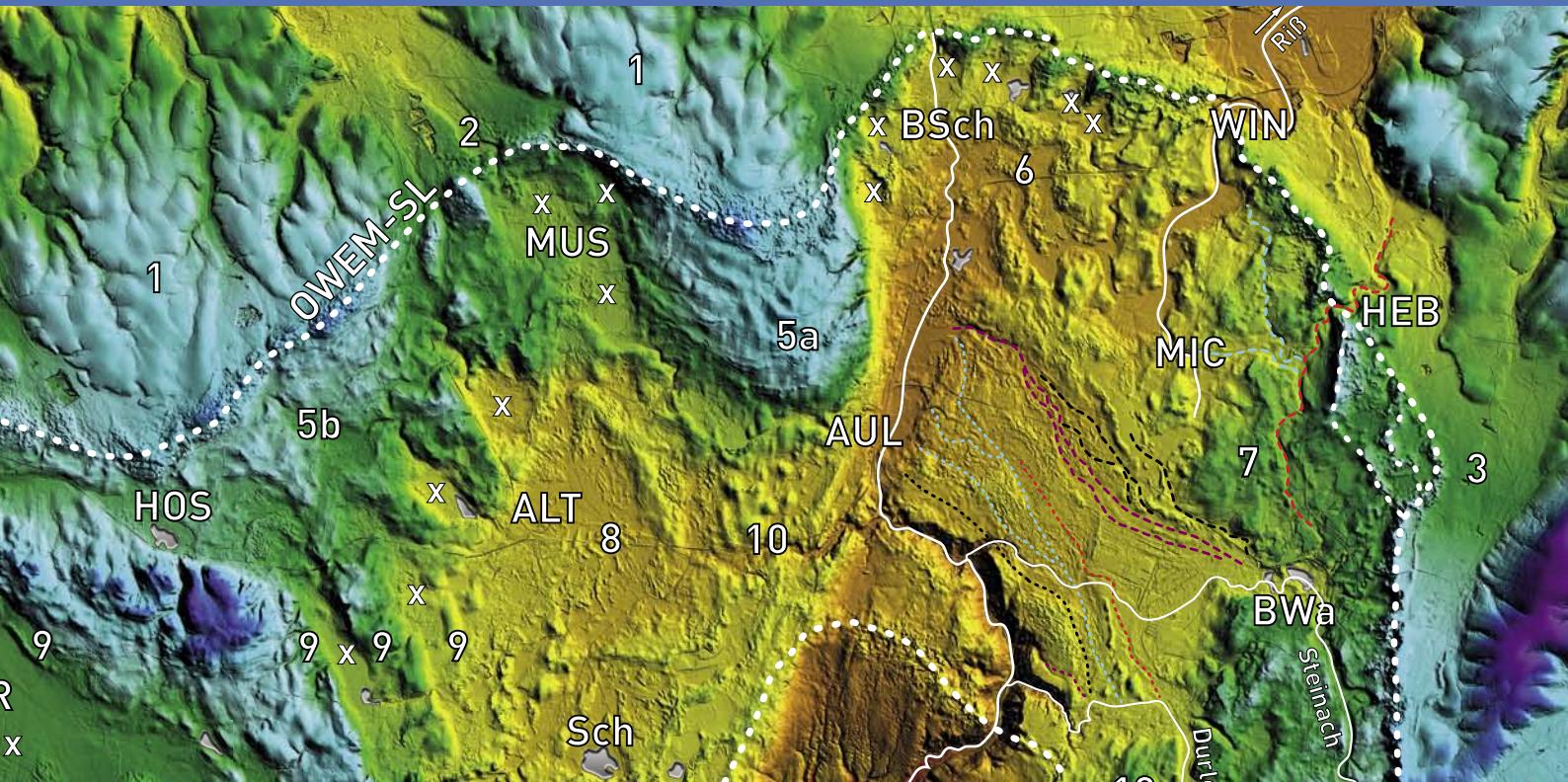


# E&G

Eiszeitalter und Gegenwart  
Quaternary Science Journal



Vol. 63  
No 2  
2014

POTENTIAL OF A HIGH-RESOLUTION DTM WITH LARGE SPATIAL COVERAGE FOR  
VISUALIZATION, IDENTIFICATION AND INTERPRETATION OF YOUNG [WÜRMIAN]  
GLACIAL GEOMORPHOLOGY, OBERSCHWABEN [Germany]

DIE SPÄTGLAZIALE VEGETATIONSGESCHICHTE IM OBEREN ILLERGEBIET, ALLGÄU/  
BAYERN [Germany]

# E&G

## Eiszeitalter und Gegenwart Quaternary Science Journal

Volume 63 / Number 2 / 2014 / DOI: 10.3285/eg.63.2 / ISSN 0424-7116 / www.quaternary-science.net / Founded in 1951

### EDITOR

DEUQUA  
Deutsche Quartärvereinigung e.V.  
Office  
Stilleweg 2  
D-30655 Hannover  
Germany  
Tel: +49 (0)511-643 36 13  
E-Mail: info [at] deuqua.de  
www.deuqua.org

### PRODUCTION EDITOR

SABINE HELMS  
Geozon Science Media  
Pettenkoferstr. 16-18  
D-10247 Berlin  
Germany  
Tel. +49 (0)30-20 23 83 19 0  
E-Mail: helms [at] geozon.net  
www.geozon.net

### EDITOR-IN-CHIEF

HOLGER FREUND  
ICBM – Geoeontology  
Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg  
Schleusenstr. 1  
D-26382 Wilhelmshaven  
Germany  
Tel.: +49 (0)4421-94 42 00  
Fax: +49 (0)4421-94 42 99  
E-Mail: holger.freund [at] uni-oldenburg.de

### ASSOCIATE EDITORS

PIERRE ANTOINE, Laboratoire de Géographie Physique, Université Paris i Panthéon-Sorbonne, France  
JÜRGEN EHLERS, Wittenberg, Germany  
MARKUS FUCHS, Department of Geography, Justus-Liebig-University Giessen, Germany  
RALF-DIETRICH KAHLEN, Senckenberg Research Institute, Research Station of Quaternary Palaeontology Weimar, Germany  
THOMAS LITT, Steinmann-Institute of Geology, Mineralogy and Paleontology, University of Bonn, Germany  
LESZEK MARKS, Institute of Geology, University of Warsaw, Poland  
HENK J. T. WEERTS, Physical Geography Group, Cultural Heritage Agency Amersfoort, The Netherlands

### FORMER EDITORS-IN-CHIEF

PAUL WOLDSTEDT (1951–1966)  
MARTIN SCHWARZBACH (1963–1966)  
ERNST SCHÖNHALS (1968–1978)  
REINHOLD HUCKRIEDE (1968–1978)  
HANS DIETRICH LANG (1980–1990)  
JOSEF KLOSTERMANN (1991–1999)  
WOLFGANG SCHIRMER (2000)  
ERNST BRUNOTTE (2001–2005)

### ADVISORY EDITORIAL BOARD

FLAVIO ANSELMETTI, Department of Surface Waters, Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science & Technology), Dübendorf, Switzerland  
KARL-ERNST BEHRE, Lower Saxonian Institute of Historical Coastal Research, Wilhelmshaven, Germany  
PHILIP GIBBARD, Department of Geography, University of Cambridge, Great Britain  
VOLLI E. KALM, Institute of Ecology and Earth Sciences, University of Tartu, Estonia  
CESARE RAVAZZI, Institute for the Dynamics of Environmental Processes, National Research Council of Italy, Italy  
JAMES ROSE, Department of Geography, Royal Holloway University of London, Great Britain  
CHRISTIAN SCHLUCHTER, Institute of Geological Sciences, University of Bern, Switzerland  
DIRK VAN HUSEN, Altmünster, Austria  
JEF VANDENBERGHE, Faculty of Earth and Life Sciences, VU University Amsterdam, The Netherlands  
ANDREAS VÖTT, Institute of Geography, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Germany

### AIMS & SCOPE

The *Quaternary Science Journal* publishes original articles of quaternary geology, geography, palaeontology, soil science, archaeology, climatology etc.; special issues with main topics and articles of lectures of several scientific events.

### MANUSCRIPT SUBMISSION

Please upload your manuscript at the online submission system at our journal site [www.quaternary-science.net](http://www.quaternary-science.net). Please note the instructions for authors before.

### FREQUENCY

2 numbers per year

### SUBSCRIPTION

Free for DEUQUA-Members! Prices for standing order: single number 27,- Euro; double number 54,- Euro; plus shipping costs. We offer discounts for libraries and bookstores. Please subscribe to the journal at the publisher *Geozon Science Media*.

### JOURNAL EXCHANGE

If you are interested in exchange your journal with the *Quaternary Science Journal*, please contact: Universitätsbibliothek Halle Tauschstelle, Frau Winther August-Bebel-Straße 13 06108 Halle (Saale), Germany

### PRINT

Printed in Germany on 100% recycled paper climate neutral produced



### COVER FIGURE

Ice wastage deposits produced between the outer and the inner Würmian (Fig. p. 115)

### RIGHTS

Copyright for articles by the authors

### LICENSE

Distributed under a Creative Commons Attribution License 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>



# Potential of a high-resolution DTM with large spatial coverage for visualization, identification and interpretation of young (Würmian) glacial geomorphology

a case study from Oberschwaben [southern Germany]

Elena Beckenbach, Thomas Müller, Hartmut Seyfried, Theo Simon

**How to cite:**

BECKENBACH, E., MÜLLER, TH., SEYFRIED, H. & SIMON, Th. (2014): Potential of a high-resolution DTM with large spatial coverage for visualization, identification and interpretation of young (Würmian) glacial geomorphology – a case study from Oberschwaben (southern Germany). – E&G Quaternary Science Journal, 63 (2): 107–129. DOI: 10.3285/eg.63.2.01

**Abstract:**

The German state of Baden-Württemberg has created a LiDAR-based digital terrain model (DTM) covering 36000 km<sup>2</sup> with a horizontal and vertical precision of 1 m and 0.15 m, respectively. This model is ideally suited for systematic geomorphological analyses as it is extremely accurate and allows reliable large-distance correlation of geological and geomorphological phenomena. Until recently, no available software could handle this amount of data in real time. One of us (T.M.) has developed a software (TerrainView) which allows the visualization of and navigation within the entire data set in nine levels of detail (in ortho and perspective view), while simultaneously offering effective tools for geomorphological and morphometric analyses. We present our first geomorphological studies based on this data set focussing on late Pleistocene glacial and proglacial/periglacial landforms in the Lake Constance/Oberschwaben area in southern Baden-Württemberg. In our study area we could identify and map a large variety of phenomena related to the last (Würmian) glaciation, including: subglacial basins with a wide variety of dimensions, outwash plains, moraines (end moraines, fragmentary moraines, kettled and hummocky moraines, micromoraines), subglacial and ice-marginal meltwater channels, eskers, drumlins and recessional terraces. Some of these features have been reported previously in literature, but others have not (or only partly) been recognized as such. Micromoraines might turn out an emerging new category of glacial features which typically are discovered at first in the DEM and subsequently verified in the field. The advantage of a geomorphological interpretation on the basis of a high-resolution DTM with large spatial coverage lies in the accurate identification of glacial and post-glacial morphological features and their correlation across large areas.

**Visualisierung und Erkennung junger (würmeiszeitlicher) glazialer Landformen im großflächigen, hochauflösenden DGM: eine Fallstudie aus Oberschwaben [Süddeutschland]****Kurzfassung:**

Das Land Baden-Württemberg verfügt über ein flächendeckendes digitales Geländemodell (DGM) auf der Grundlage von LiDAR-Daten mit einer Genauigkeit von 1 m in der Horizontalen, 0,15 m in der Vertikalen und einem Gesamtumfang von 1 TB (\*.txt). Dieses Modell ist für systematische geomorphologische Analysen hervorragend geeignet, doch scheiterte seine integrale Nutzung bisher an der Leistungsfähigkeit der verfügbaren Software, die ab Datenmengen von 50 GB stark abfällt. T. Müller hat eine Software entwickelt (TerrainView), die es ermöglicht, im gesamten Datensatz beliebig zu navigieren und Szenen in neun Auflösungsstufen verzögerungsfrei als Ortho- und Perspektivansicht zu visualisieren; geomorphologische und morphometrische Analysen können simultan durchgeführt werden. Wir stellen in dieser Studie erste Ergebnisse zu eiszeitlich überprägten Geländeformen im Raum Oberschwaben vor. Besonders im Verbreitungsgebiet des würmeiszeitlichen Rheingletschers ist es im DGM möglich, zahlreiche Ablagerungsformen zu identifizieren, mit hoher Präzision zu kartieren und teilweise auch geologisch zu interpretieren. Dazu gehören Zungenbecken verschiedenster Dimension, Aufschotterungsebenen, Endmoränen und Teilmoränen der Rückschmelzstadien in unterschiedlichem Erhaltungszustand, Mikromoränen, Esker, subglaziale und eisrandparallele Täler, Drumlins und Terrassenschachteln spät- bis postglazialer Flusssysteme. Manche dieser Erscheinungen sind aus der Literatur bekannt, doch ergeben sich durch die Möglichkeit, über große Entfernung zu korrelieren, teilweise völlig neue Perspektiven in der geologischen Erkundung glazialer, periglazialer und postglazialer Landformen. Einige Phänomene wie zum Beispiel Mikromoränen konnten überhaupt erst im DGM als solche erkannt und dann nachträglich im Gelände verifiziert werden.

**Keywords:**

airborne LiDAR, high-resolution DTM, Würmian, glaciation, glacial landforms, Rhine glacier

**Addresses of authors:** Elena Beckenbach, Institut für Planetologie, Universität Stuttgart, Herdweg 51, 70174 Stuttgart, E-Mail: elena.beckenbach@ip.uni-stuttgart.de; Thomas Müller, Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart, Allmandring 19, 70569 Stuttgart, E-Mail: thomas.mueller@vis.uni-stuttgart.de; Hartmut Seyfried, Institut für Planetologie, Universität Stuttgart, Herdweg 51, 70174 Stuttgart, E-Mail: hartmut.seyfried@ip.uni-stuttgart.de; Theo Simon, Gehrenhalde 42, 74427 Fichtenberg, E-Mail: simon-fichtenberg@gmx.de

## 1 Introduction

The LiDAR-based digital terrain model (DTM) of Baden-Württemberg (“Geobasisdatenmodell”<sup>1</sup>, provided by Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL, Stuttgart) has a resolution of 1 m in horizontal and 0.15 m in vertical direction covering 36000 km<sup>2</sup>. This model is ideally suited for systematic geomorphological analyses as it is extremely accurate and allows reliable large-distance correlation of geological and geomorphological phenomena.

Comparable data sets are offered by a growing number of institutions. EVANS (2012: 96) provides a selective overview of nationwide laser-based DEMs: 1 m resolution for parts of Austria; 2 to 5 m resolution for Belgium, the Netherlands and Alberta. LiDAR-based nationwide DTMs are offered by the National Land Survey of Finland (2x2 m grid, 14 cm vertical ground resolution; SUTINEN, HYVÖNEN & KUKKONEN 2013) and by the Geological Survey of Switzerland (swissALTI3D). Due to large differences in altitude, the DTM of Switzerland is based on a combination of LiDAR data, aerial photographs and stereo-correlation resulting in non-uniform resolution depending on the altitude (<2000 m: resolution 50 cm; >2000 m: resolution 1 to 3 m; WIEDERKEHR & MÖRI 2013). Most of the German states offer LiDAR-based DEMs with up to 1 m grids ([www.geodatenzentrum.de/iso/info/iso\\_rahmen.iso\\_div](http://www.geodatenzentrum.de/iso/info/iso_rahmen.iso_div)).

Geologic field work supported by high-resolution ( $\leq 1$  m) large-area ( $>10000$  km<sup>2</sup>) digital geomorphological exploration may benefit from this development but until now data processing and handling is slowed down or made impossible by the capacity of the currently available software. The main requirement for a software to cross this gap is instant processing of all types of visualization and morphometric analysis on all scales desired. An optimal working base would be a) a high-resolution DTM created from remote sensing procedures to identify a large range of phenomena, and b) a large area to follow these features tracing their real geological distribution.

To meet this requirement we developed TerrainView, a software designed to cope with the huge dataset covered by the LiDAR-based DTM of the state of Baden-Württemberg in south-western Germany. This study offers the results from a first test for geomorphic applications using glacial and proglacial/periglacial landforms produced during and after the Last Glacial Maximum (Würmian glaciation). In the process we discovered that in the special case of Würmian glacial phenomena the combination of high resolution and large area results in three advantages: 1) digital geomorphological mapping is at least as accurate as (and in some cases even surpasses) traditional field-based geomorphological mapping; 2) it is extremely fast, reliable and needs considerably

less ground checks; 3) in the Oberschwaben area it allows recognition of additional glaciogenic phenomena hitherto not described in literature.

In the following we provide a brief description of the working features of TerrainView and present a state-of-the-art overview of the landforms related to the last glaciation in Baden-Württemberg. The potential offered by TerrainView is then explored in a series of case studies covering known features related to the Würmian glaciation as well as some new phenomena recognized from scrutinizing the DTM.

## 2 Data source and software development

The digital terrain model of Baden-Württemberg (“Geobasisdatenmodell”) is based on airborne LiDAR data and delivered as 1001 x 1001 m<sup>2</sup> tiles consisting of Gauss-Krüger coordinates and height values stored in text format (\*.1m), where each data entry (easting, northing, height) covers 26 characters (26 Bytes). The complete dataset with 37676 tiles needs about 1 TB of disk space.

Commercial tools for DEM processing (e.g. ArcGIS, Rivertools, SCOP++) are able to handle only a limited subset of the dataset at once (roughly up to about 50 GB). For larger datasets, the performance decreases dramatically. Hence, interactive explorations and morphological studies for large areas, where the complete dataset must be available to ensure detailed height information throughout, become cumbersome.

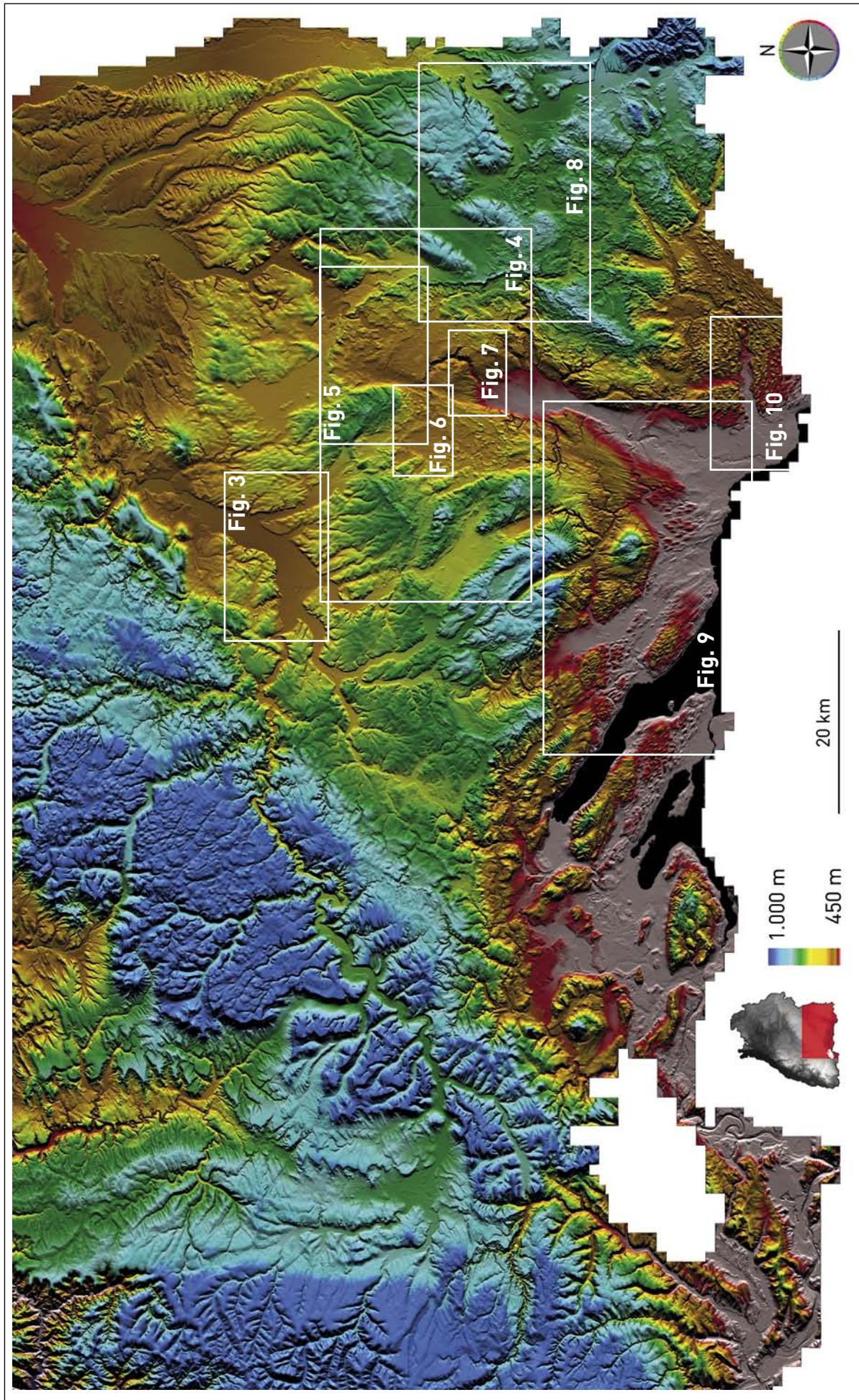
For this reason we developed ‘TerrainView’ – an Open Graphics Library (OpenGL)-based platform for visualizing DTMs in orthographic and perspective projection with interactive navigation on large datasets and special tools for geomorphological analysis (<http://go.visus.uni-stuttgart.de/terrainview>). The key concept to master the huge dataset is to reformat it into a quadtree data structure with nine levels of detail (LOD) that decomposes the spatial domain recursively into uniform quads (tiles). Each quad has the same pixel resolution but a different pixel-size depending on the level of detail (LOD). The user can navigate among these levels of detail without delay. Memory usage is minimized as only these tiles that are currently visible and those that will become visible next are effectively loaded. This dynamic loading is thread-based to prevent jerking while navigating. Levels of detail are as follows: LOD 0: 256 m/pixel; LOD 1: 128 m/pixel; LOD 2: 64 m/pixel; LOD 3: 32 m/pixel; LOD 4: 16 m/pixel; LOD 5: 8 m/pixel; LOD 6: 4 m/pixel; LOD 7: 2 m/pixel; LOD 8: 1 m/pixel.

Reformatting into a quadtree data structure has to be done only once in a pre-processing step. We first set the base length of each tile to be 1024 x 1024 pixels. The root tile of the quadtree (LOD 0) encompasses the entire area of Baden-Württemberg (resolution: 256 m/pixel). The quadtree is built top-down; at level 8, each height value of the raw dataset

<sup>1</sup> [http://www.lgl-bw.de/lgl-internet/opencms/de/07\\_Produkte\\_und\\_Dienstleistungen/Geodaten/](http://www.lgl-bw.de/lgl-internet/opencms/de/07_Produkte_und_Dienstleistungen/Geodaten/); accessed 24.03.2014

Fig. 1: Z-code coloured shaded relief of the study area. Geographic information and outlines of prominent glaciogenic features are compiled in complementary Fig. 2. White rectangles: positions of case studies areas. Black area: Lake Constance. Inset lower left: position in Germany and in Baden-Württemberg. Orthoview; illumination: 90/33; vertical exaggeration: x 4; pixel size: 64 m.

Abb. 1: Farbhöhen codiertes Schummerungsmodell des Untersuchungsgebietes. Geographische Orientierungsmerkmale und die wichtigsten glaziogenen Strukturen sind in der komplementären Abb. 2 zusammengefasst. Weiße Rechtecke: Lage der nachfolgenden Abbildungen. Schwarz: Teile des Bodensees. Lage in Deutschland und Baden-Württemberg: siehe Übersicht unten links; Farbhöhen codierung: unten Mitte; Orthoprojektion; Beleuchtung: 90/33; vertikale Überhöhung: x 4; Pixelgröße: 64 m.



with corresponding easting-northing coordinates must be inserted into the correct tile. As this coordinate pair can be reconstructed from the quadtree structure, it is only necessary to store the height value. We use single precision floating point numbers (4 Byte) for the height value reducing the size of the dataset to about a sixth. Each lower level of the quadtree follows from the higher level by integrating 4 neighbouring height values until ending up at the root level. Despite an overhead through storing lower resolutions the entire dataset finally reduced to 189 GB in binary format.

Terrain visualization in orthographic and perspective projection is realized directly on the graphics board using OpenGL<sup>2</sup> shading language (GLSL). Colour coding, relief shading and other visualization features are calculated at interactive frame rates without any additional preprocessing steps. Light direction and vertical exaggeration can be instantly adapted to produce optimal shading and relief effects. Gradients are available in normal and inverse mode and can be exaggerated to enhance steepness; contours can be spaced on individual criteria and draped as overlays on all types of view. Morphometric data (longitudinal sections, cross-sections) can be derived placing polygons and/or serial sections.

TerrainView is based on Qt<sup>3</sup> and thus is platform-independent. All parameters of a chosen scene can be saved as Qt scripts for rapid reproducibility; all types of views can be exported as high resolution PNG images.

### 3 Outline of glaciations and glacial landforms in Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg the Lake Constance/Oberschwaben region is particularly well suited for testing the visualization and mapping potential of Pleistocene landforms in a large

<sup>2</sup> <http://www.opengl.org/>; accessed 24.03.2014

<sup>3</sup> <http://qt-project.org/>; accessed 24.03.2014

DTM. Pleistocene landforms have been overprinted by advances of the Alpine Rhine glacier into the foreland. According to ELLWANGER et al. (2011b) the earliest glaciations occurred during the Middle Pleistocene (Hoßkirch glaciation, Riß glaciation). They extended far beyond the borders of the late Pleistocene (Würmian) Rhine glacier (ELLWANGER et al. 2011b, fig. 1). The Würmian glaciation episode (Birrfeld glaciation in Switzerland; GRAF 2009, KELLER & KRAYSS 2010), originally defined by PENCK & BRÜCKNER (1909), lasted from 115 ka to 11.6 ka (MENNING & DSK 2002, LITT et al. 2005) and consisted of three pulses of glacier advance centred around 105, 65, and 25 ka (PREUSSER et al. 2011). The last advance was strongest producing an ice sheet extending more than 60 km into the north Alpine foreland (EHLERS & GIBBARD 2004). According to PREUSSER et al. (2011) in the area of the present study the ice cover lasted from 26 to 17.5 ka. In Bavaria, piedmont glaciers had vanished around 16 to 15 ka (REUTHER et al. 2011). We present our first geomorphic studies based on the “Geobasisdaten” set focussing on Würmian glacial (HABBE et al. 2007) and proglacial/periglacial (FRENCH 2007) phenomena as only these youngest features are clearly recognizable in the DTM. With few exceptions (see chapters 4.1 and 4.8), morphologic features from older glaciations cannot be recognized in the model.

In the north Alpine foreland a comprehensive study by SALCHER, HINSCH & WAGREICH (2010) analysed glacial landforms based on LiDAR imagery in an area of 15 x 10 km corresponding to the frontal parts of the latest Pleistocene (Würmian) Salzach glacier 20 km north of Salzburg (Austria). According to these authors glacial landforms recognizable in a high-resolution DTM comprise the following phenomena: subglacial basins, outwash plains, continuous moraines, fragmentary recessional moraines, kettled and hummocky moraines, eskers, kames, kame terraces, subglacial channels, drumlins, and recessional terraces. In the following, usage of these terms is based on definitions present-

Fig. 2: Shaded relief of same scene as in Fig. 1 with geographic information and outlines or locations of prominent glaciogenic features. Inset lower left: position within Baden-Württemberg. Light blue: Lake Constance. Numbering follows palaeogeographic belts from distal to proximal (North to South) and internally from West to East.

**Moraines:** Dotted yellow lines: end moraines clearly discernible in DTM. REM: relic of Riß end moraine; OWEM: outer Würmian end moraine. BiBi: Binzen bifurcation, overlap of the northern Schussen lobe (OWEM-SL) on the eastern Leutkirch lobe (OWEM-LL) of the Rhine glacier shows that the Schussen lobe persisted longer than the Leutkirch lobe; IWEM: inner Würmian end moraine; KS (“Konstanzer Stadium“): last stationary episode during glacial retreat marked by erosional features or fragmentary moraines.

**Subglacial basins and outwash plains:** Riedlingen plain (1), Federsee plain (2), Laupheim plain (3), Wurzacher Ried (4), Bibertal (5), Pfrunger Ried (6), Altsachsen basin (7), Upper Schussen basin (8), Aach plain (9), Zeller See (10), Überlinger See (11), Salem valley (12), Föhrenried (14), Lower Schussen basin (15).

