Semiautomatisierte Modellierungen der landschaftlichen Einheiten im Alpenvorland Oberschwabens

Objektorientierte Analysen auf verschiedenen Raumskalen mit morphologischen, geologischen und hydrologischen Daten, in Verbindung mit der Erstellung innovativer digitaler Lernmodule

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

Doktor der Philosophie (Dr. phil.)

der Pädagogischen Hochschule Weingarten

vorgelegt von

Markus Alle, geb. am 29. Mai 1984

in Stuttgart,

Juni 2020

Weingarten 2021

Dekan: Prof. Dr. phil. Joachim Rottmann

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schwab

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Volker Hochschild

Drittgutacher: Prof. Dr. rer nat. Alexander Siegmund

Pädagogische
Hochschule Weingarten

Semiautomatisierte Modellierungen der landschaftlichen Einheiten im Alpenvorland Oberschwabens

Objektorientierte Analysen auf verschiedenen Raumskalen
mit morphologischen, geologischen und hydrologischen Daten,
in Verbindung mit der Erstellung innovativer digitaler Lernmodule

Markus Alle

Weingarten 2021

Drohnenfoto auf der Vorderseite:
Abgebildet wird die charakteristische kuppig-hügelige Glaziallandschaft des Oberschwäbischen Alpenvorlands, im Vordergrund liegt Laimnau (Tettnang) im Argental.

Aufnahme vom 14. Oktober 2019, 09:13, UTM-Koordinaten: 47.63583 / 9.62287.
Mit freundlicher Genehmigung von D. Zachenbacher & A. Schwab, PH Weingarten © 2019.

Danksagung

Allen Personen, die mich auf meinem Weg zur Promotion begleitet und unterstützt haben, möchte ich an dieser Stelle meinen großen Dank aussprechen.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr. Andreas Schwab, der mich für die Landschaft Oberschwabens begeisterte. Unzählige fruchtbare Fachgespräche, hilfreiche Kontakte und seine enorme Detailkenntnis der Region waren sehr hilfreich – vielen herzlichen Dank! Ich danke auch Prof. Dr. Volker Hochschild für konstruktive Kritik, wertvolle Anregungen und die Übernahme des Zweitgutachtens. Prof. Dr. Alexander Siegmund danke ich für die Anfertigung des Drittgutachtens. Bei Prof. Dr. Yvonne Krautter, Prof. Dr. Waldemar Grosch und Prof. Dr. Dietmar Schiersner und Prof. Dr. Joachim Rottmann bedanke ich mich für ihre Bereitschaft, die Prüfungskommission zu komplettieren.

Dem Zentrum für Regionalität und Schulgeschichte der Pädagogischen Hochschule Weingarten danke ich für die institutionelle Begleitung der Arbeit.

Ein großer Teil der Geobasisdaten für diese Arbeit wurden vom Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung, dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg sowie der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg kostenlos bereitgestellt. Vielen Dank dafür!

Dem Geographischen Institut der Universität Tübingen, ganz besonders Dr. Hans-Joachim Rosner und Christian Bick, danke ich für die Software-Unterstützung, ohne die dieses Projekt so nicht möglich gewesen wäre.

Dr. Geraldine Quénéhervé, Dr. Felix Bachofer, Dr. Joachim Eberle, Dr. Jan Kropáček, Harald Winkelhausen, Dr.-Ing. Max G. Müller, Dr. Andreas Thierer, Dr. Christine Scholtes, Dennis Zachenbacher und vielen weiteren danke ich für zahlreiche kritische Nachfragen sowie fortwährende Motivation und Zuspruch.

Christoph Felder, dem Schulleiter des Karl-Maybach-Gymnasiums Friedrichshafen und seinem Stundenplanteam möchte ich dafür danken, dass sie dieses Dissertations-Projekt parallel zu meiner dortigen Arbeit im Schuldienst ermöglicht haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinen Eltern, Mathilde und Dieter Alle, für ihre Erziehung, Dingen auf den Grund zu gehen und sie multiperspektivisch zu betrachten. Danke auch für eure uneingeschränkte Unterstützung bei all meinen Träumen und Zielen!

Unserer kleinen Tochter, Hannah Marlene, danke ich dafür, dass sie mich in der Schlussphase der Arbeit stetig daran erinnert hat, dass es auch noch andere wichtige Dinge gibt.

Der größte Dank gebührt meiner Frau und großen Liebe, Martina Veit, die mich auf meinem Weg ununterbrochen unterstützt hat und dabei stets Nachsicht walten ließ, wenn sie in unzähligen Stunden auf mich verzichten zu musste – vielen herzlichen Dank dir!

Inhaltsverzeichnis

Danksagung ... **A**

Inhaltsverzeichnis ... **III**

Abbildungsverzeichnis ... **V**

Tabellenverzeichnis ... **VII**

Abkürzungsverzeichnis ... **VIII**

Kurzfassung ... **XI**

Summary ... **XIII**

1 Einleitung ... **1**

1.1 Forschungsfragen ... 3

1.2 Struktur der Arbeit ... 3

2 Theorie – Grundlagen und Forschungsstand ... **5**

2.1 Geographie des Untersuchungsgebiets ... 5

2.1.1 Räumliche Abgrenzung und humangeographische Grundlagen ... 5

2.1.2 Kurzer Abriss der glazialen Landschaftsgeschichte ... 7

2.1.3 Geologischer Untergrund ... 10

2.1.4 Haupt-Flusssysteme ... 16

2.1.5 Landformen ... 16

2.1.6 Landschaftsgeschichtliche Grobgliederung ... 30

2.2 Landschaftsklassifikation ... 33

2.2.1 Ordnung der landschaftlichen Vielfalt – Grundlagen und Konzepte ... 34

2.2.2 *Bottom-up*-Konzept ... 37

2.2.3 *Top-Down*-Konzept ... 41

2.2.4 Statistische Konzepte ... 42

2.2.5 Habitatkarten – Klassifikationen mit anderem thematischen Schwerpunkt ... 45

2.3 Digitale Reliefanalyse und Geomorphometrie ... 47

2.3.1 Digitale Geländemodelle (DGM) ... 48

2.3.2 Geomorphometrische Analysen auf Basis von DGM ... 49

2.3.3 Direkte Ableitungen aus DGM ... 51

2.3.4 Weitere DGM-basierte Indizes ... 55
2.4 Geographische Objektbasierte Bildanalyse (GEOBIA) ... 58
2.4.1 Object Based Terrain Analysis (OBTA) ... 59
3 Empirie – *Landschaftsklassifikation in Oberschwaben* ... **61**
3.1 Datengrundlagen ... 61
3.2 OBTA-basierte Modellierung von glazialen Landformen und Landschaften ... 61
3.2.1 Parametrisierung ... 62
3.2.2 Hierarchieebenen im objektbasierten Landschaftsmodell ... 67
3.2.3 Glaziale Landformen (OBTA-Ebene 1) ... 68
3.2.4 Glaziale Landschaften und Haupt-Landschaften (OBTA-Ebene 2-3) ... 86
4 Ergebnisse und Diskussion – *Fachwissenschaftlicher Teil* ... **89**
4.1 Ergebnisse der objektbasierten Klassifikationsschritte (OBTA-Ebenen 1-3) ... 89
4.1.1 Hohlform basierte Landschaften ... 95
4.1.2 Vollform basierte Landschafen ... 104
4.1.3 Lithologisch basierte Landschaften ... 114
4.2 Vergleich der Ergebnisse mit händisch-basierten Klassifikationen ... 116
4.2.1 Expertenbasierte, analoge Klassifikationen glazialer Landschaften ... 116
4.2.2 Expertenbasierte, digitale Klassifikationen glazialer Landschaften ... 134
4.3 Anwendungsmöglichkeiten der hiesigen Ergebnisse ... 136
5 Didaktischer Teil – GIS, DGM und Landschaftsanalyse in der Schule ... **139**
5.1 DGM zur Unterstützung räumlicher Ordnungssysteme für Schüler*innen ... 142
5.2 DGM-basierte Lernmodule zur Landschaftsklassifikation ... 144
5.2.1 Das BaWü-GIS ... 145
5.2.2 Lernmodule mit dem BaWü-GIS ... 148
5.3 Fazit ... 154
6 Zusammenfassung und Ausblick ... **157**
6.1 Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfragen ... 157
6.2 Ausblick ... 160
7 Literatur ... **163**
8 Anhang ... **A-V**

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Reliefkarte des Untersuchungsgebiets 7
Abb. 2 Wichtige Sedimente im Untersuchungsgebiet 12
Abb. 3 Drumlinfeld zwischen Markdorf und Oberteurigen 18
Abb. 4 Flachwellige Till-Landformen im AML nordöstlich von Hoßkirch 21
Abb. 5 Deutlich ausgeprägter, bewaldeter Endmoränenzug 22
Abb. 6 Schwächer ausgeprägter Endmoränenzug bei Ostrach 23
Abb. 7 Blick ins Mittlere Schussenbecken von RV-Torkenweiler aus 26
Abb. 8 Das Argental am Ortsrand von Flunau (Neukirch) 27
Abb. 9 Blick durch Querschnitt des südlichen Deggenhauser Tals 27
Abb. 10 Zwei steile Kerbtal- / kerbtalartige Abschnitte 28
Abb. 11 Schmelzwasserrinne NW von Pfullendorf 29
Abb. 12 Die Tettnanger Terrassen im Bereich des Manzenbergs 30
Abb. 13 Landschaftsgeschichtliche Grobgliederung des Untersuchungsgebiets ... 33
Abb. 14 Aggregationsstufen des Bottom-up- und Top-down-Prinzips 37
Abb. 15 Prinzip der hierarchischen Landschaftsklassifikation (nach SYRBE 1999) 40
Abb. 16 Habitat- / LULC-Karte des Untersuchungsgebiets 47
Abb. 17 Raster-Darstellung und zugehörige ASCII-Codierung 50
Abb. 18 DGM 5 und Slope für eine typische Landschaft im JML 52
Abb. 19 Veranschaulichung des Konzepts der Krümmung 53
Abb. 20 Detailansicht: Kuppen-und-Kesselförmige Landform (Endmoräne) 54
Abb. 21 Funktionsweise des TPI 56
Abb. 22 TPI und TRI für eine typische Landschaft im JML 57
Abb. 23 Profillängsschnitt durch einen Drumlin (A) 75
Abb. 24 Profillängsschnitt durch einen Drumlin (B) 76
Abb. 25 Profillängsschnitt durch flachwellige Till-Landformen (B) 78
Abb. 26 Profillängsschnitt durch flachwellige Till-Landformen (B) 78
Abb. 27 Profilquerschnitt durch einen Endmoränenwall (AeWEM) (A) 81
Abb. 28 Profilquerschnitt durch einen Endmoränenwall (AeWEM) (B) 82
Abb. 29 OBTA-Klassifikation Landformen (1. Ebene) 85
Abb. 30 Datenkonversion beim Übergang von OBTA-Ebene 1 zu OBTA-Ebene 2 ... 86
Abb. 31 OBTA-Klassifikation glazialer (Haupt-)Landschaften (OBTA-Ebene 2-3) .. 88
Abb. 32 Landformen des Untersuchungsgebiets. (1. OBTA-Ebene) 92
Abb. 33 Landschaften des Untersuchungsgebiets. (2. OBTA-Ebene) 93
Abb. 34 Haupt-Landschaften des Untersuchungsgebiets. (3. OBTA-Ebene) 94
Abb. 35 Unterschiedliche Beckenlandschaften (2. OBTA-Ebene) 96
Abb. 36 Moor- & Schotteranteile der glazialen Becken 98

Abb. 37 Längsprofil des Salemer Beckens 100
Abb. 38 Verortung des Längsprofils des Salemer Beckens 100
Abb. 39 Verlauf der Argen während des Spätwürm (2. OBTA-Ebene) 102
Abb. 40 Schmelzwasserrinne bei Pfullendorf-Denkingen (OBTA-Klassifikation) . 104
Abb. 41 Räumliche Dichte kuppig-hügeliger Till- und Endmoränenformen 106
Abb. 42 Übersicht über die Landschaftsbereiche des Untersuchungsgebiets 107
Abb. 43 Westlicher Teil: Dichte kuppig-hügeliger Till- und Endmoränenformen 108
Abb. 44 Östlicher Teil: Dichte kuppig-hügeliger Till- und Endmoränenformen ... 109
Abb. 45 Gesamtgebiet: Dichte kuppig-hügeliger Till- und Endmoränenformen 110
Abb. 46 Dichteverteilung kuppig-hügeliger Till- und Endmoränenformen 110
Abb. 47 Räumliche Dichte aller Landform-Segmente im Untersuchungsgebiet ... 111
Abb. 48 Detailansicht der Landschaften um den Gehrenberg 115
Abb. 49 OBTA-basierte Till-Landformen vs. ERBs Drumlin-Kartierung 118
Abb. 50 Karte der Naturräumlichen Gliederung im Untersuchungsgebiet 121
Abb. 51 Naturräume auf Basis der OBTA-Landschaftsklassen (2. OBTA-Ebene) .. 123
Abb. 52 Naturräume auf Basis der OBTA-Landschaftsklassen (3. OBTA-Ebene) .. 126
Abb. 53 Vergleich: Naturräume vs. OBTA-(Haupt-)Landschaften (2. + 3. Ebene) .. 128
Abb. 54 Vergleich: Naturräume vs. OBTA-Haupt-Landschaften (3. Ebene) 129
Abb. 55 Lage der Vergleichslandschaften aus *Tab. 6* im Untersuchungsgebiet 131
Abb. 56 Lage der Ausschnitte im Untersuchungsgebiet 132
Abb. 57 Detailvergleich 1: DONGUS (1991) vs. OBTA-3, Wurzacher Becken 132
Abb. 58 Detailvergleich 2: DONGUS (1991) vs. OBTA, Gehrenberg 133
Abb. 59 Überblick über das BaWü-GIS in QGIS 147
Abb. 60 Ablaufschema der Lernmodule A und B 148

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Gliederung der quartären Kaltzeiten im Untersuchungsgebiet 9
Tab. 2 Übersicht: Raumskalen, landschaftliche Einheiten und ihre Fläche 38
Tab. 3 Herkunft der verwendeten Parameter 62
Tab. 4 Suchradien für den TPI und den TRI 65
Tab. 5 Die (Großen) Becken des Untersuchungsgebiets 99
Tab. 6 Räumlicher Detailvergleich: OBTA-Landschaften vs. Naturräume 130
Tab. 7 Übersetzungstabelle: OBTA-Klassifikation / Naturräumliche Gliederung C
Tab. 8 Übersetzungstabelle: OBTA-Klassifikation/ Naturräumliche Gliederung C
Tab. 9 Übersetzungstabelle: Naturräume / OBTA-IDs (2. Ebene) ..... D
Tab. 10 Vergleichsdaten: Naturräume und OBTA-Landschaften ..... F

Abkürzungsverzeichnis

AB	*Arbeitsblatt*
Abb.	*Abbildung*
AeWEM	*Äußere Würmendmoräne* (≙ Schaffhausener Stadium, Außenwallwürm, gebildet ca. 20.000 a BP)
AML	*Altmoränenland* (Rißzeitlich oder hoßkirchzeitlich geprägt; außerhalb / nördlich der AeWEM verortet)
ASCII	*American Standard Code for Information Interchange* (Datenaustausch-Format)
BKG	*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*
BP	*Before Present* ≙ (Jahre) vor heute; entspricht einem realem Bezugspunkt im Jahr 1950
BRT	*Boosted Regression Trees* (≙ Statistisches Verfahren zur besseren Klassentrennung bei großen Datenmengen auf Grundlage von Regressionsanalysen)
CORINE	*Coordination of Information on the Environment* (einheitliche Klassifikation der Landnutzung/Landbedeckung innerhalb der Europäischen Union)
DGM	*Digitales Geländemodell*
ECRINS	*European catchments and Rivers network system* (Gewässer-Datenbank der Europäischen Umweltagentur)
EHWS	*Europäische Hauptwasserscheide* (danubisches vs. rhenanisches System)
EUNIS	*European Nature Information System* (Datenbank der Europäischen Umweltagentur)
EW	*Einwohner*
FFH	*Flora-Fauna-Habitat* nach der Richtlinie 92/43/EWG der Europäischen Union
Fm	*Formation* (≙ Einheit der lithostratigraphischen geol. Gliederung)
FN	Friedrichshafen
GEOBIA	*Geographical Object Based Image Analysis* (≙ Geographische Objektbasierte Bildanalyse, basierend auf dem Prinzip: 1. Segmentierung, 2. Klassifikation)
GIS	*Geographisches Informationssystem* (eng. Geographic Informationssystem)
GK	*Geologische Karte* (analog oder digital)
GO	*Gesellschaft Oberschwaben für Geschichte und Kultur e.V.*

IWEM	*Innere Würmendmoräne* (≙ Singener Stadium, Innenwallwürm, gebildet ca. 18.000 a BP)
JML	*Jungmoränenland* (≙ Bereich südlich der Äußeren Würmendmoräne)
ka	*Jahrtausend* (kilo ≙ lat. 1000, annum ≙ lat. Jahr)
LGRB BW	*Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden Württemberg*, Regierungspräsidium Freiburg
LULC	*Landuse / Landcover* (Landnutzung / Landbedeckung)
Ma	*Millionen Jahre* (mega ≙ lat. Million, annum ≙ lat. Jahr)
Mio.	*Millionen*
OBTA	*Object Based Terrain Analysis* (≙ Objektbasierte Geländeanalyse, mit GEOBIA-Methoden)
OSM	*OpenStreetMap* (Freier Geodaten-Dienst)
OP	*Oberschwabenportal der Gesellschaft Oberschwaben für Geschichte und Kultur*
PNV	*Potenzielle Natürliche Vegetation*
RVBO	*Regionalverband Bodensee-Oberschwaben*
Sfm	*Subformation* (≙ Untereinheit der lithostratigraphischen geol. Gliederung)
SRTM	*Shuttle Radar Topography Mission* (Fernerkundungs-basierte Daten für ein globales DGM)
SVM	*Support Vector Machines* (≙ Statistisches Verfahren zur besseren Trennung von unterschiedlichen Klassen bei großen Datenmengen, basierend auf Stützvektoren)
Tab.	*Tabelle*
TPI	*Topographic Position Index*
TRI	*Terrain Ruggedness Index*
UAV	*Unmanned, Uninhabited* oder *Unpiloted Aerial Vehicle* (≙ unbemanntes Flugobjekt, umgangssprachlich auch „Drohne“ genannt)

Kurzfassung

Diese Arbeit richtet sich an Fachwissenschaftler*innen und Fachdidaktiker*innen, Lehr*innen, Studierende der Geographie[1] und Landschaftsplanung wie auch an fachlich interessierte Laien. Sie hat zum Ziel, den Blick für die Landschaften, speziell im Alpenvorland Oberschwabens, zu schärfen - fachwissenschaftlich wie fachdidaktisch. In diesem Zusammenhang war das zugehörige Forschungsprojekt folgerichtig am Zentrum für Regionalität und Schulgeschichte der Pädagogischen Hochschule Weingarten angesiedelt.

Das fachwissenschaftliche Ziel war, glazial geprägte Landformen und (Teil-)Landschaften mit Hilfe semiautomatisierter Methoden digital und möglichst objektiv zu erfassen und zu kartieren. So soll ein Beitrag zum besseren Verständnis von der Genese und den Zusammenhängen der Landschaft im Alpenvorland Oberschwabens geleistet werden. Bei der Arbeit kamen Geographische Informationssysteme (GIS) und objektbasierte Methoden (OBTA) zum Einsatz. Sie ermöglichten es, die hier entwickelten Algorithmen transparent zu machen und sie auf andere Räume mit vergleichbarer Ausstattung zu übertragen. Die klassifizierten Landschaftseinheiten wurden mit bereits vorhandenen, expertenbasierten und händischen Klassifikationen für das Untersuchungsgebiet verglichen. Dabei zeigte sich, dass diese trotz fehlender digitaler bzw. semiautomatisierter Methoden räumlich relativ genau sind und nur in einigen Aspekten hinter den hiesigen Ergebnissen zurückstehen. Die Vorteile des hier entwickelten Landschaftsmodells sind seine Nachvollziehbarkeit und spätere Übertragbarkeit.

Die Ergebnisse in mittel- bis großmaßstäbiger Perspektive könnten schließlich in Landschaftsplanung, Umweltschutz und geowissenschaftlicher Forschung Anwendung finden. Gleichzeitig bieten die hier entwickelten Methoden auch das Potenzial, in schulischen Lehr- und Lernkontexten eingesetzt zu werden.

Fachdidaktisch steht der Umgang mit Digitalen Geländemodellen (DGM) beim Erkennen und Verstehen von Landschaften und deren Genese im Mittelpunkt. Der Mehrwert von DGM für die Lehre in Schule (und Hochschule) wird unterstrichen. Dabei wurde ein mittelmaßstäbiges Geographisches Informationssystem (GIS) für Baden-Württemberg (BaWü-GIS) entwickelt und bereitgestellt. Dieses erlaubt die Bearbeitung landschaftlicher Fragestellungen mit einer geringen Zahl an Eingangsdaten für das gesamte Bundesland. Mit den vorgestellten Lernmodulen sollen Lehrer*innen zum GIS-basierten Einsatz von DGM und anderen digitalen Geodaten ermutigt und dabei unterstützt werden.

[1] Sowohl in den Lehramtsstudiengängen (BEd/MEd) wie auch in den BSc-/MSc-Studiengängen.

Die Idee für diese Arbeit entwickelte sich aus einer Fachdiskussion über das Potenzial von digitalen Methoden für die geographische Bildung sowie für die wissenschaftliche Analyse von Landschaften.

Die beiden zentralen Forschungsfragen lauten: Ist es möglich, Algorithmen zu entwickeln, welche die „Maschine“ morphologisch-geologisch basierte Landschaftseinheiten in einer Glaziallandschaft erkennen und klassifizieren lässt? Kann diese Herangehensweise auch auf schulische Kontexte übertragen werden und entsprechende Lernmodule entwickelt werden? Beide Fragen können mit „Ja“ beantwortet werden.

Während der Arbeit im hiesigen Projekt zeigte sich, dass räumliche Sachverhalte in Landschaften, welche für das menschliche Auge offensichtlich erscheinen, maschinell mitunter sehr schwer umsetzbar sind. Gleichzeitig gibt es Situationen, in denen das semiautomatisierte Landschaftsmodell räumliche Zusammenhänge erkennt, die der menschlichen Wahrnehmung zunächst verborgen bleiben.

Summary

This thesis is directed both at expert scientists and educationalists, geography teachers and students, landscape planners, as well as non-specialists interested in the subject. It aims at sharpening our awareness of the landscape in the Alpine foreland of Upper Swabia, both on a scientific and an educational level. In this context this study was associated with the Center for Regional Studies and School History (Zentrum für Regionalität und Schulgeschichte) of the University of Education of Weingarten.

The scientific goal is to detect and to map glacially shaped landforms and landscapes digitally and objectively, using semi-automated methods. That should contribute to a better understanding of the genesis and the connections of the landscape in the Alpine foreland of Upper Swabia. For that, Geographic Informationsystems (GIS) and Object Based Terrain Analysis (OBTA) was used which make it possible to transfer these developed algorithms onto other comparable landscapes. The classified landscape divisions were compared with already existing, expert-based and manual classifications for the investigated area. This showed that these results are quite exact – despite the missing digital data and methods – and that they differ from these results only in a few aspects. The advantages of the OBTA based landscape model are its comprehensibility and transferability.

Finally, the results in medium- and large-scale perspective can be used in landscape planning, environmental protection and geoscientific research. At the same time, the developed methods offer the potential of being applied in teaching and learning situations.

The use of Digital Elevation Models (DEM) for recognizing and understanding landscapes and their evolution will be put at the heart of the educational focus of this thesis. The additional benefit of DEMs for teaching in schools (and universities) will be emphasized. For that, a medium-scale Geographic Information System (GIS) for the state of Baden Wuerttemberg was developed and provided. This allows us to work on questions concerning landscapes with only few input data for the entire state. The presented learning modules shall encourage and support teachers to work with DEMs and other GIS-data.

The idea for this study evolved from a discussion about the potential of combining digital methods for geographical education and the scientific analysis of landscapes. The central research questions are: Is it possible to develop algorithms in order to detect morphologically and geologically based landscape divisions in a glacial landscape? Can this approach also be used in teaching and learning situations and can respective learning modules be developed? Both of these questions can be answered with “yes“.

During the project it became clear that spatial relationships between landscapes which appear obvious for the human eye, are sometimes very difficult to realize by machine. At

the same time, there are situations in which the semi-automated landscape model finds connections that humans cannot perceive at first glance.

1 Einleitung

Die Landschaft im Alpenvorland Oberschwabens besteht im Untergrund aus Molassesedimenten. Auf diesen lagerten sich während der vergangenen Kaltzeiten glaziale Sedimente ab. Die darüber liegende Oberfläche wurde durch glaziale und periglaziale Prozesse sowie anthropogene Einflüsse geprägt. Die Auswirkungen dieser prägen die Landschaft bis heute und machen den Raum zwischen Bodensee, Schwäbischer Alb und Iller zu einem landschaftlich höchst abwechslungsreichen wie interessanten Gebilde.

Der Begriff „Landschaft“ wurde und wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert (vgl. HARD 1983, LÖFFLER 2002, STEINHARD et al. 2012). Dabei geht es um die Frage nach der Vereinbarkeit der kausal-analytischen und der ästhetischen Perspektive auf das Gebilde „Landschaft“ (STEINHARD et al. 2012: 31). Unbestritten ist, dass es sich bei „Landschaft“ um ein hochkomplexes Raum-Zeit-System handelt (vgl. NEEF 1967: 18ff., LESER & LÖFFLER 2017: 17), das verschiedene Kompartimente als Ganzes vereint.

Um landschaftliche Eigenheiten zu erkennen, anthropogene Eingriffe vorausschauend planen, Chancen wie Risiken abwägen und Schützenswertes bewahren zu können, sind Geographie und Landschaftsökologie stets bestrebt, Ordnung(en) in die räumliche Vielfalt des Gesamtgebildes der Landschaft zu bringen (MANNSFELD 2005: 2). Dabei spielt die Frage der Abgrenzung von Teilräumen (bzw. Teillandschaften) eine bedeutende Rolle. Die dazu eingesetzten Verfahren wenden jeweils unterschiedliche Prinzipien und Regeln an.

In der jüngeren Vergangenheit wurde bereits auf verschiedenen Maßstabseben Teillandschaften des Oberschwäbischen Alpenvorlands erfasst, beschrieben und die Ergebnisse kartographisch abgebildet. Dabei wurde das Gebiet mehrfach im Rahmen einer deutschlandweiten landschaftlichen Gliederung „mit-modelliert“ (vgl. MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962, RENNERS 1991, SCHRÖDER & SCHMIDT 2000, BURAK 2005 u.a.). Die dort angesetzten Raummaßstäbe liegen in der Regel bei 1 : 1 Mio. und sind damit für Detailanalysen zu klein.

GRAUL (1952), HUTTENLOCHER (1959), BENZING (1965) sowie DONGUS (1991) hingegen konzentrierten sich bei ihrer naturräumlichen Gliederungen (Blätter *Sigmaringen*, *Ulm*, *Konstanz* und *Lindau/Oberstdorf* – alle im Maßstab 1 : 200 000) speziell auf Teilräume Oberschwabens und angrenzender Regionen. MEYNEN & SCHMITTHÜSENs Großeinheiten sowie die Naturräume von GRAUL und Kollegen dien(t)en bis ins 21. Jahrhundert bei raum- und landschaftsplanerischen Untersuchungen als Grundlage (STEINHARD et al. 2012: 203, jüngere Einsatzgebiete z.B. LANDSCHAFTSPARK BODENSEE-OBERSCHWABEN 2003: 38, FILDERSTADT 2018 – Landschaftsplan 2030).

Gemessen am Automatisierungsgrad lassen sich die bisherigen Landschaftsklassifikationen folgendermaßen typisieren:

(1) *nichtautomatisierte, händisch vorgenommene (analog oder digital)* und hauptsächlich *auf Expertenwissen basierende Verfahren*,
(2) *vollautomatisierte, statistische Verfahren* sowie
(3) *semiautomatisierte, hierarchische Verfahren*.

Innerhalb des Verfahrens muss zusätzlich zwischen der Zerlegung der Landschaft in einzelne Naturräume (*Top-down*) (z.B. Typ 1) und dem schrittweisen, hierarchischen Aggregieren von ähnlichen Landschaftselementen zu (Teil-)Räumen (*Bottom-up*, z.B. Typ 2 & Typ 3) unterschieden werden. Typ 1 und Typ 2 weisen methodische Unzulänglichkeiten auf, welche die räumliche Genauigkeit einschränken sowie die Nachvollziehbarkeit bzw. Übertragbarkeit des Klassifikationsprozesses erschweren können.

Ziel dieser Arbeit ist, mittels einer GIS-basierten Klassifikation nach Typ 3 die Teillandschaften des Oberschwäbischen Alpenvorlands unter Einbeziehung von morphologischen, lithologischen, hydrologischen und anthropogenen Daten auf der chorischen Ebene zu klassifizieren. Der dabei verwendete Ansatz ermöglicht eine möglichst hohe Objektivität. Dies wird zusätzlich durch das Verwenden weniger Input-Daten sowie einer minimalen Anzahl an korrigierenden Eingriffen realisiert.

Im hier vorgestellten Modell spielt die Morphologie eine entscheidende Rolle für die Abgrenzung der landschaftlichen Einheiten (vgl. RENNERS 1991: 29, SEYFRIED et al. 2019: 23). Es kombiniert die klassische digitale Reliefanalyse mit regel- und objektbasierten Methoden (*Object Based Terrain Analysis – OBTA*). Um das Ergebnis zu verfeinern und der Komplexität des Voralpenlands Rechnung zu tragen, kamen zusätzlich thematische Daten (Gesteinsarten, der Verlauf der Europäischen Hauptwasserscheide sowie anthropogene Auf- und Abtragungen) zum Einsatz.

Zum Schluss wurden die Ergebnisse mit anderen (händischen) Klassifikationen (GRAUL und Kollegen, BECKENBACH et al. 2014, SEYFRIED et al. 2019) hinsichtlich Methodik, inhaltlichen Ergebnissen und räumlicher Präzision verglichen und diskutiert. Dies soll ein Beitrag zu einer realitätsnahen, nachvollziehbaren und auf vergleichbare Räume übertragbaren Modellgrundlage sein. Es kann als Datenbasis für weitere raum- und landschaftsplanerische Projekte sowie für Maßnahmen des Naturschutzes (vgl. BASTIAN 2005: 43) im Alpenvorland Oberschwabens dienen.

Desweiteren wurden in enger Anlehnung an die hier eingesetzten Daten und Methoden ein Baden-Württemberg-GIS (BaWü-GIS) entwickelt, auf dessen Basis zwei Lernmodule zur Glazialmorphologie entstanden sind (vgl. dazu auch ALLE 2018). Mit diesen werden Schüler*innen[2] unterstützt, ihre Wahrnehmung von Räumen und ihr räumliches Orien-

[2] Die Lernmodule zielen auf den schulischen Kontext ab. Das BaWü-GIS eignet sich aber auch für Studierende zur Einarbeitung und Wiederholung – dann allerdings mit weiterführenden Fragestellungen.

tierungsraster für Landschaften im deutschen Südwesten im Allgemeinen und in einem glazial geprägten Raum wie im Alpenvorland Oberschwabens im Besonderen zu verfeinern bzw. zu erweitern. Damit möchte die Arbeit auch zu einem erweiterten landschaftsgeschichtlichen Systemverständnis der Lernenden beitragen.

1.1 Forschungsfragen

Die wissenschaftliche Beschäftigung mit Landformen, (Teil-)Landschaften, Landschaftsgeschichte und -Klassifikation im Alpenvorland Oberschwabens sowie der Entwicklung von Lernmodulen mündete in folgende fachwissenschaftliche wie fachdidaktische Forschungsfragen:

1. *Ist es möglich, eine glazial geprägte Landschaft groß- bis mittelmaßstäbig mit semiautomatisierten OBTA-Methoden und einer geringen Zahl an Eingangsdaten im* Bottom-up-*Verfahren zu klassifizieren?*
2. *Welche qualitativen und räumlichen Unterschiede bestehen im Vergleich der Ergebnisse mit bereits existierenden, visuell-händisch vorgenommenen Klassifikationen für das Alpenvorland Oberschwabens?*
3. *Wie kann das OBTA-basierte Modell-Konzept auf schulische Lehr- und Lernsituationen übertragen und in der Praxis eingesetzt werden? Gelingt es auf dieser Grundlage Lernmodule zu entwickeln, die mit Hilfe ähnlicher Parameter und Methoden Kenntnisse über Landformen und Landschaften des Untersuchungsgebiets vermitteln?*

1.2 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit besteht inhaltlich aus zwei Teilen. Im fachwissenschaftlichen Teil geht es um die geomorphologisch basierte, semiautomatisierte Modellierung von Landformen und (Teil-)Landschaften im Untersuchungsgebiet. Dieser stellt den Hauptfokus der Arbeit dar, es werden die ersten beiden Forschungsfragen beantwortet. Der fachwissenschaftliche Teil ist in drei Kapitel gegliedert: 2. Theorie, 3. Empirie und 4. Ergebnisse.

Im zweiten Teil geht es anschließend um fachdidaktische Fragen hinsichtlich der Übertragung von Methoden aus dem fachwissenschaftlichen Teil in den schulischen Kontext. Dabei spielt die Nutzung von bereits im ersten Teil der Arbeit eingesetzten Digitalen Geländemodellen (DGM) zur Entwicklung von Lernmodulen die Hauptrolle. Ziel ist die Vermittlung von Kenntnissen zu Landformen und Landschaften sowie deren Zusammenhängen. Das 5. Kapitel dreht sich um Forschungsfrage drei: Es werden das BaWü-GIS und zwei

Lernmodule für unterschiedliche Klassenstufen vorgestellt. Im Anhang befinden sich sämtliche zugehörige Materialien und Arbeitsblätter.

In Kapitel 6 werden alle Ergebnisse und Schlussfolgerungen zusammengefasst, mögliche Anwendungsbereiche der hiesigen Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick über potenzielle Anschlussstudien geliefert.

Kapitel 7 enthält das Literaturverzeichnis.

Der Anhang schließt neben den oben genannten Materialien weitere Tabellen und Übersichten zur hiesigen Arbeit sowie sämtliche Materialien und Arbeitsblätter, von denen in Kapitel 5 die Rede ist, mit ein.

2 Theorie: Grundlagen und Forschungsstand

In diesem Kapitel wird zunächst das Untersuchungsgebiet vorgestellt. Anschließend folgt die Erläuterung der Forschungsfelder Landschaftsklassifikation und Geomorphometrie sowie der eingesetzten Methoden der objektbasierten Geländeanalyse.

2.1 Geographie des Untersuchungsgebiets

Im Folgenden werden zunächst die räumliche Abgrenzung und humangeographische Grundlagen erläutert. Als nächstes werden die glaziale Landschaftsgeschichte, der geologische Untergrund, die Hauptflusssysteme sowie die Landformen und landschaftliche Gliederung des Untersuchungsgebiets vorgestellt.

2.1.1 Räumliche Abgrenzung und humangeographische Grundlagen

Der untersuchte Raum liegt im Südosten Baden-Württembergs und befindet sich im Regierungsbezirk Tübingen. Er umfasst den Großteil des Gebiets des Regionalverbands Bodensee-Oberschwaben (RVBO), welcher derzeit ca. 620 000 Einwohner (EW) aufweist und sich aus den Landkreisen Bodenseekreis, Ravensburg und Sigmaringen zusammensetzt (vgl. RVBO 2021). Die größten Siedlungen im Untersuchungsraum (Stand 2020) sind Friedrichshafen (ca. 62 000 EW), Ravensburg (ca. 51 000 EW), Wangen i. A. (ca. 27 000 EW), Weingarten (ca. 25 000 EW) und Überlingen (ca. 23 000 EW). Das Gros der Einwohner konzentriert sich im mittleren Teil (Schussenbecken).

Der Landkreis Sigmaringen umfasst im Nordwesten auch einen signifikanten Anteil an der Schwäbischen Alb, welche landschaftsgeschichtlich nicht zum glazial geprägten Alpenvorland zählt. In dieser Arbeit wurde daher dieser ca. 500 km² Teil umfassende nicht berücksichtigt, sodass sich der Untersuchungsraum auf eine Fläche von gut 3 000 km² (genau: 3 033,36 km²) erstreckt. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit, welche an politische Grenzen gebunden ist, bezieht sich die hiesige Untersuchung ausschließlich auf das oben abgegrenzte Gebiet in Baden-Württemberg[3].

Dieses ist heute großflächig landwirtschaftlich geprägt und im Vergleich zum restlichen Baden-Württemberg relativ dünn besiedelt (vgl. GEBHARDT 2008: 307f.). Der Bodenseekreis mit seinem ausgeglichenen Klima zeichnet sich durch den Anbau von Sonderkulturen wie Tafelobst (z.B. Äpfel, Birnen, Kirschen und Zwetschgen), Wein, Hopfen und Spargel aus (GEBHARDT 2008: 308f., GEYER & GWINNER 2011: 20). Die nördlich angrenzenden Land-

[3] Für künftige Analysen wäre die Erweiterung des Untersuchungsgebiets um den nördlich angrenzenden Raum des Landkreises Biberach bzw. um das westliche bayrische Alpenvorland interessant.

kreise Ravensburg und Sigmaringen weisen dagegen eine stärkere ackerbauliche Nutzung auf. Im Ostteil des Untersuchungsgebiets, einem Teil des Westallgäus, dominiert die Grünlandwirtschaft mit Viehhaltung (GEBHARDT 2008: 308).

Desweiteren wurden und werden im Untersuchungsgebiet Rohstoffe gewonnen. Dazu zählen der Abbau von Kiesen und Sanden an den glazial geprägten Schotterebenen, die im südlichen Oberschwaben verschiedenorts vorkommen (LGRB 2011: 253). Als eines von drei hydrogeologisch relevanten Gebieten Baden-Württembergs stellt das Oberschwäbische Alpenvorland eine wichtige Region zur Grundwassergewinnung dar (vgl. GEYER & GWINNER 2011: 475, 494ff.). Ein Teil des Grundwassers wird als Thermalwasser in Thermen verwendet, Beispiele hierfür sind Bad Waldsee, Bad Buchau, Biberach, Überlingen oder Aulendorf (ebd.:501, LGRB 2011: 278). Fossile Energieträger wurden in der Vergangenheit in Form von Torf als Brennstoff aus den zahlreichen Mooren im südlichen Untersuchungsgebiet abgebaut (ebd.: 473). Zwischen 1949 und 1997 wurde im Untersuchungsgebiet (z.B. im Raum Pfullendorf-Ostrach und Fronhofen-Ilmensee) Erdöllagerstätten erschlossen und ausgebeutet (LGRB 2011: 258f.).

Im Untersuchungsgebiet existieren einige bedeutende industrielle Zentren in Klein- und Mittelstädten, welche vor allem in den Bereichen Antriebs- und Fahrwerktechnik (Friedrichshafen), Automobilzulieferung (Friedrichshafen, Markdorf), Maschinenbau (Ravensburg, Biberach), Sonderfahrzeugen (Wohnmobile in Bad Waldsee und Isny) sowie Luft- und Raumfahrt-/Wehrtechnik (Immenstaad, Friedrichshafen; Überlingen) beheimatet sind und eine hohe Innovationskraft aufweisen (vgl. GEBHARD 2008: 141f., RVBO 2021). Die Mehrheit der Arbeitsplätze der Region konzentriert sich im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets. Nicht zuletzt ist der Tourismus in der Region Bodensee-Oberschwaben ein bedeutsamer Wirtschaftsfaktor. Der hohe Freizeitwert des Bodensees und der nahegelegenen Alpen sowie die traditionsreiche Kultur des Alpenvorlands ziehen jährlich mehrere Millionen Sommer- und Winter-Touristen an[4].

Auf die Zusammenhänge zwischen Landnutzung und den in dieser Arbeit klassifizierten Landschaften wird in Kapitel 4.3 eingegangen. In *Abb. 1* wird eine Übersicht des Untersuchungsgebiets in Form einer Reliefkarte mit wichtigen Basisdaten gezeigt.

19[4] Das Statistik-Portal für Baden-Württemberg verzeichnet für die Landkreise des RBVO für 2019 über 6,9 Mio. Übernachtungen (https://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2020037, Zugriff: 16.6.2020).

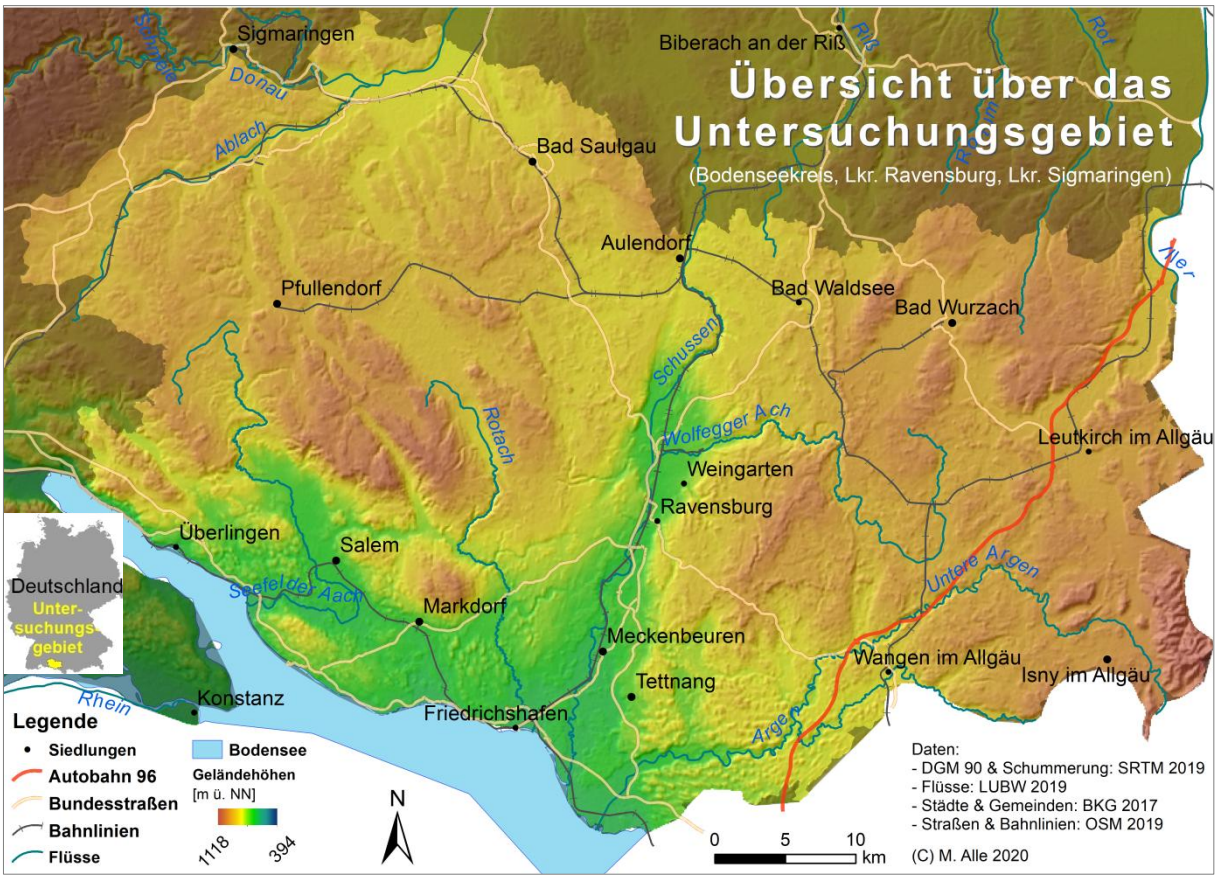


Abb. 1: **Reliefkarte des Untersuchungsgebiets.**
Bereiche außerhalb werden dunkler dargestellt.
Weiter abgebildet sind Siedlungen > 10 000 EW, wichtige Flüsse > 30 km und wichtige Verkehrswege. Die kleine Karte zeigt die Lage des Untersuchungsgebiets innerhalb Deutschlands.

2.1.2 Kurzer Abriss der glazialen Landschaftsgeschichte

Die heutige Landschaft des Untersuchungsgebiets ist das Ergebnis des Wirkens mehrerer Kaltzeiten. Während all diesen stieß der Rheingletscher als größter Vorlandgletscher der Alpen mehrfach weit nach Norden in deren Vorland, teilweise sogar über die Donau bis zum Südrand der Schwäbischen Alb, vor (ELLWANGER et al. 2011, LGRB BW 2011: 171, GEYER & GWINNER 2011: 370, 393f., SEYFRIED et al. 2019: 281).

Diese Vorgänge fallen zeitlich in das *Quartär*, dem jüngsten und bis heute andauernden Erdzeitalter. Es begann vor ca. 2,58 Millionen Jahren (künftig: a) und ist in zwei Hauptepochen gegliedert (LGRB BW 2011: 167):

1. Das ***Pleistozän***, auch als „Eiszeitalter“ bezeichnet, welches durch längere Kaltzeiten (Glaziale) und kürzere Warmzeiten (Interglaziale) gekennzeichnet wird. Es nimmt die längste Periode ein und endete vor ca. 11 700-11 500 a.
2. Das darauffolgende, bis heute andauernde ***Holozän*** (die sogenannte „Nacheiszeit“).

Mittlerweile wird von mindestens sieben eigenständigen Vereisungsphasen bzw. Kaltzeiten innerhalb des Pleistozäns ausgegangen (LGRB BW 2011: 182). Die vier ältesten (*Biber*, *Donau*, *Günz*, *Haslach / Mindel*; vgl. ebd.) sind heute lediglich über Deckenschotter nachzuvollziehen und spielen für die hiesige Arbeit eine untergeordnete Rolle.

Die drei jüngsten Vorlandvergletscherungen (*Hoßkirch*-, *Riß*- und *Würm*-Komplex) mit jeweils zwei großen Gletschervorstößen (ELLWANGER et al. 2011: 311, 315; LGRB BW 2011: 176; GEYER & GWINNER 2011: 393f.) sind von größerer aktueller Bedeutung. Die Riß- und vor allem die Würm-Vereisungen prägen die heutige Gestalt der Landoberfläche wie auch den lithologischen Untergrund (vgl. *Abb. 2*). Für die Würmzeit sind für den Rheingletscher zwei Eisfächer auszumachen: den größeren Schussen-Lobus im Westen und den kleineren Argen-Lobus direkt im Osten anschließend (SEYFRIED et al. 2019: 286, 307). Der vom Bodensee ausgehende, gestufte Aufbau der Landschaft, wird in der Fachliteratur mit einem nach Süden geöffneten Amphitheater verglichen (ELLWANGER et al. 2011: 306, LGRB BW 2015: 5ff.). Das rührt daher, dass die Eisvorstöße der letzten drei Kaltzeiten immer weniger weit nach Norden vordrangen und die vorhandenen Becken weiter übertieften.

Der ***Würm***-Komplex im Oberpleistozän dauerte gut 100 000 a (ca. 115 000 / 110 000-11 500 / 11 700 a vor heute, künftig BP). Er lässt sich in drei große Abschnitte einteilen: das Früh-, Hoch- und Spätwürm (KRAYSS & KELLER 1987: 172f., KRAYSS & KELLER 1996: 115f., EBERLE et al. 2010: 110). Eine (mehrphasige) Vergletscherung des Alpenvorlands fand nur im ca. 7 000 a währenden Hochwürm (ca. 25 000-18 000 a BP) statt. Der würmzeitliche Maximalstand der Vorlandvereisung wurde „zwischen 20 000 und 19 000“ a BP erreicht (KRAYSS & KELLER 1996: 116, GEYER & GWINNER 2011: 395). Hier betrug die Eismächtigkeit bei Friedrichshafen ca. 600 m (SEYFRIED et al. 2019: 282) und bei Bregenz ca. 800 m (SCHLÜCHTER 2009). Das Spätglazial endet mit der jüngeren Tundrenzeit (≙ Jüngere Dryas), einer letzten nennenswerten Kaltphase vor ca. 11 700-11 500 a (vgl. EBERLE et al. 2010: 110f., LGRB BW 2011: 166f.).

Während der über teilweise mehrere Zehntausende Jahre andauernden Glaziale lag die mittlere Jahrestemperatur auf der Nordhalbkugel deutlich tiefer als heute. Zur Zeit des Würm-Maximums, lag diese um mindestens 4-7 K tiefer als heute (LGRB BW 2011: 168) andere Autoren gehen sogar von bis zu 10 K und darüber aus (KRAYSS & KELLER 1996: 116). Infolgedessen sank in diesem Zeitraum die permanente Schneegrenze in den Voralpen deutlich unter 1 000 m ü. NN (ebd.). Als Folge breiteten sich die Vorlandgletscher weiter aus. In diesem Zeitraum waren ca. 32% der Erdoberfläche von Eis bedeckt, während es heute weniger als 10% sind (BAHLBURG & BREITKREUZ 2008) – mit weiter schwindender Tendenz.

Die letzte große Vergletscherungsphase innerhalb des Würm-Komplexes hatte mit weniger als 10.000 a (25 000-16 000 / 15 000 a BP) eine recht kurze Dauer. Die beiden hier ent-

standenen Endmoränenwälle – sozusagen die Grenzlinien der weitesten Eisvorstöße – haben im Gegensatz zu denen von Riß und Hoßkirch einen großen Abstand zueinander (LGRB BW 2011: 176). Sie werden als *Außenwallwürm* (Äußere Würmendmoräne, AeWEM; entstanden ca. 20 000 a BP, entspricht dem sog. Schaffhausener Stadium) und *Innenwallwürm* (Innere Würmendmoräne, IWEM; entstanden etwa 18 000 a BP, entspricht dem sog. Singener Stadium) bezeichnet (KRAYSS & KELLER 1987: 171f., LGRB BW 2011: 181, GEYER & GWINNER 2011: 395). Die letzten Eisreste hielten sich im Bodenseebecken bis ca. 14 000 a BP (DONGUS 2000: 162).

Tab. 1: **Gliederung der quartären Kaltzeiten im Untersuchungsgebiet**
(nach KRAYSS & KELLER 1996: 115f.; DONGUS 2000; EBERLE et al. 2010: 81, 90; LGRB BW 2011: 182; LGRB BW 2015: 5ff.; Seyfried et al. 2019:278ff.)
*Das Oberpleistozän endet mit den Phasen der Älteren und Jüngeren Dryas mit der dazwischen eingeschalteten Allerød-Zeit im Gesamtzeitraum von ca. 13,54-11,5/11,7 ka BP.
(ka = 1 000 Jahre, Ma = Millionen Jahre, BP = vor heute). *Hinweis: Zeitskala ist nicht linear!*

Chrono-stratigraphische Einheiten	**Litho-stratigraphische Einheiten**	**Morpho-stratigraphische Einheiten**	**Moränenstände**	**Start jeweils ka bzw. (Ma) BP**
Holozän	Jüngste Sedimente	Post-Würm	--	11,5 / 11,7
Oberpleistozän*	Hasenweiler-Fm	Würm-Komplex	▪ Konstanzer Stadium ▪ Innenwall-Würm (IWEM) (= Singener Stadium)	15 17,5
	Illmensee-Fm (Kißlegg-Sfm)		▪ Außenwall-Würm (AeWEM) (= Schaffhausener St.)	20 / 25
Mittelpleistozän	Illmensee-Fm (Dürmentingen-Sfm) (Scholterhaus-Sfm)	Riß-Komplex	▪ Innenwall-Riß ▪ Außenwall-Riß …	150 400/415
	Steinental-Fm (Steinhausen-Sfm)	Hoßkirch-Komplex	▪ Innenwall-Hoßkirch ▪ Außenwall-Hoßkirch …	(0,781)
Unterpleistozän	Jüngere Deckenschotter	Mindel-Komplex Haslach-Komplex	Tiefere Deckenschotter	
	Ältere Deckenschotter	Günzkomplex		(1,8)
	…	Donaukomplex		(2,58)

In jüngerer Zeit spielen in der Quatärgeologie Baden-Württembergs neben Terrassen und glazialen Ablagerungen (Tills, Erläuterung siehe Kapitel 2.1.3) auch glazial entstandene Becken eine entscheidende Rolle (LGRB BW 2015: 5). Das Untersuchungsgebiet wird durch große und kleine Becken geprägt. Diese wurden durch subglaziale Schmelzwässer übertieft und „greifen treppenförmig ineinander" (ELLWANGER et al. 2011: 306). Das markanteste ist das Bodensee-(Stamm-)Becken, welches sich nach Nordwesten ins Salemer Becken und fast 30 km nach Norden ins Schussenbecken verzweigt. Weitere Becken wie z.B. das Wilhelmsdorfer oder das Isnyer Becken schließen sich an. Dadurch unterscheidet sich das Untersuchungsgebiet deutlich von anderen Regionen im nördlichen Alpenvorland wie beispielsweise dem Bayrischen. Dort konzentrieren sich die Becken auf den unmittelbaren Alpenrand, die übrige Landschaft wird von großen Schmelzwasserrinnen geprägt (ELLWANGER et al. 2011: 309). Insgesamt lassen sich drei Beckengenerationen nachweisen, welche mit den drei jüngsten Kaltzeit-Komplexen korrespondieren (LGRB BW 2015: 6).

In *Tab. 1* wird ein Gesamtüberblick über die Abfolge und Gliederung der quartären Kaltzeiten im Voralpenland Oberschwabens gegeben.

2.1.3 Geologischer Untergrund

In den letzten Jahren fand in der geologischen Gliederung Baden-Württembergs ein Umbruch statt. Dem traditionellen chrono- bzw. morpho-stratigraphische System wurde die für Baden-Württemberg entwickelte lithostratigraphische Einteilung zur Seite gestellt (ELLWANGER et al. 2011).

Ersteres basiert auf PENCK & BRÜCKNERs (1901-1909) Theorien zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Es verknüpft die „Schmelzwasserablagerungen [der regionalen Flüsse Günz, Mindel, Riß und Würm] mit den Endmoränenwällen der Eisvorstöße" (GEYER & GWINNER 2011: 394). In der heutigen Landschaft des Untersuchungsgebiets lässt sich dieses Modell der *Glazialen Serie* als Abfolge von Transport- und Ablagerungsprozessen grundsätzlich gut nachvollziehen. Auf die subglazial gebildeten Till-Landformen und (Zungen-)Becken folgt in nördlicher Richtung der (Haupt-)Endmoränenwall, der ebenfalls aus Till besteht. An Gletschertoren durchbrachen Schmelzwässer die Endmoräne und transportierten die Geschiebe über schwach geneigte Schotterebenen (die sog. *Sander*) ins Gletschervorland. Dabei sortierten sich die Materialen mit zunehmendem Abstand vom Eisrand von grob nach fein (KRAYSS & KELLER 1996: 118).

Die klassische Einteilung ergibt im Untersuchungsgebiet jedoch folgendes Problem: Die mittelpleistozänen Ablagerungen der drittletzten großen Vereisungsphasen (ursprünglich *mindel*zeitlich) weisen „ein erheblich anderes Alter als jene im bayrischen Alpenvorland" auf (GEYER & GWINNER 2011: 394). Folglich ergibt sich für das Untersuchungsgebiet in die-

sem Zeitraum eine weitere Kaltzeit im Mittelpleistozän: der *Hoßkirch*-Komplex (ELLWANGER 2003, ELLWANGER et al. 2011: 313).

Im *lithostratigraphischen System* wird das Untersuchungsgebiet ab dem Mittelpleistozän (ca. -0,78 Mio. a BP) nach sedimentologischen Gesichtspunkten in sog. lithologischen Formationen gegliedert. Dabei sind für die Ablagerungen des Untersuchungsgebiets vor allem die beiden jüngsten (*Ilmensee*- und *Hasenweiler*-Formation) von Bedeutung, welche die Sedimente vom Innenwall-Riß bis zum Innenwall-Würm umfassen (GEYER & GWINNER 2011: 396).

Für die vorliegende Arbeit wurden die morphologisch stärker fassbaren, traditionellen *klima*- bzw. *chronostratigraphischen* Einheiten herangezogen (vgl. SEYFRIED et al 2019).

Grundsätzlich lassen sich fünf Hauptsedimentarten im Untersuchungsgebiet unterscheiden (vgl. LGRB BW 2011: 172f). Diese lauten in umgekehrter zeitlicher Reihenfolge (≙ jung → alt):

- ***Tills*** *(aus Diamikten),*
- ***Schmelzwasserschotter****,*
- ***Beckensedimente****,*
- ***Torf****,*
- ***Molasse*** *(= hauptsächlich Sande und Kiese, vereinzelt auch Feinsedimente).*

In *Abb. 2* wird die räumliche Verteilung dieser Sedimente im Untersuchungsgebiet dargestellt. Dabei sind dort, wo sich Fließerden ausgebildet haben, neben den oben genannten Hauptsedimenten, auch periglazial überprägte Bereiche verortet. Diese konzentrieren sich ausschließlich auf das sog. Altmoränenland (AML) und kommen hauptsächlich im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets vor.

Im Folgenden werden die Charakteristik und die räumliche Verteilung der Sedimente erläutert.

Das von den Eismassen erodierte und nach deren Rückzug abgelagerte Gesteinsmaterial ist eine der prägenden Formationen im Untersuchungsgebiet. Diese Sedimente bestehen hauptsächlich aus Diamikten, also unverfestigte, kaum sortierte und uneinheitlich geschichtete Sedimente auf toniger oder schluffiger Basis. In der Stratigraphie werden diese glazialen Ablagerungen häufig als *Moränenmaterial* bezeichnet (BAUMHAUER & WINKLER 2014: 95f.). Im englischsprachigen Raum haben sich **Till** oder schlicht *Debris* (eng. = Trümmer, Schutt) durchgesetzt (ebd.). In dieser Arbeit wird im Weiteren der international übliche Begriff „*Till*“ für glaziale Moränensedimente (LGRB BW 2011, 2015; ZÖLLER 2017; BÖSE et al. 2018: 81, SEYFRIED et al. 2019: 285) verwendet.

Till entsteht durch die direkte, erosive Einwirkung des Gletschereises auf den Untergrund. Das abgetragene und von den Gletschern ins Alpenvorland transportierte Material wurde schließlich dort abgelagert. Till besteht charakteristisch aus gerundeten wie kantigen (angularen), unsortierten Partikeln (EBERLE et al. 2010: 98, LGRB BW 2011: 172). Diese weisen unterschiedliche Korngrößen auf, von Ton, Schluff, Sand und Kies bis hin zu hausgroßen Blöcken (BAUMHAUER & WINKLER 2014: 97ff., BÖSE et al. 2018: 81).

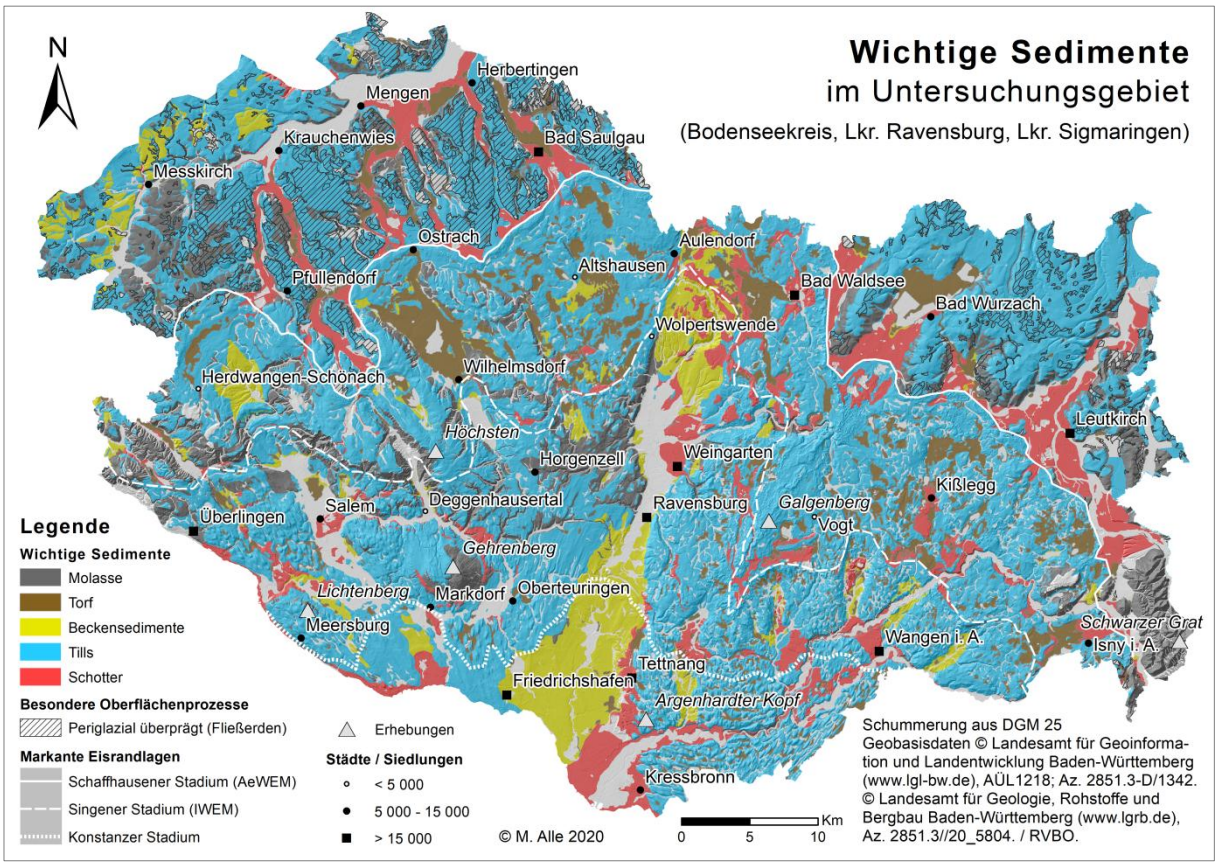


Abb. 2: **Wichtige Sedimente im Untersuchungsgebiet**.
Entnommen und zusammen gefasst aus der GK 50, Geobasisdaten © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (www.LGRB BW-bw.de), bereitgestellt durch den RVBO. Zur leichteren Orientierung wurden Siedlungen und Erhebungen sowie die drei wichtigsten Eisrandlagen des Würmglazials hinzugefügt.

Im Untersuchungsgebiet kommen Tills sowohl südlich der AeWEM, im sog. Jungmoränenland (JML) als auch nördlich der AeWEM, im AML vor (GEYER & GWINNER 2011: 395). Im JML bilden sie die Grundlage für die weitverbreiteten *Till-Landschaften*. Dabei handelt es sich um kuppig-hügelige und flachwellige Landschaften. Letztere wurden im AML periglazial überprägt. Sie bilden heute verbreitet *flachwellige Till-Landschaften*, die häufig von Fließerden bedeckt sind (EBERLE et al. 2010: 98f., SEYFRIED et al 2019: 314f, 319). Seit Beginn des Holozäns werden alle Till-Landschaften des Untersuchungsgebiets postglazial erodiert und umgeformt.

Schmelzwasserschotter bestehen meist aus sandigen Kiesen (BAUMHAUER & WINKLER 2014: 110), welche von Gletscherflüssen häufig an Gletschertoren vor Endmoränenwällen abgelagert wurden (SEYFRIED et al. 2019: 314). Sie entstanden aus glazialem Abtragungsschutt, der fluvial weitertransportiert wurde (LGRB BW 2011: 173).

Im Untersuchungsgebiet kommen sie sowohl an Durchbrüchen der AeWEM wie z.B. bei Pfullendorf, Ostrach, Bad Saulgau, im südlichen Wurzacher Becken und bei Leutkirch vor (vgl. z.B. DONGUS 1991: 38, 54; KRAYSS & KELLER 1996: 119, SEYFRIED et al. 2019: 314 sowie *Abb. 2*) vor. Eine ähnliche Situation ergibt sich bei den Durchbrüchen der IWEM und weiter südlich gelegenen Sedimentablagerungen an Eisrückzugsstadien (z.B. dem Konstanzer Stadium). Beispiele hierfür sind Schotterflachen südlich von Aulendorf, südlich von Kißlegg oder nordöstlich von Tettnang. In ehemaligen Umfließungsrinnen wie westlich von Tettnang und bei Wangen i. A. befinden sich Schotterterrassen (DONGUS 1991: 33, 47). Die oberflächlich anstehenden Kiese und Sande bilden wichtige Rohstoffquellen und werden häufig wirtschaftlich genutzt. So befinden sich häufig Kiesgruben auf dem Gebiet der Schotterebenen.

Beckensedimente weisen im Vergleich zu Schotterebenen sehr viel feinere Korngrößen auf, die hauptsächlich glazilakustrin, also während glazialen Ruhephasen in Eisrandstauseen, gebildet wurden (LGRB BW 2011: 177, BAUMHAUER & WINKLER 2014: 111). In den meisten Becken bildeten sich auf den kaum wasserdurchlässigen Beckensedimenten Moorflächen, sodass jene heute nur noch an einigen Standorten oberflächlich anstehen. Der nördliche Rand des Mittleren Schussenbeckens (DONGUS 1991: 32), große Teile des Unteren Schussenbeckens (Ebd.: 32) sowie das kleine Herdwangen-Schönacher Becken (bei BENZING 1964: 18 „Selgetweiler-Aach-Linzer Moorsenke“) sind gute Beispiele hierfür.

Im Oberschwäbischen Alpenvorland befinden sich mit großem Abstand die meisten (ca. 90%) und größten Moorgebiete Baden-Württembergs (vgl. OP 2020 / Moormodul). Das Pfrunger Ried im Wilhelmsdorfer Becken und das Wurzacher Ried im gleichnamigen Becken stellen die größten Moorflächen des Untersuchungsgebiets dar[5].

Moore bestehen aus **Torf**-Sedimenten, welche ursprünglich aus abgestorbenen Pflanzenresten gebildet wurden. Die heutigen Moorflächen entstanden während und nach den Gletscherrückzugsphasen des Würmglazials. Zunächst bildeten sich in abflusslosen Hohlformen unter dem stetigen Zufluss von Niederschlags- und Schmelzwasser große Seen (SACH 2007: 2, EBERLE et al. 2010: 132, 135f.). Aufgrund lakustriner Feinsedimente am Seegrund bestand hier eine schlechte Drainage, weswegen das Wasser unterirdisch kaum abfließen konnte (EBERLE et al. 2010: 114). Mit der Zeit versiegte der Wasserzufluss langsam

[5] Ebenfalls in Oberschwaben, jedoch außerhalb des Untersuchungsgebiets liegt das Federseemoor, welches die Liste der größten Moore Oberschwabens komplettiert.

bei gleichzeitig stetigem Sedimenteintrag (Schotter und andere fluviale Sedimente). Dabei sammelte sich abgestorbenes organisches Material an. So verlandeten die meisten der in den Kaltzeiten entstandenen Seen bis heute und es bildeten sich Moorflächen (SACH 2007: 2, LGRB BW 2011: 181, OP 2020 / Moormodul).

Im Untersuchungsgebiet existieren heute drei Moortypen, welche im Folgenden, chronologisch geordnet, kurz erläutert werden. Beim jüngsten Typ handelt es sich um ***Junge Moorbildungen***, bei denen durch langanhaltenden Wasserüberschuss und damit verbundenen Sauerstoffmangel Bedingungen herrschten, die zur teilweisen Akkumulation von organischem Material (> 30 Masse-Prozent) führten. Darauf folgen die ***Niedermoore***, welche durch einen hohen Grundwasserspiegel und die damit verbundenen anaeroben Prozesse über einen deutlich längeren Zeitraum gebildet wurden (vgl. SACH 2007: 2). ***Hochmoore*** bilden den dritten und ältesten Moortyp. Sie entwickelten sich aus Niedermooren, werden aber im Gegensatz zu diesen heute nur noch vom Niederschlagswasser gespeist. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Wurzacher Ried als heute größtes intaktes Hochmoor Mitteleuropas.

Diese sogenannten Verlandungsmoore stellen den größten Teil der Torfflächen Oberschwabens dar (ebd.). Sie werden unterteilt in große und kleine Verlandungsmoore. Erster haben sich hauptsächlich in glazialen Becken gebildet. Die zahlreicheren, kleinen Verlandungsmoore bzw. Kesselmoore sind in der Regel Toteislöchern entstanden. Auch hier sammelte sich tonreiche, feinsedimentige Sedimente der Grundmoräne und dichtete den Boden nach unten ab, sodass sich anfangs kleine Seen bildeten, aus denen dann die Moore entstanden (EBERLE et al. 2010: 135). In den Senken kuppig-hügeliger Till-Landschaften entwickelten sich sogenannte Vernässungs- bzw. Versumpfungsmoore, wie z.B. im Hepbach-Leimbacher Ried, am nördlichen Rand des Markdorf-Teuringer Drumlinfelds (DONGUS 1991: 31f., OP 2020 / Moormodul). Hierbei handelt es sich um junge Moorbildungen.

Bei den **Molasse**sedimenten handelt es sich um die ältesten und mächtigsten Sedimentformationen im Untersuchungsgebiet. Sie wurden im Tertiär unter marinen wie fluviatilen Bedingungen als Abtragungsmaterial aus den Alpen im sog. großen Molassebecken[6] Süddeutschlands abgelagert (GEYER & GWINNER 2011: 367ff., EBERLE et al. 2010: 32ff., LGRB BW 2011: 125, LGRB BW 2015: 10, SEYFRIED et al. 2019: 24). Die Molassesedimente bestehen im Wesentlichen aus wenig verfestigten Ton-, Mergel-, Schluff- und Sandsteinen, teilweise mit verfestigten Konglomeraten (EBERLE et al. 2010: 35, LGRB BW 2011: 126). Das Material wird mit größerem Abstand zu den Alpen bzw. größerer Transportdistanz immer feinkörniger (LGRB BW 2015: 10).

[6] In der Fachliteratur wird dieses auch als Nordalpines Vorlandbecken bezeichnet (vgl. SEYFRIED et al. 2019: 24). In dieser Arbeit wird aufgrund der sprachlichen Verwandtschaft zum entsprechenden Sediment weiter der Begriff „Molassebecken“ verwendet.

Sie gliedern sich im Untersuchungsgebiet grob in drei aufeinanderfolgende Typen: Meeres-, Brackwasser- und Süßwassermolasse. Dieser Zyklus wiederholt sich einmal und wird mittels der Begriffe „untere …“ und „obere …“ unterschieden (GEYER & GWINNER 2011: 371)[7]. Aufgrund der Verkippung der Molassesedimente nach Südosten, steht im Untersuchungsgebiet hauptsächlich die Obere Süßwassermolasse an (GEYER & GWINNER 2011: 368f., LGRB BW 2011). Sie wird durch Flüsse angeschnitten und tritt z.B. in den Tälern von Oberer und Unterer Argen (bei Wangen i. A.) zutage (GEYER & GWINNER 2011: 370). Nur vereinzelt, z.B. südwestlich von Meßkirch und westlich von Sigmaringen, steht die Obere Brackwassermolasse oberflächlich an (ebd.).

Die Molassesedimente weisen bei Ravensburg eine Gesamtmächtigkeit von über 2000 m, im Bereich der Adelegg, im Südosten des Untersuchungsgebiets, sogar über 3500 m auf. Nach Norden hin nimmt diese jedoch kontinuierlich bis auf wenige Zehner Meter Restmächtigkeit im Bereich der Donau ab (LGRB BW 2011: 126, GEYER & GWINNER 2011: 370). Im Vergleich zu den glazialen und postglazialen Sedimenten Oberschwabens weisen sie häufig eine deutlich geringere Erodierbarkeit auf. Das führt dazu, dass scharf eingeschnittene Geländestufen im Untersuchungsgebiet häufig Molassehänge aufweisen.

Beispiele hierfür sind die steilen Kerbtäler bzw. Tobel im Südwesten des Untersuchungsgebiets an der markanten Geländestufe zum „Heiligenberg-Höchsten-Bergland“ (BENZING 1964: 18, DONGUS 1991: 27), sowie die Steilhänge am Ufer des Überlinger Sees zwischen Überlingen und Sipplingen oder das Meersburger Steilufer (HENNING 1923: 233). Der Gehrenberg ist nur an seinem Westhang mit Till bedeckt, in seinem Kern besteht er aus spätmiozäner Oberer Süßwassermolasse, die ansonsten auch oberflächig ansteht (DONGUS 1991: 43). Die Adelegg im Westallgäu ist ein Sonderfall. Bei ihr handelt es sich um eine Schichtstufe, die aus Nagelfluh, einem Teil der Oberen Süßwassermolasse besteht. Dieser setzt sich aus stark verbackenen, harten Konglomeraten und Mergeln in gröberer Fraktion zusammen (DONGUS 1991: 23, LGRB BW 2011: 131, GEYER & GWINNER 2011: 392). Hier fehlt die Till-Bedeckung völlig, da die Adelegg als Nunatak nicht von den pleistozänen Gletschern überfahren wurde und somit nicht der glazialen Erosion unterlag (DONGUS 1991: 23). Die Schichtstufe teilte die nach Norden vorstoßenden Eismassen in den Rheingletscher im Westen, der das Untersuchungsgebiet prägte, und den Iller-Lech-Gletscher im Osten, welcher das Bayerische Allgäu formte (DONGUS 1991: 23; DONGUS 2000: 160, 163).

[7] Eine Übersicht findet sich in EBERLE et al. (2010: 33), bei GEYER & GWINNER (2011: 371) sowie in LGRB BW (2011: 123).

2.1.4 Haupt-Flusssysteme

Die Fließgewässer des Untersuchungsgebiets entwässern in zwei große europäische Flusssysteme: das rhenanische zum Rhein (und schließlich in die Nordsee/Antlantik) oder das danubische zur Donau (und schließlich ins Schwarze Meer). Die unterschiedlichen Einzugsgebiete werden durch die Europäische Hauptwasserscheide (EWHS) getrennt. Diese stimmt über weite Strecken mit der AeWEM überein (Henning 1922: 258). Weiter weisen sowohl die Fließwege als auch die durchflossenen Täler unterschiedliche Formen auf. Diese Besonderheiten haben ihren Ursprung in der glazialen Landschaftsformung.

