark, schlank
	distale Gelenkfläche, breit	kurz	breit
Cuneiforme („distale“)	proximale Gelenkfläche, fast eben	konkav	leicht konkav
	distale Gelenkfläche, leicht sattelförmig	-	leicht sattelförmig
Cuneiforme („distale“) (klein)	proximale Gelenkfläche, konvex	konvex	konkav
	gesamter Knochen distal breit	kurz	gestreckt
	Seitenansicht dreieckig	Seitenansicht rechteckig	Seitenansicht rechteckig
Mt III	massig, relativ wenig reduziert	schlank dünn, stark reduziert	schlank, lang, weniger reduziert als bei <i>Tayassu</i>

	distales Gelenk breit, wohl entwickelt Mt III / IV getrennt	reduziert, sehr ähnlich <i>Propalaeochoerus</i> proximal verwachsen	reduziert, sehr ähnlich <i>Tayassu</i>
Mt III, proximal (= der kürzere Strahl)	posteriorer Fortsatz massig Übergang von medialer Seite zur Vorderseite gerundet	wegen Verwachsung nicht feststellbar - dito -	Mt III / IV getrennt
Mt III, distal	Gelenk posterior mit scharfem Teilungsgrat		schmal scharfkanig
Mt IV, proximal (= der längere Strahl)	Übergang zur lateralen Seite gerundet Gelenk posterior	ohne scharfen Teilungsgrat - dito -	mit scharfem Teilungsgrat kantig
Mt IV, distal	mit scharfem Teilungsgrat proximales Gelenkende: Gelenkfläche für Mt III, länger	ohne scharfen Teilungsgrat	mit scharfem Teilungsgrat
Mt V		vollständig reduziert	Gelenkfläche für Mt III, kürzer
Phalanges anterior / posterior	posteriorer Fortsatz, schlank	- dito -	höher, insgesamt ähnlich <i>Sus</i> - dito -

Tab. 1: Morphologischer Vergleich der postcranialen Knochenelemente.

Tab. 1: Morphological comparison of postcranial bone elements.



Abb. 1 a: Humerus dext., posteriore Ansicht (SMNS 47241a).

Abb. 1 b: Humerus dext., mediale Ansicht, Epiphysenfuge noch nicht verwachsen (SMNS 47241a).

Abb. 2 a: Radius sin., posteriore Ansicht (SMNS 42249).

Abb. 2 b: Radius sin., laterale Ansicht (SMNS 42249).

Fig. 1 a: Humerus dext., posterior view (SMNS 47241a).

Fig. 1 b: Humerus dext., medial view, epiphysis not yet fused (SMNS 47241a).

Fig. 2 a: Radius sin., posterior view (SMNS 42249).

Fig. 2 b: Radius sin., lateral view (SMNS 42249).



Abb. 3: Ulna dext., anteriore Ansicht, distales Ende abgebrochen (SMNS 47253 d).

Abb. 4: Cuboid sin., laterale Ansicht, beachte die kleine viereckige Gelenkfacette (SMNS 47271 c).

Abb. 5: Mc III sin. (SMNS 47266 n), Mc IV sin. (SMNS 47269 c), anteriore Ansicht, beachte die Knochen liegen eng beieinander.

Abb. 6: Mc III sin., laterale Ansicht (SMNS 47266 n).

Fig. 3: Ulna dext., anterior view, distal end broken off (SMNS 47253 d).

Fig. 4: Cuboid sin., lateral view, pay attention to the little quadrangular articulation facet (SMNS 47271 c).

Fig. 5: Mc III sin. (SMNS 47266 n), Mc IV sin. (SMNS 47269 c), anterior view, pay attention to the bones being close together.

Fig. 6: Mc III sin., lateral view (SMNS 47266 n).

Abb. 1-6: Sämtliche Knochen von *P. pusillus*, Maßstab jeweils 2,0 cm. Zeichnungen: W. Hellmund.  
 Figs. 1-6: All bones from *P. pusillus*, scale always 2.0 cm. Illustration: W. Hellmund.



Abb. 7: Mc IV sin.,  
mediale Ansicht (SMNS  
47269 c).

Fig. 7: Mc IV sin., medial  
view (SMNS 47269 c).



Abb. 8: Mt III sin. (SMNS  
47277 f), Mt IV sin.  
(SMNS 47268 a), antero-  
re Ansicht, beachte die  
Knochen liegen eng  
beieinander.

Fig. 8: Mt III sin. (SMNS  
47277 f), Mt IV sin.  
(SMNS 47268 a), anterior  
view, pay attention to the  
bones being close to-  
gether.



Abb. 9: Mt III sin.,  
laterale Ansicht (SMNS  
47277 f).

Fig. 9: Mt III sin., lateral  
view (SMNS 47277 f).



Abb. 10: Mt IV sin.,  
mediale Ansicht (SMNS  
47268 a).

Fig. 10: Mt IV sin., medial  
view (SMNS 47268 a).

Abb. 7-10: Sämtliche Knochen von *P. pusillus*, Maßstab jeweils 2,0 cm. Zeichnungen: W. Hellmund.  
Figs. 7-10: All bones from *P. pusillus*, scale always 2.0 cm. Illustration: W. Hellmund.

## 5. Auswertung

Der osteologische Vergleich zielt im Wesentlichen auf die Vorderextremitäten (Stylo-, Zeugo- und Autopodium) sowie analog auf die Hinterextremitäten. Einbezogen werden die Schulter (Scapula) und das Becken (Pelvis), die aber keine diagnostisch verwertbaren Merkmale lieferten. Dagegen ergaben sich morphologische Differenzen hinsichtlich der Extremitäten. Auch die kleineren Knochenelemente weisen zahlreiche unterscheidende morphologische Details auf, z. B. im Bereich der Basipodien und der proximalen bzw. distalen Metapodialgelenke. Entwicklungstrends lassen sich am besten an den Langknochen erfassen.

Am auffälligsten sind dabei die morphologischen Übereinstimmungen der Langknochen zwischen *Propalaeochoerus* und dem rezenten *Sus scrofa*, wogegen deutliche Unterschiede

zwischen den Langknochen von *Propalaeochoerus* und dem rezenten *Tayassu tajacu* bestehen.

Daraus folgt, dass *Propalaeochoerus* hinsichtlich seiner Skelettkonfiguration eher dem „Typus“ eines Altweltschweines (Fam. Suidae) entspricht, während dessen Gebiss, insbesondere im Hinblick auf die Canini, auf eine den Tayassuiden entsprechende Gebissmorphologie hindeutet (Hellmund 1992).

Die Humeri weisen bei allen drei untersuchten Taxa ein Foramen supratrochleale in der Olecranongrube auf, lediglich bei sehr alten rezenten Tayassuiden kann dieses Foramen auch geschlossen sein. Auffällig ist, dass das distale Humerusgelenk bei *Sus* und *Tayassu* gegenüber dem Schaft etwas nach körperwärts (mediad) verdreht ist. Dementsprechend artikuliert auch das schräg zum Schaft stehende proximale Radiusgelenk. Bei *Propalaeochoerus* ist diese Verdrehung noch stärker ausgebildet. Die funktionsmorphologische

Bedeutung der damit verbundenen Auswärtsdrehung des Ellbogengelenkes bleibt vorerst offen.

Radius und Ulna sind sowohl bei *Sus* als auch bei *Propalaeochoerus* nicht verwachsen. Ein bemerkenswerter Unterschied besteht jedoch darin, dass diese beiden Knochen bei *Sus* keine vollständige Anlagerung aufweisen, während bei *Propalaeochoerus* die vollständige Anlagerung realisiert ist. Besonders gut belegt dies ein Radius (SMNS 47249) mit seiner durchgehend rauhen, konkaven Innenseite. Dies deutet unzweifelhaft die Tendenz zu einer Verwachsung der beiden Knochen Ulna und Radius an, wie sie für die rezenten Tayassuidae typisch ist. Mit der dadurch bewirkten Versteifung hängt möglicherweise auch die Verflachung des proximalen Radiusgelenkes bei *Propalaeochoerus* gegenüber *Sus* zusammen.

An dieser Tatsache lässt sich einer der wenigen formulierbaren Entwicklungstrends, die sich aus den vergleichenden osteologischen Studien ergeben haben, festmachen. Er führt bei den Tayassuiden gegenüber den Suiden zu einer deutlichen Versteifung des Zeugopodiums.

Dennoch sind die Radii und Ulnae bei *Propalaeochoerus* zweifelsfrei getrennte Knochen, die den für die Suidae typischen Primitivzustand noch nicht vollständig aufgegeben haben.

Auch am posterioren Stylopodium (Femur) ließ sich bei *Sus* eine starke Verdrehung des proximalen Gelenkes (Caput femoris) gegen das distale Gelenk (Trochlea femoris) feststellen, die in schwächerer Form auch bei *Tayassu* zu beobachten ist. Das Fehlen vollständiger Femora von *Propalaeochoerus* lässt in dieser Hinsicht keine Aussage zu. Das distale Femurgelenk ist bei *Sus* ebenfalls schräg gestellt. Das betreffende Gelenk bei *Propalaeochoerus* ähnelt diesem.

Bei *Sus* findet sich distal am Cuboid lateral eine kleine zusätzliche Gelenkfläche für das Metatarsale (Mt V). Diese Gelenkfläche ist auch bei *Propalaeochoerus* vorhanden. Das bedeutet, dass bei *Propalaeochoerus* laterale, posteriore Seitenstrahlen definitiv vorhanden waren. Demzufolge handelt es sich auch in diesem Fall beim *Propalaeochoerus* um ein plesiomorphes Merkmal. Im Unterschied dazu fehlt diese Gelenkfläche beim rezenten *Tayassu*, ein Zeichen dafür, dass die lateralen Seitenmetapodien reduziert sind (apomorpher Zustand).

Die Mt III – IV sind sowohl bei *Sus* als auch bei *Propalaeochoerus* voneinander getrennt und repräsentieren somit einen plesiomorphen Zustand, während sie bei *Tayassu* im Adultstadium verwachsen sind und ein Kanonenbein bilden.

Die Verhältnisse der Mc III – IV sind prinzipiell mit denen der Mt III - IV vergleichbar, bei *Sus* sind die beiden Knochen vollständig getrennt und bei *Propalaeochoerus* sind diese, wenn überhaupt, dann nur im proximalen Teil aneinander anliegend. Bei letzterer Konfiguration wird eine, wenn auch nur geringe Tendenz hin zu einer tayassuiden Merkmalskonfiguration sichtbar. Bei *Tayassu* liegen die betreffenden Knochen eng aneinander.

Die weiteren unterscheidenden Merkmale der postcranialen Knochenelemente finden sich in der Tabelle 1.

Bei *Conohyus simorreensis* aus Steinheim am Albuch sind die Mt III und IV völlig getrennte, separate Knochen. Die Seitenmetapodien Mt II und V sind noch vorhanden, sie weisen den gleichen geringen Reduktionsgrad auf. Es handelt sich bei dieser Konfiguration um den Primitivzustand, wie er für Vertreter der Suidae typisch ist.

## 6. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung zielt darauf zu klären, inwieweit die isolierten Skelettelemente aus dem Untermiozän von Tomerdingen hinsichtlich ihrer Morphologie eher der Merkmalsausprägung von sogenannten Altweltschweinen (Fam. Suidae) entsprechen oder ob sich bestimmte Entwicklungstrends bzw. Übereinstimmungen hinsichtlich der Osteologie von Neuweltschweinen (Fam. Tayassuidae) verifizieren lassen.

In einer synoptischen Zusammenschau werden dazu sämtliche Skelettelemente des Stylo-, Zeug- und Autopodiums vom rezenten *Sus scrofa* (Suidae), vom rezenten *Tayassu tajacu* (Tayassuidae) sowie vom untermiozänen *Propalaeochoerus pusillus* (Tayassuidae/Suidae) aus der Karstspaltenfüllung Tomerdingen (Deutschland) morphologisch beschrieben und charakterisiert.

Die dabei festgestellten Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten werden in knapper Form benannt und einander tabellarisch gegenübergestellt. Einige der charakterischen Langknochen von *Tayassu tajacu* und *Propalaeochoerus pusillus* wie Ulna und Radius, die anterioren und posterioren Metapodien (Kanonbeine) werden darüber hinaus auch bildlich dokumentiert (Abb. 1-10).