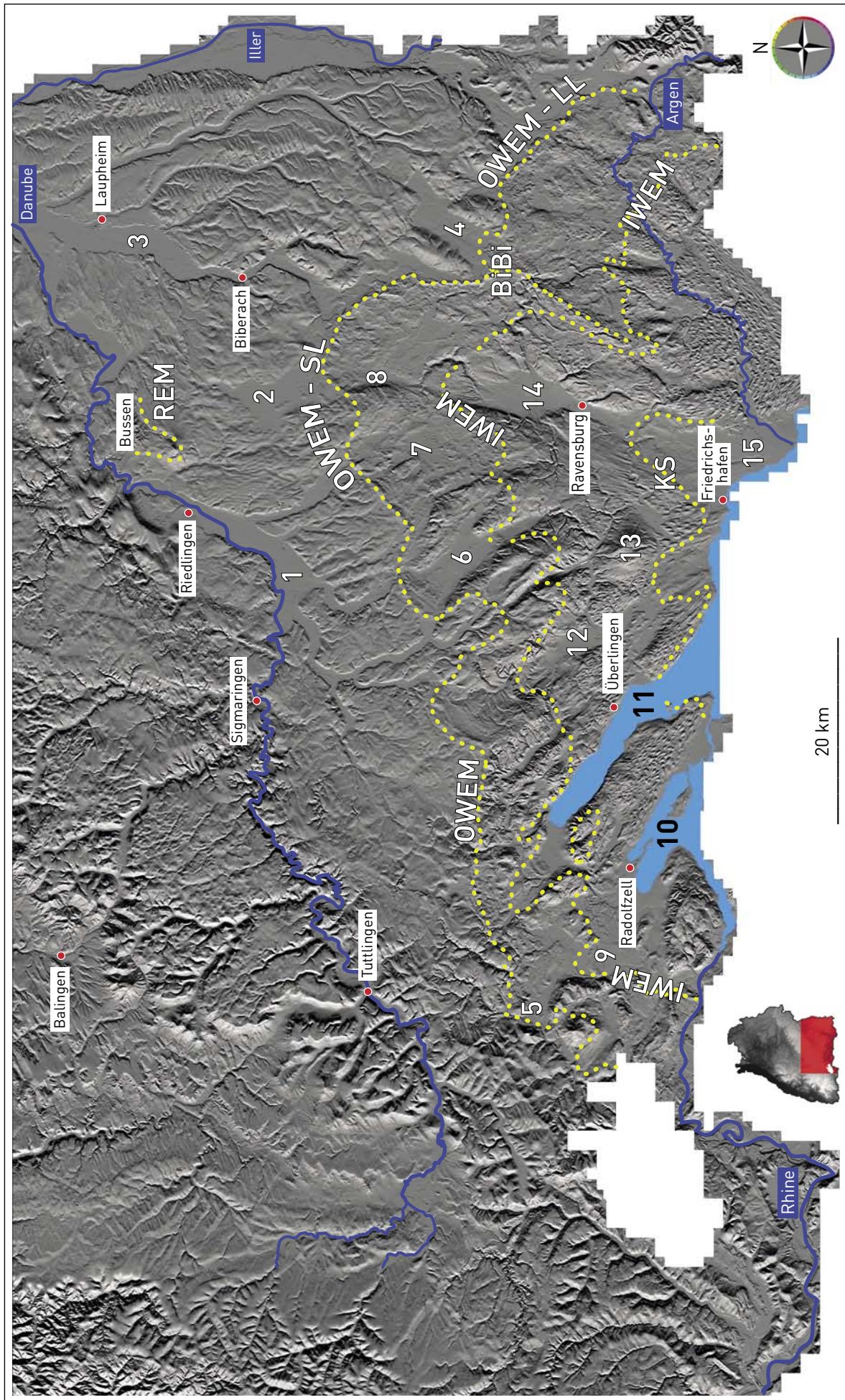
**Drumlins and other glacial to periglacial features:** The area between the inner Würmian end moraine (IWEM) and the “Konstanzer Stadium” (KS) is a domain of radially elongated high-convexity drumlins locally (west of Ravensburg) grading into low-convexity equivalents. The Gehrenberg hill (13) is an abraded buttress of late Miocene Upper Freshwater Molasse rocks. Recessional terraces are best preserved in the Lower Argen Valley.

Abb. 2: Schummerungsmodell derselben Szene wie in Abb. 1 mit geographischen Orientierungsmerkmalen und wichtigen glaziogenen Strukturen. Lage in Baden-Württemberg: siehe Übersicht unten links. Hellblau: Teile des Bodensees. Die Nummerierung folgt den paläogeographischen Gürteln von distal zu proximal (Nord nach Süd) und innerhalb dieser Gürtel von West nach Ost. In diesem Maßstab sind folgende glaziale Landschaftsformen deutlich zu erkennen:

**Moränen:** Endmoränen (gelbe punktierte Linien): Rißendmoräne (REM); Äußere Würmendmoräne (OWEM); Bifurkation von Binzen (BiBi): der Überschneidungskontakt zwischen der Endmoräne des nördlichen Schussen-Lobus (OWEM-SL) und dem östlichen Leutkirch-Lobus (OWEM-LL) belegt, dass der Schussen-Lobus länger aktiv war als der Leutkirch-Lobus; Innere Würmendmoräne (IWEM); Endmoräne des „Konstanzer Stadiums“ (KS).

**Subglaziale Becken und Schotterebenen:** Riedlinger Ebene (1), Federsee-Ebene (2), Laupheimer Ebene (3), Wurzacher Ried (4), Bibertal (5), Pfrunger Ried (6), Altsachsenbecken (7), Oberes Schussenbecken (8), Aach-Ebene (9), Zeller See (10), Überlinger See (11), Salemer Tal (12), Föhrenried (14), Unteres Schussenbecken (15).

**Drumlins und weitere glaziale bis periglaziale Strukturen:** Der Raum zwischen der Inneren Würmendmoräne (IWEM) und der Endmoräne des „Konstanzer Stadiums“ (KS) zeigt radial ausgerichtete, vorwiegend hochkonvexe Drumlins, die lokal (westlich von Ravensburg) in flache, stark ausgelängte Drumlins übergehen. Der Gehrenberg (13) ist ein vom Gletscher überschliffener Ausbiss von spätmiocäner Oberer Süßwassermolasse. Spätglaziale Terrassenschachteln sind im unteren Argental sehr gut erhalten.



ed by BRODZIKOWSKI & VAN LOON (1991), SCHAEFER (1995), MENZIES (1996), EHLERS (1996) and BENN & EVANS (1998). In comparison to DTMs, conventional topographic maps do not provide sufficient information to identify such features without ground check.

However, after more than a century of research the distribution of most of these units is well known from geological mapping although there has been a certain tendency to highlight moraines, drumlins, and outwash plains over other glacial phenomena. For the area of south-western Germany and adjoining areas PENCK & BRÜCKNER (1909), HANTKE (1978, 1980), SCHREINER (1974, 1992a, 1992b), ELLWANGER et al. (1995), JERZ (1995), SCHAEFER (1995), EBERLE et al. (2007), ZAUGG et al. (2008), DOPPLER et al. (2011), ELLWANGER et al. (2011a, 2011b), HANTKE (2011), PREUSSER et al. (2011) and VAN HUSEN & REITNER (2011) have presented contemporary state-of-the-art compilations. Information on the extent and amount of the glaciation of Switzerland during the Last Glacial Maximum is provided in great detail by the map published by BINI et al. (2009), which also covers adjacent areas in south-western Germany. Similar maps exist for the reconstruction of the ice surface geometry and flowlines in the Central Swiss Alps (FLORINETH & SCHLÜCHTER 1998) and for the Eastern Alps during the last glaciation (VAN HUSEN 1987, DE GRAAFF, DE JONG & SEIJMONSBERGEN 2007, RUPP, LINNER & MANDL 2011).

General information on the study area is condensed in Figs. 1 and 2. Fig. 1 gives an overview in coloured shaded relief while Fig. 2 provides corresponding geographic data and the outlines of major late Pleistocene landform units on the background of a grey shaded relief map. In the following, a series of case studies demonstrates the potential of high-resolution digital mapping.

#### 4 Case studies of Würmian glacial landforms identified from the DTM

The wealth of observations on Würmian glacial landforms is such that neither a systematic nor a thematic approach is apt for presentation in an overview. We therefore decided to show our results in nine case studies highlighting important features. Thus, the order of subchapters tracks a path through the DTM starting in the North and ending in the South. For a geographical overview and positions of case studies see Fig. 1.

*Fig. 3: South-western part of the Danubian meander plain upstream of Riedlingen (for position, see # 1 in Fig. 2). During initial ice retreat valley filling was dominated through braided outwash (1) from the Andelsbach (2), Ostrach (3), Wagenhauser Bach (4) and Schwarzach (5) valleys which today are only occupied by small rivulets. After ice retreat behind the drainage divide Danube/Rhine the Danube started to rework the northern part of the alluvium through randomly migrating point bars (6). The change in sedimentary regime is a result of the lower gradient and discharge of the Danube. Blue line: present course of the Danube; ERT: Ertingen; HER: Herbertingen; HOH: Hohentengen; MEN: Mengen; SCH: Scheer; Relic Drumlin: relics of drumlins from the previous (Riß) glaciation smoothed by multiple solifluction processes. Orthoview; illumination: 135/35; vertical exaggeration: x 10; pixel size: 8 m.*

*Abb. 3: Südwestlicher Teil der Schwemmebene der Donau (blau) flussaufwärts von Riedlingen (zur Lage siehe #1 in Abb. 2). Während des beginnenden Abschmelzprozesses dominierte ein verflochtenes Flusssystem (1), gespeist vom Andelsbach (2), der Ostrach (3), dem Wagenhauser Bach (4) und der Schwarzach (5), die heute nur noch kleine Bäche sind. Nachdem die Eisfront nach Süden hinter die Wasserscheide Donau/Rhein zurückwich, begann die Donau, den nördlichen Teil der Schwemmebene mit einem System von Mäanderschlingen umzugestalten (6). Der Wechsel im sedimentären Regime ist eine Folge des vermindernten Gradienten und der geringeren Abflussmenge. ERT: Ertingen; HER: Herbertingen; HOH: Hohentengen; MEN: Mengen; SCH: Scheer; Relic Drumlin: Relikte von Drumlins aus der älteren Riß-Vergletscherung, die durch mehrfache Solifluktionsprozesse morphologisch degradiert sind. Orthoprojektion; Beleuchtung: 135/35; vertikale Überhöhung: x 10; Pixelgröße: 8 m.*

#### 4.1 Continuous major moraines

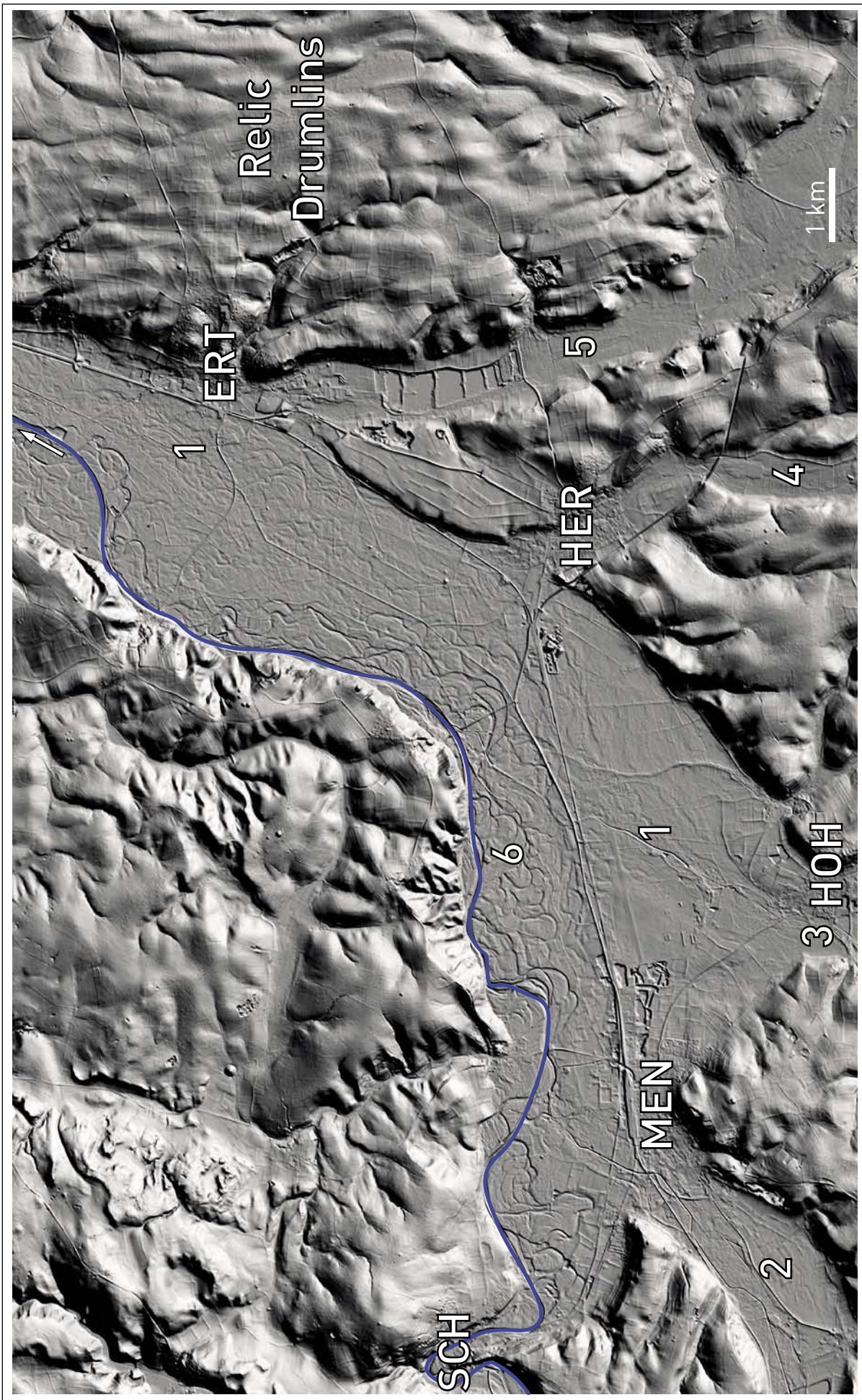
Continuous end moraines are well defined from geological mapping on scale 1:25000. The oldest end moraines (Riß glaciation and older) cannot unambiguously be identified in the DTM (with the exception of a Rissian end moraine relic flanking the Bussen hill near Riedlingen labelled "REM" in Fig. 2). In contrast, moraines corresponding to the Last Glacial Maximum (outer Würmian end moraine, label OWEM in Fig. 2) can be recognized and mapped in detail, especially in the north-eastern sector of the study area. Accuracy of delineation equals or surpasses geological mapping on the scale of 1:25000. In the western part of the study area end moraines are less well preserved but still can be traced throughout the DTM. The same applies for the inner Würmian end moraine (label IWEM in Fig. 2). Supposedly this difference in preservation is a result from steeper gradients at the outer margins of subglacial branch basins (compare Fig. 1).

The outer Würmian end moraine possesses a conspicuous bifurcation located at the hamlet of Binzen (BiBi in Fig. 2). There, the outer Würmian end moraine of the northern Schussen lobe (label OWEM-SL in Fig. 2) of the Rhine glacier crosscuts the end moraine of the eastern Leutkirch lobe (label OWEM-LL in Fig. 2) thus indicating a longer ice activity of the northern Schussen lobe (OWEM-SL); details are explained in Fig. 8.

Prior to final glacier retreat into the main Lake Constance tongue basin a short-term stationary episode ("Konstanzer Stadium" sensu SCHREINER 1974; label KS in Fig. 2) produced erosional scarps. These can be traced throughout the DTM as a boundary between well-preserved (north of KS line) and partly truncated (south of KS line) drumlins. In the area of the Lower Schussen basin (# 15 in Fig. 2) erosional scarps are substituted by moraines (for details, see Fig. 9).

#### 4.2 Subglacial basins and related outwash plains

In the DTM we observe four km-sized plains outside the outer Würmian end moraine. The plains of Riedlingen, Federsee, Laupheim, and Wurzacher Ried (# 1, 2, 3, 4 in Fig. 2) show well preserved relics of braided stream deposits. SCHREINER (1992b) and ELLWANGER et al. (2011b) considered them late (Würmian) outwash plains resting on older (Rissian) subglacial basins fed from outlets initially starting at the northern tips of local lobes of the glacier producing the outer Würmian end moraine. Consequently, they rest upon older (Rissian



or even older) outwash plain deposits which in turn already have been filling up ancient subglacial basins excavated as far North as Laupheim. Once Würmian ice had retreated behind the drainage divide Danube/Rhine runoff on outwash plains outside the outer Würmian end moraine (# 1, 2, 4 in Fig. 2) dwindled to the size of rivulets. In some basins, such as the Riedlingen basin (# 1 in Fig. 2), in the DTM it is possible to differentiate between remnants of the braided proglacial system and a Holocene meandering fluvial pattern (Fig. 3). As a consequence of its lower gradient the Danube reworked the northern part of the alluvium through randomly migrating point bars.

Inside the outer Würmian end moraine the DTM shows several radially oriented branch basins developed at different altitudes (# 5 to 12, 14 and 15 in Fig. 2). The branching arrangement of basins has been outlined by ELLWANGER et al. (2011a, 2011b). Fig. 2 shows that these basins shallow towards the perimeter of glaciation; extension is slightly inferior to the plains located outside the outer Würmian end moraine. Just inside the outer Würmian end moraine of the Schussen lobe (label OWEM-SL in Fig. 2) a series of kilometre-sized elliptical troughs are the smallest basins found in the study area; details are shown in Figs. 4 and 5 ("x" marks). Outwash plains # 5, 6, 12, and 14 show undercutting of former slightly

*Fig. 4: Ice wastage deposits produced between the outer and the inner Würmian end moraine during glacial retreat of the Schussen lobe of the Rhine glacier (areas 6, 7, 8 in Fig. 2). Description and numbering is from North to South and West to East.*

**Older (Russian) drumlin fields overprinted by multiple solifluction processes:** (1).

**Outwash plains fed from breaches through the outer Würmian end moraine:** Saulgau plain (2), Riedtal plain (3), Haidgauer Heide (4).

**Schussen lobe of the outer Würmian end moraine:** white dotted line (OWEM-SL); strongly kettled in the western and northern sector, crested in the eastern sector. Inside the outer Würmian end moraine numerous kilometre-sized frontal basins can be clearly recognized (marked with "x"). For a view in higher resolution, compare Fig. 5.

**Fragmentary moraines inside the outer Würmian end moraine:** well defined in the northwestern sector (5a, 5b); low ridges of hummocks and kettles in the uppermost Schussen valley (6); replacement by terrain of chaotic ice decay landforms with irregular hummocks and kettle holes in the eastern sector (7). For more details, compare Fig. 5.

**Esker relics:** (8); possible kame terraces: (9); possible relics of older (Russian) drumlins: (10).

**Channels parallel to the receding ice margin:** The Steinach valley probably originated as a channel parallel to the receding ice margin (upper course of the Steinach and prolongations as red and cyan dashed lines, respectively). After further ice retreat it changed into a braided stream flowing parallel to and migrating with the receding glacier (black and mauve dashed lines) shaping some scattered remains of hummocky moraines into streamlined relics. For a view in higher resolution, compare Fig. 5. The Durlesbach rivulet is a successor to the former Steinach stream. Initially it also drained towards the North firstly feeding the braided plains left by the disappearing Steinach stream (red and cyan dotted lines) then switching towards the main Schussen valley (black and mauve dotted lines).

**Inner Würmian end moraine:** white dotted line (IWEM); continuous ridge in the south-western sector, reduced to hummocks and kettles where it crosses the Schussen valley. Fragmentary moraines north of the inner Würmian end moraine are particularly well preserved around the Schreckensee lake area.

**Postglacial valley incision:** the steeply incised Schussentobel between Aulendorf and Mochenwangen became strongly overdeepened during glacial retreat towards the Föhrenried basin.

**Lettering (from North to South and West to East):** BSch: Bad Schussenried, WIN: Winterstettenstadt, MUS: Musbach, HEB: Hebershausen, MIC: Michelwinnaden, AUL: Aulendorf, HOS: Hofkirch, ALT: Altshausen, BWa: Bad Waldsee, PFR: Pfrunger Ried, SCH: Schreckensee lake, MOC: Mochenwangen, WIL: Wilhelmsdorf, BER: Bergatreute, FÖH: Föhrenried, WoAch: Wolfegger Ach.

**Shaded grey areas:** lakes. **Inset:** Position within Baden-Württemberg. Orthoview; illumination: 60/37; vertical exaggeration: x 6; pixel size: 16 m.

*Abb. 4: Eiszerfallslandschaft zwischen der Äußeren und der Inneren Würmendmoräne (Gebiete 6, 7, 8 in Abb. 2). Die Beschreibung und Nummerierung geht von Nord nach Süd und West nach Ost.*

**Ältere (rißzeitliche) Drumlinfelder, überprägt von mehrfachen Solifluktionsprozessen:** (1).

**Schotterebenen, gespeist von Durchbrüchen durch die Äußere Würmendmoräne:** Saulgauer Ebene (2), Riedtal-Ebene (3), Haidgauer Heide (4).

**Schussen-Lobus der Äußeren Würmendmoräne:** weiße punktierte Linie (OWEM-SL), im westlichen und nördlichen Bereich mit vielen Toteislöchern, scharf konturiert im östlichen Bereich. Am Innenrand der Äußeren Würmendmoräne liegen zahlreiche kilometergroße Zungenbecken (mit „x“ markiert); Abb. 5 zeigt Details in höherer Auflösung.

**Diskontinuierliche Bögen von lokalen Moränenrücken innerhalb der Äußeren Würmendmoräne sind im nordwestlichen Bereich gut zu erkennen** (5a, 5b); im obersten Schussental erscheinen sie als reliktische, flache Rücken mit zahlreichen Toteislöchern (6). Im östlichen Bereich sind es eher chaotische Eiszerfallsformen mit unregelmäßigen Hügeln und Toteislöchern (7). Abb. 5 zeigt Details in höherer Auflösung.

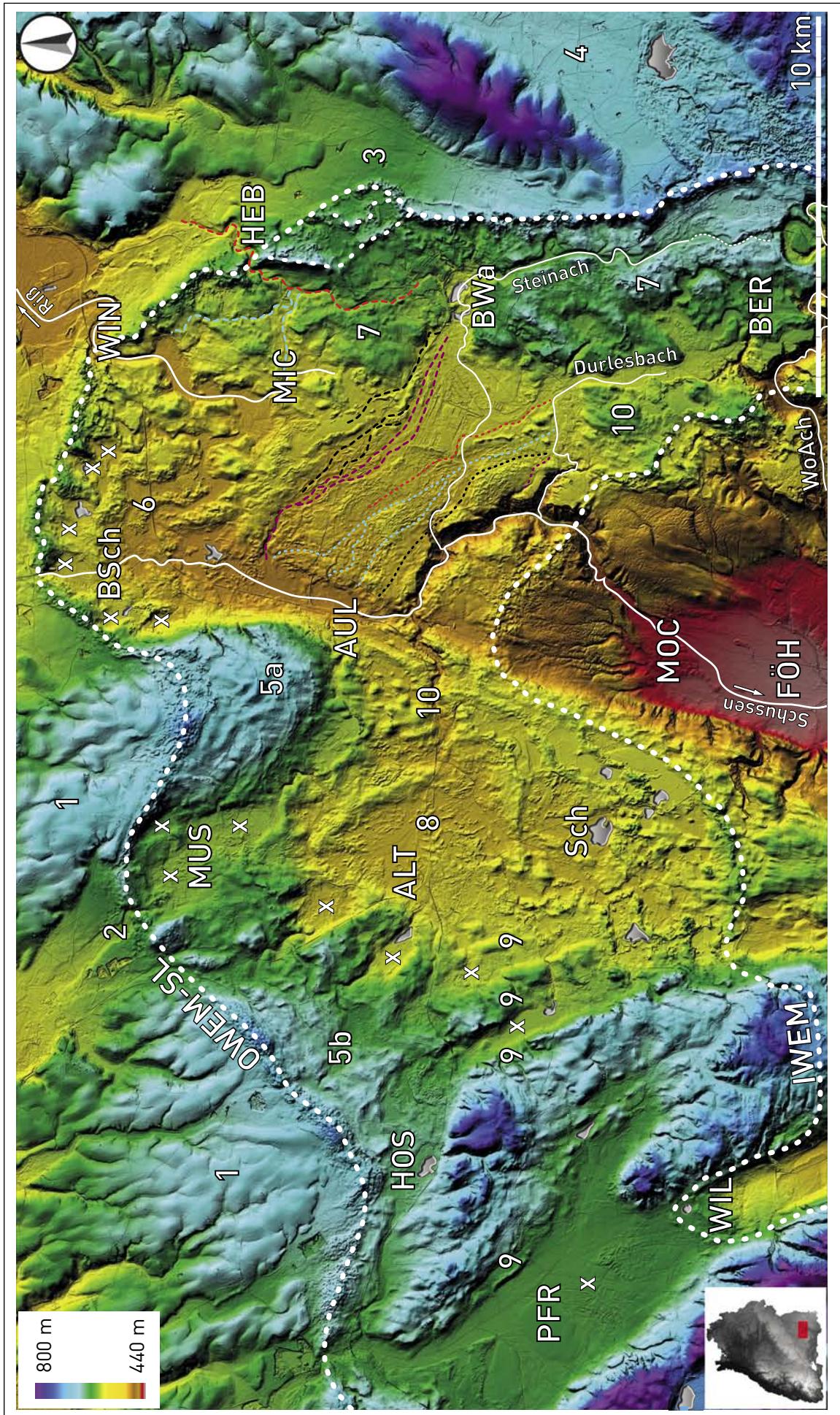
**Eskerrelikte:** (8); mögliche Kometerrassen: (9); mögliche Relikte älterer (rißzeitlicher) Drumlins: (10).

**Eisrandparallele Rinnen:** Das Steinachtal entstand wahrscheinlich als eisrandparallele Rinne (Oberlauf der Steinach und seine ursprüngliche Fortsetzung nach Norden; rote und türkisfarbene gestrichelte Linien). Mit fortschreitendem Eiszerfall entwickelte sich ein verflochtenes Rinnensystem, das dem schwindenden Eisrand folgte (schwarze und violette gestrichelte Linien) und einige lokale Moränenrelikte stromlinienartig überformte. Abb. 5 zeigt Details in höherer Auflösung. Der Durlesbach ist ein Nachfolger des Steinach-Systems und entwässerte ursprünglich ebenfalls nach Norden, wo er zunächst die Zopfstrom-Ebene speiste, welche die Steinach hinterließ (rote und türkisfarbene punktierte Linien), bis er schließlich in Richtung Schussental umgelenkt wurde (schwarze und violette punktierte Linien).

**Innere Würmendmoräne:** weiße punktierte Linie (IWEM), als durchgehender Rücken im südwestlichen Bereich, relikтив mit flachen Hügeln und Toteislöchern im Bereich des Schussentals. Diskontinuierliche Bögen von lokalen Moränenrücken nördlich der Inneren Würmendmoräne sind im Raum des Schreckensees gut erhalten.

**Postglaziale Flusseinschneidung:** die Übertiefung des Schussentobels zwischen Aulendorf und Mochenwangen begann nach dem Zurückweichen der Gletscherfront in das Föhrenried-Becken.

**Beschriftung von Nord nach Süd und West nach Ost:** BSch: Bad Schussenried, WIN: Winterstettenstadt, MUS: Musbach, HEB: Hebershausen, MIC: Michelwinnaden, AUL: Aulendorf, HOS: Hofkirch, ALT: Altshausen, BWa: Bad Waldsee, PFR: Pfrunger Ried, SCH: Schreckensee, MOC: Mochenwangen, WIL: Wilhelmsdorf, BER: Bergatreute, FÖH: Föhrenried, WoAch: Wolfegger Ach. Graue Flächen: Seen; Lage in Baden-Württemberg und Farbhöhencodierung: unten links; Orthoprojektion; Beleuchtung: 60/37; vertikale Überhöhung: x 6; Pixelgröße: 16 m.



north-dipping gravel plains by reversely flowing post-glacial (latest Pleistocene to Holocene) Rhenish waters indicating that infill is related to backfill with outwash during consecutive stages of glacial retreat (SCHREINER 1992b).

According to PREUSSER, REITNER & SCHLÜCHTER (2010) the main Lake Constance basin originated during the Last Glacial Maximum. In contrast, ELLWANGER et al. (2011b) suggested that excavation of this basin is a late event produced by the glacier producing the inner Würmian end moraine.

### 4.3 Fragmentary, kettled and hummocky moraines

Ice wastage products such as fragmentary, kettled, or hummocky moraines (DYKE & SAVELLE 2000, SALCHER, HINSCH & WAGREICH 2010) are typical features of the broad belt between the outer and the inner Würmian end moraine (OWEM and IWEM in Fig. 2). In the sector of the Schussen lobe of the Rhine glacier (OWEM-SL in Fig. 2), especially in the shallow basins of the Aulendorf/Altshausen area (# 7 and 8 in Fig. 2), an extremely well-preserved population of almost all types of ice wastage geomorphology documents ice retreat in great detail (Figs. 4 and 5). Good preservation is a consequence of the position near the present-day Danube/Rhine drainage divide, largely preventing these features from erosional deterioration. In the western part of the Lake Constance region numerous suites of fragmentary moraines covering all stages of ice retreat have been mapped by SCHREINER (1974, 1992a). In our entire study area fragmentary

moraines are locally common, but not systematically recognizable throughout. The term kettled moraine has been introduced by SALCHER, HINSCH & WAGREICH (2010) to describe morphological features produced by dead ice particularly well detectable in a high-resolution DTM. Hummocky moraines are irregular landforms resulting from ablation of detrital load resting on the ice (EVANS 2006, MUNRO-STASIUK & SJOGREN 2006). Most often, these accumulations are partly reworked by subglacial meltwater streams; laterally they might interfinger with eskers or kame terraces.

The outer Würmian end moraine (dotted line labelled OWEM-SL in Figs. 4 and 5) appears strongly kettled in the northern and north-western sector of Fig. 4, whereas it is sharply defined as a crested moraine in the eastern sector. Inside the outer Würmian end moraine a series of narrowly spaced (ca. 1 km) fragmentary recessional moraines can be traced parallel to the main ridge (WEIDENBACH 1975; # 5a, 5b in Fig. 4). On a larger scale (Fig. 5) up to six more or less concentric ridges can be identified. In places, these moraine fragments are reduced to low ridges of hummocks interspersed by kettles, in particular east and south-east of Bad Schussenried (# 6 in Fig. 4 and Fig. 5). In the eastern sector, the belt of recessional moraines is completely replaced by a terrain of chaotic ice decay landforms (# 7 in Fig. 4).