Das gesamte Untersuchungsgebiet entwässerte präglazial, vor ca. zwei Ma, nach Norden zur Ur-Donau hin (Krayss & Keller 1996: 113). Durch die im Pleistozän vorrückenden Eismassen des Rheingletschers wurde der südliche Teil Oberschwabens stark ausgeschürft und übertieft. Die glazialen Schmelzwässer flossen weiterhin relativ parallel und unverzweigt, nördlich zur Urdonau hin ab und haben ihren Verlauf bis heute größtenteils beibehalten.

Mit fortschreitendem Gletscherrückzug bildete sich im Süden des Alpenvorlands Oberschwabens sukzessive ein neues Gefälle hin zum Rhein aus, dem die Fließgewässer folgten. Während des Eiszerfalls formte sich hier ein teilweise komplexes Flusssystem (Krayss & Keller 1996: 127f.). Es entstand, als die Gletscherränder die nach Süden abfließenden Schmelzwässer wiederholt zu Richtungsänderungen nach Westen oder Osten zwangen. Erst mit weiter zurückweichenden Eismassen konnten die Fließgewässer wieder dem Gefälle der Landoberfläche nach Süden folgen. Die Wolfegger Ach sowie die Linzer Aach sind gute Beispiele für dieses Phänomen (vgl. Krayss & Keller 1996: 131, Schwab & Meiershofer 2015, Schwab 2018).

Als Talformen dominieren im Norden des Untersuchungsgebiets Kastentäler mit sehr gering geneigten Längsprofilen und niedrigen Fließgeschwindigkeiten. In der Regel handelt es sich hier um ehemalige Schmelzwasserrinnen. Im Süden, südlich der Europäischen Hauptwasserscheide (EHWS) bzw. der AeWEM wechseln sich flachere Bereiche in Becken und steilere Fließabschnitte ab. Letztere bilden steil eingeschnittene Kerbtäler (Tobel). Sie entstanden bei der Überwindung von großen Höhenunterschieden auf kurzer Distanz und befinden sich zwischen hochgelegenen (älteren) und tiefer gelegenen (jüngeren) Becken.

2.1.5 Landformen

Im Untersuchungsgebiet finden sich einige der typischen glazialen Landformen. Diese entstanden sowohl durch Erosion (Becken und Täler, Tobel, teilweise auch Grundmoränenformen) als auch durch Akkumulation (Grund- und Endmoränenformen aus Till).

Ebenfalls zu den Akkumulationsformen, allerdings bereits präglazial im Tertiär gebildet, zählen die Landformen des Molasse-Berglands.

Die aus Till bestehenden Landformen sind die häufigsten – sie bedecken zusammen fast 2/3 (62,87%) des Untersuchungsgebiets. Alle Landformen teilen sich in drei Oberkategorien auf: Vollformen (49,6%), Hohlformen (46,9%) und Ebenen (3,5%; Schotterebenen). Im Folgenden werden die Landformen daher in dieser Reihenfolge erläutert.

Kuppig-hügelige Till-Landformen

Von den im Untersuchungsgebiet auftretenden glazialen Landformen sind die *kuppig-hügeligen Till-Landformen* (darunter auch *Drumlins*) am häufigsten. Sie machen insgesamt 21,8% der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets und knapp die Hälfte (44%) der Vollformen aus. Zu diesen Landformen zählen vor allem einzeln erfassbare Vollformen aus Till mit einer jeweiligen Maximalfläche von 5-7 ha.

Ihre bekannteste Landform sind die oben erwähnten Drumlins. Hierbei handelt es sich um subglazial gebildete, hügelige Vollformen. Diese weisen eine charakteristische, asymmetrische Tropfenform auf (CLARK et al. 2009: 678). Sie bestehen aus bis zu 200 m mächtigen Tills (LGRB BW 2011: 175) und haben teilweise auch glazifluviale Schotteranteile (vgl. GLAVION et al. 2012). Im normalerweise „unauffällig[en]“ Bereich der Grundmoränenlandschaft (STRAHLER & STRAHLER 2005: 486) markieren Drumlins als markante Vollform einen Sonderfall. Sie kommen in einer Glaziallandschaft besonders häufig und gut ausgeprägt in den jüngsten Bereichen vor, da sie hier erst vergleichsweise kurz der postglazialen Erosion ausgesetzt sind. Ihre Form weist meist ein Längen-Breiten-Verhältnis von ca. 3 : 1 auf (vgl. CLARK et al. 2009: 677f., BENEDIKTSSON et al. 2016). Dabei zeigt ihre Gestalt eine enorme Variabilität, von kompakt über langgestreckt bis hin zu in der Landschaft kaum mehr wahrnehmbaren wellenförmigen Erhebungen. Letztere wurden in der hiesigen Arbeit als eigene Landform-Klasse ausgewiesen (vgl. nachfolgendes Kapitel *Flachwellige Till-Landformen*).

Bei *Abb. 3* handelt es sich um ein Luftbild von Martin GROLL aus dem Jahr 2009, das ein junges Drumlinfeld nördlich von Friedrichshafen (im Süden des Untersuchungsgebiets) zeigt. Dabei lassen sich gut die verschiedenen Landnutzungstypen erkennen (Wohnbebauung und landwirtschaftliche Nutzung, Bewaldung). Aus diesem Grund erwies sich die Landnutzung/Landbedeckung als Indikator für die Identifizierung von Drumlins bzw. *kuppig-hügeligen Till-Landformen* ungeeignet.

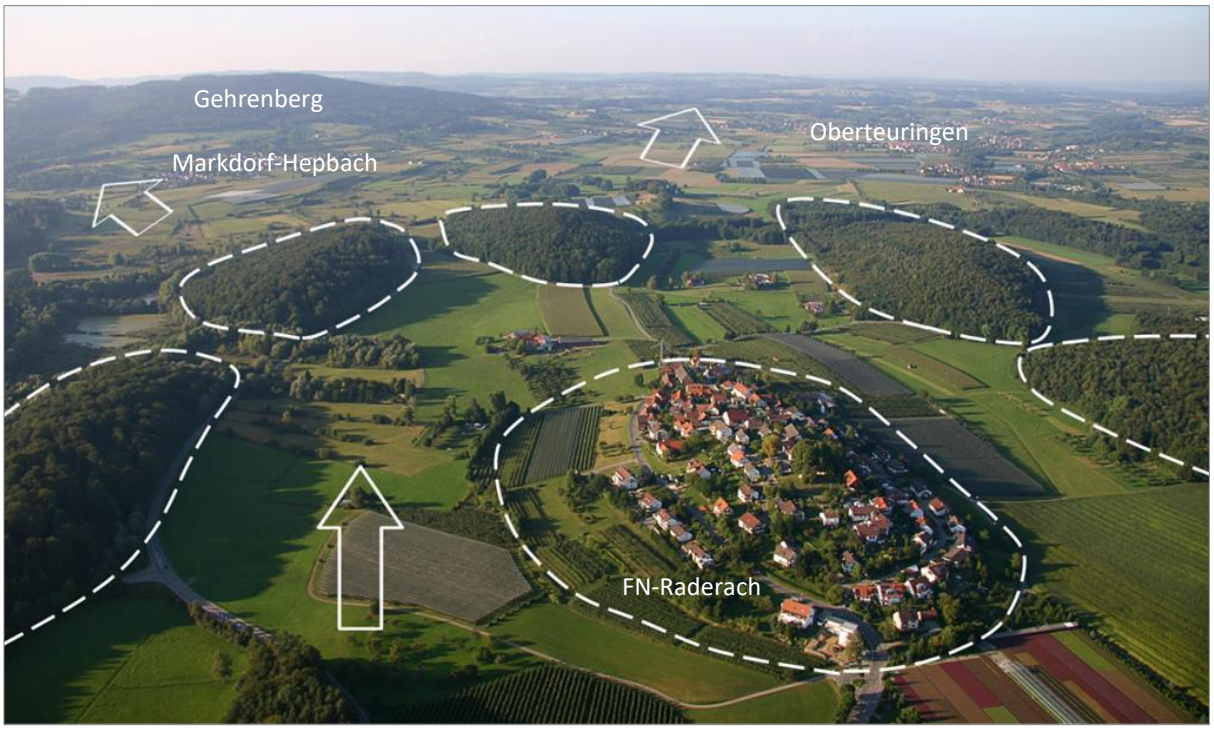


Abb. 3: **Drumlinfeld zwischen Markdorf und Oberteurigen**.
Im Hintergrund rechts liegt der Gehrenberg (754 m NN). Die Zwischenräume der Drumlins (Umrisse weiß, Höhe 25-40 m) bestehen häufig aus entwässerten, ehemaligen oder noch bestehenden Moorflächen (vgl. Mitte links). Bemerkenswert ist die unterschiedliche Landnutzung mit Forstwirtschaft, Wohnbebauung und Obstbau (Teilort FN-Raderach). Die Pfeile markieren die Gletscherstoßrichtung. Blickrichtung nach Norden. – von Martin Groll (2009) – Aufnahme aus dem Zeppelin NT, CC BY 3.0 de, verändert, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8161964. (Zugriff: 18.6.2020).

Der Begriff „Drumlin“ wurde erstmals 1833 in Schottland für besagte Glazialformen verwendet und bedeutet ursprünglich „kleiner Hügel“, „Höhenrücken“ (gaelisch *druim*; irisch *droimnín*) (Erb 1935: 30).

"Drumlins und ihre Sedimente zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein subglazial-aktives environment repräsentieren, ohne durch Eiszerfallsformen und entsprechende Sedimente überdeckt zu sein" (LGRB BW 2015: 29). „Die 'fehlenden' Sedimente und Formen des Eiszerfalls befinden sich in den lateral an die Drumlinfelder angrenzenden, subglazial übertieften Zweigbecken. Beide, Becken und Drumlinfelder, werden durch eine gemeinsame, oft unscheinbare Eisrandlage eingehüllt (im Rheingletschergebiet die Innere Jungendmoräne […]).“ (ebd.).

Obwohl es sich bei Drumlins um die wohl meist erforschten, glazialen Landformen überhaupt handelt (vgl. Clark et al. 2009, Johnson et al. 2010), ist deren Genese noch nicht abschließend geklärt (Glavion et al. 2012: 18, Eyles et al. 2016, Benediktsson et al. 2016). Feststeht, dass sie neben ihrem Hauptsedimentbestandteil Till teilweise auch Festgesteinskerne aufweisen können (Erb 1935 sowie Benn & Evans 2010, Stokes et al. 2012). Über die Bil-

dung von Drumlins existieren unterschiedliche Theorien, von denen sich in der jüngeren Zeit zwei durchgesetzt haben. Die eine besagt, Drumlins entstünden durch die lokale, subglaziale Deposition von Moränenmaterial (sogenannte ‚*emergent drumlins*', vgl. STOKES et al. 2013). Die andere betont, dass Drumlins als Produkte der subglazialen Erosion, quasi aus bereits bestehenden Sedimentstrukturen heraus präpariert würden (sog. ‚*remnant drumlins*' vgl. EYLES et al. 2016).

Jüngere Arbeiten, die sich mitunter auf aktive Drumlin-Bildungsprozesse beziehen, stützen die zweite Theorie und sprechen von einer Kombination aus Erosion und Deposition von Gletschermaterial (JOHNSON et al. 2010: 945, BENEDIKTSSON et al. 2016: 569). Als Basis für die Bildung von sogenannten „Proto-Drumlins", einer Vorform der eigentlichen Drumlins als niedrige, oval-runde Vollformen, verweisen JOHNSON et al. (2010: 945) auf das konzentrierte Auftreten von Gletscherspalten. Unter diesen findet eine größere Till-Akkumulation als Grundlage für die Proto-Drumlins statt. Während aktiven Eisvorstößen (JOHNSON et al. 2010: 945) setzt sich die Formung dieser zu „echten" Drumlins durch die oben genannten Prozesse in Form von sich positiv verstärkenden Rückkopplungen fort (BENEDIKTSSON et al. 2016: 580).

Bei der subglazialen Formung von Drumlins ist neben dem Eis auch Schmelzwasser beteiligt. Dieses fließt zwischen den Rücken subglazial ab und schärft so die Form der entstehenden Drumlins (ERB 1935: 31). Südlich des Gehrenbergs spaltete sich der Teillobus des Rheingletschers subglazial (vgl. *Abb. 3*). Dabei entstanden Gletscherspalten, welche die Drumlinbildung in diesem Bereich begünstigten.

Studien zu einem der wenigen rezenten Drumlinfelder, am Múlajökull-Gletscher in Island (JOHNSON et al. 2010, BENEDIKTSSON et al. 2016, HILLIER et al. 2018), zeigen, dass bereits diese jungen, sich noch entwickelnden Drumlins verschiedene Formen annehmen können. Dabei weisen „more developed" Drumlins (BENEDIKTSSON et al. 2016: 577), die mehrfach vom Gletscher überfahren wurden, in ihrer Gestalt deutlich länger und schmaler sowie höher sind als weniger entwickelte (JOHNSON et al. 2010: 946, MACLAHAN & EYLES 2013, BENEDIKTSSON et al. 2016: 571, 579). Die isländischen Forscher wiesen nach, dass Drumlins durch glaziale Mehrfachüberprägung an den Seiten subglazial durch Schmelzwässer erodiert wurden, worin sie ERBs These von 1935 (Ebd.: 30f.) bestätigen. Gleichzeitig wurde auf ihrer Oberfläche mit jedem Gletschervorstoß eine weitere Till-Schicht sedimentiert (BENEDIKTSSON et al. 2016: 578f.).

Aus der oben genannten Kombination von Erosion und Deposition leitet das von BENEDIKTSSON et al. (2016) entwickelte Drumlin-Modell ein *vom-Gletscherrand-Wegwandern* der Drumlins ab. EYLES et al. (2016) zeigen anschaulich, wie sich die Form von Drumlins mit der Fließgeschwindigkeit des Gletschereises von eher tropfenförmig-kompakt zu langgestreckt bis nadelförmig verändert. Im Untersuchungsgebiet findet sich eine große Band-

breite von *kuppig-hügeligen Till-Landformen*, darunter auch Drumlin-Formen. Sie reicht von den tropfenförmigen, kompakten Drumlins in Bodenseenähe (westlich und östlich des Schussenbeckens) bis hin zu langgestreckten Till-Landformen am westlichen Rand des Schussenbeckens (BECKENBACH et al. 2014: 124f., BECKENBACH 2016: 67f.). Je weiter nördlich sich die Till-Landformen sich befinden, desto flacher und unscheinbarer werden sie.

Flachwellige Till-Landformen

Noch großflächiger als die *kuppig-hügeligen*, treten im Untersuchungsgebiet *flachwellige Till-Landformen* auf. Sie bedecken 39,1% der Gesamtfläche und machen gut 2/3 (64,23%) der Till-Landformen aus.

Flachwellige Till-Landformen treten erst ab einem Abstand von ca. 15 km zum Bodensee-Ufer gehäufter und großflächiger auf bis sie in der Altmoränenlandschaft gut 96% (95,73%) aller Till-Landformen ausmachen. Ausnahmen bilden die Westflanke des Gehrenbergs und der Uferbereich um Unteruhldigen in direkter Seenähe.

Zur Bildung *flachwelliger Till-Landformer* mit ihren charakteristischen geringen Reliefunterschieden trugen hauptsächlich periglaziale Solifluktionsprozesse während des Würmglazials bei (HUTTENLOCHER 1959: 5, BECKENBACH et al. 2014: 112). Sie fanden zuerst in den nicht vergletscherten Bereichen, außerhalb der AeWEM statt. Mit dem sukzessiven Rückzug der Eismassen in Richtung der Alpen waren im Spätwürm auch weiter südlich gelegene Bereiche von Solifluktion betroffen. Die Geologische Karte 1 : 50 000 (GK 50) des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB BW BW) spricht in der Altmoränenlandschaft in diesem Zusammenhang von „Fließerden“ (vgl. auch EBERLE et al. 2010: 98f.). Auch in der Jungmoränenlandschaft, z.B. um Horgenzell, um Kißlegg sowie östlich von Herdwangen-Schönach finden sich zusammenhängende *flachwellige Till-Landformen*.

Morphologisch lassen sich die ursprünglich kuppig-hügeligen Landformen gut nachvollziehen. BECKENBACH et al. (2014: 112f., 114f.) sprechen z.B. für den Raum östlich von Herbertingen sowie nordwestlich von Hoßkirch in der Altmoränenlandschaft von „Relic Drumlins“ (= Relikte von Drumlins) der Riß-Zeit. *Abb. 4* unterstützt diese Einschätzung. Sie zeigt flachwellige, glaziale Landformen am Standort nordwestlich von Hoßkirch.

Abb. 4: **Flachwellige Till-Landformen im AML nordöstlich von Hoßkirch**.
Auf den periglazial überprägten, wahrscheinlich während des Rißglazials kuppig-hügelige Till-Landformen haben sich Fließerden gebildet, welche heute in der Regel ackerbaulich genutzt werden. Blickrichtung nach N. – Aufgenommen am 21.8.2018.

Endmoränenformen

Endmoränen-Landformen sind in der Landschaft als bogenförmige, wallartige, langgezogene Rücken mit bloßem Auge zu erkennen. Sie umrahmen „girlandenartig" (LGRB BW 2011: 176) den ehemals vereisten Bereich und weisen Höhenunterschiede von bis zu 100 m gegenüber der direkten Umgebung auf. Hier steht kantengerundeter und proglazial abgelagerter Till aller Korngrößen an. Dieser zeichnet sich durch ihr gut wasserdurchlässiges, kiesreiches Material aus (Eberle et al. 2010: 114). Grundsätzlich werden verschiedene Typen von Endmoränen-Landformen unterschieden. Die für das Untersuchungsgebiet relevanten werden im Folgenden erläutert.

Endmoränen markieren im Allgemeinen eine stationäre Randlage des Gletschers über längere Zeit. Diese wird jedoch häufig von kleineren Oszillationen (kurze Vor- und Rückzugsphasen) unterbrochen, was zu einer unregelmäßigen und breiteren Kammform führt (Ahnert 2003: 366). Bereits bei kleinen Oszillationen kommt es zur Abtrennung von Toteisblöcken. Die Aufschüttung der Endmoräne und die Bildung von Toteislöchern (sog. Sölle) erfolgt daher mehr oder weniger gleichzeitig und in unmittelbarer Nähe voneinander (vgl. Glavion et al. 2012: 186, 189; Beckenbach et al. 2014: 114; Seyfried et al. 2019: 293). Dementsprechend besteht die typische Geländeform junger Endmoränen aus einer Kuppen-und-Kessel-Landschaft (engl. knob-and-kettle topography) (Ahnert 2003: 367). Strahler & Strahler (2005: 485) sprechen von Endmoränen als "Streifen kuppiger Hügel mit dazwischenliegenden beckenartigen Hohlformen".

Wird beim Vorrücken des Gletschers älteres Untergrundmaterial aufgeschoben oder aufgepresst, entstehen sogenannte **Stauchendmoränen** mit einer zusätzlich geschuppten Struktur (Leser 2009: 254). Neben den echten Endmoränen existieren **Satz- oder Ablationsmoränen** (Ahnert 2003: 366, Leser 2009: 254). Sie entstehen während längerer Stillstandsphasen und weisen eine Schuttdecke auf, die teilweise große Teile des aktiven Eiskörpers bedeckte. Diese bewirkt häufig ein langsameres Abschmelzen der durch die Schuttauflage geschützten Eismasse, wodurch sich Toteis bildet (Glavion 2012: 186). Im

Gelände unterscheiden sie sich von den echten Endmoränen durch ihre flachere und z.T. asymmetrische Form (LESER 2009: 254).

Im Alpenvorland Oberschwabens lassen sich bis zu zehn verschiedene Eisrandlagen im Gelände nachweisen (vgl. KELLER & KRAYSS 1987: 172f.). In dieser Arbeit wurden die dort angesprochenen Stadien 2, 7 und 10 verwendet. Sie entsprechen der äußeren Würmendmoräne (AeWEM), der Inneren Würmenmoräne (IWEM) und dem Konstanzer Stadium.

Das Material der älteren Endmoränen im Voralpenland besteht, im Unterschied zu den inneralpinen Ablagerungen, hauptsächlich aus gerundeten Schottern und Sanden, was auf glaziale Vorstöße in zuvor abgelagerte Schmelzwassersedimente zurückzuführen ist (EBERLE et al. 2010: 98).

Mit knapp 2% (1,98% bzw. 59,96 km²) der Fläche des Untersuchungsgebiets bilden Endmoränenformen den kleinsten Anteil der Till-Landformen. *Abb. 5* zeigt einen im Gelände gut erkennbaren Endmoränenzug östlich von Bad Waldsee. Sie verdeutlicht den wallförmigen Charakter der Endmoränenzüge an einigen Standorten im Untersuchungsgebiet – vor allem im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets.

Abb. 5: **Deutlich ausgeprägter, bewaldeter Endmoränenzug bei Haisterkirch**.
Gut zu erkennen sind die Schmelzwasserdurchbrüche in Form von markanten Gletschertoren, die im Endmoränenzug als scharfe Einkerbungen zutage treten. Östlich von Bad Waldsee. – Aufgenommen am 1.8.2018.

Im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets hingegen treten die Höhenunterschiede der Endmoränen (AeWEM) weniger stark zutage, sodass die wallartigen Strukturen südwestlich von Ostrach morphologisch nur unregelmäßig erfasst werden können. Dazu zeigt *Abb. 6* ein Beispiel eines schwächer ausgeprägten, flacheren Endmoränenzugs bei Ostrach, am nördlichen Ende des Wilhelmsdorfer Beckens gelegen. Dieser wurde zentral durch ein großes Gletschertor (siehe Bildmitte) durchbrochen.

Abb. 6: **Schwächer ausgeprägter Endmoränenzug bei Ostrach**.
Teilweise bewaldet und bebaut, AeWEM weiß markiert. Blickrichtung: NW. – Aufgenommen am 21.8.2018.

Zusammenfassung: Till-Landformen im Untersuchungsgebiet

Im Alpenvorland Oberschwabens sind die jüngsten Drumlins bereits deutlich über 10 000 Jahre lang der Erosion ausgesetzt. Seit ca. 7 500 Jahren wird ihre Gestalt und Oberfläche zusätzlich vom Menschen nachhaltig beeinflusst und verändert (vgl. EBERLE et al. 2010: 149). Eine einheitliche Form etwa eines „Drumlin-Prototypen" kann es folglich im Alpenvorland nicht geben, was eine exakte Klassifikation erschwert. Die Landform-Klasse *kuppig-hügelige Till-Landformen* wurde daher bewusst weiter gefasst.

Im Bereich zwischen Bodensee und IWEM befinden sich die jüngsten und besterhaltenen Drumlinfelder des Untersuchungsgebiets. Sie entstanden während des letzten markanten Vorstoßes des Rheingletschers in der Würm-Kaltzeit (IWEM – Singener Stadium ca. 15 000-12 000 a BP) und mehreren anschließenden Gletscher-Rückzugsphasen (ERB 1935: 29, EBERLE et al. 2010: 112, ELLWANGER et al. 2011: 308). Zwischen den Rücken finden sich in abflusslosen Senken häufig Niedermoore (EBERLE et al. 2010: 114). Bei fortgeschrittenem Eisrückzug bildeten sich in Seenähe zwischen einigen Drumlinfeldern proglaziale Schmelzwasser-Abflussrinnen (ERB 1935: 31ff., SCHWAB 2014). Beispielhaft hierfür sind die Abflussrinnen bei Oberteuringen, Markdorf, Owingen und Lippertsreute (SCHWAB 2014).

In der lithostratigraphischen Gliederung des LRGB BW sind die oben angesprochenen, seenahen Drumlinfelder bzw. *kuppig-hügeligen Till-Landschaften* Teil der Tettnang-Subformation (qHWT), welche Teil der übergeordneten Hasenweiler-Formation ist (qHW) (ELLWANGER 2011: 317f., LGRB BW 2015). Es handelt sich um die geologisch-morphologische Klasse „Drumlins und wenig reliefierter Till aus Diamikten mit Partien aus Kies und Feinsedimenten verbreitet zwischen dem Bodensee und der Inneren Jungendmoräne" (LGRB BW 2015). Die hiesige Arbeit unterteilt diese in drei weitere:

1. Kuppig-hügelige Till-Landformen (im Süden Drumlins)
2. Flachwellige Till-Landformen
3. Endmoränenformen

ERB erfasste in seiner glazialmorphologischen Kartierung von 1935 den Raum Überlingen / Uhldingen-Mühlhofen (westlicher Bodensee, vgl. *Abb. 49*). Er kartierte Einzeldrumlins sowie auch vereinzelt Endmoränen-Teilstücke. Näheres hierzu wird in Kapitel 4.2.1 thematisiert.

Molasse-Bergland

Das Molasse-Bergland ist aus den gleichnamigen tertiären Sedimenten aufgebaut. Diese sind häufig von älteren, glazialen Deckenschottern aus früheren Vereisungen bedeckt und wurden so vor Erosion geschützt (vgl. EBERLE et al. 2010: 99).

Im Untersuchungsgebiet befinden sich drei große Gebiete mit oberflächlich anstehender, unbedeckter Molasse: das Stockacher Bergland, der Gehrenberg und die Adelegg. Die aquatische Erosion hat hier in den weichen Molassesedimenten zahlreiche kleine und steile Kerbtäler (süddeutsch: Tobel, eng. ravines) entstehen lassen. Dies führt hier zu einer stark zertalten und rauen Geländeoberfläche, die charakteristische Berglandformen ausbildete, beispielhaft hierfür steht das „Stockacher Bergland" in BENZINGs Klassifikation (1964: 15).

Der Gehrenberg ist dabei nur an seiner Südseite zerklüftet. Hier teilte sich der Rheingletscher während des Hochwürm subglazial in zwei Teilloben auf, die in der Folge das Salemer Becken und das Schussenbecken heraus präparierten. Der Berg selbst ragte allerdings nicht aus den Eismassen des hochwürmzeitlichen Rheingletschers heraus (vgl. SEYFRIED et al. 2019: 282f.). In der postglazialen Phase wurden seine Hänge stärker erodiert und bildeten so die heutigen, charakteristischen Landformen aus. Der komplette Westhang des Gehrenbergs hat eine Till-Auflage. Dabei befinden sich auf dem westlichen Gipfelbereich *flachwellige Till-Landformen*, welche an den westlichen Hangbereichen in *kuppig-hügelige Till-Landformen* übergehen. In Kapitel 4.1.3 wird in *Abb. 48* eine 3D-Ansicht des Gehrenbergs gezeigt, welche die obigen Ausführungen veranschaulicht.

Die hohe (südliche) Adelegg wurde von den Würm-Gletschern nicht überfahren (DONGUS 1991: 23, LGRB BW 2011: 181) und weist folglich auch keine Till-Bedeckung auf. Diese Landschaft ist mit Höhen von über 1 000 m ü. NN (max. 1 118 m ü. NN – Schwarzer Grat als höchster Punkt Württembergs) und einer mittleren Höhe von ca. 880 m ü. NN deutlich höher gelegen als der Gehrenberg (max. 754 m ü. NN, Ø ca. 590 m ü. NN).

Es muss noch erwähnt werden, dass auch im Norden des Untersuchungsgebiets Molassesedimente oberflächlich anstehen, z.B. südlich von Meßkirch sowie südlich von Mengen bzw. im Raum zwischen Bad Waldsee und Leutkirch. Diese Formationen befinden sich jedoch im AML. Hier besteht eine vollkommen andere Morphologie der Landformen: Es herrschen flachwellige Landschaften vor, die bereits in der Prä-Würmzeit periglazial erodiert wurden und heute von Fließerden bedeckt sind (vgl. *Abb. 2*).

(Große) Becken

(Große) Becken sind die weitläufigsten, zusammenhängenden Landformen im Untersuchungsgebiet. Flächenmäßig machen sie allerdings nur gut 15% (15,34%) der Gesamtfläche aus. Sie entstanden subglazial, durch wiederholte Vorstöße der Eismassen des Rheingletschers während der vergangen Kaltzeiten (ELLWANGER et al. 2011: 315). Die Übertiefung der Würm-Kaltzeit dürfte jüngeren Forschungen zufolge aufgrund der relativ kurzen Vereisungsphase nur relativ gering gewesen sein. Die (Großen) Becken müssen folglich als Zungenbecken früherer Vereisungen bereits vor dem Würm-Glazial vorhanden gewesen sein (EBERLE et al. 2010: 112, ELLWANGER et al. 2011: 315, LGRB BW 2011: 177, ZÖLLER 2017: 76). Sie stellen großflächige Hohlformen dar, mit deutlichem Höhenunterschied zur direkten Umgebung und steilen Beckenrändern (LGRB BW 2015: 38).

Als größtes der terrestrischen (Großen) Becken dominiert das sich zentral im Untersuchungsgebiet von Südsüdwest nach Nordnordost erstreckende Schussenbecken. Es bildet die nördliche Verlängerung des Bodenseestammbeckens und besteht aus zwei Teilen. Im Süden befinden sich das Untere und das Mittlere Schussenbecken, welche miteinander verbunden sind. Nach Norden folgt ein Geländesprung von gut 100 m, an den das Nördliche Schussenbecken anschließt. Mit dem Salemer Becken erstreckt sich ein weiteres Zweigbecken vom Unteren Schussenbecken aus nach Nordwesten.

Das größte und tiefste (Große) Becken des Untersuchungsgebiets ist jedoch das heute wassergefüllte Bodenseestammbecken. Man kann das Schussen- wie auch das Salemer Becken auch als dessen Zweigbecken interpretieren (vgl. LGRB BW 2015: 6).

Sowohl das Salemer und das Mittlere Schussenbecken führten während des Spätwürm (im Konstanzer Stadium, ca. 12 000 a BP), das Wilhelmsdorfer Becken bereits im Singener Stadium (ca. 18 000 a BP, Innenwallwürm) Eisrandstauseen (KELLER & KRAYSS 1996, DONGUS 2000: 167, SCHWAB 2013: 8, SCHWAB 2014: 6). Das hoßkirchzeitlich entstandene Wurzacher Becken (LGRB BW 2011: 177) war auch bereits während des Würm-Maximums mit Schmelzwässern gefüllt (HENNING 1922: 256, KRAYSS & KELLER 1996: 119, 127). Dies lässt sich heute noch durch feinkörnige, glazilakustrin abgelagerte Beckensedimente belegen (Ebd.).

Abb. 7 zeigt den Blick ins Mittlere Schussenbecken von Ravensburg-Torkenweiler in Richtung Westnordwest. Oberhalb des gegenüberliegenden Beckenrandes liegt die Gemeinde Berg. Die großflächigen Dimensionen lassen sich nur bedingt in der terrestrischen Fotografie wiedergeben, der breite und flache Beckenboden mit seinen durchaus steilen Hängen ist jedoch gut zu erkennen.

Beim Mittleren Schussenbecken handelt es sich um den schmalsten Teil des Schussenbeckens, welcher hier nur ca. 2,5 km breit ist. Das Untere Schussbecken weist mit bis zu 10 km, im Bereich der Tettnanger Terrassen Richtung Westen, die größte Breite auf.

Abb. 7: **Blick ins Mittlere Schussenbecken von RV-Torkenweiler aus**.
Der Beckenquerschnitt ist durch die weiß-gestrichelte Linie angedeutet. Rechts oberhalb des gegenüberliegenden Beckenrands liegt die Gemeinde Berg. Im Hintergrund, oben links befindet sich der Gehrenberg. – Aufgenommen am 1.8.2018, Blickrichtung: Westnordwest.

(Glazi-)Fluviale Landformen

Im südlichen Oberschwaben kommen glazifluvial und fluvial gebildete Landformen häufig vor. Man kann sie in drei Hauptklassen einteilen: (Glazi-)Fluvial geprägte, kleine Becken und Täler, Steile Kerbtäler (≙ Tobel) und Schmelzwasserrinnen. Alle diese Landformen wurden von proglazial abfließenden Schmelzwässern gebildet und bis heute weiter modelliert. Die Ausnahme bilden die nachfolgend besprochenen kleinen Becken.

Kleine Becken haben sich, wie ihre größeren Verwandten, subglazial gebildet. In einigen bildeten sich während der Rückzugsphasen der Gletscher Schmelzwasserseen. Im Westen des Untersuchungsgebiets sind das das hoch gelegene Ilmenseebecken (710 m ü. NN), das Kleine Becken zwischen Herdwangen-Schönach und Aach-Linz (Krayss & Keller 1996: 131) sowie das Becken von Ebersbach, nördlich des (Großen) Altshauser Beckens. Für das östliche Untersuchungsgebiet liegen fünf bis sechs in N-S-Richtung verlaufende Kleine Becken vor (vgl. Seyfried et al. 2019: 308ff.), die ins Argental münden. Ein weiteres verläuft hakenförmig durch Kißlegg und schließt im Norden auch das Immenried mit ein.

Bei (**Glazi-)Fluvial geprägten Tälern** handelt es sich häufig um Umfließungsrinnen, die parallel zu den Eisrändern verliefen (vgl. Krayss & Keller 1996: 128f., Schwab 2013 & 2014). Ihre Fließrichtung verlief und verläuft in der Regel in OW oder WO Richtung. Die Urnauer und die Markdorf-Taldorfer Rinne, die Rinne Kemmerlang-Ravensburg und die Schwarzachrinne sind hier exemplarisch zu nennen. Das Argental mit seinen im Gelände gut sichtbaren, markanten Flussterrassen steht ebenso für die fluviale Landschaftsformung im Untersuchungsgebiet (vgl. Krayss & Keller 1996: 121ff., Schwab 2013 & 2014). *Abb. 8* zeigt die ganze Bandbreite an Landformen im Argental. Einerseits werden Flachbereiche mit auf verschiedenen Terrassenniveaus des Gleithangs heute landwirtschaftlich genutzt. Daneben gibt es aber auch Bereiche von steilen Hangabschnitten (vgl. neben *Abb. 8* auch *Abb. 10* rechts).

Abb. 8: **Das Argental am Ortsrand (Südosten) von Flunau (Neukirch)**.
Rechts der flache Gleithang mit drei Flussterrassen mit unterschiedlichen Höhenniveaus (A-C) und ein steiler Molasse-Prallhang (links). – Aufgenommen ca. 4 km östlich von Neuravensburg am 1.8.2018.

Das Deggenhauser Tal ist ein Sonderfall. Angelegt ist es als (kleines) Becken (KRAYSS & KELLER 1996: 129; DONGUS 2000: 167, LGRB BW 2015: 38, 60). KRAYSS & KELLER (1996: 131) betonen die Wirkung des subglazialen Schmelzwasserabflusses während der würmzeitlichen Eisbedeckung. Mit dem Zurückweichen der Eismassen nach Süden gelangte das Deggenhauser Tal unter fluvialen Einfluss. Es wird auch als „Deggenhauser Tobel" bezeichnet (z.B. DONGUS 1991: 43f.). Der möglichen fluvioglazialen Prägung folgten postglaziale bis rezente fluviale Einflüsse. Auch der anthropogene Einfluss (Landwirtschaft) trägt zur postglazialen Formung bei. So kann das Deggenhauser Tal heute als Kerbsohlental mit steilen Hängen[8] und teilweise relativ flachem Talboden angesprochen werden (vgl. *Abb. 9*).

Abb. 9: **Blick durch den Querschnitt des südlichen Deggenhauser Tals nach Nordwesten**.
Auffällig sind die bewaldeten, steilen Hänge links und rechts sowie der landwirtschaftlich genutzte, nur leicht geneigte Talboden in der Talmitte (Breite ca. 450 m), welcher bereits subglazial und anschließend postglazial durch die Sedimente verfüllt wurde. – Aufgenommen bei Deggenhausen am 21.8.2018.

[8] Mit Höhenunterschieden zwischen Talboden und Hangoberkante von bis über 200 m.

Steile Kerbtäler / Tobel sind tief eingeschnittene Schluchten und Kerbtäler mit steilen Seitenwänden. Sie kommen im Alpenvorland Oberschwabens nur südlich der EHWS, an großen Geländestufen von oft mehr als 50 Höhenmetern vor. Die kleinräumlich, im Untersuchungsgebiet ausschließlich im JML vorkommenden Sonderformen der steilen Kerbtäler werden im Süddeutschland auch als Tobel bezeichnet. Entstanden sind sie durch starke glazifluviale Erosion beim Eisrückzug nach Süden. Als Folge richtete sich auch ihr Gefälle in Richtung Süden, zum Bodenseebecken bzw. zum Rhein hin aus. Aufgrund der ab dort fehlenden Barriere konnten die zuvor aufgestauten Schmelzwässer den beträchtlichen Höhenunterschied der unteren Stufen des Bodensee-Amphitheaters (ELLWANGER et al. 2011) auf kurzer Distanz überwinden. Die dadurch hervorgerufenen hohen Fließgeschwindigkeiten bedingten eine starke Tiefenerosion, sodass sich die scharfen Einschnitte der Kerbtäler in kurzer Zeit ausbilden konnten (vgl. BENZING 1964: 15, SCHWAB 2013:14).

Im Untersuchungsgebiet existieren drei große Kerbtäler / Kerbsohlentäler (Deggenhauser Tal, Andelsbacher Tobel und Schussentobel). Deren Talsohlen sind teilweise mit postglazialen Flusssedimenten verfüllt und daher in diesen Bereichen flacher (z.B. Deggenhauser Tal). Sie haben sich häufig tief in die oberflächlich anstehende Obere Süßwassermolasse eingeschnitten, die an den oben angesprochenen Geländestufen freigelegt wurde (vgl. *Abb. 10* links). Auch heute dienen sie noch als Abflussrinnen und führen häufig kleine Bäche.

Manche Abschnitte größerer Flüsse haben aufgrund ihrer steilen Hänge einen kerbtalartigen Charakter, wie zum Beispiel abschnittsweise die Argen[9] (vgl. *Abb. 10* rechts). Hierbei handelt es sich jedoch um keine Kerbtäler und Tobel im eigentlichen Sinne.

Abb. 10: **Zwei steile Kerbtal- bzw. kerbtalartige Abschnitte im Untersuchungsgebiet**.
Links: Der ***Schussentobel*** zwischen Mochenwangen und Reute. Talbreite ca. 15 m, Höhen unterschied ca. 10-15 m, Slope-Werte bis > 90 %. Am linken Hangfuß ist die anstehende Obere Süßwassermolasse gut zu erkennen.
Rechts: Ein ***Abschnitt im Argental*** östlich von Flunau (Neukirch) mit sehr steilen Hangbereichen (Kerbsohlental mit Slope-Werten bis zu 68 %). Talbreite ca. 35-40 m, Höhenunterschied ca. 15-20 m. – Aufgenommen am 1.8.2018.

[9] In diesem Fall handelt es sich, ähnlich wie beim Durlesbacher Tobel um ein Kerbsohlental.

Schmelzwasserrinnen erstrecken sich nördlich der großen Gletschertore häufig kilometerweit ins einstige Gletschervorland[10]. Sie wurden während der Vereisungsphasen von glazialen Schmelzwässern gespeist, welche geringe Fließgeschwindigkeiten aufwiesen. So konnten sich breite und flache Kastentäler entwickeln (vgl. *Abb. 11*). Verglichen mit den Becken sind deren Beckenböden noch deutlich flacher und weisen Slope-Werte gegen Null auf. Häufig haben sich glaziale Schotter am südlichen Ende der Schmelzwasserrinnen abgelagert. Im JML-Bereich des Untersuchungsgebiets befinden sich keine Schmelzwasserrinnen.

Abb. 11: **Schmelzwasserrinne NW von Pfullendorf**.
Blickrichtung nach Norden. Das Kastental besitzt einen charakteristischen, sehr flachen Tal boden (Breite ca. 900 m, vgl. weiß-gestrichelte Linie). Rechts und links im Bild sind die Hänge zu sehen, welche 20-30 m Höhendifferenz ausmachen (Rechts: Prallhang, links: Gleithang). © A. Schwab 2005 (verändert, mit freundlicher Genehmigung des Fotografen).

Schotterebenen

Schotterebenen (auch Schmelzwasserschotter, vgl. GEYER & GWINNER 2011: 395) befinden sich ebenfalls oft direkt nördlich der großen Gletschertore der AeWEM. Östlich von Bad Waldsee, haben sich zum Beispiel flächenhaft Schotter abgelagert (BECKENBACH et al. 2014: 114f.). Transport und Sedimentation der glazialen Schotter fanden hauptsächlich glazifluvial, im Bereich der oben besprochenen Schmelzwasserrinnen statt. Postglazial wurden Teile der meisten Schotterebenen fluvial erodiert und umgestaltet.

Am Ostrand des Unteren Schussenbeckens, südlich von Tettnang, lagerten sich auch Schotter ab. In diesem Fall wurden sie terrassenförmig sedimentiert (als sogenannte „Tettnanger Terrassen“, vgl. SCHWAB 2014: 9f. siehe auch *Abb. 12*). Einiges spricht dafür, dass es sich um eine Kamesterrasse handelt. Diese glazifluvial gebildete Landform lagerte sich parallel zum Eisrand ab. Da die „Tettnanger Terrassen“ eine sehr geringe Oberflächenneigung aufweisen, ist es ebenfalls möglich, dass es sich hierbei um eine glazilakustrine Ablagerung aus einem Eisrandstausee des Spätwürm handelt (BAUMHAUER & WINKLER 2014: 197f).

[10] Im Untersuchungsgebiet befinden sich diese im AML.

Abb. 12: **Die Tettnanger Terrassen im Bereich des Manzenbergs**.
Die baumbestandene Hangkante der Schotter-Terrasse ist gut zu erkennen. Sie stellt einen Höhenunterschied von knapp 30 m dar. Dahinter folgt eine ebene Hochfläche. Blickrichtung: Ostnordost. – Aufgenommen vom Tettnanger Stadtteil Bürgermoos aus am 1.8.2018.

Zwischenfazit – Landformen vor Ort im Gelände identifizieren

Im Gelände besteht ohne weitere Hintergrundinformationen in einigen Fällen Verwechslungsgefahr zwischen manchen Landformklassen. Ein Beispiel ist der Vergleich der Tettnanger Terrassen (= Ebenen, vgl. *Abb. 12*) mit den Endmoränenzügen bei Ostrach (= Vollformen, vgl. *Abb. 6*). Beide Landformen weisen in der Fotografie bzw. in der Landschaft zunächst deutliche Ähnlichkeiten auf (= langgestreckte, bewaldete Geländekante bzw. Höhenzug). Dies zeigt, dass weitere Informationen, wie z.B. die Gesteinsart und vor allem der Blick aus der Distanz und anderer räumlicher Perspektive (Zentralpersepktive oder Schrägperspektive) nötig sind, um grundsätzliche Unterscheidungen zu treffen. Ein Digitales Geländemodell (DGM) in Kombination mit thematischen Informationen (z.B. Gestein, Hydrologie und glaziale Landschaftsgeschichte) können hier neue und hilfreiche Raumperspektiven bieten.

Das folgende Teilkapitel zeigt einen ersten, vereinfachten Ansatz zur Bildung eines Landschaftsmodells für das Untersuchungsgebiet in Form einer Grobgliederung. Diese beruht hauptsächlich auf dessen glazialer Landschaftsgeschichte. Sie wird später um morphologische, lithologische und hydrologische Komponenten erweitert werden.

2.1.6 Landschaftsgeschichtliche Grobgliederung

Das Untersuchungsgebiet lässt sich grob in vier Bereiche einteilen. Bei der Abgrenzung spielt vor allem die oben erläuterte Landschaftsgeschichte mit den glazialen Vereisungsphasen eine Rolle. Die Anordnung der Teilbereiche erfolgt somit zentripetal um das Bodenseebecken in aufsteigendem Alter (vgl. ELLWANGER et al. 2011). Im Folgenden werden diese erläutert und in *Abb. 13* kartographisch abgebildet.

1. Der südlichste **Bereich (A)** des Untersuchungsgebiets liegt zwischen heutigem Bodensee und der Eisrandlage *Konstanzer Stadiums* (SCHREINER 1974, 1992; KELLER & KRAYSS 1987: 172, BECKENBACH et al. 2014: 125f.). Es umfasst die jüngste bzw. letzte markante Ausdehnung des Rheingletschers über einen längeren Zeitraum. Im südlichen Oberschwaben entspricht das einer gedachten Grenze über Uhldingen-Markdorf-Oberteuringen, durch das südliche Schussenbecken sowie das komplette westliche Allgäus bis Leutkirch.

   Hier finden sich die gut ausgeprägten, jüngsten glazialen Landformen (kuppig-hügelige Till-Landformen / Drumlins, Kamesterrassen) der Region (ELLWANGER et al. 2011: 316). Die Argen hat hier im Holozän, von Osten her kommend, ein tiefes Tal mit zahlreichen markanten Flussterrassen eingeschnitten.

2. Nördlich anschließend folgt **Bereich (B)**. Er befindet sich zwischen der Eisrandlage des Konstanzer Stadiums und der *Inneren Würmzeitlichen Endmoräne* (= IWEM bzw. *Singener Stadium*). Im Untergrund steht hauptsächlich Till an. Lithostratigraphisch wird Bereich (B) hauptsächlich durch die Tettnang-Subformation und die Hasenweiler Formation repräsentiert. Beide beinhalten kuppig-hügelige Till-Landformen und Drumlins, vor allem um das Salemer Becken herum. Sie prägen maßgeblich die charakteristische kuppig-hügelige Till-Landschaft Oberschwabens.
3. Als Nächstes schließt sich **Bereich (C)** zwischen der Inneren und *Äußeren Würmzeitlichen Endmoräne* (= AeWEM bzw. *Schaffhausener Stadium*, ZÖLLER 2017: 79) an. Er bildet zusammen mit den Bereichen A und B die sogenannte „Jungmoränenlandschaft". Auch hier besteht der Untergrund hauptsächlich aus Till, welcher jedoch länger und damit stärker als die Bereiche A und B erodiert wurde. Folglich sind die sich hier befindlichen kuppig-hügelige Till-Landformen und Drumlins insgesamt weniger charakteristisch ausgeprägt. Häufiger sind hier flachwellige Till-Landformen anzutreffen. Weiter befinden sich hier die großen Endmoränenwälle verschiedener Gletscherstände, unter anderem, die charakteristische AeWEM.

   Der Bereich (C) beinhaltet einen bedeutenden Geländesprung von 80 bis deutlich über 200 m im Bereich des Deggenhausertals und des Höchsten. An dessen schroffen Hängen wurde die Obere Süßwassermolasse großräumig freigelegt. Dieser Landschaftsbereich wird weiter durch mehrere, teilweise stark vermoorte Becken wie das Wilhelmsdorfer, das Altshauser und das Obere Schussenbecken geprägt.

4. **Bereich (D)** erstreckt sich nördlich der AeWEM bis hin zur Rißzeitlichen Endmoräne (diese ist jedoch nicht mehr Teil des Untersuchungsraums). Er bildet die sogenannte *„Altmoränenlandschaft"* und wurde während der *Riß-Kaltzeit* letztmals glazial überprägt. Während der nachfolgendenden Würm-Kaltzeit herrschten hier periglaziale Bedingungen, mit Erosionsvorgängen wie Bodenfließen (GRAUL 1952: 5), welche das ur-

sprünglich ebenfalls kuppig-hügelige Relief stark verebneten (HUTTENLOCHER 1959: 5). Hier steht Till nur noch in geringer Mächtigkeit an. Es dominieren weite Flächen, die entweder durch flache Verwitterungs- und Umlagerungsbildungen aus Fließerden mit deutlich ruhigerer Oberfläche oder flachwellige Till-Landformen geprägt sind.
Daneben finden sich hier breite und sehr flache Schmelzwasserrinnen, verbreitet mit Schotterauflagen. Dieses Material stammt von den Gletscherabflüssen, welche an mehreren Stellen die Endmoränenwälle durchbrochen haben. Sie rühren vom Würm-Maximalstand her.

Bei den Analysen im Rahmen dieser Arbeit zeigte sich, dass es sinnvoll ist, den **West- und Ostteil** des Untersuchungsgebiets getrennt zu betrachten. Dazu wurde die Schussen als natürliche Grenze gewählt. In *Abb. 13* wird dies in Form einer dunkelblau gepunkteten Linie dargestellt. Sie verläuft in dem nach ihr benannten Schussenbecken.

Eine weitere landschaftsprägende, natürliche Grenze stellt die **Europäische Hauptwasserscheide** (EHWS, rote Linie in *Abb. 13*) dar. Nördlich der roten Trennlinie sind die Fließgewässer Teil des danubischen Flusssystems, südlich gehören sie zum rhenanischen Flusssystem. Die EHWS verläuft, mit Ausnahme des Bereichs der Adelegg (östlich von Wangen i. A., mit höchster Erhebung des Untersuchungsgebiets: Schwarzer Grat 1118 m ü. NN), durch den Landschaftsbereich (C). Sie stimmt vor allem westlich von Pfullendorf, südlich von Bad Saulgau und östlich von Bad Waldsee mit der AeWEM überein. Beim sukzessiven Gletscherrückzug im Spätwürm mussten die nach Süden fließenden Vorfluter bis zum Bodensee teilweise beträchtliche Geländestufen überwinden, was schließlich in den Bereichen (B) und (C) zur Bildung von tiefeingeschnittenen Kerbtälern (u.a. Tobel) führte.

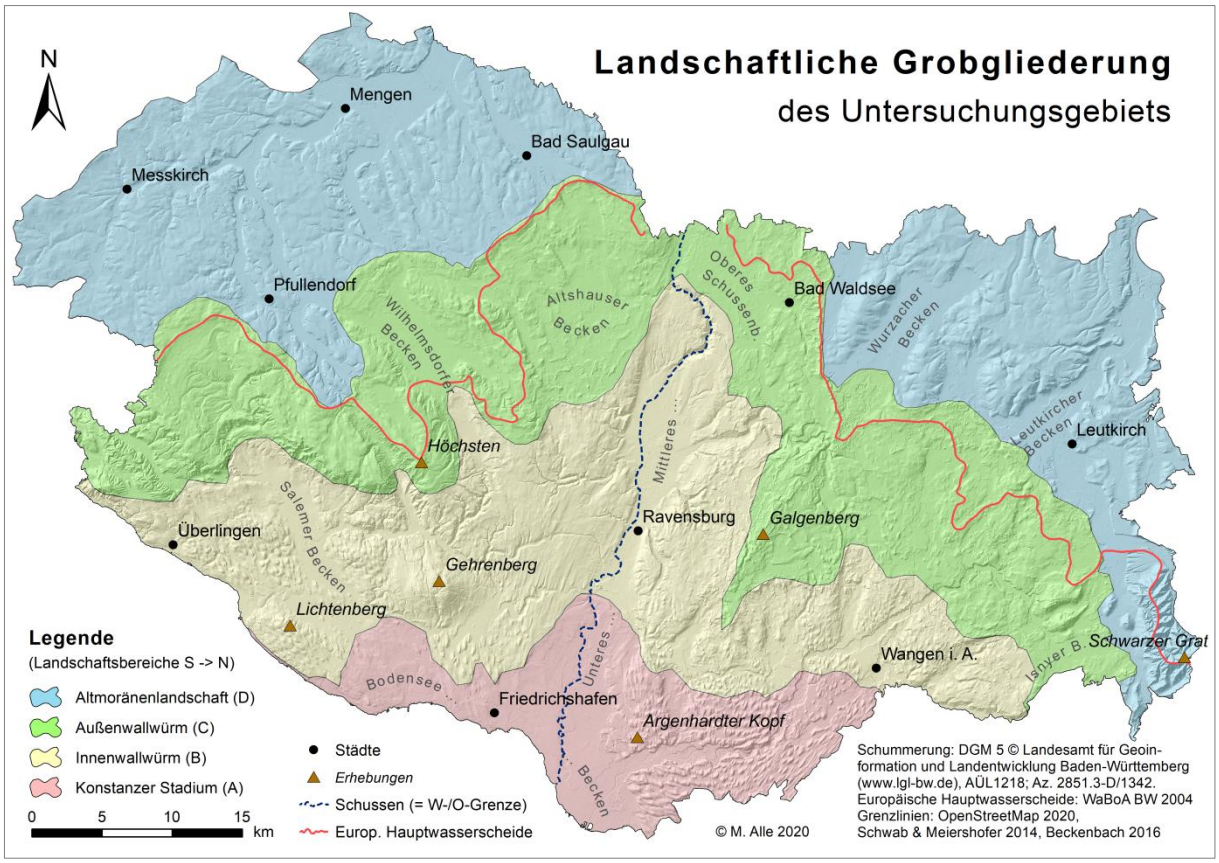


Abb. 13: **Landschaftsgeschichtliche Grobgliederung des Untersuchungsgebiets.**
Die vier Landschaftsbereiche werden anhand markanter Eisrandlagen gegliedert. (Innenwallwürm ≙ Singener Stadium, IWEM; Außenwallwürm ≙ Schaffhausener Stadium, AeWEM)
Weiter sind in der Karte Europäische Hauptwasserscheide (rot, EHWS), die Schussen (blau gestrichelt) als Grenze des westl. und östl. Teils des Untersuchungsgebiets, die (Großen) Becken sowie die wichtigsten Städte und Erhebungen verzeichnet.

2.2 Landschaftsklassifikation

Der Prozess der Landschaftsklassifikation, also das Aggregieren ähnlicher Teilbereiche zu einem landschaftlichen Gebilde, spielt in dieser Arbeit eine entscheidende Rolle. Dabei handelt es sich um ein mehrstufiges, hierarchisches Verfahren, mit dem räumliche Basis-Parameter schließlich zu Landschaftsklassen bzw. Naturräumen zusammengefasst werden.

In den folgenden Kapiteln werden zunächst allgemeine Grundlagen und Konzepte der Landschaftsklassifikation (Kapitel 2.2.1) erläutert. Anschließend wird in Kapitel 2.2.2 das *Bottom-up*-Prinzip der *Leipzig-Dresdner Schule* der *Naturräumlichen Ordnung* (Mannsfeld & Richter 1995, Bastian & Syrbe 2005, Mannsfeld & Syrbe 2008; siehe auch Lang & Blaschke 2007: 81) vorgestellt, das in dieser Arbeit Anwendung fand. Dem gegenübergestellt wird

in Kapitel 2.2.3 das *Top-down*-Prinzip der *Naturräumlichen Gliederung* nach MEYNEN & SCHMITTHÜSEN (1953-1962). Anschließend werden in Kapitel 2.2.4 statistische Methoden (*Boosted Regression Trees*, *Support Vector Machines* und *Landschaftsstrukturmaße*) zur Erfassung der Naturräumlichen Ordnung im großen / mittleren Maßstab vorgestellt. Das letzte Kapitel (2.2.5) beschäftigt sich mit weiteren aktuellen Ansätzen zur Landschaftsgliederung.

2.2.1 Ordnung der landschaftlichen Vielfalt – Grundlagen und Konzepte

Eine der wichtigsten Aufgaben der Landschaftsforschung ist es, „naturwissenschaftliche Erkenntnisse in politisch relevante Entscheidungen" zu transformieren (SYRBE 1999: 463). Raumgliederungen bieten dazu stabile, über längere Zeit gültige, naturräumliche bzw. landschaftliche Einheiten an, welche die Vielfalt der Landschaft vereinfachen bzw. idealisieren (Ebd.: 464, 466).

Landschaftliche Ordnungssysteme verlangen nach Grenzen zwischen unterschiedlichen Landschaftseinheiten bzw. Naturräumen (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962: 2). Sie sind in unserem hierarchischen Denken notwendig, um den Raum zu gliedern und „tragen zum besseren Verständnis der geographischen Wirklichkeit bei" (RENNERS 1991: 19). Die Grenzen müssen erst durch Konventionen bestimmt werden (ARMAND 1992: 361, zitiert nach STEINHARDT et al. 2012: 175) und sind stets subjektive, menschengemachte Konstrukte (RÖDER et al. 2005: 32). Je natürlicher eine Landschaft bzw. ein Ökosystem ist, desto schwächer sind Grenzen im Raum wahrnehmbar. Die anthropogene Nutzung schafft im Gegensatz hierzu deutlich sichtbare, scharfe Grenzen und abrupte Übergänge (STEINHARDT et al. 2012: 174f.). In vielen Fällen bestehen in der Natur die angesprochenen Grenzen nicht aus klaren Linien mit abruptem Übergang, sondern eher aus einem Grenzsaum, der Ökoton (engl. *ecoton*) genannt wird (RÖDER et a. 2005: 32, LANG & BLASCHKE 2007: 159ff., STEINHARDT et al. 2012: 174, LESER & LÖFFLER 2017: 135). Dieser stellt eine Übergangszone dar, deren räumliche Ausdehnung und zeitlicher Verlauf Schwankungen ausgesetzt ist.

Bereits Bernhard COTTA erkannte in seinem 1854 erschienenen Werk zur deutschlandweiten Einteilung „natürlicher Gebilde" (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962: 9, MANNSFELD 2005: 2). Hieran wird deutlich, dass das Vorhaben, eine Landschaft mit klaren Grenzen zu definieren, die natürliche Situation nur teilweise abbilden kann (vgl. LESER & LÖFFLER 2017: 177). Um in Umweltschutz oder Landschaftsplanung relevante Entscheidungen treffen zu können, werden jedoch quantifizierbare Ergebnisse benötigt, welche auf diesen klaren Abgrenzungen beruhen. Daher ist bei der Erstellung eines Landschaftsmodells stets ein Kompromiss anzustreben, welcher beiden Seiten möglichst gerecht wird. Landschaftliche Typenbildung ist notwendig, um Ordnung zu schaffen (RENNERS 1991: 19, MANNSFELD 2005: 2), das bedeutet immer eine gewisse Verallgemeinerung, die mit einem Verlust an landschaftlicher Vielfalt einhergeht.

BARSCH (Vorlesungsskript 1996, zit. nach LANG & BLASCHKE 2007: 81) definiert ***Landschaft*** als „Gruppe landschaftlicher Kompartimente in einem Zustand, deren Beziehungen zueinander enger sind als zu ihrer Umgebung." Jede Landschaft wird durch sichtbare Oberflächenformen geprägt. Die werden ebenso maßgeblich durch den geologischen Untergrund beeinflusst wie die darüber entwickelten Böden und die damit eng zusammenhängende jeweilige Landnutzung. Die Entwässerung spielt zusätzlich eine Rolle, genauso wie der Einfluss des Menschen in Form von anthropogenen Abgrabungen oder Ablagerungen. Landnutzung und menschliche Veränderung der Erdoberfläche tragen maßgeblich zum Charakter einer (Kultur-)Landschaft bei.

In der landschaftsökologischen Kartierung kommen häufig bereits flächendeckend typisierte Landschaftsmerkmale zum Einsatz, denen Raumeinheiten zugewiesen werden. Hierbei handelt es sich um Biotoptypen und Bodentypen – für beide liegen einheitliche Anspracheregeln vor (STEINHARDT et al. 2012: 209). Im Rahmen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 5) des Ad-hoc-Arbeitskreis Boden werden auch geomorphologische Aufnahmekriterien beschrieben (vgl. KA 5: 57-69). Ebenso finden sich bei HENGL & REUTER (2009: 233ff.) verschiedene brauchbare Ansätze hierzu.

Beim Versuch, Ordnung in die landschaftliche Vielfalt zu bringen, liegt in dieser Arbeit der Hauptfokus auf der Landschaftsmorphologie in Form von mit dem menschlichen Auge wahrnehmbaren Land***formen***. Wie oben bereits erläutert, hat das anstehende Gestein bzw. Sediment einen bedeutenden Einfluss auf diese, sodass ein starker Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern besteht.

Diese Arbeit nutzt eine Kombination aus geomorphographisch-geomorphometrischen und geomorphogenetischen Ansätzen. Landformen als prägendes Grundelement einer Landschaft werden klassifiziert, indem sie vermessen, ihre Merkmale erfasst und beschrieben, und dabei gleichzeitig die Entstehungsbedingungen betrachtet werden (LESER 2009: 31ff.). Dabei werden Nachbarschaftsbeziehungen der Landformen untereinander, aber auch der Landschaftsteile miteinander berücksichtigt.

Die Landschaftsklassifikation kann auf verschiedenen Maßstabsebenen bzw. räumlichen Skalen durchgeführt werden. Diese Arbeit verfolgt einen mikro- bis mesochorischen Ansatz in Maßstabsebenen von 1 : 25 000 bis 1 : 50 000. Dabei erfordern verschiedene Landformen unterschiedliche Betrachtungsmaßstäbe (LESER 2009: 31f.). Durch die Kombination verschiedener Skalen ergibt sich ein differenziertes, hierarchisches System. Dieses versucht, dem System der realen Landschaftsformen möglichst nahe zu kommen.

Grundsätzlich haben sich zwei Ansätze bzw. Konzepte durchgesetzt, Landschaften zu ordnen. In den Anfängen der wissenschaftlichen Landschaftsklassifikation, in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, wurde bis ca. zur Jahrtausendwende händisch, auf Basis von topographischen Karten im ***Top-down****-Prinzip* vorgegangen (z.B. MEYNEN & SCHMITHÜSEN

1953-1962, RENNERS 1991). Diese Methode wird als *Naturräumlichen Gliederung* bezeichnet (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962, SANDNER 2002: 31, SYRBE 2005: 26f.). Dabei wird ein Raum in gleiche oder ähnliche Teile untergliedert. Die *top-down*-Richtung geht dabei stets vom kleineren zum größeren Maßstab bzw. von einer groben zur feinen räumlichen Auflösung. Dieses Verfahren impliziert stets eine gewisse Subjektivität, da es händisch vorgenommen wird und dabei die Grenzziehung der Naturräume / Landschaften beim *top-down Ansatz* einer bestimmten Willkür unterliegt (vgl. BURAK 2005: 18f., DRĂGUȚ & BLASCHKE 2006: 330, STEINHARD et al. 2012: 203, BANDURA et al. 2015: 47). Zudem leidet beim Skalenwechsel auf eine größere Maßstabsebene die räumliche Genauigkeit, da sich Naturraumgrenzen so zwangsläufig ändern (DONGUS 1991: 1ff.) und die ausgegliederten landschaftlichen Grundeinheiten „nicht genau definiert" sind (SANDNER 2002: 31; vgl. auch BURAK 2005: 18). Das Top-down-Verfahren eignet sich am ehesten für große Betrachtungsräume mit kleinen Maßstäben von 1 : 1 Mio. (RENNERS 1991: 25).

Der zweite, später entwickelte Ansatz geht den umgekehrten Klassifikationsweg: *Vom Kleinen zum Großen* werden zunächst landschaftliche Entitäten bzw. Landschaftselemente identifiziert. Diese werden anschließend aus einem größeren Blickwinkel erneut analysiert und thematisch ähnliche Elemente zu übergeordneten Klassen bzw. (Klein-) Landschaften zusammengefasst. Dabei können mehrere Ebenen aufeinander folgen bis das endgültige Aggregations-Level erreicht ist.

Dieses ***Bottom-up**-Prinzip* trägt den natürlichen Gegebenheiten stärker Rechnung und wird als Naturräumliche (SANDNER 2002: 31, SYRBE 2005: 26f.) oder Landschaftliche Ordnung bezeichnet. Die Prinzipien dieses Verfahrens liegen auch dieser Arbeit zugrunde. Objektorientierte Klassifikationsmethoden gehen auf dieselbe Weise vor, indem sie auf Basis von klar definierten Regelwerken Pixel zu Segmenten bzw. Geoobjekten zusammenfassen (vgl. *Abb. 14*). Hierbei handelt es sich in der hiesigen Untersuchung um einzelne oder zusammenhängende Landformen. *Bottom-up*-Ansätze sind grundsätzlich objektiver angelegt, da sie wiederholbar, auf andere Regionen übertragbar und leicht korrigierbar sind (von ASSELEN & SEIJSMONBERGEN 2006: 310, LANG & BLASCHKE 2007: 118).

In *Abb. 14* werden die Zusammenhänge gezeigt. Dabei wird deutlich, dass das *Bottom-up*-Prinzip landschaftliche Einheiten beliebig aggregieren kann. Das *Top-down*-Prinzip (z.B. MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962) hingegen kann in der Regel nicht die Landformenebene erreichen.

Bislang weisen alle vorliegenden Klassifikationen für das Untersuchungsgebiet räumliche oder thematische Mängel auf, sei es durch den gewählten Maßstab oder durch den methodischen Ansatz des Ordnungsvorgangs. Bei letzterem ist zwischen subjektiver, händischer Klassifikation (BENZING et al. 1956-1991, MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-62) und einer rein statistisch basierten Herangehensweise (SCHRÖDER & SCHMIDT 2000) zu unterscheiden. In

den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Klassifikationsansätze genauer besprochen.

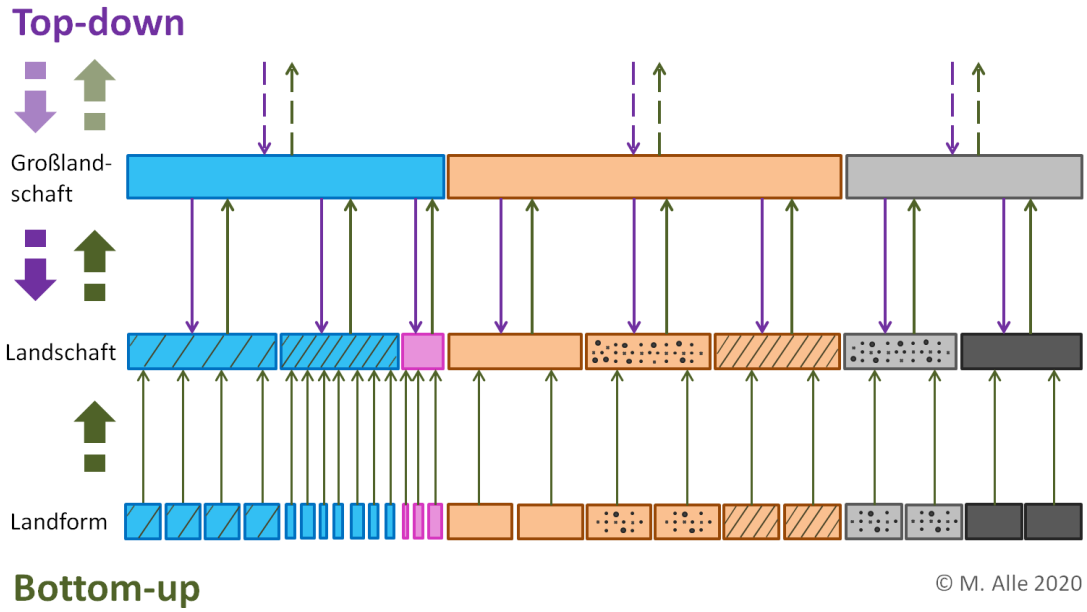


Abb. 14: **Aggregationsstufen des Bottom-up- und Top-down-Prinzips.** für die OBTA-Klassifikation von Landschaften.

2.2.2 *Bottom-up*-Konzept

(Bsp. *Leipzig-Dresdner Schule der Landschaftsklassifikation*)

Die *Leipzig-Dresdner Schule* etablierte eine Methodik der Typisierung der naturräumlichen Einheiten für den Freistaat Sachsen auf der mittleren Maßstabsebene (< ca. 1 : 50 000). Grundlage hierfür bildete die Naturraumtypen-Karte des Atlas der DDR (Barsch & Richter 1975). Die Landschaftsgliederungen Sachsens wurden in den späten 1990er und frühen Nullerjahren GIS-basiert erstellt (vgl. Syrbe 1999, 2002, Sandner 2002). Dabei kam der oben vorgestellte *Bottom-up-Ansatz* zum Einsatz. Die Ergebnisse flossen erfolgreich in die Planungspraxis ein (Mannsfeld & Richter 1995, Syrbe 1999, Röder et al. 2005).

Um die räumliche Heterogenität möglichst exakt abzubilden, wird dort das komplexe Landschafts-System auf verschiedenen räumlichen Maßstabsebenen betrachtet (vgl. Lang & Blaschke 2007: 118). Dabei wird der Blick zuerst auf die kleinstmögliche Erfassungsebene bzw. die größtmögliche Raumskala gerichtet. International hat sich der Begriff *Patch* für das kleinste, erfassbare Landschaftselement durchgesetzt (Lang & Blaschke 2007: 105, Steinhardt et al. 2012: 29f.). In dieser Arbeit entspricht dies den Einzel-Landformen. Die Dresdner Forscher sprechen in ihrer Landschaftsgliederung hierbei von *Topen* (Mannsfeld & Richter 1995, Syrbe 1999: 466f.; vgl. hierzu auch Steinhardt et al. 2012: 149f., Leser & Löffler 2017: 144ff.). Im Folgenden wird der aktuellere Begriff *Patch* verwendet. Er wird

gebraucht, wenn es um die größtmögliche Skalenebene geht. Sofern es jedoch um die Entitäten selbst geht, werden sie als Landformen bezeichnet. *Tab. 2* fasst die verschiedenen Raumskalen der landschaftlichen Einheiten und ihre Entsprechungen zusammen.

Tab. 2: **Übersicht zu Raumskalen, landschaftlichen Einheiten und ihrer Fläche** (nach STEINHARDT et al. 2012).

Leipzig-Dresdner Schule, STEINHARDT et al. 2012: 42	Entsprechung in dieser Arbeit	Raumbeispiel(e) im Untersuchungsgebiet	Fläche [km²]
1. Mikro-(Geo-)**Region**	**Gesamtes Untersuchungsgebiet**	Teile des Oberschwäbischen Alpenvorlands	ca. 500-5000
2. (Geo-)**Chore**			
▪ Makro-	**(Teil-)Räume der Vereisungsphasen** (Bereiche A-D, vgl. *Abb. 13*)	Westl. / östl. Teil von … … A – Konstanzer Stadium, … B – Singener Stadium, … C – Schaffhauser St., … D – Altmoränenlandschaft	ca. 100-500
▪ Meso-	**Landschaft**	Wurzacher Becken	ca. 20-100
▪ Mikro-	**Größere Teillandschaft**	Gehrenberg, Schotteranteil im Wurzacher Becken	ca. 10-20
▪ Nano-	**Kleinere Teillandschaft**	Tobel, Schotterebene	ca. 5-10
3. (Geo-)**Top / Patch**	**Landform**	Endmoränenwall-Teilstück, Drumlin	< 5 (tlw. < 1)

Erfasste, ähnliche Patches werden in weiteren Schritten zu größeren, übergeordneten Landschaftsklassen bzw. Naturraumeinheiten[11] zusammengefasst. Diese Arbeit verwendet in diesem Zusammenhang den Begriff *Landschaftsklassen*. Deren Elemente haben nach dem *Areal-Prinzip* (HERZ et al. 1975, HERZ 1982) zueinander engere Beziehungen als zu den Elementen der Nachbareinheit/-Klasse (BARSCH, zit. nach LANG & BLASCHKE 2007: 81). Dabei bestimmen dominante Patches den Charakter einer Landschaftseinheit. Nach HAASE (1985) haben die Landschaftseinheiten ein charakteristisches Gefüge, das sich von ihren Nachbarn deutlich unterscheidet. Grenzen befinden sich dort, wo sich mehrere zentrale Eigenschaften des Naturraums merklich ändern.

Die *Leipzig-Dresdner Schule* betrachtet Landschaftsklassen in verschiedenen Größenordnungen (vgl. SYRBE 1999, BASTIAN & SYRBE 2005, STEINHARDT et al. 2012: 42 sowie *Tab. 2* oben):

[11] Auch als *(Geo-)Choren* bezeichnet (vgl. SYRBE 1999: 466ff., STEINHARDT 2012: 149)

- **Nanogeochoren** (= Kleinst-/Teillandschaften). Hierbei handelt es sich um einzeln erfassbare (Teil-)Landschaften. STEINHARDT et al. (2012: 42) schlagen hierfür z.B. einen Berggipfel o.Ä. vor.
- **Mikrogeochoren** (= Kleinlandschaften). Sie wurden aus thematisch ähnlichen und benachbarten Nanogeochroen aggregiert.
- **Mesogeochoren**. Es fand eine weitere Zusammenfassung von ähnlichen Kleinlandschaften statt. Benannt werden sie nach zentralen Orten statt. Ein Beispiel ist das Markdorf-Teuringer Drumlinfeld.
- **Makrogeochoren** (= Großlandschaften). Hier wurde eine erneute Fusion vorgenommen. Diese Einheit dient in der vorliegenden Arbeit zur weiteren Differenzierung.

Heterogene und kontrastreiche Landschaften werden dabei nach rezenten oder vergangenen Prozessen zusammengefasst (SYRBE 2005: 26f.). Das bietet sich auch für die hiesige Klassifikation an. Sie unterscheidet zwischen unterschiedlichen Stadien der Eisvorstöße bzw. –Rückzüge (≙ Makro-Geochoren), differenziert aber auch hinsichtlich der postglazialen, fluvialen Prägung.

SYRBE (1999: 468ff., 2002: 28ff.) schlägt folgende hierarchische Strukturierung einer Landschaft vor (vgl. *Abb. 15*):

1. **Kernzone.** Sie besteht aus großflächigen, homogenen Arealen, die zentral gelegen sind. Sie bestimmen den Charakter der Landschaftseinheit und markieren einen deutlichen Unterschied zu den umgebenden Einheiten. Man spricht dabei auch von Fokalpatches.
2. **Randzone**. Sie stellt eine Übergangszone zu benachbarten Einheiten dar und kann unterschiedlich große Ausmaße annehmen. Beispiele wären Flüsse, Straßen, Waldschneisen etc.
3. **Singularitäten**. Das sind einzigartige, besondere Patches, welche den individuellen Charakter der jeweiligen Landschaftsklasse mitbestimmen.
4. **Inselareale**. Sie sind vereinzelt auftretende, Patches oder Landformen, mit relativ geringen thematischen Unterschieden zu ihrer Umgebung. Sie weisen zu wenig Eigenwert auf, um eine eigenständige Landschaftseinheit darzustellen und dienen der Akzentuierung.
5. **Gliederungsareale** – treten kleinflächig und meist langgestreckt in Außenbereichen von Patches auf. Sie vermitteln zwischen Rand- und Kernzone. Als Beispiel könnte hier eine Flussaue dienen.

Die ersten beiden Patches sind obligatorisch für jede Landschaftsklasse. *Abb. 15* verdeutlicht das Prinzip einer hierarchischen Landschaftsklassifikation.