Eine frühere Untersuchung des Erstautors, bei der die zugehörigen Dentitionen von *Propalaeochoerus pusillus* im Mittelpunkt standen, hat für sich alleine genommen, zu einer Zuweisung zu den Tayassuidae geführt (Hellmund 1992), wäh-

rend die jetzt durchgeführten osteologischen Untersuchungen eine überwiegend primitive (plesiomorphe), den Suiden entsprechende, Merkmalsausprägung zeigen.

Damit ergeben sich aus ein und derselben Fundstelle und auf der Basis ein und desselben Taxons diametral entgegengesetzte Argumente für eine Zuweisung des in Rede stehenden Taxons zu den beiden Familien Suidae und Tayassuidae. Gäbe man den osteologischen Argumenten hierbei das größere Gewicht, so müsste daraus eine Zuweisung zur Familie Suidae folgen. Inwieweit die erwähnte Gebissmorphologie einen phylogenetischen Zusammenhang mit den Tayassuidae begründet oder ob es sich dabei um eine frühe Parallelentwicklung handelt, kann an Hand der vorgenommenen Vergleiche nicht entschieden werden.

Offenbar zeichnet sich hier ein diachroner, jeweils zeitlich verschobener, „mosaikartiger“ Entwicklungsmodus einzelner Merkmale (Gebiß – Skelett) ab, zumindest gilt dies für die Zeit des basalen Miozäns in Europa. Die Gebisse, insbesondere die Canini und die Molaren aus Tomerdingen, sind unabhängig von einer eventuellen Einordnung des Genus *Propalaeochoerus* in eine eigene Familie Palaeochoeridae unzweifelhaft „tayassuid“ und der „modernen“, rezenten Konfiguration weitgehend entsprechend ausgebildet, während das Skelett primitiv, undifferenziert und generalisiert (d. h. „suid“) ist.

Ob man im Fall von *Propalaeochoerus* den odontologischen oder den osteologischen Kriterien mehr Gewicht beimessen will, liegt damit im subjektiven Ermessen des jeweiligen Bearbeiters. Es erscheint daher sinnvoll, vorerst den Terminus *Suoidea* für die gemeinsame Überfamilie zu verwenden und die Zuweisung in die jeweiligen Familien Suidae, Tayassuidae bzw. Palaeochoeridae noch oder wieder offen zu lassen.

Die angeführten Beispiele zeigen, dass zumindest vom Untermiozan (MN1) bis zum höheren Mittelmiozän (MN7) im Postcranialskelett noch keine tayassuiden Merkmale entwickelt waren.

Die Tatsache, dass es in Mitteleuropa nur wenige terrestrische Fundlokalitäten im Obermiozän und Pliozän gibt und bislang auch kein entsprechendes Material vorliegt, erschwert bzw. macht die Lösung dieses Problems gegenwärtig unmöglich. Inwieweit sich die entsprechenden Merkmalskonfigurationen in der Alten Welt oder in der Neuen Welt (z. B. in den südlichen USA, in Mittelamerika oder im nördlichen Südamerika)

definitiv herausgebildet haben, bleibt ebenfalls dahingestellt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass sich die rezenten Tayassuidae neben den verwachsenen Ulnae und Radii und der Ausbildung nahezu vollständig verwachsener Metapodien zu Kanonenbeinen im Adultstadium sowie der Reduktion der posterioren lateralen Seitenstrahlen auszeichnen.

Radius und Ulna sind bei *Sus* nicht verwachsen und sie weisen auch keine vollständige Anlagerung auf, bei *Propalaeochoerus* hingegen ist die Anlagerung vollständig. Offenbar zeichnet sich hier ein Entwicklungstrend ab, der später zu der Konfiguration (Verwachsung) bei *Tayassu* führt und daher besondere Erwähnung verdient.

Heutige Tayassuiden sind auch noch durch das Vorhandensein einer speziellen Talgdrüse auf dem hinteren Teil des Rückens charakterisiert (Nowak 1991). Dieses Merkmal hat ethologische Bedeutung (z. B. beim Sozialkontakt innerhalb der Rotte), es lässt sich naturgemäß im fossilen Fall nicht verifizieren. Die Schwanzwirbelsäule ist bei rezenten Tayassuiden mit lediglich bis zu neun Wirbeln ausgesprochen kurz. Wegen des Fehlens vollständiger Skelette ist dies bei europäischen fossilen Arten nicht nachprüfbar.

## 7. Dank

Für die Bereitstellung und Ausleihe rezenter Vergleichs-Skelette von *Sus scrofa*, *Tayassu tajacu* und *Tayassu pecari* sind wir Frau Dr. D. Mörücke (Staatliches Museum für Naturkunde, Stuttgart) und Herrn Dr. D. Heidecke (Institut für Zoologie, ZNS, der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle a. d. Saale), dankbar verbunden.

Herrn Michael Rothe (†) und Frau cand. geol. K. Bauer (Halle a. d. Saale) danken wir für die Inventarisierung und Beschriftung des fossilen Knochenmaterials aus Tomerdingen. Die Vermessung der Knochen hat dankenswerterweise Frau K. Bauer im Rahmen eines Praktikums am Geiseltalmuseum der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg durchgeführt. Herr Studiendirektor i. R. W. Hellmund (Troisdorf b. Bonn) fertigte die Tuschestrichzeichnungen ausgewählter Knochenelemente in gewohnt sorgfältiger Weise an, wofür wir unseren verbindlichsten Dank sagen. Schließlich bedanken wir uns auch bei Frau Dr. C. Kurz (Naturkundemuseum im Ottoneum, Kassel) und bei Frau PD Dr. G. Rössner (Bayerische Staatssammlung für Paläontolo-

gie und Geologie, München) für die Gutachtertätigkeit.

## 8. Literatur

- Driesch, A. von den (1976): Das Vermessen von Tierknochen aus vor- und frühgeschichtlichen Siedlungen, Institut für Paläoanatomie, Domestikationsforschung und Geschichte der Tiermedizin der Universität. – 113 S. – (Fotokopie, die 2. verb. Aufl. erschien 1982).
- Ginsburg, L. (1974): Les Tayassuidés des Phosphorites du Quercy. – *Palaeovertebrata*, 6 (1): 55-85.
- Heißig, K. (2008): Die fossilen Carnivora, Perissodactyla und Artiodactyla (Mammalia) aus dem Ober-Oligozän von Oberleichtersbach bei Bad Brückenau (Unterfranken). – *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, 260: 253-287.
- Heizmann, E. P. J. (1992): Das Tertiär in Südwestdeutschland. – *Stuttgarter Beitr. Naturk., Ser. C*, 33: 61 S.; Stuttgart.
- Heizmann, E. P. J., Bloos, G., Böttcher, R., Werner, J. & Ziegler, R. (1989): Zwei neue Wirbeltierfaunen aus der Unteren Süßwasser-Molasse (Untermiozän) von Ulm (Baden-Württemberg). – *Stuttgarter Beitr. Naturk., Ser. B*, 153: 4 S.; Stuttgart.
- Heizmann, E. P. J. & Reiff, W. (2002): Der Steinheimer Meteorkrater. – 160 S.; München (Pfeil-Verlag).
- Hellmund, M. (1991): Schweineartige (Suina, Artiodactyla, Mammalia) aus oligo-miozänen Fundstellen Deutschlands, der Schweiz und Frankreichs I. *Hyotherium meissneri* (Suidae) aus dem Untermiozän von Ulm-Westtangente (Baden-Württemberg). – *Stuttgarter Beitr. Naturk., Ser. B*, 176: 69 S.; Stuttgart.
- Hellmund, M. (1992): Schweineartige (Suina, Artiodactyla, Mammalia) aus oligo-miozänen Fundstellen Deutschlands, der Schweiz und Frankreichs II. Revision von *Palaeochoerus* POMEL 1847 und *Propalaeochoerus* STEHLIN 1899 (Tayassuidae). – *Stuttgarter Beitr. Naturk., Ser. B*, 189: 75 S.; Stuttgart.
- Made, J. von der (1994): Suoidea from the Lower Miocene of Cetina de Aragón (Spain). – *Revista Española de Paleontología*, 9 (1): 1-23.
- Made, J. von der (1996): *Albanohyus*, a small Miocene pig. – *Acta Zoologica Cracoviensis*, 39 (1): 293-303.
- Nickel, R., Schummer, A. & Seiferle, E. (1992): Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, 1, Bewegungsapparat. – 626 S.; Berlin (Parey).
- Nowak, R. M. (1991): Walker's Mammals of the World, Vol. II, 5. ed., 1629 pp.; London (The Johns Hopkins University Press).
- Seemann, R. & Berckhemer, F. (1930): Eine Spaltenfüllung mit reicher aquitaner Wirbeltierfauna im Massenkalk des Weißen Jura bei Tomerdingen (Ulmer Alb). – *Paläont. Z.*, 12 (1-4): 14-25.
- Schmid, E. (1972): Atlas of Animal Bones – Knochenatlas. – 159 S.; Amsterdam (Elsevier).
- Wandrey, R. (1987): Die Tiere der Welt, 4, Huftiere. – 160 S.; Gütersloh (Bertelsmann, Lexikothek Verlag GmbH).

## 9. Anhang

Tab 2: Übersicht des überwiegend postcranialen Knochenmaterials von *Propalaeochoerus pusillus* (Ginsburg 1974). Messstrecken nach von den Driesch (1976).

Tab. 2: Overview of mostly postcranial bones from *Propalaeochoerus pusillus* (Ginsburg 1974). Measured distances after von den Driesch (1976).

„Schädel“ (oberer Teil des Kiefergelenks)  
Squamosum

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47262 a	4,00	> 2,50
47262 b	4,00	2,80

### Rumpf

Atlas

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47256 a	2,60	4,70

47256 b	2,80	5,20
47256 c	2,70	ca. 5,00
47256 d	2,50	ca. 4,70

### Schultergürtel und Vorderextremität

Humerus (Stylopodium)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)
47241 a dext. (bestes Exemplar)	12,00
47242 a sin. (prox. fragm.; bestes Exemplar)	> 10,60
47242 b sin. (prox. fragm.; bestes Exemplar)	> 10,50
47248 dext. (prox. Epiphyse fehlt, dist. abgebrochen)	> 8,00

Ulna (Zeugopodium)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)
47252 a dext.	> 7,80
47253 a dext.	> 7,70
47253 b dext.	> 6,90
47253 c dext.	> 7,30

47253 d dext.	> 7,40
47253 e sin.	> 6,60
47253 f sin.	> 7,00
47253 g sin.	> 6,80
47253 h sin.	> 5,30
47253 i sin.	> 5,90
47253 j sin.	> 5,00

## Radius (Zeugopodium)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)
47249 sin. (vollständiges Exempl.)	10,10

**Autopodium anterior**

## Scaphoideum (Radiale)

Inv. Nr. SMNS	Tiefe (cm)	Höhe (cm)	Breite (cm)
47258 a	1,20	0,80	0,50
47258 b	1,25	0,85	0,50
47258 c	1,25	0,80	0,55
47258 d	1,22	0,90	0,50
47258 e	> 1,00	0,90	0,50

## Lunatum (Intermedium, Centrale)

Inv. Nr. SMNS	Tiefe (cm)	Breite (cm)	Höhe (cm)
47259 a	1,40	1,10	0,85
47259 b	1,30	1,20	0,80
47259 c	-	1,20	-
47259 d	1,45	1,25	0,90
47259 e	1,40	1,20	1,0
47259 f	1,40	1,20	0,80
47259 g	1,40	1,20	-
47259 h	1,40	1,10	1,00
47259 i	1,40	1,20	1,00
47259 j	1,41	1,20	1,00
47259 k	1,41	1,20	1,00

## Triquetrum (Pyramidale, Ulnare)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47260 a	1,10	0,81
47260 b	1,10	0,81
47260 c	1,00	0,80

## Pisiforme

Inv. Nr. SMNS	Tiefe (cm)	Höhe (cm)	Breite („bogenform“ messen)
47261 a	1,70	0,60	0,50
47261 b	1,70	0,65	0,55
47261 c	1,70	0,70	0,55
47261 d	1,60	0,70	0,55
47261 e	1,70	0,70	0,60
47261 f	1,70	0,65	0,50
47261 g	1,70	0,75	0,55
47261 h	1,65	0,70	0,50

47261 i	1,65	0,60	0,55
---------	------	------	------

## Capitulum (Magnum, Carpale III)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47263 a dext.	> 1,24	0,84
47263 b dext.	> 1,26	0,90
47263 d dext.	1,45	0,90
47263 e sin.	1,30	0,84
47263 f dext.	1,35	0,90