The inner Würmian end moraine (dotted line labelled IWEM in Fig. 4) forms an almost continuous ridge but appears reduced to hummocks and kettles where it crosses the Schussen valley. Fragmentary moraines north of the inner

*Fig. 5: Detailed preservation of glaciogenic features in the area of the northernmost arc of the Schussen lobe of the Rhine glacier. Position corresponds to the north-eastern quadrant of Fig. 4. Colour scale has been adapted to highlight (in red colours) the large and complex flat area of the drainage divide between Danube (via the Riß river) und Rhine (via the Schussen river). SUS: Schussenursprung outlet, WIN: Winterstettenstadt breach, BSch: Bad Schussenried, HEB: Hebershaus breach, MIC: Michelwinnaden, AUL: Aulendorf.*

**Outer Würmian end moraine:** dotted red line (OWEM-SL), clearly defined despite strong overprint by kettles. On the inside it is accompanied by elliptical frontal branch basins (marked with "x") and a series of up to 6 fragmentary moraines (dashed white lines).

**Subglacial channels:** The uppermost course of the Schussen valley may have started to form as a subglacial channel draining the small Upper Schussen basin (grey colour) towards the Schussenursprung (SUS) or neighbouring outlets. In a similar way but on minor dimensions the uppermost part of the Riß valley between Winterstettenstadt and Michelwinnaden also may have originated as a subglacial feature.

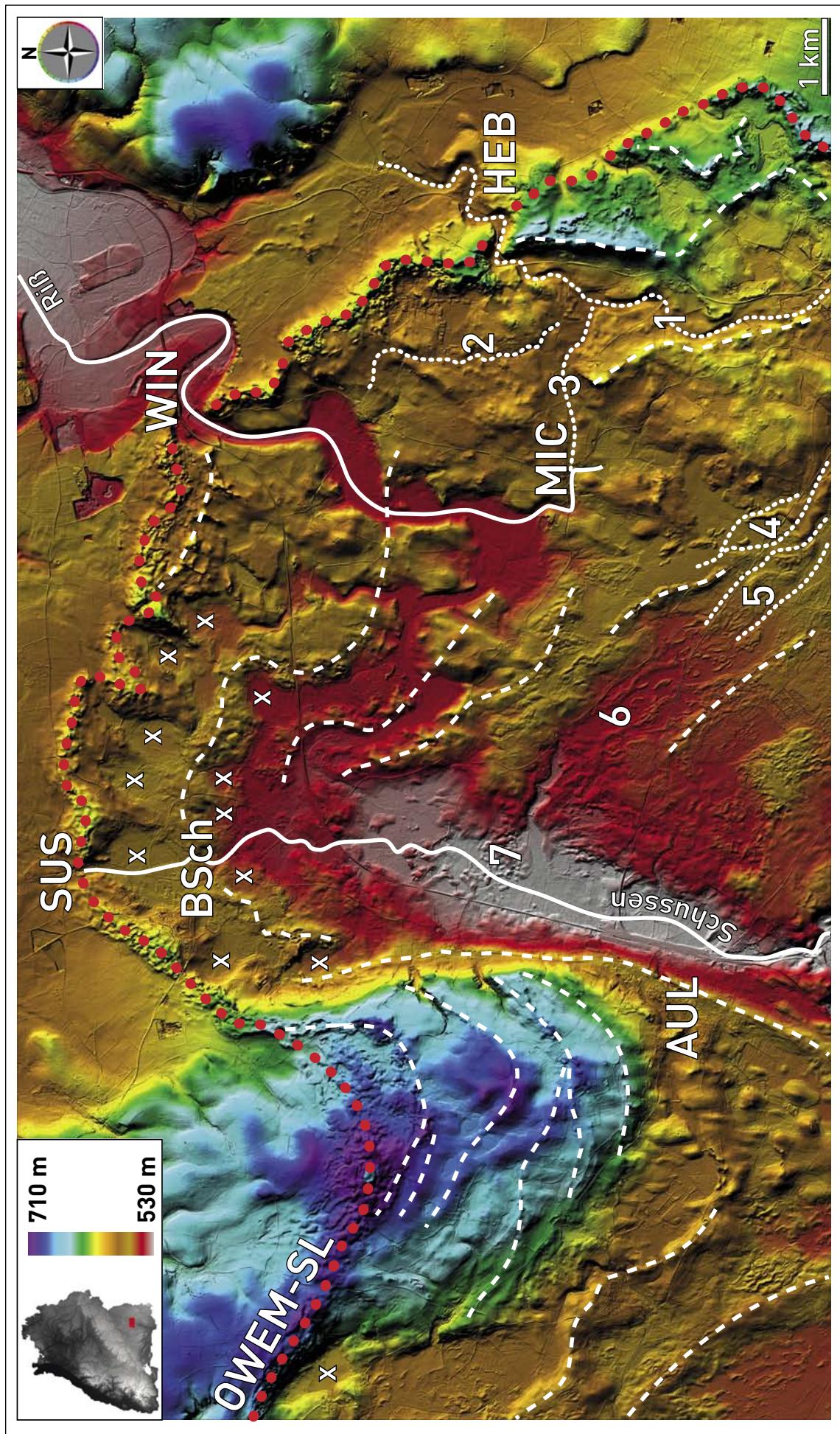
**Channels parallel to the receding ice margin:** The Steinach valley (1, dotted white line; compare Fig. 4 for the wider geographic context) initially may have formed as a channel parallel to outer Würmian end moraine which it eventually crossed at the Hebershaus breach. With further ice retreat it became deflected towards the West (2, 3, white dotted lines) temporarily using the Winterstettenstadt breach. When the retreating glacier front reached the southern rim of the area shown the Steinach changed into a braided stream pattern flowing parallel to and migrating with the receding ice margin (4, 5, white dotted lines). On the outflow plain (6) strong stream flow reworked previous morphological features into streamlined relics; together with a field of chaotic hummocks further downstream (7) this suggests an origin by sudden release of floods caused by breaching of an ice-walled lake. Inset upper left: position within Baden-Württemberg and colour scale. Orthoview; illumination: 60/34; vertical exaggeration: x 5; pixel size: 8 m.

*Abb. 5: Detailgenaue Überlieferung eiszeitlicher Landschaftsformen im Bereich der Wasserscheide Donau/Rhein (nördlicher Schussen-Lobus des Rheingletschers). Die Lage entspricht dem nordöstlichen Quadranten auf Abb. 4. Die Farbhöhencodierung ist so angepasst, dass die weitläufige und komplexe Ebene im Bereich der Wasserscheide zwischen Donau (über die Riß) und Rhein (über die Schussen) in roten Farbtönen hervorgehoben ist. SUS: Schussenursprung-Durchbruch, WIN: Winterstettenstadt-Durchbruch, BSch: Bad Schussenried, HEB: Hebershausen-Durchbruch, MIC: Michelwinnaden, AUL: Aulendorf.*

**Äußere Würmendmoräne:** punktierte rote Linie (OWEM-SL), trotz zahlreicher Toteislöcher prägnant ausgebildet. Auf der Innenseite reihen sich zahlreiche kilometergroße elliptische Zungenbecken (mit „x“ markiert) und mehrere diskontinuierliche Bögen von lokalen Moränenrücken (gestrichelte weiße Linien).

**Subglaziale Rinnen:** Der Oberlauf des Schusselftals könnte als subglaziale Rinne entstanden sein und das obere Schussenbecken (grau) in Richtung auf den Schussenursprung (SUS) oder benachbarte Durchlässe entwässert haben. Als subglaziales Tal, aber in etwas kleinerer Dimension, könnte auch der Oberlauf des Rißtals zwischen Winterstettenstadt und Michelwinnaden begonnen haben.

**Eisrandparallele Rinnen:** Das Tal der Steinach (1, weiße punktierte Linie; zur Lage vgl. Abb. 4) ist möglicherweise als Rinne entstanden, die zunächst parallel zur Äußeren Würmendmoräne verlief und schließlich im Durchbruch von Hebershausen die Moräne kreuzte. Beim Zurückweichen der Eisfront wurde der Fluss nach Westen umgelenkt (2,3, weiße punktierte Linien), wobei er vorübergehend den Durchbruch von Winterstettenstadt benutzte. Als die Gletscherfront den südlichen Teil dieses Gebiets erreichte, breitete sich die Steinach als verflochtenes System in die angrenzende Ebene aus und verlagerte sich mit dem schwindenden Eisrand nach Süden (4,5, weiße punktierte Linien). In der Schwemmebene (6) wurden vorher existierende morphologische Strukturen zu stromlinienförmigen Relikten umgeformt. Zusammen mit einer Ansammlung chaotischer Hügel weiter flussabwärts (7) deutet das auf eine Entstehung durch Schichtfluten, wie sie beispielsweise beim Bersten von Eisrandstausen auftreten. Lage in Baden-Württemberg und Farbhöhencodierung: oben links; Höhenfarbkodierung; Orthoprojektion; Beleuchtung 60/34; vertikale Überhöhung: x 5. Pixelgröße: 8 m.



Würmian end moraine are preserved in the Altshausen basin. In shallow depressions between these fragments of moraines peat bogs have been developing since ice retreat and some small lakes such as the Schreckensee persist until today.

#### 4.4 Subglacial and ice-marginal meltwater channels

As a consequence of the position at the drainage divide between the Danube and the Rhine in the Aulendorf/Hebershausen/Bad Waldsee area (Figs. 4 and 5) an intricate pattern of channels parallel or perpendicular to the outer Würmian end moraine is preserved in great detail. The high-resolution DTM allows detailed morphometric analysis of these features resulting in a reconstruction of the glacio-fluvial history that elucidates the role of initial subglacial channels followed by complex sets of channels running parallel to the receding ice margin.

According to BENETT & GLASSER (2009) subglacial channels are oriented more or less perpendicularly to the ice margin and possess conspicuous convex-up or “humped” irregular long profiles interpreted as a consequence of their origin under pressurized flow. In the Alpine foreland SALCHER, HINSCH & WAGREICH (2010) described the main parameters of subglacial drainage valleys as follows: sinuous, convex-up long profiles, depths of up to 40 m, widths of up to 500 m, lengths in the order of kilometers; channels converge towards the outlet and there merge with proglacial outwash plains. In northern Germany the Weichselian glaciation produced subglacial valleys with dimensions that are an order of magnitude larger than in the Alpine foreland (STACKEBRANDT 2009).

The uppermost course of the Schussen river upstream of Aulendorf shallows and fades out towards the outer Würmian end moraine thus at least partly fulfilling the criteria for the recognition of subglacial valleys listed by BENETT & GLASSER (2009) and SALCHER, HINSCH & WAGREICH (2010). The Schussen river may have started to form as a subglacial valley excavated under pressurized flow draining the small Upper Schussen basin (Fig. 5). During the maximum extension of Würmian glaciation drainage should have crossed the Schussenursprung (SUS in Fig. 5) and neighbouring outlets feeding the adjacent Federsee outwash plain (# 2 in Fig. 2).

Channels parallel to the ice margin are described by GREENWOOD et al. (2007) and BENETT & GLASSER (2009) as systems that tend to form series of approximately straight stream beds parallel with contemporary contours and may possess sudden changes in direction. Inside the outer Würmian end moraine a complex set of channels parallel to the end moraine can be identified in the north-eastern quadrant of the area of Fig. 4.

In its upper course, the small Steinach valley follows the outline of the outer Würmian end moraine. In the DTM it becomes apparent that north of Bad Waldsee it initially

drained northward (red dashed line in Figs. 4 and 5) suggesting an origin as a channel parallel to the receding ice margin outflowing through the Hebershaus breach in the outer Würmian end moraine. With ongoing ice retreat this channel became deflected towards the West (cyan dashed lines in Fig. 4; in Fig. 5 white dashed lines numbered 1, 2, and 3). When the retreating glacier eventually reached the area of Bad Waldsee, the Steinach predecessor changed into a braided stream flowing parallel to and migrating with the receding ice margin (black and mauve dashed lines in Fig. 4; in Fig. 5 white dashed lines numbered 4 and 5) reshaping some scattered remains of hummocky moraines into streamlined relics (# 6 in Fig. 5). In the field these features are almost impossible to identify as they occur in an area now mostly covered by dense vegetation (Tannwald forest). The reshaping of hummocks within a large field of interwoven strings of braided stream deposits evokes the effects of spontaneous flooding as a result from breaching ice-walled lakes. A good candidate would be the Bad Waldsee trough which until today harbours two small lakes (Fig. 4).

The Durlesbach valley north of Bergatreute also initially drained towards the North firstly feeding the braided plains left by the disappearing Steinach stream (red and cyan dotted lines in Fig. 4) then switching towards the main Schussen valley which gradually deepened as ice receded (black and mauve dotted lines in Fig. 4).

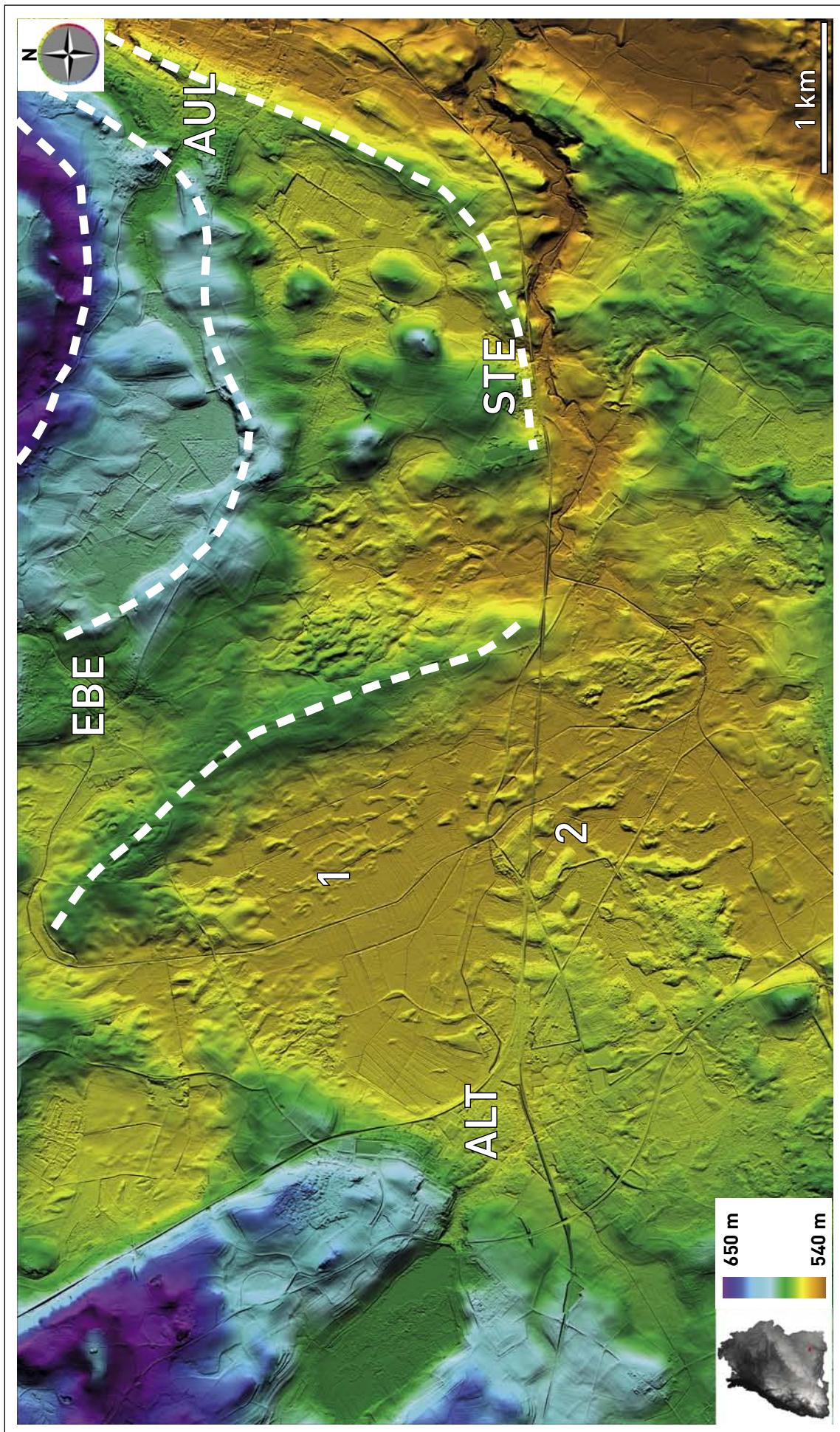
#### 4.5 Esker relics and possible kame terraces preserved in the Altshausen plain

Within our study area eskers are rarely observed. Best preservation again is given near the drainage divide Danube/Rhine, especially in the Altshausen plain (Figs. 2, 4 and 6). According to GRIPP (1978), STREHL (1998), GRUBE (2011) and BENETT & GLASSER (2009) eskers are sinuous subglacial ridges which may occur singly or in a braided pattern. Braided eskers are often associated with kame terraces, kettled topography and hummocky moraines (EVANS 2006, BENETT & GLASSER 2009). According to SALCHER et al. (2009) and BENETT & GLASSER (2009) kame terraces develop synchronously to ice wastage along the flanks of ice lobes. Common marks are the diamictitic rock texture and occasional Gilbert-type deltas of varying dimensions; they may occur singly or in parallel flights of terraces with heights of up to tens of meters.

The Altshausen plain appears to be a composite of several rather small branch basins filled with basal till as well as fragmentary and hummocky moraines (Fig. 6; for a view of the wider geographic context, compare Figs. 4 and 2). Conspicuous morphological features are elongated, up to 800 m long ridges standing between 1 and 5 m above the level of the surrounding basal till. Due to their low relief and the vegetation cover they are hard to recognize in the field and

Fig. 6: Esker relics preserved in the Altshausen plain. Eskers range in height from 1 m (1) to 5 m (2) and are up to 800 m long. Dashed white lines: fragmentary recessional moraines inside the outer Würmian end moraine. EBE: Ebersbach, AUL: Aulendorf, ALT: Altshausen, STE: Steinenbach. Inset lower left: position within Baden-Württemberg and colour scale. Orthoview; illumination: 90/35; vertical exaggeration: x 4; pixel size: 4 m.

Abb. 6: Relikte von Eskern in der Altshausener Ebene. Die Esker sind zwischen 1 m (1) und 5 m (2) hoch und bis 800 m lang. Gestrichelte weiße Linien: diskontinuierliche Bögen von lokalen Moränenrücken innerhalb der Äußeren Würmendmoräne. EBE: Ebersbach, AUL: Aulendorf, ALT: Altshausen, STE: Steinenbach. Lage in Baden-Württemberg und Farbhöhencodierung: unten links; Orthoprojektion; Beleuchtung: 90/35; vertikale Überhöhung: x 4; Pixelgröße: 4 m.



not mapped on scale 1:25000 (WEIDENBACH 1975) but are well recognizable in a vertically exaggerated DTM (# 8 in Fig. 4, # 1 and 2 in Fig. 6) and interpreted as eskers. Cross-sections are exposed along the railway line directly east of Altshausen station. The DTM also reveals markedly elongated ridges (# 9 in Fig. 4) partly bordering kilometre-sized branch basins ("x" in Fig. 4). Despite the lack of diagnostic field criteria such as delta deposits we tentatively interpret these structures as possible kame terraces.

#### 4.6 Micromoraines preserved in the Röschenwald forest

About 6 km south of Aulendorf string-like, more or less parallel ridges with heights only between 1 and 2 m and maximum lengths of 200 m are exquisitely preserved within a densely forested area named Röschenwald (approximately 20 to 30 km<sup>2</sup>) extending on both sides of the lower part of the Schussentobel (Fig. 7; compare Figs. 4 and 2 for the local context). In a densely forested area these structures would escape the attention of even an experienced geologist. However, after knowing from the DTM what to look for they can be recognized indeed, albeit only when following a tight search pattern ignoring obstacles. As far as we could realize during our ground checks these ridges probably consist of material comparable to reworked basal till although as a consequence from extremely poor outcrop conditions diagnostic criteria such as diamictitic till texture and striated boulders cannot be ascertained at the moment. These features are superimposed to the upper slope of the Föhrenried basin North of Ravensburg (# 14 in Fig. 2, compare also Fig. 4) forming a slightly inclined ramp dipping from 575 to 550 m over a distance of 5 km (gradient: 5 ‰). In the lower part of the slope (transition from brown to red colours in Fig. 7) these features gradually disappear being replaced by smooth basal till surfaces.

String-like moraines commonly are regarded products of intermittent episodes of backmelting and readvance of the glacier front (SCHREINER 1992b). Based on actualistic observations in Spitsbergen, however, STACKEBRANDT et al. (1997) pointed out that there are two alternatives to the common model of oscillatory movement of ice: a) push moraines and b) supraglacial moraines. *Push moraines* result from folding, imbrication and/or thrusting of proglacial material related to local surges during stationary episodes. Commonly they form concentric garland-like structures surrounding

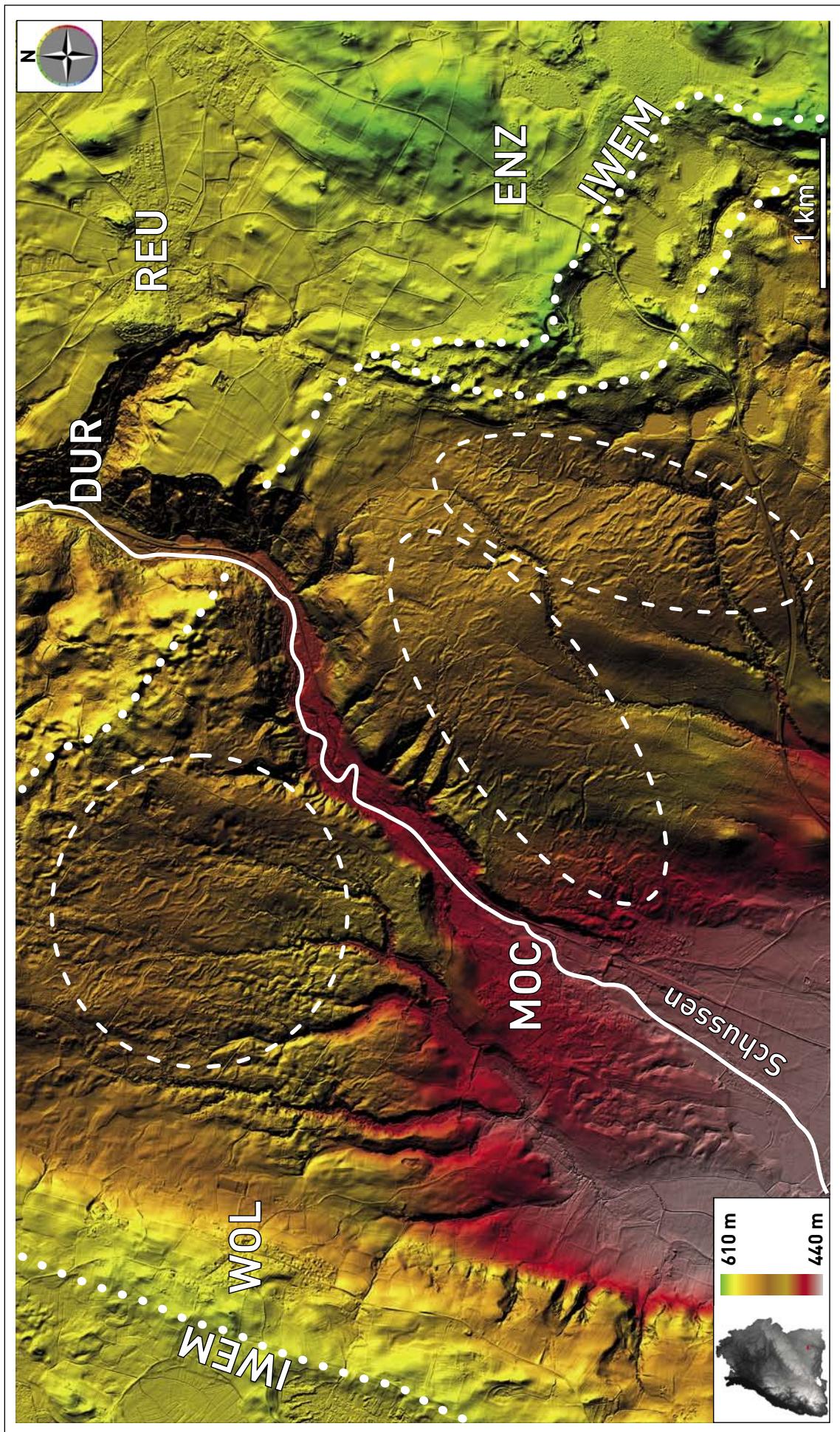
the snout of glaciers. From the petrographic point of view the decisive criterion for recognition is well-visible soft-sediment deformation affecting proglacial sediments only; subglacial material such as basal till and striated boulders is only marginally involved. A well-known example from northern Germany is the Muskauer Faltenbogen (KUPETZ 1996). However, the dimensions of such push moraines are an order of magnitude larger than the patterns observed.

Following STACKEBRANDT et al. (1997) and HÄTTESTRAND & JOHANSEN (2005) *supraglacial moraines* commonly are metre-thick ridges covering blue ice. They mainly result from transport of subglacial material along shear bands in areas of compressive ice flow (i.e., grounded glacier snouts); folding can occur locally and larger moraines may be pitted with sink holes. At the surface this debris accumulates as meltout till or sublimation till. Supraglacially entrained colluvium from surrounding slopes might be an additional source of material (HÄTTESTRAND & JOHANSEN 2005); petrographic distinction from push moraines is based on the dominance of angular clasts and the presence of diamictitic till texture and striated boulders. Dimensions and spacing of the ridges at the Röschenwald site might be in accordance with an interpretation as supraglacial moraines. These features do not occur elsewhere in the entire study area. The Röschenwald site is exceptional inasmuch as it is the only region forming an extended, slightly inclined ramp facing the ancient retreating glacier front. The observed ridges are distinctly smaller than continuous or fragmentary moraines and follow a much more regular pattern than hummocky moraines. Due to the extremely poor outcrop conditions, however, a supraglacial origin resulting from shearing in frontal parts of the glacier accompanied by entrainment of basal till cannot be confirmed so far. Therefore, we rather prefer the descriptive term *micromoraines* for the string-like ridges in the Röschenwald site, reaching heights between 1 and 2 m and maximum lengths of 200 m.

In the DTM, on the other hand, it is obvious that at the time of the formation of the micromoraines the glacier snout was facing the slightly south-dipping upper rim of the Föhrenried basin. Increased basal shear stress might indeed have resulted in extensive frontal shearing and overthrusting producing supraglacial meltout/sublimation moraines. Their gradual disappearance upon the lower part of the ramp might be interpreted as the consequence of accelerated ice retreat.

Fig. 7: Micromoraines (circled areas) on the forest-covered northern slope of the Föhrenried basin; the region corresponds to the south-central part of Fig. 4. The brown-coloured surfaces display a dense (roughly hundred-metre-spaced) succession of micromoraines with heights between 1 and 2 m and lengths in the order of 100 m interpreted to reflect valley glacier retreat upon the slightly inclined upper ramp of the Föhrenried basin. The deeply incised lower part of the Schussentobel between Durlesbach and Mochenwangen is a product of post-glacial erosion towards the base level of the Föhrenried basin. Dotted white line: inner Würmian end moraine (IWEM). DUR: Durlesbach, REU: Reute, WOL: Wolpertswende, ENZ: Enzisreute, MOC: Mochenwangen. Inset lower left: position within Baden-Württemberg and colour scale. Orthoview; illumination: 60/34; vertical exaggeration: x 5; pixel size: 4 m.

Abb. 7: Mikromoränen (eingekreiste Gebiete) auf der waldbedeckten nördlichen Böschung des Föhrenried-Beckens; das Gebiet entspricht dem mittleren südlichen Sektor von Abb. 4. Die bräunlichen Teile der Oberfläche zeigen eine dichte Abfolge von Mikromoränen (1 bis 2 m hoch, 100–200 m lang, Abstände im Bereich 100 m), die während des Rückschmelzens des Talgletschers auf der leicht nach Süden geneigten oberen Böschung des Föhrenried-Beckens entstanden sein müssen. Der tief eingeschnittene Schussentobel ist das Ergebnis postglazialer rückwärtiger Erosion auf das Niveau des Föhrenried-Beckenbodens. Punktierter weißer Linie: Innere Würmendmoräne (IWEM). DUR: Durlesbach, REU: Reute, WOL: Wolpertswende, ENZ: Enzisreute, MOC: Mochenwangen. Lage in Baden-Württemberg und Farbhöhenkodierung: unten links; Orthoprojektion; Beleuchtung: 60/34; vertikale Überhöhung: x 5; Pixelgröße: 4 m.



## 4.7 Complex landforms at the Binzen bifurcation of the outer Würmian end moraine

The region covered by Fig. 8 shows a remarkable example for complex pattern of intricately interwoven glacial landforms. The outer Würmian end moraine bifurcates at the hamlet of Binzen (BiBi in Figs. 2 and 8). Both branches of outer Würmian end moraines are clearly outlined. At the scale shown in Fig. 8 it becomes evident that the end moraine of the Schussen lobe (OWEM-SL) markedly crosscuts the adjacent end moraine of the Leutkirch lobe (OWEM-LL), indicating that the Schussen lobe had persisted longer than the Leutkirch lobe. This fact provides valuable arguments for the reconstruction of the glacial and post-glacial history of the area. Inside the Leutkirch lobe up to four fragmentary

recessional moraines are locally well defined (dashed lines in Fig. 8), which is also known from geologic mapping at a scale of 1:25000 (Szenkler & Ellwanger 1995, Szenkler & Ellwanger 1997).