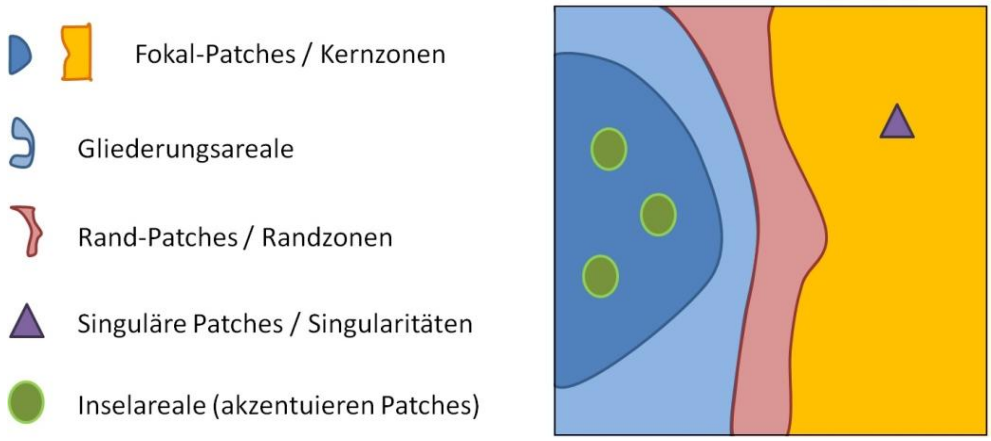


Abb. 15: **Prinzip der hierarchischen Landschaftsklassifikation** (nach SYRBE 1999)
Die Grafik zeigt zwei Landschaftsklassen / Fokal-Patches (*Blau* und *Gelb*). Diese werden von einem Rand-Patch (Rot), z.B. einem Fluss, unterteilt. Die *blaue* Klasse wird durch mehrere akzentuierende Inselareale (*Grün*) und ein sog. Gliederungsareal (*Hellblau*) am Übergang zum Rand-Patch geprägt. Die *gelbe* Klasse weist eine Singularität in Form eines einzelnen, den Gesamtcharakter nicht beeinflussenden Patches (*Violett*) auf.

Das oben vorgestellte hierarchische *Bottom-up-Konzept* eignet sich besonders für die Klassifikation einer glazial geprägten Landschaft wie dem Untersuchungsgebiet. So werden zunächst die einzelnen (Teil-)Landformen erfasst und klassifiziert, anschließend werden sie zu Landformen und später zu Landschaften aggregiert.

Eine *kuppig-hügelige Till-Landschaft* basiert folglich zunächst auf (häufig) tropfenförmigen Rücken und Kuppen aus Till (≙ Fokal-Patches). Dazwischen befinden sich häufig Mulden, in welchen Moorflächen vorhanden sein können (≙ Inselareale). Beide zusammen bilden die besagten kuppig-hügeligen Till-Landschaften, welche häufig an kleine Becken / Täler oder (Große) Becken grenzen.

In einigen Fällen, z.B. im Norden des Jungmoränengebiets, grenzen besagte Landschaftseinheiten an *flachwellige Till-Landschaften*. Diese weisen eine gewisse Ähnlichkeit in Bezug auf Substrat-Typ und Oberflächenformen auf. Letztere unterscheiden sich jedoch so deutlich, dass sie ausschlaggebend für die neue Klasse sind. Eine Verwandtschaft hinsichtlich ihrer Genese lässt sich jedoch definitiv ausmachen, da beide Landschaften subglazial entstanden sind. Die flachwellige Till-Landschaft in den nördlichen Teilen des Untersuchungsgebiets ist jedoch deutlich älter und damit länger postglazialen Erosionsprozessen ausgesetzt, welche die heutige Oberfläche prägten.

Im folgenden Kapitel (2.2.3) wird dem Bottom-up-Konzept das Top-down-Konzept gegenübergestellt.

2.2.3 *Top-Down*-Konzept

(Bsp. MEYNEN & SCHMITHÜSENS *Naturräumliche Gliederung*)

MEYNEN & SCHMITHÜSEN legten in den 1950er-/1960er Jahren die erste deutschlandweite Naturräumliche Gliederung im Maßstab 1 : 1 Mio. (1.-3. Ordnungsebene) vor (vgl. MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962). In diesem Gemeinschaftsprojekt bearbeiteten HUTTENLOCHER und GRAUL die Einheiten des für diese Arbeit relevanten „Voralpinen Hügel- und Moorlands" (Ebd. 80-88). Das Untersuchungsgebiet umfasst sechs Großlandschaften als Naturräumliche Einheiten. Diese definieren MEYNEN & SCHMITHÜSEN (1953-1962: 17) kleinmaßstäblich (1 : 200 000 bis 1 : 1 Mio.).

Diese Großlandschaften dienten anschließend als Basis für weitere Untergliederungen in größeren Maßstäben (1 : 40 0000 bis 1 : 200 000, der sog. 4. Ordnungsebene und weiteren). Für den Raum Bodensee-Oberschwaben existieren vier Kartenblätter (*Blatt 178 – Sigmaringen*, bearb. v. HUTTENLOCHER 1959; *Blatt 179 – Ulm*, bearb. v. GRAUL 1952; *Blatt 186 – Konstanz*, bearb. v. BENZING 1965 sowie *Blatt 187/193 – Lindau Oberstdorf*, bearb. v. DONGUS 1991). Sie bilden einen Teil der *Geographischen Landesaufnahme 1 : 200.000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands* und werden von der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung herausgegeben. Das Projekt wurde 1942 von der damaligen Abteilung für Landeskunde des Reichsamtes für Landesaufnahme begonnen. Nach fast 80 Jahren liegt heute das Gros der Blätter bearbeitet und kommentiert vor. Einige davon sind im WWW als freier Download[12] erhältlich.

Ursprünglich sollten die naturräumlichen Haupteinheiten (1 : 1 Mio.) aus den zuvor in größerem Maßstab kartierten Einheiten im Maßstab 1 : 200 000 im *Bottom-up*-Verfahren zusammengefasst werden. Da dies aufgrund der langwierigen Bearbeitungszeit in den frühen 1950er-Jahren nicht möglich war, wurde zunächst die Gesamtübersicht der Haupteinheiten (1 : 1 Mio.) erstellt. Die nächstfolgenden Untereinheiten im größeren Maßstab wurden auf dieser Raumbasis ausgegliedert (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962: 32).

Bei diesem hierarchischen Verfahren im *top-down*-Ansatz beziehen sich die Grenzen der untergeordneten (≙ großmaßstäbigeren) Ordnungsebene somit auf die der übergeordneten (≙ kleinmaßstäbigeren). DONGUS (1991: 1), der Bearbeiter des Blatts *187/193 Lindau-Oberstdorf*, definiert Naturräume durch eine „bestimmte Lage und ein annähernd einheitliches Gefüge […], das sich aus der räumlichen Verteilung und Vereinigung ihrer natürlichen Bestandteile ergibt." MEYNEN & SCHMITHÜSEN (1953-1962: 6f.) definieren den Begriff ***Naturraum*** als einen „nach dem Gesamtcharakter seiner Landesnatur abgegrenzten Erdraum". Dabei bedeutet ***Landesnatur*** den Landschaftscharakter, der durch nichtmenschliche „Erscheinungen und Kräfte" (Ebd.: 5) geprägt wurde und wird.

[12] Siehe: http://geographie.giersbeck.de/karten

Den Begriff ***Landschaft*** verstehen sie als einen Raum mit „[…] mehr oder weniger gleichartige[r] Beschaffenheit […] mit allem, was dessen Wesen […] ausmacht“ (Ebd.: 3). Sie ergänzen weiter unten: „Ein wichtiges […] Merkmal der Landschaft ist ihre innere räumliche Ordnung. Sie ist eine Folge der Entwicklung […] und ein Teil der Physiognomie, außerdem eine Voraussetzung für die mögliche Entwicklung“ (Ebd.: 4). Dieser Landschaftsbegriff ist der umfassendere, welcher auch anthropogene Einflüsse auf den untersuchten Raum mit einbezieht.

MEYNEN & SCHMITHÜSEN (1953-1962: 1) bauen ihre naturräumlichen Einheiten aus geologischen, morphologischen, pedologischen, hydrologischen und vegetationskundlichen Informationen auf. Dabei betonten sie ihren komplexen Ansatz zur „ganzheitlichen Naturraumvorstellung“ (ebd. VII). Diese Arbeit orientiert sich stärker am in Kapitel 2.2.1 definierten Begriff von „Landschaft“. Sie konzentriert sich dabei auf den morphologisch-morphometrischen Ansatz und verwendet daher den Begriff „Landschaften“ für die zu modellierenden, räumlichen morphologisch basierten Einheiten.

2.2.4 Statistische Konzepte

Erste Berechnungen zur statistischen Ermittlung von Naturräumen auf deutschlandweiter Ebene (Fläche: 357 385 km²) führten SCHRÖDER & SCHMIDT (2000) in 2 x 2 km Auflösung mit dem CART[13]-Algorithmus durch. Dieser basiert auf Regressionsanalysen. Das Verfahren kommt mit sehr wenigen zusätzlichen Eingriffen des Nutzers aus und weist ein hohes Maß an Objektivität auf. Die Ergebnisse bleiben in einigen Regionen deutlich hinter der Realraumsituation zurück (vgl. QUÉNÉHERVÉ et al. 2016: 205).

Im Folgenden werden zwei weitere mögliche statistische Ansätze (*Boosted Regression Trees – BRT* und *Support Vector Machines – SVM*) zur Modellierung von Naturräumen oder Landschaften vorgestellt.

Boosted Regression Trees (BRT)

Hierbei handelt es sich um ein statistisches Verfahren aus dem Bereich der maschinellen Lerntheorie (eng. machine learning), das ebenfalls auf Regressionsmodellen mit Entscheidungsbäumen basiert. Die künstliche Generierung von Wissen erfolgt durch das Lernen anhand von Trainingsdaten und vorgegebenen Algorithmen. Daraus findet das Modell selbstständig, statistische Zusammenhänge und wendet diese später auf einen neuen Datensatz an.

Bei einem Regressionsmodell soll die Klassenzugehörigkeit anhand der Merkmalsausprägungen mehrerer Eingangsvariablen in Relation zu einer bestimmten Zielvariable ermit-

[13] Classification and Regression Trees.

telt werden. Boosted Regression Trees nutzen möglichst einfache Entscheidungsbäume (Trees), um mittels des Boosting-Algorithmus (FRIEDMAN 2001) durch eine große Anzahl dieser Trees verlässlichere Voraussagen zur Klassenzugehörigkeit treffen zu können als mit nur einem einzigen Regressionsmodell.

Wie oben erwähnt, dient ein Teil der Eingangsdaten als Trainingsdaten für die Regressionsanalyse, welche durch Iterationen stets verbessert werden. Der Boosting-Algorithmus nimmt dabei nach jedem Modelldurchlauf eine Gewichtung der Variablen auf Basis des jeweiligen Zwischenergebnisses vor. So verbessert er das Modell für den nächsten Lauf. Damit kann die Varianz zwischen den Klassen entscheidend verringert werden, was zu stabileren Ergebnissen führt. Die Berechnungen können z.B. mit der freien und open-source Statistik-Software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2008) durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich um einen Top-down-Ansatz.

QUÉNÉHERVÉ et al. (2015, 2016) wendeten die ursprünglich für die Habitat-Modellierung von Tieren entwickelten BRT (vgl. ELITH et al. 2008) für die Modellierung einer naturräumlichen Ordnung Baden-Württembergs an. Dabei wurde die Landesfläche von 35.732 km² mit einer räumlichen Auflösung von 250 x 250 m klassifiziert. BACHOFER et al. (2015) nutzten BRT zur Abgrenzung von lakustrinen Sedimenten anhand von multispektralen ASTER-Daten und topographischen Parametern im Einzugsgebiet des Manyara Sees in Tansania.

Das BRT-Verfahren kann kategoriale (d. h. nominale und ordinale) Daten zusammen mit metrischen (intervall- und rationalskalierte) Daten ohne Skalentransformation verarbeiten (vgl. SCHRÖDER & SCHMIDT 2000, QUÉNÉHERVÉ et al. 2016). Es arbeitet mit einer klassifizierten Zielvariable[14], um eine homogene Raumgliederung zu erzeugen. Ziel des Verfahrens ist es, Objekte anhand der Ähnlichkeit ihrer Merkmalsausprägung in möglichst wenige einheitliche und klar unterscheidbare Klassen zu gliedern (ELITH et al 2008). QUÉNÉHERVÉ et al. 2016 arbeiteten neben DGM-Daten und verschiedenen Derivaten mit geologischen (GK BRD 1 : 1 Mio.) sowie Landnutzungsdaten (CORINE) und Vegetationsdaten (Potenzielle natürliche Vegetation, PNV). Dabei handelte es sich um freie und kostenlos verfügbare Daten. Die Ergebnisse waren mit deutlich über 90% für die beiden Naturräume des hiesigen Untersuchungsgebiets[15] sehr gut (QUÉNÉHERVÉ et al. 2016: 209). Auch die Vorhersagegenauigkeit von 81,82% für ganz Baden-Württemberg war vielversprechend (ebd.).

Landschaftsklassifikationen auf der mittel- bis großmaßstäbigen Ebene wurden bislang noch nicht mit BRT-basierten Methoden durchgeführt. Die Schwierigkeit liegt in der

[14] QUÉNÉHERVÉ et al. (2015, 2016) arbeiten mit den Naturräumen von MEYNEN & SCHMITHÜSEN (1953-1962).
[15] Dabei handelt es sich um die Naturräume „Voralpines Hügel- und Moorland“ mit 93,75% sowie „Donau-Iller-Lech-Platte“ mit 94,12% korrekt klassifizierten Pixeln.

enorm gestiegenen Anzahl möglicher Entscheidungsbäume auf der großmaßstäbigen Skalenebene. Diese sollen es ermöglichen, die Plausibilität der ermittelten OBTA-Klassen zu ermitteln. Eine solche Modellierung nach der Methodik von QUÉNÉHERVÉ et al. (2015, 2016) wäre im Anschluss an diese Arbeit wünschenswert. Die Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet könnten anschließend mit den hiesigen OBTA-basierten verglichen werden.

Support Vector Machines (SVM)

Support Vector Machines (SVM) werden auch als Stützvektoren bezeichnet. Sie stellen ein überwachtes, statistisches Klassifikationsverfahren dar, das ebenfalls auf dem Konzept des *machine learning* basiert. Es wurde von VAPNIK (1995, 1999) entwickelt. In der Folge wurde das Verfahren häufig in der Fernerkundung, z.B. zur Erkennung räumlicher Muster (*pattern recognition* – vgl. FOODY & MATHUR 2004) oder bei der Klassifikation der Oberflächenversiegelung eingesetzt (z.B. BACHOFER et al. 2009, ESCH et al. 2009).

Auch dieses Verfahren arbeitet mit Trainingsdaten. Ziel ist es, im n-dimensionalen Raum eine optimale Trennfläche zwischen den einzelnen (Landschafts-)Klassen zu finden (GUNN 1997, BURGES 1998). Diese wird über Kernel-Funktionen mit einem vordefinierten Suchradius beschrieben (GUNN 1997; GIDUDU et al. 2007, BACHOFER et al. 2009). Zunächst wird ein Regressionsmodell erstellt, welches den Zielwert der Testdaten aus den Attributen der Trainingsdaten ableitet (BACHOFER et al. 2009: 434). Dabei maximieren die Stützvektoren die Grenzflächen zwischen den angestrebten Klassen (BACHOFER et al. 2015: 86).

In einem zweiten Schritt wird das Modell auf den gesamten Datensatz übertragen und mithilfe der SVM für jedes Pixel der Zusammenhang zwischen der Zielklasse und den Eingangsparametern ermittelt. Dabei ermöglicht das Modell in einem iterativen Prozess sukzessive die Verbesserung der Klassifikationsergebnisse durch den Ausschluss der jeweils geringsten Zusammenhänge. Durch Differenzbildung zwischen den erwarteten Zielwerten und den Referenzdaten können einzelne Parameter angepasst werden (ebd.).

Zukünftig wären eine Anwendung dieses Verfahrens zur Landschaftsklassifikation im Untersuchungsgebiet sowie eine anschließende Gegenüberstellung mit den Ergebnissen dieser Arbeit und denen einer möglichen BRT-Modellierung ebenfalls interessant.

Klassenübergreifende Untersuchung von Landschaften – Landschaftsstrukturmaße

Landschaftsstrukturmaße (eng. *landscape metrics*) geben Gesamtaussagen über die „strukturellen Gegebenheiten“ einer landschaftlichen Raumeinheit (LANG & BLASCHKE 2007: 248). Sie stellen in der Praxis „ein gutes und rasch verfügbares Instrument [dar], um Landschaftswandel durch Nutzung zu erfassen“ zu können (LESER & LÖFFLER 2017: 187). Zum Einsatz kommen sie hinsichtlich Änderungen der „Landschaftsstruktur, Habitatqualität [und] Biodiversität“ (STEINHARDT et al. 2012: 195).

Landschaftsstrukturmaße wie der *Landscape Division Index* oder die *Effektive Maschenweite* (*Effective Mesh Size*, JAEGER 2000) geben die Wahrscheinlichkeit an, dass zwei beliebige Pixel zur gleichen Klasse gehören (LANG & BLASCHKE 2007: 258f.). Damit lassen sie Aussagen über die Fragmentierung einer Landschaft zu. *Shannon's Diversity Index* quantifiziert z.B. die Dominanz einer Klasse, indem er sensibel auf die Anzahl und Proportionalität der Klassen reagiert (vgl. WALZ et al. 2016: 284).

Diese globalen Analysewerkzeuge eignen sich für die hiesige Fragestellung nach Lage, Größe und Zuordnung einzelner Patches / Landformen nicht, weswegen sie auch nicht zur Anwendung gekommen sind.

Im Anschluss an diese Arbeit wäre es aber interessant und lohnend, die Struktur von Teillandschaften des Untersuchungsgebiets (z.B. Großlandschaften; JML, AML – jeweils westlicher und östlicher Teil) auf Basis der modellierten Patches mit Landschaftsstrukturmaßen zu untersuchen und anschließend miteinander zu vergleichen. So könnten Aussagen über Flächen, die von einem anthropogen indizierten Landschaftswandel betroffen sind, getroffen werden.

2.2.5 Habitatkarten – Klassifikationen mit anderem thematischen Schwerpunkt (z.B. KUTTNER et al. 2015)

Der hiesige Klassifikationsansatz betont die Landschaftsmorphologie. Andere Klassifikationsansätze setzen eigene thematische Schwerpunkte. Habitatkarten legen den Fokus stärker auf die bio- bzw. vegetationsgeographische Perspektive. Sie bilden unter anderem die Landnutzung / Landbedeckung (LULC) ab. KUTTNER et al. (2015) legten eine „high-resolution habitat distribution map" des südlichen Deutschlands und der Alpenländer vor. Die Datenbasis und Methodik stellen die Autoren als "resampling, harmonizing and merging of available high-resolution mapping and remote sensing data" vor (Ebd.: 18). Dazu dienten Landnutzungs-/Landbedeckungsdaten, Klimadaten und DGM aus unterschiedlichen Quellen:

- *DGM 25* – European Environment Agency EU-DEM 25 m
- *Hauptverkehrswege* – OpenStreetMap
- *Orte mit starker anthropogener Überprägung* – Corine Land Cover (2006)
- *Gras-/Buschflächen* – aus Fernerkundungsdaten in überwachter Klassifikation
- *Kiesbänke* (*gravel banks*) – auf Basis von Google Earth Daten am Bildschirm digitalisiert
- *Seen* – auf Basis der ECRINS-Datenbank der Europäischen Umweltagentur
- *Habitatklassen* – aus FFH-Untersuchungen.

KUTTNER et al. (2015) arbeiteten auf einer 25 x 25 m Raster-Basis. Zusätzlich flossen klimatische (Minimumtemperatur) und morphologische (Slope-, Aspect- und Höhenwerte) Da-

ten mit ein (Ebd.: 21ff.). In dieser klassischen GIS-Modellierung gingen KUTTNER et al. mehrschrittig vor und arbeiteten mit Overlaytechniken und Schwellenwerten. Allerdings verwendeten sie dabei keine objektorientierten Methoden.

Als Ergebnis präsentierten die Autoren eine hochaufgelöste, großmaßstäbige Habitatkarte (vgl. LESER & LÖFFLER 2017: 128) mit 19 Kategorien über eine Fläche von 240 000 km² bzw. über 383 Mio. Pixeln[16] (KUTTNER et al 2015: 22). Sie orientierten sich hierbei an den offiziellen Kategorien von CORINE und EUNIS. KUTTNER et al. entwickelten die verfügbare Datenbasis an Habitattypen in besagtem Raum auf der räumlichen Ebene konsequent weiter und schlossen eine wesentliche Datenlücke (Ebd.: 23ff.). Es bieten sich breite Anwendungsfelder von Habitatkarten in Verwaltung, Planung und Umwelt-/Naturschutz wie in den Fachdisziplinen Geographie, Biologie und Ökologie. So können sie bei der quantitativen Habitatabschätzung in Nationalparks, zur Risikoabschätzung für die Biodiversität einer Region oder zur Landschaftsbewertung herangezogen werden (KUTTNER et al. 2015: 26).

Die hiesige Arbeit stellt mit der Konzentration auf die Landschaftsmorphologie eine räumliche Grundlage für das Alpenvorland Oberschwabens bereit. Die Kombination dieser Landschaftsklassen mit den LULC-Daten und vegetationsgeographischen Fragestellungen, wie KUTTNER et al. sie anwenden, könnten neue Erkenntnisse für das Untersuchungsgebiet liefern. So könnten landschaftsgeschichtliche Einflüsse auf die LULC aufgezeigt werden (vgl. *Abb. 16*). Dazu müsste den unterschiedlichen räumlichen Maßstäben beider Untersuchungen Rechnung getragen werden, indem z.B. mit einer um die Eisrandlagen und Ost-West-Unterteilung modifizierten OBTA-Ebene 2 weitergearbeitet wird.

[16] Der Vergleich mit dem hiesigen Untersuchungsgebiet zeigt, dass die gesamte Habitatkarte von KUTTNER et al. ein knapp 80-mal größeres Gebiet umfasst (240 000 km² zu ca. 3 000 km²), die Zahl der analysierten Pixel beträgt jedoch nur gut dreimal so viele (383 Mio. zu 120 Mio.).

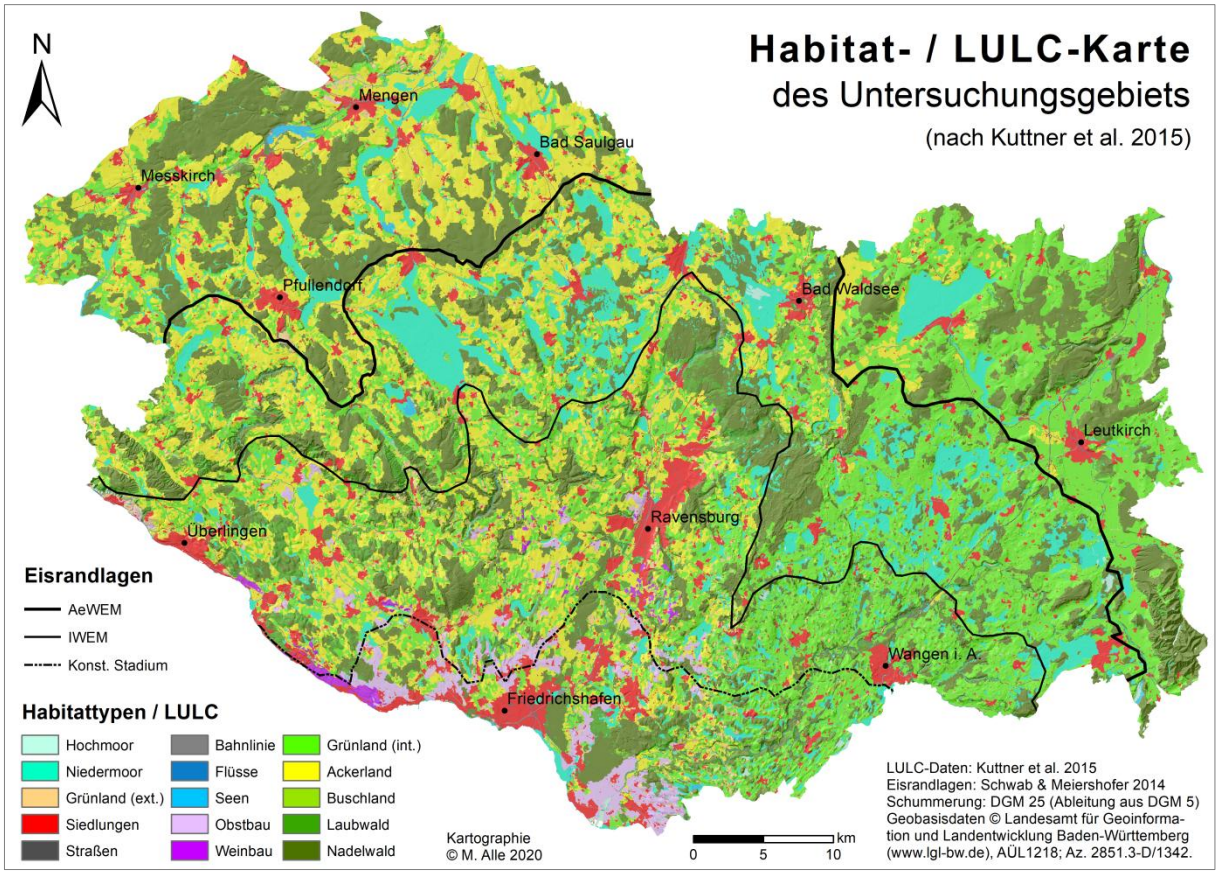


Abb. 16: **Habitat- / LULC-Karte des Untersuchungsgebiets.**
Datenbasis: Karte und Farbgebung von KUTTNER et al. (2015) über die Alpenländer und Süddeutschland. Hinzugefügt wurden die Schummerung, die drei Eisrandlagen und die größten Siedlungen. Die Klassenbezeichnungen wurden ins Deutsche übersetzt.
Auffällig sind die Niedermoorbedeckung der Becken nördlich der IWEM sowie die Waldbedeckung der Molasse-Berglandschaften und Endmoränenwälle. Deutlich sichtbar ist auch die Unterscheidung zwischen westlichem und östlichem Untersuchungsgebiet (vgl. *Abb. 13* sowie Kapitel 2.1.6) hinsichtlich der dominierenden Landnutzung (westlich: Ackerbau, östlich: Grünlandwirtschaft)

2.3 Digitale Reliefanalyse und Geomorphometrie

Geomorphometrie und Reliefanalyse bilden die Wissenschaft von der quantitativen Erfassung, Beschreibung, Analyse und Interpretation der Erdoberfläche (vgl. HORMANN 1971: 1f., PIKE 1995, PIKE et al. 2009: 3). Sie stellen einen Teilbereich der Geomorphologie dar. Ursprünglich entwickelte sie sich aus Teildisziplinen der Geowissenschaften, der Mathematik und der Informatik. Ziel der Geomorphometrie ist es meist, Landformen mittels abgeleiteter Oberflächenparameter zu detektieren (vgl. HORMANN 1971, MACMILLAN & SHARY 2009).

Erste theoretische Ansätze der Reliefanalyse wurden bereits Ende des 18. Jh. von Barnabé BRISSON, Carl Friedrich GAUß und Alexander von HUMBOLDT entwickelt (PIKE et al. 2009: 12). Lange Zeit konnten geomorphometrische Analysen nur von topographischen Karten aus, auf Basis von Isohypsen (= Linien gleicher Höhenlage, eng. *contour lines*) erfolgen. Dies bedeutet stets eine begrenzte methodische und räumliche Genauigkeit. Mit dem Aufkommen der digitalen Bearbeitung von Geodaten ab den 1960er Jahren, verbreitet erst ab Ende der 1980er Jahre, entwickelte sich jedoch eine regelrechte Revolution in der Geomorphometrie (PIKE et al. 2009: 19ff., 24; FLORINSKY 2012: 1f.).

Nun konnten ***Digitale Geländemodelle (DGM)*** in einem ***Geographischen Informationssystem (GIS)*** erstellt werden, welche dreidimensionale, digitale Geländeoberflächen repräsentieren. Das ermöglichte die Entwicklung der Digitalen Reliefanalyse bzw. der modernen ***Geomorphometrie*** (vgl. EVANS 1972, PIKE 1995, PIKE et al. 2009: 3ff., JENČO et al. 2009, FLORINSKY 2012: 2f.).

Die folgenden Teilkapitel beschäftigen sich zunächst mit den Datengrundlagen und Datenstrukturen von DGM, anschließend folgt die Erläuterung DGM-basierter geomorphometrischer Analysen mit der Ableitung verschiedener Derivate und Indizes.

2.3.1 Digitale Geländemodelle (DGM)

DGM sind eine diskrete Repräsentationsform der dreidimensionalen Geländeoberfläche. Sie bestehen entweder aus einem unregelmäßigen Dreiecksnetzwerk (TIN – Triangulated Irregular Network; vgl. HORMANN 1971: 5, 30ff.) oder, weit häufiger, aus einer regelmäßigen, auf quadratischen Pixeln basierenden Oberfläche. Näheres zur Datenstruktur findet sich weiter unten.

DGM lassen sich nach NELSON et al. (2009: 65ff.) auf drei verschiedene Weisen erstellen:

1. *Klassisch im Gelände*: Durch genau vermessene Punkte (z.B. per GPS), welche später zu einem Raster interpoliert werden.
2. *Aus topographischen Karten*: Aus Isohpysen, Tiefenlinien von Tälern, Hoch- und Tiefpunkten etc. bereits existierender topographischer Karten. (vgl. auch HENGL & EVANS 2009: 39f., FLORINSKY 2012: 36)
3. *Aus Fernerkundungsdaten*: Mittels aktiven Systemen (laserscanning- oder radarbasiert) wird die Erdoberfläche abgetastet. Aus den Reflexionsdaten wird ein Oberflächenmodell erzeugt und schließlich in ein Raster übersetzt (vgl. NELSON et al. 2009: 71).

Daneben besteht die Möglichkeit, DGM mittels photogrammetrischen Methoden aus optischen Daten zu erzeugen (vgl. ALBERTZ 2016). Dies kann satelliten- oder luftbild-gestützt erfolgen. In jüngerer Zeit bieten UAV (*Unmanned, Uninhabited* oder *Unpiloted Aerial Vehicle)*

neue Möglichkeiten, mit einer „Drohne“ relativ einfach und kostengünstig an Luftbilder zu gelangen (vgl. z.B. DOUMIT 2018).

Mittel- bis hochauflösende DGM[17] werden bereits seit längerem auf vielfältige Weise in der geowissenschaftlichen Forschung eingesetzt. Dazu gehören vor allem hydrologische Analysen, z.B. zur Überflutungsgefährdung (z.B. BATES & DE ROO 2000, ALLE et al. 2011, COVENEY & ROBERTS 2017, RIADI et al. 2018) oder zum Regenwassermanagement (z.B. ALLE et al. 2010, GAVIT et al. 2018). Sie werden in der Bodenerosionsmodellierung (z.B. MÄRKER et al. 2015, CHEN et al. 2018), der Modellierung von Massenbewegungen (z.B. GRUBER et al. 2009, HÖLBLING et al. 2015, ŽABOTA et al. 2018, MÄRKER et al. 2018) verwendet. Weiter kommen sie bei der Klimamodellierung (z.B. SCHWAB 2000, BÖHNER & ANTONIĆ 2009, SCHWAB 2015) und der meteorologischen Modellierung (z.B. EIMEIS & KNOCHE 2009) zur Anwendung. Dies sind nur einige (Haupt-)Forschungsfelder; die Möglichkeiten, DGM für (geo-)wissenschaftliche Fragestellungen einzusetzen sind noch weit größer.

Die Klassifikation von Landformen aus DGM hat mittlerweile eine gewisse Tradition. MACMILLAN & SHARY (2009), OLAYA (2009), HENGL & MACMILLAN (2009) sowie FLORINSKY (2016) geben einen grundlegenden Überblick über diese Thematik. Neuere, UAV-basierte Forschungen mit DGM führten z.B. MIDGLEY et al. (2018) zu rezenten Glazialformen, MÄRKER et al. (2018) zu Paleo-Landformen, DOUMIT & GHANEM (2021) zu Karstformen und NAKANO et al. (2014) zu vulkanischen Landformen durch.

In dieser Arbeit werden fernerkundungsbasierte DGM-Daten eingesetzt. Für den gesamten Untersuchungsraum standen vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL BW) produzierte und bereitgestellte DGM-5 Daten (5 x 5 m horizontale Auflösung, vertikale Genauigkeit ≤ 0,5 m) zur Verfügung. Diese wurden ursprünglich aus luftgestützten Laserscann-Daten eines DGM-1 abgeleitet. Für die unterschiedlichen räumlichen Skalen der Landformen und Landschaften wurden diese hochauflösenden Daten auf geringere räumliche Auflösungen transformiert (25 x 25 m und 90 x 90 m).

2.3.2 Geomorphometrische Analysen auf Basis von DGM

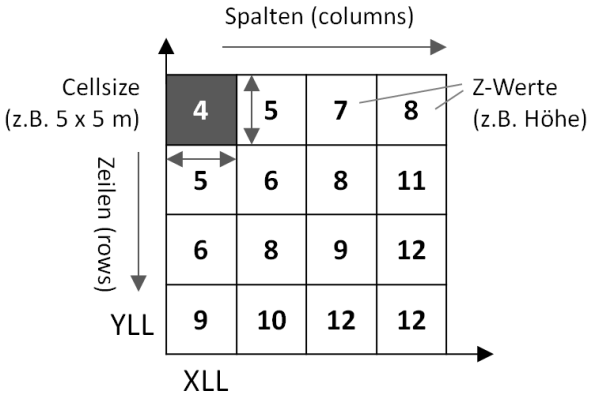
Der grundsätzliche Ablauf einer geomorphometrischen Analyse besteht aus fünf Schritten (vgl. PIKE et al. 2009: 6f.):

1. (Digitale) Erfassung der Höhenwerte (*surface sampling*)
2. Erstellung eines (digitalen) Oberflächenmodells auf Basis der Höhenwerte (*surface generation*)

[17] In diesem Fall werden Rasterweiten von 30 x 30 m oder geringer angenommen.

3. Fehlerkorrektur im Oberflächenmodell und die Umwandlung zum Digitalen Geländemodell, z.B. durch Filterung (*preprocessing*) (vgl. REUTER et al. 2009)
4. Ableitung von Oberflächenparametern und Landformen (*surface analysis*)
5. Anwendung der Oberflächenparameter und Landformen in Landschaftsplanung, Naturschutz, Hydrologischer Modellierung etc. (*application*).

Im Mittelpunkt der Digitalen Reliefanalyse / Geomorphometrie steht folglich das DGM. Hierbei handelt es sich in der Regel um einen Rasterdatensatz, mit Zeilen und Spalten quadratischer Pixel. Diese weisen eine fest definierte Kantenlänge auf (eng. *cellsize*) und ihre Raumposition wird exakt abgespeichert (X- / Y-Koordinaten) (PIKE et al. 2009: 5f., 9; FLORINSKY 2012: 7f.). Die dritte bereitgestellte Information besteht aus dem Höhenwert (Z-Wert), welcher ebenfalls für jedes Pixel abgespeichert ist. *Abb. 17* verdeutlicht dies am Beispiel eines einfachen Rasters mit der zugehörigen ASCII-Codierung der gespeicherten Raum-Informationen.




```
ncols 4
nrows 4
xllcorner 3509000
yllcorner 5291000
cellsize 5
nodata_value -9999
4 5 7 8
5 6 8 11
6 8 9 12
9 10 12 12
```

Abb. 17: **Raster-Darstellung und zugehörige ASCII-Codierung**.
Links: orthogonales Raster eines DGM aus 4 x 4 Pixeln. Diese haben eine Kantenlänge von jeweils 5 m. Die Zahlen innerhalb der Pixel symbolisieren die Z-Werte (nach PIKE et al. 2009: 9).
(XLL bzw. YLL steht für X- bzw. Y-Wert am äußersten unteren linken Pixel – LL ≙ lower left.)
Rechts: die entsprechende ASCII-Codierung des linken Rasters.

Mit den DGM-Informationen *Geländehöhe, Position im Raum* und *Nachbarschaft* und lassen sich räumliche, morphologische Zusammenhänge zwischen den Pixeln mit algebraischen Operationen beschreiben (PIKE et al. 2009: 10f.).

Dazu gibt es mittlerweile eine Fülle von Ableitungen bzw. Derivaten der durch das DGM repräsentierten Oberfläche. Dabei stellt die ***Hangneigung*** (eng. *slope*; "Streckenänderung in einem Punkt") die erste Ableitung dar (PIKE et al. 2009: 10f., FLORINSKY 2012: 10ff.). Als zweite Ableitung wird die ***Krümmung*** (eng. *curvuature*; "Änderung der Streckenänderung in einem Punkt") berechnet (OLAYA 2009: 149ff.). JENČO et al. (2009) stellen unter anderem Ableitungen bis zum vierten Grad vor.

Geomorphometrische Analysen lassen sich auf der lokalen bzw. Pixelebene als auch auf regionaler Ebene durchführen. Bei ersteren geht es bei sog. ***lokalen morphometrischen Variablen*** (OLAYA 2009: 142ff.) um die direkte Umgebung eines Pixels. Hierbei kommen in der Regel gleitende Suchfenster (eng. *mooving windows*) mit Filter-Kernels zum Einsatz (Ebd.: 145f.). Das heißt, es wird immer ein zentrales Pixel, das sogenannte Fokalpixel, betrachtet, welches aufgrund seiner Beziehungen zur unmittelbaren Nachbarschaft bewertet wird. In der Regel besteht ein Kernel aus 3 x 3 Pixeln. Die Nachbarschaftsbeziehungen des sich in der Mitte befindlichen Fokalpixel zu seinen direkten 8 Nachbarn bestimmen den jeweiligen Wert. Das gleitende Suchfenster tastet zeilenweise den Untersuchungsraum ab. Kernel-Verfahren stammen ursprünglich aus der Bildanalyse und werden beispielsweise in der Fernerkundung zur Mustererkennung oder für die Bildkorrektur eingesetzt (ALBERTZ 2007: 105ff., LILLESAND et al. 2008: 499ff.).

Die ***regionalen morphometrischen Variablen*** (OLAYA 2009: 163ff.) betrachten einen größeren Ausschnitt des DGM. Sie dienen meist dazu, hydrologische Zusammenhänge zu beschreiben. Die bekanntesten sind das hydrologische Einzugsgebiet (= *catchment area*), die Fließlänge (= *flow path length*) oder die Hanglänge (= *slope length*) (ebd.). In dieser Arbeit werden ausschließlich lokale morphometrische Variablen eingesetzt.

Die folgenden Abschnitte erläutern die maßgeblichen, in dieser Arbeit verwendeten Derivate und Indizes ausführlich.

2.3.3 Direkte Ableitungen aus DGM

Hangneigung (Slope, Gradient)

Die Hangneigung als 1. Ableitung der Höhenwerte fungiert als Steigungsänderung zweier benachbarter Pixel. Sie wird klassisch in [%] angegeben (TRAVIS et al. 1975; OLAYA 2009: 144), einige Programme erlauben aber auch die Berechnung der Hangneigung in [°].

Slope wird durch den Winkel zwischen einer geneigten und einer waagrechten Bezugsfläche ausgedrückt und in einem dreidimensionalen Raster-Koordinatensystem als maximale Änderungsrate der benachbarten Höhenwerte beschrieben (DE SMITH et al. 2007: 267, OLAYA 2009: 144):

$$(1) \qquad Slope = arctan\,(|\nabla \bar{Z}|), \qquad \text{mit } \nabla \bar{Z} = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}\right).$$

Die Standardabweichung einer DGM-Oberfläche korreliert stark mit der Hangneigung (OLAYA 2009: 158). Diese Arbeit verwendet jedoch ausschließlich die Hangneigung. In *Abb. 18* werden eine DGM 5-Oberfläche und die daraus abgeleitete Hangneigung gegenübergestellt.

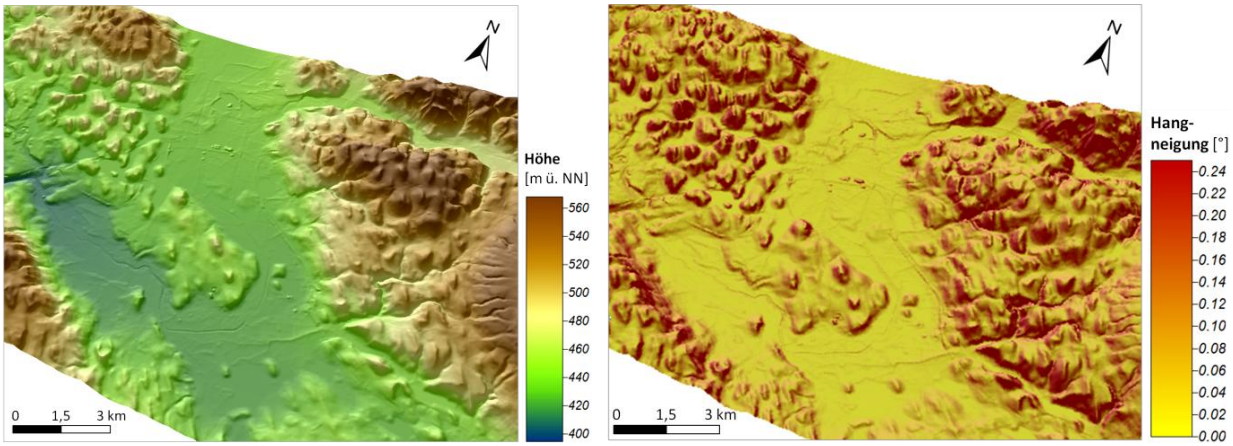


Abb. 18: **DGM 5** (links) und **Slope** (rechts) für eine typische Landschaft im JML. (Standort: Blick ins *Salemer Becken* auf Höhe Markdorf-Salem – Schrägansicht ca. 45°, Blick aus SSO, 5-fach überhöht, jeweils mit einer Geländeschummerung überlagert.) Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

Krümmung (Curvature)

Als 2. Ableitung des DGM wird die sog. Krümmung oder Curvature („Neigung der Neigung“) berechnet. Vereinfacht ausgedrückt, beschreibt die Krümmung die Abweichung einer Kurve von einer Geraden. Für jeden Punkt einer Oberfläche wird so die lokale Abweichung der Geländeoberfläche (≙ Kurve) von der gedachten Geraden der Hangneigung angegeben. Numerisch lassen sich die Krümmungswerte jeweils mittels des Inversen des Radius eines Kreises ermitteln, welcher im betreffenden Punkt an die Kurve anschmiegt. Je größer ein solcher Radius ist, desto schwächer ist die Krümmung an der betreffenden Stelle (vgl. *Abb. 19*). OLAYA (2009: 150) gibt eine einfache Formel mit 1/R für die Curvature an. Positive Werte bedeuten hier konvexe Formen (Kuppen oder Rücken), wobei negative Werte auf konkave Strukturen (Mulden, Täler oder Klüfte) hinweisen (ebd.).

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, die Krümmung einer Oberfläche zu beschreiben. OLAYA (2009: 149-153), JENČO et al. (2009: 62-66) sowie FLORINSKY (2016: 9-13), geben eine ausführliche Übersicht über die verschiedenen Versionen. Die *Maximum* bzw. *Maximal Curvature* (OLAYA 2009: 150f., JENČO et al. 2009: 65f., FLORINSKY 2016: 12ff.) kam in dieser Untersuchung zum Einsatz, deswegen konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf diese Ableitung.

FLORINSKY (2016: 12) beschreibt die ***Maximal Curvature*** (k_{max} oder $MAXC$) nach GAUß (1828) als „a curvature of a normal section with the highest value of curvature among all normal sections of the topographic surface at the given point“ (vgl. *Abb. 19*). Positive Werte von k_{max} beschreiben Rücken, während negative Werte auf geschlossene Senken hinweisen. Um selbst kleine Erhebungen oder Mulden auf der Geländeoberfläche, etwa bei End-

moränen zu finden, eignet sich die Maximal Curvature am besten. Dies liegt daran, dass hier konvexe und konkave Strukturen besonders betont werden.

In *Abb. 19* wird links das Modell für die grundsätzliche Formulierung der Krümmung dargestellt. Rechts werden die räumlichen Zusammenhänge der *Maximal Curvature* gezeigt. Diese wird über BB′ formuliert.

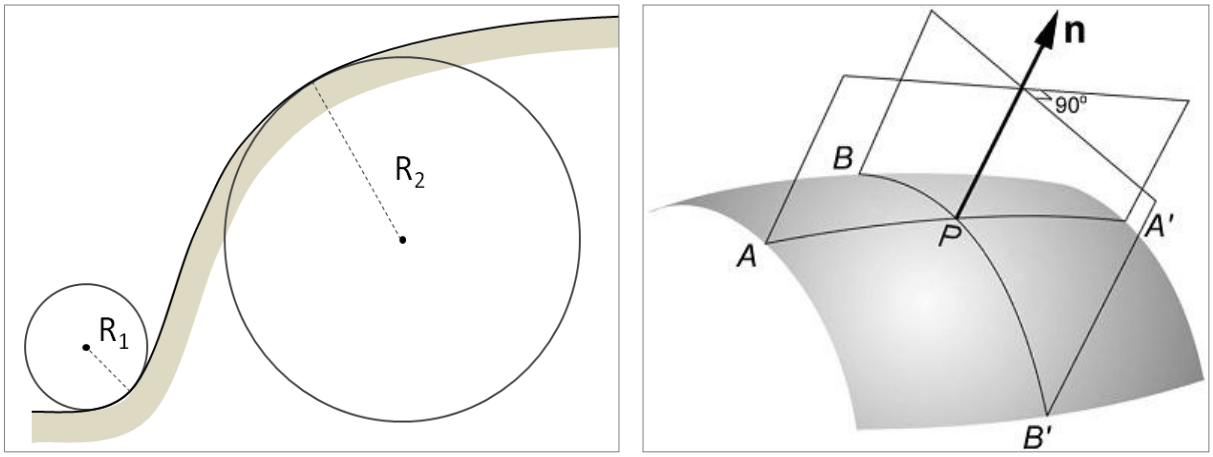


Abb. 19: **Veranschaulichung des Konzepts der Krümmung**.
Links: Allgemeines Modell der *Krümmung / Curvature* im Gelände (nach OLAYA 2009: 150)
Rechts: Theoretisches Modell der *Maximal Curvature* mit dem größten Krümmungs-Wert am Punkt P. (aus FLORINSKY 2017: 727)

MAXC lässt sich nach SHARY (1995) als Summe aus *Mittlerer Krümmung* (*MEANC*) und *Unsphericity Curvature* (*UNSPHC*) darstellen (OLAYA 2009: 153f., FLORINSKY 2017: 735f.). Sie wird wie folgt berechnet:

(2) $$MAXC = MEANC + UNSPHC$$

mit

(3) $$UNSPHC = \frac{\sqrt{\left(r \cdot \sqrt{\frac{1+q^2}{1+p^2}} - t \cdot \sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}}\right)^2 \cdot (1+p^2+q^2) + \left(p \cdot q \cdot r \cdot \sqrt{\frac{1+q^2}{1+p^2}} - 2 \cdot s \cdot \sqrt{(1+q^2) \cdot (1+p^2)} + p \cdot q \cdot t \cdot \sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}}\right)^2}}{2 \cdot (1+p^2+q^2)^{\frac{3}{2}}}$$

und

(4) $$MEANC = \frac{PROFC + TANGC}{2}.$$

Als *MEANC* wird die Mittlere Krümmung angenommen, welche ihrerseits über die *Profile Curvature* (= *PROFC*) und die *Tangential Curvature* (= *TANGC*) berechnet wird.

Dabei sind *PROFC* und *TANGC* wie folgt definiert:

(5) $$PROFC = -\frac{p^2 \cdot r + 2 \cdot p \cdot q \cdot r \cdot s + q^2 \cdot t}{(p^2+q^2) \cdot \sqrt{(1+p^2+q^2)^3}}$$

und die *Tangential Curvature* als

(6) $$TANGC = -\frac{p^2 \cdot r - 2 \cdot p \cdot q \cdot s + q^2 \cdot t}{(p^2 + q^2) \cdot \sqrt{1 + p^2 + q^2}}.$$

Dabei sind p und q die räumlichen Ableitungen ersten Grades (vgl. OLAYA 2009: 146) mit

(7) $$p = \frac{\partial z}{\partial x}$$

und

(8) $$q = \frac{\partial z}{\partial y}.$$

Die Variablen r, s und t werden wie folgt aus der DGM-Oberfläche berechnet (vgl. OLAYA 2009: 151):

(9) $$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \qquad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \qquad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}.$$

In *Abb. 20* werden die DGM-Oberfläche und die Maximal Curvature desselben Landschaftsausschnitts gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass sich die Maximal Curvature gut zur genauen Erfassung der charakteristischen Kuppen-und-Kessel-Oberfläche der *Endmoränen* eignet.

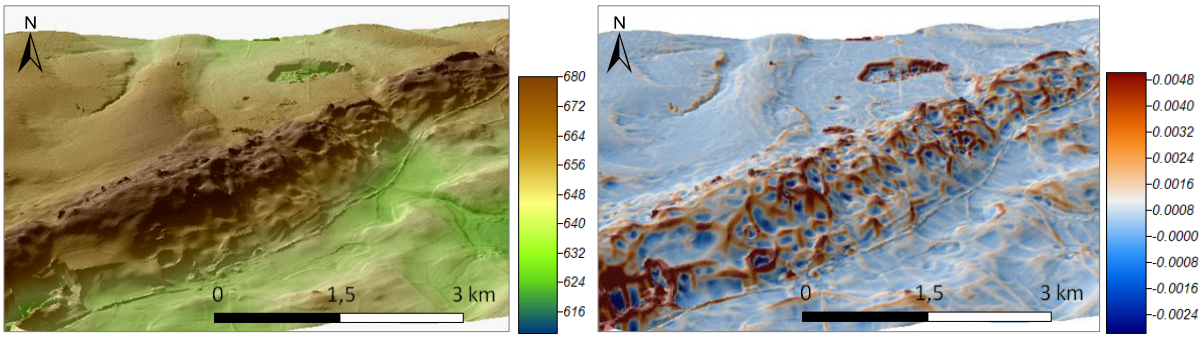


Abb. 20: **Detailansicht: Kuppen-und-Kesselförmige Landform (Endmoräne).**
Abgebildet werden die **DGM 5-Oberfläche** [m ü. NN] (links) und die **Maximal Curvature** [-] (rechts).(Endmoräne zwischen Ostrach und Hoßkirch, vgl. *Abb. 6* – Blickrichtung nach Norden in Schrägansicht aus ca. 35° Neigung; 5-fache Überhöhung, jeweils mit einer Geländeschummerung aus dem DGM 5 überlagert.
Der hier abgebildete Übergang zwischen kuppig-hügeliger Jungmoränenlandschaft (links unten) und flachwelliger Altmoränenlandschaft (rechts oben), getrennt durch den markanten Endmoränenzug wird bereits im DGM (links) deutlich. Die charakteristische, kleinräumig sehr unruhige Struktur der Kuppen-und-Kessel-Oberfläche der Endmoräne wird durch die Maximal Curvature noch verstärkt hervorgehoben.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de) AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

2.3.4 Weitere DGM-basierte Indizes

Auch DGM-basierte, räumliche Indizes basieren auf mathematischen Funktionen der DGM-Oberfläche selbst oder deren Ableitungen (z.B. *Slope* oder *Curvuature*). Auch die in dieser Arbeit eingesetzten weiteren Indizes beziehen die direkte Nachbarschaft eines Pixels mit ein und machen Aussagen über die jeweilige Form des betrachteten Landoberflächen-Ausschnitts. Ihre Werte können ebenfalls positiv oder negativ sein.

Allgemein werden sie bei geomorphometrischen Analysen eingesetzt. Dabei stellen sie häufig hydrologische Variablen, wie den *Stream Power Index (SPI)* (vgl. MOORE et al. 1991), *Topographic Wettness Index (TWI)* (vgl. BEVEN & KRIBY 1979) oder die *Slope Length* (vgl. OLAYA 2004), dar. Mit ihnen lassen sich z.B. Erosionsrisiken zu berechnen (vgl. COGNOSCENTI et al. 2016, MÄRKER et al. 2018) oder sie kommen bei der klassischen hydrologischen Modellierung des Oberflächenabflusses zum Einsatz (vgl. LI et al. 2017). Weitere Einsatzmöglichkeiten werden weiter unten besprochen.

HENGL et al. (2003) schlagen zur Charakterisierung von Oberflächenformen den *Shape Complexity Index (SCI)* vor, welcher die Ovalität eines Polygons bzw. einer Landform angibt (vgl. OLAYA 2009: 162f.). Dabei wird das DGM-Raster zunächst in eine Isohypsen (Höhenlinien) basierte Darstellung umgewandelt. Hieraus werden die geschlossenen Isohypsen als Landform-Polygone extrahiert und diese nach ihrem SCI-Wert klassifiziert (HENGL et al. 2003: 20f.).

Diese Arbeit konzentriert sich auf zwei weitere Indices, welche ohne die bei der Berechnung des SCI anfallenden Zwischenschritte verwendet werden können. Dabei handelt es sich um den *Topographic Position Index (TPI)* und den *Terrain Ruggedness Index (TRI)*. Sie werden in den folgenden Teilkapiteln vorgestellt.

Topographic Position Index (TPI)

Der *Topographic Position Index (TPI)* nach GUISAN et al. (1999) (vgl. dazu auch WEISS 2001 und JENNES 2006) benötigt für seine Berechnung – wie die Krümmungen auch – lediglich ein DGM. Er gibt an, ob es sich beim Fokalpixel um einen lokalen Hochpunkt oder Tiefpunkt in Relation zu den unmittelbar benachbarten acht Pixeln handelt (JENNES 2006: 4). Dazu wird die Geländehöhe des Fokalpixels mit der durchschnittlichen Höhe der Nachbarpixel verglichen. WEISS (2001) definiert dies wie folgt:

$$TPI = x_0 - \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\right) + 0{,}5 \qquad (10)$$

mit x_0 als Höhenwert des Fokalpixels und $\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\right)$ als mittlere Höhe aller Nachbarpixel.

Dabei gibt der *TPI* den Index-Wert für das untersuchte Fokalpixel an. Die DGM-Nachbarschaft muss speziell definiert werden. Sie kann z.B. als einfacher, selbstwählbarer

Kreisradius um das Fokalpixel bestehen. Einen umfassenden Überblick hierzu und weitere Möglichkeiten der Nachbarschafts-Definition liefert JENESS (2006: 29). Es bietet sich an, den Radius der Größe und dem Ausmaß der Landform anzupassen (EVANS 2012: 97f.). So sollte für die Klassifikation von kuppig-hügeligen Landformen einer Glaziallandschaft eine mittlere Ausdehnung der Rücken ermittelt und als Radius gewählt werden.

In *Abb. 21* wird die Funktionsweise des *TPI* (vgl. WEISS 2001, JENESS 2006: 29) verdeutlicht.

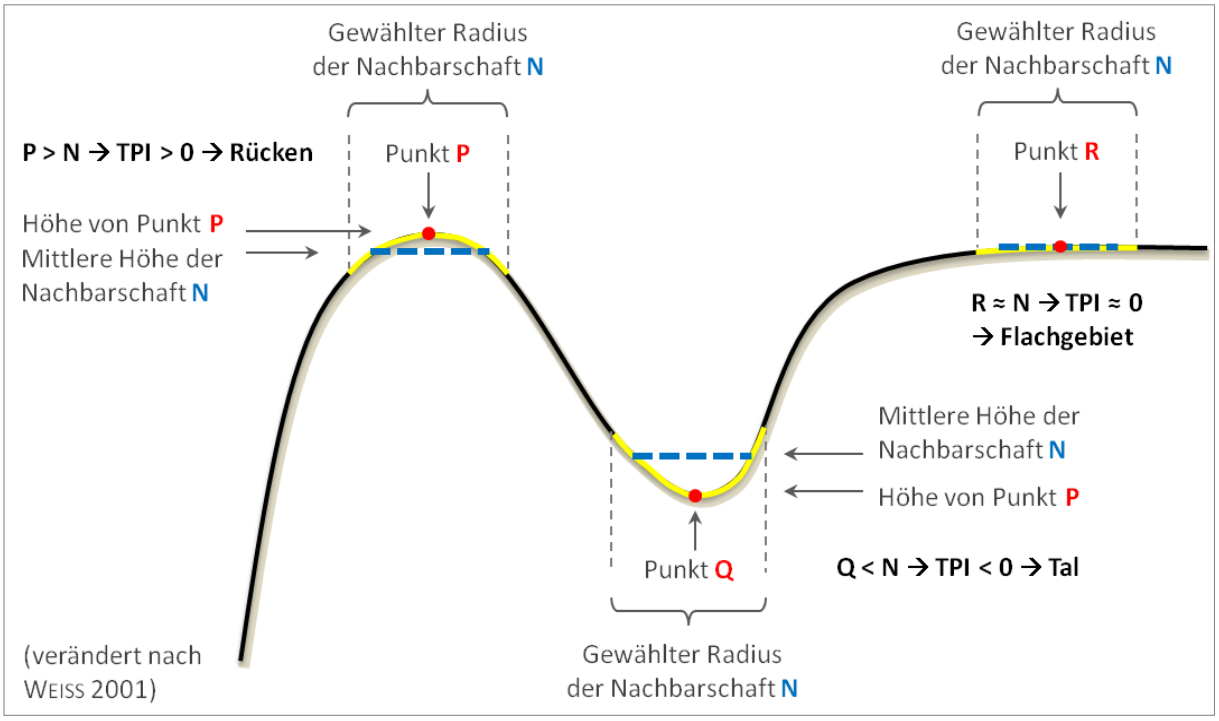


Abb. 21: **Funktionsweise des *TPI*.**
Die Relation der jeweiligen Höhenlage der Punkte P, Q, R entscheidet über die jeweilige landschaftliche Grundform (Rücken, Tal oder Flachgebiet).

Grundsätzlich gilt für den *TPI*:

TPI ≈ 0	→	Flachbereiche oder Gebiete mit konstanter Steigung
TPI > 0	→	Rücken bzw. Hochpunkte
TPI < 0	→	Täler bzw. Tiefpunkte

Zum Einsatz kommt der *TPI* in erster Linie bei der Landform-Klassifikation (ILIA et al. 2013, SILVA et al. 2017, SKENTOS 2018a). In seiner Funktion modifiziert als *Bathymetric Position Index (BPI*, vgl. LUNDBLAD et al. 2006, MOSALIK et al. 2018) wird er auch zur Klassifikation von unterseeischen Formen verwendet. Ebenso wird er als Basisindikator für die Rekonstruktion von Paläo-Landschaften (vgl. BACHOFER et al. 2015, MÄRKER et al. 2018) eingesetzt.

Der *TPI* eignet sich sehr gut zur Erfassung von kuppig-hügeligen Glazialformen (insbesondere von Drumlins und kuppig-hügeligen Formen), da er deren Grenzen sehr gut repräsentiert. Diese Vollformen lassen sich von ihrer Umgebung durch den Übergang von konvexen zu konkaven Bereichen abgrenzen (EVANS 2012: 100ff., JORGE & BRENNAND 2017: 149). Der Wechsel von deutlich positiven zu sehr geringen bzw. negativen *TPI*-Werten vollzieht das anschaulich nach (vgl. *Abb. 22* links).

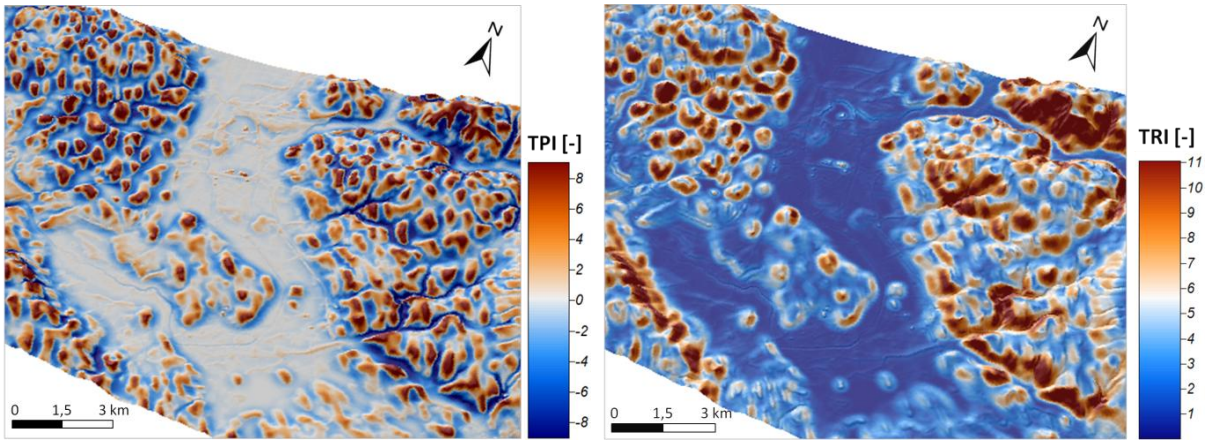


Abb. 22: ***TPI*** (links) und ***TRI*** (rechts) für eine typische Landschaft im JML. kuppig-hügelige Landformen (u.a. Drumlins) und Beckenbereiche. Standort: Blick ins Salemer Becken auf Höhe Markdorf-Salem – Schrägansicht aus 30° Neigung, 5-fach überhöht, jeweils mit einer Geländeschummerung überlagert
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

Terrain Ruggedness Index (TRI) – Geländerauheit

Der *TRI* nach RILEY et al. (1999) beschreibt die räumliche Heterogenität einer Landoberfläche über die Rauheit. Dazu wird der Höhenunterschied der benachbarten Pixel betrachtet. RILEY et al. (1999: 24) definieren den TRI als die Quadratwurzel der Summen der quadrierten Höhenunterschiede zwischen einem Pixel und seinen direkten Nachbarn. Er weist somit nur positive Werte auf.

(11) $$TRI = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_0 - x_i)^2}$$

mit x_0 als Höhenwert des Fokalpixels und x_i als Höhenwert eines Nachbarpixels.

Wie beim *TPI* kann auch hier der Radius frei gewählt werden, wobei sich hier kleinere Werte empfehlen, da die kleinräumige „Unruhe“, z.B. bei einer Kuppen-und-Kessel-Landschaft im Bereich von Endmoränenwällen ansonsten verloren gingen. Im Vergleich zum *TPI*, der einzelne Landformen sehr gut abbildet, eignet sich der *TRI* besser dazu, Landformen zu detektieren, welche wie Endmoränen aus einem Muster an Einzelformen (Mulden und Rücken) bestehen (vgl. *Abb. 22* rechts).

Die Charakterisierung der Rauheit von Landoberflächen mittels des *TRI* wird heute für verschiedenste Zwecke angewendet. Die jüngere Literatur konzentriert sich hauptsächlich auf den Einsatz des *TRI* bei der Vegetations- (ESCOBAR-FLORES et al. 2018, MILLARD & RICHARDSON 2018) und Habitatmodellierung (POESSEL et al. 2018, SCHOLER et al. 2018). STEPIŠNIK et al. (2017) charakterisieren mit Hilfe des TRI die Landschaftsdiversivität (*geodiversivity*) in einem Karstgebiet Sloveniens. Weiter wird er in der Bodenkunde (vgl. HEUNG et al. 2016, DORNIK et al. 2017), zur Berechnung der Schneeverteilung für die Klimamodellierung (vgl. PEDERSEN 2017) und bei hydrologischen Analysen (vgl. LI et al. 2017, VASCONCELOS et al. 2017) verwendet. Eines der Hautanwendungsfelder ist jedoch die geomorphologische Reliefanalyse und Kartierung (vgl. BARBARELLA et al. 2017, KAUSHAL et al. 2017, PAVANO et al. 2017, SKENTOS 2018a, 2018b).

Zur Ermittlung der Oberflächenrauheit existiert heute eine ganze Zahl von weiteren Möglichkeiten. Sie beruhen auf dem gleichen Prinzip wie beim *TRI*: Für einen ausgewählten Bereich einer Landoberfläche wird der Höhenunterschied in Relation zur Flächengröße gesetzt. Hohe Werte sprechen für eine unruhige Oberfläche wobei geringe Werte auf eine glattere, konformere Oberfläche schließen lassen. Auch hier ist auf die Pixelweite sowie die Kernelgröße zu achten (OLAYA 2009: 158).

2.4 Geographische Objektbasierte Bildanalyse (GEOBIA)

Die in dieser Arbeit eingesetzte Objektbasierte Geländeanalyse (OBTA – Object-Based Terrain Analysis) ist eine spezielle Form der Geographischen Objektbasierten Bildanalyse (GEOBIA – Geographic Object-Based Image Analysis, häufig auch nur als OBIA bezeichnet). Sie stammt ursprünglich aus der Fernerkundung (BLASCHKE et al. 2014: 180) und wird seit etwa zwei Jahrzehnten als erfolgreiche Alternative zur pixelbasierten Klassifikation angewendet (ebd.).

Ursprünglich wurden die spektralen Signaturen einzelner Pixel mit statistischen Operationen untersucht und klassifiziert. Dieses „*Per-Pixel*"-Paradigma (BLASCHKE et al. 2014: 180) lieferte jedoch nur bei geringeren räumlichen und spektralen Auflösungen der Fernerkundungsdaten akzeptable Ergebnisse. In semantischer Hinsicht weisen pixelbasierte Klassifikationen generell Einschränkungen auf: Geo-Objekte können so nur bedingt erfasst werden, ihre Form, Kontext und Nachbarschaftsbeziehungen bleiben hierbei unberücksichtigt (vgl. BLASCHKE & STROBEL 2001).

Durch die technische Entwicklung erhöhte sich ab Ende der 1990er Jahre die räumliche Auflösung der Fernerkundungsdaten enorm, womit die Nachteile des pixel-basierten Ansatzes überdeutlich wurden. In der Folge wurde dieser Ansatz vermehrt kritisiert (z.B. FISCHER 1997, BLASCHKE & STROBEL 2001, BURNETT & BLASCHKE 2003). Neue Technologien in

der Bildanalyse machten einen Paradigmenwechsel in der Fernerkundung hin zu einer Konzentration auf die zu klassifizierenden Geo-Objekte und räumliche Muster möglich (BLASCHKE & STROBEL 2001, BLASCHKE et al. 2014: 180).

Bei der GEOBIA wird vorab ein ontologisches Modell erstellt. Dabei werden relevanten Geo-Objekte definiert. Auf dieser Basis werden anschließend die Geo-Objekte mit den Inputdaten erfasst und klassifiziert (HOFFMANN et al. 2006, EISANK et al. 2010: 1684, GU et al. 2017). Die Ontologie der Geo-Objekte beschäftigt sich mit deren Form, räumlichen Zusammenhängen und Strukturen. Diese müssen erkannt, abstrahiert und formuliert werden. So dient die Ontologie der Geo-Objekte einerseits als Grundlage für die GEOBIA (BLASCHKE et al. 2014: 187). Andererseits fungiert sie auch während des gesamten Analyseprozesses als Leitfaden für die nächsten Schritte der (Re-)Segmentierung und (Re-)Klassifikation auf verschiedenen möglichen Hierarchieebenen (ebd.).

Als erster maschineller Schritt erfolgt die Segmentierung. Hier werden zunächst benachbarte, ähnliche Pixel nach statistischen (*Muster*), semantischen (*Nachbarschaft*) und geometrischen (*Größe* und *Form*) Parametern zu Segmenten bzw. Geo-Objekten zusammengefasst (EISANK et al. 2010: 1684). In einem weiteren Schritt können diese dann weiter aggregiert, neu segmentiert oder direkt klassifiziert werden (BLASCHKE et al. 2014: 186f., vgl. *Abb. 14)*. Am Schluss der Klassifikation steht die endgültige Zuordnung der relevanten Geo-Objekte zu aussagekräftigen Klassen. Diese können anschließend in GIS weiterverarbeitet werden (BLASCHKE et al. 2014: 186). Dieses Vorgehen orientiert sich stark am Prozess der menschlichen Wahrnehmung (LANG 2008; BLASCHKE et al. 2014: 185).

Die zugehörigen Algorithmen werden chronologisch in einem sogenannten „rule set" formuliert und gespeichert (vgl. Kapitel 3.2.3). Sie berücksichtigen neben den oben genannten Zusammenhängen auch die vorliegende räumliche Repräsentation der Objekte (vgl. GU et al. 2017).

2.4.1 Object Based Terrain Analysis (OBTA) – semiautomatisierte, objektorientierte, morphologisch basierte Geländeanalyse

Durch den oben beschriebenen ontologischen Ansatz der OBIA kommt diese Methode der menschlichen Wahrnehmung von Objekten deutlich näher als die isolierte Betrachtung von Einzelpixeln (BURNETT & BLASCHKE 2003). Dies basiert auf der Annahme, dass einzelne Klassen in der Regel in einen größeren semantischen Zusammenhang zu Nachbarklassen sowie ihrer Umwelt als Ganzes eingebettet sind. Dabei spielen die regionen-basierten Segmentationsansätze die entscheidende Rolle (MINAR & EVANS 2008, MACMILLAN & SHARY 2009). Gerade die glaziale Landschaftsformung zieht eine „ineinander verschachtelte, hierarchische Struktur" (EISANK et al. 2011: 1) der Landschaft nach sich, welche sich semiautomatisiert und objektorientiert als vorteilhaft erweist (ebd.).

So kann beispielsweise ein einzelner Drumlin zunächst aufgrund seiner zuvor formulierten geometrischen Eigenschaften als solche Entität erfasst und klassifiziert werden. Anschließend kann eine Region mit vielen benachbarten Drumlins und kuppig-hügeligem Relief über Till aufgrund dieser Nachbarschafts- und Kontextinformationen zu einer *kuppig-hügeligen Till-Landschaft* zusammengefasst werden. Auf einer weiteren Abstraktionsebene können *kuppig-hügelige* und *flachwellige Till-Landschaft* sowie *Endmoränen*-Landschaften ebenfalls aggregiert werden, da sie als Till-Landschaften aus demselben Material bestehen, eine ähnliche Entstehungsgeschichte aufweisen und verwandte Oberflächenformen ausbilden.

Yu et al. (2015) klassifizieren glaziale Vollformen wie Drumlins semiautomatisiert, indem sie eine auf Schwellenwerten basierende Abgrenzung mit Hilfe der Krümmung vornehmen (die sogenannte *Curvature Based Relief Separation*, CBRS). Eisank et al. (2014) nutzen zur Drumlinklassifikation objektbasierte Methoden. Sie segmentieren mit der *Multiresolution Segmentation* (MRS, vgl. Batz & Schäpe 2000), welche die besten Ergebnisse bringt (Eisank et al. 2014: 452). D'Oleire-Oltmanns et al. (2013) klassifizieren Drumlin-Segmente im bayrischen Alpenvorland objektorientiert in vier verschiedenen Größenordnungen (ebd.: 948) basierend auf Form- und Nachbarschaftsparametern (ebd.). Dabei erreichen sie akzeptable Ergebnisse von über 87% Gesamtübereinstimmung (*detection rate*, D'Oleire-Oltmanns et al. 2013: 950). Auch die OBTA-basierte Drumlins-Klassifikation Saha et al. (2011) weist vergleichbare Ergebnisse auf. Einige der hier genannten Herangehensweisen wurden auf die hiesige Klassifikation übertragen und angewendet (vgl. Kapitel 3.2.3).

3 Empirie: Landschaftsklassifikation in Oberschwaben

Im folgenden Kapitel wird die OBTA-basierte Prozedur zur digitalen, semiautomatisierten Landschaftsklassifikation für das Untersuchungsgebiet vorgestellt. Zunächst geht es um die verschiedenen Eingangsparameter. Anschließend werden das Verfahren, sein Klassifikationskonzept und die Parametrisierung erläutert.

3.1 Datengrundlagen

Als wichtigste Grundparameter dienen die Morphologie bzw. Oberflächengestalt der Landschaft und ihr jeweiliger lithologischer Untergrund[18]. Diese Geoinformationen prägen die mit dem menschlichen Auge erkennbare Gestalt der Landschaft (vgl. RENNERS 1991: 29, SEYFRIED et al. 2019: 23) und machen zu einem Großteil deren Charakter aus. Besonders im süddeutschen Alpenvorland spielen sie eine entscheidende Rolle für die Landschaftsklassifikation (RENNERS 1991: 87, BECKENBACH 2016: 19f.).

Die Eingangsparameter des Landschaftsmodells sind meist Ableitungen aus den oben genannten Grundparametern. Sie flossen flächenhaft in die Klassifikationen ein. Zusätzlich wurden landschaftsgeschichtliche Daten (drei markante Eisrandlagen der Würmkaltzeit) und hydrologische Informationen (Verlauf von Flüssen, EHWS) einbezogen. Zuletzt flossen ausgewählte Landnutzungsdaten ein. Dabei handelt es sich um Räume mit massiven Veränderungen der Landoberfläche in Form von anthropogenen Auf- und Abtragsflächen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass das Landschaftsmodell bewusst aus einer überschaubaren Anzahl an Eingangsdaten aufgebaut wurde, um eine spätere potenzielle Übertragbarkeit auf andere Regionen zu erleichtern. Auch soll so die Übernahme großer Teile der Modellstrukturen in Lernmodule (vgl. Kapitel 5) ermöglicht werden.

3.2 OBTA-basierte Modellierung von glazialen Landformen und Landschaften

Bei der Klassifikation wurden in einem ersten Schritt mittels eines OBTA-basierten Verfahrens (vgl. VON ASSELEN & SEIJSMONBERGEN 2006, DRĂGUŢ & BLASCHKE 2006: 330) Oberflächenstrukturen aus DGM unterschiedlicher Rasterweite (5 m, 25 m und 90 m) detektiert. Dabei wurden mit der Software *eCognition Developer 9* die Ausgangspixel zunächst auf Basis

[18] Damit sind die verfestigten und unverfestigten Sedimente gemeint, welche in *Kapitel 2.1.3* erläutert werden.

von statistisch ähnlichen Gruppen, zu Segmenten zusammengeführt. Diese wurden anschließend anhand verschiedener Schwellenwerte zu Landformen klassifiziert.

Hierbei handelt es sich um kuppig-hügelige Till-Landformen, Beckenstrukturen, Endmoränenwälle, steile Kerbtäler / Tobel, usw. Diese wurden anhand digitaler Geologie-Daten (GK 50) um die Komponenten ergänzt oder reduziert, die beim halbautomatischen Klassifikationsprozess nicht erkannt wurden. Häufig handelt es sich hierbei um Strukturen, welche nicht oder nur unmerklich an der Oberfläche zu Tage treten und somit vom Algorithmus nicht korrekt klassifiziert werden können. Oberflächenstrukturen, die eindeutig menschlichen Ursprungs sind, wurden bereits im Vorfeld einer Extraklasse zugeordnet, welche für die OBTA-Modellierung ausgeschlossen wurde.