## Hamatum (Uncinatum, Unciforme)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Höhe (cm)	Tiefe (cm)
47264 a	1,53	1,10	0,90
47264 c	1,53	1,20	1,00
47264 d	-	1,20	-
47264 e	1,56	1,20	-
47264 f	1,60	1,00	0,90
47264 g	1,52	1,10	0,85
47264 h	-	1,10	-

## Metacarpale II (Mc II)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47265 a	3,80	0,73
47265 d	-	0,77

## Metacarpale III (Mc III)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47266 a dext.	4,55	1,10
47266 b dext.	5,40	1,10
47266 c dext.	4,65	1,00
47266 d dext.	5,50	1,10
47266 j sin.	5,55	1,10
47266 k sin.	5,60	1,10
47266 l sin.	5,40	1,10
47266 m sin.	5,30	1,00
47266 n sin.	5,30	1,00
47266 o sin.	5,30	1,10
47266 p sin.	-	1,10
47266 q sin. (Gelenkkopf fehlt)	4,30	-

## Metacarpale IV (Mc IV)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47269 a sin.	5,00	1,25
47269 b sin.	4,90	1,00
47269 c sin.	5,30	1,10
47269 g dext.	5,20	1,10
47269 h dext.	5,20	1,00
47269 i dext.	5,20	1,10
47269 j dext. (Gelenkkopf fehlt)	4,10	1,10
47269 k dext.	5,10	1,00
47269 l dext.	4,20	1,00

(Gelenkkopf fehlt)		
47269 m dext.	4,10	1,10
(Gelenkkopf fehlt)		

## Metacarpale V (Mc V)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47270 d	3,60	0,70
47270 f	3,62	0,60
47270 g (Gelenkkopf fehlt)	3,10	-

## Phalanx III/1, IV/1 (anterior)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (m)
47278 a	2,50	1,10
47278 b	2,50	1,10
47278 c	2,55	1,10
47278 d	2,55	1,10
47278 e	2,55	1,10
47278 f	2,10	0,90
47278 g	2,55	1,90
47278 h	2,50	1,10
47278 i	2,50	1,10
47278 j	2,60	1,10
47278 k	2,40	1,00
47278 l	2,55	1,10
47278 m	2,20	1,00
47278 n	2,55	1,10
47278 p	2,10	0,90
47278 r	2,70	1,10
47278 s	2,50	1,10
47278 t	2,40	0,95
47278 u	2,20	1,00
47278 v	2,65	1,10
47278 w	2,40	1,10

## Phalanx III/2, IV/2 (anterior)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47279 a	-	0,70
47279 b	1,60	0,80
47279 c	1,60	0,80
47279 d	1,55	0,80
47279 e	1,60	0,80
47279 f	1,50	0,80
47279 g	1,55	0,80
47279 h	1,50	0,80
47279 i	1,55	0,85
47279 j	1,50	0,80
47279 k	1,50	0,80
47279 l	1,60	0,80
47279 m	1,55	0,80
47279 n	1,55	0,80
47279 o	1,50	0,80
47279 p	>1,30	0,75
47279 q	1,45	0,80
47279 r	>1,30	0,70

47279 s	>1,20	0,75
47279 t	1,60	0,85
47279 u	1,55	0,80
47279 v	1,55	0,80
47279 w	> 1,30	0,80
47279 y	> 1,20	0,70

## Phalanx III/3, IV/3 (anterior)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47280 a	2,10	0,85
47280 b	2,15	0,85
47280 c	2,10	0,85
47280 d	1,90	0,80
47280 e	2,00	0,80
47280 f	1,80	0,75
47280 g	2,10	0,85
47280 h	2,15	0,85
47280 i	1,80	0,80
47280 j	2,10	0,80
47280 l	1,80	0,80
47280 n	1,85	0,75

**Beckengürtel und Hinterextremität**

Sacrum (nur vorderer Teil erhalten)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47274	-	4,60

## Femur

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)
47239 a sin. (beide Gelenkenden unvollst.)	> 13,00
47239 b sin. (beide Gelenkenden unvollst.)	> 12,00

## Tibia

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)
47237 a sin. vollständig	15,10
47237 b sin. (prox. Gelenk unvollständig)	> 13,40

## Patella

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)	„Dicke“ (cm)
47257 a sin.	2,10	1,60	1,20
47257 b sin.	2,10	1,30	1,20
47257 c sin.	2,00	1,50	1,20
47257 d sin.	2,00	1,50	1,30
47257 e sin.	2,00	1,60	1,30
47257 f sin.	1,90	1,40	1,10
47257 g dext.	2,10	1,40	1,10
47257 h sin.	2,00	1,50	1,20
47257 i sin. (abgerollt)	1,80	1,30	0,80

47257 j sin.	2,00	1,60	1,20
--------------	------	------	------

**Autopodium posterior**

Calcaneus (Fibulare)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47244 a dext.	5,20	2,00
47244 b dext.	4,90	1,90
47244 c dext.	5,00	> 1,70
47244 d dext.	5,10	1,90
47244 e dext.	4,60	1,90
47244 f dext.	4,80	1,80
47244 g dext.	>4,30	1,80
47244 h dext.	4,30	>1,80
47244 i dext.	4,30	2,00
47244 j dext.	>4,10	>1,10
47244 l dext.	>4,10	-
47244 m dext. (fragm.)	-	1,90
47244 o dext. (fragm.)	-	1,90
47244 p dext.	5,00	1,90
47244 r dext. (fragm.)	-	1,90
47245 a sin.	5,50	2,10
47245 b sin.	5,00	2,00
47245 c sin.	4,90	> 1,80
47245 d sin.	5,30	1,90
47245 e sin.	> 4,30	1,80
47245 f sin.	> 4,50	1,90
47245 g sin.	> 4,20	1,80
M 20277 b sin.	5,30	2,10

Astragalus (Talus, Tibiale)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47246 a dext.	2,90	1,80
47246 b dext.	2,90	1,60
47246 c dext.	2,90	1,70
47246 d dext.	2,90	-
47246 e dext.	2,90	1,55
47246 f dext.	2,90	1,70
47246 g dext.	2,90	-
47246 h dext.	2,80	1,60
47246 i dext.	3,00	1,70
47246 j dext.	2,90	-
47246 k dext.	2,90	1,70
47246 l dext.	2,60	-
47246 m dext.	2,90	1,70
47246 n dext.	2,70	-
47246 o dext.	2,80	-
17247 dext.	2,90	1,80
47247 a sin.	2,90	1,70
47247 b sin.	2,80	-
47247 c sin.	2,80	1,70
47247 d sin.	2,90	1,60
47247 e sin.	2,90	1,60
47247 g sin.	2,70	1,60
M 20277 a sin.	2,90	1,70

Cuboid

Inv. Nr. SMNS	Tiefe (cm)	Höhe (cm)	Breite (cm)
47271 a dext.	1,50	> 2,10	0,95
47271 b dext.	1,60	> 1,90	1,00
47271 c dext.	1,70	2,30	1,00
47271 d dext.	1,60	>1,90	0,95
47271 e dext.	1,65	>1,90	1,10
47271 f dext.	1,60	2,20	1,05
47271 g dext.	1,60	2,20	1,00
47271 h dext.	1,55	2,10	0,95
47271 i dext.	1,65	2,20	1,05
47271 j dext.	1,50	>2,20	1,00
47271 k sin.	1,20	2,10	1,00
47271 l sin.	1,55	2,10	0,95
47271 m sin.	1,60	2,15	1,00
47271 n sin.	1,60	2,20	1,10
47271 o sin.	1,65	2,10	1,10

Naviculare (Centrale)

Inv. Nr. SMNS	Höhe (cm)	Tiefe (cm)	Breite (cm)
47272 a dext.	1,80	1,90	1,10
47272 b dext.	1,60	1,70	1,00
47272 c dext.	1,55	1,80	0,90
47272 d dext.	1,60	1,85	1,10
47272 e dext.	1,55	1,75	1,05
47272 f dext.	>1,40	1,50	1,00
47272 g dext.	1,40	1,65	0,90
47272 h sin.	-	-	0,95
47272 j sin.	1,65	1,90	1,10
47272 k sin.	1,60	1,80	1,05
47272 m sin.	-	-	1,00

Cuneiforme I

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47273a sin.	1,10	0,70
47273b sin.	1,15	0,70
47273c dext.	1,00	0,60
47273d dext.	1,10	0,60

Cuneiforme III (Ectocunifforme)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47275 a sin.	1,00	0,70
47275 b sin.	0,95	0,70
47275 c sin.	1,00	0,70
47275 d dext.	1,00	0,80
47275 e dext.	1,00	0,70

Metatarsale II (Mt II)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47265 e dext.	5,10	0,80
47265 f dext.	5,10	0,82

## Metatarsale III (Mt III)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47277 a sin.	> 6,30	-
47277 e sin.	> 6,60	-
47277 f sin.	7,00	1,25
47277 g dext.	7,30	1,30
47277 h dext.	> 7,00	-
47277 m dext.	-	1,10

## Metatarsale IV (Mt IV)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47267 a dext.	6,60	>1,10
47267 b dext.	> 6,40	>1,15
47267 c dext.	>5,70	>1,10
47267 d dext.	>6,65	1,15
47267 e dext.	-	1,10
47267 f dext.	-	1,10
47267 i dext.	-	1,60
47268 a sin.	7,00	1,15
47268 b sin.	7,20	1,10
47268 c sin.	>6,70	1,10

## Metatarsale V (Mc V)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47270 a sin.	-	1,10
47270 b sin.	-	1,10
47270 c sin.	-	1,10
47270 l dext.	-	1,10
47270 m dext.	-	1,00

## Phalangen III/IV 1 (posterior)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47281 a	3,00	1,10
47281 b	2,80	1,10
47281 c	3,00	1,10
47281 d	3,00	1,10
47281 e	3,00	1,10
47281 f	3,00	1,20
47281 g	2,90	1,30
47281 h	2,90	1,10
47281 i	3,00	1,20
47281 j	3,00	1,10
47281 k	2,55	1,00
47281 l	2,30	1,10
47281 m	3,00	1,00
47281 n	3,00	1,15
47281 o	3,00	1,10
47281 p	3,00	1,15
47281 q	2,70	1,05
47281 r	2,80	1,05
47281 s	3,00	1,20
47281 t	3,00	1,20
47281 u	3,00	1,10

47281 v	2,40	0,95
47281 w	3,00	1,10
47281 x	2,60	1,00
47281 y	2,90	1,00
47281 z	2,40	2,40
47281 ß	2,95	1,10
47281 ö	2,40	-
47281 ü	2,80	1,10
47281	2,85	1,10

## Phalangen III/IV 2 (posterior)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47282 a	1,70	0,80
47282 b	1,80	0,80
47282 c	1,80	0,80
47282 d	1,80	0,90
47282 e	1,75	0,85
47282 f	1,70	0,90
47282 g	1,70	0,85
47282 h	1,80	0,90
47282 i	1,70	0,90
47282 j	1,80	0,90
47282 k	1,70	0,80
47282 l	1,80	0,85
47282 m	1,70	0,80
47282 n	1,82	0,90
47282 o	1,60	0,85
47282 p	1,70	0,80
47282 q	1,80	0,90
47282 r	1,80	0,90
47282 s	1,75	0,90
47282 t	1,65	0,90
47282 u	1,70	0,85
47282 v	1,60	0,80
47282 w	1,70	0,85
47282 x	1,75	0,85

## Phalanx III/IV 3 (posterior)

Inv. Nr. SMNS	Länge (cm)	Breite (cm)
47283 a	2,20	1,10
47283 b	1,70	1,20
47283 c	2,00	0,95
47283 d	1,80	0,90
47283 e	2,00	1,00
47283 f	1,85	0,90
47283 g	2,00	0,90
47283 h	1,70	0,85
47283 i	1,70	0,90
47283 j	1,10	0,90
47283 k	1,50	0,90
47283 m	1,30	0,80

**Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 191-198, 9 Abb.**  
Halle (Saale), Mai 2011

## **Das Vorkommen von Erzmineralen im Kupferberggreisen am Nordostrand des Ramberges im Harz.**

Johannes Heider und Jürgen Siemroth \*

Heider, J. & Siemroth, J. (2011): Das Vorkommen von Erzmineralen im Kupferberggreisen am Nordostrand des Ramberges im Harz. [The occurrence of ore minerals in the "Kupferberggreisen" at the northeastern margin of Ramberg pluton in the Harz Mountains.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 191-198, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Im Kupferberggreisen konnten die Erzminerale Bismut, Chalkopyrit, Löllingit, Arsenopyrit, Molybdänit und Ferberit mittels EDX-Spektren und Erzmikroskopie identifiziert werden. Ihre Verwachsungen werden mitgeteilt.