Outflow from the Leutkirch lobe must have been strong because all surrounding ancient Rissian subglacial basins (Wurzacher Ried and Leutkircher Heide) are filled almost to the level of the Würmian end moraine. Main breaches were situated in the Rohrsee area and at Hünlishofen and Bettelhofen (# 1, 2, 3 in Fig. 8). A considerable part of the sediment supply to the Leutkircher Heide plain also came from the broad South-North-oriented Eschach valley paralleling the former ice margin.

Today the drainage divide between Danube and Rhine crosses the Gründlenried plain. This plain most probably

Fig. 8: Complex landforms at the Binzen bifurcation (BiBi) of the outer Würmian end moraine. Black lines: Danubian rivers; white lines: Rhenish rivers. Black patches: lakes. Lettering from North to South and West to East: BWa: Bad Waldsee, BWu: Bad Wurzach, LEU: Leutkirch, WOL: Wolfegg, KIS: Kiflegg. Outer Würmian end moraines (dotted white lines): End moraine of the Schussen lobe of the Rhine glacier: OWEM-SL; end moraine of the Leutkirch lobe of the Rhine glacier: OWEM-LL. Note that the end moraine of the Schussen lobe (OWEM-SL) crosscuts the end moraine of the Leutkirch lobe (OWEM-LL) meaning that the Schussen lobe had persisted longer than the Leutkirch lobe. Major breaches in the Leutkirch lobe end moraine: Rohrsee (1), Hünlishofen (2), Bettelhofen (3). Fragmentary moraines inside the Leutkirch lobe: dashed white lines.

**Fan of strongly reworked ice decay deposits:** Rohrsee Chaos (red-rimmed area); this fan is interpreted as a result of spontaneous flooding from the breaching of an ice-walled lake. As a consequence from subsequent incision of the Wolfegger Ach valley the apex of the fan and parts of the original feeding area are no longer preserved.

**Subglacial channels:** The uppermost course of the Wolfegger Ach in the Kiflegg area shows characteristics for an interpretation as a subglacial channel. Initially it should have drained reversely (northward) joining the lower Rot valley across the Gründlenried plain and eventually breaching the outer end moraine at the Hünlishofen outlet (2). At a higher level than today (cyan colours) the lower course of the Wolfegger Ach upstream of Wolfegg also may have started as a subglacial valley feeding the Wurzacher Ried plain. The last product of this high-level drainage system would have been the Rohrsee Chaos.

**Channel parallel to the receding OWEM-SL ice margin:** After its initial subglacial valley stage the Wolfegger Ach upstream of Wolfegg started to incise breaching the Schussen lobe end moraine (OWEM-SL) following the south-westerly receding ice margin creating a first channel which is the valley today occupied by the Steinach (compare Fig. 4 for the prolongation towards the North). Further incision of the Wolfegger Ach resulted in the formation and subsequent undercutting of the valley meander of Witschwende (4). Laterally this level corresponds to the early Durlesbach system (5) developing as a late channel parallel to the vanishing ice margin (compare Fig. 4 for the prolongation towards the North).

**Relics of drumlins:** In the Kiflegg sector a large fan of drumlins can be recognized, but in comparison with the pristine examples presented in Fig. 9 these drumlins appear rather deteriorated. We conclude that these features are relics of older Rissian drumlin fields that largely escaped Würmian glacial erosion as a result from reduced shear stress under a relatively thin ice sheet. Inset upper right: colour scale and position within Baden-Württemberg. Orthoview; illumination: 90/35; vertical exaggeration: x 4; pixel size: 16 m.

Abb. 8: Komplexe eiszeitliche Landschaftsformen im Bereich der Bifurkation von Binzen (BiBi, Äußere Würmendmoräne). Schwarze Linien: Donauzuflüsse; weiße Linien: Rheinzuflüsse. Schwarze Flächen: Seen. Beschriftung von Nord nach Süd und West nach Ost: BWa: Bad Waldsee, BWu: Bad Wurzach, LEU: Leutkirch, WOL: Wolfegg, KIS: Kiflegg.

**Äußere Würmendmoränen (punktierte weiße Linien):** Endmoräne vom Schussen-Lobus des Rheingletschers (OWEM-SL); Endmoräne vom Leutkirch-Lobus des Rheingletschers (OWEM-LL). Größere Durchbrüche durch die Endmoräne des Leutkirch-Lobus: Rohrsee-Pforte (1), Hünlishofen (2), Bettelhofen (3). Diskontinuierliche Bögen von lokalen Moränenrücken innerhalb des Leutkirch-Lobus: weiße gestrichelte Linien.

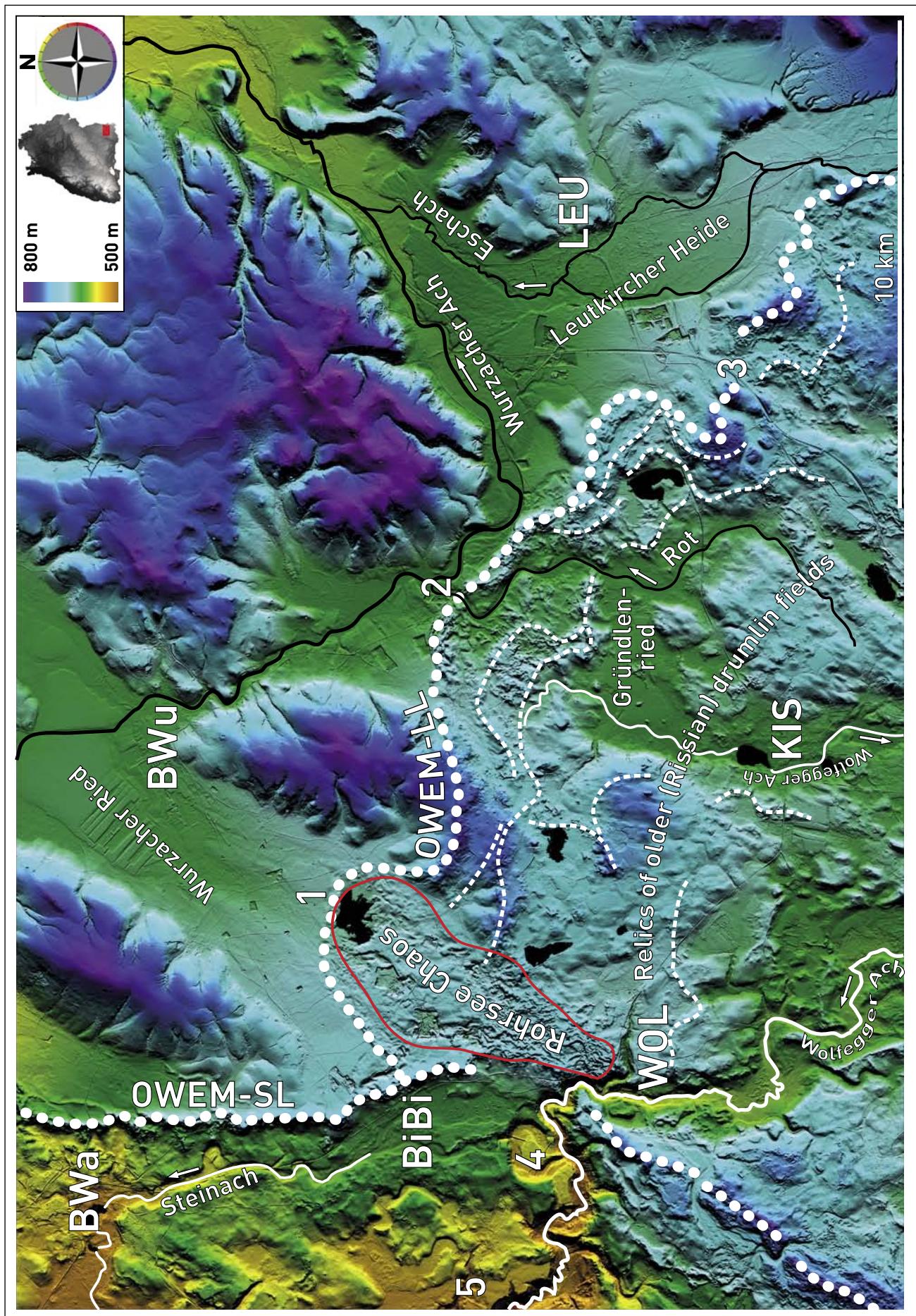
**Rohrsee-Chaos (rote Umrandung):** ein Fächer aus aufgearbeiteten Eiszerfallsablagerungen, interpretiert als Ergebnis einer Schichtflut aus einem beraustenden Eisrandstausee. Der Apex des Fächers und Teile des Zustromgebiets sind durch die postglaziale Übertiefung des Tals der Wolfegger Ach nicht mehr erhalten.

**Subglaziale Rinnen:** Im Raum Kiflegg zeigt der Oberlauf der Wolfegger Ach morphometrische Merkmale, die auf eine Entstehung als subglaziale Rinne deuten. Demnach hätte dieser Raum ursprünglich nach Norden entwässert und über die Ebene von Gründlenriet und das untere Rottal den Durchbruch von Hünlishofen (2) erreicht. Ebenso wahrscheinlich ist es, dass auch der Unterlauf der Wolfegger Ach stromauf von Wolfegg auf einem höheren Niveau als heute (Farbtön: türkis) als subglaziale Rinne begonnen hat und in die Ebene des Wurzacher Rieds entwässerte. Der jüngste und letzte Zeuge dieses relativ hochliegenden Drainagesystems dürfte das Rohrsee-Chaos sein.

**Eisrandparallele Rinnen:** Mit dem Zurückweichen des Schussen-Lobus begann die Wolfegger Ach, sich einzutiefen und durchbrach zunächst die Endmoräne nördlich von Wolfegg. Als erste eisrandparallele Rinne entwickelte sich dann das Tal, das heute in Teilen noch vom Oberlauf der Steinach eingenommen wird (vgl. Abb. 4 für die Fortsetzung nach Norden). Mit fortschreitender Eintiefung wurde die Steinach-Rinne deaktiviert und es entstand die Talschlange von Witschwende (4). Auch diese wurde durch ein weiteres kurzlebiges System unterschnitten, welches auf das Niveau des frühen Durlesbachs (5) ausgerichtet war (vgl. Abb. 4 für die Fortsetzung nach Norden).

**Drumlin-Relikte:** Im Raum Kiflegg ist ein großer Fächer von Drumlins zu erkennen, doch im Gegensatz zu den detailgenau erhaltenen Vorkommen von Abb. 9 sind diese Drumlins morphologisch degradiert. Wir halten die Strukturen für Relikte eiszeitlicher Drumlinfelder, die wegen der geringen Mächtigkeit des Leutkirch-Lobus während der Würmvereisung nur teilweise erodiert wurden.

Lage in Baden-Württemberg und Farbhöhencodierung: oben rechts; Orthoprojektion; Beleuchtung: 90/35; vertikale Überhöhung: x 4; Pixelgröße 16 m.



results from the filling of a small and shallow subglacial basin. It seems very probable that the uppermost course of the Wolfgenger Ach originated as a subglacial valley initially draining reversely, crossed the Gründlenried area, joined the lower Rot valley, and breached the outer end moraine at Hünlishofen. At a much higher level than today (cyan colours in Fig. 8) the Wolfgenger Ach upstream of Wolfegg most probably also started as a subglacial valley draining upon the outwash plain of the Wurzacher Ried. After ice retreat of the Leutkirch lobe to a line south of Wolfegg, the Schussen lobe must have persisted, deflecting the entire meltwater outflow of the Leutkirch lobe towards the Wurzacher Ried plain. From the occurrence of a fan-shaped field of chaotic deposits (named Rohrsee Chaos in Fig. 8) we conclude that an ice-walled lake must have existed temporarily in this area. The release of a large flood by breaching would explain the existence of this extraordinary morphological feature. Recently, and also on the basis of DEM analysis similar phenomena have been discovered in north-western Germany (WINSEMANN et al. 2011). In the field, however, it is hardly possible to identify any of the particular marks clearly visible in the DTM.

When the Schussen lobe eventually also started to melt back the Wolfgenger Ach breached the Schussen lobe end moraine creating at first a channel running parallel to the receding ice margin which is the valley today occupied by the Steinach running towards Bad Waldsee (Fig. 8; compare Fig. 4 for its prolongation towards the North). With ongoing ice retreat the Steinach system became replaced by the Durlesbach system developing at a lower level and slightly further West as a late channel parallel to the vanishing ice margin (Fig. 4 and # 5 in Fig. 8).

## 4.8 Drumlins

### *Würmian drumlins*

In the study area, on geological maps at a scale of 1:25000 (SCHMIDT & BRÄUHÄUSER 1913, BRÄUHÄUSER 1976, SCHMIDT & MÜNST 1978, SCHREINER 1978, ERB 1989, 1995, SZENKLER & ELLWANGER 1995, SCHMIDT 1998, JAUD, SZENKLER & ELLWANGER 2001) drumlins are identified with great accuracy. Length/width/height ratios have been noted accordingly but a clear distinction into separate fields of high- and low-

convexity drumlins has not been made so far. In the DTM the area between the inner Würmian end moraine and the last stationary (mainly erosional) episode during glacial retreat ("Konstanzer Stadium", label "KS" in Figs. 2 and 9) is a textbook example of the radial arrangement and lateral morphological variability of Würmian drumlins produced under a thick ice load during maximum extension of the glacier. Fig. 9 shows this fan-shaped arrangement of drumlins in the Überlingen - Friedrichshafen - Ravensburg triangle.

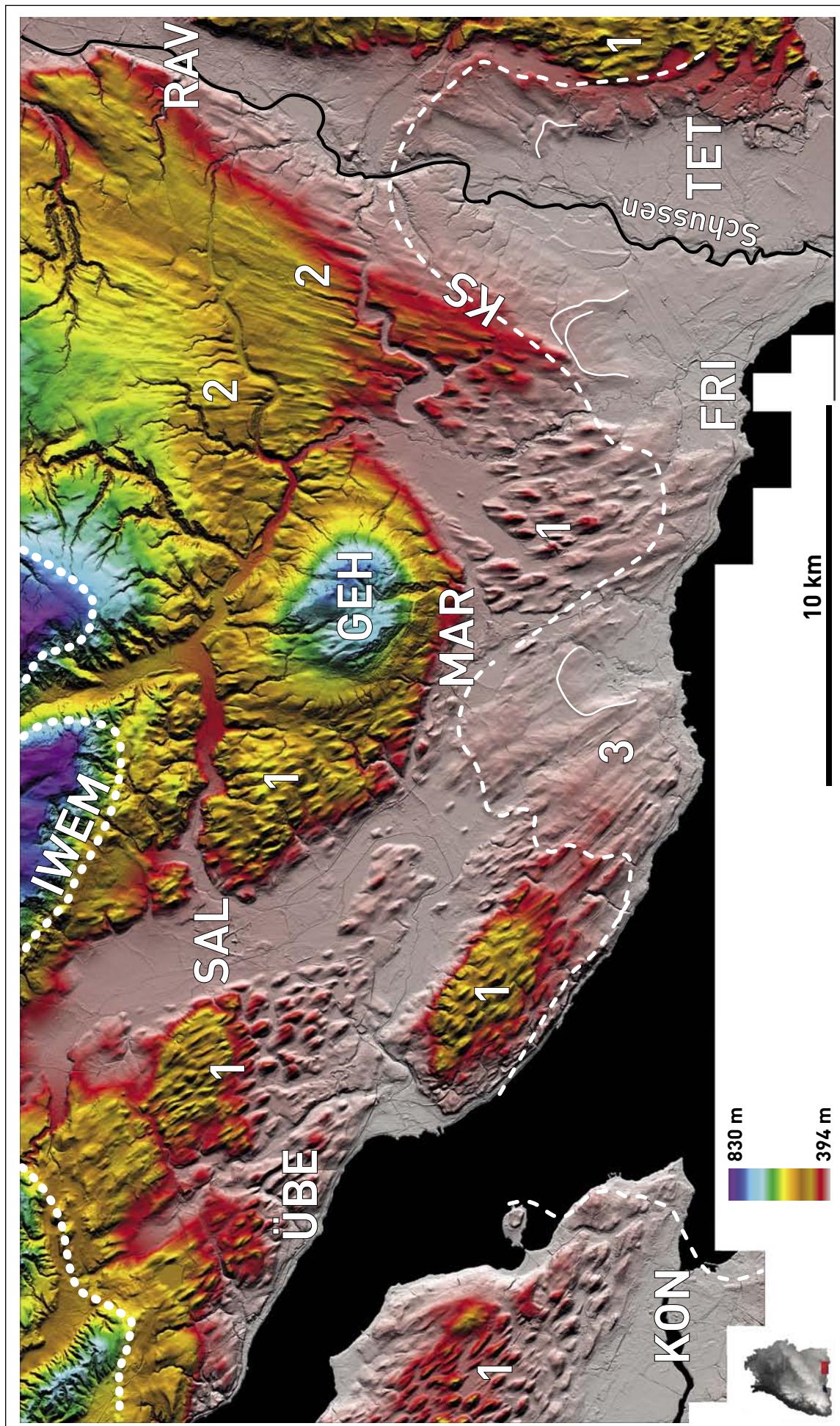
Within this domain, radially elongated high-convexity drumlins (CLARK et al. 2009: "classically-shaped drumlins") distally grade into low-convexity equivalents (CLARK et al. 2009: "spindle-shaped drumlins") fading out with distance (for an overview in regional context, compare Figs. 1 and 2). In the DTM high-convexity drumlins (# 1 in Fig. 9) are more or less elliptical in map view, possess lengths of up to 1 km, maximum heights of 60 m and often show a marked crest line. Low-convexity drumlins (# 2 in Fig. 9) are extremely elongated, streamlined hills with maximum lengths of 4 km and maximum heights of 20 m although the average elevation above the surrounding basal till surface is only around 5 m.

In the DTM (Figs. 1, 2, and 9) it appears that high-convexity drumlins are the common case in the region, whereas low-convexity drumlins are restricted to the western flank of the lower Schussen valley and an area south of Markdorf. SCHMIDT (1998) suggested that the shape of such hills depends on the gradient of the surface underneath the ice sheet. We observe that high-convexity drumlins occur where the local gradient is steeper and low-convexity drumlins occur where a broad ramp with a very low gradient exists, especially along the western side of the Lower Schussen basin. An obvious explanation would be that as a consequence from the low gradient ice flow rates were high enough to allow basal till material to be thoroughly smeared out rather than shaped into the classical sheep-back styled hills. In contrast, a slower ice motion on steeper ground would reduce shear stress at the base of the ice sheet resulting in drumlins of higher convexity.

It might be speculated whether the flat ramp that bears the low-convexity drumlins is an inheritance from Rissian times, e.g., a relic of the floor of a formerly much wider subglacial basin (predecessor of the Würmian Lower Schussen

Fig. 9: Drumlins in the Lake Constance (black) area. Black line: lower Schussen river; white dotted line: inner Würmian end moraine (IWEM); white dashed line: "Konstanzer Stadium" line (KS); thin white lines: fragmentary moraines inside the KS line. Lettering from North to South and West to East: RAV: Ravensburg, SAL: Salem, ÜBE: Überlingen, GEH: Gehrenberg, MAR: Markdorf, KON: Konstanz, FRI: Friedrichshafen, TET: Tettnang. Drumlins occur in the segment between the inner Würmian end moraine (IWEM) and the "Konstanzer Stadium" line (KS) forming a radially fanning belt. High-convexity drumlins (1) are abundant in the western part of this region. Low-convexity drumlins (2) are restricted to the western side of the Lower Schussen valley. Inside the "Konstanzer Stadium" line drumlins appear truncated (3) as a result from erosion underneath a shallow ice sheet during this last stationary episode. Inset lower left: position within Baden-Württemberg and colour scale. Orthoview; illumination: 90/38; vertical exaggeration: x 4; pixel size: 16 m.

Abb. 9: Drumlins im Gebiet des Bodensees (schwarz). Schwarze Linie: Schussen; weiße punktierte Linie: Innere Würmendmoräne (IWEM); weiß gestrichelt: Ausstrich von Endmoräne und lokalen kliffähnlichen Abschürfungsmerkmalen des „Konstanzer Stadiums“ (KS); dünne weiße Linien: Moränenrelikte innerhalb der Endmoräne des Konstanzer Stadiums. Beschriftung von Nord nach Süd und West nach Ost: RAV: Ravensburg, SAL: Salem, ÜBE: Überlingen, GEH: Gehrenberg, MAR: Markdorf, KON: Konstanz, FRI: Friedrichshafen, TET: Tettnang. Würmeiszeitliche Drumlins kommen vorwiegend im Segment zwischen der Inneren Würmendmoräne (IWEM) und der Endmoräne des „Konstanzer Stadiums“ (KS) vor und bilden dort einen radial aufgefächerten Gürtel. Hochkonvexe Drumlins (1) dominieren im Westen, niedrigkonvexe Drumlins (2) sind auf die Westflanke des unteren Schusselftals beschränkt. Innerhalb der Endmoräne des „Konstanzer Stadiums“ (KS) besitzen die Drumlins ein Aussehen, das auf Abschliff durch eine dünne Eisdecke deutet. Lage in Baden-Württemberg und Farbhöhencodierung: unten links; Orthoprojektion; Beleuchtung: 90/38; vertikale Überhöhung: x 4; Pixelgröße 16 m.



basin). In literature ( SCHMIDT & MÜNST 1978, SCHREINER 1978, ERB 1995, SCHMIDT 1998) there has also been some discussion on the question whether the drumlins themselves should be considered a Rissian inheritance. The pristine preservation clearly visible in the DTM, however, suggests that these drumlin fields are authentic Würmian phenomena. It also indicates that ice retreat between the inner Würmian end moraine and the KS line must have been so rapid as to leave the drumlins mostly unharmed by overprinting through processes of prolonged ice wastage.

Inside the “Konstanzer Stadium” (KS) line drumlins appear strongly flattened (# 3 in Fig. 9) and generally provide an abraded appearance. In our opinion this truncation could have occurred under a temporary shallow ice cover during this last stationary episode in ice retreat. A few fragments of moraines (white lines in Fig. 9) presumably are the youngest glacial features preserved in south-western Germany. There has been some debate as to whether a “Konstanzer Stadium” (SCHREINER 1974, 1992a, KELLER & KRAYSS 1994, 2000, GEYER, SCHOBER & GEYER 2003) did exist at all (ELLWANGER et al. 2011b). From the evidence provided by the DTM, however, there is no doubt that a stationary episode occurred indeed producing abrasional phenomena in the western part of the area of Fig. 9 and moraines in the Lower Schussen valley.

#### Rissian drumlins

Würmian drumlins are typically restricted to the area inside the inner Würmian end moraine (see Fig. 2). Outside (north of) the outer Würmian end moraine morphology is dominated by gentle undulating hills most probably representing older (Rissian) drumlin fields overprinted by multiple solifluction processes (# 1 in Fig. 4, SCHMIDT & MÜNST 1978, SCHREINER 1978, ERB 1995, SCHMIDT 1998).

In the space between the outer and inner Würmian end moraine the DTM reveals some probable relics of Rissian drumlins (# 10 in Fig. 4). In our opinion, an occurrence of drumlin-like structures within the belt between the outer and the inner Würmian end moraines rather points to an origin as older (Rissian) drumlins which in places escaped Würmian glacial abrasion.

Radially arranged, more or less deteriorated drumlins are an obvious landmark in the southern part of the region of Fig. 8. As in the Aulendorf area (Fig. 4) the occurrence of

drumlins in such a position is incongruous with their typical Würmian distribution (restriction to the belt between the inner Würmian end moraine and the “Konstanzer Stadium”, compare Figs. 2 and 9). We conclude that this more or less well preserved fan of drumlins is another relic of older (Rissian) drumlin fields that largely escaped Würmian glacial erosion as a result from reduced shear stress under a thin ice sheet. In addition, the almost complete lack of kettles in this sector suggests very rapid ice retreat which in turn would prevent the drumlin relics from prolonged overprint by ice wastage processes. In the corresponding geological map on scale 1:25000 (ELLWANGER et al. 2008) these features are interpreted as Rissian moraine sediments.

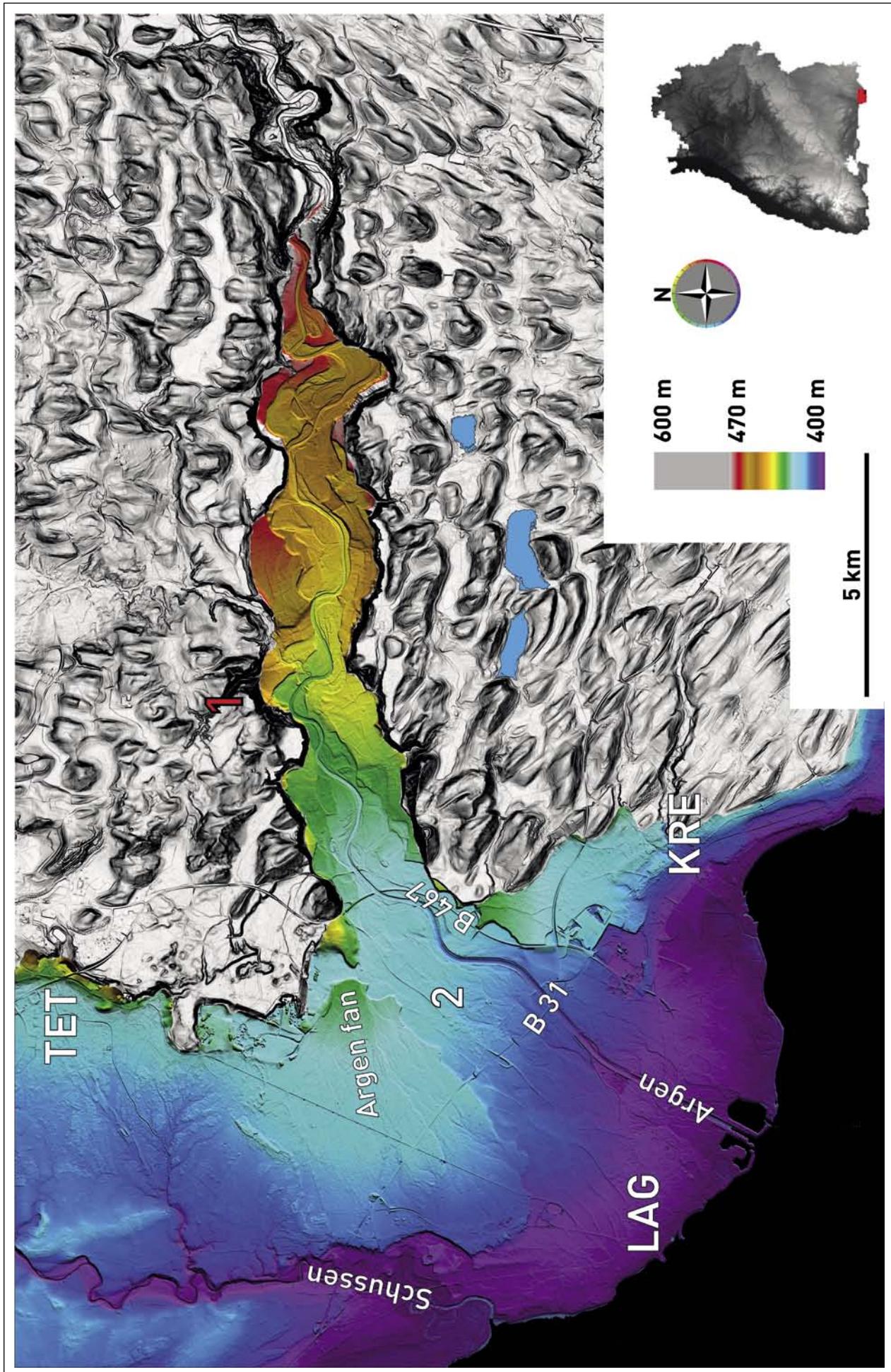
#### 4.9 Recessional terraces in the Argent valley

Within our study area the lower parts of the Argent valley display the best-preserved complex pattern of recessional terraces (Fig. 10). Five terraces are expressed in the DTM and also known from geological mapping at a scale of 1:25000 (SCHMIDT & MÜNST 1978). Incision among consecutive terraces ranges from 12 m (between old upper terraces) to 3.5 m (between young lower terraces). The valley crosscuts all previous glaciogenic deposits (in this area, almost exclusively high-convexity drumlins, SCHMIDT 1998). As elsewhere in the Alpine foreland, this type of post-glacial valley started to incise as a consequence of strong meltwater supply following the disappearance of piemont glaciers (FIEBIG 1992). Terraces resulted from rapid base level lowering during final glacier retreat towards the Alpenrhein valley. On the background of a dwindling meltwater outflow the valley became swamped with outwash gravel during colder episodes and incised during warmer time spans. In Bavaria, such late glacial terraces (“Spätglazialterrassen”) have been dated at 17/18 to 10.2 ka (DOPPLER et al. 2011). Gradients of older terraces merge towards the Argent Fan (Fig. 10) which in turn is undercut by late incision. For a terrace correlating with the Argent fan SCHREINER (1978) reported <sup>14</sup>C ages of 8455 and 8660 years before 1950 but it is to be expected that exposure dating of all terraces will result in a much wider age range for the formation of the fan comparable to the ages obtained in Bavaria.