3.2.1 Parametrisierung

Im Folgenden werden die einzelnen Parameter, welche in die Modellierung einflossen, erläutert. In *Tab. 3* werden diese und ihre Datenquellen bzw. –Herkunft aufgelistet.

Tab. 3: **Herkunft der verwendeten Parameter**

Übersicht der Eingangsdaten und deren Herkunft
Höhe ü. NN (***DGM 5***, ***DGM 25*** *[Ableitung aus DGM 5]:* Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de). Genehmigt unter AÜL1218; Az.: 2851.3-D/1342.
DGM 90: Copernicus data and information policy Regulation (EU) No 1159/2013 of 12 July 2013. With funding by the European Union.
Hangneigung (*Slope*, TRAVIS et al. 1975, Ableitung aus DGM 5)
Maximale Krümmung (*Maximum Curvature*, SHARY 1995)
Topographic Position Index (*TPI*, GUISAN et al. 1999, JENESS 2006)
Terrain Ruggedness Index (*TRI*, RILEY et al. 1999)
Brightness (DEFINIENS AG 2007)
Lithologische Daten (Sedimente) 1 : 50.000 (*klima-/chronostratigraphisch*): Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Hrsg.) (2013): Geologische Grundflächen. – Geologische Karte 1 : 50 000, Geodaten der Integrierten geowis. Landesaufnahme (GeoLa). http://www.lgrbbw.de/produkte/geologie/. Genehmigt unter Az. 2851.3//20_5804.) / RVBO)
Moorgebiete (Landesanstalt für Umwelt und Messungen Baden Württemberg, www.lubw-bw.de)
Flusssystem-Zugehörigkeit (rhenanisch vs. danubisch, Europäische Hauptwasserscheide, Landesanstalt für Umwelt und Messungen Baden Württemberg, www.lubw-bw.de)
Landschaftsgenese (*Eisrandlagen, Jungmoränenland vs. Altmoränenland*, OP 2020, KRAYSS & KELLER 1996, BECKENBACH 2016)
Anthropogene Ablagerungen / Aufschüttungen; Siedlungen (OPEN STREET MAP 2019)

Morphologische Parameter

Wie bei der Landschaftsklassifikation, gilt bei semiautomatisierten Klassifikationsansätzen das Prinzip der höheren Objektivität im Vergleich zu nichtautomatisierten, händischen auch für die Parametrisierung von morphologischen Parametern (EVANS et al. 2009: 513).

Ausgehend vom Original-DGM 5 wurden Rasterauflösungen von 25 m und 90 m in die Analysen mit einbezogen. Dies erfolgte aus zwei Gründen:

1. Der Speicher- und Rechenaufwand sinkt mit größerer Rasterweite bzw. geringerer Pixelzahl und räumlicher Auflösung. Damit steigt die Verarbeitungsgeschwindigkeit und erlaubt es, Analysen in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen von einigen Stunden durchzuführen.
2. Desweiteren bietet es sich an, mit räumlich geringer aufgelösten DGM-Daten zu operieren, da Landformen (z.B. kuppig-hügeligen Till-Landformen, Becken, Endmoränenwälle etc.), die unter anderem auf der Geländerauheit beruhen, stark maßstabsabhängig sind.

Zuvor wurden daher unterschiedliche Rasterweiten getestet, um herauszufinden, welche sich für eine bestimmte Landform am besten eignet (vgl. WOOD 1996, FLORINSKY & KURYAKOVA 2000, EVANS 2003, DENG et al. 2007, EVANS 2012).

DGM in höherer räumlicher Auflösung bilden oft kleinräumige anthropogene, künstliche Strukturen (z.B. Straßenzüge, künstliche Aufschüttungen etc.) ab, welche in ihrer Rauheit der von glazialen Landformen, wie kuppen- und muldenreichen Endmoränen sehr ähneln. Das Resamplen[19] des DGM auf 25 m oder 90 m Rasterweite bringt in diesem Fall gewisse Vorteile, da so einige Fehlstrukturen verschwinden (vgl. DENG et al. 2007). Die größeren zusammenhängenden landschaftlichen Strukturen bleiben jedoch erhalten.

Die (Großen) Becken zählen nach BAUMHAUER & WINKLER (2014: 113) zu den glazialen Makroformen und wurden daher mit der größten Rasterweite von 90 m klassifiziert. Für große Kerbtäler, Schmelzwasserrinnen / Kastentäler, Schotterebenen und Kleine Becken / Flusstäler, die ebenfalls zu den Makroformen zu zählen sind, erwies sich ein Resample der Rasterweite auf 25 m als sinnvoll, da die kleinräumigen Strukturen bei einer Pixelgröße von 90 x 90 m verschwanden. Auch flachwellige Till-Landformen wurden mit einer Pixelweite von 25 m klassifiziert.

Weiter muss der Tatsache Rechnung getragen werden, dass es bei einer auf Papier gedruckten Karte im Maßstab 1 : 10 000 Limitierungen hinsichtlich der Größe der Landformen gibt. SEIJMONSBERGEN (1996) gibt das kleinstmögliche darstellbare Objekt (in unserem Fall: eine einzelne Landform) mit einer Mindestgröße von 50 x 50 m an.

[19] ≙ Räumliche Transformation der Pixelgröße mittels des „nearest neighbour"-Verfahrens.

So wurde größte räumliche Auflösung von 5 x 5 m bei den kleinsten Objekten wie kuppig-hügeligen Till-Landformen (u.a. Drumlins, vgl. CLARK et al. 2009: 680f.) und Endmoränenformen sowie (kleinen) Kerbtälern / Tobeln verwendet.

Ausgehend von dem für den gesamten Untersuchungsraum (ca. 3 000 km²) vorliegenden DGM 5[20] wurden die restlichen geringeren räumlichen Auflösungen (mit einer Rasterweite von 25 m und 90 m) mittels eines Resample erzeugt. Anschließend wurden für alle drei räumliche Auflösungen folgende Ableitungen oder Indizes berechnet (vgl. *Tab. 3*):

- ***Hangneigung / Slope***,
- ***Maximal Curvature***,
- ***Topographic Position Index (TPI)*** und
- ***Terrain Ruggedness Index (TRI)***.

Im Sinne einer effizienten Bearbeitung wurden diese Berechnungen als Batch-Verarbeitung mit dem *Model Builder* in Arc GIS realisiert.

TPI und TRI hängen maßgeblich von der Größe der untersuchten Nachbarschaft des Fokalpixels ab (vgl. Kapitel 2.3.4). Für die Analysen im Untersuchungsgebiet wurden mehrere Suchradien getestet. Sie hängen von der räumlichen Auflösung der Pixel und Größe der zu kartierenden Landform ab. So wurde auf den drei Skalenebenen (DGM 5, DGM 25 und DGM 90) verschiedene Suchradien getestet und die jeweils besten in die Klassifikation integriert (vgl. *Tab. 4*).

Für Analysen mit dem DGM 5 erwies sich ein Suchradius von 200 Pixeln als zielführend (vgl. SKENTOS 2017: 10f). Bei kleineren Suchradien erfasste der TPI auf dieser Raumskala vermehrt auch anthropogene Mikro-Reliefformen, welche für die Klassifikation von kuppig-hügeligen Landformen unerwünscht sind. Im Folgenden wird vom *TPI 200* gesprochen. Beim TRI wurde ein Suchradius von 20 Pixeln verwendet; analog zur Nomenklatur des *TPI 200* heißt es im weiteren Text *TRI 20*.

Für die Analysen auf Basis des DGM 25 bzw. des DGM 90 wurde auf dieselbe Weise verfahren[21]. In *Tab. 4* werden die Suchradien für die verschiedenen Indizes und DGM-Auflösungen zusammengefasst.

[20] Dabei handelt es sich um ca. 120 Mio. zu berechnende Pixel für jeden der Eingangsparameter.

[21] Auf Basis des DGM 90 wurden nur die *(Großen) Becken* klassifiziert. Für diese Analysen wurden keine TRI-Daten benötigt, weswegen dieser hier nicht berechnet wurde.

Tab. 4: **Suchradien für den *TPI* und den *TRI***
Die Suchradien sind abhängig von der jeweiligen räumlicher DGM-Auflösung und der zu kartierenden Landform. (*Der TRI wurde in der DGM 90-Auflösung nicht benötigt*)

	DGM-Auflösung		
Index	***DGM 5***	***DGM 25***	***DGM 90***
TPI	200	150	200
TRI	20	15	-

Lithologische Parameter

Die lithologischen Parameter in Form von Informationen zu den oberflächlich anstehenden Gesteinsarten wurden aus der Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1 : 50 000 (GK 50 BW) abgeleitet. Sie lagen als Vektorlayer vor.

Hieraus wurden "Anthropogene Strukturen" ermittelt. Diese stellen künstliche Veränderungen der Gestalt und des lithologischen Materials der Erdoberfläche dar. Dies könnte, beispielsweise im Fall einer Kiesgrube (Hohlform) oder einer Müllhalde (Vollform) den Landform-Algorithmus fehlleiten. Um dies zu verhindern wurden besagte Flächen einer eigenen thematischen Klasse zugeordnet, um sie bei der anschließenden Klassifikation auszuschließen.

Zur Unterscheidung der landschaftsgeschichtlichen Einflüsse während der Kalt- und Warmzeiten und deren Auswirkungen auf die Ausbildung von charakteristischen Landformen dienten folgende lithologische Parameter (vgl. LGRB BW 2011: 172):

- ***Tills*** (Moränensedimente, Diamikte; mit spezifischen Landformen wie Drumlins, kuppig-hügeligen und flachwelligen Grundmoränenformen, Endmoränen etc.)
- ***Moorflächen*** (meist in [Großen] Becken; im Süden auch häufig in Senken zwischen Drumlins)
- ***Beckensedimente***
- ***Schotter***
- ***Molassesedimente*** (v.a. an Übergängen zur IWEM)
- ***Fließerden*** (AML, Ausgangssediment ist meistens Till – Altmoränenplatten mit flachwelligen Grundmoränenformen)

Im Bereich zwischen Bodensee und IWEM befinden sich die jüngsten ***Till-Landschaften***. Sie enthalten die besterhaltenen Drumlinfelder im Untersuchungsgebiet. Entstanden sind sie während des letzten markanten Vorstoßes des Rheingletschers in der Würm-Kaltzeit (IWEM – Singener Stadium ca. 15 000 – 12 000 a BP).

Aus der GK 50 BW lassen sich die lithostratigraphischen Till-(Sub-)Formationen (z.B. die Tettnang-Subformation u.a.) extrahieren. Zusammengefasst ergeben diese eine lithologisch basierte, räumliche Grundlage für die anschließende morphologische Klassifikation von Till-Landschaften.

Zwischen den einzelnen kuppig-hügeligen Till-Landformen (u.a. Drumlin-Hügel) finden sich meist ***vermoorte Flächen*** (*Junge Moorbildungen*, *Nieder-* und *Hochmoore*). Alle drei Moortypen wurden zu einer Vektor-Klasse „Torf / Moorflächen" zusammengefasst. Eine weitere Unterscheidung war nicht notwendig, da hier allgemein das Substrat Torf / Moorfläche an sich von Bedeutung ist. Sie prägen die *kuppig-hügelige Till-Landschaft* als Inselareale (vgl. Kapitel 2.2.2).

Auch in den meisten *(Großen) Becken* (vgl. Kapitel 4.1.1) kommen heute häufig großräumig Torfe / Moorflächen und vereinzelte Seen vor (vgl. LGRB BW 2011: 181). Sie bildeten sich in diesen größten abflusslosen Hohlformen des Untersuchungsgebiets nach dem Abschmelzen der Eismassen.

Eine weitere Fazies, die für (Große) Becken prägend ist, sind die ***Beckensedimente***. Sie setzten sich hauptsächlich präglazial in Gletscherstauseen als glazilakustrine Feinsedimente ab. Heute prägen sie vor allem im Unteren (vgl. DONGUS 1991: 32) und im nördlichen Teil des Mittleren Schussenbeckens den Untergrund.

Schotter wurden an Gletschertoren abgelagert, nördlich der Endmoränenwälle. Im Untersuchungsgebiet stehen sie meist im Bereich der Endmoränen und Eisrandlagen (besonders häufig um die AeWEM) an. Glaziale Schmelzwässer sortierten die glazialen Sedimente und transportierten das Feinmaterial weiter. Die Glazialen Schotter bilden im hiesigen Landschaftsmodell das Ausgangssediment für die Schmelzwasserrinnen (vgl. *Abb. 2*).

Molassesedimente bilden den tertiären Untergrund des gesamten Untersuchungsgebiets. Einige markante Vollformen (z.B. Adelegg, Gehrenberg, Stockacher Bergland) treten im Untersuchungsgebiet als Molassebergland zutage. An steilen Hängen, z.B. von steilen Kerbtälern / Tobeln wurden Molassesedimente angeschnitten. Vor allem die Altmoränenplatten im Norden des Untersuchungsgebiets bestehen aus Till-bedeckter Molasse (vgl. BENZING 1964: 21, DONUGS 1991: 55).

Diese in der Regel aus ***Till*** bestehenden ***Fließerden*** überdecken im AML flächenhaft weite Bereiche des Untersuchungsgebiets. Sie bilden das wichtigste Sediment für die flachwelligen Till-Landschaften.

Weitere Parameter

Als letzte Gruppe kamen weitere thematische Informationen zum Einsatz. Sie halfen, die Landformen weiter zu differenzieren und die Landschaften zu ordnen. Dabei handelt es sich um ***hydrologische Daten*** in Form der EHWS, welche die Zugehörigkeit zum rhenani-

schen oder danubischen Flusssystem definiert. Diese Unterscheidung floss bei der Klassifikation der Tobel mit ein.

Weiter gingen landschaftsgeschichtliche Informationen in die Modellierung mit ein. Sie teilen den Raum in verschiedene kaltzeitliche Phasen ein. Diese werden durch drei markante ***Eisrand-Stadien*** repräsentiert (Konstanzer Stadium, IWEM, AeWEM). So wird auch die die Unterscheidung zwischen Jung- und Altmoränenlandschaft möglich.

Zuletzt kamen ***Landnutzungs-Informationen*** in Form von anthropogenen Ablagerungen und Abtragungen zum Einsatz. Neben den oben beschriebenen lithologisch-basierten Daten dieser Kategorie kamen hier weitere Informationen aus OpenStreetMap zum Einsatz. Beide lagen als Vektordaten vor und wurden zu einer Datei zusammengeführt. Ihre Form ähnelt in manchen Fällen stark den kuppig-hügeligen oder flachwelligen Till-Landformen. Diese Formen wurden, wie oben beschrieben, von deren Klassifikation ausgeschlossen und der nächsten, übergeordneten Landschaftsklasse zugeordnet.

3.2.2 Hierarchieebenen im objektbasierten Landschaftsmodell

Das hiesige Landschaftsmodell basiert ebenfalls auf dem oben erläuterten hierarchischen *Bottom-up*-Ansatz. Dabei werden Ausgangspixel mittels objektorientierter Klassifikation (OBTA) zunächst zu ähnlichen Segmenten bzw. Geo-Objekten zusammenfasst. Diese werden dann in zwei aufeinander aufbauenden Prozessen zu Landformen und anschließend zu Landschaften aggregiert. Dabei gilt folgende Gliederung:

1. OBTA-Ebene: *Landformen*,
2. OBTA-Ebene: *(Teil-)Landschaften*,
3. OBTA-Ebene: *Haupt-Landschaften*.

Um eine spätere Objektivität und Übertragbarkeit der angewandten Methoden zu erleichtern, wurden ein sogenanntes „Master-Ruleset“ entwickelt, welches anschließend in den verschiedenen Teilgebieten angewandt wurde. Aufgrund der unterschiedlichen Geländeverhältnisse mussten die Algorithmen für einzelne Klassen mit großer räumlicher Ausdehnung für die einzelnen Teilgebiete leicht angepasst werden. Dazu gehören vor allem die Klassen mit komplexeren Landformen wie die kuppig-hügeligen Till-Landformen, die flachwelligen Till-Landformen und die Endmoränenformen.

Begonnen wurde mit der Erfassung der Kernsegmente einer Klasse. Hierbei wurden die strengsten Klassifikations-Vorschriften zugrundegelegt. Im folgenden Schritt wurde für die Klassifikation der direkten Nachbar-Segmente der Algorithmus leicht modifiziert. Dies wurde mehrfach bis zu einem empirisch ermittelten Schwellenwert wiederholt. Diese Art der wachsenden räumlichen Klassen wird auch als *region growing* bezeichnet.

3.2.3 Glaziale Landformen (OBTA-Ebene 1)

Die Ausweisung von (Teil-)Landschaften in einer von vergangenen Kaltzeiten geprägten Landschaft beruht in erster Linie auf der Klassifikation von charakteristischen Landformen (vgl. Kapitel 2.2.2). Neben dieser morphologischen Komponente spielen lithologische Merkmale eine wichtige Rolle. Für den Untersuchungsraum wurden daher folgende Zielklassen formuliert:

1. **Morphologisch basierte Landformen:**
   - **(Große) Becken**
     (Vgl. LGRB BW 2015: 56ff. – „Schussenbecken" und „Salemer Becken" als Zweigbecken des Bodenseestammbeckens; die Becken werden nach ihrer Lage im JML und AML unterschieden)
   - **Kleine, fluvial stark überprägte Becken und Täler**
     (Vgl. LGRB BW 2015: 56ff. – „Kleine Becken")
   - **Steile Kerbtäler (Tobel)**
   - **Schmelzwasserrinnen / Kastentäler**
   - **Kuppig-hügelige Till-Landformen**
     (Drumlins, drumlinähnliche Formen u. Ä.)
   - **Flachwellige Till-Landformen**
     (bei DONGUS 1991: 39 – „Hügelland"; bei BECKENBACH et al. 2014: 114 – z.B. „ältere rißzeitliche Drumlinfelder, überprägt von mehrfachen Solifluktionsprozesse")
   - **(Wall-)Endmoränen und Satzendmoränen** (bei BECKENBACH et al. 2014: 116 – „hummocky moraines")
2. **Lithologisch basierte Landformen**
   - **Schotterebenen**
   - **Molasse-Bergland**

Nachfolgend wird die Landform-Klassifikation durch das Landschaftsmodell erläutert.

(Große) Becken

Bei den großen Becken handelt es sich um die markantesten Hohlformen im Untersuchungsgebiet. Sie wurden durch die Vorstöße der sich verzweigenden Loben des Rheingletschers während der großen Vereisungen geschaffen.

In der Jungmoränen-Landschaft (JML) befinden sich zusammenhängend das Untere und Mittlere Schussenbecken. Beide zusammen bilden mit 162,67 km² größte Becken des Ober-

schwäbischen Alpenvorlands. Weiter sind das Obere Schussenbecken (ca. 56,58 km²), das Wilhelmsdorfer Becken (ca. 31,76 km²), das Isnyer Becken (ca. 29,65 km²) und das Salemer Becken (ca. 28,51 km²) zu nennen. In der Altmoränen-Landschaft (AML) befinden sich u. a. das Wurzacher Becken (32,79 km²) und das Federsee-Becken (ca. 17,05 km²).

Um die großflächigen Hohlformen der (Großen) Becken zu klassifizieren, galt es zunächst, deren Form morphologisch zu beschreiben, um sie anschließend in Algorithmen übersetzen zu können, mit denen sich diese Landformen erfassen und klassifizieren ließen. Dabei ging es in erster Linie darum, die passende räumliche Skala zu finden. Um nicht kleinere Landformen wie kuppig-hügelige bzw. flachwellige Till-Landformen oder fluviale Täler innerhalb von Becken mitzuklassifizieren. Diese würden das Ergebnis verfälschen, daher wurde die Rasterweite 90 x 90 m gewählt. Die mit 8.100 m² über 300-mal größere Fläche als bei einer Rasterweite von 5 x 5 m sorgt dafür, dass hier nicht erwünschte, kleinformatigere Landformen zunächst »ausradiert« werden[22].

Die konkaven Formen wurden über negative *TPI 200*-Werte, in Kombination mit sehr geringen Neigungsverhältnissen sowie sehr geringen Werten der *Maximal Curvature* erfasst. Da die Beckenränder deutlich steiler werden (LGRB BW 2015:38) dienten höhere Slope-Werte als natürlicher Schwellenwert für die Erfassung von geeigneten Becken-Segmenten. Da die Becken in ihrer Gesamtform nicht auf einmal erfasst werden konnten, wurden klassifizierte Becken-Segmente in einem nachfolgenden Schritt zusammengefasst („gemerged“) und anschließend deren Nachbar-Segmente erneut mit dem Becken-Algorithmus untersucht. Zum Schluss wurden Becken-Segmente mit weniger als 1500 Pixeln (≙ 12,15 km²) wieder deklassifiziert.

Nachfolgend werden die Reihenfolge sowie die Parameter der Klassifikation aufgezeigt.

1. **Segmente** → TPI 200 < 0 *AND*
   → Slope < 1
   → **Becken**
2. **Becken** → Merge Region
3. **Segmente** → with relative Border to Becken > 0,1 *AND*
   → Maximum Curvature < 0,0003 *AND*
   → TPI 200 < 0 *AND*
   → Slope < 1,5
   → **Becken**
4. **Becken** → with Area < 1500 Pixel
   → unklassifiziert

[22] Auf der 2. OBTA-Ebene werden diese wieder integriert um die landschaftlich unterschiedlichen Beckenbereiche räumlich zu differenzieren. Mehr dazu folgt weiter unten.

Häufig sind in den *großen Becken* zusammenhängende Moorbildungen vorzufinden, die mitunter einen Großteil des Beckens ausmachen. Desweiteren sind in einigen Becken bedeutende Schotteranteile auszumachen. Auch überschneiden sich die Klassen *große Becken* im Süden des Untersuchungsgebiets mit *kuppig-hügeligen Till-Landformen*. In Kapitel 3.2.4 folgt die Erläuterung der Algorithmen auf der 2. OBTA-Ebene; hier wurden die *großen Becken* in die drei genannten Subklassen untergliedert.

Gleichzeitig wurden alle Landformen stets nach ihrer Zugehörigkeit zu JML und AML unterschieden. Dieser Schritt lief folgendermaßen ab:

1. **Becken** → Max. Overlap [%] „AeWEM“ > 0,99
   → **Becken JML**
2. **Becken** → Max. Overlap [%] „AeWEM“ < 0,99
   → **Becken AML**

Die Becken-Klasse wird im nördlichen Teil des Mittleren Schussenbeckens ergänzt durch eine lithologisch basierte Klassifikation. Der entscheidende Parameter ist die räumliche Überlappung mit Beckensedimenten (≙ Glazifluviale Kiese und Sande), die in die OBTA als thematische Information eingingen.

Dieser Klassifikationsteil fand am Ende des gesamten Klassifikationsprozesses statt. Pixel, die zu diesem Zeitpunkt keiner anderen Landform-Klasse angehörten, gleichzeitig direkt an bereits klassifizierte Becken-Segmente angrenzen und eine bestimmte Mindestfläche besitzen, wurden erfasst. Sie wurden anschließend bei entsprechender lithologischer Übereinstimmung der Klasse *Becken* zugeordnet. Wie oben erwähnt traf dieser Fall traf nur in einem Bereich im JML zu.

Die folgenden Definitionen zeigen die Klassifikationsvorschriften.

Segmente → ≠ Rücken (Till-Landformen) *AND*
→ ≠ Molasse-Berglandformen *AND*
→ ≠ Kleine Becken / Fluviale Täler *AND*
→ ≠ Kerbtäler / Kerbsohlentäler / Tobel *AND*
→ Rel. Border to „Becken“ > 0,9 *AND*
→ Max. Overlap with them. Class „Glazifluviele Kiese/Sande“ > 0,95 *AND*
→ Area > 70.000 Pixel
→ **Becken JML** bzw. **Becken AML**

Kleine, stark fluvial überprägte Becken und Täler

Die Klasse „Kleine stark fluvial überprägte Becken und Täler“[23] umfasst zwei grundsätzliche Formungsprozesse. Der Begriff *Becken* steht im Zusammenhang mit einer glazialen Genese. So finden sich im südlichen Oberschwaben mehrere kleine Becken, welche aber seit dem Beginn des Holozän in der Regel fluvial überprägt wurden.

Daneben gibt es auch Landformen, bei denen der fluviale Einfluss dominierend war bzw. die komplett fluvial geprägt worden sind und noch werden. Diese fallen unter die Subkategorie der *Täler*.

Um die engeren Talabschnitte ebenso wie die kleineren Becken zu erfassen, war es nötig, eine größere räumliche DGM-Auflösung (25 x 25 m) zu wählen und auch die Algorithmen zu modifizieren. Kleine Becken und Täler weisen aufgrund ihrer geringeren Breite an den Rändern häufig steilere Hänge auf. Das resultiert in etwas größeren Slope-Werten. Negative *TPI 150*-Werte repräsentieren die Konkavität der Hohlformen.

1. **Segmente** → Slope > 2 *AND*
   → TPI 150 < 0
   → **Kleine Becken / Täler**
2. **Segmente** → Relativ Border to Kleine Becken / Täler > 0,5 *AND*
   → Slope > 2,5 *AND*
   → TPI 150 < 0
   → **Kleine Becken / Täler**

Steile Kerbtäler / Tobel

Die tief eingeschnittenen, schluchtartigen Kerbtäler mit steilen Seitenwänden im JML wurden als eigene Klasse der Hohlformen erfasst. Da diese Landformen häufig sehr kleinräumig vorkommen, wurde die höchste räumliche DGM-Auflösung (5 x 5 m) gewählt. Die OBTA erfolgte in mehreren Schritten. Als Erstes wurden die Kernsegmente mit den größten Hangneigungswerten, stark konkaven Bereichen und einem deutlichen Höhenunterschied zur direkten Umgebung erfasst.

Konkave Segmente (Senken) ließen sich am besten mit dem *TPI 200* klassifizieren. Negative Werte weisen auf Senken hin, wobei deutlich positive Werte konvexe Formen repräsentieren. Der hier verwendete TPI-Schwellenwert betrug „-8“ und stellte mit Abstand den negativsten Wert der gesamten Untersuchung dar. Damit ließen sich die meisten der scharf eingeschnittenen Landformen detektieren.

[23] Im Folgenden in der Regel als *Kleine Becken / Täler* bezeichnet.

Der nachbarschaftsbasierte Parameter *Mean Difference to darker Neighbours (DGM 5)*[24] identifiziert Segmente, die Höhenunterschiede zu ihrer Umgebung aufweisen. „Darker Neighbours" meint in diesem Fall geringere Höhenwerte in der direkten Umgebung und „brighter Neighbours" wären folglich größere Höhenwerte. Positive Werte dieses Parameters bedeuten also, dass die entsprechenden Segmente höher als ihre direkte Umgebung liegen (vgl. DEFINIES 2012: 250)

Im 2. Schritt wurden die Segmente der Klasse *kleine Becken /Täler* auf die obigen Kriterien untersucht und gegebenenfalls als *Steile Kerbtäler / Tobel* reklassifiziert. Beim Argental erfolgte dies im Abschnitt zwischen Steinenbach und Primisweiler. Die nur hier freigelegte Obere Süßwassermolasse unterstreicht dies.

Anschließend wurden direkt benachbarte Segmente erfasst, welche nur wenig geringere Steilheit und Konkavität aufwiesen. In beiden Schritten war die Grundvoraussetzung für die Kerbtal-/Tobel-Segmente, dass sie südlich der EHWS liegen bzw. zum rhenanischen Flusssystem gehören.

In einem erst später folgenden, letzten Schritt wurden die dann vorhandenen Segmente *Molasse-Berglandformen* der Adelegg gesondert auf Steile Kerbtäler / Tobel untersucht. Diese Ausnahme erfolgte, da diese Landformen / Landschaften in der gesamten Adelegg markant auftreten, aber vom Algorithmus nicht vollständig erfasst würden. Der Grund hierfür ist, dass die EHWS mitten durch die Adelegg hindurchführt.

Der folgende Abschnitt fasst die Klassifikationsschritte zusammen.

1. Segmente
→ Max. Overlap [%] „Europäische Hauptwasserscheide" > 0,99 *AND*
→ Slope > 8 *AND*
→ TPI 200 < -8 *AND*
→ Mean Diff. to darker Neighbours (DGM 5) > 15
→ **Steile Kerbtäler / Tobel**

2. Kl. Becken
→ Max. Overlap [%] „Europäische Hauptwasserscheide" > 0,99 *AND*
→ Slope > 8 *AND*
→ TPI 200 < -8
→ **Steile Kerbtäler / Tobel**

3. Segmente
→ Relativ Border to Steile Kerbtäler /Tobel > 0,5 *AND*
→ Max. Overlap [%] „Europäische Hauptwasserscheide" > 0,99 *AND*
→ Slope > 5 *AND*
→ TPI 200 < -3
→ **Steile Kerbtäler / Tobel**

[24] Analog dazu existiert in eCognition auch der Algorithmus „*Mean Difference to brighter Neighbours*".

Die Untersuchung der Molasse-Berglandformen der Adelegg auf Kerbtäler / Tobel und deren Klassifikation wird nachfolgend erläutert.

4. „Adelegg“ → Molasse-Bergland with …
- → Slope > 8 *AND*
- → TPI 200 < -8 *AND*
- → Mean Diff. to darker Neighbours (DGM 5) > 15
  - → **Steile Kerbtäler / Tobel**

Schmelzwasserrinnen / Kastentäler

Diese Landformen entstanden an den Gletschertoren als Folge größerer Schmelzwasser-Durchbrüche an den Endmoränenwällen (hauptsächlich der AeWEM). Die Schmelzwasserströme formten breite und flache Kastentäler in der Altmoränenlandschaft.

Für die OBTA wurden diese raum- und formbezogenen Zusammenhänge folgendermaßen in Algorithmen übersetzt: Es wurde eine mittlere räumliche DGM-Auflösung (25 x 25 m) gewählt, ähnlich wie bei der Klasse *Kleine Becken / Täler*. Die Klasse *Kastentäler / Schmelzwasserrinnen*[25] liegen in der Altmoränenlandschaft und folglich außerhalb der AeWEM. Die maximale Überlappung eines Segments mit der Jungmoränenlandschaft, welche als thematischer Layer (= „JML“-Layer) im Shape-Format vorliegt, darf also nur relativ gering sein[26]. Die von Schmelzwasser geprägten Talbereiche lassen sich räumlich durch sehr geringe Neigungswerte sowie eine gering ausgeprägte Kuppigkeit nachvollziehen. Desweiteren wurden weitere thematische Daten in Form von Schmelzwassersedimenten (*Glazifluviale Kiese und Sande*) hinzugezogen. Eine signifikante Überlappung deutet auf die Zugehörigkeit zu besagter Klasse hin.

Zum Schluss des iterativen Klassifikationsprozesses wurden Segmente der Klasse *Kleine Becken / Täler* mit entsprechend gering geneigten Talböden und in direkter Nachbarschaft der *Schmelzwasserrinnen / Kastentäler* auf die zugehörigen Kriterien überprüft und gegebenenfalls reklassifiziert.

Nachfolgend werden die genannten Zusammenhänge und zugehörigen Schwellenwerte verdeutlicht.

[25] Im Folgenden wird für diese Klasse häufig die Kurzform *Schmelzwasserrinnen* verwendet.

[26] Für jüngere Gletscherstände wurden keine Schmelzwasserrinnen klassifiziert, da diese Landformen / Landschaften in südlichen Bereichen weniger markant auftreten.

1. Segmente → Max. Overlap with JML < 0 *AND*
→ TPI 150 < -0,5 *AND*
→ Slope < 2
→ **Schmelzwasserrinnen**

2. Segmente → Relativ Border to Schmelzwasserrinnen > 0,5 *AND*
→ Slope < 3 *AND*
→ TPI 150 < 0 *AND*
→ Max. Overlap [%]: Glazifluviale Kiese & Sande > 0,66 *AND*
→ **Schmelzwasserrinnen**

3. Kl. Becken → Relativ Border to Schmelzwasserrinnen > 0,5 *AND*
→ Max. Overlap [%]: Glazifluviale Kiese & Sande > 0,66 *AND*
→ Slope < 3 *AND*
→ TPI 150 < 0
→ **Schmelzwasserrinnen**

Kuppig-hügelige Till-Landformen

Die kuppig-hügeligen Vollformen bestehen aus glazialen Sedimenten der Grundmoräne (Till). Im Bereich südlich der IWEM / Singener Stadium finden sich vermehrt Drumlins, die Hauptlandform der Grundmoränenlandschaft. Ihre Form variiert von hochkonvexen, ovalen bis hin zu niedrig konvexen, langgezogenen Hügeln (Clark et al. 2009: 678ff, Beckenbach 2016: 66f.). Weiter nördlich und vor allem im Bereich des rißzeitlichen Altmoränenlandes (außerhalb der AeWEM) sind diese Landformen deutlich weniger gut ausgeprägt, da sie bereits deutlich länger der nachkaltzeitlichen Erosion ausgesetzt sind. Sie treten hier daher nur vereinzelt neben den großflächigen, flachwelligen Tillformen auf.

Zur Klassifikation *kuppig-hügeliger Till-Landformen* wurden mehrere Schritte unternommen auf Basis des DGM 5 durchgeführt (vgl. Clark et al. 2009: 678f.). Zuerst wurden konkave Landformen klassifiziert, um sie für die weiteren Schritte auszuschließen. Anschließend wurden auf Basis von Form, Nachbarschaftsbeziehungen und thematischer Zugehörigkeit tropfenförmige, kuppig-hügelige Vollformen im Tilluntergrund klassifiziert.

Diese Landform-Klasse ist relativ komplex: Sie basiert auf der Nachbarschaft von Hügeln und Kuppen wie auch von Senken, die voneinander separiert werden müssen. Konvexe (≙ Rücken) und konkave (≙ Senken) Formen wurden über den *TPI 200* erfasst. Deutlich positive Werte (> 1,5) repräsentieren kuppig-hügelige Landformen. Über den Parameter *Mean Difference to darker Neighbours (DGM 5)* wurden niedriger gelegene Segmente in der direkten Umgebung identifiziert. Die charakteristische Tropfenform wird über den Parameter *Elliptic Fit* erfasst. Dabei wird zunächst eine Ellipse mit derselben Fläche wie das untersuchte Segment berechnet und anschließend über dessen Schwerpunkt platziert. Danach wird die Segmentfläche außerhalb der Ellipsen-Fläche mit der innerhalb verglichen. Ein *Elliptic*

Fit-Wert von »0« bedeutet, dass keine Überschneidung beider Flächen vorliegt (≙ nicht elliptisch), einer von »1« drückt eine komplette Überschneidung (≙ hoch elliptisch) aus (DEFINIES 2012: 27of.).

Nachfolgend werden die Klassifikationsschritte und -parameter aufgelistet.

1. **Segmente** → TPI 200 < 0
   → **Konkav** *(→ aktuell von weiterer Klassifikation ausgeschlossen)*
2. **Segmente** → TPI 200 > 1,5 *AND*
   → Max. Overlap [%]: Till > 90 *AND*
   → Elliptic Fit >= 0,5 *AND*
   → Mean Diff. to darker Neighbours (DGM 5) >= 5 *AND*
   → Max. Overlap [%]: Till > 1 *AND*
   → Max. Overlap [%]: Molasse < 1 *AND*
   → Max. Overlap [%]: Anthropogene Flächen < 1
   → **Rücken (= Kuppig-hügelige Till-Landformen)**

In *Abb. 23* wird das Höhenlängsprofil gut ausgeprägten, *kuppig-hügeligen Till-Landform* (ein jüngerer Drumlin) südwestlich des Salemer Beckens gezeigt (Schnittrichtung: NNW nach SSO). Die maßgeblichen morphologischen Variablen (*Slope*, *TPI 200* und *TRI 20*) sind ebenfalls aufgetragen. Alle Daten wurden auf einer 5 x 5 m-Basis ermittelt. Durch die Grafik werden beispielhalft die besondere Eignung des *TPI 200* zur Beschreibung der konvexen Form von *kuppig-hügeligen Till-Landformen* verdeutlicht. Dieser Vertreter der Klasse *kuppig-hügelige Till-Landformen* weist eine Höhendifferenz von 27 m und eine durchschnittliche Steigung von 7,7 % sowie eine maximale Steigung von 19,7 % auf.

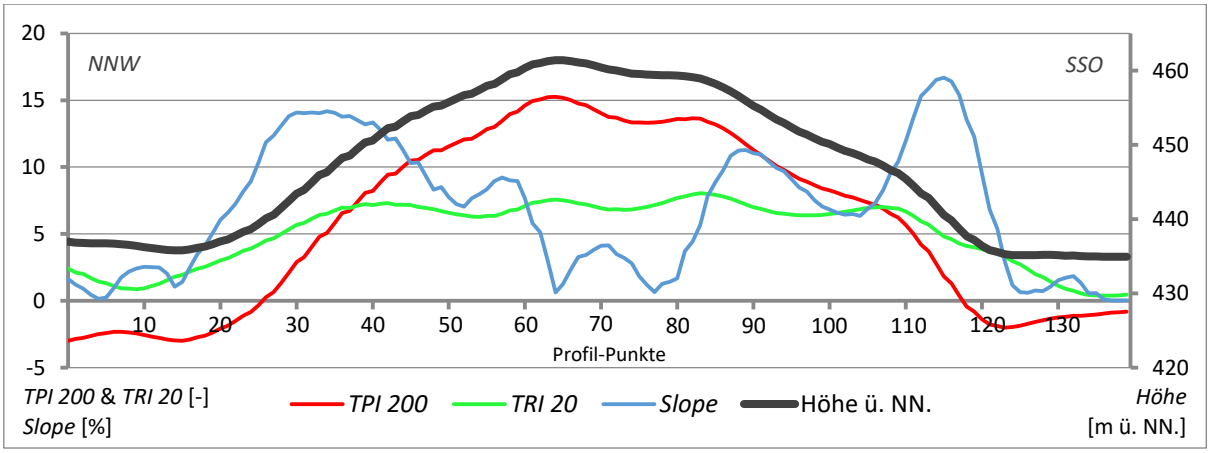


Abb. 23: **Profillängsschnitt durch einen Drumlin** (A).
Südwestlich des Salemer Beckens. Pixelgröße 5 x 5 m. Abgebildet werden *Geländehöhe ü. NN.*, *Slope / Hangneigung* sowie Indizes (*TPI 200* & *TRI 20*). Pfad (0,85 km) berechnet mit 140 Profil-Punkten im Abstand von ca. 6 m in SAGA GIS.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

Dabei fällt auf, dass der Fuß der Drumlins bereits negative *TPI 200*-Werte aufweist. Die oben formulierte Klassifikationsvorschrift deckt den unteren Teil der Vollformen nicht ab. Da das OBTA-Verfahren die Kombination mehrerer Variablen erlaubt, kann der Drumlin-Fuß jedoch durch den Parameter *Mean difference to darker neighbours (DGM 5)* erfasst werden.

Abb. 24 zeigt die *Maximal Curvature* (*MaxCurv*, abgeleitet aus dem DGM 5) in Relation zu den Höhenwerten des Drumlins. Im Vergleich zu den gleichmäßigen, die Konvexität betonenden Werten des *TPI 200* weist die *MaxCurv* wesentlich kleinräumigere Unterschiede auf, da sie eine deutlich kleinere Nachbarschaft um das Fokalpixel untersucht. Zur Erfassung von kuppig-hügeligen Landformen, speziell Drumlins, eignet sich der *TPI 200* besser.

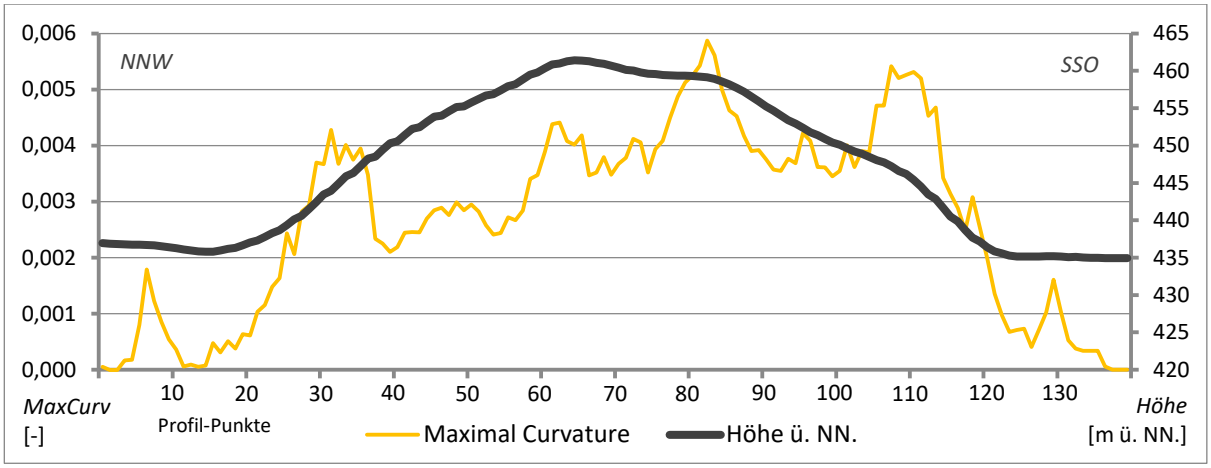


Abb. 24: **Profillängsschnitt durch einen Drumlin** (B).
Südwestlich des Salemer Beckens. Pixelgröße 5 x 5 m. Abgebildet werden *Geländehöhe ü. NN.* und die *Maximal Curvature*. Pfad (0,85 km) berechnet mit 140 Profil-Punkten im Abstand von ca. 6 m in SAGA GIS.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

Flachwellige Till-Landformen

Flachwellige Till-Landformen treten mit zunehmendem Abstand zum Bodensee häufiger auf. In vielen Fällen könnte es sich um *kuppig-hügelige Landformen* aus der Rißzeit handeln (vgl. Beckenbach 2016: 69). Sie waren deutlich längeren Erosionsprozessen ausgesetzt als die oben besprochenen jüngeren *kuppig-hügeligen Till-Landformen*. Langsam voranschreitende Solifluktion während periglazialer Perioden sorgten für eine sukzessive Verflachung der ursprünglich unruhigen, glazialen Oberfläche. Daher weisen die *flachwelligen Till-Landformen* im Zentrum und im Norden des Untersuchungsgebiets meist nur ein geringere Reliefunterschiede auf, da sie von den würmzeitlichen Gletschervorstößen nicht mehr tangiert wurden. Die sich im JML befindlichen Landformen sind maximal seit Ende der letzten Kaltzeit im Spätpleistozän der Erosion ausgesetzt und weisen damit noch ein etwas

deutlicher ausgeprägtes Relief (hier repräsentiert durch die höhere Kuppigkeit) und mehr kuppig-hügelige Landformen auf, als die verwandten Landformen im AML.

Die Solifluktionsprozesse führten jedoch auch dazu, dass periglazial bewegtes Oberflächenmaterial andere (nicht glaziale) Sedimente überlagerte. Daher ragen flachwellige Till-Landformen auch über die Till-Bedeckung hinaus. Dem wurde mittels eines großzügigeren Suchradius an den Till-Grenzen Rechnung getragen, was in der OBTA eine Till-Überlappung von lediglich >= 60% erforderte.

Flachwellige Till-Landformen kommen sowohl in Alt- als auch in Jungmoränenlandschaft vor und wurden schließlich auch nach ihrem Alter und ihrer Nachbarschaft in die Klassen *Flachwellige Till-Landschaft (JML)* und *Flachwellige Till-Landschaft (AML)* unterschieden. Beide zeichnen sich durch eher flächenhafte Landformen mit geringer ausgeprägter Kuppigkeit, geringeren Hangneigungen und geringerem Höhenunterschied zur direkten Umgebung aus. Aus diesem Grund wird hierbei mit einer mittleren Rasterweite (25 x 25 m) segmentiert. Das DGM 25 als morphologische Basis für die Klassifikation bringt den Vorteil, dass es die Erfassung größerer, zusammenhängender Areale derselben Klasse (vgl. Teilkapitel *(Große) Becken*) erlaubt. Gleichzeitig kommen hier nur Segmente infrage, die nicht bereits als *kuppig-hügelige Till-Landformen*, *Becken* oder *kleine Becken / Täler* klassifiziert wurden. Ebenfalls ausgeschlossen werden die thematischen Klassen *Molasse*, *Schotter* und *anthropogene Flächen*.

Im folgenden Abschnitt wird der Algorithmus in zwei Schritten formuliert.

1. **Segmente** → TPI 150 < 0
   → **Konkav** *(aktuell uninteressant)*
2. **Segmente** → TPI 150 > 0 *AND*
   → TPI 150 <= 2 *AND*
   → Slope (DGM 25) <= 5 *AND*
   → Max. Overlap [%]: Till >= 60 *AND*
   → Mean Diff. to darker Neighbours (DGM 25) < 15 *AND*
   → ≠ kuppig-hügelige Till-Landformen *AND*
   → ≠ (Große) Becken *AND*
   → ≠ Kleine Becken / Täler *AND*
   → Max. Overlap [%]:Molasse < 1 *AND*
   → Max. Overlap [%]: Schotter < 1 *AND*
   → Max. Overlap [%]: Anthropogene Flächen < 1
   → **Flachwellige Till-Landformen**

Dabei unterscheiden sich die im AML gelegenen Segmente von den weiter südlich (im JML), durch eine geringer ausgeprägte Kuppigkeit (*TPI 150*-Werte < 1,75; > 0) und etwas

größere und flächigere Segmente. Im AML beinhalten flachwellige Till-Landformen eine geringere Anzahl an einzelnen Patches mit *kuppig-hügeligen Till-Landformen* als die im JML.

Abb. 25 und *Abb. 26* verdeutlichen die Zusammenhänge zwischen *Geländehöhe*, *TPI 150*, *TRI 20*, *Slope* und *MaxCurv*. Dabei wird die Eignung des *TPI 150* für die Klassifikation von Flachwelligen Till-Landformen deutlich. Vereinzelte Ausreißer des *TPI 150* nach oben, mit Werten über dem oben genannten Schwellenwert (1,75 für das AML; 2,0 für das JML) werden dadurch ausgeschlossen, dass die OBTA Segmente und keine Einzelpixel klassifiziert.

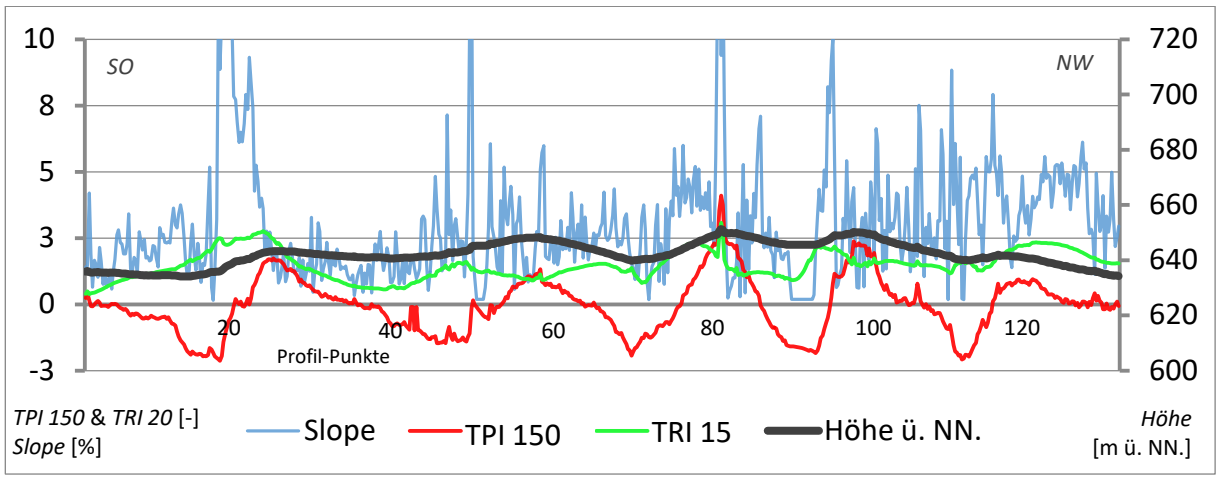


Abb. 25: **Profillängsschnitt durch flachwellige Till-Landformen** (B).
Pixelgröße 25 x 25 m. Abgebildet werden *Geländehöhe ü. NN.*, *Slope / Hangneigung* sowie Indizes (*TPI 150* & *TRI 15*). *Slope*-Werte > 10 % werden nicht abgebildet. Pfad (4,1 km) berechnet mit 130 Profil-Punkten im Abstand von ca. 31,5 m in SAGA GIS.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

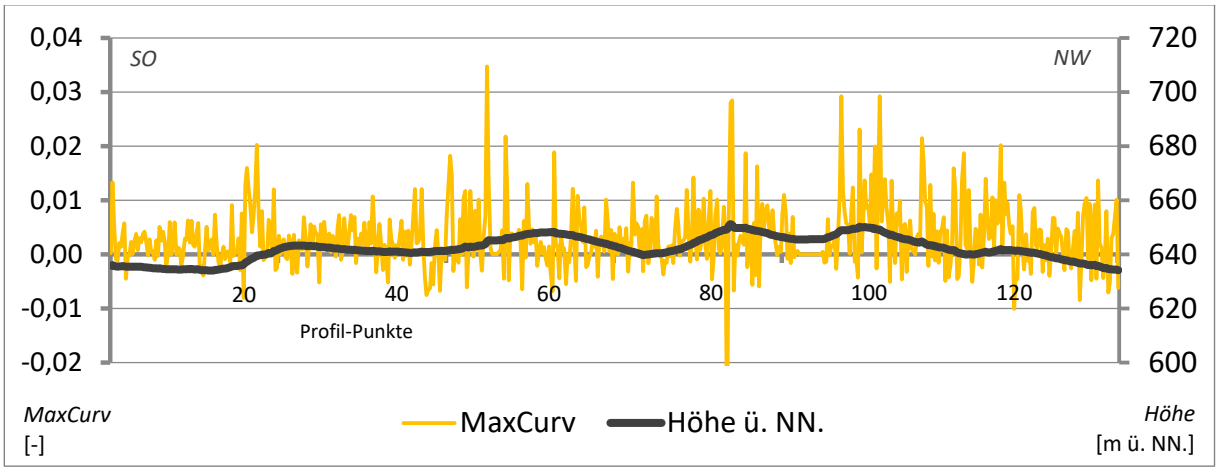


Abb. 26: **Profillängsschnitt durch flachwellige Till-Landformen** (B).
Zwischen Ostrach und Krauchenwies. Pixelgröße 25 x 25 m. Abgebildet werden *Gelände höhe ü. NN.* und die *Maximal Curvature*. Pfad (4,1 km) berechnet mit 130 Profil-Punkten im Abstand von ca. 31,5 m in SAGA GIS.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

MaxCurv weist auf dieser Skala (25 x 25 m) durchgängig (zu) große Schwankungen auf, weswegen diese Ableitung nicht zur Detektion *flachwelliger Till-Landformen* eingesetzt wurde.

Endmoränen

Endmoränen-Segmente, die vor allem in Süddeutschland häufig wallförmig (IWEM, AeWEM) auftreten, wurden auf Basis der Landform-Klasse *kuppig-hügelige Till-Landformen* erfasst. Auf Endmoränen mit Ablationsmoränen und langem Gletscherstillstand sind Toteislöcher und mitunter Sölle (≙ Kleingewässer in Toteislöchern) zu finden, welche für eine sehr unruhige, kleinräumig raue Kuppigkeit der Oberfläche sorgt (LESER 2009: 254f., BAUMHAUER & WINKLER 2014: 212, BECKENBACH 2016: 51). Diese lässt sich ab einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m im DGM optisch gut von ihrer direkten Umgebung unterscheiden (BECKENBACH 2016: 48). Besonders deutlich trifft dies für die AeWEM zu. Im Bereich des Konstanzer Stadiums sind heute kaum noch morphologisch erfassbaren Moränenformen mehr erhalten, was unter anderem auf die kurze Verweilzeit des Rheingletschers in dieser Position zurückgeführt werden kann (vgl. SCHREINER 1992).

Da der grobe Verlauf der *Endmoränen*züge der IWEM und AeWEM bereits seit Längerem bekannt und publiziert ist (vgl. KELLER & KRAYSS 1987, 1996, LGRB BW 2011, BECKENBACH 2016: 47), wurden um diese jeweils ein 2 km breiter Korridor (*AeWEM 2km, IWEM 2km*) erstellt. Dieser diente nach der Erfassung und Klassifikation der Endmoränen-Segmente auf Basis der unten erläuterten morphologischen und semantischen Merkmale als Filter. Nur Segmente mit einer mindestens 80%igen Überlappung mit *AeWEM 2km* wurden abschließend in die Klasse „Endmoränen“ übernommen. Weiter wurden fragmentarisch auftretende Moränenzüge in der Eiszerfallslandschaft zwischen der IWEM und der AeWEM erfasst. Diese sogenannte *kettled moraines* sowie *hummocky moraines* (vgl. EVANS 2006; BAUMHAUER & WINKLER 2014: 212; BECKENBACH et al 2014: 116, BECKENBACH 2016: 48) entstanden bei Gletscherrückzugsphasen oder stagnierenden Gletscherbewegungen.

Die in der Regel im DGM gut erfassbare, charakteristische kuppen-und-kesselförmige Oberfläche von Endmoränen ließ sich grundsätzlich relativ präzise über die sogenannte *Brightness* abbilden. Dieser Parameter repräsentiert in eCognition den Mittelwert aller Pixelwerte der Raster-Inputdaten für ein bestimmtes Segment (DEFINIES 2007: 97). Pixelbasiert erwies sich die *Maximal Curvature* (*MaxCurv*) als robuster Parameter. Sie erreicht ihre Maxima und Minima im Bereich der Endmoränen, da sie die kuppen-und-kesselförmige Oberfläche relativ präzise wiedergibt (vgl. *Abb. 27*). Auch der *TRI 20* (vgl. Kapitel 2.3.4) lieferte hier kleinräumig Ansätze für gute Unterscheidungsmerkmale, da er die Gelände-Rauheit nachvollzieht. Um diesen Effekt zu verstärken, wurde letztlich in eCognition

segmentbasiert die *Standardabweichung* des *TRI 20* herangezogen, um weniger stark ausgeprägte Endmoränen-Segmente zu klassifizieren.

Die wallartige Form der Endmoränen im Gelände lässt sich objektorientiert durch signifikante geometrische und Formparameter erfassen. Dabei spielten die Höhenwerte des DGM die entscheidende Rolle. Die langgestreckten Segmente weisen hohe Werte des Geometrie-Index „*Length/Width*" (das Verhältnis Länge-zu-Breite) sowie geringe Werte des Form-Index „*Compactness (polygon)*" (≙ Verhältnis der Fläche eines Segments zur Kreisfläche mit demselben Umfang, – vgl. DEFINIENS 2012: 288f.) auf. Der durchgängige Höhenunterschied von Endmoränen-Segmenten zu ihrer direkten Umgebung wurde über den Parameter „*Mean Difference to darker Neighbours (DGM 5)*" realisiert (vgl. Kapitel *Schmelzwasserrinnen / Kastentäler*).

Das folgende Schema zeigt die Parameter und Reihenfolge der mehrschrittigen Klassifikation der **Endmoränen**-Segmente:

0. Merge **Rücken (= Kuppig-hügelige Till-Landformen)**
1. **Rücken** → Brightness < 240 *AND*
   Rücken → Brightness >= 230 *AND*
   Rücken → Mean Diff. to darker Neighbours (DGM5) >= 8 *OR*
   Rücken → MaxCurv >= 0,025 *AND*
   Rücken → MaxCurv <= -0,01 *AND*
   Rücken → Mean Diff. to darker Neighbours (DGM5) >= 8
   → **Endmoränen**
2. **Rücken** → Distance to **Endmoränen** <= 100 Pixel *AND*
   Rücken → TRI 20 >= 2,5 *AND*
   Rücken → Compactness (Polygon) < 0,4 *AND*
   Rücken → Mean Diff. to darker Neighbours (DGM 5) >= 8
   → **Endmoränen**
3. **Rücken** → Standard Deviation (TRI 20) <= 2,7 *AND*
   Rücken → Area >= 16.000 Pixel *AND*
   Rücken → Length to Width >= 7
   → **Endmoränen**
4. **Endmor.** → Max. Overlap [%]: AeWEM 2km > 80
   → **Endmoränen FINAL**

In den folgenden beiden Grafiken (*Abb. 27* und *Abb. 28*) werden Profilschnitte durch einen markanten *Endmoränenwall* (AeWEM) bei Boms, südlich von Bad Saulgau gezeigt. In *Abb. 27* wird die kuppige Oberfläche vom Südosten (*kuppig-hügelige Till-Landschaft*) bis zur End-

moräne sowie das nordwestlich anschließende, deutlich flachere und ruhigere Terrain deutlich. Dies wird über die Parameter *TPI 200* und *TRI 20* repräsentiert. Besonders im Bereich des Endmoränenwalls (violetter Kasten) fallen die relativ hohen *TRI 20*-Werte auf, die hier ihr Maximum (8,45) erreichen, welches deutlich über den höchsten *TRI 20*-Werten (4,27) außerhalb des Endmoränenbereichs liegt.

Auch die *Slope*-Werte weisen hier ihre Maxima auf, sie eignen sich allerdings nicht zur Klassifikation von Endmoränen. Gründe hierfür liegen darin, dass die Hangneigung kleinräumig sehr große Unterschiede aufweist und sehr sensibel auf Geländesprünge reagiert. So besteht die Gefahr einer Fehlklassifikation, z.B. entlang steiler Talflanken, weswegen *Slope* nicht zur Klassifikation von Endmoränen-Formen herangezogen wurde.

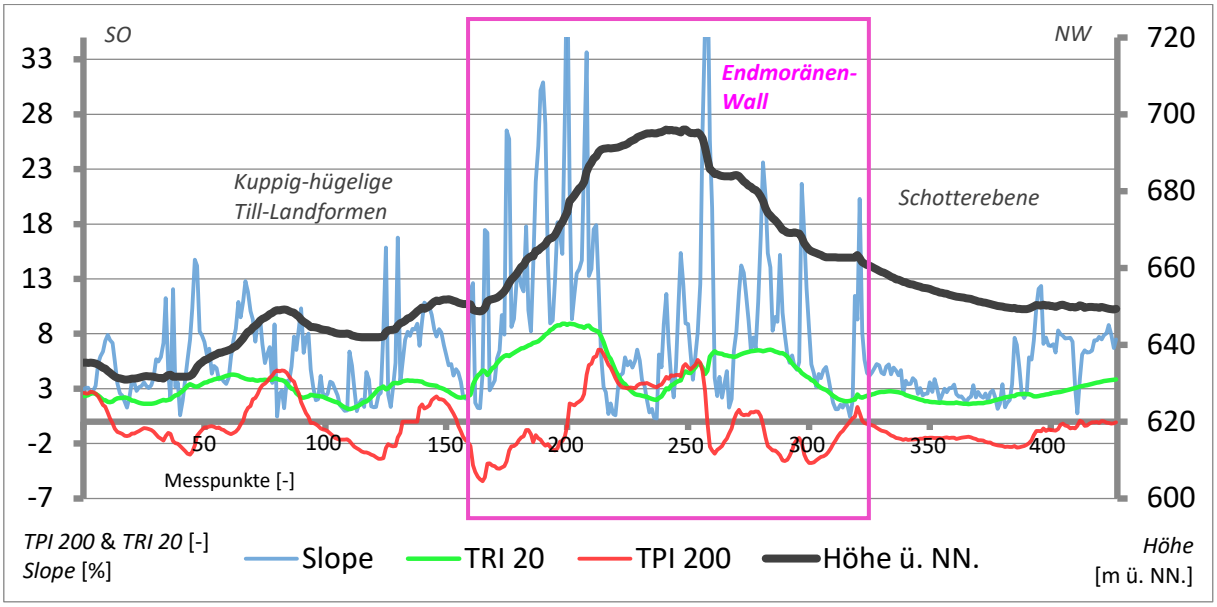


Abb. 27: **Profilquerschnitt durch einen Endmoränenwall** (AeWEM) (A).
Endmoräne bei Boms, südlich von Bad Saulgau. Pixelgröße 5 x 5 m. Abgebildet werden *Geländehöhe ü. NN.*, *Slope / Hangneigung* und Indizes (*TPI 200* & *TRI 20*). *Slope*-Werte > 35% werden nicht abgebildet, der Maximalwert beträgt 43,5%.
Der Pfad (2,8 km) wurde in SAGA GIS mit 428 Profil-Punkten im Abstand von ca. 6,5 m berechnet. Der violette Kasten markiert den Bereich des klassifizierten Endmoränenwalls. Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

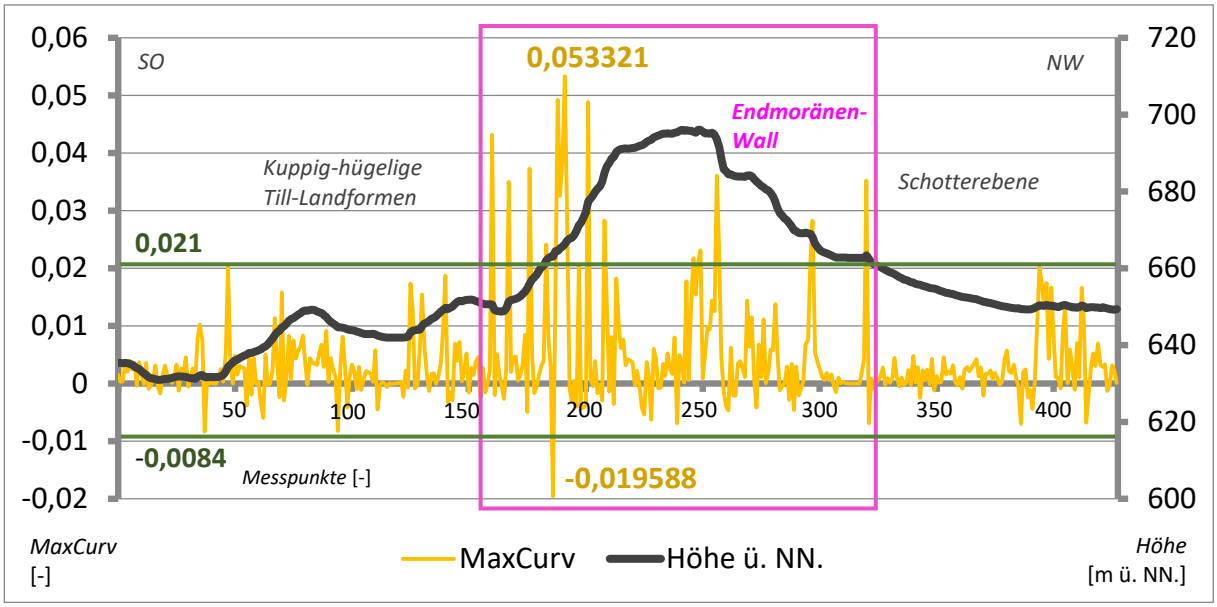


Abb. 28: **Profilquerschnitt durch einen Endmoränenwall** (AeWEM) (B).
Endmoräne bei Boms, südlich von Bad Saulgau. Pixelgröße 5 x 5 m. Abgebildet werden *Geländehöhe ü. NN.* und *Maximal Curvature* (MaxCurv), letztere mit Minimal- und Maximalwert.
Der Pfad (2,8 km) wurde in SAGA GIS mit 428 Profil-Punkten im Abstand von ca. 6,5 m berechnet. Der violette Kasten markiert den Bereich des klassifizierten Endmoränenwalls. Die beiden waagrechten grünen Linien zeigen die Schwellenwerte zur Identifizierung von Endmoränensegmenten auf Basis der MaxCurv.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

In *Abb.* 28 wird die *Maximal Curvature* (*MaxCurv*) im Bereich um den Bomser Endmoränenwall (violetter Kasten) gezeigt. Nordwestlich befinden sich *flachwellige*, südwestlich *kuppig-hügelige Till-Landformen*. Aufgrund der Kuppen-und-kessel-Oberfläche des Endmoränenwalls erreicht die *Maximal Curvature* im Bereich des Endmoränenwalls ihre lokalen Minima (-0,0196) und Maxima (0,0533). Dies wird besonders im Vergleich zu Landschaften Umgebung deutlich. Die Werte reichen hier über einen Korridor von -0,0084 bis 0,021 nicht hinaus (vgl. *Abb. 28*, grüne, waagrechte Linien).

Aus diesem Grund erwies sich die Maximal Curvature als geeigneter Hauptparameter zur Klassifikation von Endmoränenwällen.

Schotterebenen

Schotterebenen[27] als Landformen werden besonders durch ihren geologischen Untergrund geprägt. Dieser bestehen aus glazifluvial transportierten Schottern, welche bei Gletschervorstößen oder Eiszerfallsvorgängen abgelagert wurden (vgl. GLAVION et al. 2009: 189, BAUMHAUER & WINKLER 2014: 198, LGRB BW 2015). Auffällig ist ein vermehrtes Auftreten

[27] In Norddeutschland spricht man von Sanderflächen (vgl. GLAVION et al. 2009: 189).

in direkter nördlicher Nachbarschaft zu den *Endoränen*wällen der AeWEM und der IWEM, meist an Gletschertoren. Hier grenzen die Schotterebenen an *Schmelzwasserrinnen / Kastentäler*. Zusätzlich treten *Schotterebenen* innerhalb *Becken* im JML und im AML auf.

An der östlichen Flanke des Unteren Schussenbeckens haben sich Schotter im Bereich der „Tettnanger Terrassen" zwischen dem ehemaligen Eisrand und östlich angrenzender *kuppig-hügeliger Till-Landschaft* abgelagert (SCHWAB 2014: 6f.).

Morphologisch lassen sich *Schotterebenen* im DGM 25 als relativ ebene Flächen beschreiben. Jedoch existieren aufgrund der häufig vorkommenden Schrägschichtung auch einheitlich leicht geneigte Flächen (SCHWAB 2014: 6). Das bedeutet weder ausgeprägt konkave noch ausgeprägt konvexe Flächen mit niedrigem Gefälle. Hierfür eignen sich *TPI 150-Werte* um »0«. Gleichzeitig müssen die möglichen Schotterebenen-Segmente einen signifikanten Anteil an der thematisch-lithologischen Klasse *Glazifluviale Kiese und Sande* aufweisen.

1. **Segmente** → Max. Overlap [%]: Glazifluv. Kiese/Sande > 0,66 *AND*
→ TPI 150 < 0,5 *AND*
→ TPI 150 > -0,5 *AND*
→ Slope <= 2
→ **Schotterebenen**

Molasse-Berglandformen

Molasse-Berglandformen bilden zusammen mit den *steilen Kerbtälern / Tobeln* die am stärksten zerklüfteten Landformen des Untersuchungsgebiets. Das liegt unter anderem daran, dass die Molassesedimente die älteste und am stärksten verfestigte Fazies im Untersuchungsgebiet darstellen, welche der Erosion am stärksten wiedersteht. Da *steile Kerbtäler / Tobel* u.a. durch *TPI 150* und *Slope* definiert wurden, kam bei der Klassifikation der *Molasse-Berglandformen* zur besseren Unterscheidung der *TRI 15* im DGM 25 zum Einsatz. Lediglich im letzten Schritt wurde der *TPI 150* mit einem niedrigen Schwellenwert zur Endkontrolle genutzt, um unpassende *Molasse-Berglandformen*-Segmente zu deklassifizieren.

Die Molasse-Landformen des Untersuchungsgebiets unterscheiden sich in ihrer Zerklüftung voneinander. Der Gehrenberg weist eine weniger raue Oberfläche, als die beiden anderen großen Molassegebiete (Stockacher Bergland und Adelegg) auf. Deshalb wurde bei der Klassifikation des Gehrenbergs ein etwas geringerer *TRI 15*-Schwellenwert als bei den übrigen Molasse-Formen angesetzt. So konnten auch Formen an steilen Molasse-Hängen detektiert werden, welche dünne Auflagen von Deckenschottern oder Tills aufweisen.

Die folgende Zusammenstellung zeigt den Algorithmus zur Klassifikation der Molasse-Berglandformen.

1. **Segmente** → ≠ Hohlformen (Becken, Täler, Schmelzwasserrinnen, Kerbtäler) *AND*
   → ≠ Till-Landformen *AND*
   → Max. Overlap [%]: Molasse >= 90 *AND*
   → TRI 15 >= 3 (*Gehrenberg*) bzw. TRI 15 >= 6 (*Adelegg* & *Stock. Bergld.*)
   → **Molasse-Berglandformen**
2. **Molasse-Bergldf.** → Grow region: Rel. Border to **Molasse-Berglandformen** >= 0,7
   → **Molasse-Berglandformen**
3. **Molasse-Bergldf.** → With mean TPI 150 < 0,5 *OR*
   → Area < 4500 Pixel
   → **unklassifiziert**

In *Abb. 29* werden alle oben erläuterten Abläufe der 1. OBTA-Ebene zusammengefasst. Dabei wird in **Eingangsdaten**, **Operationen**, **Zwischenergebnissen** (*weiß*) und **Landformen** (≙ Ergebnisse) unterschieden.

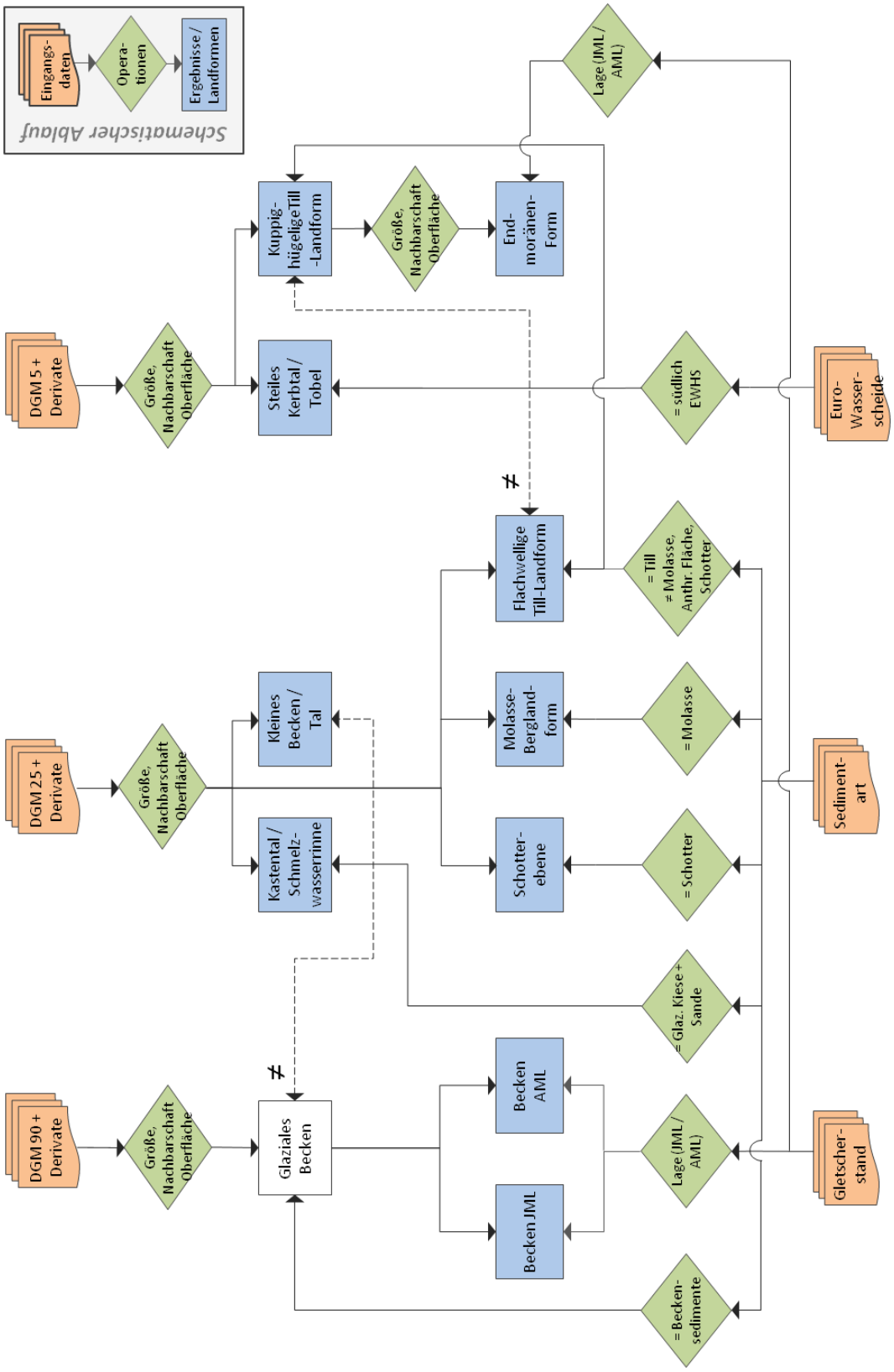


Abb. 29: **OBTA-Klassifikation Landformen** (1. OBTA-Ebene).
Flussdiagramm des schematischen Klassifikationsablaufs von den raster- (DGM + Derivate) und vektorbasierten (Gletscherstand, Gesteinsart & Europäische Hauptwasserscheide) Parametern (= orange) zu glazialen Landformen als Vektordaten (= blau). Vereinfachte Klassifikationsentscheidungen des Algorithmus werden grün, Zwischenergebnisse weiß dargestellt.

3.2.4 **Glaziale Landschaften und Haupt-Landschaften** (OBTA-Ebene 2-3)

Die OBTA-basierte Klassifikation liefert die zehn Landformklassen als Zwischenergebnisse des 1. Analyseschritts (Shapefiles). Diese wurden einzeln auf ein 5 x 5 m Raster konvertiert und auf binäre Werte (»0« für »*No Data*« und 1 für die jeweilige Landform-Klasse) reklassifiziert. So gingen alle zehn Landform-Klassen im 2. Analyseschritt erneut in die Segmentierung ein und wurden schließlich zu Landschaftsklassen zusammengefasst. Folglich liefert **OBTA-Ebene 2** die (Klein-) bzw. (Teil-)**Landschaften** des Untersuchungsgebiets. Dies ist das zentrale Ziel der Arbeit mit der höchsten thematischen Informationstiefe. In *Abb. 30* wird der Übergang von Schritt 1 zu Schritt 2 visualisiert.