**Abstract:** The ore minerals bismuth, chalcopyrite, löllingite, arsenopyrite, molybdenite and ferberite could be identified within the Kupferberggreisen by using EDX spectra and ore microscopy.

**Schlüsselwörter:** Kupferberggreisen, Bismut, Chalkopyrit, Löllingit, Arsenopyrit, Molybdänit, Ferberit, EDX

**Keywords:** "Kupferberggreisen", bismuth, chalcopyrite, löllingite, arsenopyrite, molybdenite, ferberite, EDX

---

\* Anschriften der Verfasser:

Dr. Jürgen Siemroth (juergen-siemroth@t-online.de), An der Magistrale 19, D-06124 Halle (Saale);  
Johannes Heider (heider\_johannes@web.de), Goethestraße 22, D-08060 Zwickau.

## 1. Einleitung

Erdmannsdorfer (1914) beobachtete am Nordostrand des Ramberggranits ein greisenähnliches Gestein, welches er neutral als Quarzglimmergestein bezeichnete. Er teilte ohne nähere Beschreibung mit, dass dieses Gestein Spuren von Chalkopyrit enthält. Kaemmel & Just (1992) bezeichnen dieses Gestein auf Grund geochemischer Untersuchungen als Greisen und berichteten über eine disperse, schwache Sulfidmineralisation mit Pyrit, Chalkopyrit und Arsenopyrit ohne näher auf diese Minerale einzugehen. Kaemmel (1992) teilt mit, dass der Greisen am Kupferberg anscheinend keinen Wolframit führt.

Im Jahre 2000 erhielt ein Autor dieser Publikation (J.S.) von dem Mineraliensammler Gerfried Seidel aus Gernrode, welcher sein Leben auf tragische Weise ein Ende bereite, Funde von Erzmineralen aus dem Kupferberggreisen, welcher er als Arsenopyrit und Molybdänit bezeichnete. Ab dieser Zeit wurde der Kupferberggreisen von Sammlern intensiv beprobt, sodass heute eine Vielzahl von Funden vorliegen.

## 2. Der Kupferberggreisen

Am Nordabhang des großen Kupferberges südwestlich von Gernrode steht der Greisen als Felsen an (Abb. 1). Dort kann auch der Kontakt des Greisen zum Ramberggranit beobachtet werden. Am Abhang zum Hagental in der Nähe des Felsens befinden sich unterschiedlich große Blöcke des Greisen, welche die vorwiegende Fundstelle der Erzminerale sind. Der südwestlich davon liegende größere Teil des Greisen ist bisher nur durch Lesesteine charakterisiert. Dort waren nur vereinzelt Funde von Erzmineralen möglich. Der Greisen selbst besteht vorwiegend aus Quarz und verschiedenen auch Lithium enthaltenden Glimmern, die bisher nicht genau identifiziert sind. Daneben kommen darin auch geringe Anteile von Feldspäten, Chlorit, Andalusit, Fluorit und Zirkon vor (Kaemmel & Just - 1992). Außerdem konnte nun auch schwarzer Turmalin in Form von cm-langen Kristallbüscheln beobachtet werden, die lokal bis zu 30 cm große Aggregate bilden. Wahrscheinlich liegt hier Schörl vor.

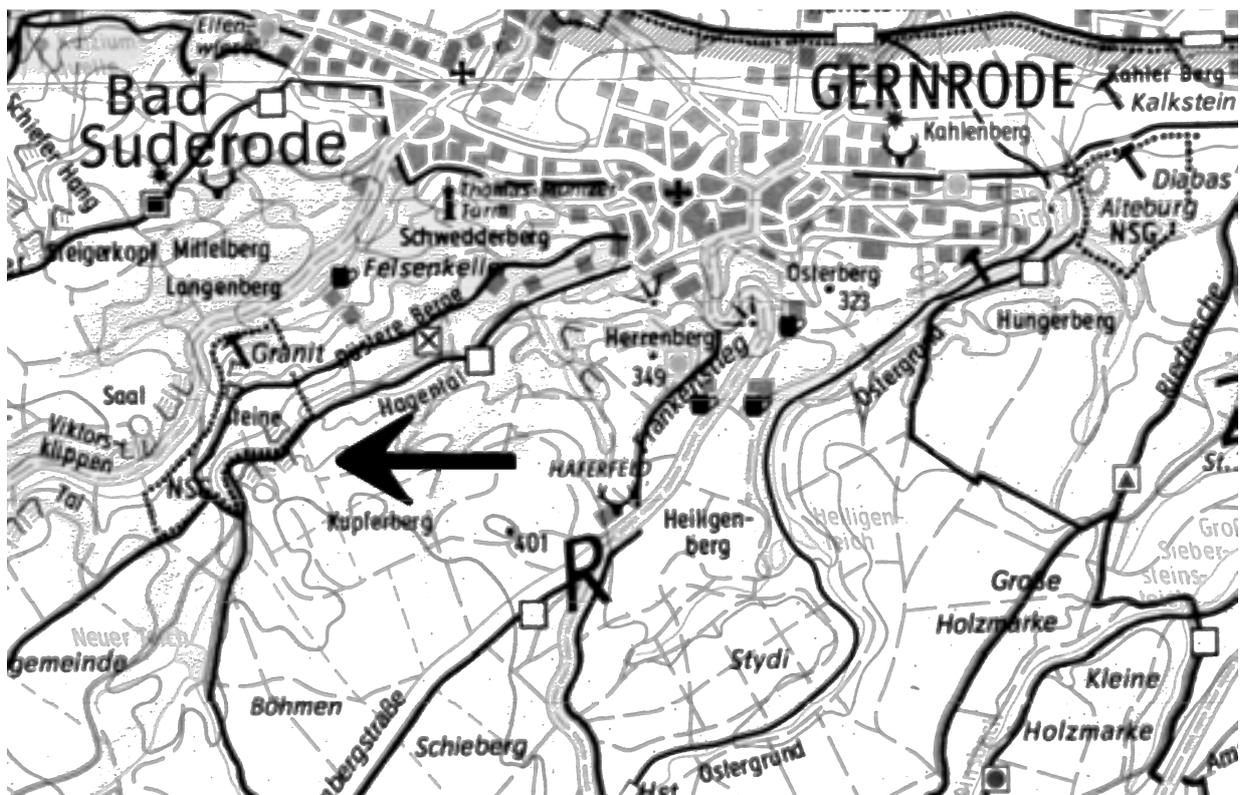


Abb. 1: Lage der Greisenfundstelle am Kupferberg bei Gernrode.

Fig. 1: Position of the Greisen location at the Kupferberg near Gernrode.

### 3. Beschreibung der Erzminerale

Die Erzminerale Arsenopyrit, Löllingit, Molybdänit und Ferberit kommen im Greisen selten als 1-2 cm große unregelmäßig ausgebildeten Aggregate vor, die noch seltener Nester bis zu 10 cm Durchmesser bilden. Alle anderen Erzminerale konnten nur als maximal millimetergroße

Körnchen entweder verwachsen mit anderen Erzmineralen oder im Quarz des Greisens beobachtet werden. Sie werden im Folgenden entsprechend der Systematik von Strunz aufgelistet und beschrieben.

#### Bismut

kommt sehr selten in bis zu 1 mm großen rundlichen Körnern im Quarz vor. Häufiger konnten Bismutkörnchen von maximal 40 µm Größe in Quarz beobachtet werden, die nur erzmikroskopisch zu erkennen waren (Abb.2). Auch in Löllingit und seltener in Arsenopyrit kommen kleine Bismutkörnchen vor. Eine oft beschriebene „Frostsprennung“ der umhüllenden Erze konnte bedingt durch die geringe Größe der Körnchen nicht beobachtet werden. Im Randbereich einiger Körnchen konnte erzmikroskopisch ein weiches graues Erz beobachtet werden. Es könnte sich dabei um Bismutinit handeln. Die geringe Größe erlaubte jedoch keine exakte erzmikroskopische Bestimmung.

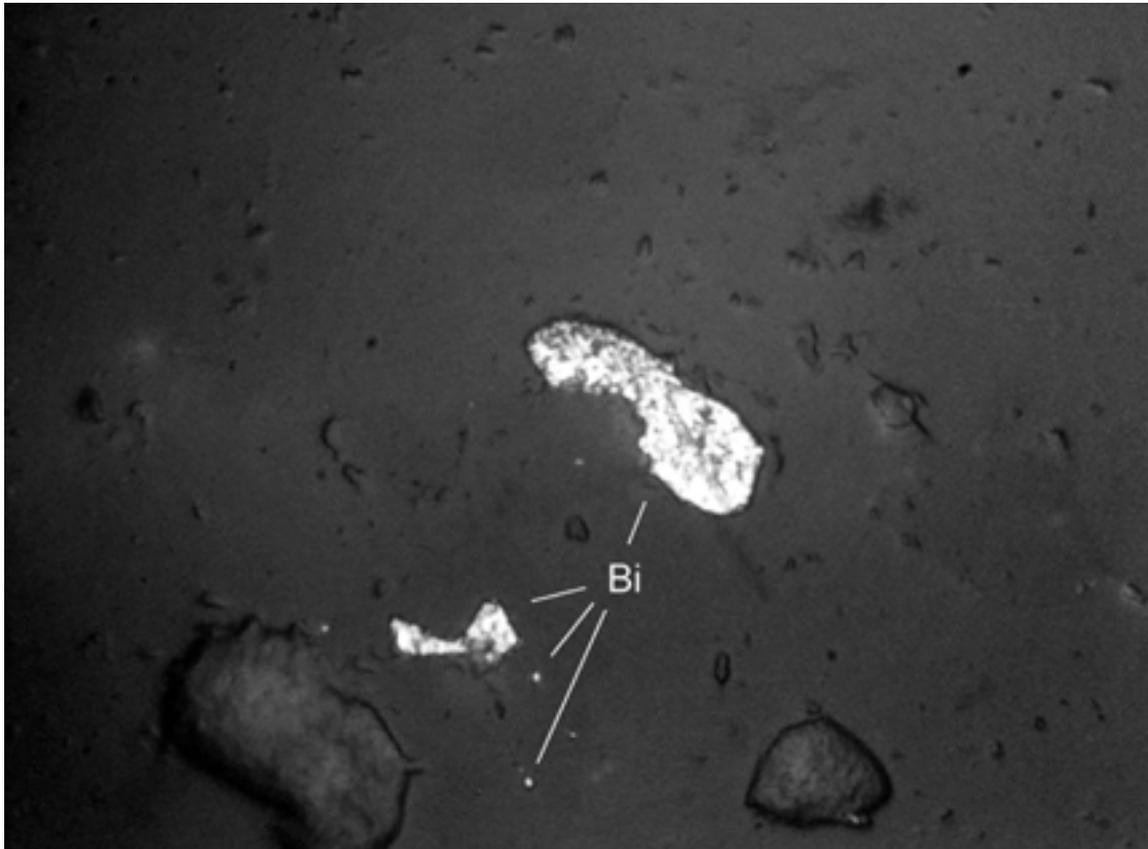


Abb. 2: Bismut (Bi) in kleinen Tröpfchen im Quarz (dunkel). Bildbreite ca. 100 µm, linear polarisiertes Licht.  
Fig. 2: Bismuth (Bi) in small droplets of quartz (dark). Picture size ca. 100 µm, linear polarized light.

#### Chalkopyrit

ist relativ selten. Kleine monomineralische Körnchen kommen im Quarz vor. In Arsenopyrit füllt Chalkopyrit kataklastische Risse aus und erweist sich hier als jüngstes Mineral (Abb. 3).