Fig. 10: Post-glacial recessional terraces in the Argent valley; for the regional context, compare Figs. 1 and 2. The Argent incised into a terrain of high-relief drumlins (shown as a gradient map). Drumlins are interspersed with peat swamps or small lakes; basal till base level surrounding the drumlins dips from 540 m in the East to 470 m in the West. The oldest incision undercutting this level is a steep cliff along the valley flanks; where drumlins are dissected, cliff height reaches 80 m (1). The oldest terraces show undercutting in the order of 10 m; towards the younger terraces, undercutting decreases to 3.5 m. The oldest terraces merge towards the Argent Fan which in turn is undercut by late incision caused by a broad system of braided channels (2). The present-day course of the Argent is a single artificial channel. TET: Tettnang, LAG: Langenargen, KRE: Kreßbronn. B 37, B 467: Federal Highways. Black area: Lake Constance. Inset lower right: position within Baden-Württemberg and colour scale. Orthoview; illumination: 100/40; vertical exaggeration: x 8; pixel size: 8 m. Vertical enhancement of gradient map of drumlin fields: x3.

Abb. 10: Postglaziale Terrassenschachtel im Argental; zur geographischen Orientierung vgl. Abb. 1 und 2. Die Argent unterschneidet ein großes Feld hochkonvexer Drumlins (als Gradientenbild dargestellt). Zwischen den Drumlins liegen zahlreiche Torfmoore und Tümpel (blassblau); die Erosionsbasis der Grundmoräne neigt sich von 540 m im Osten auf 470 m im Westen. Die ältesten Terrassen belegen eine Übertiefe um etwa 10 m; bei den jüngeren Terrassen sinkt dieser Betrag auf 3,5 m. Die ältesten Terrassen korrespondieren mit der Oberfläche des Argent-Fächers, der selbst wiederum von einem späten verflochtenen Flusssystem unterschnitten wird (2). Die heutige Argent fließt in einem künstlichen Gerinne. TET: Tettnang, LAG: Langenargen, KRE: Kreßbronn; B 37, B 467: Bundesstraßen. Schwarz: Teil des Bodensees.

Lage in Baden-Württemberg und Farbhöhencodierung: unten rechts; Orthoprojektion; Beleuchtung: 100/40; vertikale Überhöhung: x 8; Pixelgröße 8 m; vertikale Überhöhung der Gradientenkarte des Drumlinfeldes: x 3.



## 5 Conclusions

The potential for recognition and correlation of young glacial landforms is very high in a large-area high-resolution DTM rivalling and in places surpassing conventional ground-based geological mapping. In our study area we could identify and map a large variety of phenomena related to the last (Würmian) glaciation. Some of these features are known from literature, but others have not (or only partly) been recognized as such. This is especially true for a) the distinction between crested and kettleled moraines, b) the visualization of fluvial facies in outwash plains, c) the recognition of complex suites of subglacial basins shallowing towards the former ice margin, d) the identification of several subglacial valleys and complex suites of channels parallel to the receding ice margin, e) micromoraines, f) the considerable differences observed in the shape of drumlins and g) the confirmation of fields of deteriorated Rissian drumlins within the area of Würmian glaciation. During our ground checks we realized that digital mapping of morphologic phenomena related to the last glaciation can be very accurate. In fact, as a consequence of comfortable large-distance correlation within the model it turned out that ideas to be tested rather grew from scrutinizing the DTM than out of traditional mapping. The identification of structures related to older glaciations, on the other hand, largely depends on geological field criteria. With the exception of a wide belt of gentle undulating hills most probably representing older (Rissian) drumlin fields overprinted by multiple solifluction processes there are in the DTM only a few morphological traces of older glaciations.

## Acknowledgements

E.B. acknowledges a grant from Landesgraduiertenförderung Baden-Württemberg. An early version of the manuscript benefited from the comments by Werner Stackebrandt (Potsdam), thank you so much. We are very grateful for the careful and detailed comments provided by two anonymous reviewers and Harold Lovell (University of London).

## References

- BENN, D.I. & EVANS, D.J.A. (1998): Glaciers and Glaciation. – 734 p.; London (Arnold).
- BENNETT, M.R. & GLASSER, N.F. (2009): Glacial Geology – Ice sheets and landforms (2nd ed.). – 385 p.; Chichester (Wiley-Blackwell).
- BINI, A., BUONCRISTIANI, J.-F., COUTERRAND, S., ELLWANGER, D., FELBER, M., FLORINETH, D., GRAF, H.R., KELLER, O., KELLY M., SCHLÜCHTER, C. & SCHOENEICH P. (2009): Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM), map 1:500000. – Wabern (Bundesamt für Landestopografie swisstopo).
- BRÄUHÄUSER, M. (1976): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8322 Friedrichshafen (3rd ed.). – 153 p.; Stuttgart (Geologisches Landesamt und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).
- BRODZIKOWSKI, K. & VAN LOON, A.J. (1991): Glacigenic sediments. – Developments in Sedimentology, 49. – 674 p.; Amsterdam (Elsevier).
- CLARK, C.D., HUGHES, A.L.C., GREENWOOD, S.L., SPAGNOLO, M. & NG, F.S.L. (2009): Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. – Quaternary Science Review, 28: 677–692. DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.08.035
- DOPPLER, G., KROEMER, E., RÖGNER, K., WALLNER, J., JERZ, H. & GROTTENTHALER, W. (2011): Quaternary Stratigraphy of Southern Bavaria. – E&G Quaternary Science Journal, 60(2/3): 329–365. DOI: 10.3285/eg.60.2.3.08
- DYKE, A.S. & SAVELLE, J. M. (2000): Major end moraines of Younger Dryas age on Wollaston Peninsula, Victoria Island, Canadian Arctic: implications for palaeoclimate and for formation of hummocky-moraine. – Canadian Journal of Earth Sciences, 37: 601–619. DOI: 10.1139/e99-118
- EBERLE, J., EITEL, B., BLÜMEL, W.D. & WITTMANN, P. (2007): Deutschlands Süden vom Erdmittelalter zur Gegenwart. – 188 p.; Berlin, Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).
- EHRLERS, J. (1996): Quaternary and Glacial Geology. – 578 p.; Chichester (Wiley).
- EHRLERS, J. & GIBBARD, P.L. (eds.), (2004): Quaternary Glaciations – Extent and Chronology, Part I: Europe. – 475 p.; Amsterdam (Elsevier).
- ELLWANGER, D., BIBUS, E., BLUDAU, W., KÖSEL, M. & MERKT, J. (1995): Baden-Württemberg. – In: BENDA, L. (ed.): Das Quartär Deutschlands. – 255–295; Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- ELLWANGER, D., NEEB, I., WEINSZIEHR, R. & SZENKLER, C. (2008): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8225, Kißlegg. – Stuttgart (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg).
- ELLWANGER, D., KIMMIG, B., SIMON, T. & WIELANDT-SCHUSTER, U. (2011a): Quartärgeologie des Rheingletschergebietes (Exkursion I am 29. April 2011). – Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins, N. F., 93: 387–417.
- ELLWANGER, D., WIELANDT-SCHUSTER, U., FRANZ, M. & SIMON, T. (2011b): The Quaternary of the southwest German Alpine Foreland (-Oberschwaben, Baden-Württemberg, Southwest Germany). – E&G Quaternary Science Journal, 60(2/3): 306–328. DOI: 10.3285/eg.60.2.3.07
- ERB, L. (1989), mit Beiträgen von SCHMIEDLE, M.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25 000, Blatt 8220, Überlingen-West und Blatt 8322, Konstanz-West (unveränderter Nachdruck von 1934). – 120 p.; Stuttgart (Geologisches Landesamt und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).
- ERB, L. (1995): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8221, Überlingen-Ost (3. Ed.). – 83 p.; Freiburg i. Br., Stuttgart (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).
- EVANS, D.J.A. (2006): Glacial landsystems. – In: KNIGHT, P.L. (ed.): Glacier Science and Environmental Change. – 83–88; Malden, Oxford, Carlton (Blackwell Publishing).
- EVANS, I.S. (2012): Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? – Geomorphology, 137: 94–106.
- FIEBIG, M. (1992): Quartärgeologische Untersuchungen entlang der Unteren Argen zwischen Isny und Kißlegg. – Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, 34: 343–366.
- FLORINETH, D. & SCHLÜCHTER, C. (1998): Reconstructing the Last Glacial Maximum ice surface geometry and flowlines in the Central Swiss Alps. – Eclogae geologicae Helvetiae, 91(3): 391–407.
- FRENCH, H.M. (2007): The Periglacial environment (3rd ed.). – 458 p.; West Sussex (Wiley).
- GEYER, O.F., SCHOBER, T. & GEYER, M. (2003): Die Hochrhein-Regionen zwischen Bodensee und Basel. – Sammlung geologischer Führer, 94. – 526 p.; Berlin, Stuttgart (Gebr. Borntraeger).
- GRAAFF, L.W.S. DE, DE JONG, M.G.G. & SEIJMONSERGEN, A.C. (2007): Landschaftsentwicklung und Quartär – In: FRIESE, J.G. (ed.): Geologie von Vorarlberg: 21–32; Wien (Geologische Bundesanstalt Österreich).
- GRAF, H.R. (2009): Stratigraphie von Mittel- und Spät-Pleistozän in der Nordschweiz – Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz. – 168 p.; Wabern (Bundesamt für Landestopografie swisstopo).
- GREENWOOD, S.L., CLARK, C.D. & HUGHES, A.L.C. (2007): Formalising an inversion methodology for reconstructing ice-sheet retreat patterns from meltwater channels: application to the British Ice Sheet. – Journal of Quaternary Science, 22: 637–645. DOI: 10.1002/jqs.1083
- GRIPP, K. (1978): Die Entstehung von Geröll-Osern (Esker). – Eiszeitalter und Gegenwart, 28(1): 92–108; Hannover. DOI: 10.3285/eg.28.1.08
- GRUBE, A. (2011): Zur Struktur von Eskern in Schleswig-Holstein, unter besonderer Berücksichtigung des „Esker-Kames-Systems Forst Steinberg“ in morphologischer Hochlage. – E&G Quaternary Science Journal, 60(4): 425–433. DOI: 10.3285/eg.60.4.03
- HABBE, K.A., in coop. ELLWANGER, D. & BECKER-HAUMANN, R. (2007): Stratigraphische Begriffe für das Quartär des süddeutschen Alpenvorlandes. – E&G Quaternary Science Journal, 56(1/2): 66–83. DOI: 10.3285/eg.56.1.2.03
- HAGEDORN, J. (1995): Late Quaternary and present-day fluvial processes in Central Europe. – Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement 100, 204 p.; Stuttgart (Schweizerbart).
- HANTKE, R. (1978): Eiszeitalter, Band 1: Klima, Flora, Fauna, Mensch, Alt- und Mittel-Pleistozän, Vogesen, Schwarzwald, Schwäbische Alb. – 468 p.; Thun (Ott).
- HANTKE, R. (1980): Eiszeitalter, Band 2: Letzte Warmzeiten, Würm-Eiszeit,

- Eisabbau und Nacheiszeit der Alpen-Nordseite vom Rhein- zum Rhone-System. – 703 p.; Thun (Ott).
- HANTKE, R. (2011): Eiszeitalter – Kalt-/Warmzeit-Zyklen und Eistransport im alpinen und voralpinen Raum. – 570 p.; Bern (Ott).
- HÄTTESTRAND, C. & JOHANSEN, N. (2005): Supraglacial moraines in Scharffenbergbotnen, Heimefrontfjella, Dronning Maud Land, Antarctica – significance for reconstructing former blue ice areas. – Antarctic Science, 17(2): 225–236. DOI: 10.1017/S0954102005002634
- HUSEN, D. VAN (1987): Die Ostalpen und ihr Vorland in der letzten Eiszeit (Würm), map 1:500000. – In: VAN HUSEN, D. (ed.): Die Ostalpen in den Eiszeiten. – 24 p.; Wien (Geologische Bundesanstalt Österreich).
- HUSEN, D. VAN & REITNER, J.M. (2011): An Outline of the Quaternary Stratigraphy of Austria. – In: E&G Quarternary Science Journal, 60(2/3): 366–387. DOI: 10.3285/eg.60.2-3.09
- JAUD, T., SZENKLER, C. & ELLWANGER, D. (2001): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Vorläufige Ausgabe, Blatt 8222, Markdorf (2. ed.). – Freiburg i. Br. (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg).
- JERZ, H. (1995): Bayern. – In: BENDA, L. (ed.): Das Quartär Deutschlands: 296–326; Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- KELLER, O. & KRAYSS, E. (1994): Die Vorlandvereisung des Rheingletschers im Konstanzer Stadium der letzten Eiszeit. – Berichte der sankt-gallischen naturwissenschaftlichen Gesellschaft, 87: 31–40.
- KELLER, O. & KRAYSS, E. (2000): Die Hydrographie des Raums in Vergangenheit und Gegenwart (Erläuterung zur Karte "Vorlandvereisung des -Rheingletschers in der Würmeiszeit"). – Berichte der sankt-gallischen naturwissenschaftlichen Gesellschaft, 89: 39–56.
- KELLER, O. & KRAYSS, E. (2010): Mittel- und spätpleistozäne Stratigraphie und Morphogenese in Schlüsselregionen der Nordschweiz. – E&G Quarternary Science Journal, 59(1/2): 88–119. DOI: 10.3285/eg.59.1-2.08
- KUPETZ, M. (1996): Der Muskauer Faltenbogen – ein Geotop von europäischer Bedeutung. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 3: 125–136.
- LITT, T., ELLWANGER, D., VILLINGER, E. & WANSA, S. (2005): Das Quartär in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland. – Newsletters on Stratigraphy, 41: 385–399; Berlin, Stuttgart. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0385
- MUNRO-STASIUK, MJ. & SJOGREN, D. (2006): The erosional origin of hummocky terrain, Alberta, Canada. – In: Knight, P.L.(ed.): Glacier Science and Environmental Change: 33–36; Malden, Oxford, Carlton (Blackwell Publishing).
- MENNING, M. & DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (2002): Eine geologische Zeitskala 2002. – Deutsche Stratigraphische Kommission (ed.), Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002.
- MENZIES, J. (1996): Sediments, forms and techniques. – Glacial Environments, 2: 598 p.; Oxford (Butterwort-Heinemann).
- PENCK, A. & BRÜCKNER, E. (1909): Die Alpen im Eiszeitalter. – 1199 p., (3 vol.); Leipzig (Tauchnitz).
- PREUSSER, F., REITNER, J.M. & SCHLÜCHTER, C. (2010): Distribution, geometry, age, and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. – Swiss Journal of Geosciences, 103: 407–426. DOI: 10.1007/s00015-010-0044-y
- PREUSSER, F., GRAF, H.R., KELLER, O., KRAYSS, E. & SCHLÜCHTER, C. (2011): Quaternary glaciation history of northern Switzerland. – E&G Quarternary Science Journal, 60(2/3): 282–305. DOI: 10.3285/eg.60.2-3.06
- REUTHER, A.U., FIEBIG, M., IVY-OCHS, S., KUBIK, P.W., REITNER, J.M., JERZ, H. & HEINE, K. (2011): Deglaciation of a large piedmont lobe glacier in comparison with a small mountain glacier – new insight from surface exposure dating. Two studies from SE Germany. – E&G Quarternary Science Journal, 60(2/3): 282–305. DOI: 10.3285/eg.60.2-3.03
- RUPP, C., LINNER, M. & MANDL, G.W. (2011): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Oberösterreich 1:200000. – Wien (Geologische Bundesanstalt Österreich).
- SALCHER, B.C., HINSCH, R. & WAGREICH, M. (2010): High-resolution mapping of glacial landforms in the North Alpine Foreland, Austria. – Geomorphology, 122: 283–293. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.09.037
- SCHAEFER, I. (1995): Das Alpenvorland im Zenit des Eiszeitalters. – 2 vol., 405 + 671 p.; Stuttgart (Steiner).
- SCHMIDT, M. & BRÄUHÄUSER, M. (1913): Blatt Neukirch (Nr. 181) – Erläuterungen der Geologischen Spezialkarte des Königreichs Württemberg. – 102 p.; Stuttgart (Königliche Württembergische Statistische Landesamt). [Unveränderter Nachdruck als Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8324, Wangen im Allgäu/West. – Stuttgart 1985, (Geologisches Landesamt und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg)].
- SCHMIDT, A. & MÜNST, M. (1978): in coop. SCHMIDT, M.: Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8323, Tettnang (3. ed.). – Stuttgart (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).
- SCHMIDT, M. (1998): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8223, Ravensburg (4. ed.). – 91 p.; Freiburg, Stuttgart (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).
- SCHREINER, A. (1974): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:50000, Landkreis Konstanz mit Umgebung. – 286 p.; Stuttgart (Geologisches Landesamt und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).
- SCHREINER, A. (1978): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8323, Tettnang (3rd ed.) – 60 p.; Freiburg, Stuttgart (Geologisches Landesamt und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).
- SCHREINER, A. (1992a): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:50000, Blatt Hegau und westlicher Bodensee. – 290 p.; Freiburg, Stuttgart (Geologisches Landesamt und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).
- SCHREINER, A. (1992b): Einführung in die Quartärgeologie. – 277 p.; Stuttgart (Schweizerbart, Nägeli/Obermiller).
- STACKEBRANDT, W., THIEDIG, F., THIEKE, H.U. & HERMSDORF, N. (1997): Glazialdynamik und Moränengenese – aktuogeologische Beobachtungen in Spitzbergen (Svalbard). – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 4: 31–48.
- STACKEBRANDT, W. (2009): Subglacial channels of Northern Germany. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 160(3): 203–210. DOI: 10.1127/1860-1804/2009/0160-0203
- STREHL, E. (1998): Glazilimnische Kames in Schleswig-Holstein. – Eiszeitalter und Gegenwart, 48: 19–22. DOI: 10.3285/eg.48.1.02
- SUTINEN, R., HYVÖNEN, E. & KUKKONEN, I. (2013): LiDAR detection of palaeolandslides in the vicinity of the Susselkä postglacial fault, Finnish Lapland. – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, in press. DOI: 10.1016/j.bbr.2011.03.031
- SZENKLER, C. & ELLWANGER, D. (1995): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Vorläufige Ausgabe, Blatt 8121, Heiligenberg, Beiheft. – 20 p.; Freiburg i. Br. (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).
- SZENKLER, C. & ELLWANGER, D. (1997): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Vorläufige Ausgabe, Blatt 8124, Wolfegg. – Freiburg i. Br. (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).
- WEIDENBACH, F. (1975) in coop. MÜLLER, S., GöTTLICH, K., WERNER, J., SCHREINER, A., SCHWARZENHÖLZER, W.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt 8023, Aulendorf. – 126 p.; Stuttgart (Geologisches Landesamt und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).
- WIEDERKEHR, M. & MÖRI, A. (2013): swissALTI3D – a new tool for geological mapping. – Swiss Bulletin for Applied Geology, 18(1): 61–69.
- WINSEMAN, J., BRANDES, C., POLOM, U., WEBER, C. (2011): Depositional architecture and paleogeographic significance of middle Pleistocene glaciocustrine ice marginal deposits in northwestern Germany: a synoptic overview. – E&G Quarternary Science Journal, 60(2/3): 212–235. DOI: 10.3285/eg.60.2-3.01
- ZAUGG, A., GEYER, M., RAHN, M., WESSELS, M., SCHLICHTHERLE, H., HASENFRATZ & A., BURKHALTER, R. (2008): Erläuterungen zum Geologischen Atlas der Schweiz 1:25000, Blatt 1033 Steckborn (Südteil) mit SW-Anteil von 1034 Kreuzlingen. – 124 p.; Wabern (Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

# Die spätglaziale Vegetationsgeschichte im oberen Illergebiet (Allgäu/Bayern)

Philipp Stojakowits, Arne Friedmann, Andrea Bull

**How to cite:** STOJAKOWITS, PH., FRIEDMANN, A., BULL, A. (2014): Die spätglaziale Vegetationsgeschichte im oberen Illergebiet (Allgäu/Bayern). – E&G Quaternary Science Journal, 63 (2): 130–142. DOI: 10.3285/eg.63.2.02

**Kurzfassung:** Anhand dreier  $^{14}\text{C}$ -datierter Pollendiagramme kann erstmals die spätglaziale Vegetationsentwicklung im ehemals vergletscherten südlichen Allgäu rekonstruiert werden. Die vorliegenden Pollendiagramme wurden mit anderen Untersuchungen aus dem Alpenvorland und den nördlichen Alpen verglichen und entsprechenden Biozonen zugeordnet. Im Bölling breitet sich in den tieferen Lagen *Pinus* aus und wird zur dominanten Baumart. In höheren Lagen findet die Ausbreitung verzögert statt. Die Warmphase des Alleröds führt im Vergleich zum Bölling zur Entwicklung dichterer Wälder. Die klimatische Abkühlung der Jüngeren Dryas zeigt sich in einer Auflichtung der Wälder. Des Weiteren konnten möglicherweise erstmals im Allgäu die Gerzensee-Schwankung im Alleröd und das Rammelbeek im Präboreal pollenanalytisch nachgewiesen werden.

## Lateglacial vegetation development in the upper Iller region [Allgäu/Bavaria]

**Abstract:** Three radiocarbon dated pollen diagrams for the first time reveal the full Lateglacial vegetation development in the formerly glaciated area of the Southern Allgäu. The presented pollen diagrams were compared with other investigations of the Alpine foreland and northern Alps and were assigned to corresponding biozones. In the Bölling *Pinus* immigrates in lower altitudes and becomes the dominant tree species. In higher altitudes the expansion is delayed. During the Alleröd denser pine forests evolve with an understorey of birches. The climatic cooling of the Younger Dryas leads to sparser forests. Furthermore it is likely, that two climatic oscillations were detected pollanalytically, the Gerzensee-depression in the Alleröd and the Rammelbeek-depression in the Preboreal.

**Keywords:** Vegetation history, Lateglacial,  $^{14}\text{C}$ -dating, Climatic oscillations, Alps

**Addresses of authors:** Philipp Stojakowits, Arne Friedmann, Andrea Bull, Arbeitsgruppe Biogeographie, Institut für Geographie, Universität Augsburg, Alter Postweg 118, D-86135 Augsburg, Germany. E-Mails: stojakowits@geo.uni-augsburg.de, friedmann@geo.uni-augsburg.de

## 1 Einleitung

Aus vielen Regionen des deutschen Alpenvorlandes existieren detaillierte pollenanalytische Untersuchungen zum Ablauf der spätglazialen Vegetationsgeschichte. Für die Bodenseeregion mit Oberschwaben wurden z.B. Untersuchungen von GöTTLICH (1955), BERTSCH (1961), LANG (1952, 1962), MÜLLER (1962), MIELKE & MÜLLER (1981), RÖSCH (1985, 1990) und LECHTERBECK (2001) vorgelegt. Die Ammerseegegend wurde von KLEINMANN (1995) bearbeitet. Aus dem südöstlichen Bayern seien die Analysen von SCHMEIDL (1971), RAUSCH (1975), BEUG (1976) und VOIGT (1996) genannt. Obwohl schon seit über 80 Jahren pollenanalytische Forschung im südwestbayerischen Alpenvorland betrieben wird – PAUL & RUOFF (1932) als Pioniere – ist das Allgäu jedoch bisweilen ein weißer Fleck hinsichtlich der spätglazialen Vegetationsentwicklung. Lediglich von KÜSTER (1988) wurde ein Pollendiagramm publiziert, welches das jüngere Spätglazial abdeckt.

Mit der vorliegenden Arbeit wird angestrebt, einen Teil dieser Lücke zu schließen. Es werden zwei Profile aus dem

oberen Illertal und eines aus dem angrenzenden Kleinwalsertal vorgestellt. Dabei finden zwei Diagramme aus einer nicht publizierten Dissertation von DIEFFENBACH-FRIES (1981) ergänzend Berücksichtigung.

## 2 Untersuchungsgebiet

Die vorgestellten Archive liegen in Bayerisch-Schwaben im Landkreis Oberallgäu (Abb. 1). Die Niedersonthofener Seen, zu denen auch der Untere Inselsee (703 m ü. NN) gehört, sind in ein Mosaik aus Jungmoränen und Schichten der Faltenmolasse unweit des morphologischen Alpenrandes eingebettet. Das Profil Moorbad Oberstdorf ist im Illertalboden auf 830 m ü. NN lokalisiert und von den Gebirgszügen des Helvetikums, der Flyschzone und des Kalkalpins umgeben. Die Vermoorung am Gasthof Bergblick ist auf 1050 m ü. NN im angrenzenden Kleinwalsertal im Verzahnungsbereich von Flysch und Helvetikum auf einer Hangverebnung gelegen. Weiter südlich schließen ebenfalls kalkalpine Ablagerungen an.

Während der Würmeiszeit wurde das zuvor schon angelegte Illertal vom Illergletscher weiter glazial übertieft. Für

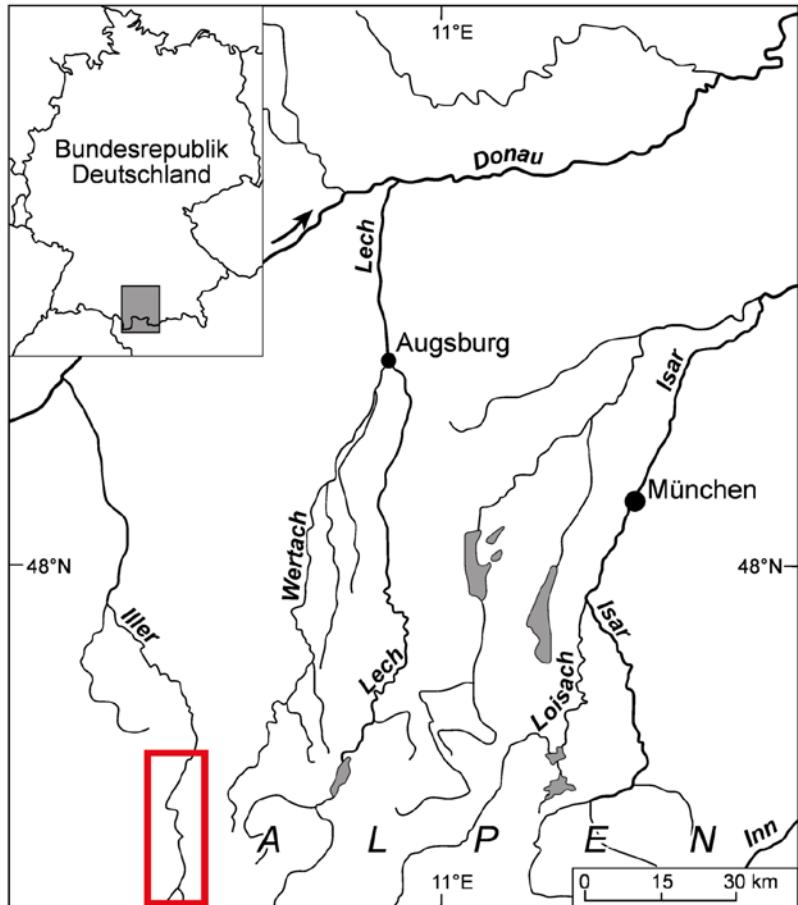


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes.

Fig. 1: Location of the study area.

den Höhepunkt der letzten Eiszeit werden für das Untersuchungsgebiet Eismächtigkeiten von 700 bis 800 m über dem heutigen Talboden angegeben (BADER & JERZ 1978: 29). Beim Niedertauen des Illergletschers wurden durch Glazialerosion vertiefte Becken freigegeben. In einem solchen Becken, welches im ausgehenden Würm-Hochglazial durch Toteis vor der Zusedimentierung bewahrt wurde, liegen auch die Niedersonthofener Seen (JERZ 1974: 72). Die Ausschürfung des Beckens wurde wohl durch eine Störungszone mit leichter erodierbaren Molasseschichten begünstigt (JERZ 1974: 81). Im Spätglazial sind der Illergletscher und seine Seitengletscher in die Hochlagen der Allgäuer Alpen zurückgeschmolzen (SCHOLZ 1995: 250). Zur Zeit des Bühl-Stadiums war das Moor am Gasthof Bergblick noch von Gletschereis bedeckt. In diesem und dem darauf folgenden Steinach-Stadium, welche beide jüngst als Phase des frühspätglazialen Eiszerfalls in die Literatur eingingen (REITNER 2007: 82 und IVY-OCHS et al.: Tab. 1), wurden am Gletschertalrand glazikustrine Einstauseeschüttungen in Form von vier Deltaterrassenstufen abgelagert. Die unterste Terrassenstufe ist auf 1050 m ü. NN ausgebildet (VÖLK 2001: 67).

### 3 Methoden

Am Südwestufer des Unteren Inselsees wurde mit einem Russischen Kammerbohrer ein 7,20 m langer Bohrkern gewonnen. Für die Anreicherung der Pollenkörper im Probenmaterial kamen die gängigen Standardverfahren zur Anwendung (FÆGRI & IVERSEN 1989, MOORE, WEBB & COLLINSON 1991). Dem Bohrkern wurden alle zwei bis vier

cm Proben von einem  $\text{cm}^3$  aus dem Kerninneren entnommen und mittels Salzsäure-, Natronlauge-, Flusssäure- und Acetylase-Behandlung aufbereitet. Abschließend wurde mit Hilfe eines Ultraschallbades das Feinmaterial ( $< 10 \mu$ ) ausgesiebt. Um die absolute Pollenkonzentration berechnen zu können, wurden den Proben jeweils zwei Tabletten mit einer definierten Menge *Lycopodium*-Sporen hinzugefügt (STOCKMARR 1971). Die aufbereiteten Proben wurden unter einem Durchlichtmikroskop mit Kreuztisch bei 400- bis 1000-facher Vergrößerung ausgezählt.

Zur sicheren Identifikation der Pollenkörper diente die einschlägige Bestimmungsliteratur (BEUG 1961, FÆGRI & IVERSEN 1989, MOORE, WEBB & COLLINSON 1991, REILLE 1998). Zusätzlich stand eine umfangreiche Vergleichssammlung rezenter Pollenkörper und Sporen aus Süddeutschland zur Verfügung. Die Nomenklatur der Pollentypen richtet sich nach BEUG (2004).