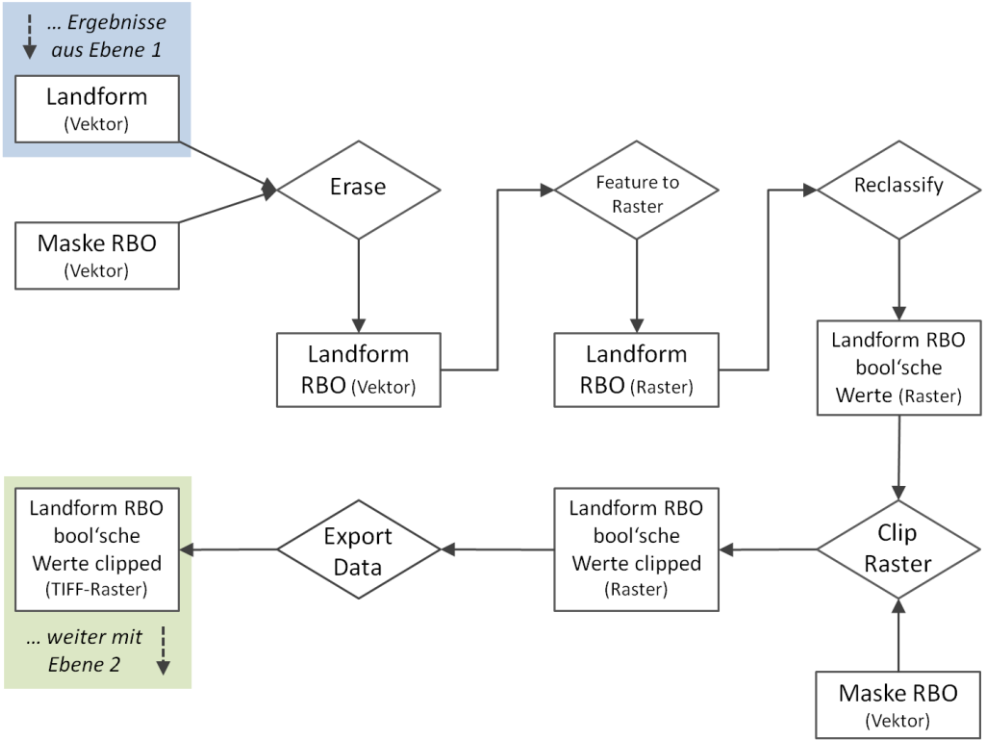


Abb. 30: **Datenkonversion beim Übergang von OBTA-Ebene 1 zu OBTA-Ebene 2.** (Flussdiagramm exemplarisch für eine Landform-Klasse)

Auf der 2. OBTA-Ebene werden alle Landform-Segmente zu Gruppen gleicher oder ähnlicher Landschaften zusammengeführt. Dazu wurden alle Landformen mit einem relativ groben Scale-Faktor (150) segmentiert (vgl. *Abb. 31*).

Um kleinräumige Landformen gegenüber großflächigen dabei nicht untergehen zu lassen, wurden die Klassen unterschiedlich gewichtet. So wurden morphologisch basierte Landformen wie *Kleine Becken / Täler* oder *Kuppig-hügelige Till-Landformen* etc. deutlich stärker gewichtet als lithologisch basierte Landformen wie *Schotterebenen* oder *Molasseberglandschaft*[28].

[28] Im Faktor 10:1.

Als Klassifikationsreihenfolge erfolgte zuerst der Ausschluss von Segmenten ohne Landform-Information als *No-Data*-Werte. Anschließend wurden flächenhaft vorliegende Haupt-Landschaftsklassen erfasst (Große Becken, Kleine Becken / Täler) und diese anschließend jeweils um eine oder mehrere Teil-Landschaften erweitert. Insgesamt wurden auf OBTA-Ebene 2 siebzehn Landschaftsklassen ausgewiesen. Diese größere Zahl resultiert aus der inneren Differenzierung der Landschaften, wie unten gezeigt wird. Im Folgenden ist ein Überblick über die Landschaftsklassen zu finden.

- **Hohlform basierte Landschaften** (= glaziale oder fluviale Prägung des Reliefs)
  - ***Große Becken (AML)***
  - ***Große Becken mit Mooranteil > 50% (AML)***
  - ***Große Becken mit Schotteranteil > 50% (AML)***
  - ***Große Becken (JML)***
  - ***Große Becken mit Mooranteil > 50% (JML)***
  - ***Große Becken mit Schotteranteil > 50% (JML)***
  - ***Große Becken mit kuppig-hügeligen Formen (JML)***
  - ***Schmelzwasserrinnen (AML)***
  - ***Kleine Becken / Täler***
  - ***Kleine Becken / Täler mit kuppig-hügeligen Formen***
  - ***Steile Kerbtäler / Tobel***
- **Vollform basierte Landschaften**
  - ***Flachwellige Till-Landschaft (AML)*** (vgl. STEINHARDT et al. 2012: 149f.)
  - ***Endmoränen***
  - ***Flachwellige Till-Landschaft (JML)***
  - ***Kuppig-hügelige Till-Landschaft*** (STEINHARDT et al. [2012: 149f.] sprechen in diesem Zusammenhang von einer „kuppigen Grundmoränenlandschaft“).
- **Lithologisch basierte Landschaften** (= großflächige Landschaften)
  - ***Schotterflächen***
  - ***Molasse-Bergland*** (≙ stark kleinräumig reliefierte Landschaft aus oberflächlich anstehender Molasse)

Anzumerken ist, dass die kuppig-hügeligen Landformen zu Landschaftsklassen zusammengefasst wurden, während für die Endmoränen die Landform-Segmente aus OBTA-Ebene 1 dienten. Diese Klasse wurde als einzige nicht der Prozedur von OBTA-Ebene 2 unterzogen, da eine flächenhafte Zusammenfassung dem einzigartigen Charakter der stark linienhaft auftretenden Endmoränenzüge und-Wälle nicht gerecht würde (vgl. Kapitel 3.2.3). Weiter wurden die lithologisch basierten Moorflächen nicht als eigene Landschaft betrachtet, sondern zur Differenzierung der Beckenlandschaften herangezogen.

Beim Übergang von OBTA-Ebene 2 zu **OBTA-Ebene 3** wurde die Klassenzahl von 17 auf fünf reduziert. In eCognition wurden so mehrere Landschaftsklassen durch Reklassifikation zu Großlandschaften zusammengefasst. Es fand keine neue Segmentierung oder Klassifikation statt. Bei den vier Großlandschaften handelt es sich um *Becken-* und *Flusslandschaften*, *Ebenen*, *Molasse-Bergland*. *Kuppig-hügelige* und *flachwellige Till-Landschaft* sowie die *Endmoränenformen* wurden als fünfte Großlandschaft-Klasse *Till-Landschaften* zusammengefasst (vgl. *Abb. 31*).

Während auf OBTA-Ebene 2 eine räumliche Differenzierung der Becken- und Flusslandschaften besteht, entfällt diese auf der 3. OBTA-Ebene. Auf die Zusatzinformationen zu kuppig-hügeligen Bereichen, Moor- oder Schotterbedeckung innerhalb der Becken wurde ebenfalls verzichtet. Die *Beckenlandschaften* (OBTA-Ebene 3) entsprechen den Becken-Landformen *(Große) Becken* der 1. OBTA-Ebene. Diesmal wurde jedoch nicht nach JML und AML unterschieden. Die *Fluvial-Landschaften* fassen auf der 3. OBTA-Ebene die *Schmelzwasserrinnen*, *Kleinen Becken / Tälern* und *Steile Kerbtäler / Tobel* (OBTA-Ebene 1 und 2) zusammen.

In *Abb. 31* werden die oben beschriebenen Zusammenhänge und Abläufe auf den drei Ebenen verdeutlicht. Dabei werden alle Landschaftsklassen der OBTA-Ebenen 2 und 3 gezeigt.

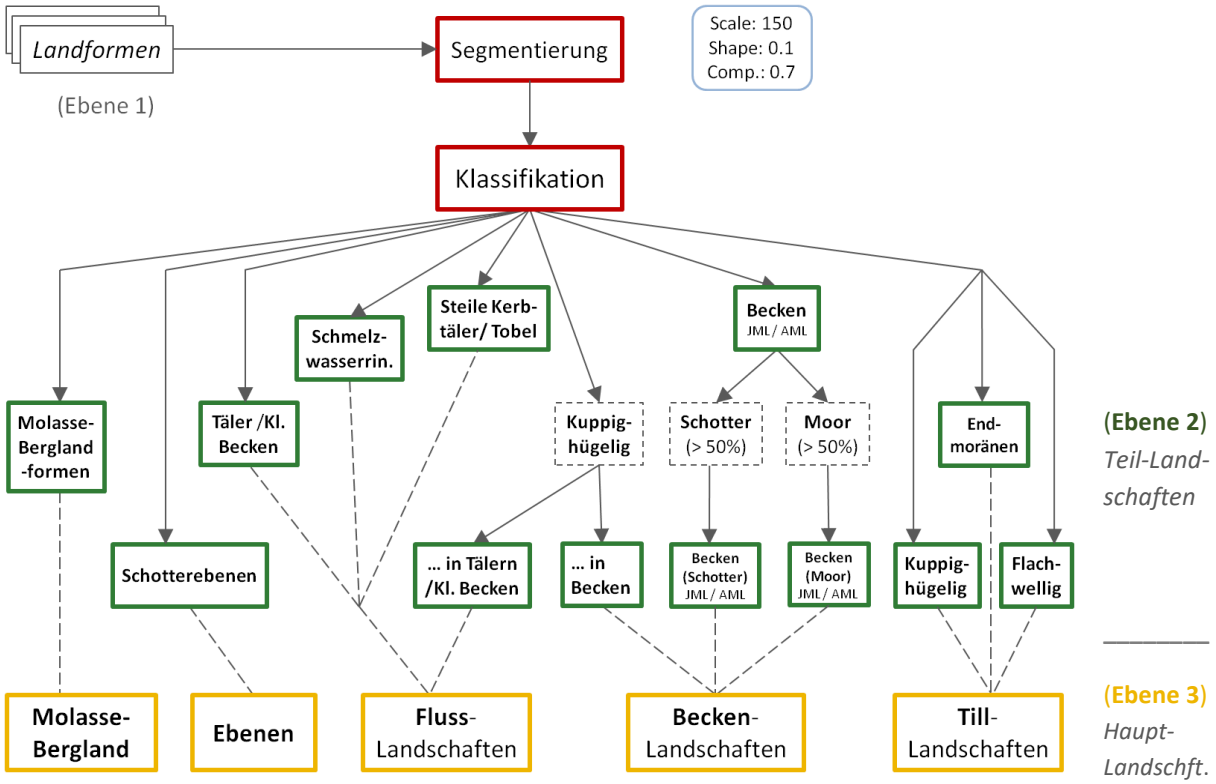


Abb. 31: **OBTA-Klassifikation glazialer (Haupt-)Landschaften** (OBTA-Ebene 2-3). Schematischer Ablauf des 2. Klassifikationsschritts von den rasterbasierten **Landform-** (aus OBTA-Ebene 1, *oben links*) zu vektorbasierten **Landschaftsklassen** (OBTA-Ebene 2, *grüne Umrandung*). Ebenfalls aufgeführt ist die übergeordnete Zugehörigkeit zu **Haupt-Landschaftsklassen** (OBTA-Ebene 3, *gelbe Umrandung*). Die Landform-Klassen werden in Kapitel 3.2.3 erläutert.

4 Ergebnisse und Diskussion: *Fachwissenschaftlicher Teil*

In diesem Kapitel geht es um die Ergebnisse der OBTA-Klassifikation und deren Diskussion. Hierbei werden die unterschiedlichen Skalenbereiche (OBTA-Ebenen 1-3) auf jeweils einer Karte dargestellt. Die Landformen bzw. (Teil-) und Haupt-Landschaften werden grundsätzlich farblich voneinander unterschieden. Hohlformen erhalten hierbei Braun- und Grüntöne, Vollformen werden in Blautönen, violett oder schwarz dargestellt. Weitere Abstufungen werden durch Schraffuren oder Signaturen symbolisiert.

In einem weiteren Schritt werden die Ergebnisse dieser Arbeit mit händisch-wissensbasierten Klassifikationen verglichen und diskutiert. Zuletzt werden mögliche Anwendungsfelder der hiesigen Ergebnisse vorgestellt.

4.1 Ergebnisse der objektbasierten Klassifikationsschritte (OBTA-Ebenen 1-3)

Die Klassifikation führte auf ***OBTA-Ebene 1*** zu ***10 Landform-Klassen*** (vgl. *Abb. 29*, *Abb. 32*). Dabei wird zunächst die grundsätzliche Unterscheidung in Hohl- und Vollformen deutlich. Die Modellierung auf unterschiedlichen Skalenebenen (vgl. Kapitel 3.2) erwies sich als zielführend. Bei den Vollformen kamen die größten räumlichen Auflösungen (DGM 5) zum Einsatz. Das führte zu wesentlich kleineren Geoobjekten bzw. Landformen (z.B. *Drumlins* & *kuppig-hügelige Till-Landformen*). Die meisten Landformen (*Schmelzwasserrinnen, Kleine Becken / Täler, Schotterebenen, Molassebergland-Formen* & *Flachwellige Till-Landformen*) wurden auf einer mittleren räumlichen Auflösung (DGM 25) erfasst und klassifiziert. Die größten Geoobjekte wurden auf Basis der kleinsten räumlichen Auflösung (DGM 90) erfasst, hierbei handelt es sich um *(Große) Becken*.

Die Analysen auf ***OBTA-Ebene 2*** (vgl. *Abb. 33*) erbrachten final ***17 Landschafts-Klassen*** im Untersuchungsgebiet. Hierbei handelt es sich um das zentrale Klassifikationslevel der Untersuchung – die Fokalebene. Die Klassenbezeichnungen werden in Kapitel 3.2.4 genannt und strukturiert.

Zur besseren Übersicht wurden kombinierte Landschaftsklassen in der Kartenlegende in *Abb. 33* vereinfacht dargestellt. Das brachte eine Reduktion von 17 auf 12 Legendensymbole. Dabei ging es um die Zusammenfassung von morphologisch-lithologisch ähnlichen Räumen zu Landschaften. Die *kuppig-hügeligen* und die *flachwelligen* Vollformen wurden zu entsprechenden Landschaften aggregiert, welche hauptsächlich durch diese Landformen

geprägt werden. Noch unklassifizierte, aber strukturverwandte Segmente in der direkten Nachbarschaft ohne signifikant neuen Landschaftscharakter wurden diesen zugeordnet.

Als einzige Vollform-Klasse wurden die *Endmoränenformen* nicht weiter zusammengefasst. Diese Landform-/Landschafts-Klasse kommt häufig in Form vereinzelter signifikanter Landschaftselemente vor. Sie fällt deshalb oft unter die Kategorie „Singularität" und würde so in den meisten Fällen als Teil einer anderen Landschaftsklasse (vgl. das *Bottom-up Konzept* in Kapitel 2.2.2) dem eigentlichen morphologischen Charakter der jeweiligen Landschaft nicht mehr gerecht.

Die Hohlformen wurden nicht weiter zusammengefasst, sondern nach thematischen Informationen wieder unterteilt. Dieses weitere Kriterium über die Beschaffenheit des jeweiligen Untergrunds kategorisiert die großen[29] Hohlformen (*Große Becken*, *Kleine Becken und Täler*). So wurde dem morphologischen Charakter der jeweiligen Landschaften Rechnung getragen (vgl. LGRB BW 2015: 61). Die Landschaftsgeschichte ging mit der Unterscheidung von Jung- und Altmoränenlandschaft in die Klassifikation mit ein. So wurden *(Große) Becken* und *flachwellige Till-Landformen* innerhalb dieser Sub-Klassen unterschieden.

Steile Kerbtäler / Tobel gingen wie die *Endmoränenformen* als Landform-/Landschafts-Klasse direkt in die Hauptklassifikation (OBTA-Ebene 2) ein. Eine Landschaft, die durch *Steile Kerbtäler / Tobel* geprägt ist, besteht logischerweise aus ebendiesen. Die Nachbar-Landschaft weist eine deutlich verschiedene Morphologie auf. Da diese kleinräumig dominierend für das Landschaftsbild ist, bildet sie in diesen Fällen auch eine andere Klasse.

Einige Landschafts-Klassen werden als *„lithologisch basierte Formen"* bezeichnet. Hierbei handelt es sich um Landschaften, welche aufgrund ihrer starken Prägung durch den geologischen Untergrund ausgewiesen wurden. So dominierte bei „*Schotter*ebenen" und „*Molasse*-Bergland-Formen" das jeweilige Material. Morphologische Kriterien, wie geringe *Slope*-Werte bei der ersten und besonders steile Geländeverhältnisse bei der zweiten Klasse akzentuieren diese und wurden in die Klassifikation mit einbezogen.

Auf ***OBTA-Ebene 3*** (vgl. *Abb. 34*) wurden die Landschaften aus OBTA-Ebene 2 zu ***5 Haupt-Landschaftsklassen*** zusammengefasst:

- *Fluss*-,
- *Becken*- und
- *Till*-Landschaften,
- *Ebenen* [≙ Schotterebenen],
- *Molasse-Bergland*.

[29] Die *Steilen Kerbtäler / Tobel* als kleine Hohlformen werden hiervon bewusst ausgenommen.

Diese geben Aufschluss über den landschaftlichen Hauptcharakter des Untersuchungsgebiets. Dabei wird die Landschaftsgenese des Untersuchungsgebiets als ein komplexes Zusammenspiel von Sedimentations- und Erosionsprozessen deutlich sichtbar:

Der aus mächtigen Molassesedimenten bestehende Untergrund wurde während der Kaltzeiten großräumig mit Till bedeckt. Dieser bildet die charakteristischen kuppig-hügeligen Landschaften. Mit dem wiederholten Vorstoß von Gletscherzungen wurden proglazial häufig Ebenen aus Schmelzwasserschottern abgelagert. Während der Gletschervorstöße modellierten die Loben von Süden her fächerförmig kleinere und größere Becken in die Till-Landschaft. Diese wurden später periglazial durch Solifluktion und postglazial durch fließendes Wasser weiter geformt und bilden heute Becken- oder Flusslandschaften. Dabei ist der Hauptcharakter der jeweiligen Landschaft für deren Zuordnung ausschlaggebend.

An einigen Beckenrändern und Geländestufen, aber auch an einzelnen prominenten Erhebungen (Gehrenberg, Adelegg sowie im Raum zwischen Überlingen und Stockach) wurden die Till-Sedimente bis heute wieder flächig abgetragen, sodass hier bergige Molasse-Landschaften vorherrschen.

Die verschiedenen Kaltzeiten, mit unterschiedlichen Eisrandlagen und wiederholter glazialer Überprägung machen die Landschaft des Untersuchungsgebiets sehr vielseitig und deren Klassifikation dementsprechend komplex.

Auf den folgenden Seiten werden die drei Klassifikations-Ebenen als Karten dargestellt. Zur besseren Orientierung sind jeweils die drei wichtigsten Eisrandlagen verzeichnet. Im Anschluss werden die Klassifikationsergebnisse der einzelnen Landschaften auf Basis von OBTA-Ebene 2 (Fokalebene) besprochen (siehe Kapitel 4.1.1-4.1.3).

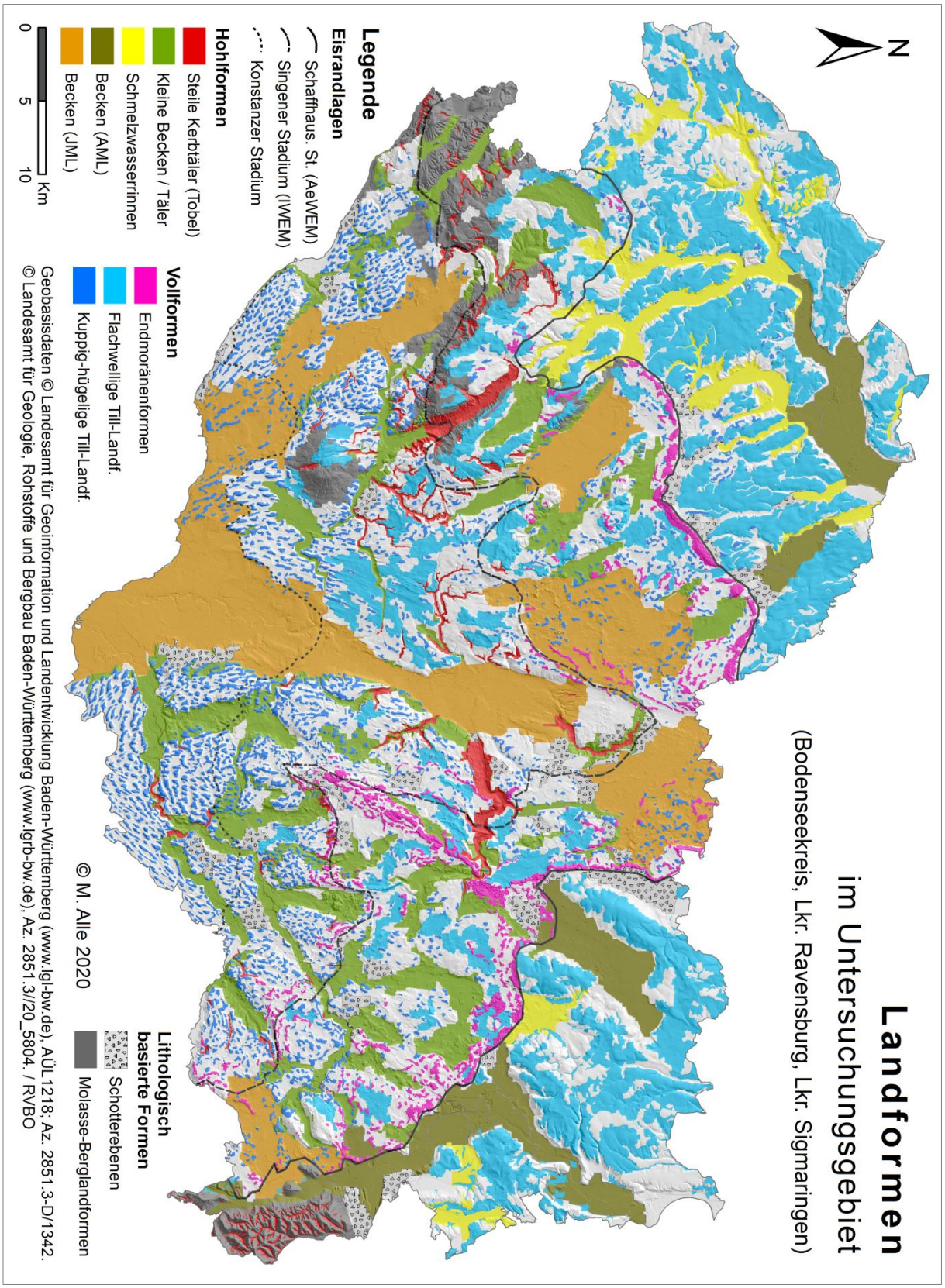


Abb. 32: **Landformen des Untersuchungsgebiets**. (**1. OBTA-Ebene**)
(semiautomatisierte OBTA-Klassifikation)
1. Spalte der Legende: Hohlform basierte Landschaftsklassen (Morphologie),
2. Spalte: Vollform basierte Landschaftsklassen (Morphologie),
3. Spalte: lithologisch basierte Landschaftsklassen (Geologie).

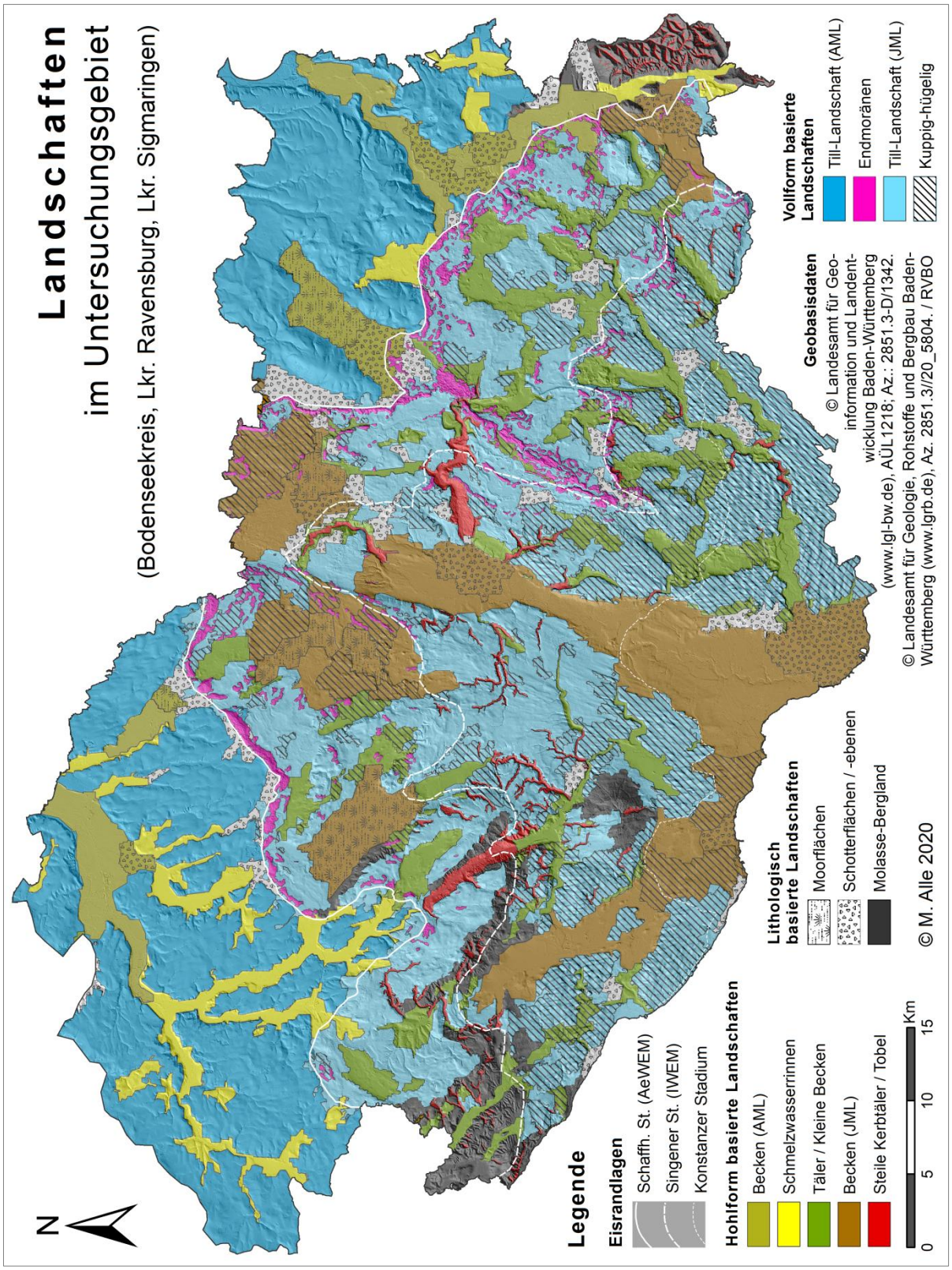


Abb. 33: **<u>Landschaften</u> des Untersuchungsgebiets. (2. OBTA-Ebene)**
(semiautomatisierte OBTA-Klassifikation; Fokalebene)
1. Spalte der Legende: Hohlform basierte Landschaftsklassen (Morphologie),
2. Spalte: Lithologisch basierte Landschaftsklassen (Geologie),
3. Spalte: Vollform basierte Landschaftsklassen (Morphologie).
Anmerkung zur Klasse Till-Landformen *(*JML *bzw.* AML*): hierbei handelt es sich grundsätzlich um* flachwellige *Landschaften.* Kuppig-hügelige *Landschaften sind schraffiert dargestellt.*

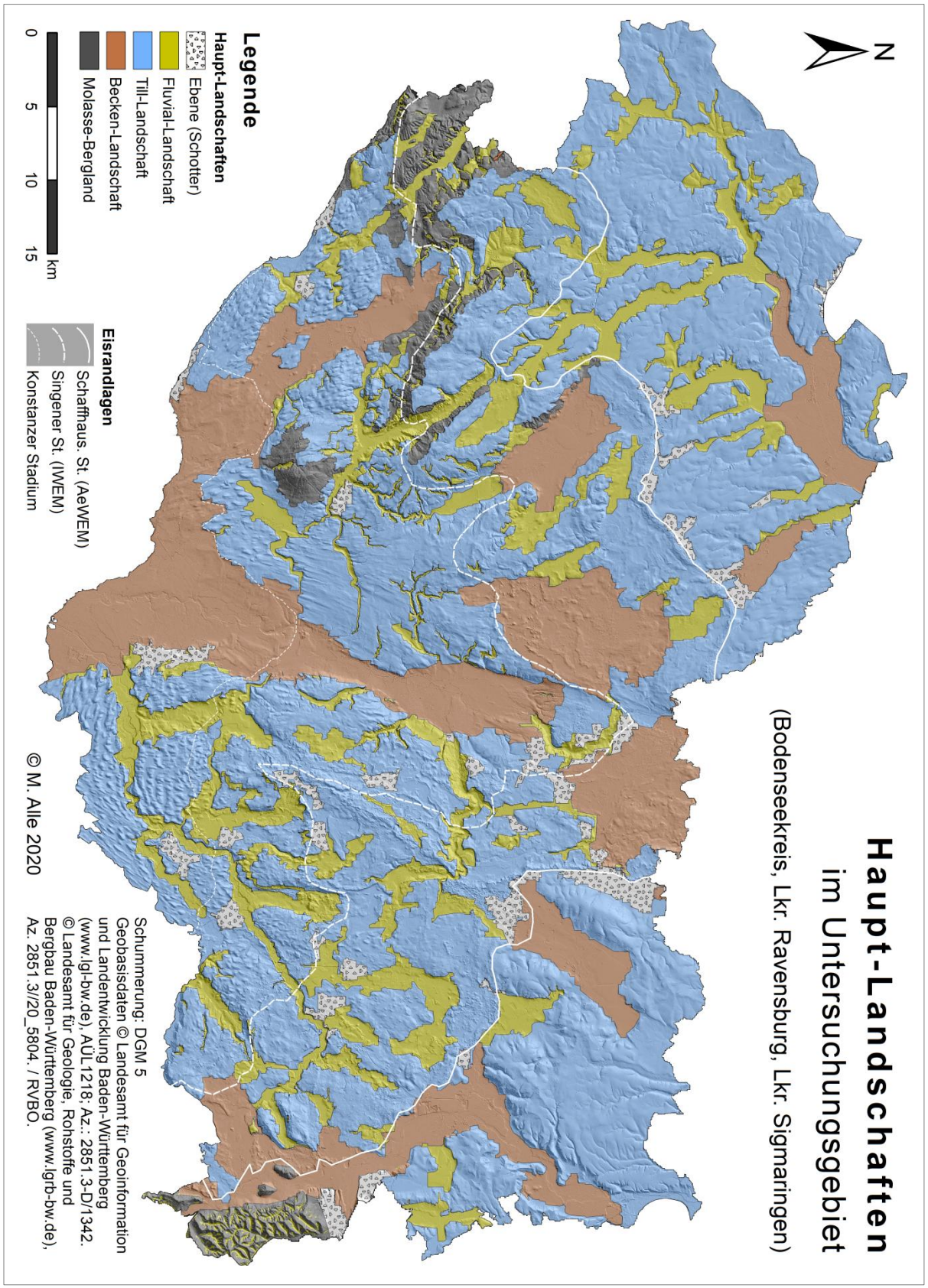


Abb. 34: **Haupt-Landschaften des Untersuchungsgebiets**. (**3. OBTA-Ebene**)
(semiautomatisierte OBTA-Klassifikation der fünf Haupt-Landschaften)

4.1.1 Hohlform basierte Landschaften

Beckenlandschaften

Räumliche Grundlage für diese Landschaftsklasse auf der 2. und 3. OBTA-Ebene bildet die Landformklasse *(Große) Becken* (1. OBTA-Ebene). Die objektbasierte Klassifikation ermöglicht es, die landschaftliche Hierarchie sichtbar zu machen. Auf der Fokalebene (≙ 2. OBTA-Ebene) werden morphologisch geprägte Landschaften durch ihren lithologischen und mikromorphologischen Charakter differenziert. Dies wird in *Abb. 33* jeweils durch eine enge Schrägschraffur gekennzeichnet, während der Farbton der Landschaftsklasse beibehalten wurde.

Im Bereich südlich der IWEM, befinden sich zunächst die beiden zusammenhängenden, tiefgelegenen Beckenlandschaften. Sie werden durch das westlich gelegene Salemer (398 bzw. 420-500 m ü. NN) und das in Süd-Nord-Richtung verlaufende Schussenbecken (398-550 m ü. NN) gebildet, die beide Zweigbecken des Bodenseestammbeckens darstellen (vgl. LGRB BW 2015: 100). Die deutlich höher gelegene Generation der ebenfalls in der Würm-Kaltzeit geprägten Becken besteht (von West nach Ost) aus dem Wilhelmsdorfer (610-625 m ü. NN), Altshauser[30] (565-580 m ü. NN) und Oberen Schussenbecken (575-605 m ü. NN) sowie dem Isyner Becken (680-705 m ü. NN). Sie grenzen an die AeWEM. Sie alle weisen in Teilbereichen eine Prägung durch Moor- oder Schotterebnen auf bzw. haben kuppig-hügelige Teilbereiche.

Im AML verhält es sich ähnlich: Das Wurzacher Becken (660-665 m ü. NN) ist im südlichen Teil schottergeprägt, während der nördliche Teil stark vermoort ist. Außerhalb der AeWEM befinden sich (vor allem im westlichen Untersuchungsgebiet) an den Gletschertoren kleine Täler und flache Schmelzwasserrinnen. Diese sind teilweise auch vermoort, häufig beinhalten sie auch markante Schotterebenen.

Im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets, im Bereich der Leutkircher Heide (vgl. DONGUS 1991: 57), liefert der Algorithmus ein hoßkirch-/rißzeitliches Becken (das Leutkircher Becken, 615-640 m ü. NN). Dieses fungierte würmzeitlich als Schmelzwasserrinne, wovon die großen Schotteranteile rund um Leutkirch zeugen. Es handelt sich folglich um ein mit würmzeitlichen Sedimenten verfülltes Becken im AML. Im Nordwesten des Untersuchungsgebiets liegt das Riedlinger Becken (vgl. GRAUL 1952: 5f., HUTTENLOCHER 1959: 5). Dieses rißzeitlich entstandene Becken diente während der Würmzeit als Schmelzwasserrinne und wurde mit glazialen Schottern sowie holozänen Auensedimenten der Donau verfüllt (GRAUL 1952: 5).

[30] ELLWANGER (in LGRB BW 2015: 66) spricht von der Altshauser *Depression*.

Die Analyse der lithologischen Prägung der Beckenlandschaften erfolgte hinsichtlich ihres Moor- und Schotteranteils. Auffällig ist die thematische Gegensätzlichkeit beider lithologischen Klassen: Hohe Anteile der einen brachten geringe Anteile bei der anderen Klasse. Nur drei Beckenlandschaften machten dabei eine Ausnahme (das Salemer, das Wurzacher und das Obere Schussenbecken). Sie weisen ähnlich hohe Moor- und Schotteranteile auf.

Abb. 35 zeigt eine dreidimensionale Übersichts-Grafik der oben beschriebenen Beckenklassen. Hier werden die einzelnen Subklassen farblich differenziert. Dabei wird auch die unterschiedliche Höhe der Beckengenerationen deutlich.

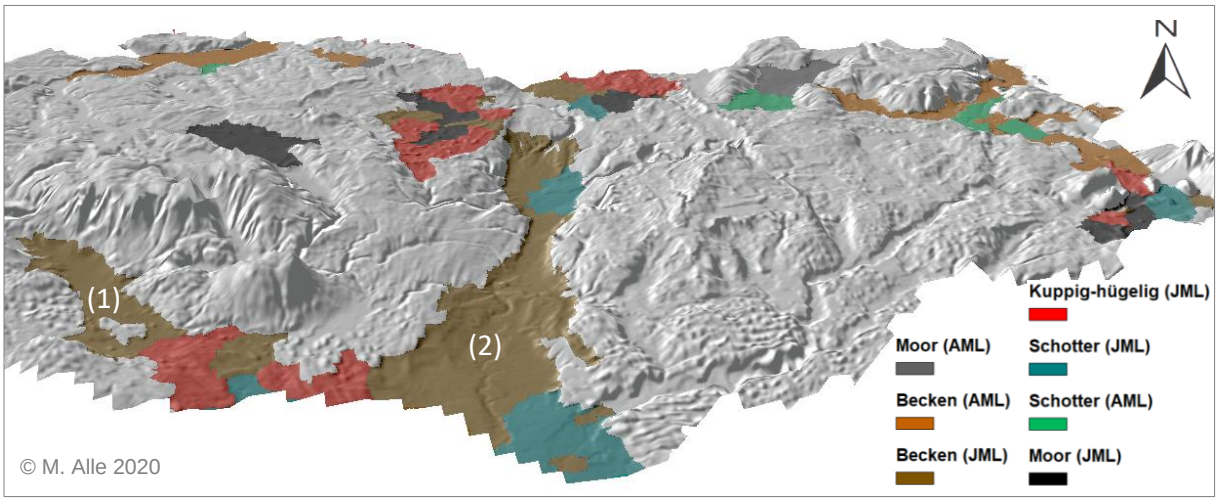


Abb. 35: **Unterschiedliche Beckenlandschaften** (2. OBTA-Ebene).
Gut zu erkennen sind im Südwesten das Salemer Becken (1) sowie das östlich anschließende Schussenbecken (2), die sich aus dem tief gelegenen Bodensee-Stammbecken nach Nordwesten bzw. Norden verzweigen. Der Höhenunterschied zu den weiteren, höher gelegenen Becken wird ebenfalls deutlich. Die zunächst morphologisch ermittelten Becken wurden durch ihr spezifisches geologisches Material (Torf oder Schotter) bzw. Mikromorphologie (*kuppig-hügelige Landformen*) weiter differenziert.
Schrägansicht (35° Neigung), 10-fache Überhöhung. Schummerung: DGM 90 (SRTM). Copernicus data and information policy Regulation (EU) No 1159/2013 of 12 July 2013. With funding by the EU.

Eine gute Unterscheidungsmöglichkeit der verschiedenen *(Großen) Becken* liefert der Mooranteil (vgl. *Abb. 36*). Es ergaben sich drei Kategorien:

1. ***Becken mit mehrheitlichem Mooranteil (> 60%)***– das Wilhelmsdorfer Becken mit dem Pfrunger Ried (0% Schotteranteil) sowie das Wurzacher Becken mit dem Wurzacher Ried (gut 34% Schotteranteil).
2. ***Becken mit mittlerem Mooranteil (ca. 25-50%) und in der Regel geringeren Schotteranteilen (< 20%)*** – das Isnyer Becken, das Altshauser Becken, das Obere Schussenbecken und das Saulgauer Becken.

3. ***Becken mit geringen Mooranteilen (< 10%) und dabei größeren Schotteranteilen (mindestens 4-facher Mooranteil)*** – das Salemer Becken (*Ausnahme!*), das Untere und Mittlere Schussenbecken, das Leutkircher sowie das Riedlinger Becken.

In Kategorie 1 bildet das Wilhelmsdorfer Becken mit dem Pfrunger Ried „eine der größten geschlossenen Moorzonen Oberschwabens" (DONGUS 1991: 38). Es befindet sich zwischen IWEM und AeWEM im JML. Sein Untergrund besteht komplett aus Niedermoortorfen, welche 2-10 m mächtig sind und von drei größeren Hochmoorinseln überdeckt werden (Ebd.: 39). Der fehlende Schotteranteil fällt bei allen Becken südlich der AeWEM auf, die im Westen des Untersuchungsgebiets liegen. Weiter unten wird deutlich, dass der fehlende Kontakt zu einer Endmoräne bzw. zu einem Gletschertor die nicht vorhandenen Schotter erklärt.

Das Wurzacher Becken mit seiner Lage direkt nördlich der AeWEM im AML besteht zu knapp 2/3 aus Moor (Norden) und gut 1/3 aus Schottern (Süden). Während des Würm-Maximums hatte sich im bereits rißzeitlich entstandenen Wurzacher Becken ein Eisrandstausee gebildet (KRAYSS & KELLER 1996: 119, 126f.), in dessen südlichen Bereich sich großflächig Schotter ablagerten.

Die meisten Becken der Kategorie 2 befinden sich nördlich der IWEM im JML. Becken, welche direkt an die AeWEM oder die IWEM grenzen, weisen in diesem Bereich signifikante Schotteranteile auf (Isnyer Becken und Oberes Schussenbecken). Diese liegen an den Gletschertoren und Durchbrüchen, an denen Schmelzwasserschotter sedimentiert wurden. Da das Altshauser Becken keinen Kontakt zur AeWEM bzw. zu einem Gletschertor der IWEM hat, fehlt auch hier der Schotteranteil.

Das Saulgauer Becken grenzt im Süden nicht direkt an die AeWEM sondern an eine *Schotterebene*, welche als eigenständige OBTA-Klasse ausgewiesen wurde. Würde man die Schotterebene und das Saulgauer Becken als eine Landschaft betrachten, ergäbe sich ein gemeinsamer Schotteranteil von 32,6%. Die Moorgebiete der Kategorie-2-Becken sind auf das Vorhandensein von Eisstauseen zurückzuführen. Das Altshauser Becken steht beispielhaft hierfür (vgl. DONGUS 1991: 39).

Je weiter nördlich die Becken liegen, desto größer wird der Schotteranteil. Die Becken der Kategorie 3 zeigen das. Hier sind, mit Ausnahme des südlich gelegenen Salemer Beckens, die Schotteranteile am höchsten (35-50%). Der geringe Schotteranteil des Salemer Beckens hat seinen Ursprung im großen Salemer Eisstausee während des Konstanzer Stadiums (vgl. SCHWAB & MEIERSHOFER 2015). Dieser lagerte an seinem Grund große Lagen von Beckentonen und Seesedimenten ab, welche zu Vermoorungen führten. Die Moorgebiete wurden postglazial von Menschenhand trockengelegt, um das Salemer Becken bereits seit Jahrhunderten ackerbaulich zu nutzen (BERAN 1980: 32, DONGUS 1991: 32).

Der generell höhere Schotteranteil in den nördlichen Becken ist mit der Gletscherstoßrichtung und dem Schmelzwasserabfluss nach Norden zu begründen. Im Süden verhinderten die Eismassen bis zum Spätwürm (≙ Konstanzer Stadium) die Schotterakkumulation. Gleichzeitig sedimentierten weiter nördlich Schotterebenen an den Gletschertoren der Endmoränen. Das Untere und Mittlere Schussenbecken stellen dabei eine Ausnahme dar, da dessen südlicher Teil im Bereich des Konstanzer Stadiums liegt.

Abb. 36 sowie *Tab. 5* wurden mit Daten aus den Flächen der klassifizierten Becken, den Moor-Daten der LUBW sowie den Schotter-Daten des LGRB BW (abgeleitet aus den GK 50-Daten, bereitgestellt durch den RVBO) berechnet.

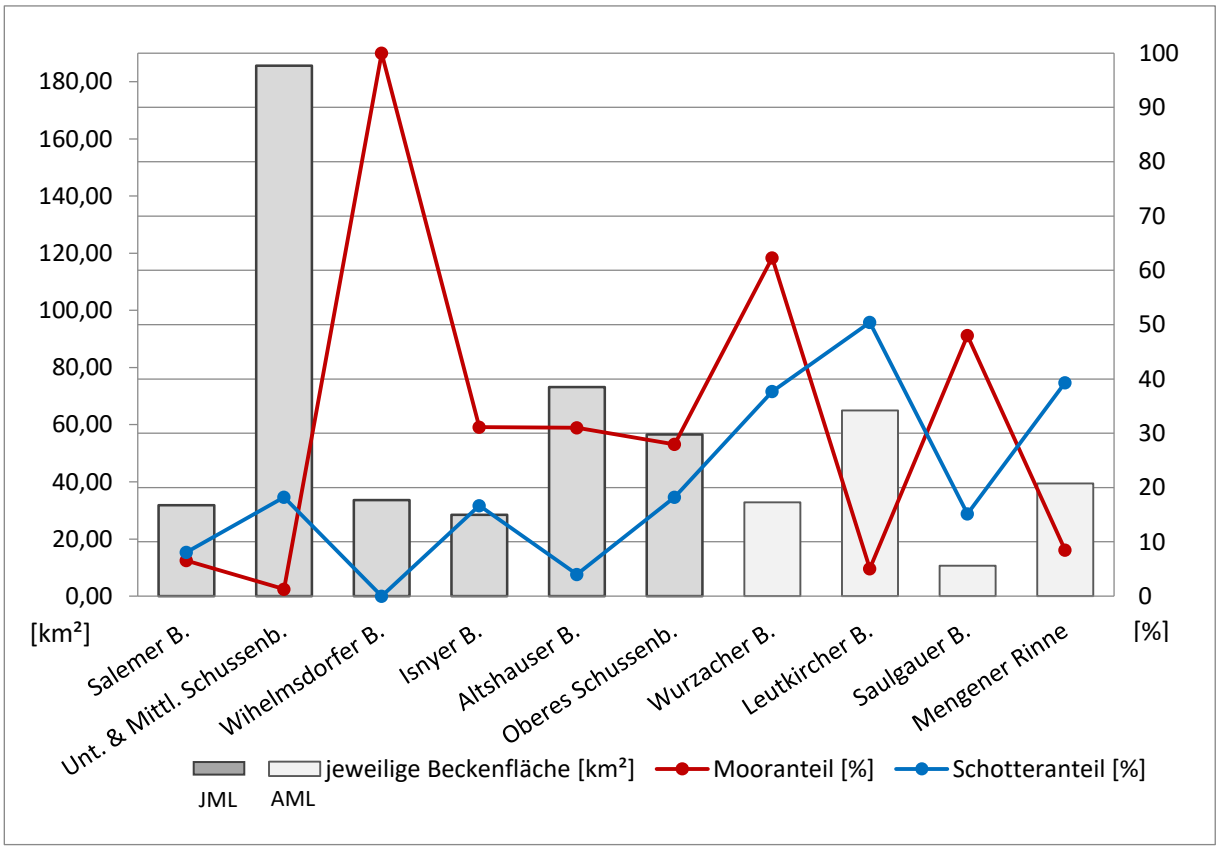


Abb. 36: **Moor- & Schotteranteile der (Großen) Becken**.
Die Ergebnisse sind unterteilt in JML und AML (unterschiedliche Grautöne und Rahmenstärken). Geobasisdaten © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (www.lgrb-bw.de), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Az. 2851.3//20_5804. / RVBO.

Tab. 5: **Die (Großen) Becken des Untersuchungsgebiets**.
Ordnung: S → bzw. JML → AMLMit Gesamtflächen [km²], Mooranteilen [%] & Schotteranteilen [%].
Geobasisdaten © Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (www.lgrb-bw.de), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Az. 2851.3//20_5804. / RVBO.

Bezeichnung	**Gesamtfläche** [km²]	**Moor** [%]	**Schotter** [%]
Salemer Becken	31,8	6,6	8,1
Unteres & Mittleres. Schussenb.	185,6	1,3	18,2
Wilhelmsdorfer Becken	33,6	100,0	-
Isnyer Becken	28,4	31,1	16,7
Altshauser Becken	73,2	31,0	4,0
Oberes Schussenbecken	56,6	28,0	18,2
Wurzacher Becken	32,8	62,3	37,7
Leutkircher Becken	64,9	5,1	50,4
Saulgauer Becken	10,7	48,0	15,2
Mengener Rinne	39,5	8,5	39,3

Für das Salemer Becken (von Immenstaad im SO bis Frickingen im NW verlaufend) wurde eine Längsschnitt-Analyse über vier Landschaftsklassen (A = *Schotter in Becken*, B = *Becken*, C = *Kuppig-hügelig im Becken* und D= *Kuppig-hügelige Till-Landschaft*) durchgeführt. *Abb. 37* verdeutlicht beispielhaft die jeweilige Klassenzugehörigkeit anhand der spezifischen Oberflächenstruktur. In *Abb. 38* wird der oben gezeigte Längsschnitt durch das Salemer Becken verortet.

Streng genommen ist Klasse A (*Schotter im Becken*) mit einer geringeren Höhenlage (396-417 m ü. NN) als die übrigen Klassen dem Bodensee-Stammbecken zuzuordnen. Erst anschließend folgt das Salemer Becken. Es beginnt im Bereich *B1* mit einer mittleren Höhe von 420 m ü. NN und bleibt auch westlich von Bermatingen (*B2*) auf diesem Niveau. Das liegt daran, dass es sich hierbei um einen Teil der Taldorf-Markdorfer Rinne handelt. Dieser wurde in der Spätphase des Konstanzer Stadiums fluvial erodiert (vgl. KRAYSS & KELLER 1996: 128, SCHWAB 2014: 4f.). Erst südlich von Salem steigt das Beckenniveau langsam auf 440 m ü. NN an. Zwischen Salem und Frickingen erhöht sich die Steigung bis zum Rand des Beckens nördlich von Frickingen. Hier liegt das Becken auf über 490 m ü. NN (*B3*).

Ebenfalls auffällig ist der sichtbare Höhenunterschied zwischen den Klassen C und D. Diese weisen zwar ähnliche Landformen (*kuppig-hügelige Vollformen*) und das gleiche Sediment (Till) auf, Klasse C ist jedoch aufgrund der geringeren Formen-Ausprägung Teil der Beckenlandschaft, wobei Klasse D eine eigenständige Landschaft bildet.

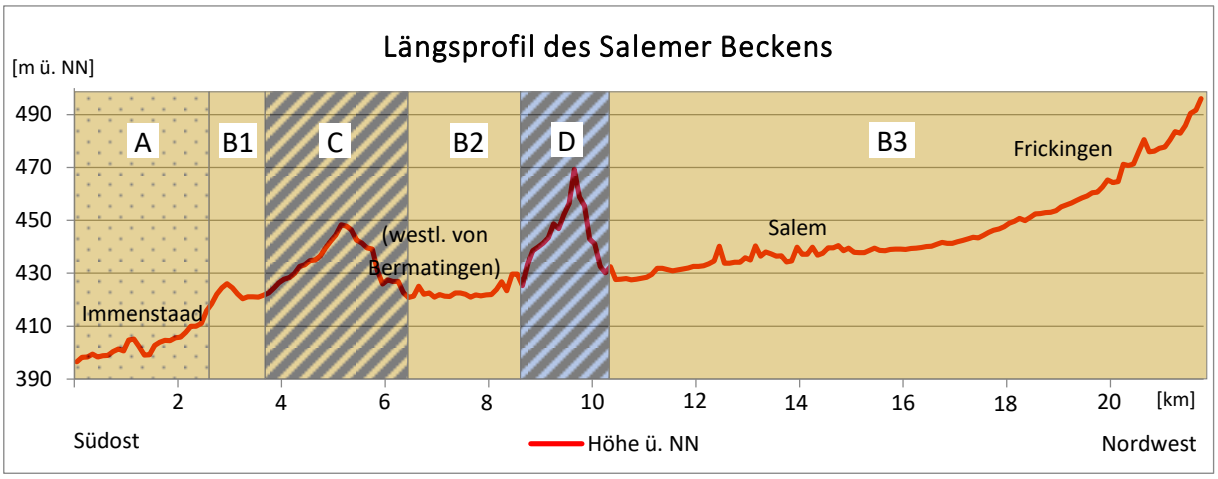


Abb. 37: **Längsprofil des Salemer Beckens**.
Der Zusammenhang zwischen den 4 verschiedenen Landschaftsklassen und der jeweiligen Oberflächenstruktur ist gut erkennbar (50-fache Überhöhung). Verlauf: SO → NW.
A = *Schotter im Becken (→ Teil des Bodensee-Stammbeckens)*, B1-B3 = *Salemer Becken*, C = *Kuppig-hügelige Formen im Becken*[31], D = *Kuppig-hügelige Till-Landschaft (mit Drumlins).*
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

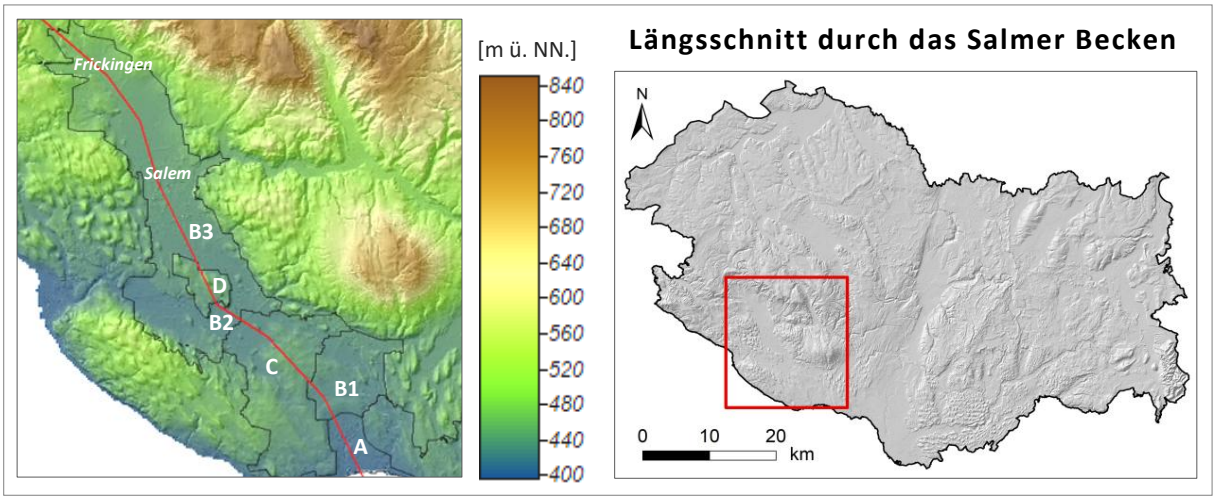


Abb. 38: **Verortung des Längsprofils des Salemer Beckens**.
Neben den Höhenwerten [in m ü. NN] sind die Grenzen der Landschaftsklassen (2. OBTA-Ebene) mit der entsprechenden Bezeichnung aus Abb. 37 eingetragen.
In der Karte rechts wird die Lage des Ausschnitts im Untersuchungsgebiet verortet.
Beide Darstellungen wurden auf Basis des DGM 90 (SRTM) erstellt.

[31] BECKENBACH (2016: 52) verortet hier einen Teil der Satzendmoräne des Konstanzer Stadiums.

Fluvial geprägte Landschaften

Kleine Becken und Täler

Auch bei den postglazial geprägten Landschaften der *fluvial überprägten kleinen Becken und Täler* wurden kleinräumige morphologische Unterschiede berücksichtigt. Hauptsächlich in den südlichen Bereichen des Untersuchungsgebiets prägen *kuppig-hügelige Till-Landformen* die *Kleinen Becken- und Tallandschaften* und spezifizieren diese. Aus diesem Grund sind diese Bereiche in *Abb. 33* (2. OBTA-Ebene) mit derselben Schrägschraffur gekennzeichnet wie die kuppig-hügeligen Bereiche der glazialen Beckenlandschaften.

Häufig treten diese Subklassen an den ehemaligen Umfließungsrinnen der Gletscherrückzugsstadien auf. Die Argen und die Umfließungsrinne bei Uhldingen bieten hier gute Beispiele (vgl. KELLER & KRAYSS 1987: 173f.; KRAYSS & KELLER 1996: 121ff., 125ff.; SCHWAB 2013, 2014). Mit den Klassen *Kleine Becken und Täler* sowie teilweise *Steile Kerbtäler / Tobel* kann die Flussgeschichte der Argen mit ihren mehrfach wechselnden Läufen gut nachvollzogen werden. Die Argen wurde von Schmelzwässern des Rheingletschers gespeist. Sie floss entlang des sich während des Spätwürm sukzessive zurückziehende Gletscherrands, welcher die südliche Grenze darstellte. Von Osten kommend, durchfloss sie den Ravensburger Eisstausee und entwässerte über die „Rinne von Taldorf nach Oberteuringen und Markdorf" (KRAYSS & KELLER 1996: 128). Dabei bildeten bzw. vergrößerten sich Tal- und kleine Beckenstrukturen, die noch heute im Gelände zu finden sind und im DGM repräsentiert werden (SCHWAB 2013, 2014; SEYFRIED et al. 2019: 307ff.).

In *Abb. 39* wird der Lauf der Argen im Konstanzer Stadium (West und Ostteil) gezeigt.

Die Schwarzacher Rinne, die Rinne Kemmerlang-Ravensburg, die Urnauer Rinne, die Markdorf-Taldorfer Rinne sowie die Rinne bei Uhldingen werden im Landschaftsmodell korrekt abgebildet. In *Abb. 39* wird deutlich, wie das Modell die ehemaligen Laufwege in Form von *Tal- und Kleinen Becken-Landschaften* sowie *Kerbtälern* sichtbar macht. In Bereichen, in denen die Argen *Große Becken* durchfließt, befanden sich Eisrandstauseen (vgl. SCHWAB 2014: 1).

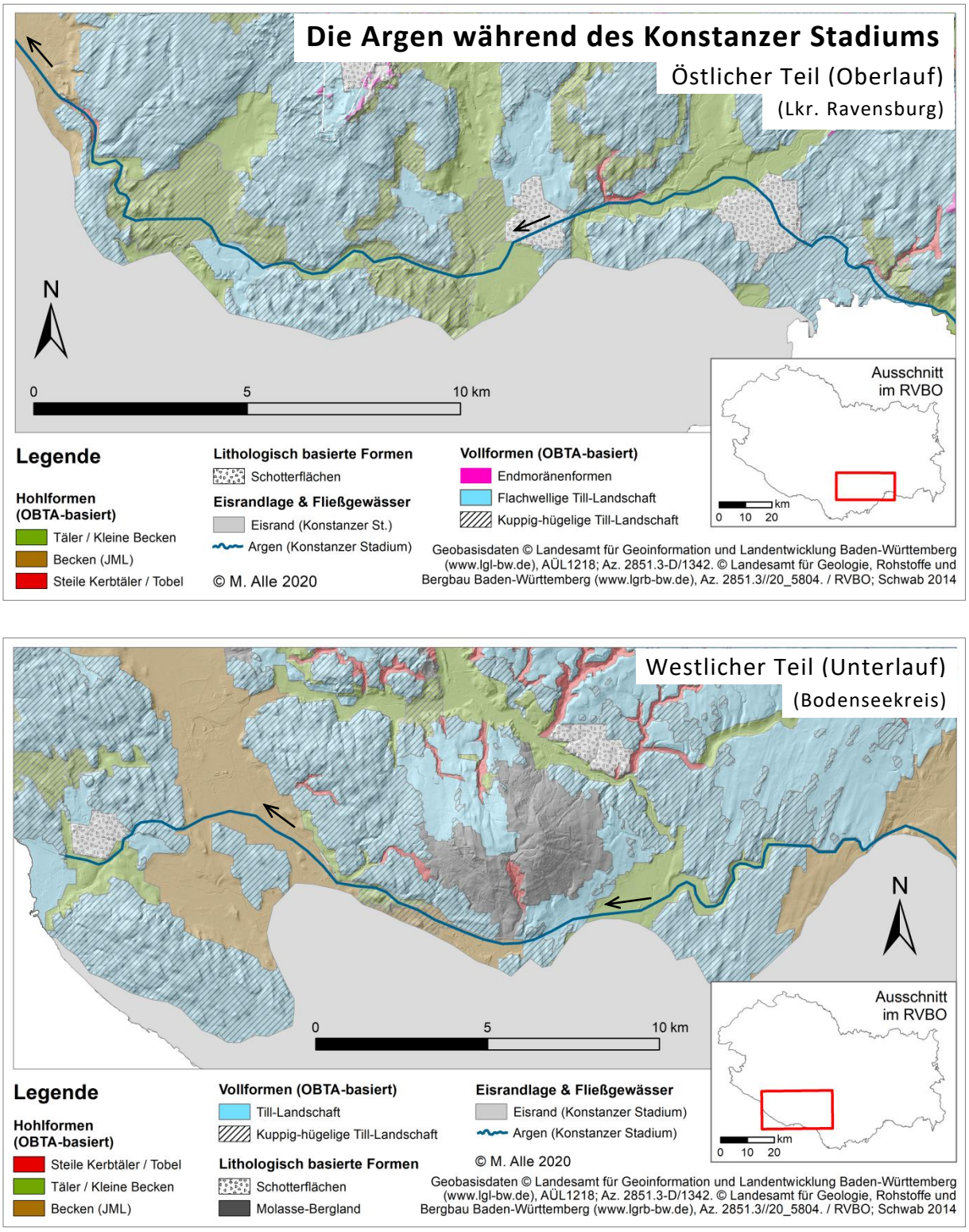


Abb. 39: **Verlauf der Argen während des Spätwürm** (2. OBTA-Ebene).
Dargestellt wird der Flussverlauf während des Spätwürm. Er wird im hiesigen Landschaftsmodell gut abbildet. Der Eisrand während des Konstanzer Stadiums im Süden ist grau dargestellt. Fließrichtung von Ost nach West (*siehe Pfeil* ←).
Obere Karte: Oberlauf der Argen *Untere Karte:* Unterlauf der Argen.

Steile Kerbtäler / Tobel

Auch diese Landschaftsklasse hat einen (glazi-)fluvialen Ursprung. Sie stellt insofern eine Sonderklasse dar, als dass sie auf der 1. und 2. OBTA-Ebene aus den gleichen Segmenten besteht. *Steile Kerbtäler / Tobel* bilden eine charakteristische Mikro-Landschaft, die völig von der zugehörigen Landform *Steiles Kerbtal / Tobel* abhängt.

Abb. 32 und *Abb. 33* verdeutlichen farblich, wie sich diese markanten Landformen postglazial in die umgebende Landschaft eingeschnitten haben. Die *Steilen Kerbtäler / Tobel* kommen am häufigsten in einer Till-Landschaft vor. Vor allem im südwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets, an der Geländestufe nördlich der IWEM, haben sie sich auch in die Molasse eingetieft bzw. diese freigelegt. In der Adelegg, im Südosten haben sich markante Kerbtäler / Tobel gebildet (vgl. DONGUS 1991: 23). Diese werden vom Algorithmus eindeutig identifiziert. *Steile Kerbtäler / Tobel* werden grundsätzlich nur südlich der EHWS erfasst. Die einzige Ausnahme bildet hier die Adelegg, welche direkt von der EHWS durchquert wird. In diesem Fall wurden innerhalb der Molassesedimente der Adelegg ebenfalls *Steile Kerbtäler / Tobel* zugelassen und klassifiziert.

Die in Kapitel 2.1.5 angesprochenen drei Kerbsohlentäler (Deggenhauser Tal, Andelsbacher und Schussentobel) sowie teilweise die Argen (am Mittellauf, im Raum östlich von Flunau) weisen zumindest an ihren Hängen einen kerbtalartigen Charakter auf, den der Algorithmus auch so klassifiziert. Dem flacheren Charakter der Talsohlen wurde dabei nicht immer Rechnung getragen, was zu kritisieren wäre. Der südliche Teil des Deggenhauser Tals zeigt jedoch die erwartete Klassifikation: Hier wurde der Talboden als „*Täler / Kleine Becken*“ ausgegeben und lediglich die steilen Hänge der *Kerbtal / Tobel*-Klasse zugeordnet.

Schmelzwasserrinnen

Diese dritte fluvial geprägte Landschaft unterscheidet sich in den Ergebnissen deutlich zwischen dem westlichen und dem östlichen Teil des Untersuchungsgebiets (vgl. *Abb. 13*). Im Westen verlaufen die *Schmelzwasserrinnen* „lehrbuchhaft“. Entsprechend dem Modell der Glazialen Serie folgen sie entweder direkt auf die Endmoränenzüge der AeWEM (z.B. bei Pfullendorf-Denkingen und nördlich des Ilmensee-Beckens, vgl. *Abb. 40*) oder schließen an zwischengelagerte Schotterebenen an (z.B. bei Ostrach und Bad Saulgau). Auch ihre linear nach Norden verlaufende Form entspricht der hiesigen Definition der *Schmelzwasserrinnen*.

Im Osten klassifizierte der Algorithmus keine zusammenhängenden, von Schmelzwasser geprägten Rinnen. Im Bereich der Leutkircher Heide, zwischen Isny und Leutkirch, wurde die große Schmelzwasserinne als *Becken im AML* ausgewiesen. Das liegt an der Talbreite, welche den Schwellenwert für die Schmelzwasserrinnen-Klasse überschreitet. Wie oben

bereits ausgeführt, handelt es sich bei den westlich von Leutkirch anstehenden *Schotter im Becken AML* um die würmzeitlichen Schotterablagerungen als hier Schmelzwässer des Rheingletschers noch Nordosten abflossen.

Die Entscheidung des Algorithmus, ein glazial geformtes Becken zu klassifizieren, ist mit der großflächigen Form dieser Landschaft zu erklären. Die größeren Hangneigungen und absoluten Höhenunterschiede an den Beckenrändern entsprechen eher den Klassenvorschriften der Becken als denen der flachen Schmelzwasserrinnen.

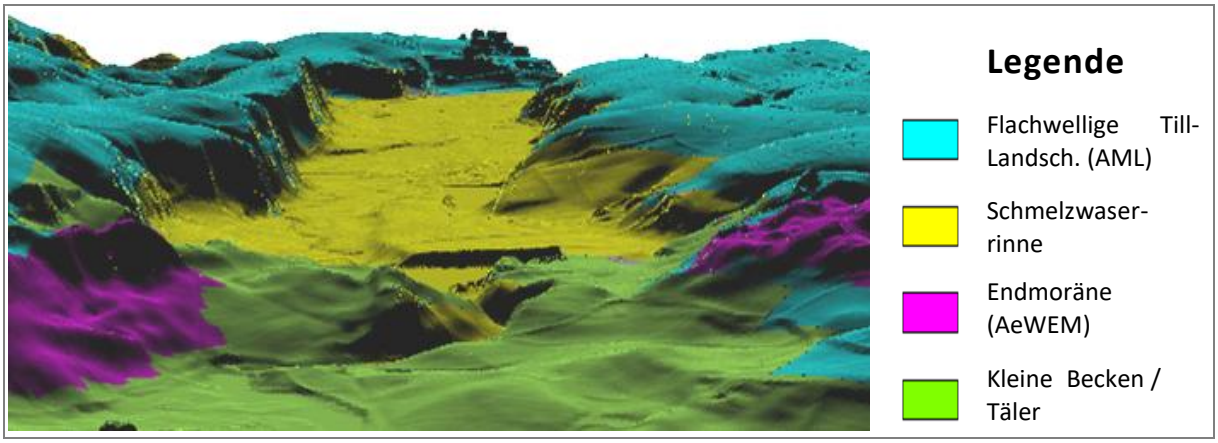


Abb. 40: **Schmelzwasserrinne bei Pfullendorf-Denkingen** (OBTA-Klassifikation)
Blick nach NW, 5-fache Überhöhung, Schrägansicht (Neigung ca. 10°), Schummerung aus DGM 5. Die Ansicht zeigt den Übergang vom Ilmensee-Becken (grün) zur *Schmelzwasser rinne* (gelb). An den Beckenrändern finden sich *Endmoränen*-Reste der AeWEM, die vom Gletschertor durchbrochen wurden. Die 500-600 m breite *Schmelzwasserrinne* wurde in die *flachwellige Till-Landschaft* des AML gegraben.
Interessant ist, dass der Schmelzwasserrinnen-Algorithmus in manchen Fällen die Talhänge mit klassifizierte. Das liegt einerseits an der Region-Grow-Funktion des Schmelzwasserrinnen-Algorithmus sowie an den Schwellenwerten für flachwellige Till-Landschaften, welche keine großen Hangneigungen zulassen.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

4.1.2 Vollform basierte Landschafen

Alle klassifizierten Vollformen sind aus Sedimenten aufgebaut. Die Landschaften im Untersuchungsgebiet bestehen entweder aus tertiären Sedimentgesteinen (Molasseformen) oder aus glazialen Sedimenten (Tills, Schotter, Beckensedimente).

Kuppig-hügelige Till-Landschaft

Kuppig-hügelige Till-Landschaft bilden die markantesten, zusammenhängenden, glazial geprägten Regionen im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets. Im Folgenden wird zunächst die Verteilung der klassifizierten Landformen erläutert, um anschließend die darauf basierenden Landschaften zu besprechen.

Um die räumliche Verteilung der *kuppig-hügeligen Till-Landformen* und verwandter Landformen wie *Endmoränen*[32] zu quantifizieren und räumlich vergleichbarer zu machen, wurde die *Drumlin Density* (= Anzahl einzelner Landformen bzw. Landform-Segmente am Gesamtraum oder pro km², vgl. JÓNSSON et al. 2014, BENEDIKTSSON et al. 2016) ermittelt. Dieser Ansatz stützt die Unterscheidung der Bereiche Innenwall- und Außenwall-Würm sowie JML und AML. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Einzelsegmente der Landform-Klassen *kuppig-hügelige Till-Landformen* und *Endmoränenformen* ebenfalls eine Dichte-Karte erstellt (vgl. *Abb. 41*, nächste Seite). Sie basiert auf der oben genannten Methode und gibt die Anzahl der klassifizierten Segmente pro km² an. Dazu wurde jedem Segment der obigen Klasse ein Punkt zugewiesen und anschließend ein Raster der Punktdichte berechnet.

Die Ergebnisse zeigen eine große Übereinstimmung hinsichtlich der Verteilung der *kuppig-hügeligen Landformen* mit den drei markanten würmzeitlichen Gletscherständen. Die Segmentdichte nimmt nach Norden hin allgemein ab. Lokale Konzentrationen sind im Raum der *Endmoränen*, besonders bei Bad Waldsee, im Bereich des Höhenrückens um den Galgenberg und südlich von Bad Saulgau zu verzeichnen.

Es wird deutlich, dass die Räume mit der größten Segment-Dichte mit den Bereichen der Klasse *kuppig-hügelige Till-Landschaft* übereinstimmen, in denen sich auch die markanten Drumlinfelder befinden. Diese konzentrieren sich vor allem südlich der IWEM (vgl. BECKENBACH 2014: 110).

Weiter fällt auf, dass sich der westliche und der östliche Teil des Untersuchungsgebiets bezüglich der Dichteverteilung der Klasse „*kuppig-hügelige Till-Landformen*“ ebenfalls unterscheiden. Der östliche Teil weist im Bereich des *Konstanzer Stadiums* wie auch im nördlich anschließenden Bereich des Innenwallwürms die höchsten Segmentdichten auf. Hier kommen Werte von 20 und mehr Segmenten pro km² flächenhaft vor. Diese Zahlen werden im westlichen Teil nur vereinzelt westlich des Gehrenbergs erreicht. Insgesamt weist der westliche Teil im Bereich des *Konstanzer Stadiums* sogar eine geringere Segmentdichte pro km² auf als der Bereich des *Innenwallwürms* (vgl. *Abb. 41*).

[32] Für die Drumlin-Density-Berechnung wurden beide Klassen zusammengenommen, da die *Endmoränenformen* aus den Segmenten der Klasse *kuppig-hügeliger Till-Landformen* detektiert werden.

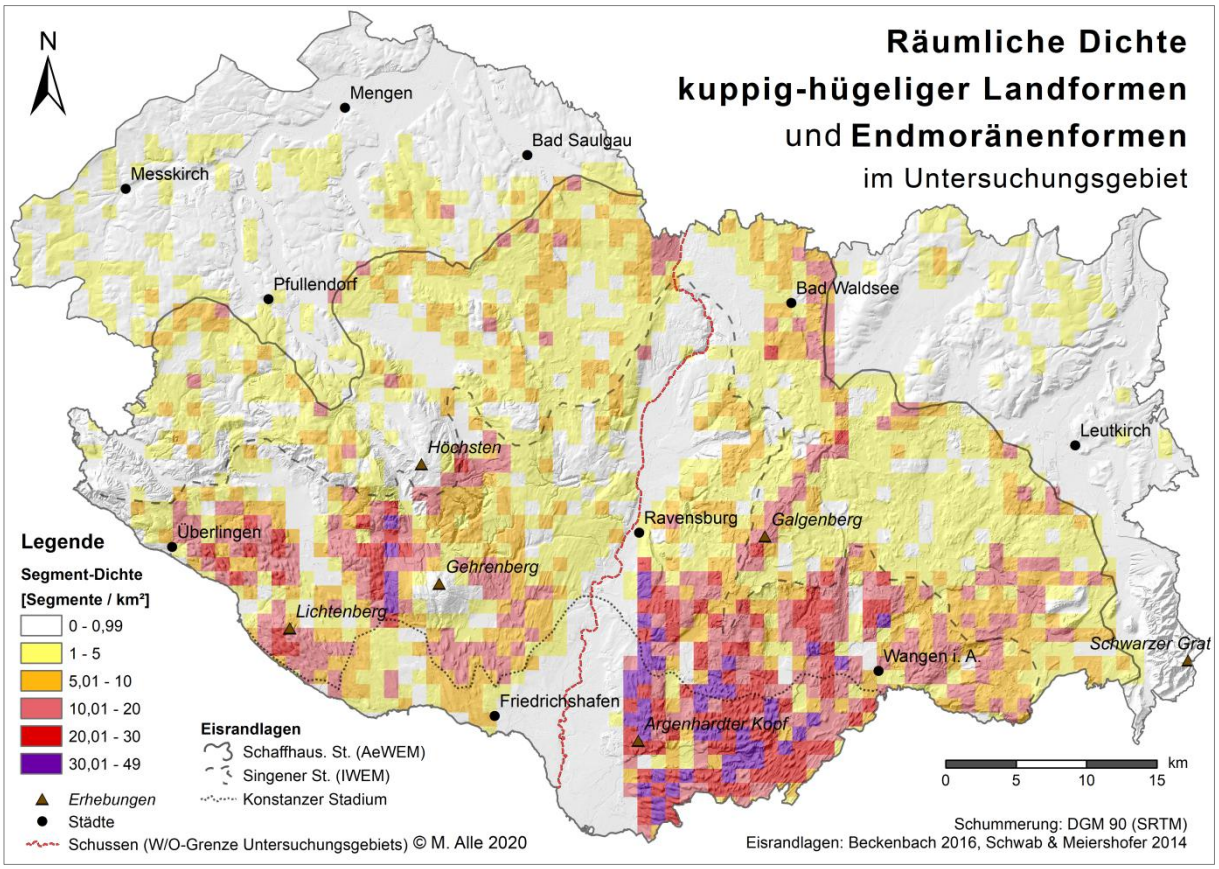


Abb. 41: **Räumliche Dichte *kuppig-hügeliger Till-Landformen* und *Endmoränenformen*.** 1. OBTA-Ebene. Mit Gletscherständen (*verschieden grau gestrichelt bzw. gepunktet*) im Untersuchungsgebiet. Die Schussen dient als natürliche Grenze zwischen dem westlichen und dem östlichen Teil des Untersuchungsgebiets.