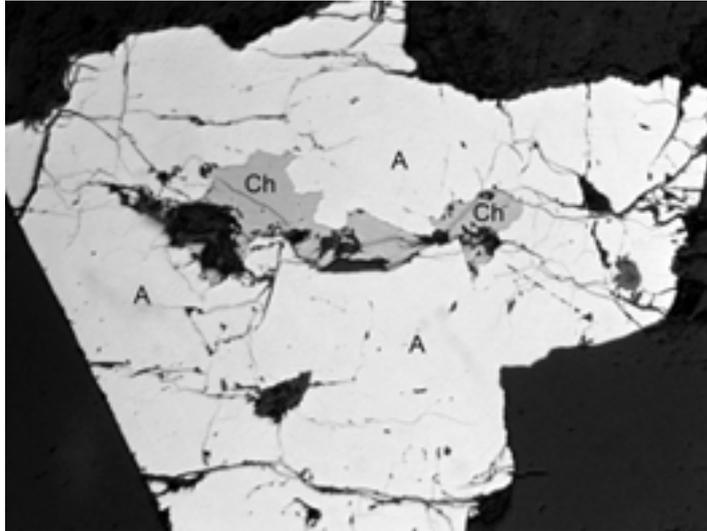


Abb. 3: Chalcopyrit (Ch) mit Arsenopyrit (A) in Quarz (dunkel). Bildbreite ca. 500  $\mu\text{m}$ , linear polarisiertes Licht.  
 Fig. 3: Chalcopyrite (Ch) with arsenopyrite (A) in quartz (dark). Picture size ca. 500  $\mu\text{m}$ , linear polarized light.

### Löllingit

ist im Kupferberggreisen das häufigste Erzmineral. Er bildet grobkörnige xenomorphe Aggregate von mehreren Zentimeter Größe. Makroskopisch ist die Grobkörnigkeit oft schon durch die gut ausgebildete, einheitliche Spaltbarkeit erkennbar. Erzmikroskopisch sind nicht selten Körner von 1 bis 2 cm Größe an ihrer Bireflexion und Anisotropie zu erkennen. Verzilligung und Zonenbau konnten nicht beobachtet werden. Anscheinend verdrängt Löllingit den Glimmer des Greisens. Dabei werden die Quarzkörnchen und Reste der Glimmer übernommen (Abb. 4). Löllingit enthält verbreitet winzige Bismutkörnchen. Daneben konnte Löllingit auch als Einschluss in Arsenopyrit beobachtet werden. REM-EDX-Spektren zeigen, dass im Löllingit der Kobalt- und Nickelgehalt unter 0,5 % liegt (Abb. 5).

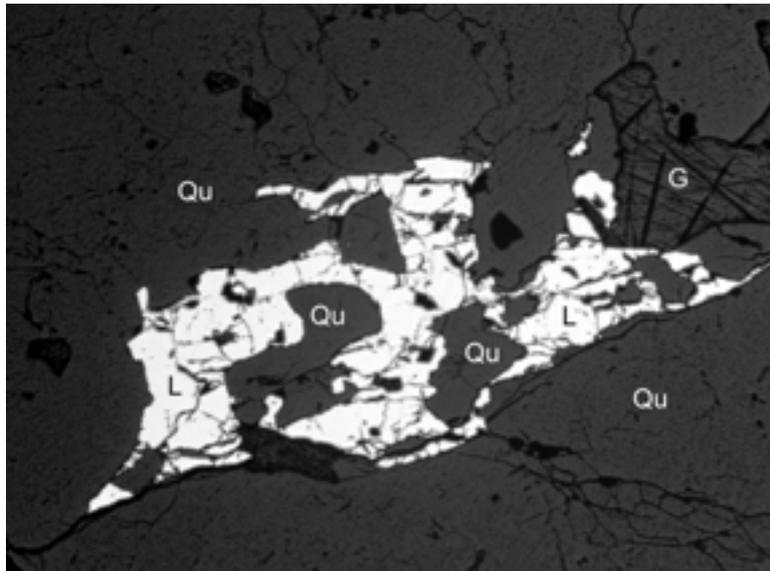


Abb. 4: Angewitterter und von vielen mit niedrig reflektierenden Oxidationsprodukten erfüllten Rissen durchzogener Löllingit (L) verdrängt Glimmer (G) Glimmer und Quarz (Qu). Im Löllingit „schwimmen“ übernommene Quarz-Relikte. Bildbreite ca. 4,5 mm, linear polarisiertes Licht.  
 Fig. 4: Partially weathered löllingite (L) replacing mica (G) Glimmer and quartz (Qu), and passed through by cracks filled with alteration products of low reflectance. Picture size ca. 4.5 mm, linear polarized light.

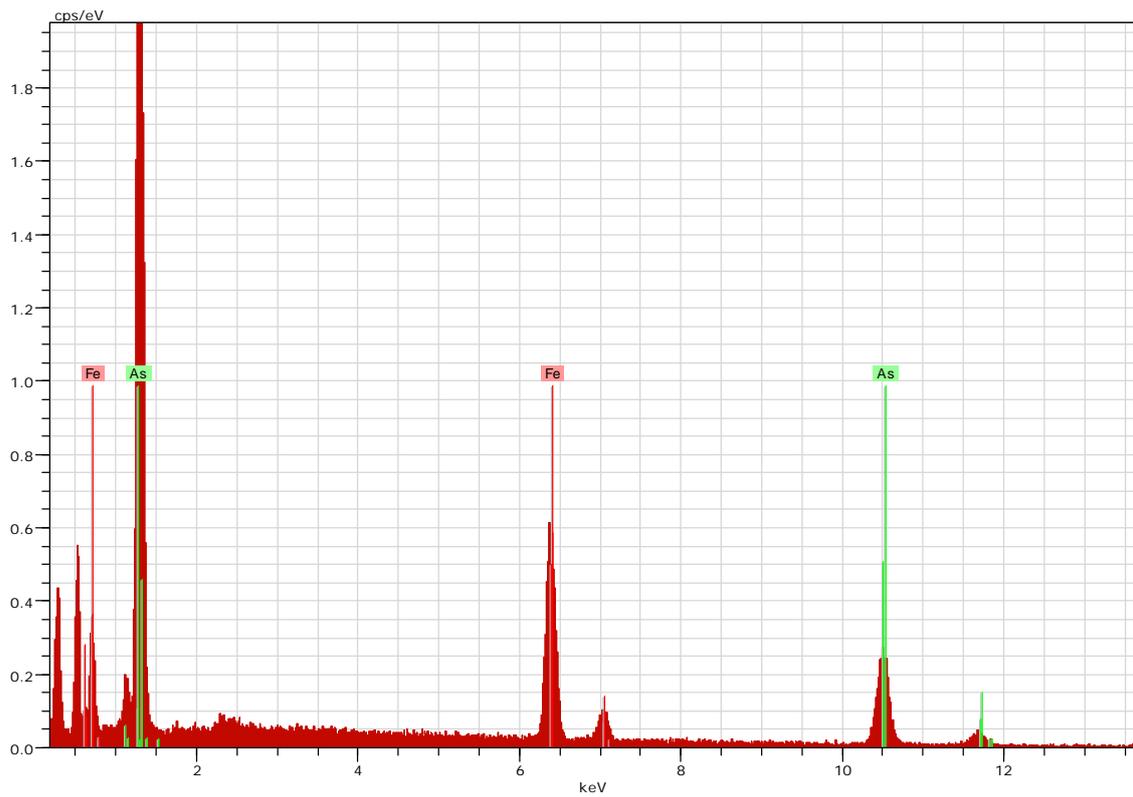


Abb. 5: EDX-Spektrum von Löllingit  
 Fig. 5: EDX spectrum of löllingite.

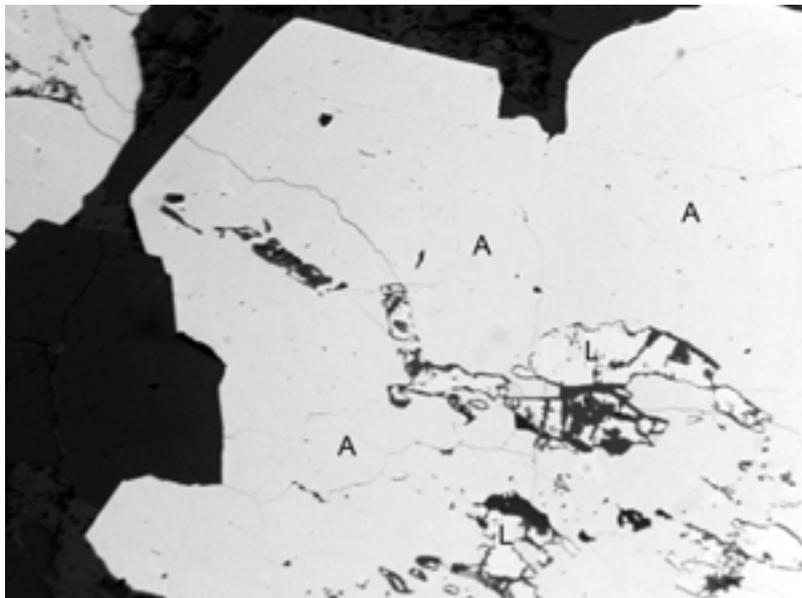


Abb. 6: Idiomorphe Arsenopyrit-Kristalle (A) mit korrodierten Löllingit-Relikten im Kernbereich in Quarz-Matrix (dunkel). Bildbreite ca. 1 mm, linear polarisiertes Licht.  
 Fig. 6: Arsenopyrite crystals (A) with corroded relicts of löllingite in the core, in quartz (dark). Picture size 1 mm, linear polarized light.

## Arsenopyrit

ist nach Löllingit das häufigste Erzmineral. Häufig ist Arsenopyrit idiomorph ausgebildet, jedoch sind die Aggregate kleiner als bei Löllingit. Im Kern solcher Aggregate konnten häufig kleine Löllingitkörner beobachtet werden. (Abb.

6). Wie Löllingit enthält Arsenopyrit selten winzige Bismutkörnchen. REM-EDX-Spektren zeigen, dass auch im Arsenopyrit der Kobalt- und Nickel-gehalt unter 0,5 % liegt. (Abb. 7)

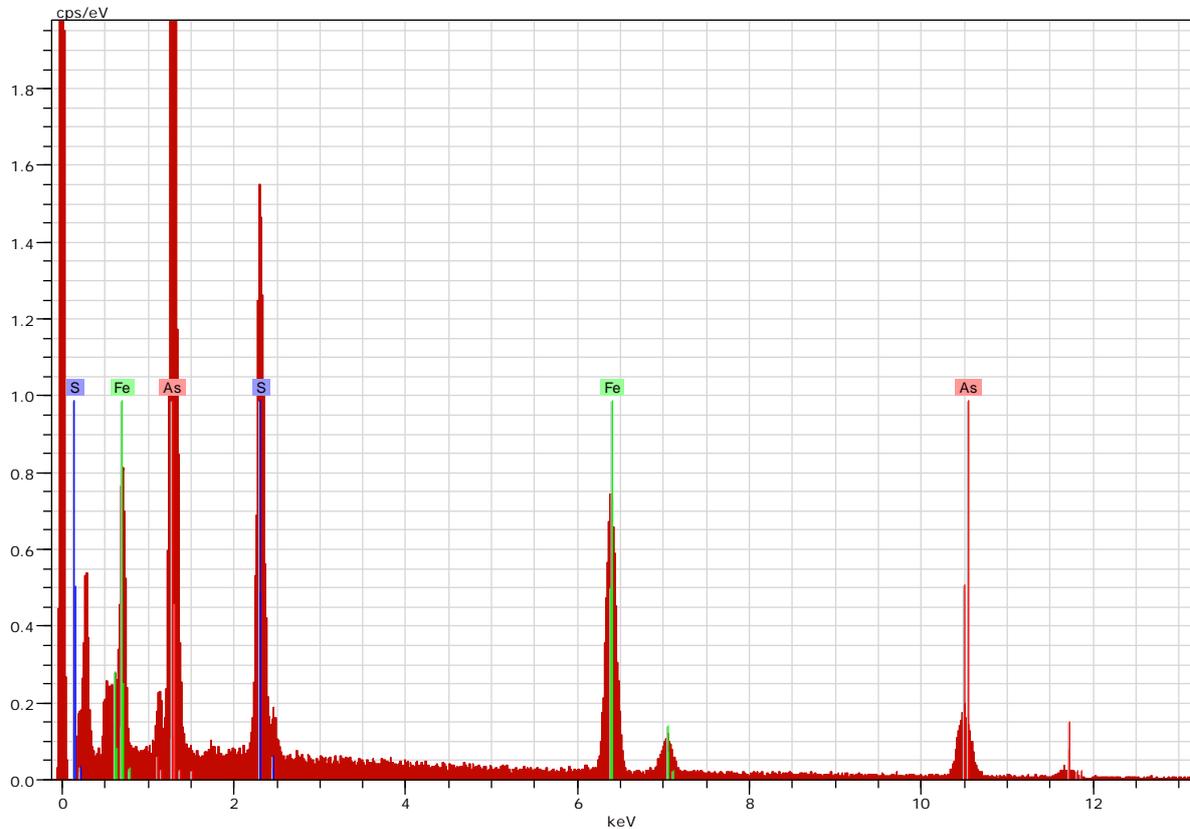


Abb. 7: EDX-Spektrum von Arsenopyrit.