Die Ergebnisse der Pollenanalysen sind in drei Diagrammen dargestellt (Abb. 2 bis 4). Als Bezugssumme (=100 %) wurde der gesamte Gehölzpollen und Nichtbaumpollen unter Ausschluss der Sporen sowie der lokalen Moor- und Wasserpflanzen gewählt. Ausgeschlossen wurden neben Cyperaceen, *Botrychium*, *Caltha*, *Lemna*, *Menyanthes*, *Myriophyllum*, *Nuphar*, *Nymphaea*, *Parnassia*, *Polypodiaceae*, *Potamogeton*, *Selaginella selaginoides*, *Sparganium*, *Sphagnum* und *Typha*. Einige der in den Diagrammen enthaltenen Pollentypen wurden zusammengefasst (z.B. *Rosaceae spp.*). Die beiden von DIEFFENBACH-FRIES (1981) bearbeiteten Diagramme Moorbad Oberstdorf und Gasthof Bergblick enthielten ursprünglich Cyperaceen in der Bezugssumme, weswegen die-

## Unterer Inselsee (703 m ü. NN) - Prozentpollendiagramm ausgewählter Taxa

Analyse: A. Bull

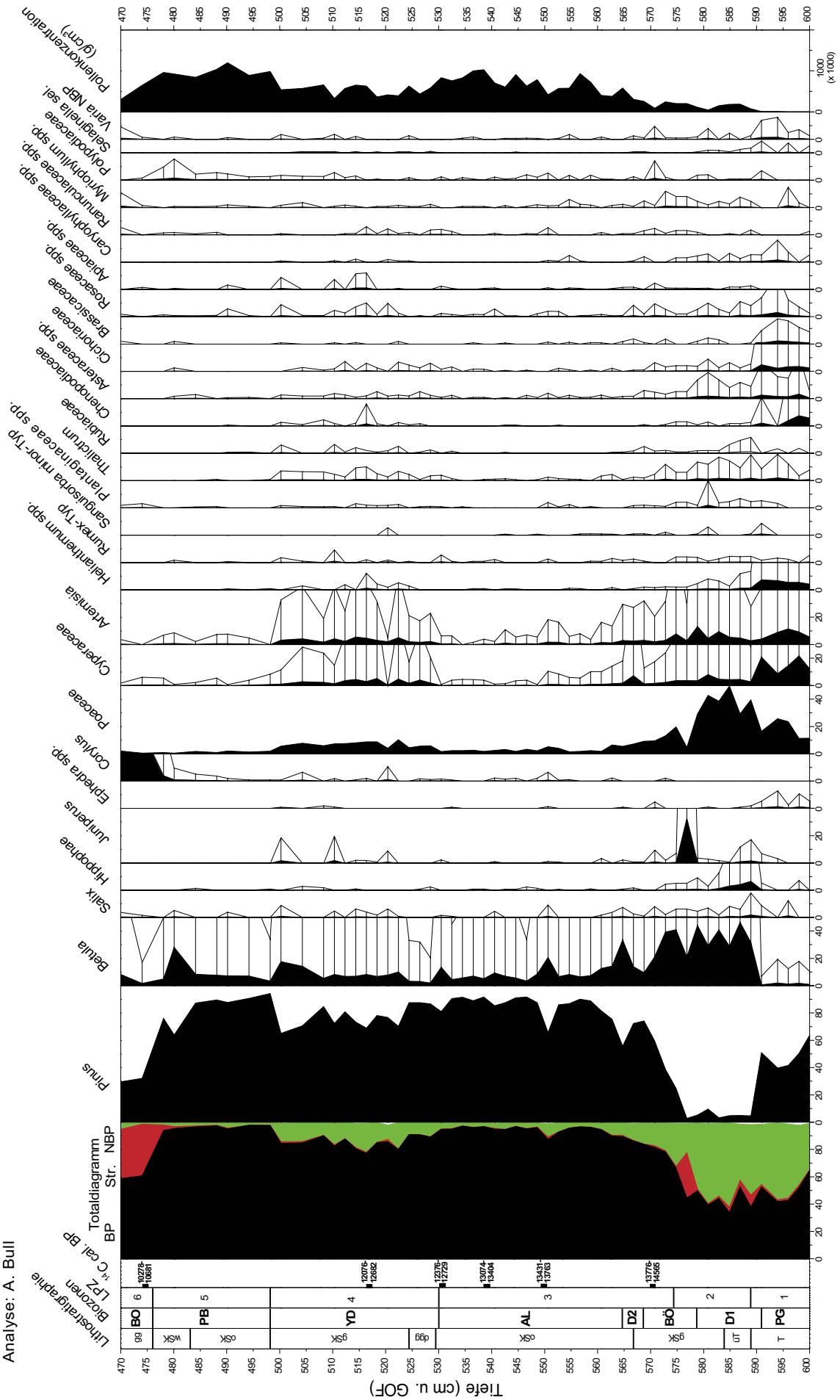
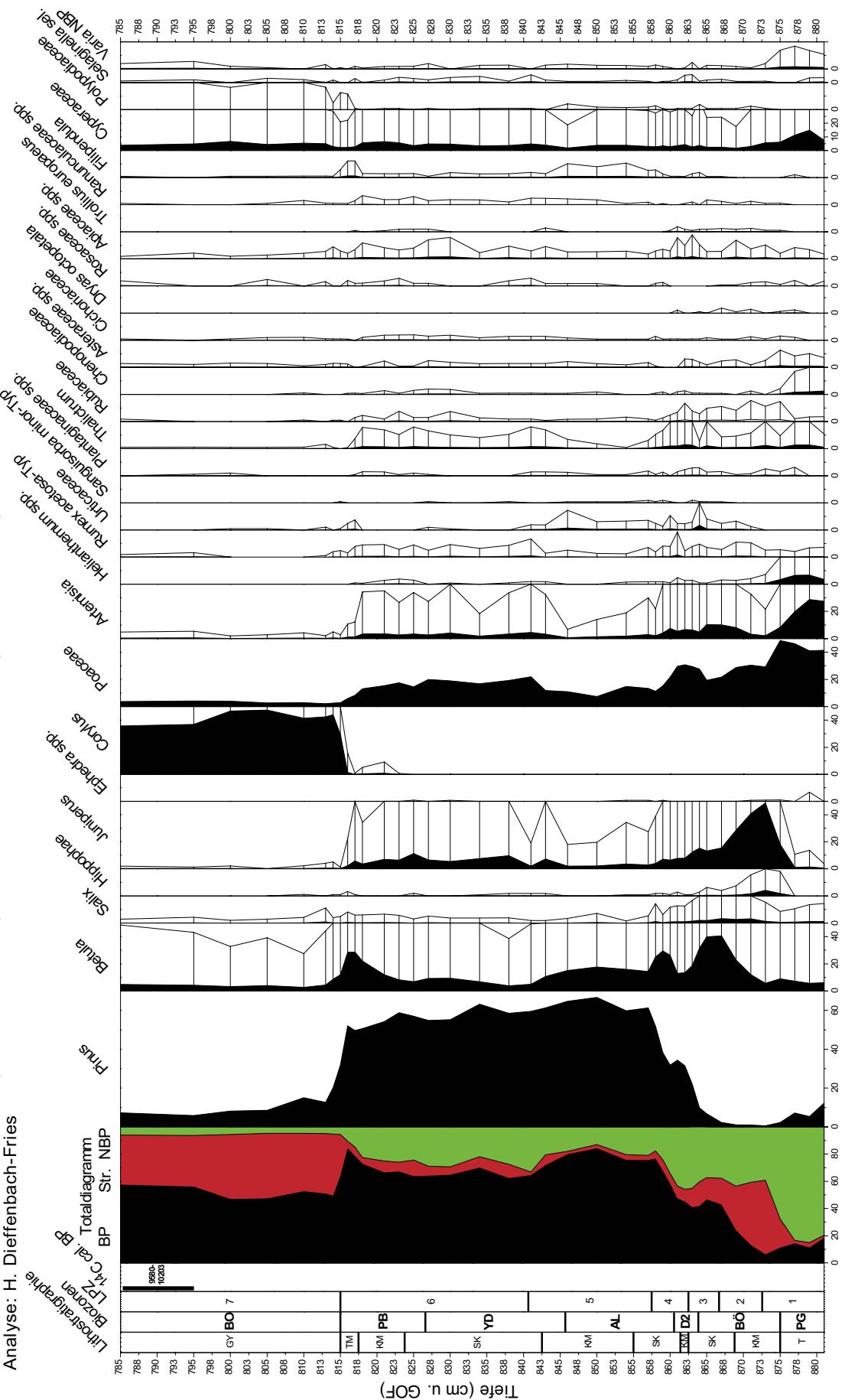


Abb. 2: Pollendiagramm Unterer Inselsee.  
Fig. 2: Pollen diagram Unterer Inselsee.

## Moorbad Oberstdorf (830 m ü. NN) - Prozentpollendiagramm ausgewählter Taxa

Analyse: H. Dieffenbach-Fries



*Abb. 3: Pollendiagramm Moorbad Oberstdorf.*  
*Fig. 3: Pollen diagram Moorbad Oberstdorf.*

## Moor am Gasthof Bergblick (1050 m ü. NN) - Prozentpollendiagramm ausgewählter Taxa

Analyse: H. Dieffenbach-Fries

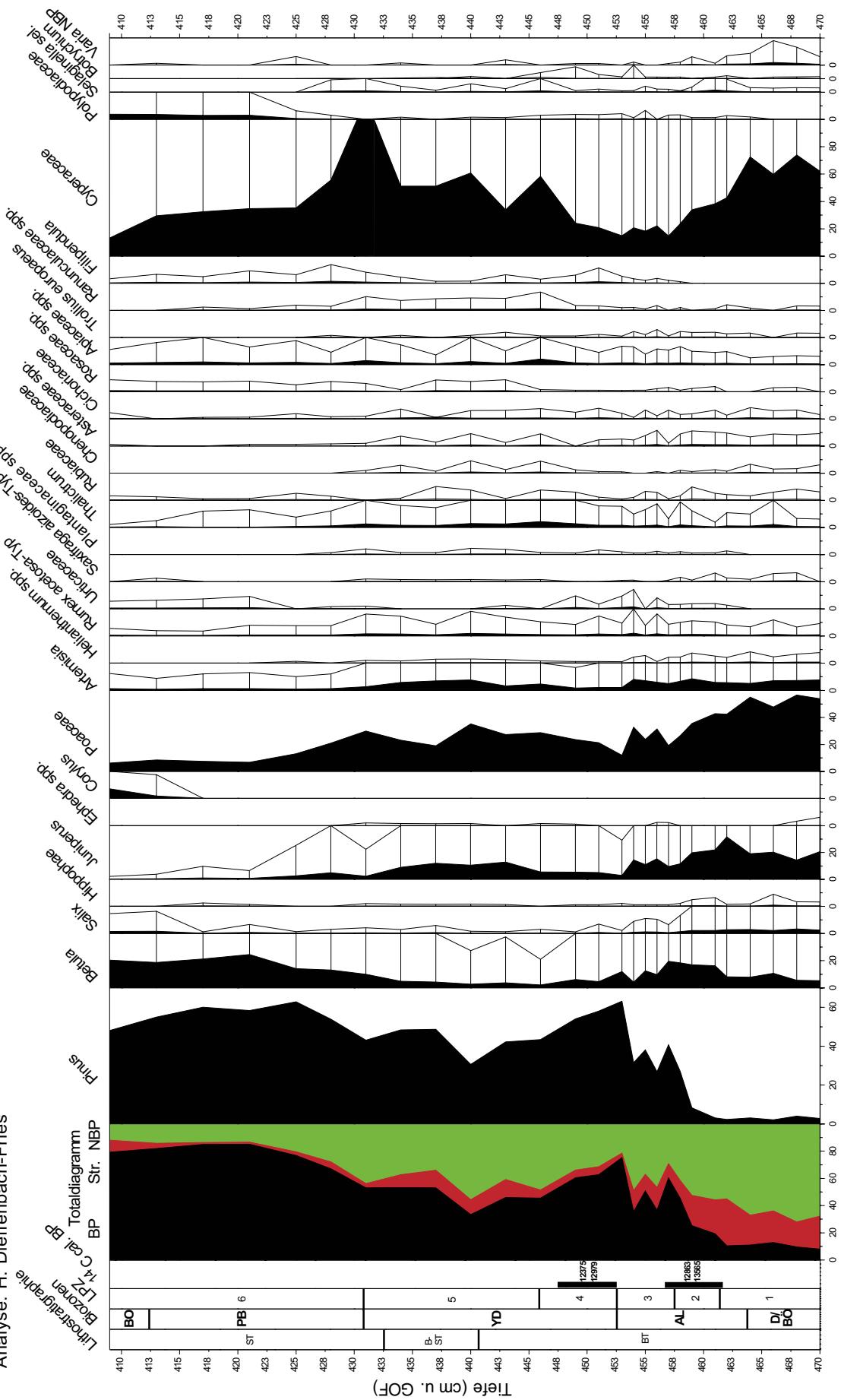


Abb. 4: Pollendiagramm Gasthof Bergblick.  
Fig. 4: Pollen diagram Gasthof Bergblick.

se Profile neu berechnet wurden. Abzüglich der ausgeschlossenen Palynomorphen wurden nahezu durchweg hohe Pollensummen ausgezählt. Im Profil Inselsee wurden abgesehen vom Pleniglazial und der frühen Ältesten Dryas (260–400 Pollenkörner) mindestens 600 Baumpollen- bzw. 1000 terrestrische Pollenkörner pro Probe erfasst. Die Bezugssumme des Profils Oberstdorf beinhaltet 600–900 Pollenkörner, nur nicht im Pleniglazial (300–500). Auf das Profil Bergblick entfallen bis auf eine Probe (= 492) jeweils 600–900 Palynomorphen. Die stratigraphischen Einheiten wurden im Gelände bohrbegleitend abgegrenzt. Eine genaue Farb- und Substratansprache erfolgte im Labor, welche durch Makrorestbefunde ergänzt wurde. An vegetationsgeschichtlich markanten Stellen wurde dem Bohrkern Material (bulkproben bei DIEFFENBACH-FRIES 1981) für Datierungszwecke entnommen und mittels AMS  $^{14}\text{C}$ -Messung datiert. Die kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Daten wurden mit dem Programm Calib 7.01 (STUIVER & REIMER 1993) berechnet und die wahrscheinlichste Alterszeitspanne mit 2 Sigma-Intervall angegeben. Dem Programm lag dabei der Datensatz IntCal13 (REIMER et al. 2013) zugrunde.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Stratigraphie

Die Stratigraphie ist in den Tabellen 1 bis 3 dargelegt.

### 4.2 Datierung

Die kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Daten sind in den Tabellen 4 und 5 dargestellt.

### 4.3. Lokale Pollenzonen der Profile

#### 4.3.1 Lokale Pollenzonen Diagramm Inselsee

##### LPZ 1 (600–588 cm): NBP-*Pinus*

Die Nichtbaumpollenanteile und die von *Pinus* schwanken jeweils zwischen ungefähr 40 und 60 %. Die wichtigsten Nichtbaumpollentypen sind nach absteigender Häufigkeit *Poaceae*, *Cyperaceae*, *Artemisia*, *Helianthemum* und *Chenopodiaceae*. Bei den Gehölzpollentypen sind Funde von *Ephedra* erwähnenswert. Insgesamt zeichnet sich der Abschnitt durch eine hohe Anzahl nachgewiesener Taxa aus.

##### LPZ 2 (588–574 cm): *Betula-Poaceae*

*Betula* und *Poaceae* sind über mehrere Proben hinweg mit wechselnden Dominanzverhältnissen repräsentiert. Die *Pinus*-Kurve ist auf ein Minimum abgesunken und nimmt erst gegen Ende des Abschnitts wieder zu. Kurz zuvor erreicht *Juniperus* einen Gipfel mit 30 % bei zugleich rückläufiger *Poaceae*-Kurve.

##### LPZ 3 (574–530 cm): *Pinus-Betula*

Die Nachweise der Nichtbaumpollentypen pendeln sich auf sehr niedrigerem Niveau ein und *Pinus* dominiert fortan das Pollenspektrum. Kurvenschwankungen dieses Taxons fallen mit erhöhten *Betula*-Werten und einer einmaligen Zunahme der Nichtbaumpollenfunde zusammen.

##### LPZ 4 (530–498 cm): *Pinus-NBP*

Die *Pinus*-Kurve sinkt ab und schwankt zwischen 60–80 %. *Betula* ist meist mit unter 10 % Anteil am Pollenspektrum

vertreten, nimmt jedoch am Abschnittsende kurzzeitig zu. Bei *Juniperus* und *Salix* treten kleinere Gipfel auf. Die Nichtbaumpollenwerte liegen bei bis zu 20 %, wobei besonders *Poaceae* und *Artemisia* hervortreten. Auch viele andere Nichtbaumpollentypen treten wieder deutlicher im Pollenspektrum hervor, wie z.B. *Thalictrum*, *Rubiaceae*, *Chenopodiaceae*, *Asteraceae* und *Cichoriaceae*.

##### LPZ 5 (498–476 cm): *Pinus*

Der Nichtbaumpollenanteil geht zurück, der von *Pinus* nimmt entsprechend zu. Gegen Ende der Pollenzone ist ein Anstieg der *Betula*-Kurve zu verzeichnen.

##### LPZ 6 (476–470 cm): *Corylus-EMW*

Diese Pollenzone ist durch ansteigende Werte der thermophilen Gehölze gekennzeichnet. Neben dominanter *Corylus* sind die sogenannten Eichenmischwaldgehölze *Ulmus*, *Tilia* und *Quercus* gehäuft nachgewiesen. *Pinus* ist nur noch mit Werten um die 20 % vertreten.

### 4.3.2 Lokale Pollenzonen Diagramm Oberstdorf

##### LPZ 1 (881–873 cm): *Poaceae-Artemisia*

In dieser Zone überwiegt der Nichtbaumpollenanteil. Hier von machen *Poaceae* 40 bis 50 % aus. *Artemisia* ist anfangs mit knapp 30 % vertreten, sinkt aber im Verlauf der Pollenzone auf 8 % ab. In etwa gegenläufig dazu verhält sich die *Juniperus*-Kurve am Ende des Abschnitts.

##### LPZ 2 (873–867 cm): *Juniperus-Poaceae-Betula*

*Juniperus* dominiert zwar durchweg den Polleninhalt, dessen Werte fallen jedoch von 49 auf 28 % ab bei zugleich steigenden *Betula*-Gehalten. Die *Poaceen*-Anteile sind bei um die 30 % stabil.

##### LPZ 3 (867–863 cm): *Betula-Poaceae-Juniperus*

In dieser Zone sind die Dominanzverhältnisse umgekehrt. *Betula* ist mit 31 bis 40 % am häufigsten nachgewiesen. *Juniperus* ist mit etwa 15 % deutlich seltener geworden. *Poaceae* erreichen 19 bis 28 %.

##### LPZ 4 (863–858 cm): *Pinus-Poaceae-Betula*

Die *Pinus*-Werte liegen anfangs bei rund 20 % und nehmen im Verlauf des Abschnitts bei kurzzeitiger Kodominanz mit *Poaceae* zu. Deren Nachweise gehen zum Zonenende hin zurück und neben *Pinus* ist *Betula* stärker im Pollenspektrum repräsentiert.

##### LPZ 5 (858–841 cm): *Pinus-Betula-Poaceae*

*Pinus* ist zum dominanten Taxon geworden bei Anteilen von 52 bis 67 %. *Poaceae* sind mit Werten um die 10 % vertreten und die *Betula*-Nachweise fallen von anfänglich 25 % auf etwa 15 % ab.

##### LPZ 6 (841–815 cm): *Pinus-Poaceae*

Das Pollenspektrum wird weiterhin von *Pinus* dominiert. Jedoch ist *Betula* – vom Abschnittsende einmal abgesehen – deutlich seltener und die *Poaceen*-Anteile sind deutlich erhöht. Ebenso sind andere Nichtbaumpollentypen (z.B. *Artemisia*, *Thalictrum*) wie auch *Juniperus* häufiger.

Tab. 1: Stratigraphie der Kernbohrung Unterer Inselsee.

Tab. 1: Stratigraphy of the Unterer Inselsee core.

Tiefe (in cm u. GOF)	Sediment/ Sedentat
470-476	Seekreide (gräulich gelb, Conchylien)
476-483	Seekreide (grau bis ockerfarben, Conchylien)
483-498	Seekreide (ockerfarben, Conchylien)
498-524	Seekreide (gräulich gelb)
524-529	Seekreide (dunkelgräulich gelb)
529-567	Seekreide (ockerfarben)
567-583	Seekreide (grau)
583-588	Carbonatreicher Beckenton bis tonige Seekreide
588-720	Carbonatreicher Beckenton

Tab. 2: Stratigraphie der Kernbohrung Moorbad Oberstdorf.

Tab. 2: Stratigraphy of the Moorbad Oberstdorf core.

Tiefe (in cm u. GOF)	Sediment/ Sedentat
785-815	Gyttja
815-818	Carbonatreiche Torfmudde (Gyttja)
818-824	Tonreiche Kalkmudde
824-843	Tonreiche Seekreide (sehr wenig Conchylien); <i>Pinus</i> -Spaltöffnungen
843-855	Kalkmudde (Conchylien); <i>Pinus</i> -Spaltöffnungen; 1 <i>Hippophaë</i> -Samen
855-862	Seekreide (Conchylien); <i>Pinus</i> -Spaltöffnungen
862-863	Kalkmudde
863-869	Seekreide (Conchylien)
869-875	Kalkmudde (wenig Conchylien); <i>Juniperus</i> -Spaltöffnungen
875-882	Carbonatreicher Seeton bis tonreiche Seekreide

Tab. 3: Stratigraphie der Kernbohrung Gasthof Bergblick.

Tab. 3: Stratigraphy of the Gasthof Bergblick core.

Tiefe (in cm u. GOF)	Sediment/ Sedentat
409-433	Seggentorf mit <i>Carex limosa</i> , <i>Carex flava</i> agg., <i>Carex pallescens</i> , <i>Potentilla erecta</i> , <i>Betula alba</i> s.l.-Nüsse
433-441	Braunmoos-Seggentorf mit <i>Calliergon trifarium</i> , <i>Carex limosa</i>
441-468	Braunmoostorf mit <i>Calliergon trifarium</i>
468-470	Tonhaltiger Braunmoostorf mit <i>Drepanocladus revolvens</i> , <i>Calliergon trifarium</i> , <i>Eleocharis cf. Palustris</i>

### **LPZ 7 (815–785 cm): *Corylus*-EMW**

Der Polleninhalt wird von *Corylus* mit Werten zwischen 30 und 47 % dominiert, gefolgt von *Ulmus* mit 12 bis 20 %. Andere nicht im Pollendiagramm dargestellte Laubgehölze (*Fraxinus*, *Quercus*, *Tilia cordata*, *Tilia platyphyllos*) überschreiten im Zonenverlauf 5 % und die *Pinus*-Nachweise gehen von 30 auf 7 % zurück. Nichtbaumpollentypen sind nur noch sehr spärlich vorhanden.

### **4.3.3 Lokale Pollenzonen Diagramm Bergblick**

#### **LPZ 1 (470–462 cm): *Cyperaceae-Poaceae-Juniperus***

Der Pollengehalt wird von Cyperaceen, Poaceen und *Juniperus* bestimmt, wobei die Cyperaceen-Nachweise zwischen 60 und knapp 75 % liegen. Poaceen sind mit Werten um die 50 % vertreten und *Juniperus* erreicht zwischen 15 und 20 %. Am nächst häufigen treten *Artemisia* und *Betula* hervor.

#### **LPZ 2 (462–458 cm): *Poaceae-Cyperaceae-Juniperus***

Mit dem Beginn der Zone fällt ein *Juniperus*-Gipfel zusammen. In deren Verlauf gehen die Anteile von Poaceen, Cyperaceen und *Juniperus* zurück, während die Werte von *Betula* und verzögert auch von *Pinus* zunehmen.

#### **LPZ 3 (458–453 cm): *Pinus-Poaceae-Cyperaceae-Betula***

Im Pollenspektrum dominieren *Pinus* und *Poaceae* bei schwankenden Verhältnissen. Mit absteigender Häufigkeit folgen *Cyperaceae*, *Betula* und *Juniperus*. Die *Artemisia*-Funde sind gegenüber den vorangegangenen Abschnitten nicht signifikant verändert.

#### **LPZ 4 (453–446 cm): *Pinus-Poaceae-Cyperaceae***

Diese Pollenzone ist durch die Vorherrschaft von *Pinus* gekennzeichnet. *Poaceae* und *Cyperaceae* sind mit steigenden Kurvenverläufen auf je 24 % repräsentiert. Die *Juniperus*-und auch *Betula*-Nachweise sind seltener geworden.

#### **LPZ 5 (446–431 cm): *Pinus-Cyperaceae-Poaceae***

Der Pollengehalt wird durch *Pinus* und *Cyperaceae* bestimmt, wobei *Pinus* an Bedeutung eingebüßt hat. Entsprechend treten *Poaceae*, *Juniperus* und *Artemisia* stärker hervor. Zudem häufen sich die Nachweise verschiedener Nichtbaumpollentypen (z.B. *Thalictrum* und *Apiaceae*).

#### **LPZ 6 (431–409 cm): *Pinus-Cyperaceae-Betula***

Am Beginn des Abschnitts ist ein Cyperaceen-Maximum mit 115 % Anteil bezogen auf die zugrunde gelegte Pollensumme zu verzeichnen. Die *Pinus*-Kurve pendelt sich auf deutlich höherem Niveau mit Werten zwischen 48 und 62 % ein. *Betula* gewinnt ebenfalls an Bedeutung im Polleninhalt. In der ersten Hälfte der Zone sinken die Cyperaceen- und Poaceen-Anteile deutlich ab und stabilisieren sich nachfolgend.

## **5 Diskussion**

### **5.1 Vegetationsgeschichtlicher Ablauf und die Zuordnung zu biostratigraphischen Phasen**

#### **5.1.1 Vegetationsgeschichte Diagramm Unterer Inselsee**

Im tiefsten Diagrammabschnitt (600–591 cm), der in das ausgehende Würm-Hochglazial gestellt wird, dominiert der

Gräser- und Kräuterpollenanteil. Dieser enthält relativ hohe Anteile an Pionierpflanzen und Heliophyten. Als häufigste Nichtbaumpollen finden sich *Poaceae*, *Cyperaceae*, *Artemisia*, *Helianthemum*, *Chenopodiaceae*, *Cichoriaceae*, *Thalictrum*, *Brassicaceae* und *Asteraceae*. Des Weiteren sind *Ephedra*, *Hippophaë* und *Salix* nachweisbar.

Die hohen *Pinus*-Werte (40–60 %) sind unter Offenlandbedingungen als Fernflug zu interpretieren (LANG 1994). Es ist von einer baumlosen Tundren-Vegetation auszugehen, die eine nicht geschlossene, lückenhafte Vegetationsdecke (sehr geringe Pollenkonzentration!) aus Pionierpflanzen und Steppenelementen aufweist. Je nach Definition wird in der Schweiz diese Phase ebenfalls in das ausgehende Pleniglazial oder davon abweichend in den frühesten Teil der Ältesten Dryas gestellt (AMMANN et al. 1994: 121).

Der nächste Diagrammabschnitt (591–578 cm) wird der Ältesten Dryas zugeordnet. Mit deren Einsetzen kommt es zu einer Erhöhung der *Betula*-, *Hippophaë*-, *Juniperus*- und *Salix*-Prozentwerte sowie der Pollenkonzentration. Gleichzeitig gehen die Fernflugeinträge von *Pinus* (< 8 %) und die *Cyperaceen*- und Kräuterpollenanteile (z.B. *Artemisia*) deutlich zurück. Dies deutet auf die Etablierung einer Strauchvegetation hin, obwohl der Nichtbaumpollentyp jedoch weiterhin hoch bleibt, da *Poaceen* an Bedeutung gewinnen. Die *Betula*-Kurve schwankt zwischen 30 und 40 %, was auf das Näherrücken der Arealgrenze hinweist, aber auch schon die Möglichkeit des vereinzelten Auftretens anderer *Betula*-Arten (außer *Betula nana*) einschließt. Verglichen mit den palynologischen Befunden aus der Schweiz (AMMANN et al. 1994: 121) könnte es sich hierbei um die sogenannte *Betula nana*-Subzone innerhalb der Ältesten Dryas handeln.