Das Drumlinfeld zwischen Friedrichshafen und Gehrenberg (= Markdorf-Oberteuringer Drumlinfeld) liegt im westlichen Teil innerhalb des *Konstanzer Stadiums* und weist eine ungewöhnlich geringe Segmentdichte für ein vergleichsweise junges Gebiet auf. Erwartbar wäre eine vergleichbare Dichte wie im Bereich westlich des Gehrenbergs oder wie im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets (also südlich und nördlich des Argentals) auf ungefähr gleicher Lage (= IWEM bzw. *Singener Stadium*).

Bei genauerer Betrachtung lässt sich dieser Unterschied wie folgt erklären. Die *kuppig-hügeligen Till-Landformen* in beiden Teilen sind gut ausgeprägt. Die des Markdorf-Oberteuringer Drumlinfelds sind jedoch größer (Länge: ca. 660 – 850 m, Breite: ca. 240 – 260 m, Längen-Breiten-Verhältnis: 2,7-3,2) und nicht so zahlreich wie die im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets in vergleichbaren Bereichen. Hier weist der Bereich nördlich und südlich des Argentals kleinere (Länge: ca. 370 – 610 m, Breite: ca. 150 – 220 m, Längen-Breiten-Verhältnis: 2,4-2,8) aber in größerer Zahl vorhandenen *kuppig-hügelige Till-Landformen*, darunter viele Drumlins, auf. So kommen die im Westen des jüngsten Landschaftsbereichs deutlich geringeren Dichtewerte zustande.

Die größeren Landformen des Markdorf-Oberteuringer Drumlinfelds könnten von einer geringeren Fließgeschwindigkeit der würmzeitlichen Eismassen herrühren. Da sich die Eismassen des Rheingletschers südlich des Gehrenbergs, aufgrund dessen stauender Wirkung, unterirdisch teilten. Dies könnte die Größe der Landformen des Markdorf-Oberteuringer Drumlinfelds beeinflusst haben.

Die Mittelwerte, die CLARK et al. (2009: 677f.) zur Gestalt für über 37 000 untersuchte Drumlins in Großbritannien angeben (Länge: 629, Breite: 209, Längen-Breiten-Verhältnis: 2,9; ebd.), entsprechen denen der kuppig-hügeligen Till-Landformen im Süden des Untersuchungsgebiets weitgehend (im Westen wie im Osten).

In den Grafiken *Abb. 43* und *Abb. 44* werden Unterschiede in der Verteilung *kuppig-hügeliger Till-Landformen* und *Endmoränenformen* im Untersuchungsgebiet deutlich, indem die durchschnittliche Dichte-Verteilung dargestellt wird. Dabei wird der Gesamtraum in die oben genannten vier Bereiche in Süd-Nord-Richtung aufgeteilt. Der westliche und der östliche Teil werden dabei getrennt betrachtet. Auf der folgenden Karte (*Abb. 42*) werden die in den *Abb. 43* bis *Abb. 45* untersuchten Landschaftsbereiche A1-D1 bzw. A2-D2 verortet (vgl. *Abb. 13*).

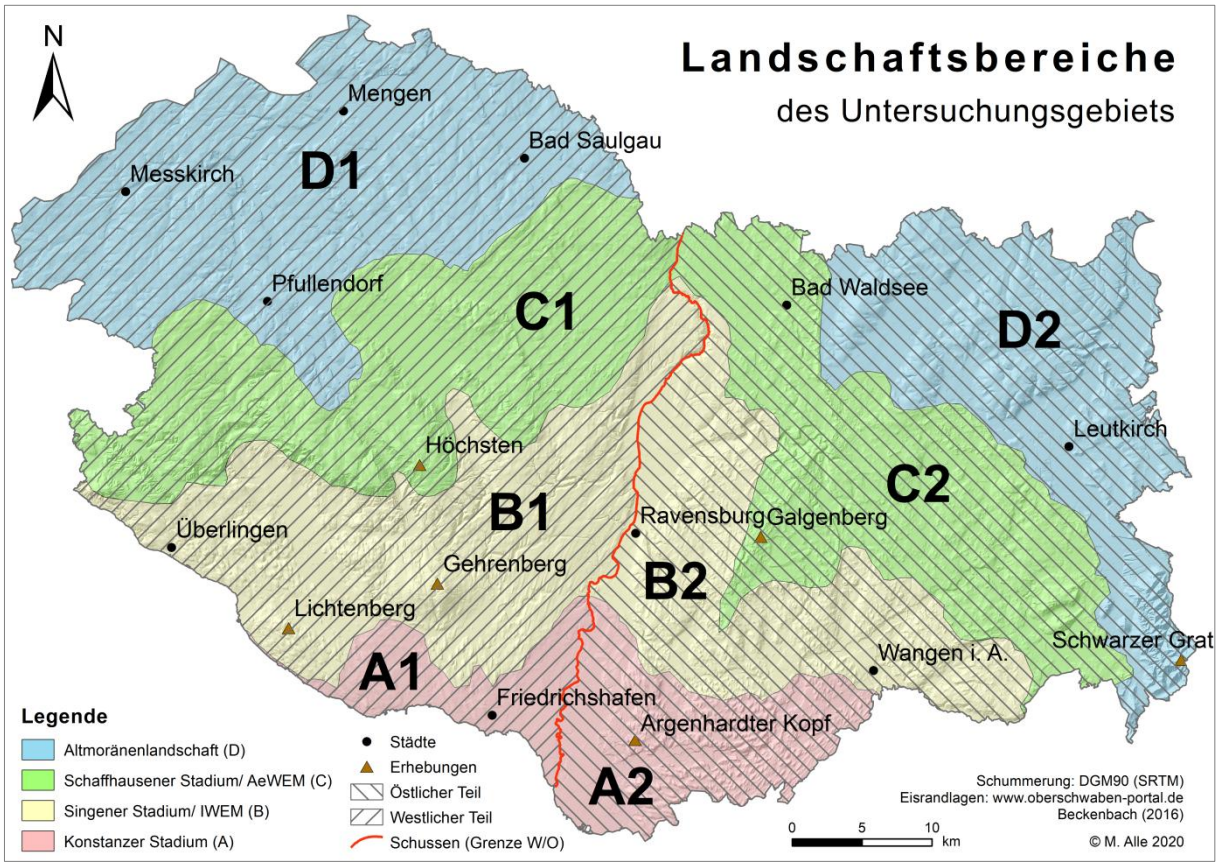


Abb. 42: **Übersicht über die Landschaftsbereiche des Untersuchungsgebiets.** Grundsätzlich erfolgte eine Teilung in westlichen und östlichen Teil. Diese wurden in jeweils vier Regionen unterteilt, die sich nach den wichtigsten Gletscherständen richten.

In *Abb. 43* geht es um den westlichen Teil des Untersuchungsgebiets. Im *Bereich des Innenwallwürm (B1)* weist die Grafik die größte durchschnittliche Segment- bzw. Punktdichte von 6,9 Punkten pro km² auf. Der südlichste Bereich des *Konstanzer Stadiums (A1)* beinhaltet nur die zweithöchste Segmentdichte (ø 4,8 Pkt. / km²). Dies ist auffällig, wenn man diese Ergebnisse mit dem östlichen Teil (*Abb. 44*) vergleicht. Erwartungsgemäß nimmt die Segmentdichte kuppig-hügeliger Till-Landformen und Endmoränenformen deutlich ab, je weiter man nach Norden gelangt. Insgesamt wurde für den gesamten westlichen Teil des Untersuchungsgebiets eine durchschnittliche Segmentdichte von 3,3 Pkt. / km² ermittelt.

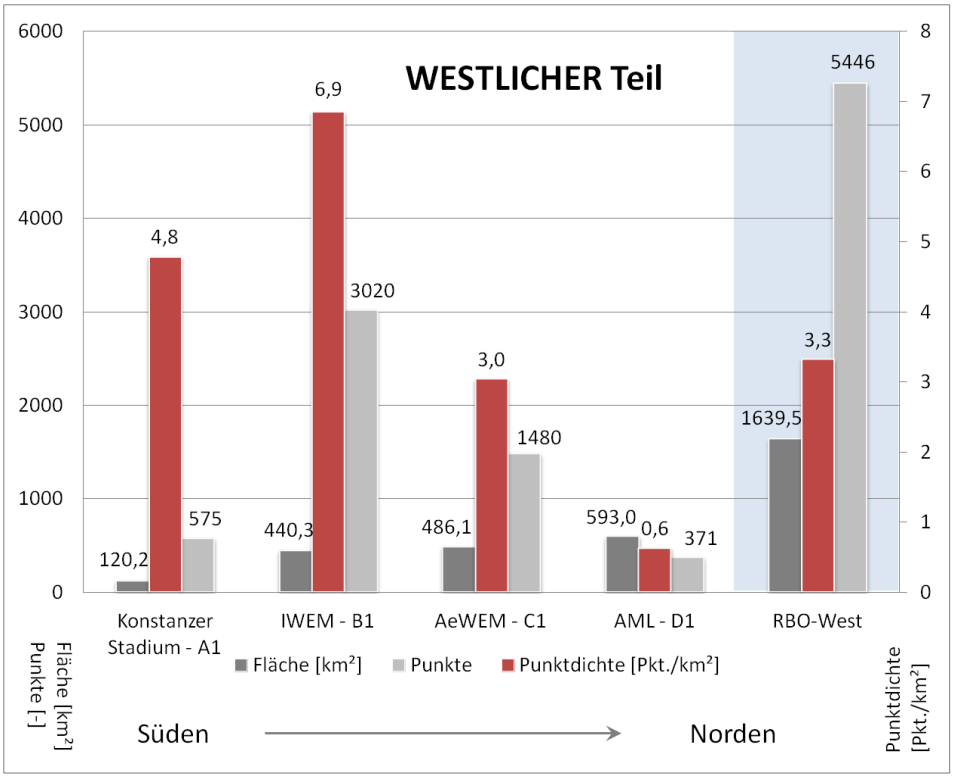


Abb. 43: ***Westlicher Teil*: Dichte *kuppig-hügeliger Till-Landformen* und *Endmoränenformen*.** Dargestellt für die vier Regionen aus *Abb. 42* (S → N): *Konstanzer Stadium*, IWEM (= *Innenwallwürm*, Singener Stadium), AeWEM (= *Außenwallwürm*, Schaffhausener Stadium), Altmoränenland und den gesamten West-Teil des Untersuchungsgebiets.

In *Abb. 44* wird eine kontinuierliche Abnahme der durchschnittlichen Segmentdichte in östlichen Teil des Untersuchungsgebiets von 14,8 Punkten pro km² im Bereich des *Konstanzer Stadiums (A2)* bis auf 0,2 Pkt. / km² im Bereich des *Altmoränenlands (D2)* deutlich. Hier findet sich die absolut größte wie geringste durchschnittliche Segmentdichte aller acht Teilbereiche. Auch die Gesamtdichte der Segmente für den östlichen Teil ist mit durchschnittlich 6,1 Pkt. / km² um ca. 85 % größer als im westlichen Teil.

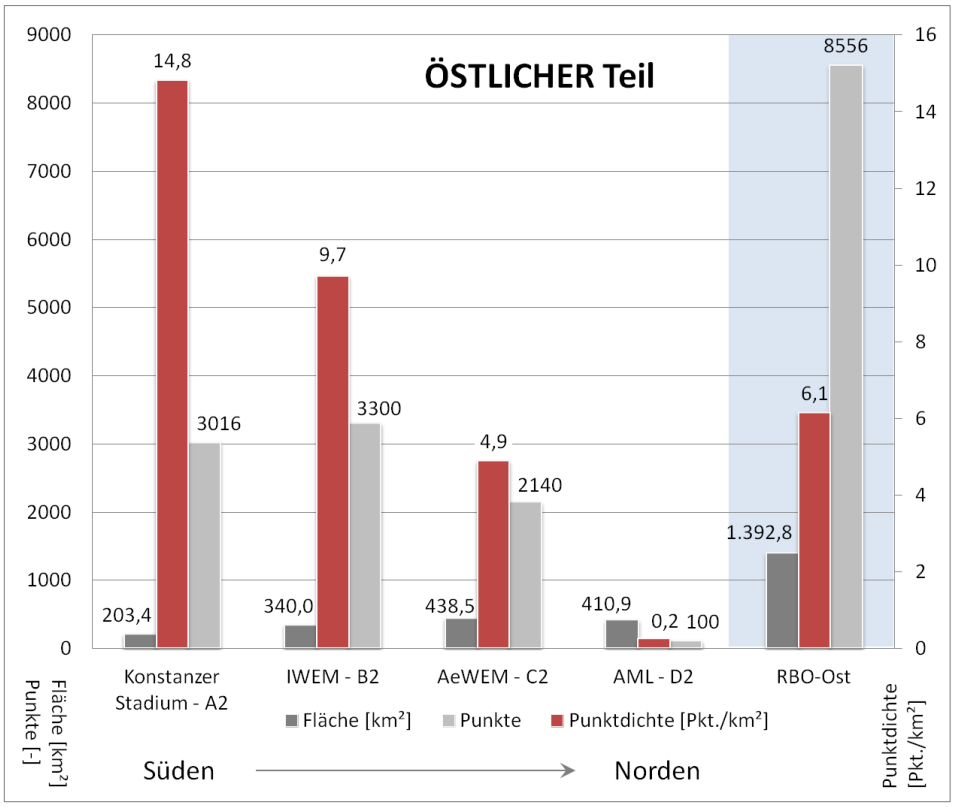


Abb. 44: ***Östlicher Teil*: Dichte *kuppig-hügeliger Till-Landformen* und *Endmoränenformen*.** Dargestellt für die vier Regionen aus *Abb. 42* (S → N): *Konstanzer Stadium*, IWEM (= *Innenwallwürm*, Singener Stadium), AeWEM (= *Außenwallwürm*, Schaffhausener Stadium), Altmoränenland und den gesamten Ost-Teil des Untersuchungsgebiets.

In *Abb. 45* wird die Dichte *kuppig-hügeliger Till-Landformen* und *Endmoränenformen* für die vier Landschaftsbereiche des Untersuchungsgebiets dargestellt. Die Ergebnisse für den westlichen und östlichen Teil bestätigen sich hier. Im südlichsten Bereich (*Konstanzer Stadium – A*) herrscht die höchste Punktdichte, welche nach Norden hin kontinuierlich abnimmt. Die mittlere Punktdichte für den gesamten Untersuchungsraum liegt mit 4,6 Punkten ² bzw. klassifizierten Segmenten pro km relativ genau zwischen der des östlichen (6,1 Pkt. /km²) und westlichen (3,3 Pkt. /km²).

Die deutlich größere Dichte kuppig-hügeliger und Endmoränenformen-Segmente im östlichen Teil wirkt sich aufgrund dessen geringeren räumlichen Anteils (45,9% der Gesamtfläche) etwas geringer auf das Gesamtergebnis aus.

In *Abb. 46* wird abschließend die Verteilung der Segmentdichte für die vier Teilräume des Gesamtraums verdeutlicht. Hier bestätigt sich der Modellcharakter des östlichen Teils für das Untersuchungsgebiet, was sich in den sehr ähnlich verlaufenden Graphen

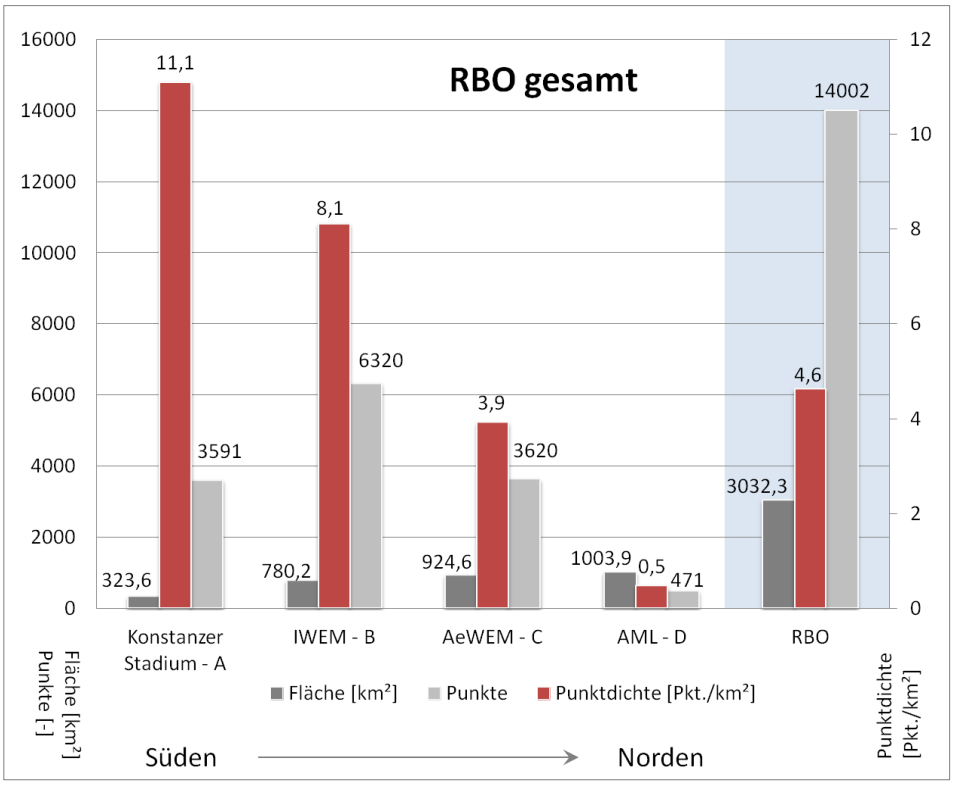


Abb. 45: **Untersuchungsgebiet: Dichte *kuppig-hügeliger Till-Landformen* und *Endmoränenformen*.** (S → N) *Konstanzer Stadium*, IWEM (= *Innenwallwürm*, Singener Stadium), AeWEM (= *Außenwallwürm*, Schaffhausener Stadium), Altmoränenland und das gesamte Untersuchungsgebiet.

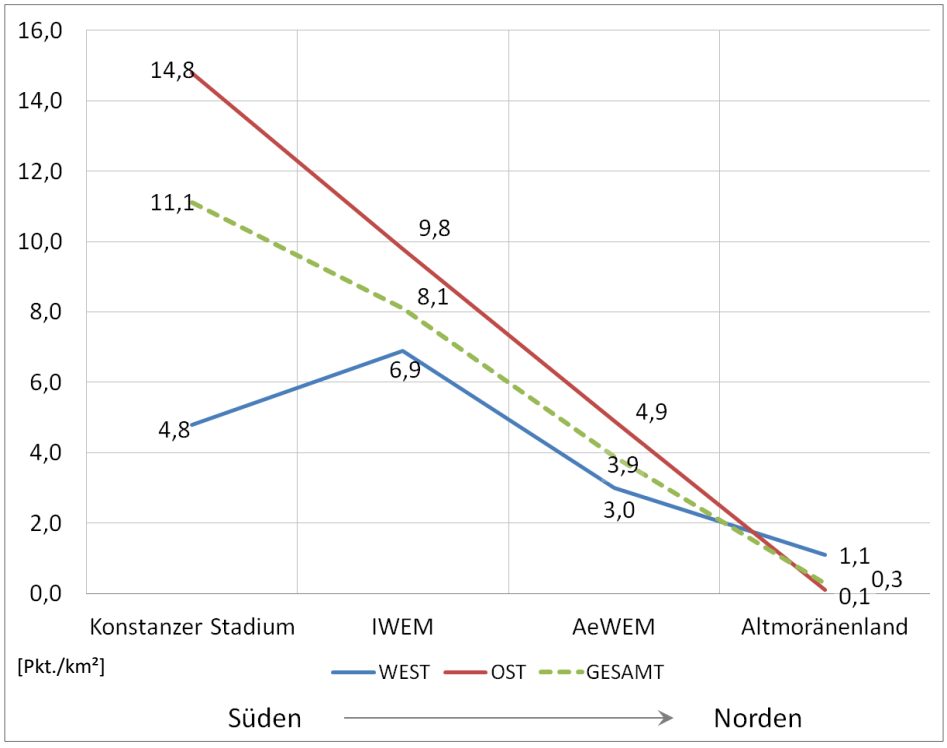


Abb. 46: **Dichteverteilung *kuppig-hügeliger Till-Landformen* und *Endmoränenformen*.** (S → N) Westlicher und östlicher Teil sowie Gesamtraum RVBO.

Zum Schluss wird in *Abb. 47* die Segment-Dichte aller Landformen im Untersuchungsgebiet abgebildet. Sie weist ähnliche räumliche Konzentrationen wie die oben besprochene *Drumlin-Density* auf und wurde mit demselben Verfahren berechnet. In den Bereichen mit *kuppig-hügeligen Till-Landformen* (incl. *Endmoränenformen*) treten die höchsten Segment-Dichten auf. Besonders auffällig ist dies im südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets. Im Bereich der Drumlinfelder findet sich die höchste Segmentdichte.

Dies lässt sich mit der Größe der klassifizierten Landform-Segmente erklären: Die relativ kleinen Segmente kuppig-hügeliger Till-Landformen oder Endmoränen-Segmente liegen deutlich dichter beieinander als beispielsweise die um ein Vielfaches größeren Beckensegmente. Somit eignet sich die bloße Segment-Dichte bereits als ein erster Indikator für das Vorhandensein von (kuppig-hügeligen) Till-Landformen.

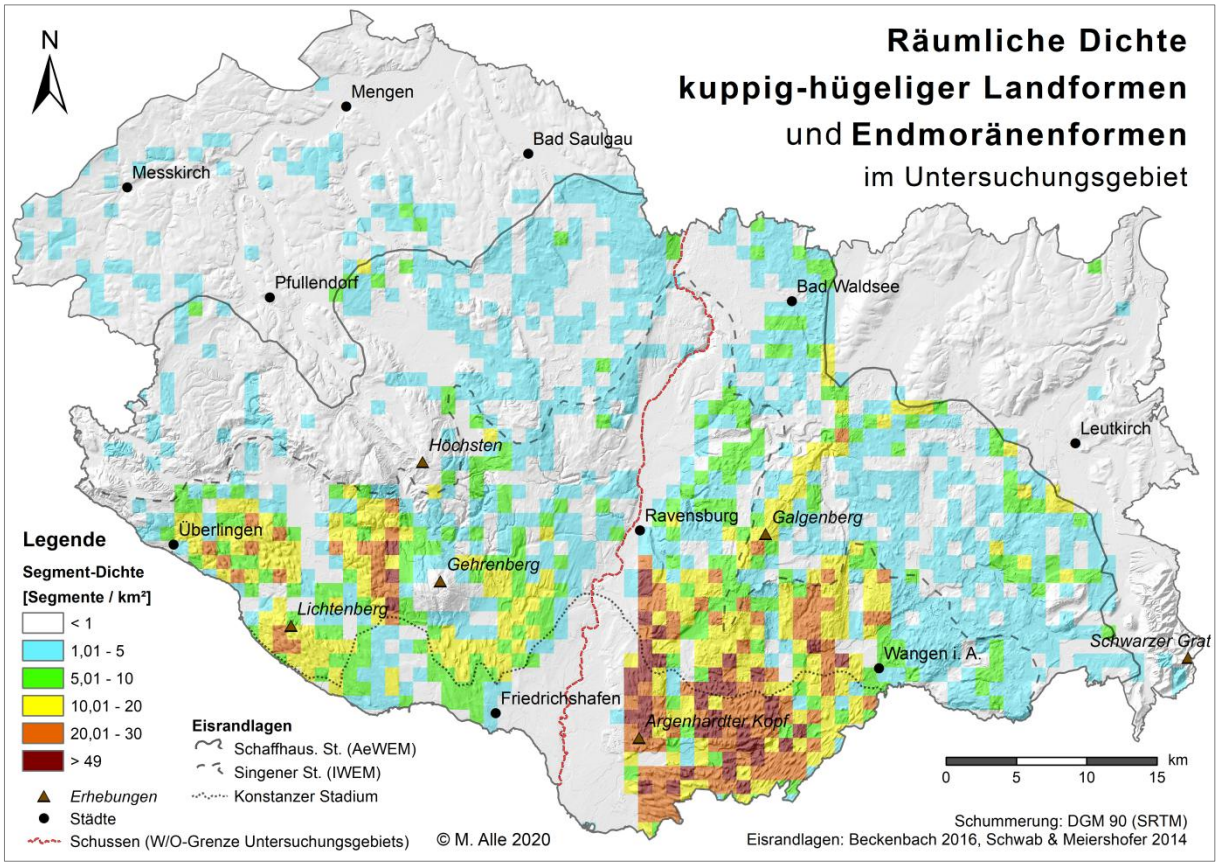


Abb. 47: **Räumliche Dichte aller Landform-Segmente im Untersuchungsgebiet**.
1. OBTA-Ebene. Die Karte zeigt die räumliche Konzentration der OBTA-basiert klassifizierten Landform-Segmente pro km².
Zur besseren Orientierung sind die drei markanten Eisrandlagen (*verschieden grau gestrichelt bzw. gepunktet*), die Schussen als Grenze zwischen westlichem und östlichem Untersuchungsgebiet und weitere topographische Basisdaten eingefügt.

In *Abb. 47* kann anschaulich nachvollzogen werden, dass *(Große) Becken*, aber auch *flachwellige Till-Landformen* sehr geringe Landform-Segment-Dichten (< 1) besitzen. Das trifft für

die OBTA-Klassifizierten Becken zu (Schussenbecken, Salemer, Wilhelmsdorfer, Wurzacher, Leutkircher und teilweise auch im Isnyer Becken). Im Bereich zwischen Leutkirch, Wangen und Bad Waldsee weisen Segment-Dichten > 1 darauf hin, dass es sich einen Wechsel von Till-Landformen und kleinen Becken und Tälern handelt. Beim Vergleich mit den Naturräumen von DONGUS (1991) in Kapitel 4.2.1 wird dies weiter thematisiert.

Die Zusammenfassung der *kuppig-hügeligen Till-Landformen* (1. OBTA-Ebene) zu den entsprechenden Landschaften (2. OBTA-Ebene) erfolgte konsequent in den südlichen Bereichen des Untersuchungsgebiets mit besonders hoher Segment-Dichte. Weiter nördlich, zwischen Konstanzer und Singener Stadium (= IWEM) beginnt ein Übergangsbereich mit einer deutlichen Abnahme der Zahl und Dichte *kuppig-hügeliger Till-Landformen*. Diese sind umgeben von großflächigen Bereichen aus *flachwelligen Till-Landformen*. Der Algorithmus für die 2. OBTA-Ebene interpretierte die wenigen *kuppig-hügeligen Landformen* als Inselareale innerhalb einer *flachwelligen Till-Landschaft* und ordnete jene folglich dieser Landschaftsklasse zu. Hierbei waren die Schwellenwerte Größe, Kuppigkeit und Nachbarschaft für die Klassenzugehörigkeit entscheidend. In der Regel lieferte der Algorithmus gute Ergebnisse.

Endmoränen-Formen als eigenständige Teil-Landschaften

Endmoränen-Formen stellen im Landschaftsmodell eine Sonderform der kuppig-hügeligen Landformen dar. Sie bestehen aus demselben Material wie diese und wurden zunächst auch mit denselben Algorithmen klassifiziert, um anschließend hinsichtlich ihrer Form weiter spezifiziert zu werden. Landschaftsbereiche, die von Endmoränen-Formen dominiert werden, wurden in der hiesigen Klassifikation ausschließlich aus den entsprechenden Landformen gebildet. Dies erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie die oben besprochenen *Steilen Kerbtäler / Tobel*. Endmoränen-*Landschaften* als Gesamtheit mehrerer verschiedener Landformen zu definieren, wie z.B. bei den kuppig-*hügeligen Till-Landschaften*, erschien als nicht sinnvoll (vgl. Kapitel 3.2.3 – Endmoränen).

Die *Endmoränenformen*-Bereiche stehen aufgrund ihrer charakteristischen Formen für sich. Sie können nach dem in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Prinzip der Leipzig-Dresdner-Schule entweder als Randzonen zwischen Patches *flachwelliger* und vereinzelt auch *kuppig-hügeliger Till-Landschaften*, *Schotterebenen* und *(Großen) Becken* interpretiert werden. Das würde ihrem Charakter als zwei Großlandschaften trennende Grenzlandform entsprechen. Hierzu zählen z.B. die markanten Endmoränenzüge der AeWEM östlich von Ostrach bzw. südlich von Bad Saulgau sowie östlich von Bad Waldsee.

Die zweite Möglichkeit, die Endmoränen in das Konzept der Leipzig-Dresdner-Schule zu integrieren, ist die, Endmoränen-Formen als Inselareale zu klassifizieren. Diese weisen ähnliche Eigenschaften (Form, Material) wie die angrenzenden Landformen der benachbarten Landschaft auf (*kuppig-hügelige Till-Landschaft* oder *flachwellige Till-Landschaft*).

Gleichzeitig unterscheiden sie sich dennoch durch spezifische Formparameter (die kleinräumige Kuppen-und-Kessel-Oberfläche) von diesen und werden so in der Klassifikation auch einzeln ausgewiesen.

Als Beispiele hierfür dienen die kleineren Satzendmoränen-Patches südlich der AeWEM. Diese weniger linear ausgebildeten Endmoränenformen, welche durch Gletscherrückzüge und -Vorstöße mit deutlich kürzerer Verweildauer gebildet wurden, befinden sich oft innerhalb von flachwelligen Till-Landschaften, außerhalb des Bereichs des Konstanzer Stadiums. Sie bilden die Inselareale, welche die flachwellige Till-Landschaft im JML akzentuieren (vgl. *Abb. 15*).

Flachwellige Till-Landschaften

Wie oben angesprochen, kommen diese sowohl im JML wie auch im AML vor. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die *flachwelligen Till-Landschaften* im Untersuchungsgebiet älter als ihre südlicher gelegenen Verwandten (die kuppig-hügeligen) sind. Daher werden sie bereits deutlich länger durch nicht-glaziale Erosionsprozesse, insbesondere im Oberpleistozän durch periglaziale Prozesse (Solifluktion) geprägt (vgl. Kapitel 2.1.5). Dabei wurden kuppige Formen, etwa riß- und würmzeitliche Drumlins, sukzessive abgeflacht (GRAUL 1952: 7, HUTTENLOCHER 1959: 5, EBERLE et al. 2010: 98f., BECKENBACH et al. 2014: 115f., SEYFRIED et al. 2019: 314f., 319) und Oberflächenmaterial von Ober- zum Unterhang verfrachtet.

Aber auch die flachwelligen Till-Landschaften des Untersuchungsgebiets unterscheiden sich deutlich voneinander – je nachdem, ob sie im JML oder im AML gelegen sind. Im JML treten sie flächenhaft erst nördlich der IWEM (Singener Stadium) auf. Diese Flächen sind seit ca. 18 000 Jahren nicht mehr glazial geprägt (LGRB BW 2011: 181, SEYFRIED et al. 2019: 280). Ausnahmen bilden hier nur zwei Landschaftsbereiche: Der Gehrenberg wurde aufgrund seiner Höhe während des Gletscherrückzugs im Spätwürm als erstes in seiner direkten Umgebung nicht mehr vom Eis überfahren. Die frühwürmzeitlichen Tills der Westflanke bewegten sich folglich als Fließerden langsam hangabwärts und werden heute vom Algorithmus als *flachwellige Till-Landschaft* klassifiziert. Der Bereich zwischen Oberteuringen, Berg und Horgenzell ist die zweite flachwellige Till-Landschaft südlich der IWEM. Die Kuppigkeit ist hier nur gering ausgeprägt, daher klassifiziert der Algorithmus *flachwellig* und nicht *kuppig-hügelig*. DONGUS (1991: 45) spricht hier von „mehrfach hintereinandergestaffelten Wallmoränen“, die rund um die Eisrandlage des Konstanzer Stadiums gebildet wurden. Diese Formen sind flachwellig, unterscheiden sich jedoch deutlich von der kleinräumig unruhigeren Oberfläche der Klasse *Endmoränenformen*. BECKENBACH (2016: 67f.) interpretiert die besagten *flachwelligen Till-Landformen* südlich der IWEM als „niedrigkonvexe Drumlins“, die durch eine größere Fließgeschwindigkeit und damit einhergehenden geringeren Scherspannungen an der Gletscherbasis entstanden (ebd.).

Die flachwellige Till-Landschaft im AML wurde während der Riß-Kaltzeit zum letzten Mal glazial geprägt. Anschließend war sie ca. 120 000 Jahre länger Erosionsprozessen ausgesetzt als die im JML (vgl. LGRB BW 2011: 180). Vor allem im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets, im Raum zwischen Pfullendorf, Mengen und Bad Saulgau, finden sich heute große, einst periglazial geprägte Bereiche mit Fließerden (vgl. *Abb. 33* in dieser Arbeit sowie BECKENBACH 2016: 49f., 69). Im AML wird die besagte Landschaft von breiten Schmelzwasserrinnen zerschnitten, die zur Donau hin entwässern. Im Raum zwischen Leutkirch und Wolfegg, im Wirkungsbereich des einstigen Argen-Lobus finden sich nennenswerte flachwellige Till-Landschaften. Diese waren aufgrund des früheren Abschmelzens des Argen-Lobus (SEYFRIED et al. 2019: 307) deutlich länger der peri- und postglazialen Erosion ausgesetzt und sind folglich heute weniger gut erhalten als weiter westlich gelegene Till-Landformen.

4.1.3 Lithologisch basierte Landschaften

Schotterebenen

Schotterebenen wurden erwartungsgemäß in der Nachbarschaft zu den Gletschertoren der AeWEM klassifiziert. Auch nördlich der großen Beckenlandschaften (z.B. dem Mittleren Schussenbecken), im Bereich der IWEM konnten größere Schotterebenen erfasst werden. Kleinere Schotterebenflächen wurden bereits bei der OBTA ausgeschlossen, da sie aufgrund ihrer zu geringen Fläche keine eigene Landschaft darstellen, sondern andere lediglich akzentuieren.

Weitere Schotterebenen wurden an den Rändern von größeren Umfließungsrinnen abgelagert. Auch hier sedimentierten die Schmelzwässer während des Gletscherrückzugs Schotter, die sich an geschützten Stellen bis heute erhalten haben. Große Teile wurden aber aufgrund ihrer Morphologie anderen Landschaften zugeordnet (z.B. Tälern und kleinen Becken – vgl. *Abb. 32* bis *Abb. 34*). Die Urnauer Rinne, nördlich des Gehrenbergs sowie die Uhldinger Rinne sind Beispiele hierfür (vgl. SCHWAB 2014: 1, 5).

Molasse-Bergland

Als *Molasse-Bergland* wurden größere, zusammenhängende Molasseformen mit steilen Hängen klassifiziert (vgl. Kapitel 3.2.1). Grundsätzlich kommen in der OBTA-Klassifikation *Molasse-Bergländer* ausschließlich in der südlichen Hälfte des Untersuchungsgebiets vor. Weiter ist zwischen der (Hohen südlichen) Adelegg im Osten und den weiter westlich gelegenen *Molasse-Berglandschaften* zu unterscheiden.

In *Abb. 48* wird eine Detailansicht des Gehrenbergs vom Südosten aus dargestellt. Dieser weist stark zerklüftete, bewaldete Molassehänge sowie einen abgeflachten Gipfelbereich

mit Tillbedeckung auf, welche den westlichen Hang hinab reicht. Bei der Hochfläche der Gipfelregion handelt es sich um *flachwellige Till-Landschaft* (DONGUS 1991: 43), die im Westen in *kuppig-hügelige Till-Landschaft* übergehen. Die 3D-Darstellung verdeutlich auch den besonderen morphologischen Charakter der Wechselschichtung der Oberen Süßwassermolasse am Gehrenberg.

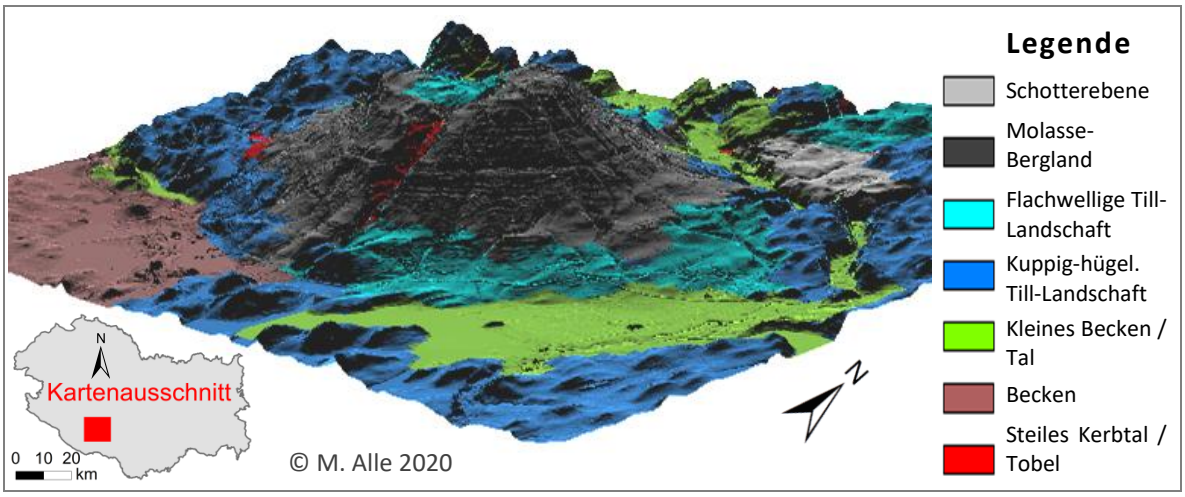


Abb. 48: **Detailansicht der Landschaften um den Gehrenberg.**
Blick aus SO, 5-fache Überhöhung, Schrägansicht (Neigung ca. 10°), Schummerung aus DGM 5. Der zerklüftete Südhang sowie die Tillbedeckung auf Gipfel, am Hangfuß und Westhang werden deutlich. Ebenso ist der Tobel am Südhang und die Markdorf-Taldorfer Rinne (Landschaftsklasse *Kleines Becken / Tal*) zu erkennen. Die Abbildung zeigt auch die horizontale Schichtung der Molassesedimente. NO des Gehrenbergs fällt eine Schotterebene auf. Der *Kleine Becken/Tal*-Algorithmus weist vereinzelt kuppig-hügelige Till-Landformen als Teil eines Tals aus. Dies rührt von der Funktion des Region-Grow-Ansatzes im Klassifikations-Algorithmus her.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

Bis auf die Adelegg haben alle Landschaften dieser Klasse eine Till-Bedeckung, da sie während des Würmglazials (während des *Schaffhausener* und *Singener Stadiums*, vgl. KELLER & KRAYSS 1987: 172f.) von den Eismassen des Rheingletschers überfahren wurden. Sie werden heute zumindest teilweise acker- und obstbaulich genutzt (DONGUS 1991: 43). Die Adelegg wurde bereits während des Spätwürm nicht mehr von Gletschern überfahren (vgl. LGRB BW 1998: 87, LGRB BW 2011: 181). Andere Autoren verorten den eisfreien Zeitraum bereits früher, im Hochwürm (vgl. KELLER & KRAYSS 1987: 173, BECKENBACH 2016: 42). Im Vergleich zum Gehrenberg weist die Adelegg ausschließlich bewaldete und stark zerschnittene Hänge auf (DONGUS 1991: 23). Diese verleihen ihr von allen Molasse-Landschaften den auffälligsten Charakter einer Gebirgslandschaft.

In der geologischen Karte GK 50 BW sind im Nordwesten und Nordosten des Untersuchungsgebiets (vgl. Kapitel 2.1.5) oberflächlich anstehende Molassesedimente verzeichnet.

Diese wurden aufgrund ihres flachwelligen Charakters der Landformen vom Algorithmus nicht als „Bergland“ erkannt und daher auch nicht als solches klassifiziert. Diese Landschaftsbereiche wurden auf OBTA-Ebene 2 der Klasse *flachwellige Till-Landschaft* zugeordnet.

Dies wird von der Fachliteratur bestätigt: Für den besagten nordwestlichen Bereich konstatiert GRAUL (1952: 8) vorwiegend „Grundmoräne“, HUTTENLOCHER (1959: 5) spricht von „Bodenfließen während der Würm-Eiszeit und Abtragungsvorgänge[n]“, welche das „ursprünglich unruhige Relief weitgehend ausgeglichen“ haben. Er nennt die Oberflächenformen „flachwellige Platten“ (ebd.). DONGUS (1991: 55) bezeichnet die Landformen des (Molasse-)Bereichs westlich von Leutkirch als „langgezogene, flachkuppige Altmoränenwälle“ über der Oberen Süßwassermolasse.

4.2 Vergleich der Ergebnisse mit händisch-basierten Klassifikationen

In diesem Kapitel werden ausgewählte Landschafts-Klassifikationsansätze mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen. Dabei liegt der Fokus auf der Methodik, den inhaltlichen wie räumlichen Ergebnissen sowie der pleistozänen Prägung der Landschaft.

Beispiele sind händisch-expertenbasierte Klassifikationen, welche analog oder digital durchgeführt wurden. Sinn des Vergleichs ist es nicht, die anderen Verfahren zu diskreditieren sondern den jeweiligen Wert der Ansätze herauszuarbeiten sowie die Vor- und Nachteile des hier vorgestellten Verfahrens zu eruieren.

4.2.1 Expertenbasierte, analoge Klassifikationen glazialer Landschaften

Im Folgenden werden zwei analoge Klassifikationsansätze vorgestellt. Hierbei erfassten und kartierten die Autoren auf Basis ihrer Landschaftskenntnisse und thematischen Informationen[33] über Geologie, Klima, Landnutzung etc. landschaftliche Einheiten händisch.

Obwohl die genannten Arbeiten nicht zu den jüngeren zählen, sind sie noch in der aktiven Anwendung. Die hochauflösende, 1935 von Ludwig ERB erstellte, Karte (1 : 25 000) wurde vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg[34] mehrfach wieder aufgelegt, zuletzt 1995. Auch die anderen Arbeiten wurden seither nicht wieder neu bearbeitet. DONGUS vervollständigte die von GRAUL und Kollegen Anfang der 1950er begonnene landschaftliche

[33] Diese stammten in der Regel von großmaßstäbigen Topographischen Karten.
[34] Mittlerweile Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB BW), Freiburg i. Br.

Gliederung (1 : 200 000) des Raums Bodensee-Oberschwaben erst zu Beginn der 1990er Jahre.

Daher lohnt sich der Vergleich der in dieser Arbeit neu vorgestellten Methodik der semi-automatisierten OBTA-basierten Landschaftsklassifikation mit den eben genannten Untersuchungen aus der Region.

Bsp. A – Geologische Spezialkarte von Baden – 8221 Überlingen-Ost Blatt 149 (ERB 1935)

LUDWIG ERB legte 1935 eine hochauflösende, geologisch-morphologische Kartierung des Raums um Salem – Überlingen – Uhldingen-Mühlhofen vor. Sie liegt im Kartierungsmaßstab 1 : 25 000 vor und zeigt zahlreiche glaziale Landformen, darunter auch Drumlins und Endmoränen-Wälle der IWEM. Diese dienten als Grundlage für den Vergleich mit den im hiesigen Modell klassifizierten kuppig-hügeligen Grundmoränenformen.

Zum Vergleich mit der hiesigen Klassifikation wurde ERBs Karte zunächst gescannt und georeferenziert. Anschließend wurden oben genannte Landformen digitalisiert und mittels Abfrage-Routinen in ArcGIS mit der hiesigen Klassifikation verglichen. Auffällig ist, dass nur die Kuppen der „Drumlinhügel" als solche ausgewiesen werden. ERB (1935: 30f.) erklärt die zurückhaltende Auszeichnung der Drumlins im Blatt 8221 Überlingen-Ost damit, dass für die Bildung der Drumlin-Flanken proglaziale Schmelzwässer verantwortlich seien. Er konstatiert: „Man darf also nicht die ganze Formenerscheinung der Drums [≙ Drumlins] auf subglaziale Modellierung zurückführen, sondern nur ihre Auflage." (Ebd.: 31). Die hier verzeichneten Drumlins haben Längen von 200 - 500 m und Breiten von 50 – 100 m.

Die Darstellung der Drumlin-Kuppen in der Karte ERBs von 1935 gibt folglich nur einen ungefähren Eindruck ihrer Lage. Sie wurde in Blatt 8221 hauptsächlich durch unterschiedlich große Oval-Schablonen verzeichnet. Für einen Flächenvergleich mit den semiautomatisiert klassifizierten, kuppig-hügeligen Till-Landformen eignen sie sich folglich nur bedingt. Die in dieser Arbeit weiter gefasste Definition konzentriert sich nicht auf die Einzelformen der Drumlins sondern weist die glazial geprägten Rücken über einem Till-Untergrund als *„kuppig-hügelige Till-Landformen"* aus. Dies schließt vor allem im Süden Oberschwabens Drumlins, aber auch drumlinähnliche Formen mit ein. Eine für Klassifikationen übliche Genauigkeitsabschätzung (*accuracy assessment*) ist daher in diesem Fall nicht sinnvoll, da die Vergleichsklasse (*Drumlins* von ERB 1935) eine Teilmenge der OBTA-Klasse (*kuppig-hügelige Till-Landformen*) ist. Es kann aber die Übereinstimmung beider Klassen überprüft werden, um eine grobe Abschätzung zur Genauigkeit der hiesigen Klassifikation zu geben.

Der Vergleich der OBTA-Klassifikation mit Blatt 8221 Überlingen-Ost (vgl. *Abb. 49*) ergibt, dass sich 148 (in der Karte ***blau*** dargestellt) der insgesamt 161 von ERB (1935) verzeichneten Drumlins mit der Klasse „Kuppig-hügelige Grundmoränenformen" überschneiden.

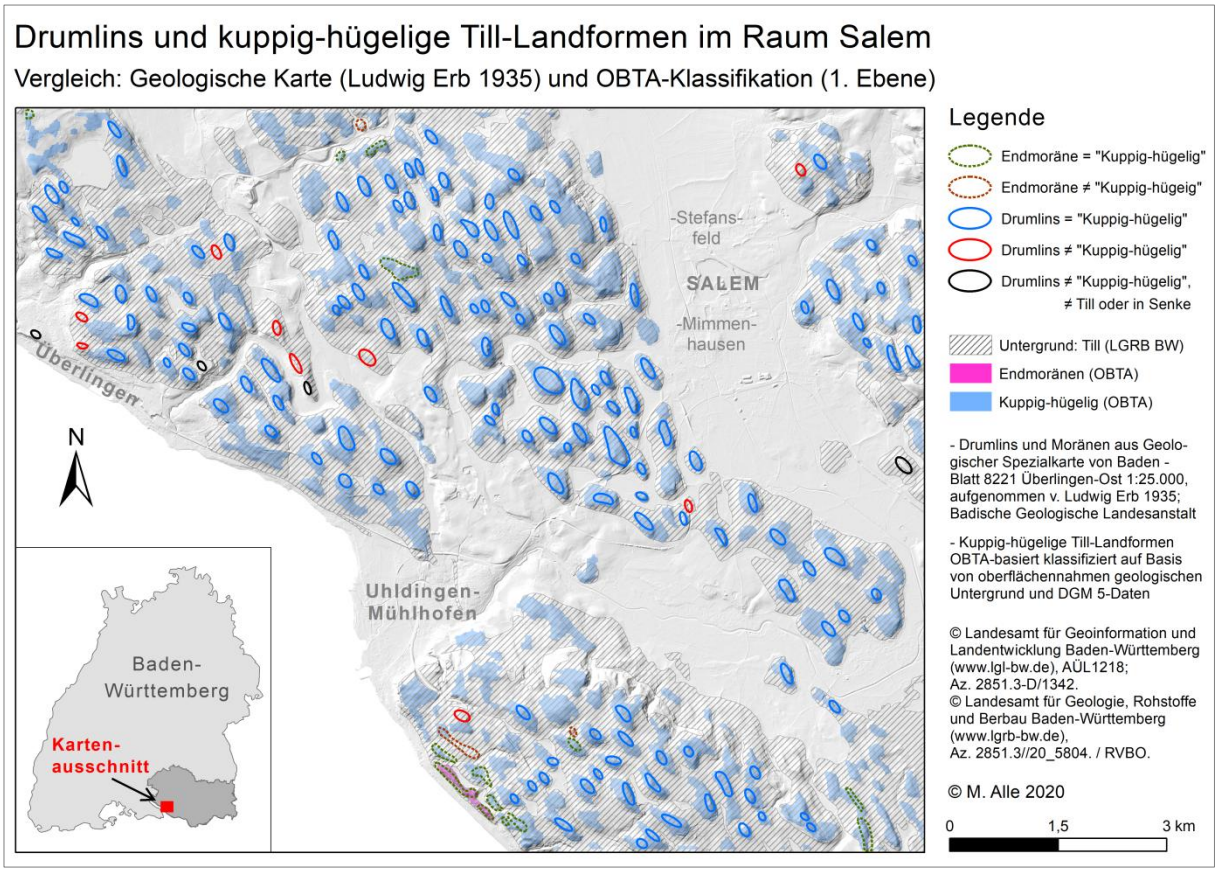


Abb. 49: **OBTA-basierte Till-Landformen** vs. **ERBs Drumlin-Kartierung** (1935) im Raum Salem. Zur besseren Orientierung sind wichtige Siedlungen verzeichnet.

Das entspricht einer Übereinstimmung (eng. *detection rate*) von 92%. Fünf der 13 nicht übereinstimmenden Drumlins (schwarz in der Karte dargestellt) befinden sich nicht oder mit weniger als 50% ihrer Fläche in dem für die Klassifikation maßgeblichen Till-Untergrund (vgl. graue Schraffur in der Karte). Bezieht man nur die verbleibenden 8 Drumlins aus ERBs Kartierung in das Verhältnis mit ein, ergeben sich 95% Übereinstimmung.

In Blatt 8221 Überlingen-Ost sind weiter 17 End- und Seiten-Moränen-Formen verzeichnet, die in der hiesigen Klassifikation ebenfalls Teil der Klasse *Kuppig-hügelige Till-Landformen* sind. Diese beiden Landschaftsklassen weisen eine Übereinstimmung von 14 Elementen auf, was 82% entsprechen.

Nimmt man den Anteil beider Landformen (Drumlins und [End-]Moränenformen) aus der Kartierung von 1935 und betrachtet die Übereinstimmung mit der Klasse *Kuppig-hügelige Till-Landformen*, so ergibt ein Verhältnis von 162 positiven zu insgesamt 178 Elementen

oder 91%. Bereinigt man die Berechnung um die Elemente, die sich nicht über Till befinden, sind es 162 zu 173 oder 94%.

Wie bereits angesprochen, legt die OBTA-Klassifikation eine breitere Klassendefinition zugrunde, was dazu führt, dass deutlich mehr Flächen als glazial gebildete, *Kuppig-hügelige Till-Landformen* ausgewiesen werden, als die ausschließliche Konzentration ERBS auf Drumlins. Generell lässt sich aber auch festhalten, dass bei einer DGM-basierten Klassifikation mehr glaziale Landformen (Drumlins) erkannt werden, als bei einer händischen Erfassung auf Basis von Felduntersuchungen (vgl. EVANS 2012: 95, D'OLEIRE-OLTMANNS et al. 2013: 949)

Der im Norden des Untersuchungsgebiets entwickelte Algorithmus für die Klassifikation der Endmoränen ergibt für den Vergleichsraum Salem ein Segment, das in ERBS Kartierung zwei der (End-)Moränen-Segmente überdeckt. Verglichen mit den verbleibendenden 15 Moränen-Segmenten bedeutet dies eine deutlich geringere Übereinstimmung von lediglich 12%.

Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Ruleset für den Endmoränen-Algorithmus auf Basis gut ausgeprägten Würm-Endmoränenwällen (AeWEM) erstellt wurde. Diese weisen einen größeren Höhenunterschied zur direkten Umgebung sowie eine deutlich stärker ausgeprägte Kuppigkeit bzw. Oberflächenrauheit auf, die beide maßgeblich in die Algorithmen eingehen. Diese Parameter sind im Raum Salem im Bereich der Gletscherrückzugsstadien jedoch kaum ausgeprägt, sodass als Moränen-Merkmal lediglich das Längen-Breiten Verhältnis und der relative Höhenunterschied herangezogen werden können, was so wesentlich weniger Endmoränen-Segmente in Bodensee-Nähe ergibt. Die meisten von ERBS Endmoränen werden hier als Teile der Grundmoränenlandschaft klassifiziert, was kein größeres Problem darstellt.

Die insgesamt hohe räumliche wie thematische Übereinstimmung beider Klassifikationsansätze spricht dafür, dass sich der mikroskalige Betrachtungsmaßstab gut dafür eignet.

Bsp. B – Naturräumliche Gliederung im Untersuchungsgebiet

GRAUL (1952), HUTTENLOCHER (1959), BENZING (1964) und DONGUS (1991)

Die Naturräumliche Gliederung von MEYNEN & SCHMITTHÜSEN (1953-1962) stellte das Konzept der Landschaftsgliederung vor. Als *top-down*-Ansatz werden Großlandschaften in immer kleinere Subeinheiten geteilt (vgl. Kapitel 2.2.3). Da der Maßstab von MEYNEN & SCHMITTHÜSENS deutschlandweiter Gliederung (1 : 1 Mio.) für einen Raum wie das südliche Oberschwaben deutlich zu klein ist, war es logisch, dass auf Basis dieser Vorlage Detailanalysen für das Untersuchungsgebiet erstellt wurden. Dies wurde von GRAUL (1952), HUT-

TENLOCHER (1959), BENZING (1964) und DONGUS (1991) in einem Maßstab (1 : 200 000) über einen Zeitraum von knapp 40 Jahren übernommen.

Nachfolgend wird zunächst die Aufbereitung der Daten für die Verarbeitung im GIS erläutert. Anschließend werden die oben genannten Naturräume mit den OBTA-Klassen inhaltlich und räumlich verglichen.

Um die Naturräumliche Gliederung mit der OBTA-Klassifikation vergleichen zu können, wurden die vier Kartenblätter digitalisiert und georeferenziert. Anschließend wurden die verschiedenen Naturraum-Polygone digitalisiert und eine Gesamtdatei (Shapefile) erstellt. Dieses wurde mit den administrativen Grenzen des RVBO verschnitten, sodass ein zusammenhängender Datensatz aus allen Naturräumen des Untersuchungsgebiets vorliegt. Das Ergebnis ist in *Abb. 50* abgebildet.

Als thematische Information in der Attributtabelle[35] wurden hier zunächst die Originalbezeichnungen der Naturräume von den vier oben erwähnten Kollegen übernommen (Spalte „*Dongus_Nat*“). Weiter wurde die Zugehörigkeit zum Altmoränenland (Spalte „*Zugehörig*“, ID = 0) oder Jungmoränenland („*Zugehörig*“, > 0) definiert. Letzteres wurde in IWEM (= 2) und AeWEM (= 1) unterteilt. Dabei fällt auf, dass GRAUL und Kollegen bei ihrer Einteilung zwar zwischen Alt- und Jungmoränenland unterscheiden, auf eine weitere Unterteilung (z.B. IWEM, Konstanzer Stadium, weitere) jedoch verzichten. Das wird an Naturräumen, wie dem „Rinkenburger Hügelland“, „Homberg-Höchsten“ oder „Zungenbecken und Moränenwälle von Kißlegg“ deutlich, die von der IWEM durchbrochen werden.

[35] Struktur und Inhalt der Attributtabelle sind in den Anhängen I-IV zu finden.

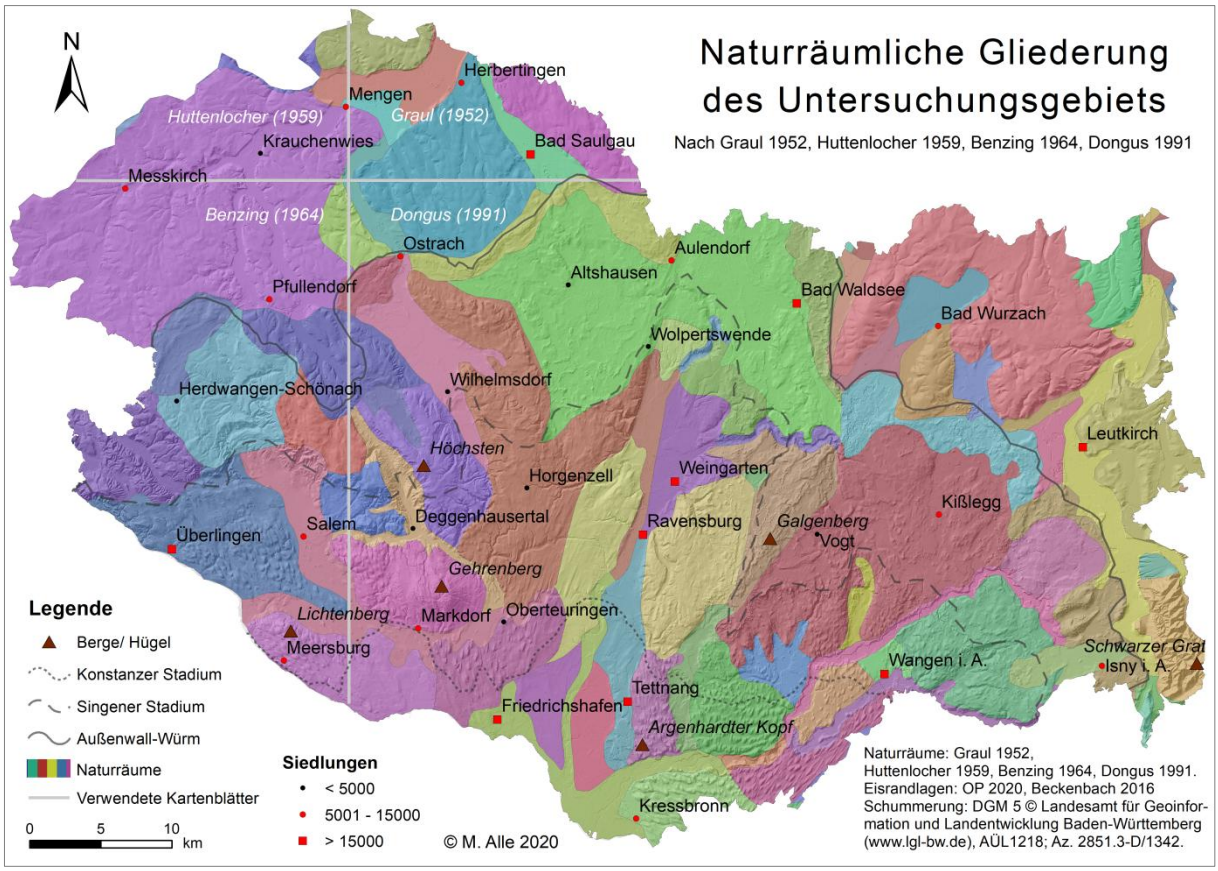


Abb. 50: **Karte der Naturräumlichen Gliederung im Untersuchungsgebiet**.
Die Naturräume wurden im Maßstab 1 : 200 000 aufgenommen, die Farben sind zufällig gewählt und haben keine inhaltliche Bedeutung. Als zusätzliche Informationen sind die Schummerung des DGM 5, die Siedlungen und Berge der Region Bodensee-Oberschwaben abgebildet. Die Karte enthält auch die wichtigsten Eisrandlagen sowie Markierungen für die Grenzen der verwendeten Kartenblätter.

Wenn GRAUL (1952) und Kollegen von „Hügelland“ im Gegensatz zu „Drumlinfeld“ o.ä. sprechen, deutet dies auf eine andere Till-basierte Klasse hin. In diesen Fällen wurde die entsprechenden Naturräume der Klasse *flachwellige Till-Landschaft* zugeordnet. Ebenso wurden alle Naturräume, welche von GRAUL und Kollegen mit „Platten“ und „Altmoränen“ angesprochen werden, dieser Landschaftsklasse zugeordnet. Für den Süden des Untersuchungsgebiets sprechen die Autoren stets von der Klasse „Drumlinfeld“, welche mit der OBTA-Klasse *kuppig-hügelige Till-Landform* bzw. *-Landschaft* korrespondiert. Zusätzlich wurde eine Spalte integriert, die räumliche Besonderheiten wie große Moorflächen, anthropogene Strukturen (hier: Abraum- und Abtragsflächen) oder Endmoränenbestandteile (AeWEM, IWEM) aufweisen.

Für den Vergleich wurden die 2. und die 3. OBTA-Ebene (Landschaften und Großlandschaften) herangezogen, da die 1. OBTA-Ebene zu großmaßstäbig ist. Es zeigte sich, dass die OBTA-Großlandschaften (3. OBTA-Ebene) die größte Übereinstimmung mit den Na-

turräumen haben und diese Maßstabsebene am ehesten den Einheiten von GRAUL und Kollegen entspricht.

Nachfolgend werden die beiden oben angesprochenen OBTA-Ebenen mit der Naturräumlichen Gliederung von GRAUL und Kollegen inhaltlich und räumlich verglichen. Dabei sollen Karten die Raum-Situation veranschaulichen und den Vergleich unterstützen.

Inhaltlicher Vergleich der Naturräume und OBTA-Landschaften
(2. und 3. OBTA-Ebene)

In *Abb. 51* wird die Naturräumliche Gliederung des Untersuchungsgebiets nach GRAUL und Kollegen gezeigt, welchen die Klassen der 2. OBTA-Ebene zugeordnet wurden. In *Abb. 52* werden die Naturräume aus *Abb. 51* nach den Vorgaben der 3. OBTA-Ebene zusammengefasst. Der anschließende räumliche Vergleich beider Klassifikationsansätze wird auf dieser Ebene durchgeführt.

Im Folgenden werden zunächst die Landschafts-bzw. Naturraumklassen beider Modelle inhaltlich auf Basis der 2. OBTA-Ebene verglichen. Dabei fällt auf, dass die ***Till-Landschaften*** (***kuppig-hügelig*** – *Naturraum-Klasse 42, und* ***flachwellig*** – *Naturraum-Klassen 30 und 41*) gut mit der hiesigen Klassifikation übereinstimmen. Auch die ***Endmoränen-Landschaften*** (*Naturraum-Klasse 40*) der Kollegen werden relativ akzeptabel verortet. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Entscheidung, bei den Naturräumen von Endmoränen-Landschaften zu sprechen, räumlich nicht immer sinnvoll erscheint. Die Flächen, die von den Endmoränen-Landschaften in der naturräumlichen Gliederung eingenommen werden, schließen in einigen Fällen auch signifikante weitere Landschaften mit ein, die so nicht zur Geltung kommen. Ein Beispiel hierfür ist der Naturraum „Arnacher Jungendmoränen", der sowohl die AeWEM zwischen Kißlegg und Leutkirch beinhaltet als auch die Schotterebene zwischen AeWEM und Wurzacher Becken. Letztere wird in der OBTA-Klassifikation (2. und 3. Ebene) als eigenständige Landschaft ausgewiesen.

Die ***Beckenlandschaften*** (im JML und AML, mit den Differenzierungen: Moor- oder Schotter-Auflage) weisen große Unterschiede auf. Das Schussenbecken taucht in der naturräumlichen Gliederung nicht auf. Stattdessen gliederte DONGUS (1991) diese und die angrenzenden Landschaften nach präwürmzeitlichen Terrassen. Da hier eine inhaltliche Zuordnung zu den OBTA-Landschaften nicht möglich war, blieben jene Naturräume unklassifiziert. Sie machen knapp 10 % (9,9 %) der Fläche aus.

Die OBTA-Klassifikation liefert mit dem Oberen Schussenbecken und dem Altshauser-Becken zwei in sich differenzierte, große, glazial geprägte Becken. Bei DONGUS (1991) werden diese beiden zusammen als das *Becken von Altshausen-Waldsee* ausgewiesen[36]. Diese

[36] DONGUS (1991: 39) spricht in seiner Klassenbeschreibung andererseits von „zwei Zungenbecken", „ohne merkbare ökologische Grenze, nur vom Schussentobel orographisch unterbrochen".

Klassifikation schließt den nördlichen Teil des Durlesbacher-/Schussentobels mit ein. Er bildet in der OBTA-Klassifikation zusammen mit kuppig-hügeligen und flachwelligen Till-Landschaften die Grenze zwischen beiden Landschaften. Das Altshauser Becken sowie das Obere Schussenbecken sind in der hiesigen Klassifikation deutlich kleiner als bei DONGUS.

Das Salemer Becken wird bei BENZING (1964) und bei DONGUS (1991) als hauptsächlich fluvial geprägt angesehen. Die glaziale Genese steht hier weniger im Fokus als die spätwürmzeitliche Schmelzwasserprägung (BENZING 1964: 16). DONGUS bezeichnet das Salemer Becken als „Umfließungsrinne von Markdorf-Frickingen", lediglich den Nordteil um Frickingen benennt er als „Zungenbecken" (DONGUS 1991: 32).

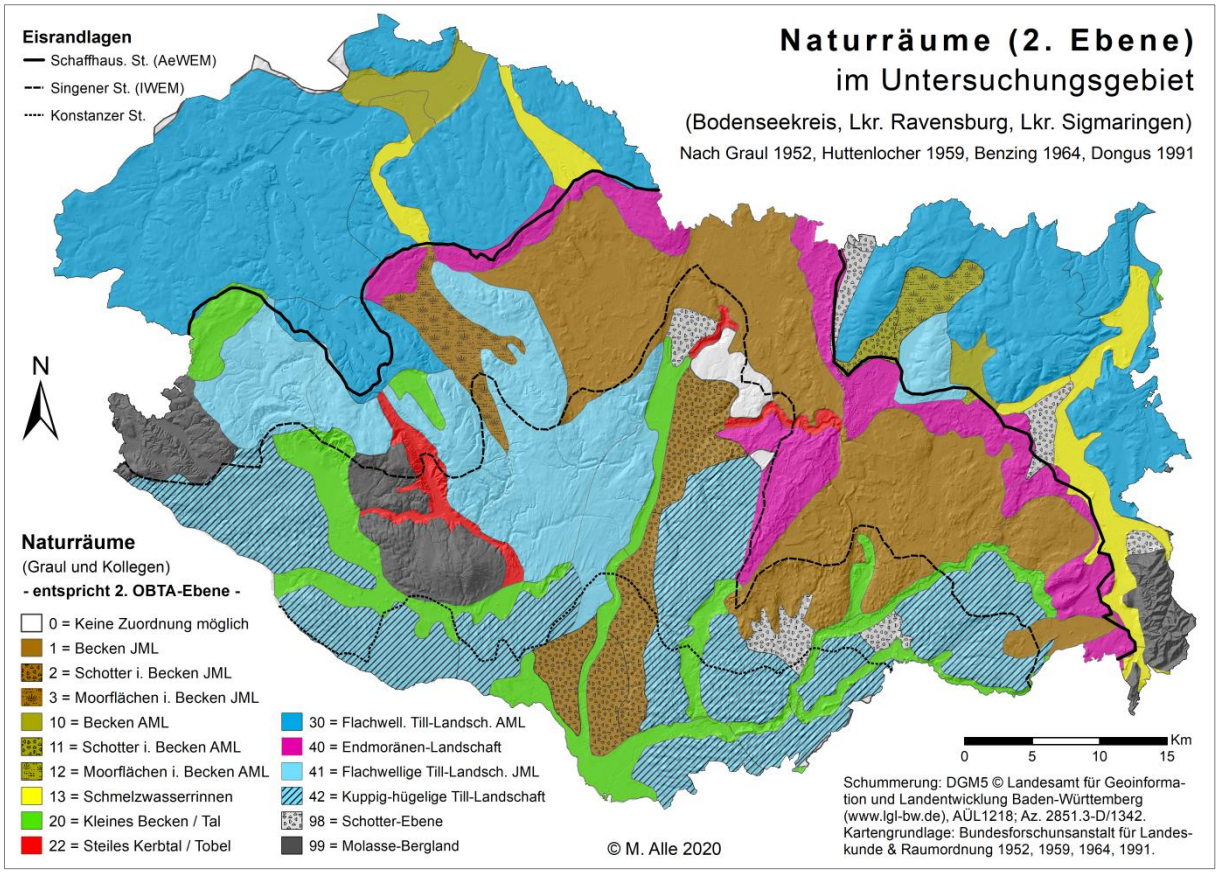


Abb. 51: **Naturräume auf Basis der OBTA-Landschaftsklassen** (2. OBTA-Ebene)
Hier wurden den Naturräumen von GRAUL 1952, BENZING 1959, HUTTENLOCHER 1964 und DONGUS 1991 die entsprechenden OBTA-Klassen (2. Ebene – *Landschaften*) zugeordnet. Dies erfolgte auf Grundlage der Naturraumbeschreibungen der Autoren. Die farblose Klasse „0" zeigt Naturräume, die nicht zugeordnet werden konnten. Sie basieren auf dem Prinzip der im Mittelpleistozän gebildeten Terrassen.

Das „Zungenbecken […] von Kißlegg" (DONGUS 1991: 46) besteht in der OBTA-Klassifikation aus *Till-Landschaften* (*kuppig-hügelig, flachwellig, Endmoränen*) und *Tälern und Kleinen Becken*. Es weist zwar eine ähnlich hohe Vermoorung wie das Altshauser Becken auf, eine spezifische

konkave Becken-Morphologie ist jedoch nicht vorhanden, da die Täler keine einheitliche Oberflächenstruktur zulassen. DONGUS (ebd.) bestätigt zwar, dass hier auch „Moränenwälle“ (IWEM) anstehen, er weist sie jedoch nicht als eigenständigen Naturraum aus. Die OBTA-Klassifikation ergibt für diesen Bereich des Untersuchungsgebiets ein durch *kleine Becken und fluviale Täler, flachwellige Till-Landschaft* sowie vereinzelte kuppig-*hügelige Landformen* und abschnittsweisen *Endmoränen*-Wälle der IWEM geprägtes Gebiet. Die Dichte-Analysen der räumlichen Landformen-Konzentration (Kapitel 4.1.1) untermauern dies. Auch andere DGM-basierte Klassifikationen des Untersuchungsgebiets bestätigen dies (vgl. BECKENBACH 2016, SEYFRIED et al. 2019).

Das Wilhelmsdorfer, das Wurzacher und das Isnyer Becken in der Klassifikation von GRAUL und Kollegen weisen hingegen große Übereinstimmungen mit der OBTA-Klassifikation auf. Die beiden erstgenannten Landschaften stimmen hier auch in ihrer inneren Differenzierung nach Moor- und Schotterauflage mit den DONGUS‘schen überein. Dem Wilhelmsdorfer Becken gliedert DONGUS (1991: 39) das südlich anschließende Zußdorfer Becken an. Dieses ist jedoch nicht vermoort und wird durch den Wall der IWEM vom jenem getrennt. In der OBTA-Klassifikation wird es folglich als eigenständiges *Kleines Becken* ausgewiesen, was DONGUS (ebd.) in seiner Naturraum-Beschreibung indirekt bestätigt. Auch im Bereich des südlichen „Riedlinger Beckens“ (GRAUL 1952: 5f.), im Untersuchungsgebiet zwischen Mengen und Herbertingen gelegen, stimmt die Naturräumliche Gliederung mit der entsprechenden OBTA-Landschaft überein.

Kleine Becken- und fluviale Tal-Landschaften werden in der Naturräumlichen Gliederung aufgrund der stärkeren Generalisierung häufig mit weiteren Naturräumen zu übergeordneten Klassen verschmolzen. Die „Donau-Ablach-Platten“ auf dem Blatt „Konstanz“ zeigen dies beispielhaft. BENZING (1964: 19) fasst hier die OBTA-Landschaften *Schmelzwasserrinnen*, *Schotterebenen* und *Flachwellige Till-Landschaft (AML)* zusammen. Er spricht von „Flachrelief mit einem Gefüge von Platten und pleistozänen Schmelzwasserrinnen“, das sich im „Altmoränengebiet“ befindet (ebd.).

Die „Selgetsweiler-Aach-Linzer Moorsenke“ (BENZING 1964: 18) sowie das „Ilmensee-Becken“ (DONGUS 1991: 44) werden auch in der OBTA-Klassifikation als kleine glaziale Becken erfasst. Als Beckenlandschaften weisen sie beide eine Vermoorung auf, die bei einer reinen fluvialen Genese eher unwahrscheinlich wäre.

GRAUL und Kollegen klassifizieren drei Naturräume als ***Steile Kerbtäler*** / ***Tobel*** (*Naturraum-Klasse 22*) („Durlesbacher Tobel“, „Tobel der Wolfegger Aach“ und „Tobel von Deggenhausen“). Diese drei werden auch in der OBTA-Klassifikation (2. Ebene) klassifiziert. DONGUS (1991) fasst auf seinem Kartenblatt den „Tobel von Deggenhausen“ und die Urnauer Rinne als zusammengehörigen Naturraum auf. Einerseits sind beide Landschaften fluvial entstanden. Die Urnauer Rinne wurde jedoch als Umfließungsrinne, parallel zum

Gletscherrand während des Reichenauer Stadiums gebildet (SCHWAB 2014: 5), während der „Tobel von Deggenhausen" orthogonal zum Gletscherrand verläuft und sich charakteristisch tief in die Obere Süßwassermolasse einschneidet. Dabei überwindet er einen Höhenunterschied von 300 m (DONGUS 1991: 43) und weist deutlich größere Hangneigungen auf. Aufgrund dieser unterschiedlichen Genese und Morphologie erscheint es angebracht, beide Landschaften zu trennen.

Der „Durlesbacher Tobel" (Schussentobel) verläuft bei DONGUS (1991) zwischen Mochenwangen im Süden bis ca. auf die Höhe von Reute. Dies ist allerdings nur gut die Hälfte der von diesem selbst beschriebenen Verlauf von ca. 10 km „zwischen Rugetsweiler im Norden und Mochenwangen im Süden" (DONGUS 1991: 41). Der eigentliche Verlauf des Durlesbacher bzw. Schussentobels, wie ihn DONGUS (ebd.) beschreibt, würde das in dessen Naturräumlicher Gliederung klassifizierte Becken von Altshausen-Waldsee teilen. Dass dies sinnvoll wäre, wurde bereits erläutert. Der Naturraum „Tobel der Wolfegger Aach" stimmt letztlich relativ gut mit der Tobel-Landschaft der OBTA-Klassifikation überein.