Fig. 7: EDX spectrum of arsenopyrite.

## Molybdänit

kommt seltener vor und bildet im Greisen nur wenige mm große, blättrige Pakete. Noch seltener sind über 1 cm große Aggregate zusammen mit Arsenopyrit in grobkörnigen Greisenschlieren. Daneben kommen auch Einlagerungen von

Molybdänit zwischen Glimmerlamellen vor (Abb. 8). Erzmikroskopisch zeigt Molybdänit häufig die für dieses Mineral typischen Deformationen.

## Ferberit

kommt relativ selten als langprismatische bis dünnplattige Kristallfragmente bis 3 cm Länge bei nur wenigen Millimetern Dicke, meist isoliert, seltener auch in Erzmineralen eingewachsen, vor. Die deutliche Spaltbarkeit ist oft gut zu erkennen, was eine einfache Unterscheidung von dem sehr ähnlich ausgebildeten Turmalin ermöglicht. Erzmikroskopisch zeigt Ferberit aus-

geprägte Idiomorphie (Abb. 9). Auch kann oft eine Zwillingsbildung nach (100) beobachtet werden. Durch REM-EDX-Analysen wurde die Zusammensetzung des Ferberits zu  $(\text{Fe}_{0,79}\text{Mn}_{0,21})\text{WO}_4$  ermittelt. Das Verhältnis von Ferberit zu Hübnerit entspricht etwa dem der Wolframite des Neudorfer Gangzuges.

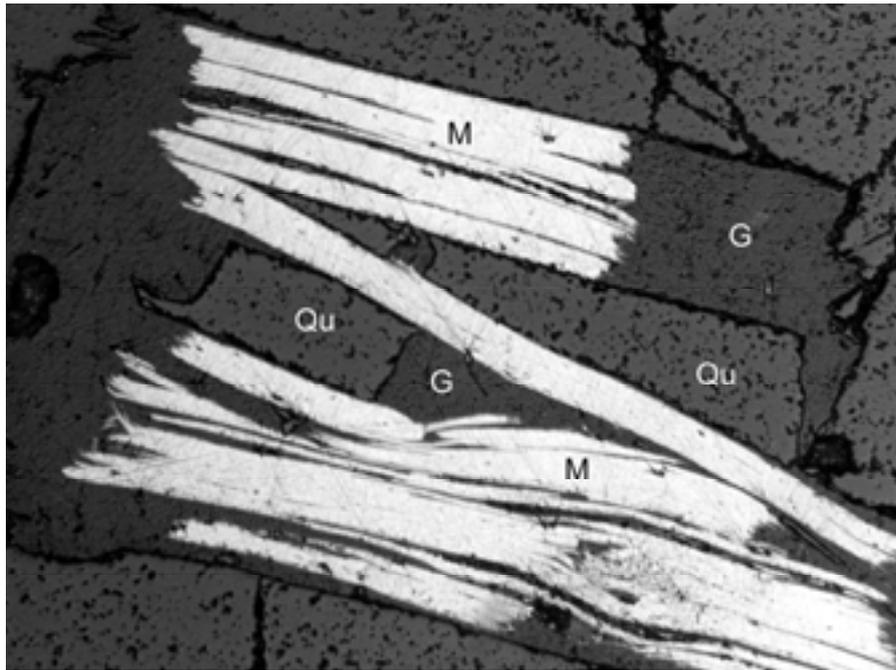


Abb. 8: Molybdänit (M) in Wechsellagerung mit Glimmer (G) in Quarz (Qu). Bildbreite ca. 500  $\mu\text{m}$ , linear polarisiertes Licht.

Fig. 8: Molybdenite intergrown with mica (G) in quartz (Qu). Picture size ca. 500  $\mu\text{m}$ , linear polarized light.

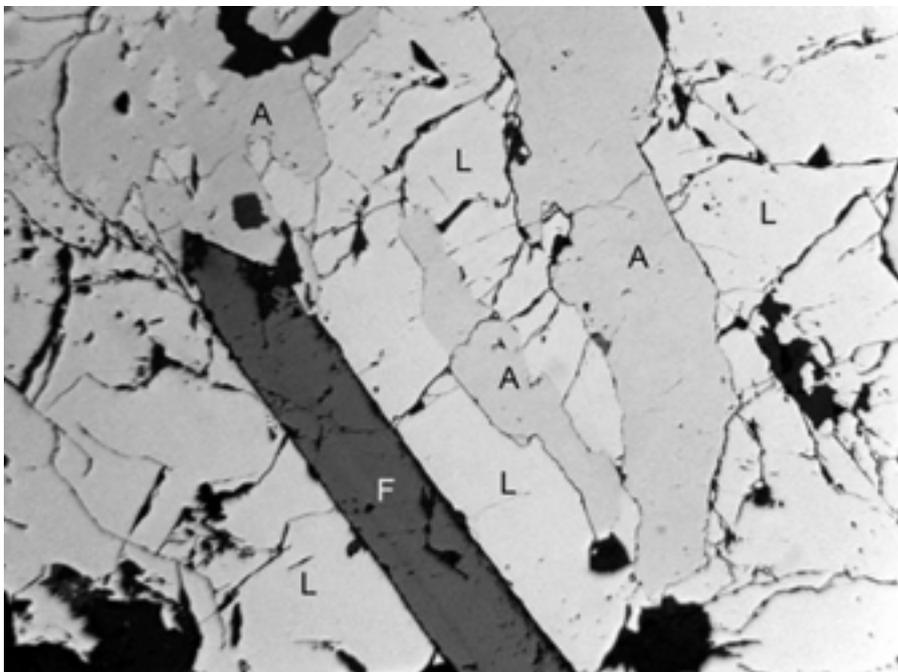


Abb. 9: Idiomorpher Ferberit-Kristall (F) mit schwach erkennbarer lamellarer Zwillingsbildung in stark rissigem Löllingit (L) und Arsenopyrit (A). Die Risse sind von Oxidationsprodukten erfüllt. Bildbreite ca. 2 mm, linear polarisiertes Licht.

Fig. 9: A ferberite crystal (F) with weakly discernible lamellar twinning in cracked löllingite (L) and arsenopyrite (A). The cracks are filled with alteration products. Picture size ca. 2 mm, linear polarized light.

#### 4. Danksagung

Herrn Dr. W. Erfurth, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle sind wir für die Anfertigung der REM-EDX-Spektren und Analysen sehr zum Dank verpflichtet. Herrn Dr. Th. Witzke, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, las dankenswerterweise eine frühere Version des Manuskripts.

#### 5. Literaturverzeichnis

- Erdmannsdorfer, O. H. (1914): Petrographische Mitteilungen aus dem Harz. VI: Über ein Quarzglimmergestein als Randfazies des Ramberggranits. – Jb. Preuß. G. L. A., 32 (2): 182-187.
- Kaemmel, T. & G. Just (1992): Die pedogeochemische Erfassung eines Greisenkörpers am Nordostrand des Ramberggranitmassivs im Harz bei Gernrode. – Geol. Bl. NO-Bayern, 42: 85-102.
- Kaemmel, T. (1992): Zur Kassiteritführung am Ostkontakt des Ramberggranitmassivs (Harz) – Zbl. Geol. Paläont., Teil I: 63-69.

**Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 199-204, 2 Abb.**  
Halle (Saale), Mai 2011.

## Mitteilungen aus dem Institut: Veranstaltungen



### 75 Jahre Geiseltalmuseum an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Jahre 2009

Meinolf Hellmund\*

Hellmund, M. (2011): 75 Jahre Geiseltalmuseum an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Jahre 2009. [75th Anniversary of the Geiseltalmuseum at Martin-Luther-University Halle-Wittenberg in 2009.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 199-204, Halle (Saale).

#### Einführung

Am 23.11.2009 jährte sich die Gründung des Geiseltalmuseums durch Prof. Dr. J. Weigelt (1890 – 1948) zum 75. Male.

Die Räumlichkeiten, sowohl die Dauerausstellung als auch die Magazinräume, in denen sich das Geiseltalmuseum seit 1934 befindet, haben im Laufe der Jahrzehnte eine deutliche Abnutzungspatina bekommen, so dass die Notwendigkeit eines Umzuges in ein angemessenes, dauerhaftes Domizil mit einem

---

\* Anschrift des Autors:

Dr. Meinolf Hellmund (meinolf.hellmund@zns.uni-halle.de), Zentralmagazin Naturwissenschaftlicher Sammlungen, Geiseltalmuseum, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Domstr. 5, D-06108 Halle (Saale).

zeitgemäßen Schaumuseum, einer ansprechenden Ausstellung und einem adäquaten Magazin in den letzten Jahren immer deutlicher sichtbar wurde.

Diesem dringenden Bedarf wurde im November 2009 vom Senat der MLU durch einen entsprechenden Beschluß zur Einrichtung eines Zentralmagazins Naturwissenschaftlicher Sammlungen (ZNS) für die Unterbringung der Geiseltalsammlung, der Zoologischen Sammlung und der Haustierkundlichen Sammlung Rechnung getragen.

Erfreulich und eher unerwartet groß war die Zahl der Geburtstagsgäste aus Nah und Fern, die vom Leiter der Institution, Prof. Dr. H. Heinisch, sowie dem Leiter der Zentralen Kustodie, Dr. R.-T. Speler, und dem Kustos des Geiseltalmuseums, Dr. M. Hellmund, begrüßt werden konnte. Denn wegen der bereits angelaufenen Umzugsvorbereitungen war nur eine kleine Zahl von Gästen zur Präsentation „Ida und die Geiseltal – Primaten“ eingeladen worden. Es waren erfreulicherweise auch Studierende aus dem Institut für Geowissenschaften zur Festversammlung gekommen.



Abb. 1: Blick in die Vitrine zur Präsentation „Ida und die Geiseltal - Primaten“ anlässlich des 75-jährigen Bestehens des Geiseltalmuseums an der MLU Halle-Wittenberg (23.11.2009). Links im Bild Dr. D. Heidecke, Kustos für Vertebraten, Zoologische Sammlung der MLU. Foto: Dr. Monika Hellmund



Abb. 2: Angeregte Unterhaltung einiger Gäste der Festversammlung am 23.11.2009 im Geiseltalmuseum: v. l.: Prof. Dr. M. Schwab (vormals Inst. f. Geol. Wiss. u. Geiseltalmuseum), Dr. G. Krumbiegel (vormals Kustos des Geiseltalmuseums), PD Dr. A. Clausing (Deutsche Akademie der Naturforscher, Leopoldina, Halle (Saale)) und R. Clausing. Foto: Dr. Monika Hellmund

Herr Dr. Speler ging in seinem Grußwort auf die wissenschaftliche Bedeutung, die Meilensteine und Eckpunkte in der langen Entwicklung des Geiseltalmuseums ein, die z. T. mit dem Aufbau der Zentralen Kustodie an der MLU seit den 1980er Jahren einherging.

Unter den 48 Gästen war auch eine „Gratulantin“ aus Oslo (Norwegen) via Frankfurt/Main angereist. Dazu gab es eine Präsentation.

## **Ida – das „Affenmädchen“**

Manch einer der Anwesenden kannte „Ida“ das „Affenmädchen“, von dem hier die Rede ist, bereits aus der wissenschaftlichen Presse und von ihrer Vorstellung am 19. Mai 2009 in New York. Das ZDF hatte damals in den Hauptnachrichtensendungen um 19.00 Uhr und 21.45 Uhr darüber berichtet und am 31. Mai sendete das ZDF um 19.30 Uhr in der Serie „Terra X“ diesbezüglich „Die geheime Entdeckung“.

Das Primaten-Fossil trägt sozusagen als Spitznamen die Bezeichnung „Ida“, nach der Tochter des norwegischen Paläontologen Dr. J. Hurum.