Mit Beginn des Bölling-Interstadials (578–568 cm) tritt der für das Alpenvorland charakteristische *Juniperus*-Gipfel auf. Dieser liegt bei 33 % der Bezugssumme. Bei entsprechend dichterer Auszählung könnten wohl Proben mit noch höheren *Juniperus*-Anteilen erfasst werden. So liegt das *Juniperus*-Maximum am Schleinsee bei über 70 % (MIELKE & MÜLLER 1981: Fig. 6.9). Nachfolgend kommt es zu einer deutlichen Zunahme der *Pinus*-Werte, was das Heranrücken der Arealgrenze anzeigen. Im Laufe dieses vegetationsgeschichtlichen Abschnitts wandert *Pinus* schließlich ein und die Offenlandanteile gehen leicht zurück. Dabei verlieren insbesondere *Poaceen* und *Artemisia* an Bedeutung. Der Rückgang der *Betula*-Kurve von 30 auf 10 % ist relativ zu sehen, da er auf die Zunahme der *Pinus*-Kurve zurückzuführen ist. Gegen Ende des Böllings bestimmt ein sehr lichter Kiefernwald mit mosaikartigen Offenlandbereichen das Landschaftsbild. Den Kiefernwäldern ist untergeordnet *Betula* beigemischt. Die Abgrenzung dieses vegetationsgeschichtlichen Abschnitts zum Liegenden hin ist allerdings nicht gesichert. Typischerweise ist für das frühe Bölling im südlichen Mitteleuropa ein ausgeprägtes *Juniperus*-Maximum zu verzeichnen, so im süddeutschen Alpenvorland (vgl. z.B. BERTSCH 1961, LECHTERBECK 2001, MIELKE & MÜLLER 1981 SCHMEIDL 1971) und in der Schweiz (vgl. z.B. AMMANN & LOTTER 1989, AMMANN et al. 2013, LOTTER et al. 1992). Mit den erhöhten *Juniperus*-Nachweisen im Verein ist auch *Hippophaë* verstärkt im Pollenspektrum repräsentiert, weswegen das frühe Bölling von BERTSCH (1961: 257) sowie von AMMANN et al. (1994: 121) und AMMANN et al. (2013: Fig. 7) als *Juniperus-Hippophaë*-Strauchphase bezeichnet wird. Folglich könnte im vorlie-

Tab. 4: AMS-<sup>14</sup>C-Daten aus dem Bohrkern Unterer Inselsee. Datierung durch Dr. W. A. Keller am Geogr. Institut der Univ. Zürich und dem Institut für Teilchenphysik der ETH-Hönggerberg (2003) sowie durch Dr. A. Scharf am AMS-Labor Erlangen des Physikalischen Instituts der Univ. Erlangen-N. (2011). Kalibriert (für cal. BP-Alter) mit Calib 7.01.

Tab. 4: AMS-<sup>14</sup>C-dates from the Unterer Inselsee core. Dated by Dr. W. A. Keller Geogr. Department Univ. Zürich and Department of Physics ETH-Hönggerberg (2003) and Dr. A. Scharf AMS-laboratory Erlangen of the Physics Department Univ. Erlangen-Nürnberg (2011). Calibrated (for cal. BP-ages) with Calib 7.01.

Labor-Nr.	Tiefe (cm u. GOF)	Probenmaterial	konv. <sup>14</sup> C- Alter BP	Kalib.-Alter cal. BP (2 σ)
UZ-4831	571	Holz	12210±95	13776-14565
UZ-4830	550	Holz	11760±90	13431-13763
UZ-4887	539	Holz	11380±90	13074-13404
UZ-4886	531	Kiefernnadel	10610±95	12376-12729
UZ-4885	517	Holz	10470±85	12076-12682
Erl-16266	474	Blattreste	9306±71	10278-10681

Tab. 5: <sup>14</sup>C-Daten aus den Bohrkernen Moorbad Oberstdorf und Gasthof Bergblick. Datierung durch Dr. M. Geyh. Kalibriert (für cal. BP-Alter) mit Calib 7.01.

Tab. 5: <sup>14</sup>C-dates from the Moorbad Oberstdorf and Gasthof Bergblick. Dated by Dr. M. Geyh. Calibrated (for cal. BP-ages) with Calib 7.01.

Labor-Nr.	Tiefe (cm u. GOF)	Proben- material	konv. <sup>14</sup> C- Alter BP	Kalib.-Alter cal. BP (2 σ)
Hv 10257 (Oberstdorf)	785-795	Torfbulk	8845±125	9580-10203
Hv 9986 (Bergblick)	457-462	Torfbulk	11390±175	12863-13565
Hv 10474 (Bergblick)	448-453	Torfbulk	10725±145	12375-12979

genden Diagramm der Beginn des Böllings auch schon bei 591 cm gezogen werden. Somit würde der *Juniperus*-Gipfel etwa ins mittlere Bölling datieren, was mit den palynologischen Befunden aus dem österreichischen Vorarlberg von VAN MOURIK et al. (2013: Fig. 6) übereinstimmen würde. Im Gegensatz dazu werden in anderen Profilen aus Österreich *Juniperus*-Maxima mitunter in die ausgehende Älteste Dryas gestellt (vgl. BORTENSCHLAGER 1984), bei WAHLMÜLLER (1985) an die Wende Älteste Dryas – Bölling.

Der kurze Abschnitt der Älteren Dryas (568–564 cm) zeichnet sich im Pollendiagramm nur schwach ab. Eine geringe Zunahme der *Betula*- und Nichtbaumpollen-Werte steht einem Einschnitt in der *Pinus*-Kurve gegenüber. Wie BLUDAU (1985: 156) anführt, könnte die Klimaverschlechterung der Älteren Dryas eine verringerte Blühfähigkeit von *Pinus* bewirkt haben. Für die Vegetationszusammensetzung lassen sich daraus jedoch keine Veränderungen gegenüber dem Bölling ableiten. Eine Verminderung der Pollenkonzentration ist ebenfalls nicht feststellbar. Lediglich gegen Ende des Bölling ist ein Einschnitt in der Pollendichte zu verzeichnen.

Mit dem Übergang zum Allerød (564–530 cm) nehmen die *Pinus*-Werte auf bis zu 90 % zu und die NBP-Anteile gehen deutlich zurück. Es ist von einem lichten Kiefernwald mit standortsbedingt stärkeren Birkenvorkommen auszugehen. Im mittleren Allerød ist vermutlich die von EICHER & SIEGENTHALER (1976) beschriebene Gerzensee-Schwankung erfasst. Deren Einsetzen konnte auf 13431–13763 cal. BP datiert werden. Im Pollendiagramm zeigt sich ein Rückgang der *Pinus*-Werte bei gleichzeitigem Anstieg der *Betula*, *Salix*- und NBP-Kurven. Diese Veränderungen deuten auf eine kurzzeitige Auflichtung der Kiefernwälder und erhöhte Offenlandanteile hin. Im weiteren Allerød gehen die NBP-Werte wieder zurück. Die Auswirkungen der Klimaschwankung finden aber laut LOTTER et al. (1992: 187) palynologisch keinen Niederschlag. Bei der von WICK (2000: Fig. 1) durchgeführten Untersuchung am *locus typicus* des Gerzensees sind während dieser Klimaoszillation die *Pinus*-Werte erhöht bei zugleich niedrigeren *Betula*-Anteilen. Die jüngst dort besorgte Pollenanalyse weist keine deutlichen Signale in den Kurvenverläufen von *Betula* und *Pinus* wie auch den Nichtbaumpollennachweisen auf (AMMANN et al. 2013: Fig. 2).

Mit dem Beginn der Jüngeren Dryas (530–498 cm) nehmen die NBP-Anteile (bis zu 20 %) sowie die *Salix*-, *Betula*- und *Juniperus*-Werte zu. Die *Pinus*-Kurve geht zurück und schwankt zwischen 60 und 80 %. Bei den Nichtbaumpollen sind wieder verstärkt *Artemisia*, *Helianthemum*, *Chenopodiaceae* und *Thalictrum* nachweisbar. Die Pollendichte pendelt sich gegenüber dem Allerød auf einem deutlich niedrigeren Niveau ein. Für den Abschnitt der Jüngeren Dryas ist somit von einer markanten Verschiebung der Wald-Offenlandanteile auszugehen. Ebenfalls ändert sich auch die Farbe der ausgefällten Seekreiden. Die ockerfarbenen Seekreiden des Alleröds gehen in dunkelgrau bis graue über.

Die Grenze zwischen Spätglazial und Holozän ist bei 498 cm zu ziehen. Mit Einsetzen des Präboreals (498–476 cm u. GOF) kommt es zu einem starken Rückgang der NBP-Werte und einem Anstieg der *Pinus*-Kurve auf 90 %. Die geschlossene *Corylus*-Kurve setzt ein und zeigt das Näherrücken der Arealgrenze an. Die Pollenkonzentration steigt auf die höchsten im Diagramm erfassten Werte. Mit der Erwärmung kommt es zur Ausbildung relativ geschlossener Kiefernwälder. Pionier- und Steppenelemente werden entsprechend zurückgedrängt. Bei 480 cm ist eine kurze Klimaverschlechterung erfasst. Hierbei handelt es sich vermutlich um die sog. Rammelbeek- bzw. Schlaten-Schwankung, welche von BEHRE (1978: Tab. 1 und Tab. 2) ins mittlere Präboreal gestellt wurde. Diese zeichnet sich im Pollendiagramm durch einen deutlichen Einbruch in der *Pinus*-Kurve und einen starken Anstieg der *Betula*-Werte ab. Untergeordnet sind auch die Nachweise von *Salix*, *Artemisia*, *Cichoriaceae* und *Brassicaceae* gehäuft. Das von RÖSCH (1990: 49) bearbeitete Durchenbergried enthält ebenfalls schwache palynologische Hinweise, welche auf diese Klimaschwankung hindeuten. Zudem ist dort der Glühverlust erniedrigt. Jedoch legen jüngere Untersuchungen (vgl. z.B. Bos et al. 2007) nahe, dass die Rammelbeek-Phase in Mitteleuropa keineswegs synchron verlaufen ist und entsprechende regionale Unterschiede zu konstatieren sind. Oft zeigt sich von palynologischer Seite kein deutlicher Niederschlag im Gegensatz zu den  $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankungen (vgl. WICK 2000). Die im Diagramm Inselsee erhöhten *Betula*-Werte könnten nämlich auch durch eine Seespiegelschwankung mit eventuell einhergehendem Hiatus verursacht worden sein, wie es KLEINMANN (1995: z.B. 320 und 329) in Profilen des Ammersees aufzeigen konnte.

## 5.1.2 Vegetationsgeschichte Diagramm Oberstdorf

Das Profil setzt im Pleniglazial (881–875 cm) ein. Das Polenspektrum unterscheidet sich von demjenigen des Unteren Inselsees durch geringere *Pinus*-Fernflugeinträge bei zugleich höheren Poaceen- und *Artemisia*-Anteilen. *Helianthemum* ist in etwa gleich stark repräsentiert. Im Liegenden des Beckentons untersuchte tonig-schluffige Sedimente waren absolut pollenleer, im Hangenden liegt ein Hiatus vor.

Das Bölling (875–864 cm) beginnt mit einer *Juniperus-Hippophaë*-Strauchphase, in der vor allem *Artemisia* und *Helianthemum* entscheidend an Verbreitung verlieren. Darauf folgt die zögerliche und lückenhafte Wiederbewaldung mit *Betula*-Exemplaren.

Die nachfolgende Ältere Dryas (864–861 cm) ist durch höhere NBP-Werte repräsentiert. Infolge der Klimadepression kommt es zu einer Stillstandsphase der Waldausbreitung.

Eine stärkere Entwaldung ist aber nicht anzunehmen.

Im Allerød (861–846 cm) vollzieht sich die flächendeckende Wiederbewaldung der Tallagen. Die erfolgte Einwanderung von *Pinus* wird durch bei 857 cm identifizierten Stomata belegt. Die hohen NBP-Werte im Vergleich zum Profil Inselsee sind auf eingewehte Pollenkörner aus den umgebenden Gebirgszügen zurückzuführen.

Die Jüngere Dryas (846–827 cm) führt zu einer Auflichtung der Wälder. Zum Höhepunkt dieser Kaltphase beträgt der Baumpollenanteil nur noch 67 %. Damit ist der Grad der Auflichtung deutlich größer wie im Profil Inselsee. Vergleichsweise treten insbesondere rasenanzeigende Taxa wie *Poaceae* und *Thalictrum* stärker auf, was nicht nur mit den lichter werdenden Wäldern in Zusammenhang steht, sondern auch eine Absenkung der Waldgrenze im Gebiet widerspiegelt.

## 5.1.3 Vegetationsgeschichte Diagramm Bergblick

Der basale Diagrammabschnitt (470–464 cm) dürfte wohl dem Bölling und der Älteren Dryas zuzurechnen sein. Die *Juniperus*-Werte um 20 % bei gleichzeitig geringen BP-Werten deuten lockere Strauchgesellschaften an. Daneben ist von gehölzfreien Pioniergesellschaften auszugehen, die sich u.a. aus Offenlandzeigern wie *Helianthemum*, *Saxifraga aizoides*-Typ und *Selaginella selaginoides* zusammensetzen. Gemäß den Untersuchungen von WAHLMÜLLER (1985: Beilagendiagramme Mieminger See und Seefelder See) könnte dieser Abschnitt auch in die Älteste Dryas gestellt werden. In Konsequenz müsste dann der hier ins Allerød (464–453 cm) fallende kleinere *Juniperus*-Gipfel den Übergang zum Bölling markieren. Folglich wäre die ein allerödzeitliches Alter indizierende  $^{14}\text{C}$ -Datierung als falsch anzusehen. Die Verfasser wie auch DIEFFENBACH-FRIES (1981: 68) gehen aber von einer erst allerödzeitlichen Wiederbewaldung aus, welche durch eine birkenreiche Phase initiiert wird. Nachdem *Pinus* eingewandert war, treten im weiteren Allerød zwei markante Schwankungen in den Kurven von *Pinus* und *Betula* bei gleichzeitigem Anstieg von *Juniperus*, *Poaceen* und anderen Pollentypen auf. Hierbei könnte es sich zum einen um die Gerzensee-Schwankung und zum anderen um die Auswirkungen des Laacher-See-Ausbruchs handeln, obwohl Tuffablagerungen nicht vorhanden sind.

Die Jüngere Dryas (453–431 cm) bedingt ein deutliches Lichterwerden der *Pinus*-Bestände (bis zu 56 % NBP) in dieser Höhenlage, darüber werden Wald- und Baumgrenze um etwa 200 m herabgedrückt, wenn man die von BURGA & PERRET (1998: 629) ausgewerteten Makrorestbefunde aus vergleichbaren Gebirgsräumen der Schweizer Voralpen zugrunde legt. Gemäß IRMLER & SCHOLZ (2005: 97 und Fig. 5) könnte die errechnete Schneegrenzdepression während dieses Kälterückschlags in der Allgäuer Nagelfluhkette auf 1400 m ü. NN herabgereicht haben. Für diese rund 20 Kilometer weiter südlich gelegene Lokalität ergibt sich infolge des Massenerhebungseffekts eine ungefähre Schneegrenzlage von 1700 m ü. NN. Die infolge dessen deutlich erniedrigte Waldgrenze dürfte sich auch in der Zunahme der Cyperaceen-Anteile zeigen. Ein nicht quantifizierbarer Teil der gezählten Cyperaceen-Pollenkörner entstammt sicherlich einem damaligen Pendant heutiger Polsterseggenrasen (*Caricetum firmae* Lüdi 1921).

Tab. 6: Gegenüberstellung der Warvenchronologien und zugehörigen Biozonen vom Meerfelder Maar (LITT & STEBICH 1999, LITT et al. 2001) und vom Steißlinger See (EUSTERHUES et al. 2002) sowie der jüngst veröffentlichten Altersangaben aus der Schweiz (AMMANN et al. 2013).

Tab. 6: Comparison of the varve chronologies and related biozones from Meerfelder Maar (LITT & STEBICH 1999, LITT et al. 2001) and from Steißlinger See (EUSTERHUES et al. 2002) and most recent published dates from Switzerland (AMMANN et al. 2013).

Meerfelder Maar		Steißlinger See		Schweiz	
Warvenjahre vor heute	Biozonen	Warvenjahre vor heute	Biozonen	Alter kalibriert vor heute	Biozonen
11590 – 12680	Jüngere Dryas	11580 – 12690	Jüngere Dryas	ca. 11570 – 12710	Jüngere Dryas
12680 – 13350	Allerød	12690 – 13787	Allerød	ca. 12710 – 13835	Allerød
13350 – 13540	Ältere Dryas				
13540 – 13780*	Bølling				
13780 – 13910	Älteste Dryas	13787 – 14700**	Bølling	ca. 13835 – 14665	Bølling
13910 – ca. 14560 (interpoliert)	Meiendorf				
nicht gewarvt	Pleniglazial	14700 – 15500	Älteste Dryas	ca. 14665 – 15676***	Älteste Dryas

\*= Hiatus von 110 Jahren (vgl. STEBICH et al. 2009: Fig. 5), wodurch sich die älteren Biozonen analog nach hinten verschieben

\*\*= im ausgehenden Bølling wäre eine Ausgliederung durch einen von kleinen Kurvengipfeln von Poaceen, Helianthemum und Thalictrum gekennzeichneten Abschnitt möglich

\*\*\*= letztes Drittel der Ältesten Dryas (AMMANN et al. 2013: Fig. 7)

## 5.2 Gestaffelte *Pinus*-Ausbreitung und sich entwickelnde Höhenstufung im oberen Illertal

Sofern die besprochenen Diagramme korrekt abgegrenzt wurden und keine falschen Altersdatierungen vorliegen, ist von einer zeitlich verzögerten *Pinus*-Ausbreitung im oberen Illertal auszugehen, welche vom Alpenvorland her erfolgte. Makrorestbefunden zufolge fällt die Wiedereinwanderung von *Pinus sylvestris* im süddeutschen Alpenvorland in das späte Bølling (MIELKE & MÜLLER 1981: Fig. 6.9), wobei LANG (1952: Fig. 3) den ersten Nadelfund schon im frühen bis mittleren Bølling erbracht hat. Für die Lokalität Inselsee ist gemäß der Pollenstratigraphie eine im späten Bølling erfolgte *Pinus*-Immigration zu konstatieren, welche durch die <sup>14</sup>C-Datierung bei 571 cm mit einer Alterszeitspanne von 13776–14565 cal. BP nachgezeichnet wird. Im 25 Kilometer weiter südlich und 130 Meter höher gelegenen Raum Oberstdorf ereignet sich die *Pinus*-Einwanderung erst in der Älteren Dryas oder gar beginnenden Allerød, je nachdem welcher Prozentschwellenwert herangezogen wird. Die in einem südwestlich anschließenden Seitental befindliche Vermoorung am Gasthof Bergblick auf 1050 m ü. NN zeigt eine mittelallerödzeitliche Ansiedlung von *Pinus* an. Die an einer 5 cm mächtigen Torfbulkprobe niedergebrachte Radiokarbondatierung mit einem Alter von 12863–13565 cal. BP umgrenzt grob das Einwanderungsgeschehen. Ob im Allerød schon eine Höhenstufung mit *Pinus sylvestris* und darüber befindlicher *Pinus mugo* existiert hat, ist wie in der Schweiz (BURGA & PERRET 1998: 402) mangels aussagekräftiger Makrorestbelege nicht gesichert. So sind bei den von DIEFFENBACH-FRIES (1981: Tab. 21 und 22) an der Lokalität Bergblick durchgeführten Makrorestanalysen erst ab dem

Frühholozän nicht näher bestimmte *Pinus*-Großrestfunde belegt. Auch muss die Frage nach einer Beteiligung von *Pinus cembra* am Aufbau der Wald- und Baumgrenze offen bleiben, da eine Trennung in einen *Pinus sylvestris*-Typ und einen *Pinus cembra*-Typ in den vorliegenden Analysen nicht vorgenommen wurde. Im östlich angrenzenden Ammergebirge sind jedoch gemäß des Pollenbefundes frühholozäne Arvenbestände im Waldgrenzbereich zu vermuten (OBIDOWICZ & SCHOBER 1985: 157). Analog zu den Ausführungen von BURGA & PERRET (1998: 628) die Schweizer Voralpen betreffend könnte in den Allgäuer Alpen ab dem Allerød bis ins Frühholozän folgende Höhenstufung bestanden haben:

Höhenlagen bis ca. 1200 m ü. NN sind von Kiefernwäldern mit untergeordneter *Betula*-Partizipation eingenommen.

Lagen bis zur bei ca. 1600 m ü. NN lokalisierten Waldgrenze sind zusehends arvenreicher.

Darüber sind Krummholzbestände mit *Pinus mugo* zu vermuten, welche mit zunehmender Höhenlage von Rasengesellschaften und schließlich von Gesteinsschutt- und Felsspaltengesellschaften abgelöst werden.

Für den Kälterückschlag der Jüngeren Dryas ist die schon erwähnte Wald- und Baumgrenzdepression von jeweils etwa 200 m zu konstatieren.

## 5.3 Datierungen

Für <sup>14</sup>C-Datierungen am Bohrkern des Unteren Inselsees wurden ausschließlich terrestrische Makrofossilien verwendet. Die konventionellen Radiokarbondaten lassen sich gut mit einigen <sup>14</sup>C-Datierungen des Schleinsees (MIELKE & MÜLLER 1981: Fig. 6.9) parallelisieren. Vergleicht man die

kalibrierten Radiokarbondaten (Tab. 4) mit den aktuell existierenden Warvenchronologien vom Meerfelder Maar (LITT & STEBICH 1999, LITT et al. 2001) und vom Steißlinger See (EUSTERHUES et al. 2002) in Tabelle 6, passen die jüngeren <sup>14</sup>C-Alter gut in die Zeitschemen. So ergibt sich z.B. für die Grenze Allerød – Jüngere Dryas eine Alterszeitspanne von 12376–12729 cal. BP. Allerdings fällt der ermittelte Zeitraum für die einsetzende Gerzenseeschwankung mit 13431–13763 cal. BP schon deutlich zu alt aus, selbst wenn man allein die Gliederung von EUSTERHUES et al. (2002) betrachtet. Die bøllingzeitliche Datierung ist bei eben genanntem Zeitschema wiederum schlüssig. Der Grund für fehlerhafte <sup>14</sup>C-Datierungen in der Jungmoränenlandschaft und den nördlichen Kalkalpen ist meist in Hartwassereffekten zu suchen. RÖSCH (1990) kommt aufgrund von Vergleichen mit Datierungsergebnissen aus der Schweiz und der Tiefenlage des Laacher See-Tuffs zu dem Schluss, dass die spätglazialen <sup>14</sup>C-Daten im Bodenseeraum infolge von Hartwassereffekten um 400 bis 600 Jahre zu alt ausfallen. Datierungsfehler aufgrund von umgelagertem Material sind jedoch nicht gänzlich auszuschließen.

#### 5.4 Bemerkungen zum Meiendorf-Interstadial

Das Meiendorf wurde erstmals von MENKE (1968) in Schleswig-Holstein beschrieben und ist dort durch einen Anstieg von *Betula nana*, *Hippophaë* und *Artemisia* charakterisiert. Jüngere Arbeiten aus Nord- und Westdeutschland wie z.B. MERKT & MÜLLER (1999), SCHIRMER (1999) sowie STEBICH (1999) bestätigen diese sinnvolle Abgrenzung, da die letzte Eiszeit ja nicht mit einem erneuten Kälterückschlag (= Ältere Dryas) enden kann. Der Vergleich der Warvenchronologien vom Meerfelder Maar (LITT & STEBICH 1999, LITT et al. 2001) und vom Steißlinger See (EUSTERHUES et al. 2002) in Tabelle 6 lehrt jedoch, dass das Meiendorf in Nord- und Westdeutschland dem frühen Bølling bzw. der von BERTSCH (1961: 257) ausgeschiedenen *Juniperus-Hippophaë*-Strauphase in Süddeutschland entspricht. Die süddeutsche Gliederung stimmt mit derjenigen der Schweiz (z.B. AMMANN et al. 1994: 121 und AMMANN et al. 2013: Fig. 7) überein. Im österreichischen Alpenvorland wurde jüngst das Meiendorf das südliche Mitteleuropa betreffend erstmalig abgegrenzt (LAUTERBACH et al. 2011: Fig. 6). Den eben genannten Publikationen aus Süddeutschland (BERTSCH 1961) und der Schweiz (AMMANN et al. 1994, AMMANN et al. 2013) zufolge, welche die gültige Chronologie darstellen sollten, ist das Meiendorf größtenteils als Synonym zum ersten Teil des Bøllings zu sehen. Wie bei De KLERK (2004) treffend dargestellt, existieren insbesondere aufgrund von Korrelationsfehlern schon einige verwirrende Unterteilungen der spätglazialen Vegetationsabschnitte im nördlichen Mitteleuropa, welche nicht auch noch auf das südliche Mitteleuropa ausgedehnt werden sollten.

#### Danksagung

Wir möchten Herrn Prof. Dr. Hermann Jerz herzlich für dessen tatkräftige Hilfe bei der Wahl des optimalen Bohrpunktes im Gebiet des Unteren Inselsees danken. Zudem gebührt unser Dank den wertvollen Hinweisen der beiden Reviewer.

#### Literatur

- AMMANN, B. & LOTTER, A. (1989): Late-Glacial radiocarbon- and palynostigraphy on the Swiss Plateau. – *Boreas*, 18: 109–126.
- AMMANN, B., LOTTER, A., EICHER, U., GAILLARD, M.-J., WOHLFAHRT, B., HABERLI, W., LISTER, G., MAISCH, M., NIESSEN, F. & SCHLÜCHTER, CH. (1994): The Würmian Late-glacial in lowland Switzerland. – *Journal of Quaternary Science*, 9 (2): 119–125.
- AMMANN, B., VAN LEEUWEN, J., VAN DER KNAAP, W., LISCHKE, H., HEIRI, O. & TINNER, W. (2013): Vegetation responses to rapid warming and to minor climatic fluctuations during the Late-Glacial Interstadial (GI-1) at Gerzensee (Switzerland). – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 391 (Part B): 40–59.
- BADER, K. & JERZ, H. (1978): Die glaziale Übertiefung im Iller- und Alpseetal (Oberes Allgäu). – *Geologisches Jahrbuch*, A46: 25–45.
- BEHRE, K.-E. (1978): Die Klimaschwankungen im europäischen Prähoreal. – *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 122 (2): 97–102.
- BERTSCH, A. (1961): Untersuchungen zur spätglazialen Vegetationsgeschichte Südwestdeutschlands. – *Flora*, 151: 243–280.
- BEUG, H.-J. (1961): Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete. – 63 S.; Stuttgart (Fischer).
- BEUG, H.-J. (1976): Die spät- und frühpostglaziale Vegetationsgeschichte im Gebiet des ehemaligen Rosenheimer Sees (Oberbayern). – *Botanische Jahrbücher für Systematik*, 95: 373–400.
- BEUG, H.-J. (2004): Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete. – 542 S.; München (Pfeil).
- BLUDAU, W. (1985): Zur Paläökologie des Ammergebirges im Spät- und Postglazial. – 363 S.; Rheinfelden (Schäuble).
- BORTENSCHLAGER, S. (1984): Beiträge zur Vegetationsgeschichte Tirols I. Inneres Ötztal und unteres Inntal. – *Berichte des Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereins in Innsbruck*, 71: 19–56.
- BOS, J., VAN GEEL, B., VAN DER PFLICHT, J. & BOHNCKE, S. (2007): Preboreal climate oscillations in Europe: Wiggle-match dating and synthesis of Dutch high-resolution multi-proxy records. – *Quaternary Science Reviews*, 26: 1927–1950.
- BURGA, C. & PERRET, R. (1998): Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter. – 805 S.; Thun (Ott).
- DE KLERK, P. (2004): Confusing concepts in Lateglacial stratigraphy and geochronology: origin, consequences, conclusions (with special emphasis on the type locality Bøllingsø). – *Review of Palaeobotany and Palynology*, 129: 265–298.
- DIEFFENBACH-FRIES, H. (1981): Zur spät- und postglazialen Vegetationsentwicklung von Oberstdorf (Oberallgäu) und im Kleinwalsertal (Vorarlberg). Pollen- und makrofossilanalytische Untersuchungen an drei Mooren der montanen Stufe. – 154 S.; Dissertation am Fachbereich Biologie der Technischen Hochschule Darmstadt.
- EICHER, U. & SIEGENTHALER, U. (1976): Palynological and oxygen isotope investigations on Late-Glacial sediment cores from Swiss lakes. – *Boreas*, 5: 109–117.
- EUSTERHUES, K., LECHTERBECK, J., SCHNEIDER, J. & WOLF-BROZIO, U. (2002): Late- and Post-Glacial evolution of Lake Steisslingen (I). Sedimentary history, palynological record and inorganic geochemical indicators. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 187: 341–371.
- FÆGRI, K. & IVERSEN, J. (1989<sup>a</sup>): Textbook of Pollen Analysis. – 328 S.; Chichester (Wiley).
- GÖTTLICH, K. (1955): Ein Pollendiagramm ungestörter späteiszeitlicher Verlandungsschichten im Federseebecken. – *Beiträge zur naturkundlichen Forschung in Südwestdeutschland*, 14: 88–92.
- JERZ, H. (1974): Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 8327, Buchenberg. – 181 S.; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- IRMLER, R. & SCHOLZ, H. (2005): Bestätigt der Fund einer „Schieferkohle“ die spätglaziale Vergletscherung der Immenstädter Nagelfluhberge? – Eiszeitalter und Gegenwart, 55: 88–101.
- IVY-OCHS, S., KERSCHNER, H., REUTHER, A., PREUSSER, F., HEINE, K., MAISCH, M., KUBIK, P. & SCHLÜCHTER, C. (2008): Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. – *Journal of Quaternary Science*, 23: 559–573.
- KLEINMANN, A. (1995): Seespiegelschwankungen am Ammersee. Ein Beitrag zur spät- und postglazialen Klimgeschichte Bayerns. – *Geologica Bavaria*, 99: 253–367.
- KÜSTER, H. (1988): Vom Werden einer Kulturlandschaft. Vegetationsgeschichtliche Studien am Auerberg (Südbayern). – 214 S.; Weinheim (Acta humaniora).
- LANG, G. (1952): Zur späteiszeitlichen Vegetations- und Floengeschichte Südwesterdeutschlands. – *Flora*, 139: 243–294.