Die kleineren Tobel weiter im Süden des Untersuchungsgebiets wurden von GRAUL und Kollegen nicht erfasst. Sie fallen hier in die Naturraum-Klassen der Till-Landschaft (kuppig-hügelig und flachwellig JML) sowie des Molasse-Berglands (*Naturraum-Klasse 99*).

Die ***Schmelzwasserrinnen*** (*Naturraum-Klasse 13*) im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets wurden bereits weiter oben angesprochen. Das „Schwarzachtal" (GRAUL 1952: 8) und die „Ostrachrinne" (DONGUS 1991: 54) bilden Ausnahmen. Sie werden in der Naturräumlichen Gliederung erfasst und stimmen mit der OBTA-Klassifikation überein. Im östlichen Teil klassifiziert der OBTA-Algorithmus aufgrund der Größe und der Neigung der Beckenränder zwischen Isny und Leutkirch ein rißzeitlich angelegtes Becken, welches in der Würmzeit als Schmelzwasserrinne fungierte. DONGUS (1991: 56ff.) verortet hier die „Rinne von Altmannshofen-Großholzleute", die „Rinnen von Grünenbach und Wengen" sowie das „Tal der Wurzacher Aach", was plausibler ist.

Die ***Schotter-Ebenen*** (*Naturraum-Klasse 98*) fehlen in der Naturräumlichen Gliederung im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets. Die „Terrasse von Wangen" (DONGUS 1991: 47) im Südosten, das „Riedtal" und das angrenzende „Weite Ried" (Ebd.: 54f.) sowie die „Terrasse von Friesenhofen" (Ebd.: 58), nördlich der Adelegg, stimmen mit den jeweiligen OBTA-Klassen überein. Weitere Schotterebenen im JML, wie beispielsweise die Tettnanger Terrassen werden nicht als eigenständige Landschaft aufgeführt. Sie wird bei DONGUS als Teil der Klasse „Südöstliche Schussenbecken-Terrasse" (Ebd.: 33) ausgewiesen.

Die OBTA-Klasse ***Molasse-Bergland*** (*Naturraum-Klasse 99*) wird in der Naturräumlichen Gliederung in Form der oberflächlich anstehenden, meist stark zerklüfteten Molasse im Südteil des Untersuchungsgebiets ausgewiesen. BENZING (1964: 15) erfasst das im Westen

des Untersuchungsgebiets gelegene „Stockacher Bergland“. Er weist auf die auch in der OBTA klassifizierte, starke Zertalung (ebd.) durch viele kleine, steile Kerbtäler (Tobel) hin. Weiter östlich klassifiziert DONGUS (1991: 42f.) das „Höchsten Bergland“ mit den Naturräumen „Gehrenberg“, „Heiligenberg“ und „Homberg-Höchsten“ als Molasse-Landschaften. Diese sind „mit würmzeitlicher Grundmoräne bedeckt“ (Ebd.: 43), die an einigen, meist steilen Stellen gekappt und die Molassesedimente freigelegt wurden. Im Osten des Untersuchungsgebiets befindet sich mit der Adelegg die höchstgelegene Molasse-Berglandschaft des Untersuchungsgebiets, die der südlich gelegene Hasenberg komplettiert. Diese wurde als Nunatak von keiner der pleistozänen Gletscherzungen überfahren, daher fehlt hier die Till-Bedeckung völlig (ebd.).

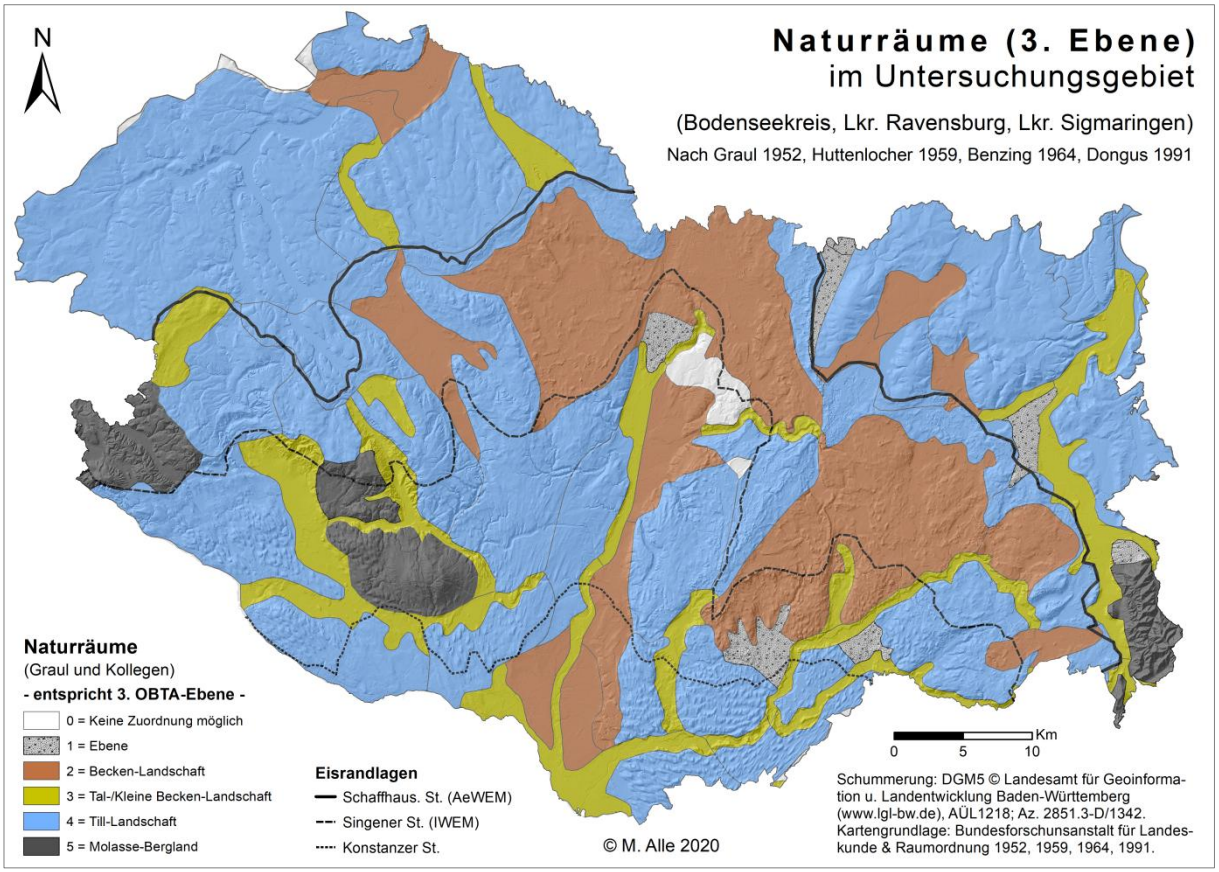


Abb. 52: **Naturräume auf Basis der OBTA-Landschaftsklassen** (3. OBTA-Ebene)
Hier wurden den Naturräumen von GRAUL 1952, BENZING 1959, HUTTENLOCHER 1964 und DONGUS 1991 die OBTA-Klassen (3. Ebene – Großlandschaften) zugeordnet. Dies erfolgte auf Grundlage der Naturraum-Beschreibungen der genannten Autoren. Die farblose Klasse »0« zeigt Naturräume, die nicht zugeordnet werden konnten. Sie basieren auf dem Prinzip der im Mittelpleistozän gebildeten Terrassen.

Zwei der DONGUS‘schen Landschaftsklassen konnten nicht in das System der OBTA-Klassen übertragen werden (Klasse 0, unklassifiziert): der „Kümmerazhofer Wald“ und die „Ebisreuter Moorsenke“. Beide liegen räumlich nahe beieinander und grenzen im Nordosten an das Mittlere Schussenbecken. Der „Kümmerazhofer Wald“ liegt im Bereich zwi-

schen dem Schussentobel und dem Tobel der Wolfegger Ach. Er beinhaltet in der OBTA-Klassifikation mehrere Landschaftsklassen: *Till-Landschaften* (*kuppig-hügelig* und *flachwellig*), wechseln sich mit *Endmoränen*-Abschnitten der IWEM und *Schotterebenen* ab. Letztere deutet DONGUS (1991: 41) in seiner Klassenbeschreibung ebenfalls an. Die „Ebisreuter Moorsenke" liegt westlich der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden IWEM und entspricht in der OBTA-Klassifikation *flachwelligen Till-Landschaften* und Teilen der Kuppen-und-Kessel-Landschaft der *IWEM*.

Räumlicher Gesamtvergleich der Naturräume und OBTA-Landschaften
(2. und 3. Ebene)

Um die oben vorgestellte Klassifikation der Naturräumlichen Ordnung für das Untersuchungsgebiet mit der OBTA-Klassifikation oder anderen räumlich vergleichen zu können, galt es, eine möglichst große thematische Übereinstimmung der Klassen zu erreichen. Dazu wurden auf Grundlage der Beschreibungen der Naturräumlichen Einheiten von GRAUL (1952), BENZING (1959), HUTTENLOCHER (1964) und DONGUS (1991) Kennzahlen erstellt. Diese wurden auf Basis der OBTA-basierten Landschaftsklassen ermittelt. Naturräume in Randbereichen mit einer Fläche von unter 2 km² wurden ausgeschlossen. *Tab.* 7, *Tab.* 8 und *Tab.* 9 (siehe Anhang) zeigen die Entsprechung von Naturräumen und OBTA-Landschaftsklassen.

Da die Naturräume von GRAUL und Kollegen nicht immer eindeutig auf die Einheiten der OBTA-Klassifikation übertragbar sind, wurde anhand der Merkmalsbeschreibungen die wahrscheinlichste Einheit zugeordnet. Einige Naturräume haben keine Entsprechung bei den OBTA-Klassen (siehe oben). In *Abb. 53* wird die räumliche Übersicht der Übereinstimmung zwischen beiden Modellen in einer Karte dargestellt.

Der Vergleich wurde mittels 10 000 in ArcGIS zufällig erstellten Referenzpunkten durchgeführt und dabei jeweils die Klassenzugehörigkeit ermittelt. *Abb. 53* verdeutlicht die Zusammenhänge farblich:

Ein ***grüner Punkt*** steht für die gleiche Klasse in beiden Modellen in beiden OBTA-Ebenen (2: Teil-Landschaften und 3: Hauptlandschaften).
Blaue Punkte weisen auf die Klassenübereinstimmung auf der 3. OBTA-Ebene hin.
Rote Punkte zeigen Räume, in denen es keine Klassenübereinstimmung gibt.

Auf der Hauptlandschafts-Ebene (OBTA-3) bestehen die höchsten Übereinstimmungen (66,15%), während auf der Ebene der (Teil-)Landschaften (OBTA-2) lediglich eine Klassenübereinstimmung von 44,05% existiert. Dies ist einerseits auf den geringeren landschaftlichen Differenzierungsgrad zurückzuführen. Es zeigt weiter, dass die Naturräume in deutlich kleinerem räumlichem Maßstab aufgenommen wurden als die Fokalebene (OBTA-2) dieser Arbeit.

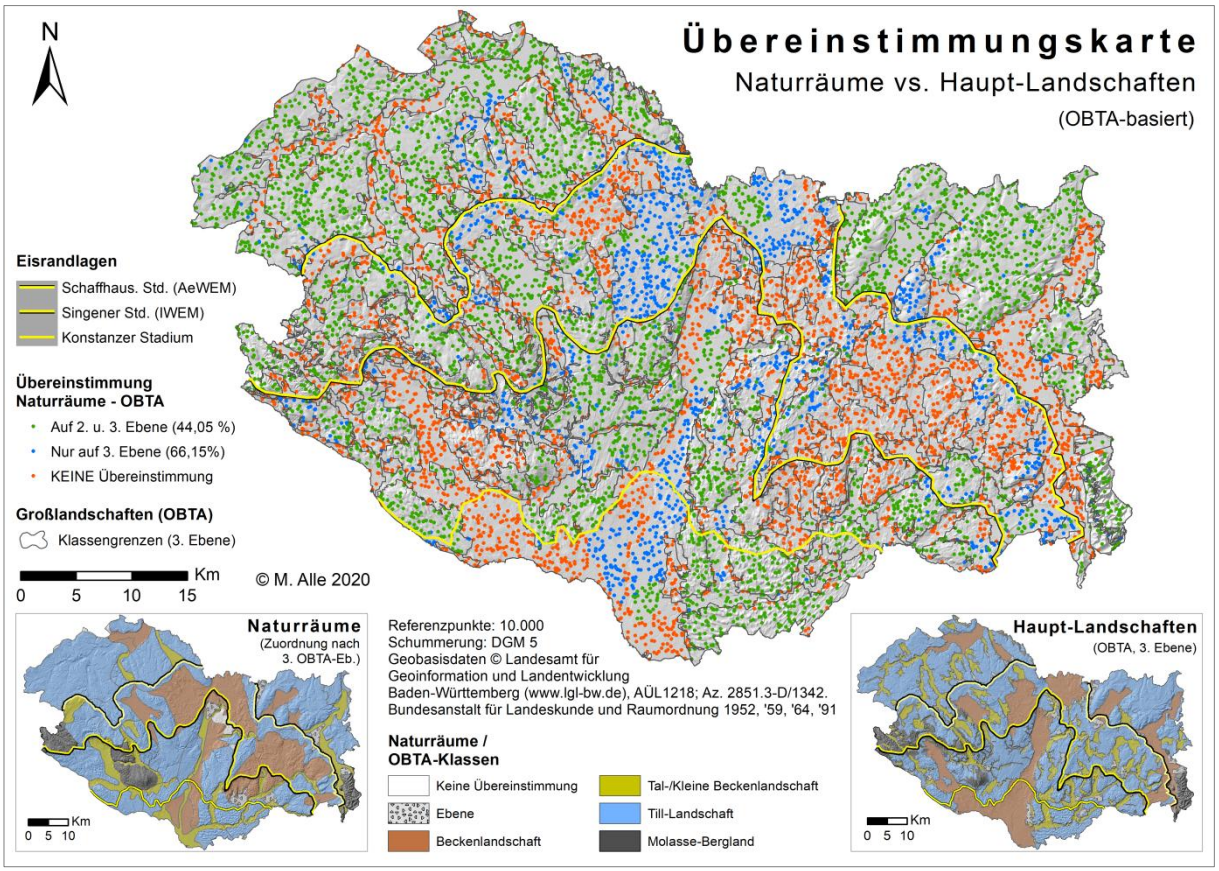


Abb. 53: **Vergleich: Naturräume vs. OBTA-(Haupt-)Landschaften** (2. und 3. Ebene)
Große Karte: Übereinstimmung der Naturräume mit den Hauptlandschaften der OBTA-Klassifikation. Ermittelt und dargestellt anhand von 10 000 zufällig erstellten Referenzpunkten. Zur leichteren Orientierung werden die Schummerung (DGM 5) sowie die Grenzlinien der OBTA-Klassifikation (3. Ebene) abgebildet.
Übereinstimmung auf OBTA-Ebene 2: 44,05%, auf OBTA-Ebene 3: 66,15%.
***Kleine Karten: links* – Naturräume** zugeordnet nach OBTA-Klassen, 3. Ebene,
rechts – Hauptlandschaften (OBTA-Klassen, 3. Ebene).

Der Vergleich der Klassenübereinstimmung zwischen den Modellen erbrachte interessante quantitative Zusammenhänge (vgl. *Abb. 54*). Vor allem die für das Untersuchungsgebiet signifikanten ***Till-Landschaften*** (*kuppig-hügelig*, *flachwellig* und *Endmoränen*) mit 83,67% (Naturräume) bzw. 81,44% (OBTA) liefern ähnliche Raumgrößen[37] und eine hohe räumliche Übereinstimmung aller Punkte für beide Modelle. ***Molasse-Berglandschaften*** folgen mit großen Übereinstimmungen (nur ca. 2% Unterschied). Knapp 2/3 (ca. 63% bzw. ca. 64%) aller Referenzpunkte liefern bei beiden Modellen die Klasse *Molasse-Bergland*. ***Becken-Landschaften*** (*Becken*) weisen ebenfalls sehr geringe Klassenunterschiede (< 1%) auf. Auch hier ergaben jeweils über 60% (62,38% bzw. 60,12%) der Referenzpunkte in beiden Modellen die Klasse *Beckenlandschaft*.

[37] Dies sagt jedoch nur etwas über die absoluten Flächenanteile, jedoch nichts über die räumlich verteilte Übereinstimmung der Till-Landschaften in beiden Modellen aus.

Die Naturraum-Klassen *Ebenen* (*Klasse 1*; OBTA: ***Schotterebenen***) und *Täler* (*Klasse 3*; OBTA: ***Tal-Landschaften***: *Kleine Becken / Täler* und *Schmelzwasserrinnen*) zeigen große Unterschiede innerhalb der jeweiligen Klasse (*Ebenen*: > 30%, *Täler*: > 15%). Dies liegt zum einen an der unterschiedlichen Zuordnung großer Flächen des östlichen und westlichen Untersuchungsgebiets durch beide Modelle (Naturraum „Zungenbecken und Moränenwälle von Kißlegg", siehe oben). Das Salemer Becken wurde von der Naturräumlichen Gliederung von BENZING (1964) und DONGUS (1991) als Tallandschaft interpretiert, wobei die Andelsbach-Platten bei HUTTENLOCHER (1959) und BENZING (1964) sowie die Fulgenstätter Platten bei DONGUS (1991) keine Tallandschaften (*Schmelzwasserrinnen*) aufweisen, sondern als (flachwellige) Till-Landschaften angesprochen werden. Die Unterschiede für die Klasse *Ebenen* kommen dadurch zustande, dass das OBTA-Modell die DONGUS'sche „Terrasse von Amtzell" größtenteils als Kleine Becken / Tal-Landschaft klassifiziert. In diesem Zusammenhang sind auch die knapp 10% nicht zuordenbaren Flächen der Naturräume zu nennen, welche bei der OBTA-Klassifikation zu einem Großteil von Ebenen eingenommen werden. Insgesamt klassifiziert das OBTA-Modell deutlich mehr Ebenen und Tal-Landschaften als die Naturräumliche Gliederung.

Insgesamt ist die Gesamt-Übereinstimmung mit maximal 2/3 aller Punkte (66%) zwar akzeptabel, aber auch steigerungsfähig. Lediglich für eine Landschaftsklasse (*Till-Landschaften*) werden Werte über 80% erreicht. Die grundsätzlich unterschiedlichen Klassifikationsansätze (Naturräumliche Gliederung ≙ *top-down* vs. OBTA-Landschaften ≙ *bottom up*) spielen hier eine wichtige Rolle. Die unterschiedliche Interpretation des Naturraums „Zungenbecken und Moränenwälle von Kißlegg" zeigt dies. Während DONGUS und Kollegen landschaftlich vom »Großen zum Kleinen« her denken und Teillandschaften aus Großlandschaften ausgliedern, baut das OBTA-Modell die Landschaft aus ihren Kompartimenten auf. So entsteht ein Landschaftsbild, das der Realraum-Situation näher kommt.

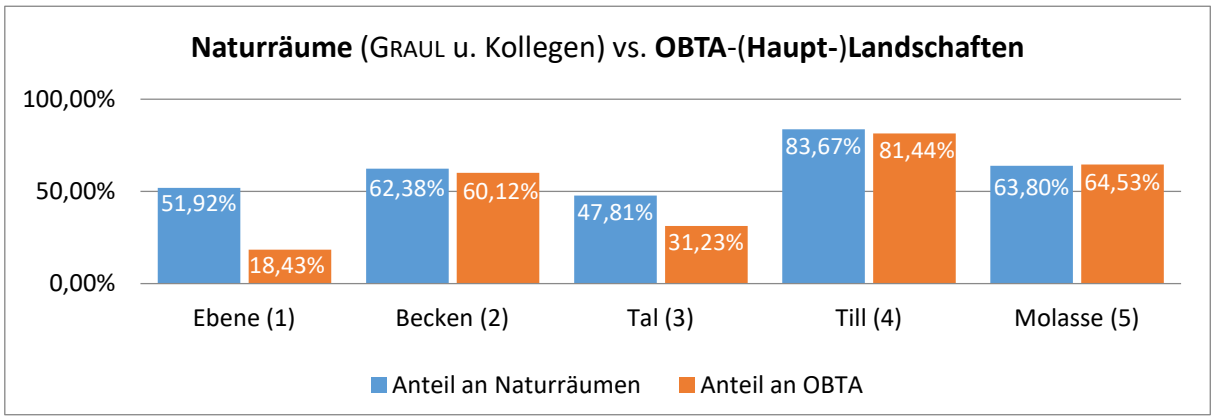


Abb. 54: **Vergleich: Naturräume** (GRAUL und Kollegen) **vs. OBTA-Haupt-Landschaften** (3. Ebene).
Die Balken zeigen die jeweilige Übereinstimmung pro Klasse für die beiden Klassifikationen.
(**Naturräume** von GRAUL et al. und **OBTA-Haupt-Landschaften**)
Insgesamt wurden für den Vergleich 10.000 zufällig ermittelte Punkte eingesetzt. Bei 9,88% aller Punkte gab es keine Übereinstimmung (weitere Daten hierzu finden sich im Anhang).

Räumlicher Detailvergleich der Naturräume und OBTA-Landschaften (3. Ebene)

Das folgende Teilkapitel widmet sich dem räumlichen Detailvergleich zwischen den OBTA-Ergebnissen und den Naturräumen von GRAUL und Kollegen. Dabei kommen 18 repräsentative Landschaften auf der 3. OBTA-Ebene zum Einsatz (vgl. *Tab. 6* und *Abb. 55*). Die 2. OBTA-Ebene eignet sich aufgrund der unterschiedlichen Maßstabsebenen (vgl. vorheriges Kapitel) nur bedingt für den Vergleich und wurde deshalb nicht berücksichtigt. *Tab. 10* (im Anhang) zeigt den nominalisierten Vergleich der Deckung bzw. Übereinstimmung der Vergleichslandschaften. In *Abb. 57* und *Abb. 58* wird der Landschaftsvergleich zwischen beiden Klassifikationen kartographisch anhand zweier exemplarischer Räume verdeutlicht. Einer liegt im Grenzbereich zwischen JML und AML und einer im Übergangsbereich vom Konstanzer zum Singener Stadium.

Tab. 6: **Räumlicher Detailvergleich: Ausgewählte OBTA-Landschaften** (3. Ebene) **vs. Naturräume.**
Erläuterung der geographischen Lage: N, O, S, W stehen für die Himmelsrichtungen sowie ihre Kombinationen. Der Zusatz Z bedeutet *Zentrum* (in Bezug auf das Untersuchungsgebiet).
Erläuterung Deckung bzw. Übereinstimmung: ++ Deckung > 90%, + Deckung > 50%, ± geringe Deckung, Ø keine Übereinstimmung, .
Abb. 55 verortet die hier besprochenen Vergleichslandschaften.

#	**Naturraum** (GRAUL und Koll.)	**Lage**	**Landschaften** (OBTA-Eb. 3)	**Deckung**
1	Wurzacher Becken	NNO	Becken, Till	++
2	Wilhelmsdorfer Becken	ZW	Becken, Till	+
3	Untere & Mittlere Schussenbecken-Terrassen	Z	Becken, Till, Täler	±
4	Kißlegger Zungenbecken & Moränenw.	ZO	Becken, Till, Schotterebenen	±
5	Umfließungsrinne Markdorf-Frickingen	SW	(Salemer) Becken	Ø
6	Riedlinger Becken	N	Becken, Täler	+
7	Altshauser Becken	ZNW	Becken, Till, Täler	+
8	Isnyer Becken	O	Becken	++
9	Oberes Schussenbecken	ZN	Becken	+
10	Adelegg	O	Molassebergland	++
11	Stockacher Bergland	W	Molassebergland	+
12	Gehrenberg	ZS	Molassebergland	±
13	Andelsbachplatten	NW	Till (flachwellig), Täler	+
14	Altmoränenplatten um Wurz. Ried	NO	Till (flachwellig)	++
15/1	(Kuppig-hügelige) Till-Landschaften	SW	Till, Täler	+
15/2	(Kuppig-hügelige) Till-Landschaften	SO	Till, Täler	++
16	Riedtal	ZNO	Schotterebenen	++
17	Argental	SO	Täler	++
18	Tobel von Durlesbach	ZNO	Täler	+

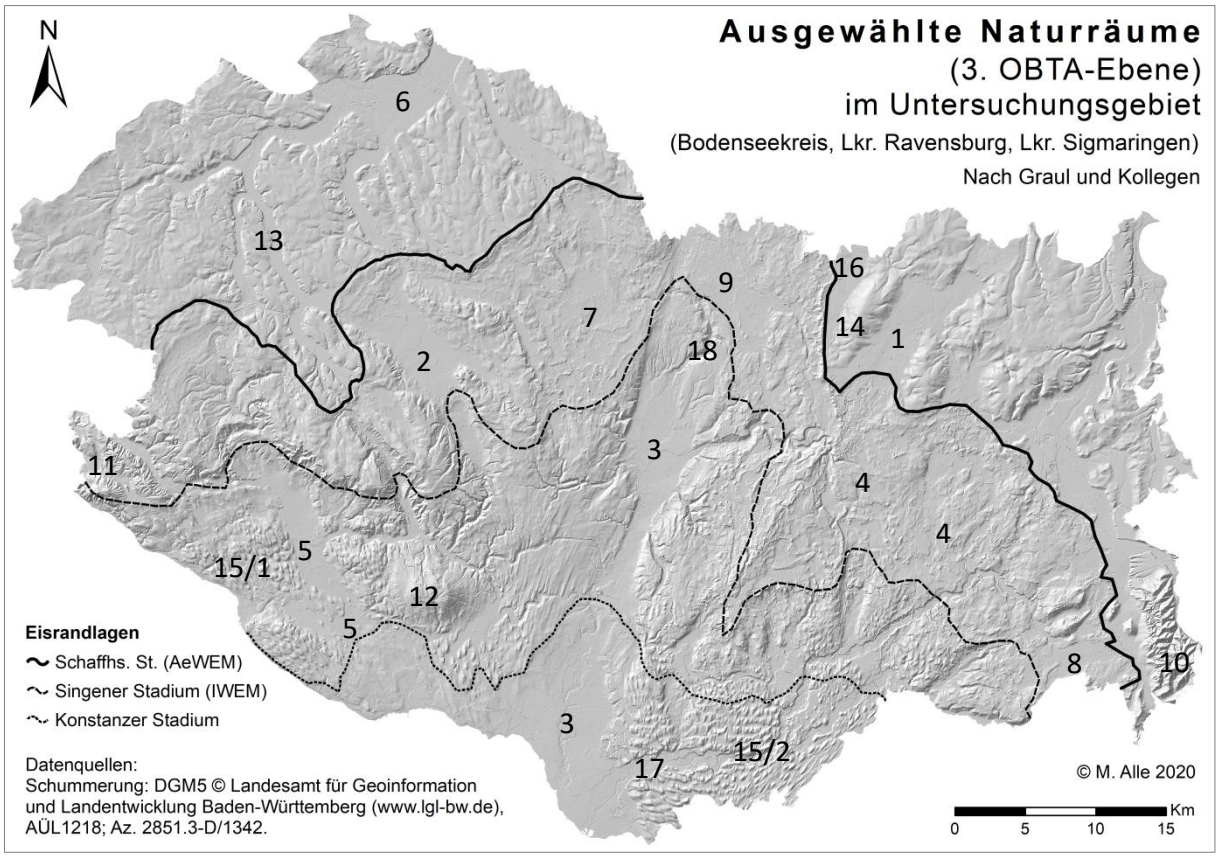


Abb. 55: **Lage der Vergleichslandschaften aus** *Tab. 6* **im Untersuchungsgebiet**.

In *Tab. 6* / *Abb. 55* und *Abb. 57* wird deutlich, dass Till-Landschaften eine relativ gute Deckung bzw. Übereinstimmung haben (> 50%). Becken weisen unterschiedliche Übereinstimmungsgrade auf: von einer sehr geringen Übereinstimmung beim „Zungenbecken und Moränenwälle von Kißlegg“ (*Naturraum-Klasse*) mit dem Wechsel von *Till-Landschaften* und *Tal-/Kleinen Becken-Landschaften* (*OBTA-Klassen*) bis hin zu sehr großer Übereinstimmung beim Isnyer und Wurzacher Becken (vgl. *Abb. 57*). Einige Becken wurden von GRAUL und Kollegen zusammengefasst (vgl. „Becken von Altshausen-Waldsee“) wo die OBTA-Klassifikation zwei eigenständige Becken ausweist (Altshauser und Oberes Schussenbecken). Das Salemer Becken (*OBTA-Klasse*) stimmt zwar räumlich mit dem nördlichen Teil der „Umfließungsrinne von Markdorf-Frickingen“ (*Naturraum-Klasse*) überein, es handelt sich aber um verschieden interpretierte Genesen der Landschaften (vgl. *Abb. 58*). Die OBTA-Klassifikation betont den glazialen Charakter der Landschaften im Untersuchungsgebiet, während GRAUL und Kollegen den periglazialen und den postglazialen, fluvialen Charakter dieser hervorheben.

Abb. 56 zeigt die beiden oben genannten Ausschnitte des Untersuchungsgebiets, für die der Detailvergleich zwischen OBTA und den Naturräumen durchgeführt wurde. Es handelt sich dabei um das Gebiet rund um das Wurzacher Becken (W) am Übergang von JML/AML sowie das Gebiet um den Gehrenberg (G) zwischen Konstanzer Stadium und Singener Stadium.

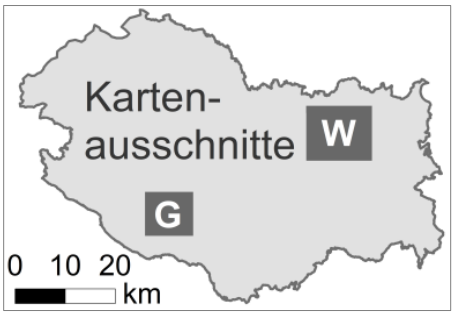


Abb. 56: Lage der Ausschnitte im Untersuchungsgebiet.

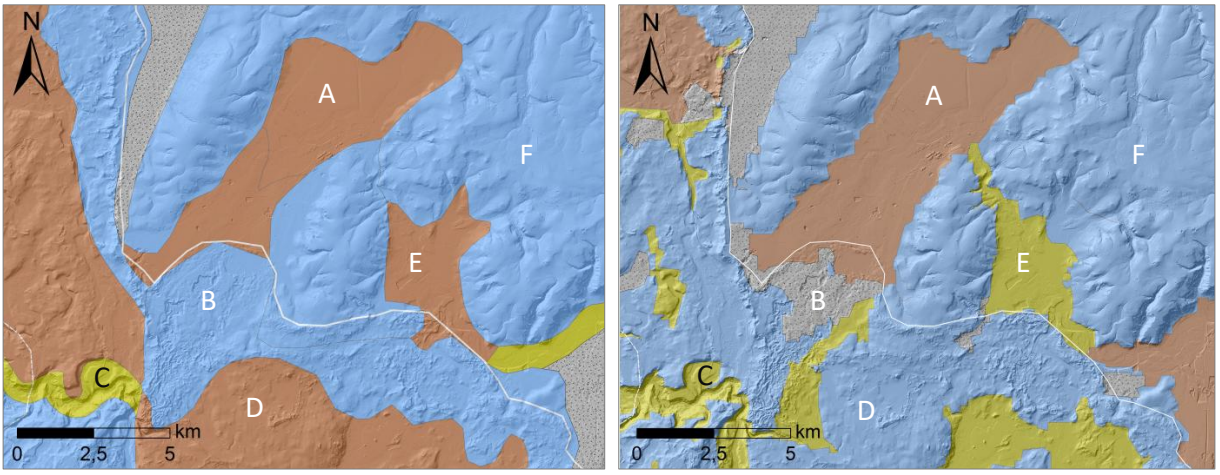


Abb. 57: **Detailvergleich 1: Dongus (1991) vs. OBTA-3 um das Wurzacher Becken.**
Bereich W in *Abb. 56*. Die Schummerung stammt vom DGM 5. Dicke weiße Linie = AeWEM, gestrichelte weiße Linie = IWEM. Die ausgewählten Landschaften / Naturräume A-F weisen unterschiedliche räumliche wie inhaltliche Übereinstimmungen auf.
A = Wurzacher Ried vs. *Becken*, B = Wurzacher Arnacher Jungendmoränen vs. *Schotterebene*, C = Andelsbacher *Tobel*, D = Zungenbecken und Moränenwälle von Kißlegg vs. *Till-Landschaft*, E = Becken von Gospoldshofen vs. *Flusslandschaft*, F = (*Flachwellige*) *Till-Landschaft* (*AML*) um das Wurzacher Becken.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

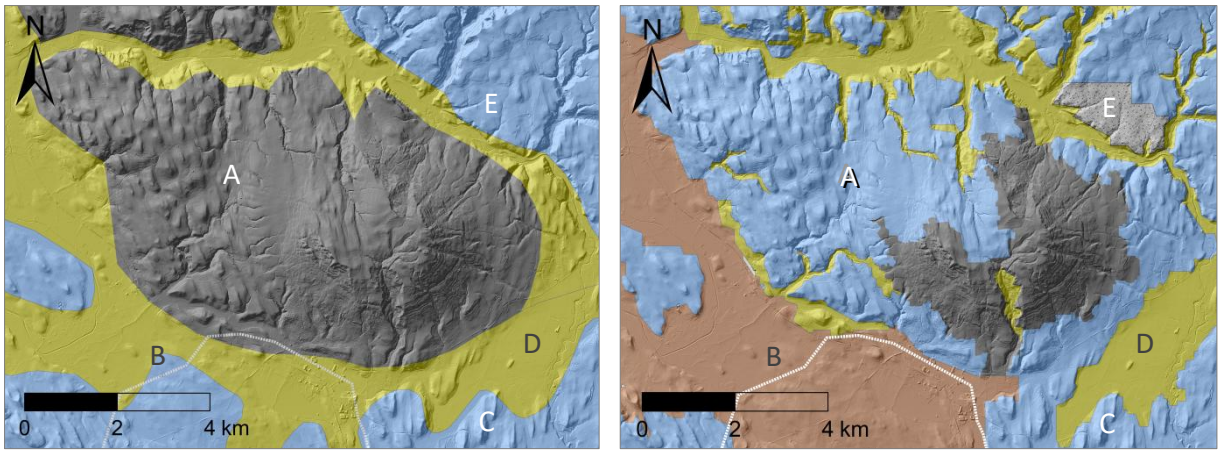


Abb. 58: **Detailvergleich 2: DONGUS (1991) vs. OBTA um den Gehrenberg.**
Bereich G in *Abb. 56*. Die Schummerung stammt vom DGM 5. Gestrichelte weiße Linie = Konstanzer Stadium. Die ausgewählten Landschaften / Naturräume A-E weisen unterschiedliche räumliche wie inhaltliche Übereinstimmungen auf.
A = Gehrenberg (≙ Molasse) vs. (*Flachwellige* & *Kuppig-hügelige*) *Till-Landschaft*, B = Umfließungsrinne von Markdorf-Frickingen + Meersburger Drumlinrücken vs. Salemer *Becken*, C = Oberteuringer Drumlinrücken vs. (*kuppig-hügelige*) *Till-Landschaft*, D = Umfließungsrinne von Markdorf-Frickingen vs. (*Umfließungsrinne*) *Flusslandschaft*, E = Rinkenburger Hügelland vs. (*Schotter-*)*Ebene*.
Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), AÜL1218; Az. 2851.3-D/1342.

Die Molasse-Berglandschaft der Adelegg weist große räumliche Übereinstimmungen in beiden Klassifikationen auf, während das „Stockacher Bergland" in der OBTA-Klassifikation von Tallandschaften durchschnitten wird. Der Naturraum „Gehrenberg" (BENZING 1964, DONGUS 1991) beinhaltet auch Anteile kuppig-hügeliger sowie flachwelliger Till-Landschaften, welche an seiner Westflanke anschließen. Hier ergibt der Vergleich nur geringe Übereinstimmungswerte (vgl. *Abb. 58*).

Die OBTA klassifiziert für den Gehrenberg nur die oberflächlich anstehenden, stark zerklüfteten Bereiche als Molasse-Berglandschaft. DONGUS (1991: 43) betrachtet den Gehrenberg und die westlich anschließende Till-Landschaft als zusammenhängenden Naturraum einer „Molassehöhe" mit „moränenbedeckt[er] und drumlinisiert[er]" Hochfläche (ebd.) (vgl. *Abb. 58*).

Der Detailvergleich in *Abb. 58* verdeutlicht den Unterschied beider Klassifikationsansätze erneut: Das *Bottom-up*-System ermöglicht es, die in größerem Maßstab (2. OBTA-Ebene) räumlich wie inhaltlich präziser erhobenen Landschaften zu aggregieren, ohne dabei räumliche Strukturen (Grenzen) zu verlieren. Der *Top-Down*-Ansatz weist in dieser Hinsicht und auf dieser räumlichen Skalenebene Defizite auf.

4.2.2 Expertenbasierte, digitale Klassifikationen glazialer Landschaften

(SALCHER et al. 2010, BECKENBACH et al. 2014, BECKENBACH 2016, SEYFRIED et al. 2019)

Die meisten aktuellen Arbeiten zur Klassifikation glazialer Landschaften erfolgen auf Basis von Expertenwissen. Landformen und Landschaften werden hierbei ebenfalls visuell erfasst und händisch digitalisiert. Diese klassische Methodik führt die Vorgehensweisen der Pioniere der Landschaftsklassifikation fort und erweitert sie um digitale Geodaten. DGM spielen dabei die Hauptrolle (SALCHER et al. 2010: 284, BECKENBACH et al. 2014: 107f., BECKENBACH 2016, SEYFRIED et al. 2019: 11f.).

In diesem Zusammenhang veröffentlichten SALCHER et al. 2010 eine mikroskalige Studie für drei Standorte Alpenvorland Österreichs, nördlich von Salzburg. BECKENBACH et al. (2014) sowie BECKENBACH (2016) legen eine DGM-basierte, visuell-händisch durchgeführte Untersuchung der Glaziallandschaft des Oberschwäbischen Alpenvorlands vor.

Diese Studien arbeiteten mit DGM in mittlerer bis höchster räumlicher Auflösung (SALCHER et al. 2010: 284 – 25 m Pixelweite; BECKENBACH et al. 2014: 107f. – bis zu 1 m Pixelweite). BECKENBACH et al. (2014), BECKENBACH (2016: 88) sowie SEYFRIED et al. (2019: 11, 323) betonen die Vorteile von hochauflösenden DGM bei der morphologisch basierten (visuellen) (Landschafts-)Klassifikation. Das gilt besonders für den Fall, dass ansonsten nur wenige oder keine Zusatzinformationen genutzt werden können. Die österreichischen Kollegen kombinieren die klassische Geländearbeit mit der DGM-Information (SALCHER et al. 2010: 283). BECKENBACH et al. (2014: 107f.) schätzen z.B. die räumliche Genauigkeit der auf Basis von hochauflösenden DGM kartierten Endmoränenzüge höher ein als in großmaßstäbigen geologischen Karten (1 : 25 000).

BECKENBACH (2016: 72ff.) nimmt Berechnungen zu Eisvolumina und Abschmelzraten des Rheingletschers während der Würm-Kaltzeit vor. Dies erfolgt auf Basis des DGM mithilfe der Eisrandlagen (AeWEM, IWEM und Konstanzer Stadium) und Literaturangaben zu Eishöhen über Grund, basalen Till-Sedimenten, heutigem Seevolumen und postglazialer isostatischer Hebung. Dazu konstruiert sie mittels der Software *TerrainView* einen isometrischen Kegelstumpf als Modell für den jeweiligen Eiskörper (ebd.: 85). Das stellt eine deutliche Vereinfachung dar, die aktuell jedoch die einzige Möglichkeit für großflächige, DGM-basierte Berechnungen von Eisvolumina ist (ebd.). Für die beiden älteren Gletscherstände (AeWEM und IWEM) überzeugen die Ergebnisse weitgehend. Für das Konstanzer Stadium kann Eishöhe und -volumen aufgrund des unregelmäßigen Verlaufs der Eisrandlagen lediglich grob geschätzt werden (ebd.: 74).

Die oben genannten Autor*innen erfassen und kartieren glaziale Landformen wie u.a. Drumlins, verschiedene Arten von (End)moränenzügen, Esker / Oser, Kames und Kamesterrassen sowie (Zungen-)Becken. Dies erfolgte manuell auf Basis von Schummerung, Höhen- und Neigungswerten. Die jeweiligen Landformen wurden anschließend grob zu

Landschaften zusammengefasst und in die Karte eingetragen (SALCHER et al. 2010: 283, BECKENBACH et al. 2014: 110). Dabei werden zwischen (End-)Moränenzügen, „Drumlins und weitere glaziale bis periglaziale Strukturen" sowie „Subglaziale Becken und Schotterebenen" unterschieden (BECKENBACH et al. 2014: 11). Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit konzentrieren sich diese Studien auf die Landformen; die Landschaften werden lediglich grob markiert. Dabei werden deren genaue Grenzen oder räumliche Ausdehnung in der Regel nicht kartiert. Die exakten Klassifikationsvorschriften werden dabei nicht genannt. Daher wird hier in diesem Zusammenhang für diese Studien im Folgenden von „Landschaften" und nicht von „Landschaftsklassen" gesprochen.

Für die Studie von BECKENBACH et al. (2014) sowie BECKENBACH (2016) weisen die ermittelten Landschaften eine hohe räumliche wie inhaltliche Übereinstimmung mit der hiesigen Untersuchung auf. Interessant sind jedoch besonders die wenigen Unterschiede. So sprechen BECKENBACH et al. (2014) sowie BECKENBACH (2016) vom „Salemer Tal" statt vom Salemer *Becken*. Auch beim Wurzacher Becken und Mittleren Schussenbecken werden die Bezeichnungen „Wurzacher Ried" und „Föhrenried" verwendet (BECKENBACH et al. 2014: 110, 112.). Das zeigt, dass deren Fokus in beiden Fällen stärker auf der nacheiszeitlichen fluvialen / hydrologischen Überprägung liegt. Die hiesige Arbeit betont stärker die morphologische Grundlage der Landschaft, bzw. die glaziale Genese während des Pleistozäns.

Was in dieser Arbeit als „flachwellige Till-Landschaft im Altmoränengebiet" klassifiziert wird, bezeichnen BECKENBACH et al. (2014) als „Ältere (rißzeitliche) Drumlinfelder, überprägt von mehrfachen Solifluktionsprozessen" (ebd.: 114) – das entspricht derselben Logik.

BECKENBACH et al. (2014) arbeiten mit einer fein abgestimmten Farbpalette für die Darstellung der Höhenunterschiede. Damit lassen sich z.B. Kerbtäler, Endmoränen, Becken sichtbar machen. Bei größeren Landformen, welche in sich geneigt sind wie z.B. großen Becken, gelangt diese Technik an den Rand ihrer Möglichkeiten. Die Farben ändern sich aufgrund der Höhenänderung auch innerhalb einer Landform und ihrer Grenzen. Sie lassen sich farblich nicht mehr eindeutig zuordnen. Auch lassen sich Landschaften wie z.B. die kuppig-hügelige Till-Landschaft zwischen Überlingen und Markdorf (vgl. *Abb. 33* und *Abb. 34*) farblich nicht mehr als Ganzes erfassen (vgl. Abb. 29 in BECKENBACH 2016: 68 – „Drumlinfeld 1")

Die OBTA-Klassifikation bezieht neben den DGM-basierten Reliefinformationen (vgl. Kapitel 3.2) als zweiten wichtigen Parameter den geologischen Untergrund in Form der Gesteinsarten mit ein. So können die hier erfassten Landschaftsklassen weiter differenziert werden. Z.B. kann das „Wurzacher Ried" als glaziales Becken nach seinem Moor- bzw. Schotteranteil in zwei unterschiedliche Klassen mit jeweils einem dominanten Anteil differenziert werden. Die glazialen Becken lassen sich noch weiter unterscheiden, wenn sie z.B. einen besonders markanten Anteil an glazialen Beckensedimenten oder eine nach-

trägliche Überprägung mit kuppig-hügeligen Landformen aufweisen. So sind mit der Grundklasse *„glaziales Becken“* schließlich fünf verschiedene Subklassen möglich (vgl. Kapitel 3.2.4). In ähnlicher Weise wurde auch die Klasse *„kleine Becken und Täler“* unterteilt.

Ein weiterer Vorteil des hier vorgestellten Verfahrens ist die Möglichkeit, eindeutige Abgrenzungen der Landform- bzw. Landschaftsklassen zu ihren Nachbarn zu definieren. So können Quantifizierungen vorgenommen werden, die wertvolle möglicherweise Erkenntnisse für Landschafts- und Regionalplanung und Ökologie liefern können.

Diese Möglichkeit, mittels des Hierarchiekonzepts in der OBTA / GEOBIA einen Raum auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen zu differenzieren, stellt allgemein einen systematischen Vorteil der semiautomatisierten im Vergleich zur händisch-visuellen Klassifikation dar. Das OBTA-basierte Konzept kann somit leichter auf einen anderen Raum mit ähnlicher Ausstattung und Landschaftsgeschichte übertragen werden. Auch die Durchführung dieser Klassifikation durch andere Nutzer*innen ist so leichter zu realisieren, als bei der händisch-visuellen, die durch dieselbe Expertenperson durchgeführt werden sollte, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

4.3 Anwendungsmöglichkeiten der hiesigen Ergebnisse in Landschaftplanung und Naturschutz

Die Ergebnisse der hiesigen Modellierung bieten verschiedene Möglichkeiten in der Praxis angewendet und weiterverarbeitet zu werden. Neben der didaktischen Anwendung (ausführliche Erläuterung in *Kapitel 5*, vgl. auch den Hinweis von RÖDER et al. 2005: 32) könnten auch Landschafts- und Regionalplanung und der Natur- und Landschaftsschutz von der hier erstellten räumlichen Grundlagen profitieren. Auch könnten weitere Forschungen, z.B. hinsichtlich eines möglichen Zusammenhangs zwischen Landnutzung und Landschaftsklassen basierend auf den hier vorgestellten Ergebnissen aufbauen.

Eine großflächige, hochauflösende Kartierung von Landformen und Landschaftseinheiten ist notwendig, um z.B. die Morphogenese einer Landschaft besser verstehen zu können (EISANK 2013: IV). Die Bestimmung des Leistungsvermögens einer Landschafts bzw. die Landschafts- oder Naturraumpotenziale stellen wichtige Grundlagen für die Landschaftsplanung dar (RÖDER et al. 2005: 32). Kartierungen von Landschaftseinheiten und Naturräumen unterstützen die Umsetzung des schutzbezogenen Ansatzes (STEINHARD et al. 2012: 200). Eine der Grundaufgaben der Landschaftsplanung ist die Regelung möglicher Eingriffe in den Naturhaushalt (ebd.: 267f.). LANG & BLASCHKE (2007: 270f.) schlagen auf Basis der Empfehlungen des Bundesamts für Naturschutz einen zehnschrittigen Ablauf für die Eingriffsregelung vor. Der erste Schritt lautet: „Abgrenzung (und Orientierung

innerhalb) des Untersuchungsraums“ (ebd.). Hierfür könnten die Ergebniskarten (*Abb. 32* bis *Abb. 34*) dieser Arbeit eine wertvolle Grundlage bieten.

Um Schutzgebiete ausweisen zu können, ist es nötig, die Landschaft kategorisieren zu können. Anschließend kann eine Bewertung hinsichtlich einer Schutzwürdigkeit vorgenommen werden. Die FFH-Richtlinie der Europäischen Union fordert die „Sicherung von positiven Erhaltungszuständen“ (LANG & BLASCHKE 2007: 277f.). Um hierfür Maßnahmen ergreifen zu können, bedarf es einer räumlichen Grundlage, beispielsweise in Form der hiesigen Landschaftseinheiten. In unserer pluralistischen Welt ist eine Bewertung der Landschaft hinsichtlich allgemein akzeptierter Wertmaßstäbe sinnvoll und notwendig. Dabei ist es von enormer Wichtigkeit, sämtliche Entscheidungsprozesse transparent und für Dritte nachvollziehbar zu machen (ebd.). Möglichst klare Klassifikationsregeln in einem GIS- bzw. OBTA-basierten Landschaftsmodell mit einer überschaubaren Anzahl an Parametern bieten hierfür ein großes Potenzial. Sie können räumliche Grundlagen für spätere politische Entscheidungen schaffen (SYRBE 1999).

Auch hinsichtlich des Landschaftsbilds sind Bewertungen auf Basis räumlicher Einheiten wichtig, z.B. um den Erholungswert einer Landschaftseinheit er- und vermitteln zu können. Dieser spielt z.B. im Tourismus und Regionalmarketing eine wichtige Rolle (RÖDER et al. 2005: 32). Die Dresdner Kollegen formulieren den Erholungswert auf Basis der Kriterien *Eigenart*, *Vielfalt* und *Natürlichkeit* (ebd.: 38). Die Eigenart der Landschaft setzt sich dabei aus der Verbindung von Ursprünglichkeit der „natürlichen sowie kulturhistorischen Erbes“ sowie aus Einzigartigkeit der landschaftlichen Ausstattung zusammen (ebd.). Landschaftliche Vielfalt definieren die Autoren die „Anzahl und Verschiedenheit an […] Einzelobjekten, Formen, Typen […] des Landschaftsbilds“ (ebd.). Für die Natürlichkeit legen Röder und Kollegen den Hemerobiegrad der Vegetation zu Grunde, der als flächendeckender Parameter zur Verfügung steht (ebd.: 39).

Der Wert einer Landschaft lässt sich auch hinsichtlich ihrer Seltenheit ausdrücken. Diese wie auch ihre potenzielle Gefährdung zu betrachten, stellt eine lohnenswerte Aufgabe für die Landschaftsplanung dar. Die in dieser Arbeit klassifizierten Landschaftseinheiten können der Regionalplanung ein „zusätzliches Entscheidungskriterium an die Hand […]geben“ (ebd.) um sie bei Entscheidungen, etwa bei der Einrichtung eines Landschaftsschutzgebietes, zu unterstützen.

Zusammengefasst bieten die hier vorgestellten Ergebniskarten mit den in unterschiedlichen Raumskalen klassifizierten Landschaftseinheiten das Potential als räumliche Grundlage für die Landschaftsplanung zu dienen. Auf dieser Basis ließen sich weitere Analysen durchführen, um der Komplexität einer Landschaft Rechnung zu tragen und wissenschaftlich fundiert politische Entscheidungen treffen zu können.

5 Didaktischer Teil: GIS, DGM und Landschaftsanalyse in der Schule

Die Geographie als Wissenschaft wie als Schul-und Studienfach lebt vom Arbeiten mit Karten (vgl. HÜTTERMANN 2012: 22). Als Raum-Modelle erlauben es diese, komplexe räumliche Zusammenhänge und Prozesse visuell darzustellen. Das können Lerninhalte selbst (*input*) aber auch Analyseergebnisse (*output*) der Lernenden sein.

Die Karten-Betrachter*innen werden in die Lage versetzt, selbst über die Reihenfolge der einzelnen Analyse- und Verstehensschritte zu entscheiden. So besteht für sie die Möglichkeit, die Karte individuell zu entschlüsseln und trotzdem zum gleichen Ergebnis zu gelangen. In welcher Abfolge Farbkodierung, Legende und zusätzliche Informationen analysiert und zu einem Gesamtkomplex der abgebildeten räumlichen Zusammenhänge mental aggregiert werden, ist individuell verschieden.

Karten erlauben es im Vergleich zu Texten, unterschiedliche Interpretations-Strategien erfolgreich anzuwenden. Vor allem leisten Karten hier einen wertvollen Beitrag in Lernsituationen, da sie im Gegensatz zu versprachlichten Informationen verschiedene (visuelle) Zugänge zulassen und dennoch eine große Informationsmenge kompakt anbieten können. Antworten auf wichtige fach- und raumspezifische Leitfragen (vgl. SCHLEICHER 2010: 18) zu einer Region lassen sich so anschaulich in einem einzigen Produkt geben.

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass analoge Karten als 2D-Medium immer die räumlichen Vorstellungen und (Vor-)Interpretationen der jeweiligen Produzent*in wiederspiegeln (HÜTTERMANN 2012: 28). Raum-Perspektive und Maßstab lassen sich nicht verändern. GIS-Anwendungen und digitale Geomedien mit einzeln zuschaltbaren, aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtbaren Rauminformationsebenen (Layern) bieten den Lernenden hier eine Fülle an weiteren (persönlichen) Zugangsmöglichkeiten an. Die Farben und Transparenz sowie die Zahl der Layer sind frei wählbar und kombinierbar – je nach Fragestellung und individueller Herangehensweise. Mit GIS lassen sich digitale Geodaten analysieren und so weiterverarbeiten, dass ein Mehrwert in Form neuer Rauminformationen entsteht. So können eigene Lernprodukte in Form von Ergebniskarten erstellt werden. Gleichzeitig stellen GIS-Anwendungen selbst als Lerninstrumente für raumbezogene Fragestellungen dar (FALK & NÖTHEN 2005: 18).

Der Einsatz digitaler Geomedien und GIS als Teil der schulischen Ausbildung hinsichtlich (digitaler) räumlicher Orientierung in Baden-Württemberg ist in den gymnasialen Bildungsplänen von 2004 und 2016 verankert. Digitale Geomedien sind hier im Sinne eines progressiven Spiralcurriculums in die Methodenstandards integriert. Im Bildungsplan von 2004 werden sie ab Klasse 8 gefordert (vgl. BP GEO BW 2004: 239, 241ff.). Der aktuelle Bildungsplan (2016) legt im Rahmen der prozessbezogenen Kompetenzen noch stärkeren

Wert auf Medienbildung (vgl. BP GEO BW 2016: 7, 13). Er verlangt hier bereits ab der Unterstufe einfache digitale Anwendungen von Geomedien (vgl. BP GEO BW 2016: 14f.), welche bis zur Kursstufe progressiv und spiralcurricular aufeinander aufbauen. Ein mögliches GIS-Curriculum an allgemeinbildenden Gymnasien könnte wie folgt aussehen (vgl. THIERER & ALLE 2017):

- ***Unterstufe*** – über (Web)GIS reden und einfache Anwendungen digitaler Geomedien nutzen.
- ***Mittelstufe*** – mit (Web)GIS arbeiten und räumliche Analysen mit digitalen Geomedien durchführen (vgl. z.B. ALLE 2012, ALLE 2018).
- ***Oberstufe*** – mit (Web)GIS eigene (mehrschrittige) Projekte durchführen und räumliche Fragestellungen beantworten.

Trotz zahlreicher Lehrerfortbildungen im vergangenen Jahrzehnt zum Thema *GIS in der Schule* hat sich das Medium leider noch nicht flächendeckend in den Schulen Baden-Württembergs etabliert. Das staatliche INSTITUT FÜR BILDUNGSANALYSEN BADEN-WÜRTTEMBERG (IBBW) stellt über den Landesbildungsserver kostenlos verschiedene Unterstützungsangebote zum Thema GIS hinsichtlich Software (QGIS) und frei verfügbaren digitalen Geodaten auf seiner Homepage zur Verfügung (vgl. IBBW 2021).

Für den nördlichen Teil Baden-Württembergs hat die an der Pädagogischen Hochschule Heidelberg angesiedelte GIS-Station bereits wertvolle Grundlagenarbeit bezüglich des schulischen GIS-Einsatzes geleistet und regionale Kooperationen aufgebaut (vgl. https://www.gis-station.rgeo.de/wirueberuns/partner/). Das Projekt wurde von der in der Region ansässigen Klaus Tschira Stiftung für digitale Geomedien gefördert und bietet z.B. Lehrerfortbildungen rund um den schulischen Einsatz von QGIS (https://www.gis-station.rgeo.de/bildungsangebote/lehrkraefte/individuelle_lehrerfortbildungen.php).

Auch an der Pädagogischen Hochschule Weingarten werden seit Jahren angehende Geographie-Lehrer*innen und Studierende der Umweltbildung mit QGIS ausgebildet.

Leider scheitert der schulische GIS-Einsatz oft auch an fehlendem ausgearbeitetem und einsatzfähigem Material. An diesem Punkt möchte diese Arbeit anknüpfen und GIS-basierte Lernmodule – „ready to use“ anbieten.

Im Folgenden geht es zunächst um den methodisch-technischen Aspekt der GIS und digitalen Geomedien im schulischen Kontext. Anschließend wird die inhaltliche Komponente, das Verständnis von Landschaften im Sinne des Aufbaus eines räumlichen Orientierungsrasters, beleuchtet.

Räumliche Orientierungs- und Ordnungssysteme wie Kima- und Vegetationszonen, aber auch Landschaftsklassen bzw. Naturräume ordnen den Raum in verteilt ablaufende Prozesse und Zusammenhänge (HEMMER 2012: 19). Dabei werden Landschaften in eine konstruierte naturräumliche Ordnung integriert. Diese fasst Ähnliches zusammen, betont Gegensätze der natürlichen Ausstattung und grenzt diese voneinander ab. Um Übersicht zu gewinnen und planen zu können, sind landschaftliche Grenzen, zumindest für unsere Denkstrukturen, zwingend notwendig. So erleichtern sie Zugänge zu einer komplexen Materie wie einer Landschaft. STEINER (2015: 24f.) betont in diesem Zusammenhang die konstruktivistischen Ansätze der Geographie als Mensch-Umwelt-Wissenschaft.

Räumliche Orientierungs- und Ordnungssysteme spielen in Schule und Hochschule eine wichtige Rolle für das Verständnis von Mensch-Umwelt-Systemen (KIRCHBERG 1977: 28, STEINER 2009: 129, STEINER 2015: 23f.). In diesem Zusammenhang bieten speziell DGM den Lernenden neue Chancen, Landschaften und landschaftliche Prozesse anhand charakteristischer Oberflächenformen anschaulich und zeitgemäß zu erfahren. Diese bieten die grundlegende technische Funktion einer farblich beliebig skalierbaren Darstellung der Geländehöhe an. Kombiniert mit einer daraus abgeleiteten Schummerungsdarstellung erlauben DGM quasi ein dreidimensionales Sehen im zweidimensionalen Raum. So können die Lernenden eine neue Perspektive der jeweiligen Landschaft erlangen.

Landschaften bzw. Naturräume spielen im BP GEO BW (2016) ebenso wie in den Standards der DGfG (2017) eine wichtige Rolle in der Analyse von Mensch-Umwelt-Systemen. Sie stellen die naturräumlichen Voraussetzungen dar, welche der Mensch in der betreffenden Region vorfindet und gegebenenfalls nutzt bzw. verändert. Räumliche Zusammenhänge einer Landschaft zu analysieren heißt, über deren Entstehung und Ausstattung Bescheid zu wissen sowie aktuelle und zukünftige Prozesse (er-)kennen zu können. Die Wichtigkeit landschaftlicher Strukturen wird im BP GEO BW (2016) deutlich. Dieser verankert das Thema sowohl in der Unterstufe als auch im Leistungsfach der Kursstufe (vgl. BP GEO BW 2016: 19, 34 – nähere Infos dazu im Kapitel 5.2.1).

Im folgenden Kapitel 5.1 wird auf die Bedeutung von DGM und Naturräumen bzw. Landschaftsklassen im schulischen Kontext eingegangen. Kapitel 5.2 stellt zwei Lernmodule vor, die DGM und weitere digitale Geodaten sowie webbasierte Angebote nutzen. Damit werden landschaftliche Strukturen und naturräumliche Ordnungen in Baden-Württemberg zu analysieren und verglichen. Sie orientieren sich an den Standards des Bildungsplans 2016 in Geographie für Gymnasien in Baden-Württemberg (BP GEO BW 2016) sowie denen der Deutschen Gesellschaft für Geographie für den Mittleren Schulabschluss (DGfG 2017). In Kapitel 5.3 werden die in Kapitel 5 erläuterten Vorschläge zusammengefasst und diskutiert.

5.1 DGM zur Unterstützung räumlicher Ordnungssysteme für Schüler*innen

GIS und DGM sind mittlerweile längst im gesellschaftlichen Mainstream und somit auch in der Lebenswelt der Schüler*innen angekommen (FALK & NÖTHEN 2005: 18). Im Folgenden soll dies durch einige Alltags-Beispiele verdeutlicht werden. Beim Wetterfernsehen etwa zeigen die meisten Wetterkarten Geländeschummerungen im Hintergrund; sie helfen uns, in kürzester Zeit, die relevanten Wetterinfos zu verorten. 3D-Darstellungen von Gebäuden und Gelände in Google Earth/ Maps (Streetview) oder anderen digitalen Kartendiensten vermitteln eine virtuelle Raum-Realität, die der Wirklichkeit immer näher kommt (vgl. HASSENPFLUG 2012: 252f., SCHULZE et al. 2012: 299). DGM sind auch bereits Thema in der aktuellen populärwissenschaftlichen Literatur: SEYFRIED und Kolleg*innen (2019) veröffentlichten jüngst ein Buch zum Thema „Baden-Württemberg im Digitalen Geländemodell". Hier werden allgemeinverständlich Zusammenhänge von Landformen und Landschaften innerhalb des Bundeslandes visualisiert und erläutert (SEYFRIED et al. 2019: 323). Nicht zuletzt sind es auch die für die Allgemeinheit erstellten, frei zugänglichen Web-(GIS-)Angebote, die es jederzeit ermöglichen, sich eine Region räumlich in dreidimensionaler Perspektive anzueignen. Die Online-Lern-Module[38] des Oberschwaben-Portals (OP) zur Landschaftsgeschichte Oberschwabens sind hierfür ein treffendes Beispiel.

Mit DGM wird im schulischen Kontext seit den 1990er-Jahren gearbeitet. SCHWAB (1998) entwickelte beispielsweise einen multiperspektivischen, fächerverbindenden Einsatz von DGM im Informatik-Unterricht. Dabei wurden in erster Linie die Datenstrukturen der DGM und die Algorithmen zur Bestimmung von Geländehöhe sowie direkte Ableitungen (Hangneigung und Exposition) untersucht (ebd.: 12f.). So wurden geographische, mathematische und informationstechnische Lerninhalte miteinander kombiniert.

In dieser Arbeit richtet sich der Blick stärker auf die praktische Anwendung von DGM für geographische Fragestellungen. DGM ermöglichen es Lernenden, sich klassische geographische Inhalte (Landformen, Landschaften / Naturräume, deren Entstehung sowie Wechselwirkungen zwischen diesen) mit modernen Methoden (DGM, WMS, Internet, Data-Viewer, Web-GIS) aus ihrem Alltag anzueignen. Dabei tun sich junge Menschen[39] grundsätzlich leichter mit dem Zugang zur digitalen Technik und schaffen es besser, digitale und realräumliche Aspekte zu verbinden. Die räumliche Distanz durch die Perspektive „von oben" oder „von schräg oben" verhilft den Lernenden dazu, Zusammenhänge zwi-

[38] http://www.oberschwaben-portal.de/elomm.html (Zugriff: 8.6.2021)

[39] Diese werden auch als *digital natives* (vgl. PERNSKY 2001) bezeichnet. Darunter versteht man Menschen, die mit digitalen Medien aufgewachsen sind und für die deren Gebrauch zum Alltag gehört. Bis heute ist eine genaue Abgrenzung dieser Bevölkerungsgruppe allerdings umstritten.

schen einzelnen Landformen zu erkennen und diese mental zu einer Landschaft zu vereinen. Auch die Möglichkeit, Geoobjekte wie Landformen aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten zu können, trägt dazu bei. Raumstrukturen können so besser erfasst und verstanden werden. Das kann dazu beitragen, ein räumliches Ordnungssystem individuell aufzubauen und zu festigen.

Im Kontext des Arbeitens mit DGM und daraus abgeleiteten Schummerungsdarstellungen werden die (jungen) Lernenden mit der Herausforderung der Datenbeschaffung, ihrer Herkunft und Qualität konfrontiert. In einer Zeit von *Fake News* und der schieren Allgegenwärtigkeit von unverständlichen Algorithmen, die unser Leben scheinbar bestimmen, wächst die Bedeutung eines kritischeren Umgangs mit digitalen Daten enorm. Häufig stellen Landschaftskarten eine (Vor-)Interpretation des abgebildeten Raums dar, die Landschaften bzw. Naturräume als Ergebnis einer quasi „Black Box"-Klassifikation zeigt. Darunter leiden Nachvollziehbarkeit und Verständnis auf Seiten der Betrachter*innen. Durch die Kenntnis der zugrundeliegenden Daten und ihrer Herkunft sowie durch die eigene Analyse der Oberflächenmorphologie soll dem ein wenig entgegengewirkt und Prozesse ein Stück weit objektiviert werden.

Durch die Angabe aller Primärdatenquellen und dem Software-Download samt Installationsanleitung für Lehrer*innen (vgl. AB 2), ist es möglich, dass die Kolleg*innen im Unterricht verschiedene Möglichkeiten der digitalen und kostenfreien Beschaffung von DGM-Daten und den Institutionen, welche diese bereitstellen, thematisieren. Das fördert einen verantwortungsvolleren und souveräneren Umgang mit digitalen Geodaten. Gleichzeitig trainieren diese auch den Umgang mit GIS und deren spezifischen Funktionen, ob in der Desktop-Version als eigenständige Software oder in Form von Web-GIS-Angeboten. Dabei stellt der parallele Erwerb von prozessbezogenen (Methodik) wie auch inhaltsbezogen Kompetenzen gleichberechtigte Lernziele dar, die sich gegenseitig ergänzen: Räumliche Ausstattung und Charakter einer Landschaft können mit DGM und GIS vielseitiger erfahren, verstanden und gelernt werden als allein mit einer Karte im Gelände. Im Gegenzug erarbeiten sich Lernende dabei spielerisch Kenntnisse und Fertigkeiten im Umgang mit GIS. Dieses dient beim gesamten Lernprozess als wichtiges Instrument zur Problemlösung und Entscheidungsfindung (vgl. SCHULZE et al. 2012: 306). Die Schüler*innen erstellen ein eigenes Produkt ihrer Analyseergebnisse in Form einer digitalen oder analogen Karte.

Als letzter Baustein eines Lernmoduls über Landschaften und räumliche Ordnungssysteme bietet sich der Blick vom analogen und / oder digitalen Medium in den Realraum an. Dies könnte im Rahmen einer Exkursion in die zuvor analysierte Landschaft erfolgen. Schüler*innen können so ihre zuvor gewonnenen Erkenntnisse „vor Ort" überprüfen. Die Mitnahme der erstellten analogen Karten und / oder des GIS auf mobilen Endgeräten (z.B. auf Tablets oder Mobiltelefonen) bietet die Möglichkeit, im Gelände den aktuellen Standpunkt in der jeweiligen Landschaft / Naturraum zu überprüfen und zu vergleichen. Damit

lassen sich die Kompetenzen *„Fähigkeit zur Einordnung geographischer Objekte und Sachverhalte in räumliche Ordnungssysteme“* und *„Fähigkeit zur Orientierung im Realraum“* (vgl. HEMMER 2012: 13) kombinieren.

5.2 DGM-basierte Lernmodule zur Landschaftsklassifikation

Im Folgenden werden zwei selbstentwickelte GIS-basierte Lernmodule zur Landschaftsgeschichte bzw. zur Analyse landschaftlicher Strukturen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen vorgestellt. Sie richten sich an Schüler*innen des Gymnasiums[40]. DGM spielen hier bei allen Aufgaben und Analysen eine wichtige Rolle. Im Zentrum der Lernmodule steht das ***Baden-Württemberg-GIS (BaWü-GIS)*** zur Identifikation von landschaftlichen Strukturen (Landformen) sowie von Landschaften bzw. Naturräumen. Das BaWü-GIS besteht aus einer Zusammenstellung von relevanten Geodaten in einem einheitlichen räumlichen Informationssystem. In zwei Teilräumen Baden-Württembergs (Alpenvorland und Schichtstufenland) werden Detailanalysen durchgeführt. Dies erfolgt neben dem BaWü-GIS mit Web-basierten Modulen des ***Oberschwaben-Portals***[41] und der ***LUBW***[42]. Das BaWü-GIS ist so konzipiert, dass im gesamten Bundesland landschaftliche und geomorphologische Untersuchungen möglich sind. Sämtliche Arbeitsblätter hierzu sind im Anhang dieser Arbeit zu finden.

Im Folgenden werden die beiden Lernmodule kurz skizziert.

(A) In der **Unterstufe** (Sek. I) wird die landschaftliche Ausstattung der ***Landschaften Baden-Württembergs*** („Naturräumliche Gliederung“, BP Geo BW 2016: 19) mit dem BaWü-GIS untersucht. Die Schüler*innen arbeiten mit unterschiedlichen digitalen Geodaten und erstellen hier erste eigene Karten mit GIS.

(B) Im **Leistungsfach** Geographie (Sek. II) erarbeiten sich die Schüler*innen „charakteristische Oberflächenformen von zwei ausgewählten Landschaften ([…] Glazial- und Schichtstufenlandschaft) als Ergebnis endogener und/oder exogener Prozesse […]“ (BP Geo BW 2016: 34) mit dem BaWü-GIS.

Unterrichtseinheit (B) eignet sich auch als Übung für eine Geomorphologie-Veranstaltung für Lehramtsstudierende an einer (pädagogischen) Hochschule.

Im Teilmodul ***Schichtstufenlandschaft*** erstellen sie analog und GIS-basiert Querprofile der Schichtstufenlandschaft. Dabei wiederholen sie die Methode *„Erstellen einer kommentier-*

[40] Die Module eigenen sich auch für Lehramtsstudierende der Geographie oder Lehrer*innen im Rahmen von Lehrveranstaltungen bzw. Fortbildungen oder als Materialgrundlage für den (späteren) schulischen Einsatz

[41] www.oberschwaben-portal.de (Zugriff: 24.7.2021)

[42] https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/ (Zugriff: 24.7.2021)

ten Profilskizze", welche in den vergangenen Abiturjahrgängen in Baden-Württemberg verstärkt eingesetzt wurde. Beim Arbeiten mit dem BaWü-GIS beschäftigen sie sich mit dem Zusammenhang zwischen Längen- und Höhenmaßstab (bzw. der Überhöhung). Sie erfahren so die Vorteile der GIS in Form der schnelleren und präziseren Profilproduktion und -Manipulation.

Das Teilmodul ***Alpenvorland*** ermöglicht es den Lernenden ihren Blick hin zur Analyse einer Glaziallandschaft und ihrer Bestandteile zu weiten. GIS sind hier nicht nur ein Informationsportal für unterschiedliche digitale Geodaten (Oberflächengestalt, geologische Einheiten zur Identifikation von Landformen und Landschaften). Sie dienen auch zur DGM-basierten, automatischen Erstellung einer Neigungskarte, die ebenfalls für die landschaftlichen Analysen eingesetzt wird.

Zur Bearbeitung beider Lernmodule kommen Desktop-GIS wie webbasierte GIS-Anwendungen zum Einsatz. Die Lernenden arbeiten sowohl mit digitalen Medien als auch mit analogen Arbeitsmaterialien wie Arbeitsblättern und Karten. Die Kombination aus mehreren unterschiedlichen medialen Kanälen kann die individuellen Zugänge der Lernenden auf Landschaften und landschaftliche Strukturen erleichtern. Die hier vorgestellten Lernmodule greifen den Ansatz des fachwissenschaftlichen Teils auf, ein Landschaftsmodell mit einer überschaubaren Anzahl von digitalen Datensätzen zu verwenden (vgl. Kapitel 3.1). Das dient der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte und Ergebnisse. Es werden DGM, geologische und Geo-Basisdaten (Städte, Flüsse) sowie zum Vergleich die Naturraumdaten eingesetzt. Dabei kommt dem *Prozess* des digitalen, multiperspektivischen Arbeiten eine wichtige Rolle zu. Dieses wird als ebenso wichtig angesehen wie die *Ergebnisse* der Klassifikation von (Teil-)Landschaften.

Obwohl sich die Lernmodule räumlich auf den deutschen Südwesten beziehen, ist die Methodik grundsätzlich auf andere Räume Mitteleuropas übertragbar. Zusätzlich enthalten die Module parktische Hinweise (AB 1 im Anhang) für Lehrende zur Beschaffung von freien Geodaten und GIS sowie die Arbeit mit diesem (vgl. dazu ALLE 2018: 24, 29f.). Dies soll zu einem einfachen und ressourcenschonenden Zugang zur Nutzung von GIS in der Lehre beitragen.

5.2.1 Das BaWü-GIS für Detailanalysen zu Landschaftsgeschichte und Naturräumlicher Ordnung

Hier werden zunächst das BaWü-GIS und die verwendeten Geodaten sowie Web-GIS-Anwendungen vorgestellt und anschließend die Lernmodule erläutert. Das BaWü-GIS bedient Standards nach dem BP Geo BW 2016 sowohl für die gymnasiale Ober- wie für die Unterstufe. Landschaftliche Strukturen, Landschaftsgenese und die naturräumliche Ordnung können so digital erfahren und gelernt werden. Dabei bietet sich den Lernenden die

Möglichkeit, ihren Blick und das Verständnis der Lernenden für landschaftsbildende Prozesse zu schärfen.

Software und Daten

In dieser Arbeit wurde die kostenfreie und open-source Software ***QGIS Essen 2.14*** eingesetzt. Dies trägt der Realität mit oft überschaubaren Schul- bzw. Geographie-Etats Rechnung und möchte die Anwendbarkeit von GIS in der Schule erleichtern. Diese Version von QGIS wurde lange Jahre an der PH Weingarten, der Universität Tübingen und anderen Hochschulen in der Lehre sowie in der regionalen Verwaltung[43] erfolgreich eingesetzt und hat sich als sehr zuverlässig erwiesen.

Die Software liegt als portable Version[44] vor. Das bedeutet, dass sie von einem USB-Stick aus gestartet und betrieben werden kann. Daraus ergeben sich einige Vorteile, vor allem für den schulischen Einsatz. Häufig stehen Lehrende an öffentlichen Schulen vor der Situation, dass in Schulnetzwerken keine externen Programme installiert werden dürfen bzw. hierfür hohe Hürden bestehen. Weiter besteht durch die portable Version der Vorteil, dass Schüler*innen die Software auch problemlos zuhause einsetzen und die Projekte so zeitunabhängiger bearbeitet werden können (vgl. ALLE 2018).