Das Objekt lag während der Präsentation als Kopie der sogenannten „Plate A“ des Skelettes eines 47 Mio. Jahre alten Primaten in der für die Veranstaltung eingerichteten Vitrine. Die originale Gegenplatte („Plate B“) gelangte durch den internationalen Fossilhandel seinerzeit nach Wyoming (USA).

Das Fossil ist ca. 60 cm groß und in vielerlei Hinsicht einzigartig und geradezu sensationell in seiner filigranen Erhaltung und Überlieferung. Es offeriert zahlreiche Details, die üblicherweise der Fossildokumentation entgehen. Die Erstbeschreiber Franzen et al. (2009) charakterisieren es als das vollständigste Primatenskelett, das jemals weltweit gefunden wurde, also als etwas äußerst Seltenes. Auf Grund des Gebißzustandes handelt es sich um ein juveniles Individuum von neun bis zehn Monaten.

Sogar der Weichkörper (Umriß vom Fell) und Reste der „letzten“ Mahlzeit, bestehend aus Früchten und Blättern, sind mit überliefert (letztere auf der „Plate B“ in Wyoming).

„Ida“ stammt ursprünglich aus Deutschland aus der Grube Messel bei Darmstadt und ist dort vor mehr als 25 Jahren von Privatsammlern ausgegraben worden. Die beiden Fossilplatten (A und B) kamen damals in unterschiedlichen Besitz.

Lange Zeit waren die Existenz und der Verbleib von „Plate A“ der Öffentlichkeit gar nicht bekannt.

Schließlich ist das damals noch nicht wissenschaftlich beschriebene Original von „Plate A“ vor wenigen Jahren an das Naturkundemuseum der Universität Oslo gelangt. Das Museum hatte es für einen sehr hohen Kaufpreis erworben.

Erst seit der Präsentation in New York im Mai 2009 trägt das „Affenmädchen“ den wissenschaftlichen Namen *Darwinius masillae*. Der Name bezieht sich auf Charles Darwin, dessen 200. Geburtstag im Jahr 2009 begangen wurde und auf die Fundlokalität Messel (lat. masilla).

Manch einem ging und geht die Bezeichnung „Ida“ sicher leichter über die Zunge.

## **Rückschau in das Jahr 2008**

In der Zeit vom 23.04. - 25.04.2008 traf sich eine international zusammengesetzte Gruppe von Paläontologen im Geiseltalmuseum, um vergleichende osteologische und odontologische Untersuchungen an den fossilen Primaten der Geiseltalsammlung und dem Fund aus Messel durchzuführen.

Dieser Forschergruppe gehörten drei Deutsche, ein Norweger und ein Amerikaner an: Dr. J. L. Franzen, Titisee-Neustadt, Deutschland; Prof. Dr. Ph. Gingerich, University of Michigan, Ann Arbor, USA; Dr. J. Habersetzer, Forschungsinstitut Senckenberg, Frankfurt am Main, Deutschland; Dr. J. H. Hurum, Naturkundemuseum Oslo/Universität Oslo, Norwegen und Prof. Dr. em. W. v. Koenigswald, Universität Bonn, Deutschland.

Bei den Untersuchungsobjekten aus dem Geiseltal handelte es sich um isolierte Kiefer, einen Schädel und ein disloziertes Teilskelett mit Kieferfragmenten.

Ein so vollständiges und nahezu perfekt artikuliertes Exemplar wie „Ida“ aus Messel wurde im Geiseltal im Laufe der jahrzehntelangen Grabungsaktivitäten jedoch nicht gefunden.

Wie kam es eigentlich zum Kontakt zwischen „Ida“ und dem Geiseltalmuseum, warum hat sich „Ida“ zur Gratulation hierher auf gemacht?

Es hatte sich rasch herausgestellt, dass zur wissenschaftlichen Bearbeitung dieses außergewöhnlichen Fundes aus Messel vergleichbare Primatenfunde aus dem eozänen Geiseltal in die Vergleiche mit einbezogen werden mussten.

Damit war klar, wenn es um so brisante und wissenschaftlich hochrangige Fossilien wie Primaten geht, dass eine so bedeutende Sammlung, wie es die Geiseltalsammlung ist, an vorderster Stelle angefragt wird.

Neben den Untersuchungen vor Ort in Halle (Saale) wurden relevante Vergleichsobjekte aus der Geiseltalsammlung zusätzlich zur Herstellung hochauflösender Röntgenbilder (High Resolution Digital X-Ray- und CT-Untersuchungen) nach Frankfurt/Main an das Forschungsinstitut Senckenberg ausgeliehen und damit die angestrebten Untersuchungen entsprechend befördert und unterstützt.

Die Fossilliste der einbezogenen Objekte aus dem Geiseltal liest sich beinahe wie das „Who is who“ eozäner europäischer Primaten:

*Europolemur klatti* (Weigelt, 1933), GMH CeIV-3656, *Europolemur klatti* (Weigelt, 1933), GMH LeoI-4233, *Europolemur klatti* (Weigelt, 1933), GMH XXXVII-120, *Europolemur klatti* (Weigelt, 1933), GMH XXII-1, *Protoadapis ignoratus* (Thalmann, 1994), GMH XXII-549, *Protoadapis weigelti* Ginge- rich, 1977, GMH XXII-624, *Godinotia neglecta* (Thalmann, Haubold & Martin, 1989), GMH L-2-1969.

Das Material aus dem Geiseltalmuseum fand dann auch erwartungsgemäß seinen Niederschlag in der online erschienenen Erstpublikation im Internet: Franzen, J. L. et al. (2009): „Complete Primate Skeleton from the Middle Eocene of Messel in Germany: Morphology and Paleobiology“.

## Fokus auf *Godinotia* aus dem Geiseltal

Bei den Untersuchungen vor Ort im Geiseltalmuseum richtete sich der Fokus der Bearbeiter mehr und mehr auf ein ganz besonderes Einzelstück. Es spielte schließlich die Rolle für die Differentialdiagnose und das Identifizieren entsprechender Merkmalsunterschiede.

Eine Arbeitshypothese war es, dass „Ida“ möglicherweise zum bereits existierenden Genus *Godinotia* gehören könnte. Dies hat sich aber nicht bestätigt.

Bei *Godinotia neglecta* (Inv. Nr. GMH L-2-1969) handelt es sich um ein unvollständiges disartikuliertes Teilskelett eines Primaten aus der unteren Mittelkohle des Geiseltales, einem Flözhorizont, aus dem generell nur wenige Fossilien geborgen wurden.

Das betreffende, nur aus der Fossilagerstätte Geiseltal bekannt gewordene Taxon *Godinotia* war ebenso im Original in der Vitrine ausgestellt. Es ist wie „Ida“ eine große Rarität, denn es existiert jeweils nur ein Exemplar.

Charakteristische Merkmale von *Godinotia neglecta* sind: der kurze Gesichtsschädel, große Augenhöhlen (> nachtaktiv), die jeweils langgestreckte Elle und Speiche (= Zeugopodium), d. h. *Godinotia* besaß ein besseres Sprungvermögen als „Ida“, einen schlankeren Körperbau, ein reduziertes Vordergebiss D1/1 und P2/2 wie es analog bei „Ida“ ist.

Als Hauptunterschied zwischen *Godinotia* und „Ida“ nennen die Bearbeiter die Proportionen der Extremitäten.

## Ida's Schlüsselmerkmale

„Ida“ ist durch einige Schlüsselmerkmale charakterisiert, die zeigen, dass es sich bei ihr nicht um einen altertümlichen („einfachen“) Lemuren handelt (Franzen et al. 2009):

Die typische Putzkralle der Lemuren am zweiten Zeh fehlt ihr, d. h. alle Zehen und Finger sind normal ausgebildet und haben Nägel; es ist kein Zahnkamm vorhanden (no toothcomb), d. h. also keine „fusio- nierten Zähne“; Unterarm (Zeugopodium = Elle und Speiche) und Unterschenkel (Zeugopodium = Schienbein und Wadenbein) sind kurz und robust; es ist ein vergleichsweise „modernes“ Fußgelenk ausgebildet, das demjenigen unserer Vorfahren ähnlich ist (vgl. z. B. Form des Calcaneus) und ein opponierbarer Daumen und ein 1. Zeh.

## Ida's systematische Stellung

„Ida“ ist ein früher Repräsentant einer größeren „Gruppe“ von Primaten, den sog. Adapoidea (Fam. Cercamoniinae), die zu den sog. Trockennasaffen (Haplorhini) gehören (Franzen et al. 2009).

„Ida“ ist möglicherweise der älteste bekannte Vorfahre von Mensch und Affe (die Bearbeiter haben diesbezüglich weitergehende Untersuchungen angekündigt):

Ordnung Primates  
 Unterordnung Euprimates  
 Überfamilie Adapoidea  
 Familie Notharctiae  
 Unterfamilie Cercamoniinae  
 Gattung *Darwinius*  
 Typusart *Darwinius masillae*

## Schlußfolgerung

An dem referierten Beispiel zeigte sich einmal mehr der herausragende, internationale wissenschaftliche Stellenwert der Geiseltalsammlung und der Geiseltalfauna für die Beurteilung und Bewertung von Merkmalen und Entwicklungsprozessen, in diesem Fall an den Primaten des terrestrischen, europäischen Mitteleozäns.

Die Präsentation „Ida und die Geiseltal – Primaten“ fügte sich in die z. T. kontrovers laufende Diskussion an der MLU ein, in der über den Wert, den Erhalt, die Erhaltungsmöglichkeiten und die grundsätzliche Bedeutung der naturwissenschaftlichen Sammlungen für die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und für die breite Öffentlichkeit diskutiert wurde (s. Uni-Magazin, Scientia halensis, 2/(09); 3/(09)).

Unstreitig ist, nur derjenige, der überhaupt entsprechende Sammlungsobjekte wie z. B. in diesem Falle die Universität als Eigentümerin besitzt, diese dauerhaft pflegt, erhält, sowie diese für die Wissenschaft erschließt, sie im Sinne unseres wissenschaftlichen Gedächtnisses an nachfolgende Generationen weitergibt, ist in der Lage, sich in außergewöhnliche wissenschaftliche Aktivitäten entsprechend mit einzubringen.

Eine positive Wahrnehmung im wissenschaftlichen Umfeld resultiert dann von selbst daraus.

In diesem Zusammenhang wurde noch auf ein aktuelles Forschungsergebnis hingewiesen, dass auf einer eher zufälligen, ganz unerwarteten Entdeckung in der Geiseltalsammlung beruht.

Es handelte sich dabei um den Inhalt des „Magendarmtraktes“ eines Urpferdes aus dem Geiseltal, der in Form einer Braunkohlenprobe und einigen wenigen Mikropräparaten etwa 75 Jahre nach der Ausgrabung im Gelände in der Geiseltalsammlung aufgefunden wurde. Recherchen ergaben, dass dieses Material auf das berühmte Urpferdskelett des *Propalaeotherium isselanum* zu beziehen ist, das bei den Fossilgrabungen der frühen 1930er Jahre im Tagebau „Grube Cecilie IV“ im ehemaligen zentralen Braunkohlenrevier des Geiseltales in der Oberen Mittelkohle (= Oberes Mitteleozän) ausgegraben wurde (Weigelt 1934).

Die Untersuchung der Probe unter dem Licht- und dem Rasterelektronenmikroskop ergab eine dichte Packung von kleinen und kleinsten Fragmenten unterschiedlicher pflanzlicher Gewebeteile (z. B. Kutikulen, Leitgewebe, Früchte bzw. Samen) in einer nicht weiter aufzulösenden Matrix.

Sowohl makroskopisch als auch unter dem Rasterelektronenmikroskop sind in der Matrix eingebettete Quarzkörner, sogenannter Beifang, deutlich erkennbar. Das einzigartige Material vom „Magendarmtrakt“ eines „Paläohippiden“, so die Etikettaufschrift, aus dem Geiseltal, wurde den mittlerweile zahlreich vorhandenen Beispielen aus der Grube Messel bei Darmstadt gegenüber gestellt. Demnach hatten die Propalaeotherien beider Fundstellen, im Geiseltal und in Messel, offenbar ein vergleichbares, aber dennoch individuell variables Nahrungsspektrum. Sie waren Pflanzenfresser, die neben Laubblättern sowohl Samen als auch Blüten (Ericaceen-Pollen) konsumierten. Dies deutet daraufhin, dass sie einen eher dem Zufall überlassenen Nahrungserwerb betrieben haben und dabei nicht selektierend vorgehen.