- LANG, G. (1962): Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen der Magdalenenstation an der Schussenquelle. – Veröffentlichungen des Geobotanischen Instituts der Eidg. Tech. Hochschule Zürich, 37: 129–154.
- LAUTERBACH, J. und mind. 9 weitere (2011): Environmental responses to Lateglacial climatic fluctuations recorded in the sediments of pre-Alpine Lake Mondsee (northeastern Alps). – *Journal of Quaternary Science*, 26 (3): 253–267.
- LECHTERBECK, J. (2001): „Human Impact“ oder „Climatic Change“? Zur Vegetationsgeschichte des Spätglazials und Holozäns in hochauflösenden Pollenanalysen laminierten Sedimenten des Steißlinger Sees (Südwestdeutschland). – *Tübinger Mikropaläontologische Mitteilungen*, 25: 1–101.
- LITT, T. & STEBICH, M. (1999): Bio- and chronostratigraphy in the Eifel region, Germany. – *Quaternary International*, 61: 5–16.
- LITT, T., BRAUER, A., GOSLAR, T., MERKT, J., BALAGA, K., MÜLLER, H., RALSKA-JASIEWICZOWA, M., STEBICH, M. & NEGENDANK, J. (2001): Correlation and synchronisation of Lateglacial continental sequences in northern central Europe based on annually laminated lacustrine sediment. – *Quaternary Science Reviews*, 20: 1233–1249.
- LOTTER, A., EICHER, U., SIEGENTHALER, U., & BIRKS, H.J.B. (1992): Late Glacial climatic oscillations as recorded in Swiss lake sediments. – *Journal of Quaternary Science*, 7 (3): 187–204.
- MERKT, J. & MÜLLER, H. (1999): Varve chronology and palynology of the Lateglacial in Northwest Germany from lacustrine sediments of Hämmelsee in Lower Saxony. – *Quaternary International*, 61: 41–59.
- MIELKE, K. & MÜLLER, H. (1981): Palynologie. – In: Bender, F. (ed.): *Angewandte Geowissenschaften* 1: 393–407; Stuttgart (Enke).
- MOORE, P., WEBB, J. & COLLINSON, M. (1991<sup>2</sup>): *Pollen Analysis*. – 216 S.; London (Blackwell)
- MÜLLER, H. (1962): Pollenanalytische Untersuchung eines Quartärprofils durch die spät- und nacheiszeitlichen Ablagerungen des Schleinsees (Südwestdeutschland). – *Geologisches Jahrbuch*, 79: 493–526.
- OBIDOWICZ, A. & SCHOBER, H. (1985): Moorkundliche und vegetationsgeschichtliche Untersuchungen des Sennalpenmoores im Trauchgauer Flysch (Ammergebirge). – *Berichte der Bayerischen Botanischen Gesellschaft*, 56: 147–165.
- PAUL, H. & RUOFF, S. (1932): Pollenstatistische und stratigraphische Mooruntersuchungen im südlichen Bayern. II. Teil. Moore in den Gebieten der Isar-, Allgäu- und Rheinvorlandgletscher. – *Berichte der Bayerischen Botanischen Gesellschaft*, 20: 1–264.
- RAUSCH, K. (1975): Untersuchungen zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte im Gebiet des ehemaligen Inn-Chiemseegletschers. – *Flora*, 164: 235–282.
- REILLE, M. (1998): Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord. Supplement 2. – 521 S.; Marseille (Laboratoire de Botanique historique et Palynologie).
- REIMER, P.J. und 29 weitere (2013): IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. – *Radiocarbon*, 55 (4): 1869–1187.
- REITNER, J. (2007): Glacial dynamics at the beginning of Termination I in the Eastern Alps and their stratigraphic implications. – *Quaternary International*, 164–165: 64–84.
- RÖSCH, M. (1985): Ein Pollenprofil aus dem Feuenried bei Überlingen am Ried: Stratigraphische und landschaftsgeschichtliche Bedeutung für das Holozän im Bodenseegebiet. – Materialhefte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg, 7 (Berichte zu Ufer- und Moorsiedlungen Südwestdeutschlands 2): 43–79.
- RÖSCH, M. (1990): Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen im Durchenbergsried. – *Siedlungsarchäologie im Alpenvorland II*. – Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg, 37: 9–64.
- SCHMEIDL, H. (1971): Ein Beitrag zur spätglazialen Vegetations- und Waldentwicklung im westlichen Salzachgletschergebiet. – Eiszeitalter und Gegenwart, 22: 110–126.
- SCHIRMER, U. (1999): Pollenstratigraphische Gliederung des Spätglazials im Rheinland. – Eiszeitalter und Gegenwart, 49: 132–143.
- SCHOLZ, H. (1995<sup>3</sup>): *Bau und Werden der Allgäuer Landschaft*. – 305 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- STEBICH, M. (1999): Palynologische Untersuchungen zur Vegetationsgeschichte des Weichsel-Spätglazial und Frühholozän an jährlich geschichteten Sedimenten des Meerfelder Maares (Eifel). – *Dissertationes Botanicae*, 320: 1–127.
- STEBICH, M., MINGRAM, J., HAN, J. & LIU, J. (2009): Late Pleistocene spread of (cool-)temperate forests in Northeast China and climate changes synchronous with the North Atlantic region. – *Global and Planetary Change*, 65: 56–70.
- STOCKMARR, J. (1971): Tablets with spores used in absolute pollen analysis. – *Pollen et Spores*, 13: 615–621.
- STUIVER, M. & REIMER, P.J. (1993): Extended <sup>14</sup>C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. – *Radiocarbon*, 35: 215–230.
- VAN MOURIK, J., SLOTBOOM, R., VAN DER PFLECHT, J., STREURMAN, H., KUIJPEN, W., HOEK, W. & DE GRAAF, L. (2013): Geochronology of *Betula* extensions in pollen diagrams of Alpine Late-glacial lake deposits: a case study of the Late-glacial deposits of the Gasserplatz soil archives (Vorarlberg, Austria). – *Quaternary International*, 306: 3–13.
- VÖLK, H. (2001): Geomorphologie des Kleinwalsertales und seiner Gebirgsrahmung. Landschaftsformen zur Eiszeit und Nacheiszeit unter Einbeziehung der geologischen Verhältnisse. – Vorarlberger Natur schau, 10: 7–95.
- VOIGT, R. (1996): Paläolimnologische und vegetationsgeschichtliche Untersuchungen an Sedimenten aus Fuschlseee und Chiemsee (Salzburg und Bayern). – *Dissertationes Botanicae*, 270: 1–303.
- WAHLMÜLLER, N. (1985): Beiträge zur Vegetationsgeschichte Tirols V: Nordtiroler Kalkalpen. – *Berichte des Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereins in Innsbruck*, 72: 101–144.
- WICK, L. (2000): Vegetational response to climatic changes recorded in Swiss Late Glacial lake sediments. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 159: 231–250.





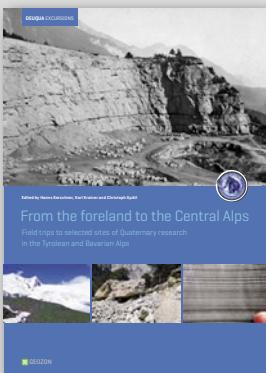






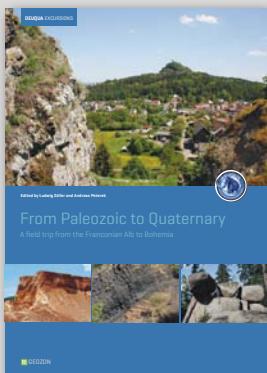


## DEUQUA EXKURSIONSFÜHRER



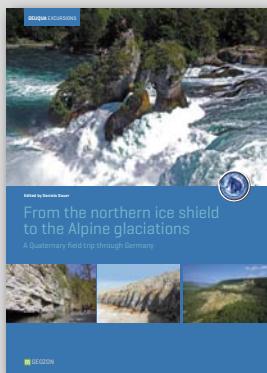
**From the foreland to the Central Alps – Field trips to selected sites of Quaternary research in the Tyrolean and Bavarian Alps**

ISBN 978-3-941971-10-3  
160 pp., A4, 34,- Euro



**From Paleozoic to Quaternary – A field trip from the Franconian Alb to Bohemia**

ISBN 978-3-941971-08-0  
120 pp., A4, 34,- Euro



**From the northern ice shield to the Alpine glaciations – A Quaternary field trip through Germany**

ISBN 978-3-941971-06-6  
88 pp., A4, 29,- Euro



**Eiszeitlandschaften in Mecklenburg-Vorpommern**

ISBN 978-3-941971-05-9  
164 pp., A4, 34,- Euro

## LANDSCHAFTSGESCHICHTE



**Zur jungquartären Landschaftsentwicklung der Mecklenburgischen Kleinseenplatte**

ISBN 978-3-941971-09-7  
78 pp., A4, 22,- Euro



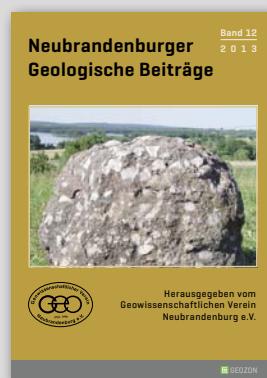
**Zur Landschafts- und Gewässer-geschichte der Müritz**

ISBN 978-3-941971-00-4  
94 pp., A4, 29,- Euro



**Neubrandenburger Geologische Beiträge 11**

ISSN 1616-959X  
88 pp., 17 x 24 cm, 8,50 Euro



**Neubrandenburger Geologische Beiträge 12**

ISSN 1616-959X  
72 pp., 17 x 24 cm, 8,50 Euro

Gerne unterstützen wir auch Sie bei Ihrer wissenschaftlichen Veröffentlichung. Wir publizieren print und digital:

- **Bücher** (Monographien, Reihen, Tagungsbände, Festschriften, Dissertationen etc.)
- **Zeitschriften** (Disziplinäre oder institutionelle Journals, Neugründung, Archivierung etc.)
- **Dokumente** (Artikel, Diskussionspapiere, Berichte, Protokolle, Karten, Daten etc.)



Geozon Science Media  
Pettenkoferstr. 16-18  
D-10247 Berlin  
Germany

Tel. 030-20 23 83 19-0  
Fax 030-20 23 83 19-9  
E-Mail: [info@geozon.net](mailto:info@geozon.net)  
Online: [www.geozon.net](http://www.geozon.net)



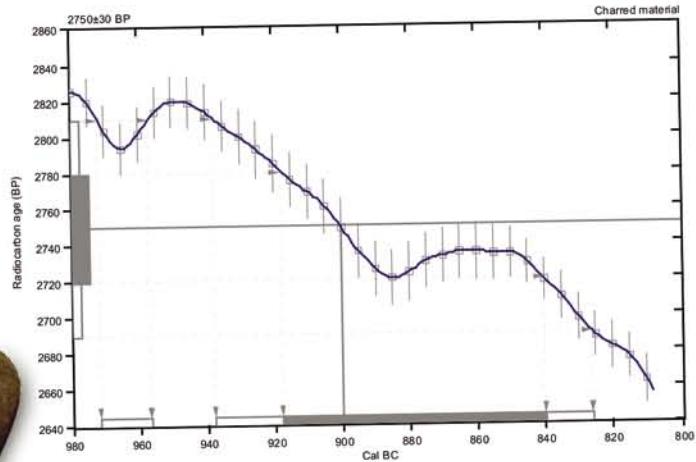
# Radiocarbon Dating Results While You're Still in the Field

## Radiocarbon Age Calibration

Laboratory number: Beta-317090

Conventional radiocarbon age:  $2750 \pm 30$  BP

2 Sigma calibrated results: Cal BC 970 to 960 (Cal BP 2920 to 2910) and  
(95% probability) Cal BC 940 to 830 (Cal BP 2890 to 2780)



- Results in as little as 2-3 days
- Online Access to Results

**BETA**

**Beta Analytic**  
Radiocarbon Dating  
[www.radiocarbon.com](http://www.radiocarbon.com)

# Instruction to Authors

Basically the manuscript shall be submitted in electronic form and has to include the name and the address of the first author. Please use a standard word processor in .rtf, .odt or .doc-format (LaTeX files on request). As character set please use the standard fonts Times Roman, Helvetica or Courier with 1.5 line spacing.

For the submission please use our online system at [www.quaternary-science.net](http://www.quaternary-science.net). After the login you can upload your manuscript as well as separate figures and tables.

## Manuscript style

The acceptable languages are English and German. Manuscripts in German have to contain an English subtitle, an abstract in English and English keywords. The rules of the new German spelling reform apply to German texts.

Manuscripts should be arranged in the following order:

- I Short but concise title
- II Full names, full address and e-mail
- III 5 to 10 keywords that describe the contents of your paper
- VI An abstract of up to 200 words in German and English.  
The translated abstract should carry the translated title in square brackets,
- V Clearly structured text. For chapter numbering use Arabic numerals.
- VI The reference list has to be arranged alphabetically and should be conform to the examples given below.

References have to be insert in the text as brief quotations, the name of the author has to be set in small CAPITALS, the year of publication in brackets e.g. MÜLLER (2006). If more than one publication of the same author in the same year is cited, identify each citation as follows: MÜLLER (2006a, 2006b). Where three or more authors are listed in the reference list, please cite in the text as MÜLLER et al. (2006). Papers with up to three authors should be cited as MÜLLER & MEYER (2006) or MÜLLER, MEYER & SCHULZ (2006). If a special page or figure of a paper should be cited, use following citation style: MÜLLER (2006: 14) or MÜLLER (2006, Fig. 14).

Scientific names of flora and fauna (*gender, sub-gender, species, sub-species*) have to be written in *italics*. Use small CAPITALS for the author (*Armeria maritima* WILLD.)

Do not justify your text, use a ragged left alignment.  
Do not use automatic hyphenation.  
Do not use any automatic formatting.  
Do not use pagination.

Do not insert images, tables and photos into the text, it should be added as separate files. Captions of figures and tables in German and English should be placed at the end of the manuscript.

## Illustrations

Supply each figure as a separate file with the name of the author. Illustrations should be reducible to a column width (8.4 cm) or type area (17.2 x 26 cm). The lettering has to be easy readable after reduction. Where a key of symbols is required, include this in the figure, not in the caption of the figure. Avoid fine lines (hairlines) and grey-shading/halftones. All figures may be colored. There are no additional costs.

For printing all illustrations have to be supplied electronically. Please use for pixel-based images (photos) the .tif-format with a resolution of at least 450 dpi and for vector-based illustrations (graphs, maps, tables) the .eps-format. Greatly reduced .jpg-files or .pdf-files or figures included in word-documents are not accepted.

## References [examples]

### Papers:

- SCHWARZBACH, M. (1968): Neue Eiszeithypothesen. – Eisezetalter und Gegenwart, 19: 250–261.
- EISSMANN, L. & MÜLLER, A. (1979): Leitlinien der Quartärenentwicklung im norddeutschen Tiefland. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 7: 451–462.
- ZAGWIJN, W.H. (1996): The Cromerian Complex Stage of the Netherlands and correlation with other areas in Europe. – In: TURNER, C. (ed.): The Middle Pleistocene in Europe: 145–172; Rotterdam (Balkema).
- MAGNY, M. & HAAS, J.N. (2004): A major widespread climatic change around 5300 cal. yr BP at the time of the Alpine Iceman. – Journal of Quaternary Science, 19: 423–430. DOI: 10.1002/jqs.850

### Books:

- EHLERS, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. – 358 S.; Stuttgart (Enke).

Please do not use abbreviations of the journal names.

## Specimen copies

Authors receive no printed specimen copies. The electronic version is available as download free.

For further questions about the submission of manuscripts please contact the production editor (imprint).

Das Manuskript ist grundsätzlich in elektronischer Form einzureichen und muss mit Namen und Adresse des Erstautoren versehen sein. Bitte benutzen Sie eine Standard-Textverarbeitung im .rtf, .odt oder .doc-Format (LaTeX-Dateien auf Anfrage). Als Zeichensatz verwenden Sie bitte die Standard-Fonts Times Roman, Helvetica oder Courier mit einem 1,5-fachen Zeilenabstand.

Zur Einreichung nutzen Sie bitte unser Online Submission System unter [www.quaternary-science.net](http://www.quaternary-science.net). Nach dem Login steht Ihnen hier eine Upload-Funktion für das Manuskript und die Abbildungs-Dateien zur Verfügung.

## Manuskriptform

Als Publikationssprachen sind Englisch und Deutsch zugelassen. Manuskripte in deutscher Sprache müssen einen englischen Untertitel tragen sowie eine englische Kurzfassung und englische Keywords beinhalten. Für die deutschen Texte gelten die Regeln der neuen Rechtschreibreform.

Die Manuskripte sollen folgendem Aufbau entsprechen:

- I Kurze, aber prägnante Überschrift
- II Ausgeschriebener Vor- und Nachname, Post- und E-Mail-Adresse
- III 5 bis 10 englische Keywords, die den Inhalt des Manuskriptes widerspiegeln.
- IV Deutsche und englische Kurzfassung des Textes mit einer Länge von bis zu 200 Wörtern. Der englische Untertitel des Manuskriptes ist der englischen Kurzfassung in eckigen Klammern voranzustellen.
- V Klar gegliederter Text. Kapitelnummernierungen sind mit arabischen Ziffern zu versehen.
- VI Alphabetisch geordnete Literaturliste. Die Zitierweise muss der unten angegebenen Form entsprechen.

Im fortlaufenden Text sind Literaturhinweise als Kurzzitate einzufügen, der oder die Autorennamen sind in KAPITÄLCHEN-Schrift zu setzen, das Erscheinungsjahr in Klammern, z. B. MÜLLER (2006). Werden von einem Autor mehrere Arbeiten aus einem Jahr zitiert, so sind diese durch Buchstaben zu unterscheiden: MÜLLER (2006a, 2006b). Bei mehr als drei Autoren kann et al. verwendet werden: MÜLLER et al. (2006). Arbeiten mit bis zu drei Autoren werden folgendermaßen zitiert: MÜLLER & MEYER (2006) oder MÜLLER, MEYER & SCHULZ (2006). Sind mit der Zitierung bestimmte Seiten oder Abbildungen gemeint, müssen diese genau angegeben werden: MÜLLER (2006: 14) oder MÜLLER (2006: Fig. 14).

Die wissenschaftlichen Namen von Pflanzen und Tieren (*Gattungen, Untergattungen, Arten, Unterarten*) sind kursiv zu schreiben. Die den biologischen Namen folgenden Autoren werden in KAPITÄLCHEN gesetzt (*Armeria maritima* WILLD.).

Bitte keinen Blocksatz verwenden, sondern linksbündigen Satz.  
Bitte keine automatische Silbentrennung verwenden.  
Bitte alle automatischen Formatierungen in Ihrer Textbearbeitung deaktivieren.  
Bitte keine Seitenzählung.

Abbildungen, Tabellen und Fotos nicht in den Text einbauen, sondern separat als Datei beifügen. Abbildungsunterschriften in Deutsch und Englisch am Ende des Manuskripttextes platzieren.

## Abbildungen

Bitte fügen Sie jede Abbildung als separate Datei mit einem eindeutigen Namen bei. Alle Grafiken müssen eine Verkleinerung auf Spaltenbreite (= 8,4 cm) oder Satzspiegel (= 17,2 x 26 cm) zulassen. Die Beschriftung muss nach der Verkleinerung noch gut lesbar sein. Sollte eine Legende nötig sein, so binden Sie diese in die Abbildung ein. Bitte vermeiden Sie Haarlinien oder Grauwerte. Alle Abbildungen können farbig sein. Es entstehen keine Mehrkosten.

Für die Drucklegung müssen alle Abbildungen in elektronischer Form eingereicht werden. Bitte verwenden Sie für pixelbasierte Abbildungen (Fotos) das .tif-Format mit einer Auflösung von mindestens 450 dpi und für vektorbasierte Abbildungen (Diagramme, Maps, Tabellen) das .eps-Format. Stark reduzierte .jpg oder .pdf-Dateien sowie in Text-Dokumente eingebundene Abbildungen werden nicht akzeptiert.

## Zitierweise (Beispiele)

### Aufsätze:

- SCHWARZBACH, M. (1968): Neue Eiszeithypothesen. – Eiszeitalter und Gegenwart, 19: 250–261.
- EISSMANN, L. & MÜLLER, A. (1979): Leitlinien der Quartärentwicklung im norddeutschen Tiefland. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 7: 451–462.
- ZAGWIJN, W.H. (1996): The Cromerian Complex Stage of the Netherlands and correlation with other areas in Europe. – In: TURNER, C. (ed.): The Middle Pleistocene in Europe: 145–172; Rotterdam (Balkema).
- MAGNY, M. & HAAS, J.N. (2004): A major widespread climatic change around 5300 cal. yr BP at the time of the Alpine Iceman. – Journal of Quaternary Science, 19: 423–430. DOI: 10.1002/jqs.850

### Monographische Werke, Bücher:

- EHLERS, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. – 358 S.; Stuttgart (Enke).

Bitte keine Abkürzungen der Zeitschriftentitel verwenden.

## Belegexemplare

Es werden keine gedruckten Belegexemplare verschickt. Die elektronische Version steht zum kostenlosen Download zur Verfügung.

Bei weiteren Fragen zur Manuskriteinreichung wenden Sie sich bitte an die technische Redaktion (s. Impressum)

## German Quaternary Association

The German Quaternary Association (DEUQUA) eV is an association of German-speaking Quaternary Scientists. The aim of the association is to promote the Quaternary Science, to represent it in public, to intensify the contact to applied science as well as to advice public and political boards in quaternary issues.

Furthermore, the association has set itself the task of operating the contacts between the Quaternary Scientists and related organizations at home and abroad.

The DEUQUA published annually several editions of "E&G – Quaternary Science Journal". In that journal research results from the field of Quaternary Science are published. In addition, developments in the DEUQUA are announced in the "Geoscience messages" (GMIT). GMIT is published quarterly.

Every two years, the German Quaternary Association held the DEUQUA-Conference. At this conference the latest research results of the Quaternary Science are presented and discussed.

## Committee / Vorstand



### PRESIDENT / PRÄSIDENTIN

MARGOT BÖSE  
Freie Universität Berlin  
Malteserstr. 74-100  
D-12249 Berlin, Germany  
Tel.: +49 [0]30-838-70 37 3  
E-Mail: m.boese [at] fu-berlin.de

### VICE PRESIDENTS / VIZEPRÄSIDENTEN

CHRISTOPH SPÖTL  
Institut für Geologie und Paläontologie  
Universität Innsbruck  
Innrain 52  
A-6020 Innsbruck, Austria  
Tel.: +43 [0]512-507-5593  
Fax: +43 [0]512-507-2914  
E-Mail: christoph.spoetl [at] uibk.ac.at

LUDWIG ZÖLLER  
Fakultät II – Lehrstuhl für Geomorphologie  
Universität Bayreuth  
Universitätsstraße 30  
D-95440 Bayreuth, Germany  
Tel.: +49 [0]921-55 2266  
Fax: +49 [0]921-55 2314  
E-Mail: ludwig.zoeller [at] uni-bayreuth.de

### TREASURER / SCHATZMEISTER

JÖRG ELBRACHT  
Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie  
Stilleweg 2  
D-30655 Hannover, Germany  
Tel.: +49 [0]511-643-36 13  
E-Mail: joerg.elbracht [at] lbg.niedersachsen.de

### EDITOR-IN-CHIEF / SCHRIFTLEITUNG (E&G)

HOLGER FREUND  
ICBM – Geoecology  
Carl-von-Ossietzky Universitaet Oldenburg  
Schleusenstr. 1  
D-26382 Wilhelmshaven, Germany  
Tel.: +49 [0]4421-94 42 00  
E-Mail: holger.freund [at] uni-oldenburg.de

### ARCHIVIST / ARCHIVAR

STEFAN WANSA  
Landesamt für Geologie und Bergwesen  
Sachsen-Anhalt  
Postfach 156  
D- 06035 Halle, Germany  
Tel. +49 [0]345-5212-12 7  
E-Mail: wansa [at] lagb.mw.sachsen-anhalt.de

### ADVISORY BOARD / BEIRAT

CHRISTIAN HOSELMANN  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Postfach 3209  
D-65022 Wiesbaden, Germany  
Tel.: +49 [0]611-69 39 92 8  
E-Mail: christian.hoselmann [at] hlug.hessen.de

### DANIELA SAUER

Institut für Bodenkunde und Standortslehre  
Universität Hohenheim  
Emil-Wolff-Str. 27  
D-70593 Stuttgart, Germany  
Tel.: +49 [0]711-459-22 93 5  
E-Mail: d-sauer [at] uni-hohenheim.de

### FRANK PREUSSER

Department of Physical Geography and  
Quaternary Geology  
Stockholm University  
10961 Stockholm, Sweden  
Tel. +46 8 674 7590  
E-Mail: frank.preusser@natgeo.su.se

### REINHARD LAMPE

Institut für Geographie und Geologie  
Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald  
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße 16  
D-17487 Greifswald, Germany  
Tel.: +49 [0]3834-86-45 21  
E-Mail: lampe [at] uni-greifswald.de

### BIRGIT TERHORST

Geographisches Institut  
Universität Würzburg  
Am Hubland  
D-97074 Würzburg, Germany  
Deutschland  
Tel. +49 [0]931-88 85 58 5  
E-Mail: birgit.terhorst [at] uni-wuerzburg.de

## Deutsche Quartärvereinigung

Die Deutsche Quartärvereinigung (DEUQUA) e.V. ist ein Zusammenschluss deutschsprachiger Quartärwissenschaftler und wurde 1949 gegründet. Der Verein hat zum Ziel, die Quartärwissenschaft zu fördern, sie in der Öffentlichkeit zu vertreten, den Kontakt zu angewandter Wissenschaft zu intensivieren sowie öffentliche und politische Gremien in quartärwissenschaftlichen Fragestellungen zu beraten. Des Weiteren hat der Verein sich zur Aufgabe gemacht, die Kontaktpflege der Quartärforscher untereinander und zu verwandten Organisationen im In- und Ausland zu betreiben.

Die DEUQUA veröffentlicht jährlich mehrere Ausgaben von „E&G – Quaternary Science Journal“. Dort werden Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Quartärwissenschaft publiziert. Zusätzlich werden Entwicklungen in der DEUQUA vierteljährlich in den Geowissenschaftlichen Mitteilungen (GMIT) bekannt gemacht.

Im zweijährigen Turnus veranstaltet die Deutsche Quartärvereinigung e.V. die DEUQUA-Tagung. Diese bietet ein Forum, in welchem aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Quartärwissenschaften vorgestellt und diskutiert werden.

## Reorder / Nachbestellung

Prices are understood plus shipping costs. VAT is included. The complete content is searchable at [www.quaternary-science.net](http://www.quaternary-science.net)

Year	Topics	Price
2007		
Vol. 56 No 1–2	Special issue: Stratigraphie von Deutschland – Quartär	54,- □
Vol. 56 No 3	Pfälzerwald, pollen types and taxa, Oberösterreich, Riß-Iller, Schatthausen	27,- □
Vol. 56 No 4	Nußloch, Rangsdorfer See, Lieth/Elmshorn, Gardno Endmoräne/Debina Cliff	27,- □
2008		
Vol. 57 No 1–2	Special issue: Recent progress in Quaternary dating methods	54,- □
Vol. 57 No 3–4	Special issue: The Heidelberg Basin Drilling Project	54,- □
2009		
Vol. 58 No 1	Surface Exposure Dating, Bodensee, Living Fossil, Hochgebirgsböden	27,- □
Vol. 58 No 2	Special issue: Changing environments – Yesterday, Today, Tomorrow	27,- □
2010		
Vol. 59 No 1–2	Baltic Sea Coast, Rodderberg Crater, Geiseltal, Wettersteingebirge, Møn, Argentina	54,- □
2011		
Vol. 60 No 1	Special issue: Loess in Europe	27,- □
Vol. 60 No 2–3	Special issue: Glaciations and periglacial features in Central Europe	54,- □
Vol. 60 No 4	Special issue: Quaternary landscape evolution in the Peribaltic region	27,- □
2012		
Vol. 61 No 1	Calcareous Alps Austria, Löss, Holzreste Schweiz, Rinnen-Strukturen, Permafrost carbon	27,- □
Vol. 61 No 2	Rivers, Lakes and Peatlands NE Germany, Lavrado Region Brazil, Terna River Basin India	27,- □
2013		
Vol. 62 No 1	Special issue: Middle to Upper Pleistocene paleosols in Austria	27,- □
Vol. 62 No 2	Special issue: Environment – Man – Geohazards in the Quaternary	27,- □
2014		
Vol. 63 No 1	Northern Switzerland, Schleswig-Holstein, Rattlesnake Mountain, Peloponnese	27,- □

## Subscription / Abonnement

Title: E&G – Quaternary Science Journal

Print-ISSN: 0424-7116

Issues per volume: 2

### Prices [EUR] print per volume

End customers: 50,46 □ (Free for DEUQUA-Members)

Wholesalers, booksellers: 32,80 □

Scientific libraries: 47,94 €

VAT is not included.

### Postage [EUR] per volume

within Germany: 2,50 □

World (Surface): 6,80 □

World (Airmail): 7,70 □

### Special offer

Libraries which subscribe our journal can receive the volumes 1951–2006 for free. Only shipping costs have to be paid.

### Order address

Geozon Science Media

Pettenkoferstr. 16-18

10247 Berlin

Germany

tel.: +49 (0)30-20 23 83 19-0

fax: +49 (0)30-20 23 83 19-9

e-mail: info (at) geozon.net

web: [www.geozon.net](http://www.geozon.net)

## Contents

DOI 10.3285/eg.63.2.01

- 107 **Potential of a high-resolution DTM with large spatial coverage for visualization, identification and interpretation of young (Würmian) glacial geomorphology – a case study from Oberschwaben (southern Germany)**

*Elena Beckenbach, Thomas Müller, Hartmut Seyfried, Theo Simon*

DOI 10.3285/eg.63.2.02

- 130 **Die spätglaziale Vegetationsgeschichte im oberen Illergebiet (Allgäu/Bayern)**

*Philipp Stojakowits, Arne Friedmann, Andrea Bull*