Auch diese Untersuchungen und ihre Ergebnisse, die in einer Forschungskooperation zwischen dem Geiseltalmuseum (Dr. M. Hellmund) und dem Forschungsinstitut Senckenberg, Frankfurt/Main (PD Dr.

V. Wilde) erarbeitet wurden, unterstreichen die eminente Bedeutung und die Notwendigkeit nachhaltiger Pflege von wissenschaftlichen Sammlungen als Quelle für die spätere Forschung. Insbesondere dann, wenn die betreffende Fossilagerstätte, wie diejenige des Geiseltales, bereits seit Jahren nicht mehr zugänglich ist (Hellmund & Wilde 2009, Wilde & Hellmund 2010).

Dem Geiseltalmuseum bzw. der Geiseltalsammlung ist ein gedeihlicher Fortbestand, zusammen mit der Zoologischen Sammlung und der Haustierkundlichen Sammlung in einem künftigen gemeinsamen Naturkundlichen Universitätsmuseum bzw. dem Zentralmagazin Naturkundlicher Sammlungen (ZNS) der MLU zu wünschen.

## Dank an das Geiseltalmuseum

Als Dank für die wissenschaftliche Unterstützung des Projektes „Ida“ und die Bereitstellung von Vergleichsmaterial hat das Naturkundemuseum der Universität Oslo, vertreten durch Herrn Dr. J. Hurum, der Geiseltalsammlung eine Kopie der Positiv-Fossilplatte („Plate A“) (Inv. Nr. GMH – PMO 214.214 # 004) geschenkt, die in der oben erwähnten Vitrine ausgestellt war.

Das Geiseltalmuseum ist damit eines der wenigen Museen in der Welt, das eine derartige Kopie von *Darwinius masillae* besitzt. Von Seiten des Forschungsinstitutes Senckenberg in Frankfurt/Main haben wir durch Herrn Dr. J. Habersetzer zum Dank für die Fossilausleihe hochauflösende Fotos bzw. Röntgenbilder von unseren Primatenfossilien erhalten.

## Literatur

- Franzen, J. L., Gingerich, Ph. D., Habersetzer, J., Hurum J. H. & Koenigswald, W. v. (2009): “Complete Primate Skeleton from the Middle Eocene of Messel in Germany: Morphology and Paleobiology”. – Public Library of Sciences One (“Plos One”).
- Hellmund, M. & Wilde, V. (2009): Der „Mageninhalt“ von *Propalaeotherium isselanum* aus dem Geiseltal (Sachsen-Anhalt, Deutschland). – *Hercynia*, N.F., 42: 167-175.
- Uni-Magazin, Scientia halensis (2009): „Eigentum verpflichtet, aber wozu“; „Beeindruckend aber nicht bezahlbar“; 2/09: 12-13.
- Uni-Magazin, Scientia halensis (2009): „Kontroverse Debatte setzt sich fort. Leser schreiben zum Thema Naturkundemuseum“, 3/09: 6-7.
- Weigelt, J. (1934): Die Geiseltalgrabungen des Jahres 1933 und die Biostratonomie der Fundschichten. – *Nova Acta Leopoldina*, N. F., 1 (4/5): 552-600.
- Wilde, V. & Hellmund, M. (2010): First record of gut contents from a middle Eocene equid from the Geiseltal near Halle (Saale), Sachsen-Anhalt, Central Germany. – *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 90 (2): 153-162.

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 205-207, 1 Abb.  
Halle (Saale), Mai 2011.

## Mitteilungen aus dem Institut: Nachrufe

### Hans Jürgen Rösler, \*14. Mai 1920 - †12. Januar 2009, in memoriam

Thomas Kaemmel\*

Kaemmel, Th. (2011): Hans Jürgen Rösler, \*14. Mai 1920 - †12. Januar 2009, in memoriam. [In memoriam Hans Jürgen Rösler, \*14. Mai 1920 - †12. Januar 2009.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 205-206, Halle (Saale).

Einer der bedeutendsten ostdeutschen Mineralogen und Geochemiker ging für immer von uns. Hans Jürgen Rösler starb im 89. Lebensjahr an seinem langjährigen Wirkungsort Freiberg in Sachsen. Seine letzte Ruhestätte fand er auf dem Donatsfriedhof.

Er wurde in Braschen (heute Brzozka, Polen) bei Crossen (heute Krosno Odrz.) nordöstlich Guben geboren. 1947 begann er ein Bergbaustudium an der Bergakademie (BA) Freiberg, wechselte jedoch zum Fach Geologie. Rösler schilderte sein wissenschaftliches Leben in den Geohistor. Blättern 2 (2): 159-164, in 3 (1): 23-28, in 4 (1): 65-74, in 4. (2): 87-89, in 6 (1): 57-62 und 6 (2): 143-158. Damals lernte er seine Frau Ursula, mit der er drei Kinder haben wird, kennen. Er gehörte der Studentengeneration an, die als Soldaten am Zweiten Weltkrieg teilgenommen und überlebt hatten. Sein wichtigster Lehrer war Friedrich Leutwein, der 1947 zum Professor mit Lehrstuhl für Mineralogie an die Bergakademie berufen worden war. Geologie hörte er bei den Professoren Rudolf Schreiter und Hermann Schwanecke. Auch das große Chemiepraktikum absolvierte er dort. Er studierte dann von Herbst 1949 bis Sommer 1950 an der Martin-Luther-Universität in Halle (Saale) Geologie-Paläontologie bei Hans Gallwitz und Mineralogie bei Ferdinand von Wolff. Assistent Wolffs war Günter Hoppe. Er lernte die Dünnschliffmikroskopie und von Wolff vermittelte ihm die Grundlagen der Kristallographie. Außerdem hörte er chemische, biologische und geisteswissenschaftliche Vorlesungen. Wieder in Freiberg folgten Vorlesungen wie z. B. Geophysik bei Wolfgang Buchheim, Erzlagerstättenkunde bei Oscar Oelsner und Geologie von Sachsen bei Kurt Pietzsch. Nach Abschluss des Studiums 1951, einer Assistentenzeit und der Promotion ging er 1954 an den Geologischen Dienst in Jena. 1959 habilitierte er sich und folgte im gleichen Jahr einem Ruf als Dozent an das Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der BA Freiberg. Er wurde der Nachfolger von Friedrich Leutwein, der die BA 1958 verlassen hatte. Seit 1964 war er Professor mit Lehrstuhl für Mineralogie und Petrographie, ab 1967 ordentlicher Professor für Mineralogie und Geochemie. Mehr als 150 Studenten erwarben bei ihm das Diplom, über 75 doktorierten, 15 machten die Promotion B bzw. habilitierten, fast 60 Doktoranden förderte er als Zweitgutachter. Er schuf für die Ausbildung notwendige Lehrbriefe und grundlegende Lehrwerke wie das „Lehrbuch der Mineralogie“ und „Geochemische Tabellen“ (mit H. Lange). Beide Werke erschienen in mehreren Auflagen, die „Tabellen“ wurden ins Englische übersetzt. Seine Forschungsarbeiten erstreckten sich über einen weiten Bereich der Petrologie, Geochemie und Rohstoffmineralogie, erwähnt seien Forschungen zu basischen Magmatiten, anorganischer Kohlengeochemie, Geochemie einzelner Elemente, Isotopengeochemie und -geochronologie und besonders zur Umweltgeochemie. Ein letztes Werk beschäftigte sich mit dem Kristallographen Victor Mordechai Goldschmidt.

H. J. Rösler entwickelte beachtliche wissenschaftsorganisatorische Aktivitäten im In- und Ausland. Er war über ein Jahrzehnt Dekan der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der BA, zwei Jahre (1966-68) Vorsitzender der Deutschen Gesellschaft für Geologische Wissenschaften (DGGW, später

---

\* Anschrift des Autors:

Priv.-Doz. Dr. Thomas Kaemmel (Kaemmel-Berlin@t-online.de), Rabindranath-Tagore-Str. 21, D-12527 Berlin.

GGW) und acht Jahre lang Vorstandsmitglied. Er war Gründungsmitglied ihres Fachverbandes Mineralogie und leitete ihn von 1960-64. Die moderne Geräteausstattung des Mineralogischen Instituts der BA, z. T. durch Eigenbau, wurde von ihm stark gefördert. Er regte die Schaffung von Mineralstandards als geochemisches Referenzmaterial an. Die Mineralogische Sammlung der BA wuchs durch das von ihm inaugurierte Tauschsystem auf 70 000 Belege an. Er war zeitweilig auf internationaler Ebene tätig, so in der IMA (International Mineralogical Association), der IAGC (International Association of Geochemistry) und der IAGOD (International Association on the Genesis of Ore Deposits)

Zu seinen Auszeichnungen zählen u.a. „Verdienter Hochschullehrer der DDR“ 1978. Die Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig berief ihn als ihr ordentliches Mitglied 1981. Die GGW verlieh ihm 1986 die Serge-von-Bubnoff-Medaille. Er war Ehrensator der TU Bergakademie Freiberg.

## **Günter Zinke, \*8. Mai 1940 - †27. Mai 2010, in memoriam**

### **Karl-Heinz Schmidt \***

Schmidt, K.-H. (2011): Günter Zinke, \*8. Mai 1940 - † 27. Mai 2010, in memoriam. [In memoriam Günter Zinke \*8. Mai 1940 - †27. Mai 2010.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 206-207, Halle (Saale).



Abb. 1: Dr. Günter Zinke (\*8. Mai 1940 - † 27. Mai 2010). Foto: E. Scheiner, 2004.

Herr Dr. Günter Zinke, langjähriger wissenschaftlicher Mitarbeiter am damaligen Institut für Geographie der Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg ist am 27. Mai 2010 im Alter von 70 Jahren verstorben. Er wurde im Jahr 1940 in Hauptmannsdorf (Hejtmánkovice) bei Braunau (Broumov) in Böhmen geboren,

---

\* Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Karl-Heinz Schmidt (karl-heinz.schmidt@geo.uni-halle.de), Institut für Geowissenschaften und Geographie, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle (Saale).

eine Heimat, zu der er immer eine tiefe Verbindung empfand. An einer Exkursion nach Böhmen, die im letzten Jahr vom Verein für Erdkunde in Halle organisiert wurde, konnte er leider aus gesundheitlichen Gründen nicht mehr teilnehmen, obwohl gerade das ein großer Wunsch von ihm gewesen wäre.

Seine große fachliche Leidenschaft galt der Hydrologie, zu der er während seines wissenschaftlichen Lebens eine sehr starke Beziehung hatte, die er auch nach seiner Pensionierung verfolgte. Er vertrat die geographische Hydrologie als geradliniger, engagierter und aller manchmal abstrusen Modellabstraktion abgeneigter Wissenschaftler. Auch in seinen Veröffentlichungen vertrat er die klassische regionale Hydrologie. Dazu fand er auch in dieser Zeitschrift ein dankbares Forum. Nach der politischen Wende und der Öffnung der Grenzen veröffentlichte er auch in gesamtdeutschen Zeitschriften wie den „Berichten zur deutschen Landeskunde“.

Als Lehrender hat er einer Vielzahl von Studenten Wissen in unterschiedlichen Themenbereichen der Hydrologie und Physischen Geographie vermittelt, wovon u. a. zahlreiche von ihm betreute Qualifikationsarbeiten zeugen. Sein besonderes Interesse galt dabei der Exkursions- und Praktikumstätigkeit im mitteldeutschen Raum und insbesondere in der Region Halle.

Auf dem Felde der Hydrologie war er der Hochwasserforschung, mit der er sich bis an das Ende seines Lebens beschäftigte, im besonderen Maße verbunden. Seine letzte Publikation, die posthum im Jahre 2011 in einer Veröffentlichung der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft erschien, hatte folgerichtig die Überschrift: „Die historische Entwicklung der hydrographischen Bedingungen in der Stadtregion Halle unter besonderer Berücksichtigung der Hochwasserverhältnisse“.

Das Institut für Geowissenschaften und Geographie in Halle hat mit ihm einen *Wissenschaftler* verloren, der einer der besten Kenner der regionalen Hydrologie des mitteldeutschen Raumes war, ein *Institutsmitglied*, das sich immer für die Belange des Instituts und all seiner Mitglieder, auch über die unmittelbaren Dienstpflichten hinaus, einsetzte und einen engagierten *Lehrenden* und Studienberater, der bei mehreren Generationen von Studierenden bleibende, positive „Spuren“ hinterlassen hat.