Das BaWü-GIS besteht aus folgenden Geo-(Basis-)Daten:

- **DGM 90 (**SRTM 2021), http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/ (Zugriff: 24.7.2021)
- **DGM 25** (Copernicus 2013), https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1?tab=download&selected:list=dem-v1-1-e40n20 (Zugriff: 24.7.2021)
  (Copernicus data and information policy Regulation (EU) No 1159/2013 of 12 July 2013. With funding by the European Union).
- **Schummerungs-Darstellung** (abgeleitet aus dem DGM 90 bzw. DGM 25)
- **Geologische Haupteinheiten (**LGRB BW 2021), http://maps.lgrb-bw.de/ (Zugriff: 24.7.2021)
- **Naturräume / Großlandschaften**, auf Basis von MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962, 3. & 4. Ordnung (LUBW 2021),
  https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/api/navigatorurl/show?globalId=naturLand.Naturr%C3%A4ume.nais%3A%24SYSTEM%7BCADENZAWEB_GEODOWNLOAD%7Did%3D7 (Zugriff: 24.7.2021)
  (Grundlage: Daten aus dem Umweltinformationssystem (UIS) der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Daten verändert).

---

[43] Schweizer Kantone verwenden seit längerem in ihrer Regionalverwaltung QGIS. Z.B. https://www.qgis.ch/de/ressourcen/anwendertreffen/2018/qgis-im-thurgau-rueckblick-auf-eine-erfolgsgeschichte/view (Zugriff: 24.5.2020)

[44] Download unter: http://pkg.sourcepole.ch/download/QGIS-Portable-CH.zip (Zugriff: 24.5.2020)

- **Flusssysteme**, > 40 km Länge (LUBW 2021), http://bit.ly/2Zwy9iG (Zugriff: 24.7.2021) (Grundlage: Daten aus dem Umweltinformationssystem (UIS) der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Daten verändert).
- **Städte**, > 20.000 Einwohner (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2021), https://daten.gdz.bkg.bund.de/produkte/vg/vg250_ebenen_0101/aktuell/vg250_01-01.gk3.shape.ebenen.zip (Zugriff: 24.7.2021) (© GeoBasis-DE / BKG 2019, Daten verändert).

In *Abb. 59* wird ein Screenshot des BaWü-GIS in der open-source Software QGIS gezeigt.

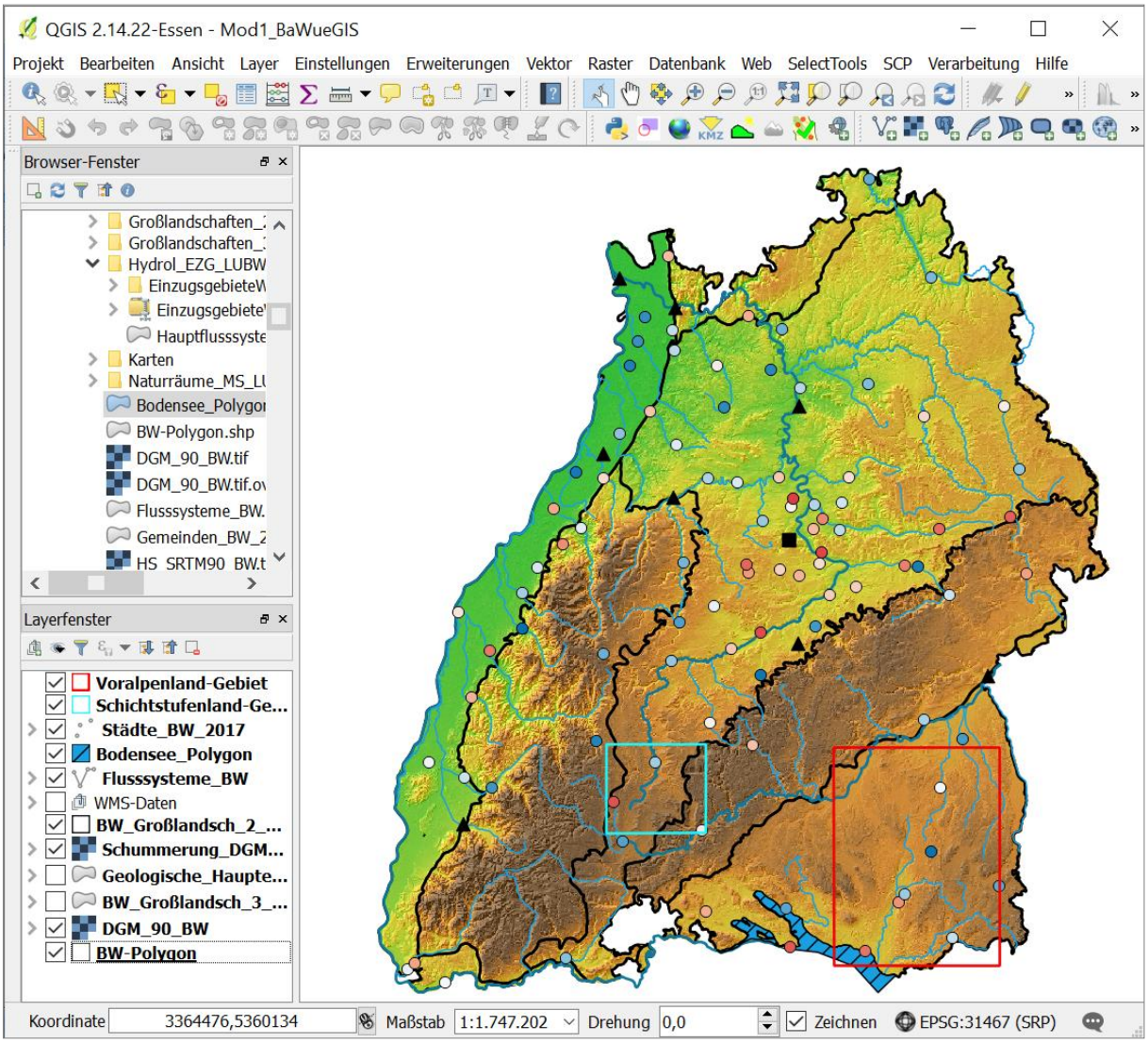


Abb. 59: **Überblick über das BaWü-GIS in QGIS.**
In dieser Ansicht sind einige der oben genannten Geodaten geöffnet. Im Hintergrund wird das DGM 90 und die zugehörige Geländeschummerung abgebildet. Darüber liegen die Großlandschaften Baden-Württembergs, das Flusssystem, wichtige Städte sowie die beiden Untersuchungsgebiete für die Kursstufe (*türkis*: Schichtstufenlandschaft in der Baar und *rot*: Glaziallandschaft im Alpenvorland Oberschwabens).

5.2.2 Lernmodule mit dem BaWü-GIS

Grundsätzlich folgen beide Lernmodule dem Ablaufschema in *Abb. 60*. Dieses umfasst fünf Hauptphasen und ist an die Vorschläge von FALK & NÖTHEN (2005: 42) angelehnt. Je nach Lernvoraussetzungen und Lernsituation ergeben sich verschiedene mediale Zugänge. Dabei können digitale oder analoge Medien eine größere oder geringere Rolle spielen. So können GIS als Informationsmedium das analoge Arbeiten und Sichern mittels einer Karte unterstützen. Sie können aber auch als Analyse- und Sicherungsmedium und -Werkzeug genutzt werden (vgl. STEINBACH 2019: 50). In Klasse 5 ist der analoge Anteil größer als in der Kursstufe, wo der digitale Anteil überwiegt.

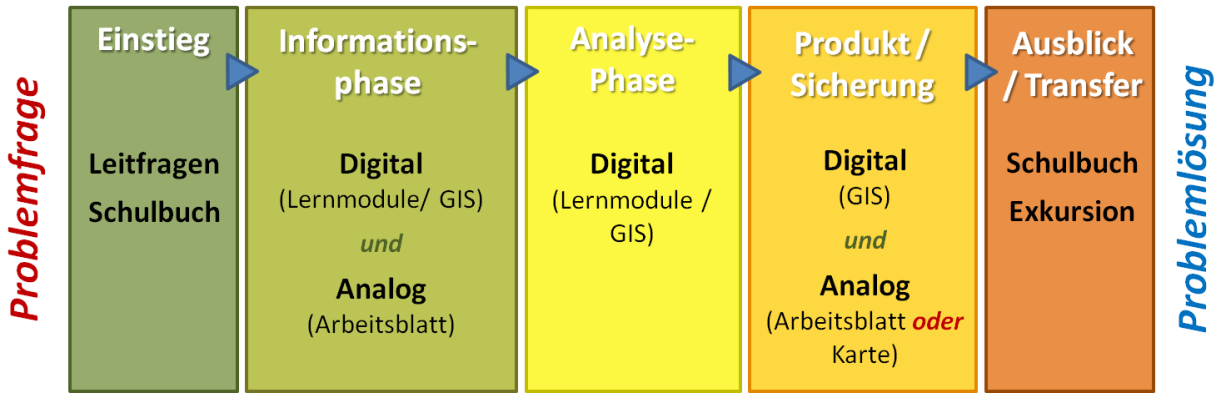


Abb. 60: **Ablaufschema der Lernmodule A und B.**
Angelehnt an die Vorschläge von FALK & NÖTHEN (2005: 42).

Modul A: Kursstufe (Leistungsfach) –
Detailanalysen im Alpenvorland und Schichtstufenland

Für die ***Kursstufe*** eignet sich der ***5-stündige Kurs (Leistungsfach)***.

Bildungsplanbezüge:

Der BP Geo BW (2016: 34) beinhaltet den Standard *3.5.2.1 Formen und Prozesse der Reliefsphäre*:

Die Schüler*innen können

(5) charakteristische Oberflächenformen von zwei ausgewählten Landschaften ([…] Glazial-, […], Schichtstufenlandschaft […]) als Ergebnis endogener und exogener Prozesse erklären. […]
- Glaziallandschaft (Kaltzeit, Warmzeit, Permafrost, Periglazial, Postglazial, Altmoräne, Jungmoräne […], Trogtal, […], glaziale Serie, Grundmoräne […], Endmoräne, Zungenbecken, Sander, Urstromtal, Drumlin, […], Findling, Toteisloch, […] Solifluktion)

- Schichtstufenlandschaft (Deckgebirge, […], Schichtlagerung, Stufenbildner, Sockelbildner, […], rückschreitende Erosion, Trauf, […], Zeugenberg, Reliefumkehr)

[…]

Lernziele:

S*innen …

… wiederholen und vertiefen ihre Kenntnisse über charakteristische Landformen und deren Entstehung der Schichtstufenlandschaft oder des Alpenvorlands bzw. …

… erarbeiten sich neue Kenntnisse zu einem der beiden oben genannten Räume.

… führen eine einfache Landschaftsklassifikation von Teilräumen der jeweiligen Beispiellandschaften (Schichtstufenlandschaft und Glaziallandschaft) durch.

… erstellen ein digitales Geländeprofil mit GIS.

… übertragen Kenntnisse und Methoden der analytischen Geometrie zur Berechnung der Neigung einer Fläche auf die Landschaft.

… Sie lassen eine digitale Hangneigungskarte von Baden-Württemberg in GIS berechnen und nutzen diese zur Interpretation von Landformen und Landschaften.

… arbeiten mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen der DGM (DGM 90 und DGM 25, als Differenzierung auch DGM 5) und lernen so, dass unterschiedliche räumliche Fragestellungen (Landform oder Landschaft?) unterschiedliche räumliche Skalenniveaus erfordern.

… trainieren ihre Medienkompetenz im Umgang mit digitalen Geodaten und GIS.

… lernen dabei den Umgang mit verschiedenen digitalen geographischen Informationsquellen (Desktop-GIS, web-GIS, webbasierte Geo-Lernmodule).

… lernen die Stärken Geographischer Informationssysteme anhand der digitalen Erstellung eines Höhenprofils kennen und einschätzen.

Grober Ablauf der Unterrichtssequenz:

Das Lernmodul ist für zwei bis drei Doppelstunden konzipiert.

Als Einstieg in die komplette Bildungsplan-Einheit können zum Beispiel Fotos von charakteristischen Landformen beider Landschaften (Schichtstufen, Drumlins, Endmoränen, Becken aber auch Dolinen, Trockentäler, Zeugenberge, Findlinge etc.) dienen. Über das Erkennen der Landformen, gemeinsamen Mutmaßungen über deren Entstehung und ein erstes Zuordnen zu vorgegebenen Landschaften kann die Lerngruppe ins Gespräch kommen. Dabei können die Schüler*innen auf ihre Erfahrungen aus der Unter- und Mittelstufe zurückgreifen. Es werden aber Punkte offen bleiben, die als Leitfragen für die Unterrichtseinheit dienen können. Die Problemfrage lautet folglich:

Wie kann die Entstehung von charakteristischen Landformen einer [Glazial- oder Schichtstufenlandschaft] möglichst objektiv erklärt werden?

So kann von Beginn an mit dem BaWü-GIS in Kombination mit dem jeweiligen Schulbuch gearbeitet werden. Falls die Lernmodule als Ergänzung zur besagten Bildungsplaneinheit dienen sollen, können sie nach Belieben als Übungseinheit angeschlossen werden.

Es bietet sich an, mit der ***Schichtstufenlandschaft*** zu beginnen, da hier GIS-Kompetenzen aufgebaut werden, welche die Schüler*innen anschließend zur Bearbeitung des zweiten Moduls (Alpenvorland) benötigen. Das Lernmodul zur Schichtstufenlandschaft dient zur Vertiefung der Unterrichtseinheit „*Charakteristische Oberflächenformen als Ergebnis endogener und exogener Prozesse*". Im Fokus steht hier das GIS-gestützte Anfertigen einer kommentierten Profilskizze der Schichtstufen zwischen Villingen-Schwenningen und Tuttlingen. Das BaWü-GIS dient hier als Informationsquelle sowie als Analyse- und Produktionswerkzeug. Dabei kommen digitale Geodaten (DGM 90, Geländeschummerung, Geologische Haupteinheiten, Städte, Flüsse, Naturräume) zum Einsatz.

Die Schüler*innen lernen dabei die in der Regel für sie neue Software QGIS kennen. Alle Hinweise zur Arbeit mit dem BaWü-GIS und wiederholende Infos zur Schichtstufenlandschaft sind auf AB 3 zu finden. Die Lernenden orientieren sich zunächst digital in der Region. Dann erstellen sie mit dem BaWü-GIS ein Höhenprofil basierend auf dem DGM 90, welches sie anschließend grob auf AB 3 übertragen. Dabei wird anhand der einfachen Bedienbarkeit und der schnellen Ergebnisse der Mehrwert von GIS deutlich. Sofern die Schüler*innen bereits während des Schuljahrs eine analoge, kartenbasierte Profilskizze angefertigt haben, werden sie die GIS-Vorteile hinsichtlich Geschwindigkeit und Präzision noch besser einschätzen können. Mit dem BaWü-GIS als Informationsquelle können sie ihre Profilskizze weiter auswerten und ergänzend beschriften.

In einem anschließenden Schritt folgt die Bearbeitung des Teilmoduls ***Alpenvorland*** (AB 4-5), welches die obige Unterrichtseinheit methodisch fortführt. Sie steigt umfangreicher in die Thematik *Arbeiten mit digitaler Geoinformation* ein, da hier mit verschiedenen Quellen von Geodaten (GIS und webbasierte Module) gearbeitet wird. Dieses Teilmodul beinhaltet zwei doppelseitige Arbeitsblätter (AB 4/1 und AB 4/2) sowie ein Zusatzblatt zur Differenzierung (AB 5). Geplant werden ca. zwei Doppelstunden.

Arbeitsblatt 4/1 (*Alpenvorland – Glaziale Landformen prägen Landschaften*) bietet Grundinformation über die Elemente und das Entstehen einer Glaziallandschaft, die Arbeitsaufträge zur Landschaftsklassifikation sowie die Ergebnissicherung (1) in Form einer Tabelle an. Das Grundwissen wird durch die Bearbeitung zweier webbasierter Lernmodule des Oberschwaben-Portals ergänzt und vertieft. Alternativ kann auch auf die Angebote im jeweiligen Schulbuch zurückgegriffen werden.

Das Ziel der darauffolgenden Doppelstunde ist, dass die Schüler*innen signifikante Landformen und wichtige Teil-Landschaften im Alpenvorland digital erfassen und sie anschließend auf die analoge Karte (AB 4/2 – Rückseite) übertragen. Hierzu arbeiten die Lernenden mit dem BaWü-GIS (vgl. AB 4/1 und 4/2 – Vorderseite). Neben den bisher verwendeten Geodaten des BaWü-GIS erzeugen die Schüler*innen nun einen neuen Datensatz aus dem DGM 90 in Form der Hangneigung (Slope). Dazu führt sie das *EXTRABLATT* zu AB 4 (Vorderseite) zunächst in die Bedeutung und Hintergründe der Neigungsberechnung ein. Die Lernenden nutzen Methoden der analytischen Geometrie. Eventuell bietet sich hier die Zusammenarbeit mit dem Fach Mathematik an. Der zweite Teil des *EXTRABLATTs* enthält eine detaillierte Anleitung, welche durch den Prozess der Neigungsberechnung mit QGIS führt.

In diesem Teilmodul können unterschiedliche räumliche Maßstäbe eingesetzt werden. Das BaWü-GIS beinhaltet DGM 90- sowie DGM 25-Daten[45] samt Geländeschummerung. Zusätzlich können die Schüler*innen in unklaren Fällen über den Daten- und Kartendienst der LUBW Geländevergleiche auf Basis einer DGM 5-Geländeschummerung durchführen (vgl. AB 5). Bei diesem weiteren Differenzierungsangebot erfahren die Lernenden, dass es unterschiedliche räumliche Repräsentationen desselben geographischen Sachverhalts (Relief, Geländeschummerung, Hangneigung) gibt. Daraus können sie ableiten, dass, ähnlich wie bei unterschiedlichen Kartenmaßstäben, die geographische Fragestellung (z.B. Geht es um Land*formen* oder Land*schaften*?) die räumliche Skala / Auflösung der Geodaten (mit-)bestimmt.

Je nach Schulort bietet sich die Möglichkeit, an die Unterrichtseinheit eine Exkursion zu einer der untersuchten Teillandschaften anzuschließen. Dabei können aufgestellte Thesen verifiziert, unklare oder strittige Klassifikationen vor Ort überprüft und die Landschaft aus einer weiteren, der realräumlichen Perspektive erfahren werden. So können die Schüler*innen ihr räumliches Orientierungsraster im Gelände festigen und weiter ausdifferenzieren. Die Exkursion bleibt aber fakultativ für die Unterrichtseinheit.

Modul B: Unterstufe (Kl. 5) – Naturräumliche Ordnung Baden-Württembergs mit DGM lernen

In der ***Unterstufe (Kl. 5)*** dient das BaWü-GIS zur vertiefenden Beschäftigung mit den Großlandschaften Baden-Württembergs nach MEYNEN & SCHMITTHÜSEN (1953-1962). Diese deutschlandweite Gliederung stellt seit über sechs Jahrzehnten eine häufig verwendete Einteilung in Naturräume dar (vgl. LANDSCHAFTSPARK BODENSEE-OBERSCHWABEN 2003 so-

[45] Das DGM 25 dient zur Differenzierung. Alle Operationen können sowohl hiermit als auch mit dem den Schüler*innen bereits bekannten DGM 90 durchgeführt werden.

wie FLATH & RUDYK 2016: 42ff.). Die Schüler*innen nutzen das BaWü-GIS zur räumlichen Informationsgewinnung und erstellen eigene Karten mit QGIS.

Lernende wie Lehrende erhalten mit dem BaWü-GIS die Möglichkeit, die Großlandschaften des deutschen Südwestens digital aus einer erweiterten Raumperspektive zu erfahren. Dabei untersuchen sie deren landschaftliche Ausstattung und reflektieren selbst die Landschaftsgrenzen. Die Morphologie spielt für die Wahrnehmung einer Landschaft und ihrer Strukturen eine Schlüsselrolle (SEYFRIED et al. 2019: 15). DGM können in diesem Zusammenhang einen enormen Beitrag für das Verständnis der landschaftlichen Charakteristik leisten (ebd.).

Ein Blick in aktuelle Geographie-Schulbücher der Klassenstufe 5/6 für Baden-Württemberg[46] zeigt, dass das Thema in der Regel über Fotografien der besagten Großlandschaften eröffnet wird. Diese sollen die Schüler*innen in Kombination anhand kurzer Landschaftsbeschreibungen, Zusatzinformationen wie Klimadaten o.Ä. sowie einer Karte der Landschaften nach MEYNEN & SCHMITHÜSEN zuordnen. Es scheint fraglich, ob der Charakter einer Landschaft allein mittels eines Fotos und kurzer Beschreibungen bereits einzufangen und darzustellen ist. An diesem Punkt möchte dieses Lernmodul ansetzen und eine digitale Alternative bieten.

Bildungsplanbezüge:

Der Bildungsplan 2016 sieht in Kl. 5/6 den Standard *3.1.5.1 Analyse ausgewählter Räume in Deutschland und Europa* vor (BP GEO BW 2016: 19):

Die Schüler*innen können

(1) „die naturräumliche Gliederung Baden-Württembergs […] beschreiben ([…] Tiefland, Mittelgebirge, Alpenvorland, […] Fluss, See, […])".

Lernziele:

S*innen …

… lernen die Fachbegriffe Geographisches Informationssystem (GIS), Digitales Geländemodell (DGM) und (digitale) Geodaten kennen und ihre Bedeutung verstehen.

… nutzen GIS-Funktionen (Zoomen / Verkleinern, Nutzen des Info-Buttons, Verändern der Layerreihenfolge und -Transparenz, etc.) zur räumlichen Analyse.

… lernen die naturräumliche Gliederung Baden-Württembergs kennen und deren landschaftliche Ausstattung erklären.

… trainieren ihre räumliche Orientierungskompetenz und ihre Landschaftskenntnisse Baden-Württembergs.

[46] Untersucht wurden Diercke, Seydlitz, Terra und Klett/Unsere Erde.

… erstellen eigene GIS-Karten zur landschaftlichen Ausstattung Baden-Württembergs.

Grober Ablauf der Unterrichtssequenz:

Das Lernmodul umfasst ca. 2-3 Unterrichtsstunden.

Ein klassischer Einstieg in die Thematik mittels Fotografien und Kurzbeschreibungen der Landschaften z.B. über Zuordnungsaufgaben auf Basis des Vorwissens bietet sich auch hier an. Die sich hieraus ergebenden Leitfragen können mit dem hier vorgestellten, GIS-gestützten Lernmodul weiter bearbeitet werden. Die zentrale Problemstellung lautet:

Wie lässt sich die Landschaft Baden-Württembergs sinnvoll gliedern?

Das BaWü-GIS berücksichtigt morphologische, geologische, hydrologische Komponenten sowie die Siedlungsverteilung der Landschaften. Es stellt eine inhaltliche wie methodische Vertiefung dar, die es ermöglicht, die Charakteristik und Entstehung der Landschaften Baden-Württembergs nachhaltiger zu erfahren und zu lernen. Die Schulbücher dienen weiterhin als zusätzlicher Informationsspeicher für die Lernenden.

Arbeitsblatt (6/1 – 3S.) liefert zunächst eine kurze allgemeine Übersicht über Geodaten, DGM und GIS. Anschließend lernen die Schüler*innen die Software QGIS spielerisch kennen. Eine detaillierte Anleitung führt sie in den Umgang mit den Geodaten und den Funktionen von QGIS ein. In einer Topographie-Übung trainieren sie den Umgang mit beidem. Die Aufgaben sind so gestaltet, dass die Lernenden selbstständig am PC arbeiten können und die*der Lehrer*in nur bei inhaltlichen oder technischen Einzelfragen eingreifen muss.

Der zweite Teil (AB 6/2 – 2S.) beschäftigt sich mit der Untersuchung der landschaftlichen Ausstattung der Großlandschaften Baden-Württembergs. Drei Leitfragen führen die Schüler*innen durch die Unterrichtssequenz. Zunächst vergleichen sie dazu die Grenzen der Großlandschaften mit den vorhandenen Geodaten des BaWü-GIS. Durch An- und Ausschalten, Zoomen und Verkleinern, Veränderungen der Layerreihenfolge und -Transparenz sowie das Nutzen des Info-Buttons entwickeln die Lernenden schrittweise ein differenziertes Bild der einzelnen Großlandschaften.

Dieses hilft ihnen, die Großlandschaften in einer Tabelle zu charakterisieren. Die Ergebnissicherung bietet im Rahmen der Binnendifferenzierung zwei Niveaustufen an:

- Eine **anspruchsvollere** Tabelle (*a*) verlangt zu jeder Großlandschaft die landschaftliche Ausstattung und die dazu verwendeten Geodaten. Ein Beispiel gibt die Struktur vor. Dieses Arbeitsblatt eignet sich für Schüler*innen, die mit QGIS gut zurechtkommen.
- Tabelle (*b*) berücksichtigt das **Mindest**-Niveau. Sie basiert auf dem gleichen Konzept, sie gibt den Schüler*innen jedoch mehr Lösungsteile als Lückentext vor, der ergänzt

werden muss. Der Fokus liegt hier auf der landschaftlichen Ausstattung, die Detail-Arbeit mit QGIS spielt eine geringere Rolle. Dieses Arbeitsblatt eignet sich für Lernende, die sich mit QGIS und allgemein der Arbeit am PC etwas schwerer tun.

Zum Ende der Unterrichtssequenz erstellen die Schüler*innen erste einfache Kartenansichten von aussagekräftigen Layerkombinationen als Screenshots. Dabei wird die landschaftliche Ausstattung der einzelnen Großlandschaften deutlich. Die Karten lassen sich farbig ausdrucken und die digitalen Informationen so, falls gewünscht, wieder analogisieren (vgl. STEINBACH 2019: 50).

Auch bei dieser Unterrichtssequenz besteht im Anschluss die Möglichkeit, erworbene räumliche Kompetenzen vor Ort auf einer Exkursion zu überprüfen. In Klassenstufe 5 bieten sich zudem Möglichkeiten dies mit weiteren Bildungsplanthemen[47] wie der Schwäbischen Alb oder dem Schwarzwald, aber auch der Betriebsbesichtigung in Schulortnähe zu kombinieren. Interessant sind dann besonders die Grenz- bzw. Übergangsbereiche der Großlandschaften. Sie machen deutlich, dass in der Natur scharfe Grenzen nur selten bestehen.

5.3 Fazit

Geographische Informationssysteme und andere digitale Geomedien bieten mehrperspektivischen Rauminformationen individuelle Verstehens- und Lernzugänge zu komplexen geographischen Inhalten. Sie zielen auf die Ausprägung und Festigung eines räumlichen Orientierungsrasters bei Schüler*innen ab. GIS und DGM im Speziellen existieren als digitale Geomedien bereits seit längerem in deren Lebenswelt.

Als Teil einer kritischen und innovativen Medienbildung, mit der Aufgabe, junge Menschen zu souveränen, mündigen Bürgern zu erziehen, spielen digitale Geomedien in schulischen Curricula eine wichtige Rolle.

GIS dienen nicht nur als vielfältiges Rauminformationssystem, sie dienen auch als Analyse- und Produktionswerkzeug um räumliche Zusammenhänge sichtbar und verständlich zu machen. Die Beschäftigung der Schüler*innen mit Herkunft und Weiterverarbeitung der verwendeten Geodaten trägt zu einem kritischen Umgang mit digitalen Daten bei.

Die beiden vorgestellten GIS-basierten Lernmodule greifen die oben genannten Gedanken auf. Sie basieren auf Prozeduren, die im fachwissenschaftlichen Teil dieser Arbeit entwickelt wurden und sollen diese auf schulische Lehr- und Lernkontexte übertragen. Ziel ist es, Schüler*innen mit digitalen Methoden die geographischen Inhalte „Landformen“,

[47] Grundlage ist hier der BP BW 2016.

„Landschaften“ und „Landschaftsgeschichte“ für ein besseres Verständnis von Mensch-Umwelt-Systemen zu vermitteln. Prozessbezogene wie inhaltsbezoge Kompetenzen ergänzen sich hierbei als gleichberechtigte Kompartimente. Die Lernmodule folgen dem bewährten Schema für GIS-Projektarbeit: *Information – Analyse – Produkt* und decken dabei verschiedene kognitive Stufen ab (vgl. FALK & NÖTHEN 2005: 42).

Obwohl die vorgestellten Lernmodule für den schulischen Einsatz konzipiert sind, eignen sich diese und das BaWü-GIS im Besonderen auch z.B. für Studierende der Geographie und verwandter Disziplinen. In diesem Fall sollten aber die Fragestellungen auf akademisch relevante Bedürfnisse und Inhalte angepasst bzw. erweitert werden.

Neben den Lernenden haben die hier vorgestellten GIS-Module auch die Lehrenden im Blick. Mit ihnen soll ein kleiner Beitrag zu einem erleichterten und häufigeren GIS-Einsatz in Schulen geleistet werden. Um finanzielle Hürden abzubauen bestehen die Lernmodule aus frei verfügbaren, kostenlosen Geodaten und arbeiten mit einer ebenso kostenfreien open-source Software. Die Möglichkeit, mit einer portablen Software-Version zu arbeiten, sorgt für einen quasi-autarken Einsatz, da so ohne Installation auf Schul- oder Privatgeräten gearbeitet werden kann. Technisch weniger erfahrenen Kolleg*innen werden durch detaillierte Download-, Installations- und Arbeitsanleitungen unterstützt.

Als Teil einer Arbeit über die digitale Analyse von Landschaften möchte das Kapitel 5 dazu beitragen, diese wichtige Thematik im schulischen Kontext stärker zu etablieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und beantwortet die in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen. Abschließend folgt ein Ausblick mit Desideraten für zukünftige Untersuchungen im Alpenvorland Oberschwabens hinsichtlich dieser Thematik.

6.1 Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfragen

Der Hauptfokus dieser Arbeit, für das Alpenvorland Oberschwabens mittels eines semiautomatisierten Landschaftsmodells in aussagekräftige Landschaftseinheiten zu aggregieren wurde erfolgreich realisiert.

Die Entscheidung, dabei nach dem *Bottom-up*-Verfahren zu verfahren und auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen (OBTA-Ebenen 1-3) zu arbeiten, erwies sich als günstig. Ausgehend von den kleinsten eigenständigen Landschaftselementen, den Landformen über (Teil-)Landschaften hinzu Hauptlandschaften wurden ähnliche Entitäten zusammenfasst. Dabei konnte die auf der 1. OBTA-Ebene erreichte sehr hohe räumliche Genauigkeit bis auf das Level der Hauptlandschaften (OBTA-Ebene 3) erhalten werden. Dies stellt einen klaren methodischen Vorteil gegenüber *top-down*-Verfahren dar.

Die angewandte OBTA-Methodik ermöglicht die segmentbasierte Analyse der Landschaftsmorphologie mittels DGM. Weiter können zusätzliche thematische Daten zu Geologie, Hydrologie und Landschaftsgeschichte verarbeitet werden. Ebenso lassen sich Nachbarschafts-, Form- und Strukturparameter einbeziehen. So gelang der Aufbau eines hierarchischen Modells, welches den Transfer von thematischen Eigenschaften zwischen den verschiedenen Ebenen erlaubt. Damit konnten komplexe Landschaften wie z.B. *Becken im JML mit kuppig-hügeligen Landformen* erfasst und klassifiziert werden. Auf der Fokalebene (OBTA-Ebene 2) wurden einzelne Vollformen zu Landschaften zusammengefasst (z.B. *kuppig-hügelige* oder *flachwellige Till-Landschaften*, *Endmoränen*). Hohlformen wurden zur inneren räumlichen Differenzierung in thematisch-morphologische Einheiten unterteilt. Diese reziproken Prozesse führten zu einer differenzierten Kartierung von 17 charakteristischen Landschaftsklassen des Oberschwäbischen Alpenvorlands.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern neue Einblicke in die Landschaftsentwicklung des Oberschwäbischen Alpenvorlands (z.B. hinsichtlich der Schotter- und Mooranteile der Beckenlandschaften). Die eingesetzten raumanalytischen Methoden können auf andere glazial geprägte Untersuchungsgebiete und ähnlichem Forschungsbedarf übertragen werden. Dazu trägt auch die relativ geringe Anzahl an Eingangsparametern bei.

Im didaktischen Teil der Arbeit gelang auch die Adaption der hier eingesetzten Methoden und Konzepte auf schulische Lehr- und Lernprozesse. Das in dieser Arbeit entwickelte BaWü-GIS ermöglicht es Schüler*innen in ganz Baden-Württemberg, digitale geomorphologisch-geologische Analysen im Heimatraum durchzuführen. Dabei können sie ihr räumliches Orientierungsraster erweitern und trainieren zusätzlich den Umgang mit modernen Geomedien.

Es wurden zwei am aktuellen Bildungsplan in Geographie für allgemeinbildende Gymnasien in Baden-Württemberg ausgerichtete Lernmodule entwickelt und vorgestellt. Beide nutzen das BaWü-GIS und decken sowohl die Unterstufe als auch die Oberstufe im Leistungsfach Geographie ab. Für Lehrkräfte wie für Schüler*innen ermöglichen sie einen geleiteten Einstieg in die digitale Landschaftsanalyse und sollen die Nutzung von GIS und DGM in der Schule unterstützen. Erste Erprobungen in der Praxis sind vielversprechend!

Im Folgenden werden die drei Forschungsfragen aus *Kapitel 1.1* beantwortet.

1. ***Ist es möglich, eine glazial geprägte Landschaft groß- bis mittelmaßstäbig mit semiautomatisierten OBTA-Methoden und einer geringen Zahl an Eingangsdaten im* Bottom-up-*Verfahren zu klassifizieren?***

   → Wie BECKENBACH et al. (2014) bereits gezeigt haben, lassen sich glaziale Landformen auf Basis eines hochauflösenden DGM präzise kartieren.
   Die vorliegende Arbeit macht deutlich, dass sich mit den beiden Hauptparametern *Morphologie* und *Geologie* in einem semiautomatisierten OBTA-Modell glaziale Landformen (im Speziellen *Endmoränenformen*) klassifizieren lassen. Die Möglichkeit mit OBTA auf verschiedenen räumlichen Maßstabseben zu arbeiten erlaubt es, Ergebnisse mit hoher räumlicher und thematischer Genauigkeit zu generieren. Im *Bottom-up*-Verfahren können die klassifizierten Landformen anschließend zu Glaziallandschaften zusammenfasst werden. Mit OBTA können Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Teil-Segmenten, Landformen und Landschaften berücksichtigt und thematische Daten regelbasiert integriert werden. Das erhöht die Präzision gegenüber pixelbasierten Verfahren deutlich. So können unterschiedliche, aufeinander aufbauende Aggregations-Ebenen erstellt werden, die je nach räumlicher Fragestellung das Potenzial bieten können, als Raumbasiseinheiten für planerische, wissenschaftliche oder naturschutzbezogene Anwendungen zu dienen.

2. ***Welche qualitativen und räumlichen Unterschiede bestehen im Vergleich der Ergebnisse mit bereits existierenden, visuell-händisch vorgenommenen Klassifikationen für das Alpenvorland Oberschwabens?***

   → In dieser Arbeit wurden sowohl analoge (ERB 1935, GRAUL 1952, HUTTENLOCHER 1959, BENZING 1964 und DONGUS 1991) als auch digitale Klassifikationen (BECKENBACH et al. 2014, BECKENBACH 2016 und SEYFRIED et al. 2019) auf großen bis mittleren Maßstäben

   OBTA-basierte, *kuppig-hügelige Till-Landformen* wurden ERBs Klassifikation von 1935 verglichen. Das brachte insgesamt sehr hohe räumliche wie thematische Übereinstimmungen (> 90%). Dabei bleibt zu konstatieren, dass das OBTA-Modell die Landformflächen großzügiger klassifiziert als ERBs Klassifikation.

   Derselbe hohe Übereinstimmungsgrad konnte für die mittelmaßstäbigen Klassifikationen von GRAUL (1952) und Kollegen nicht erreicht werden. Hier muss zwischen einzelnen Landschafts- bzw. Landformkategorien unterschieden werden: *Becken* und *Molasse-Bergland* sowie *Till-Landschaften* wurden mit befriedigender (> 62%) bzw. guter (> 82%) Übereinstimmung klassifiziert. *Täler* und *Ebenen* wiesen hingegen nur einen Deckungsgrad von knapp 50% auf. Gründe hierfür liegen unter anderem in den unterschiedlichen Klassifikationskonzepten (vgl. Kapitel 2.2.3). Gleichzeitig zeigen diese Ergebnisse auch, dass sich der hiesige Klassifikationsansatz besser für großmaßstäbige Landschaftsvergleiche eignet.

   Der Vergleich mit den digitalen Klassifikationen von BECKENBACH et al. 2014, BECKENBACH 2016 und SEYFRIED et al. 2019 zeigt eine sehr hohe inhaltliche Übereinstimmung der erfassten Landformen. Es wird aber auch deutlich, dass händische Landform-Kartierung anhand von hochauflösenden DGM (< 10 m Pixelgröße) räumlich präziser sein können. Die Kolleg*innen beschränken sich jedoch hauptsächlich auf Landformen und weisen nur vereinzelt Landschaften aus. Das OBIA-/OBTA-Konzept der verschiedenen maßstäblichen wie inhaltlichen Klassifikationsebenen erlaubt jedoch eine objektivere und leichter reproduzierbare Landschaftsklassifikation.

3. ***Wie kann das OBTA-basierte Modell-Konzept auf schulische Lehr- und Lernsituationen übertragen und in der Praxis eingesetzt werden? Gelingt es auf dieser Grundlage Lernmodule zu entwickeln, die mit Hilfe ähnlicher Parameter und Methoden Kenntnisse über Landformen und Landschaften des Untersuchungsgebiets vermitteln?***

   → Notwendige didaktische Reduktionen wurden behutsam vorgenommen, um Schüler*innen die Vorteile digitaler Methoden zum Verständnis einer (Teil-)Landschaft zu vermitteln. Damit können sie ihr räumliches Orientierungsraster festigen bzw. erweitern. So wurde das Prinzip der geringen Zahl an Eingangsparametern beibehalten. Das BaWü-GIS stützt sich auch auf morphologische und geologische Parameter sowie Geobasisdaten wie die Lage von Städten und Flüssen.

Die GIS-basierten Lernmodule fußen, wie die OBTA-Klassifikation, auf dem Erkennen und Analysieren von Geo-Objekten wie Landformen. Dabei funktioniert die objektbasierte Klassifikation ähnlich regelbasiert wie die menschliche Wahrnehmung. Das ermöglichte die Übertragung wesentlicher Methoden auf die Lernmodule. Ergänzende Online-Kartendienste (z.B. LGRB, LUBW) ermöglichen vereinzelt auch großmaßstäbige Detailanalysen. Die Unterrichtseinheit für die gymnasiale Oberstufe zeigt, dass mit dem BaWü-GIS bildungsplankonform auch in anderen Landschaften Baden-Württembergs gearbeitet werden kann (Bsp. Schichtstufen- bzw. Glaziallandschaft).

Grundsätzlich ist das BaWü-GIS offen konzipiert und lässt sich beliebig erweitern. So können regionsspezifische Geodaten, welche vor Ort vorliegen, von den Kolleg*innen einfach integriert und genutzt werden.

Bei geeigneter Datenlage lässt sich das hier vorgestellte GIS-Konzept grundsätzlich auch auf Landschaften außerhalb Baden-Württembergs übertragen.

Die Lernmodule legen im Vergleich zur OBTA-Klassifikation stärkeren Wert auf analoge (End-)Produkte wie Tabellen, Profile und Karten. Diese sollen es Schüler*innen erleichtern, digital recherchierte, analysierte und erstellte Raum-Ergebnisse in ihre reale Welt zu übertragen.

6.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurde mit OBTA-Methoden ein digitales Landschaftsmodell entwickelt. Dabei wurde die Zahl der Eingangsparameter bewusst klein gehalten um eine leichtere Übertragbarkeit zu ermöglichen. Während des Projekts ergaben sich einige methodische und inhaltliche Ansätze, welche noch nicht realisiert werden konnten. Diese sollten jedoch weiterverfolgt werden. Es folgt ein kurzer Ausblick auf mögliche Anschlussforschungen; dazu werden die vielversprechendsten Projekte angesprochen.

Die klassifizierten Landschaftseinheiten könnten mittels Landschaftsstrukturmaßen untersucht werden (vgl. Kapitel 2.2.4). Dies würde weitere statistische Erkenntnisse über die innere Differenzierung der modellierten Einheiten bringen.

Interessant wäre auch die Integration des *maschinellen Lernens* (vgl. Lary 2010) und der *Künstlichen Intelligenz* (eng. Artificial Intelligence) in die großmaßstäbige Landschaftsklassifikation. Entsprechende Studien auf der mittel- bis großmaßstäbigen Ebene wurden bislang noch nicht mit *BRT*-basierten Methoden durchgeführt. Eine solche Modellierung im Untersuchungsgebiet zu realisieren wäre eine konsequente Fortführung der Arbeit von Quénéhervé et al. (2015, 2016) und im Anschluss an diese Arbeit wünschenswert. Momentan stellt jedoch die Verarbeitung der großen Datenmengen auf diesem Maßstabsniveau

eine Hürde dar. Ebenfalls interessant wäre eine *SVM*-gestützte Landschaftsklassifikation im Untersuchungsgebiet. So könnte mehr über das Potenzial von statistischen in Relation zu objektbasierten Verfahren bei der Landschaftsklassifikation erfahren werden. Der anschließende Vergleich der Ergebnisse beider statistischer Verfahren untereinander sowie jeweils mit den hiesigen Ergebnissen (vgl. Kapitel 2.2.4) erscheint logisch.

Methoden wie z.B. das *Deep Learning* stellen ein noch relativ junges Forschungsfeld in den Geowissenschaften dar (vgl. HÖSER & KÜNZER 2020). Sie bieten Chancen, die Klassifikationsergebnisse inhaltlich wie räumlich weiter zu verbessern. Dabei bleibt aber zu bedenken, dass momentan die exakten Algorithmen, welche die beiden genannten Methoden nutzen, noch nicht völlig nachvollzogen werden können. Die Übertragbarkeit auf andere Regionen und die Anwendung im didaktischen Bereich wäre so zumindest fraglich (vgl. EBERT-UPHOFF et al. 2019).

Das bislang für eine geringe Zahl an Eingangsparametern konzipierte Landschaftsmodell könnte künftig um zusätzliche Parameter erweitert werden. Klima- und Vegetationsdaten sowie Bodenfeuchte-Stufen könnten zu einer stärkeren geoökologische Ausrichtung beitragen. Damit könnte der Landschaftshaushalt enger in den Blick der Untersuchung genommen werden (vgl. LESER & LÖFFLER 2017), was mögliche Anwendungen der Ergebnisse in der Landschafts- und Regionalplanung unterstützen könnte.

Räumlich wäre eine Erweiterung des Untersuchungsgebiets um den Landkreis Biberach wünschenswert. Bislang fehlt ein wichtiger Teil des AML, was genauere Analysen reliktisch auftretender Landformen aus rißzeitlichen Vereisungsphasen unmöglich macht. Stark überformte Drumlins und Endmoränenzüge aus der vorletzten Kaltzeit könnten so eingehender untersucht werden (vgl. BECKENBACK et al. 2014, SEYFRIED et al. 2019). Dazu würden vor allem die Geobasisdaten des DGM 5 sowie der GK 50 benötigt.

Auch in didaktischer Hinsicht wären in der Zukunft drei Punkte interessant:

Das wichtigste Ziel ist, dass die hier entwickelten Lernmodule und das BaWü-GIS an möglichst vielen Schulen praktisch eingesetzt werden.

Weiter wäre ein großes Anliegen, die Lernmodule, z.B. über das Oberschwaben-Portal (http://oberschwaben-portal.de/lernmodule.html), öffentlich und kostenlos zugänglich zu machen. So könnte eine noch größere Öffentlichkeit erreicht werden.

Daran anschließend könnte die Nutzung der Lernmodule in der schulischen (und akademischen) Ausbildung untersucht werden. So könnten Aussagen darüber getroffen werden, ob in den Bildungseinrichtungen bereits verstärkt digital oder noch analog gearbeitet wird. Dazu wäre es denkbar, die beteiligten Akteure (Schüler*innen sowie Lehrer*innen) zeitnah zur Nutzung mit geeigneten (Online-)Umfragen zu Wort kommen zu lassen.

7 Literatur

Ahnert, F. ([3]2003): *Einführung in die Geomorphologie*. Stuttgart-Hohenheim: Ulmer.

Albertz, J. ([5]2016): *Einführung in die Fernerkundung*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Alle, M. (2010): *Parametrisierung mikroskaliger Niederschlag-Abflussmodelle mit hochauflösenden Fernerkundungsdaten*. Unveröff. Zulassungsarbeit (Zula) am Geographischen Institut der Eberhard Karls Universität Tübingen (in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart). Tübingen.
(DOI: 10.13140/RG.2.2.21935.07847)

Alle, M. (2012): *Handlungs- und kompetenzorientierte Untersuchung des schulnahen Mikroklimas mit einer Einführung in die Nutzung von Geographischen Informationssystemen (GIS) in Klassenstufe 8*. Unveröff. Dokumentation einer Unterrichtseinheit (DUE) am Staatlichen Seminar für Didaktik und Lehrerbildung Weingarten. Weingarten.

Alle, M. (2018): *Zeugen der Kaltzeit mithilfe von Digitalen Geländemodellen (DGM) auf die Spur kommen. Elemente der Glazialen Serie Norddeutschlands digital und analog erfassen, analysieren und kartieren.* – In: Praxis Geographie 48 (11-2018), 24-31.

Alle, M.; Tyrna, B. & **Haller, B. (2011)**: *Fernerkundungsbasierte Modellierung von Überflutungsszenarien nach Starkregenereignissen als Grundlage zur Risikoabschätzung*. – GIS und GDI in der Wasserwirtschaft – Dt. Verband für Wasser- und Abwasserwirtschaft DWA Jahrestagung (19.-20. Jan., Kassel).

Armand, A. (1992): *Sharp and Gradual Mountain Timberlines as a Result of Species Interaktion.* – In: Hansen, A. & di Castri, F. (Hrsg.): *Landscape Bounderies.* Ecological Studies 92: 360-378 New York: Springer.

Bachofer, F.; Esch, T. & **Klein, D. (2009)**: *Ableitung von Versiegelungsgraden basierend auf hochaufgelösten Fernerkundungsdaten mittels Support Vector Machines*. – In: Angewandte Geoinformatik 2009. Beiträge zum 21. AGIT-Symposium Salzburg. Heidelberg: Wichmann, 432-441.

Bachofer, F.; Quénéhervé, G.; Märker, M.; & **Hochschild, V. (2015)**: *Comparison of SVM and Boosted Regression Trees for the Delineation of Lacustrine Sediments using Multispectral ASTER Data and Topographic Indices in the Lake Manyara Basin*. – In: Photogrammetrie · Fernerkundung · Geoinformation 1, 81-94.

Bandura, P.; Minár, J.; Harciníková, T. & Drăguţ, L. (2015): *Towards delineation of the morphostructural division of the Western Carpathians using object-based image analysis.* – Geomorphometry for Geosciences, Jasiewicz, J.; Zwoliński, Z.; Mitasova, H.; Hengl, T. (eds.), 2015. Adam Mickiewicz University in Poznań, 47-50.

Bastian, O. (2005): *Landschaftsgliederungen und Naturschutz.* – In: Landschaftsgliederungen in Sachsen. Mitteilungen des Landesvereins Sächsischer Heimatschutz e. V., Sonderheft 2005, 43-49.

Bastian, O. & **Syrbe, R.-U. (2005):** *Naturräume in Sachsen – eine Übersicht.* In: Landschaftsgliederungen in Sachsen. Mitteilungen des Landesvereins Sächsischer Heimatschutz e.V., Sonderheft 2005, 9-24.

Bahlburg, H. & **Breitkreuz, C. (2008)**: *Grundalgen der Geologie*. Heidelberg: Spektrum.

Barbarella, M.; Fiani, M. & **Zollo, C. (2017)**: *Assessment of DEM derived from very high-resolution stereo satellite imagery for geomorphometric analysis.* – In: European Journal of Remote Sensing 50 (1), 534-549.

Barsch, H. & **Richter, H. (1975)**: *Grundzüge einer naturräumlichen Gliederung der DDR auf der Basis typisierter Naturräume*. – In: Petermanns Geographische Mittteilungen 113, 173-179.

Bates, P.D. & **De Roo, A.P. (2000)**: *A simple raster-based model for flood inundation simulation*. – In: Journal of Hydrology, 236 (1), 54-77.

Baatz, M. & **Schape, M. (2000)**: *Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation.* – In: Strobl, J.; Blaschke, T. & Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung XII. Karlsruhe: Wichmann, 12–23.

Baumhauer, R. & **Winkler, S. (2014)**: *Glazialgeomorphologie. Formung der Landoberfläche durch Gletscher.* Stuttgart: Gebr. Borntraeger.

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).* – In: E&G Quaternary Science Journal 63 (2), 107–129.

Beckenbach, E. (2016): *Geologische Interpretation des hochauflösenden digitalen Geländemodells von Baden-Württemberg.* Stuttgart (Diss. Univ. Stuttgart).

Benediktsson, Í. Ö.; Jónsson, S. A. ; Schomacker, A. ; Johnson, M. D. ; Ingólfsson, Ó. ; Zoet, L. ; Iverson, N. R. & **Stötter, J. (2016)**: *Progressive formation of modern drumlins at Múlajökull, Iceland: stratigraphical and morphological evidence*. – In: Boreas 45 (4), 567-583.

Benzing, A. (1965): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 186 Konstanz.* (Kartenblatt und Begleitheft; Geogr. Landesaufnahme 1:200 000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands) Hrsgg. v. d. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bonn-Bad Godesberg.

Beran, F. (1980): *Die Landschaft*. – In: Wiedmann, B. (Hrsg.): Der Bodenseekreis (Reihe: Heimat und Arbeit). (436 S.) Stuttgart / Aalen: Theiss.

Beven, K.J. & **Kirkby, M.J. (1979)**: *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology*. – In: Hydrological Sciences Bulletin 24, 43–69.

Bieler, J. (2002): *Kapitel 5.1* – In: Haase, G. & Mannsfeld, K. (Hrsg.): Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen. Dt. Akademie für Landeskunde. (Forschungen zur dt. Landeskunde, Bd. 250) Flensburg.

Blaschke, T. & **Strobl, J. (2001)**: *What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS.* – In: GIS 6 / 01, 12-17.

Blaschke, T.; Hay, G.T.; Kelly, M.; Lang, S.; Hoffmann, P.; Addink, E.; Queiroz Feitosa, R; van der Meer, F.; van der Werff, H.; van Coillie, F. & **Tiede, D. (2014)**: *Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm.* – In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 87 (1), 180-191.

Böhner, J. & **Antonić, O. (2009)**: *Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology*. – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 195-226.

Böse, M.; Ehlers, J. & **Lehmkuhl, F. (2018)**: *Deutschlands Norden vom Erdaltertum zur Gegenwart*. Berlin: Springer.

BP Geo BW (2004): *Geographie*. – In: Bildungsplan allgemein bildendes Gymnasium Baden-Württemberg. Hrsgg. v. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem Landesinstitut für Erziehung und Unterricht Stuttgart. Ditzingen: Philipp Reclam Jun., S. 237-248.

BP Geo BW (2016) – *Bildungsplan des Gymnasiums Geographie Baden-Württemberg*. – In: Kultus und Unterricht 3/2016 (Ausgabe C - Bildungsplanhefte). Hrsgg. v. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg. Stuttgart: Neckar-Verlag.

Burak, A. (2005): *Eine prozessorientierte landschaftsökologische Gliederung Deutschlands: Ein konzeptioneller und methodischer Beitrag zur Typisierung von Landschaften in der chorischen Dimension*. (Forschungen zur dt. Landeskunde 2005, Bd. 254; zugleich Diss. Ruhr Univ. Bochum 2004). Flensburg.

Burges, C. (1998): *A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition*. – In: Data Mining and Knowledge Discovery 2 (2), 121–167.

Burnett, C. & **Blaschke, T. (2003)**: *A multi-scale segmentation / object relationship modelling methodology for landscape analysis.* – In: Ecological Modelling 168 (3), 233-249.

Chen, W.; Li, D.-H; Yang, K.-L.; Tsai, F. & **Seeboonruang, U. (2018)**: *Identifying and comparing relatively high soil erosion sites with four DEMs*. – In: Ecological Engineering 120, 449-463.

Clark, C.; Hughes, A.; Greenwood, S.; Spagnolo, M. & **Ng, F. (2009)**: *Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws*. – In: Quaternary Science Reviews 28 (7-8), 677–692.

Conoscenti, C.; Rotigliano, E.; Cama, M.; Caraballo-Arias, N.A.; Lombardo, L. & **Agnesi, V. (2018)**: *Exploring the effect of absence selection on landslide susceptibility models: A case study in Sicily, Italy.* – In: Geomorphology 261, 222-235.

Cotta, B. (1854): *Deutschlands Boden, sein geologischer Bau und dessen Einwirkung auf das Leben der Menschen*. Leipzig: Brockhaus.

Coveney, S. & **Roberts, K. (2017)**: *Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for environmental applications: data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling*. – In: International Journal of Remote Sensing 38 (8-10), 3159-3180.

De Smith, M.; Goodchild, M. & **Longley, P. (2007)**: *Geospatial analysis. A comprehensive guide to principles, techniques and software tools.* Leicester: Troubador Publishers

Definiens (2012): *Defeniens Developer XD 2.0.4. Reference Book.* München.

Deng, Y.; Wilson, J.P. & **Bauer, B.O. (2007)**: *DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape.* – In: International Journal of Geographical Information Science 21, 187-213.

DGfG (⁹2017) – Deutsche Gesellschaft für Geographie: Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Schulabschluss mit Aufgabenbeispielen. Bonn.

Dollinger, F. (1998): *Die Naturräume im Bundesland Salzburg*. (Forschungen zur dt. Landeskunde, Bd. 245). Flensburg.

Dongus, H. (1991): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 187 / 193 Lindau-Oberstdorf.* (Kartenblatt und Begleitheft; Geogr. Landesaufnahme 1:200 000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands) Hrsgg. v. d. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bonn-Bad Godesberg.

Dongus, H. (2000): *Die Oberflächenformen Südwestdeutschlands*. Geomorphologische Erläuterungen zu Topographischen und Geologischen Übersichtskarten (mit 17 Abbildungen und 1 Tabelle im Text und 1 auf Beilage). Berlin / Stuttgart: Gebr. Borntraeger.

Dornik, A.; Drăguţ, L. & **Urdea, P. (2018)**: *Classification of soil types using geographic object-based image analysis and Random Forest.* – In: Pedosphere 28 (6), 913-925.

Doumit, J.A. (2018): *Multiscale Landforms Classification Based on UAV Datasets.* – In: Sustainability in Environment (3) 2, 128-141.

Doumit, J.A. & Ghanem, D.F. (2021): *Using high-resolution Digital Surface Models and GIS-based geomorphometry to draw a karst landforms map.* – In: Mazedan Transactions on Engineering Systems Design 2 (2), 1-4.

Drăguţ, L. & **Eisank, C. (2011)**: *Object representations at multiple scales from digital elevation models.* – In: Geomorphology 129, 183-189.

Drăguţ, L. & **Blaschke, T. (2006)**: *Automated classification of landform elements using object-based image analysis*. – In: Geomorphology 81, 330-344.

Draser, J.H.; Ellwanger, D. & **Wielandt-Schuster, U. (2015)**: *Erosions-Akkumulations-Zyklen & Beckengenese im östlichen Rheingletschergebiet*. DEUQUA Exkursion, Allgäu 21.-3.09.2015. Hrsgg. v. RP Freiburg, Abt. 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Freiburg i. Br.

d'Oleire-Oltmanns, S.; Eisank, C.; Drăguţ, L. & **Blaschke, T. (2013)**: *An Object-Based Workflow to Extract Landforms at Multiple Scales From Two Distinct Data Types.* – In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 10 (4), 947-951.

Ebert-Uphoff, I.; Samarasinghe, S.M. & **Barnes, E.A. (2019)**: Thoughtfully *using artificial intelligence in Earth science* – In: Eos Transactions American Geophysical Union 100. (https://doi.org/10.1029/2019EO135235, Zugriff: 14.6.2020)

Eisank, C.; Drăguţ, L. Götz, J. & **Blaschke, T. (2010)**: *Developing a semantic model of glacial landforms for object-based terrain classification – the example of glacial cirques.* – In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 38 (4C7).

Eisank, C. (2014): *Ein optimiertes objektbasiertes Verfahren zur halbautomatischen Kartierung von Landformen auf Basis Digitaler Geländemodelle (DGM).* – In: Kolbe, T.; Bill, R.; Donaubauer, A. (Hrsg.): Geoinformationssysteme 2014 – Beiträge zur 1. Münchener GI-Runde. München: Wichmann, 136-147.

Eisank, C.; Smith, M. & **Hillier, J. (2014)**: *Assessment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital elevation models.* – In: Geomorphology 214, 452-464.

Eberle, J.; Eitel, B.; Blümel, W. D. & **Wittmann, P. (²2010)**: *Deutschlands Süden vom Erdmittelalter zur Gegenwart.* Heidelberg: Spektrum.

Ellwanger, D. (2003), unter Mitarb. v. Lämmermann-Barthel, J. & Neeb, I.: *Eine „landschaftsübergreifende Lockergesteinsgliederung" vom Alpenrand zum Oberrhein.* – In: GeoArchaeoRhein 4, 81-124.

Ellwanger, D.; Wielandt-Schuster, U.; Franz, M. & **Simon, Th. (2011)**: *The Quaternary of the southwest German Alpine Foreland (Bodensee-Oberschwaben, Baden-Württemberg, Southwest Germany).* – In: E&G Quaternary Science Journal, 60 (2-3), 306-328.

Elith, J.; Leathwick, J. R. & Hastie, T. (2008): *A working guide to boosted regression trees.* – In: Journal of Animal Ecology 77 (4), 802–813.

Emeis, S. & **Knoche, H.R. (2009)**: *Applications in Meteorology.* – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 603-622.

Erb, L. (1935 / 1995): *Erläuterungen zum Blatt 8221 Überlingen-Ost (früher Mainau),* mit Karte. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg. Freiburg i. Br.

Esch, T.; Himmler, V.; Schorcht, G.; Tiel, M.; Wehmann, T.; Bachofer, F.; Conrad, C.; Schmidt, M. & **Dech, S. (2009)**: *Large-area assessment of impervious surface based on integrated analysis of single-date Landsat-7 images and geospatial vector data.* – In: Remote Sensing of Environment, Vol. 8 / 113, 1678-1690.

Escobar-Flores, J.G.; Lopez-Sanchez, C.A.; Sandoval, S.; Marquez-Linares, M. & **Wehenkel, C. (2018)**: *Predicting Pinus monophylla forest cover in the Baja California Desert by remote sensing.* – In: PeerJ 6:e4603, 1-17.

Evans, D.J. (2006): *Glacial landsystems.* – In: Knight, P. G. (Ed.): Glacier science and environmental change. London: Blackwell, 83–88.

Evans, I.S. (1972): *General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics.* – In: Corley, R. J. (Ed.): Spatial Analysis in Geomorphology. New York: Harper & Row, 17-90.

Evans, I.S. (2003): *Scale-specific landforms and aspects of the land surface.* – In: Evans, I.S.; Dikau, R.; Tokunaga, E.; Ohmori, H. & Hirano, M. (Eds.): Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives. Tokyo: Terrapub, 61-84.

Evans, I.S. (2012): *Geomorphometry and landform mapping: What is a landform?* – In: Geomorphology 137, 94-106.

Evans, I.S.; Hengl, T. & **Gorsevski, P. (2009)**: *Applications in Geomorphometry* – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 497-525.

Eyles, N.; Putkinen, N.; Sookhan, S. & **Arbelaez-Moreno, L. (2016)**: *Erosional Origin of Drumlins and Megaridges.* – In: Sedimentary geology 338, 2-23.

Falk, G. & **Nöthen, E. (2005)**: *GIS in der Schule. Potenziale und Grenzen*. Berlin: Mensch & Buch.

Fischer, P. (1997): *The pixel: a snare and a delusion.* – In: International Journal of Remote Sensing 18 (3), 679–685

Flath, M. & **Rudyk, E.** (Hrsg., **2016)**: *Unsere Erde, Gymnasium Baden-Württemberg: 5./6. Schuljahr, Schülerbuch*. Berlin: Cornelsen.

Florinsky, I.V. & **Kuryakova, G.A. (2000)**: *Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations-exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale.* – In: International Journal of Geographical Information Science 14, 815-832.

Florinsky, I.V. (²2016): *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Amsterdam: Elsevier.

Florisnky, I. V. (2017): *An illustrated introduction to general geomorphometry.* – In: Progress in Physical Geography 41 (6), 723-752.

Foody, G.M. & **Mathur, A. (2004)**: *Toward intelligent training of supervised image classifications: directing training data acquisition for SVM classification.* – In: Remote Sensing of Environment 93 (1–2), 107–117.

Franke, W. & **Bischof, H. (1998)**: *Wirtschaft im Bodenseekreis.* – In: Tann, S. (Hrsg.): Der Bodenseekreis. Ein Führer zu Natur, Geschichte und Kultur. Friedrichshafen: Robert Gessler, 61-69.

Frankl, A.; Laenerts, T.; Radusinović, S.; Spalevic, V. & **Nyssen, J. (2016)**: *The regional geomorphology of Montenegro mapped using Land Surface Parameters.* – In: Zeitschrift für Geomorphologie (60/1), 1-14.

Friedman, J.H. (2001): *Greedy function approximation: a gradient boosting machine*. – In: Annals of Statistics, 1189–1232.

Gallant, J.C. & **Dowling, T.I. (2003)**: *A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas*. – In: Water Resources Research 39 (12), 1347-1359.

Gavit, B.K.; Purohit, R.C.; Singh, P.K.; Kothari, M. & **Jain, H.K. (2018)**: *Rainwater Harvesting Structure Site Suitability Using Remote Sensing and GIS*. – In: Singh, V.P.; Yadav, S. & Narayan Yadava, R. (Eds.): *Hydrologic Modelling*. Select Proceedings of ICWEES-2016 (Water Science and Technology Library). Singapore, 331-341.

Gebhardt, H. (2008): *Schwäbische Alb und Oberschwaben: Erholungsräume im Windschatten des Ferntourismus*. – In: Gebhardt, H. (Hrsg.): Geographie Baden-Württembergs. Raum, Entwicklung, Regionen. (Landeszentrale für Politische Bildung Baden-Württemberg) Stuttgart: Kohlhammer, 304-320.

Geyer, O. & **Gwinner, M. (5 2011)**: *Geologie von Baden-Württemberg*. (Völlig neu bearb. Aufl., hrsgg. v. Geyer, M; Nitsch, E. & Simon, T.) Stuttgart: Schweizerbart.

Gidudu, A.; Hulley, G. & **Marwala, T. (2007)**: *Classification of Images Using Support Vector Machines.* – In: arXiv: 0709.3967.

Glaser, R. (2007): *Ordnung muss sein – naturräumliche und landschaftsökologische Gliederungen.* – In: Gebhardt, H.; Schenk, W. (Hrsg.): Geographie Deutschlands. Darmstadt: WBG, 20-29.

Glavion, R. (3 2002): *Ökosysteme und Landnutzung.* – In: Liedke, H. & Marcinek, J. (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands. Gotha, Stuttgart: Klett, 289-319.

Glavion, R.; Glaser, R.; Saurer, H.; Gaede, M. & **Weiler, M. (2012 2)**: Physische Geographie. Braunschweig: Westermann.

Graul, H. (1952): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 179 Ulm.* (Kartenblatt und Begleitheft; Geogr. Landesaufnahme 1:200 000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands). Hrsgg. v. d. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bonn-Bad Godesberg.

Gu, H.; Li, H.; Yan, L.; Liu, Z.; Blaschke, T. & **Soergel, U. (2017)**: *An Object-Based Semantic Classification Method for High Resolution Remote Sensing Imagery Using Ontology* – In: Remote Sensing 9 (4), 329.

Guisan, A.; Weiss, S. & **Weiss, A. (1999)**: *GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution.* – In: Plant Ecology 143, 107-122.

Gunn, S. (1997): *Support Vector Machines for Classification and Regression.* ISIS Technical Report (University of Southampton), Southampton.

Haase, G. (1996): *Geotopologie und Geochorologie – Die Leipzig-Dresdener Schule der Landschaftsökologie*. – In: Haase, G. & E. Eichler (Hrsg.): Wege und Fortschritte der Wissenschaft: Beiträge von Mitgliedern der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig zum 150. Jahrestag ihrer Gründung. Berlin: Akademie-Verlag, 201-229.

Haase, G. & **Mannsfeld, K. (Hrsg.) (2002)**: *Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen.* Dt. Akademie für Landeskunde (Forschungen zur dt. Landeskunde, Bd. 250) Flensburg.

Hard, G. (1982): *Zu Begriff und Geschichte von „Natur" und „Landschaft" in der Geographie des 19. und 20. Jahrhunderts.* – In: Großklaus, G. und Oldemeyer, E. (Hrsg.): Natur als Gegenwelt. Beiträge zur Kulturgeschichte der Natur. Karlsruhe: Von Loeper, 139-167.

Hassenpflug, W. (2012): *Verstehen, was wir sehen – Google Earth und Co machen möglich, wovon abgetretene Geo-Didaktiker träumten*. – In: Hüttermann, A.; Kirchner, P.; Schuler, S. & Krieling, K. (Hrsg.): *Räumliche Orientierung. Räumliche Orientierung, Karten und Geoinformation im Unterricht*. Tagungsband zum HGD-Symposium in Ludwigsburg (Geographiedidaktische Forschungen, Bd. 49). Braunschweig: Westermann, 252-259.

Hemmer, M. (2012): *Räumliche Orientierungskompetenz – Herausforderungen für die Forschung und Schulpraxis*. – In: Hüttermann, A.; Kirchner, P.; Schuler, S. & Krieling, K. (Hrsg.): *Räumliche Orientierung. Räumliche Orientierung, Karten und Geoinformation im Unterricht*. Tagungsband zum HGD-Symposium in Ludwigsburg (Geographiedidaktische Forschungen, Bd. 49). Braunschweig: Westermann, 10-21.

Hengl, T.; Gruber, S. & **Shrestha, D.P. (2003)**: *Digital Terrain Analysis in ILWIS*. Lecture Notes. International Institute for Geo-Information Science & Earth Observation (ITC), Enschede, 1-56.

Hengl, T. & **Reuter, H. (**Eds., **2009)**: *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier.

Hengl, T. & **Evans, I.S. (2009)**: *Mathematical and Digital Models oft he Land Surface.* – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 31-63.

Henning, E. (1922): *Geologie von Württemberg nebst Hohenzollern*. (= Handbuch der Geologie und Bodenschätze Deutschlands, II. Abteilung: Regionale Geologie Deutschlands; 2 Teile: 1922 & 1923) Berlin: Gebr. Borntraeger.

Heung, B.; Ho, H.C.; Zhang, J.; Knudby, A.; Bulmer, C.E. & **Schmidt, M.G. (2016)**: *An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping.* – In: Geoderma 265, 62-77.

Herz, K.; Kaulfuß, W; Kramer, M. & **Noack, K.-H. (1975)**: *Einführung in die Landschaftsanalyse*. (Lehrermaterial zur Ausbildung v. Diplomlehrern f. Geographie) Potsdam.

Herz, K. (1982): *Der Arealbegriff in der Landschaftsanalyse*. – In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Pädagogischen Hochschule Dresden 17, 119-127.

Hillier, J. K.; Benediktsson, Í. Ö.; Dowling, T. P. F. & **Schomacker, A. (2018)**: *Production and preservation of the smallest drumlins*. – In: GFF – Journal of the Geological Society of Sweden 2018, 1-17.

Hillier, J. K. & **Smith, M. (2008)**: *Residual relief separation: digital elevation model enhancement for geomorphological mapping.* – In: Earth Surface Processes and Landforms 33 (14), 2266-2276.

Hölbling, D.; Friedl, B. & **Eisank, C. (2015)**: *An object-based approach for semi-automated landslide change detection and attribution of changes to landslide classes in northern Taiwan*. – In: Earth Science Informatics 8 (2), 327-335.

Höser, T. & **Künzer, C. (2020)**: *Object Detection and Image Segmentation with Deep Learning on Earth Observation Data: A Review-Part I: Evolution and Recent Trends*. – In: Remote Sensing 12 (10), 1-44.

Hoffmann, P.; Strobl, J.; Blaschke, T. & **Kux, H. (2006)**: *Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object based approach*. – In: IAPRS, vol. XXXVI – 4/C42.

Hormann, K. (1971): *Morphometrie der Erdoberfläche*. (Diss. Univ. Kiel) Schriften des Geographischen Instituts der Universität Kiel (Bd. 36). Kiel: Selbstverlag d. Geograph. Inst. d. Univ. Kiel.

Hüttermann, A. (2012): *Von der „Einführung in das Kartenverständnis" zur „Kartenkompetenz": Der schillernde Begriff der Kartendidaktik*. – In: Hüttermann, A.; Kirchner, P.; Schuler, S. & Krieling, K. (Hrsg.): *Räumliche Orientierung. Räumliche Orientierung, Karten und Geoinformation im Unterricht*. Tagungsband zum HGD-Symposium in Ludwigsburg (Geographiedidaktische Forschungen, Bd. 49). Braunschweig: Westermann, 22-32.

Huttenlocher, F. (1959): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 178 Sigmaringen.* (Kartenblatt und Begleitheft; Geogr. Landesaufnahme 1:200 000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands) Hrsg. v. d. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bonn-Bad Godesberg.

Ilia, I.; Rozos, D. & **Koumantakis I. (2016)**: *Landform classification using GIS techniques. The case of Kimi municipality area, Euboea Island, Greece.* – In: Bulletin of the Geological Society of Greece 47, 264-274.

Jaeger, J. (2000): *Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation*. – In: Landscape Ecology 15, 115–130.

Jenčo, M.; Pacnina, J. & **Shary, P. (2009)**: *Terrain skeleton and local morphometric variables: geosciences and computer vision technique* (Chap. V) – In: Horák, J. (Ed.): Advances in Geoinformation Technologies. Ostrava: Ostrava VŠB, 57-76.

Johnson, M. D.; Schomacker, A.; Benediktsson, I. Ö.; Geiger, A. J.; Ferguson, A. & **Ingolfsson, O. (2010)**: *Active Drumlin Field revealed at the Margin of Múlajökull, Iceland: A surge-type Glacier*. – In: Geology 38, 943-946.

Jorge, M. G. & **Brennand, T. A. (2017)**: *Semi-automated extraction of longitudinal subglacial bedforms from digital terrain models – Two new methods.* – In: Geomorphology 288, 148-163.

KA 5 – *Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl.* (2005) – Hrsgg. v. d. AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN der staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover. Stuttgart: Schweizerbart.

KAUSHAL, R. K.; SINGH, V.; MUKUL, M. & **JAIN, V. (2017)**: *Identification of deformation variability and active structures using geomorphic markers in the Nahan salient, NW Himalaya, India.* – In: Quaternary International 462, 194-210.

KELLER, O. & **KRAYSS, E. (1987)**: *Die hochwürmzeitlichen Rückzugsphasen des Rhein-Vorlandgletschers und der erste alpine Eisrandkomplex im Spätglazial*. – In: Geographica Helvetica 2, 169-178.

KELLER, O. & **KRAYSS, E. (1994)**: *Die Bodensee-Vorlandvereisung des Rheingletschers im Konstanz-Stadium der letzten Eiszeit.* – In: Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft 87: 31-40.

KIRCHBERG, G. (1977): *Der Lernzielbereich „Topographie" im geographischen Lehrplan*. – In: Hefte zur Fachdidaktik der Geographie 1, 25-44.

KRAYSS, E. & **KELLER, O. (1996)**: *Hydrographie des Bodenseeraums während der letzten Vorlandvereisung.* – In: Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung (113), 111-143.

KUTTNER, M.; ESSL, F.; PETERSEIL, J.; DULLINGER, S.; RABITSCH, W.; SCHINDLER, S.; HÜLBER, K.; GATTRINGER, A. & **MOSER, D. (2015)**: *A new high-resolution habitat distribution map for Austria, Liechtenstein, southern Germany, South Tyrol and Switzerland.* – In: eco.mont 7 (2), 18-29.

LANG, S. & **BLASCHKE, T. (2007)**: *Landschaftsanalyse mit GIS*. Stuttgart: Ulmer.

LANG, S. (2008): *Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality – dealing with complexity.* – In: BLASCHKE, T.; LANG, S. & HAY, G.J. (Eds.): Object Based Image Analysis. Heidelberg, Berlin, New York: Springer, 817-827.

LESER, H. (2009): *Geomorphologie*. (= Das Geographische Seminar; Neubearbeitung) Braunschweig: Westermann.

LESER, H. & **LÖFFLER, J. ([5]2017)**: *Landschaftsökologie*. Stuttgart-Hohenheim: Ulmer.

LGRB BW ([12]1998): *Erläuterungen zur Geologischen Schulkarte von Baden-Württemberg 1 : 1 000 000.* (12., überarbeitete und erweiterte Aufl.) – Bearb. v. GROSCHOPF, R. & VILLINGER, E. Hrsgg. v. Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Freiburg i. Br.

LGRB BW ([13]2011): *Erläuterungen zur Geologischen Übersichts- und Schulkarte von Baden-Württemberg 1 : 1 000 000.* (13., völlig neu bearbeitete Aufl.) – Bearb. v. VILLINGER, E. et al. Hrsgg. v. Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Freiburg i. Br.

LGRB BW (2015): *Lithostratigraphische Entwicklung des baden-württembergischen Rheingletschergebiets: Übertiefte Becken- und Moränen-Landschaft.* – Bearb. v. ELLWANGER, D. et al. Hrsgg. v. Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Freiburg i. Br. Dez. 2015.

LI, Q.; WIE, X.; YANG, X.; GILES-HANSEN, K.; ZANG, M. & **LIU, W. (2017)**: *Topography significantly influencing low flows in snow-dominated watersheds.* – In: Hydrology and Earth System Sciences 22, 1947-1956.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. & **CHIPMAN, J. (⁶2008)**: *Remote sensing and image interpretation*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.

LÖFFLER, J. (2002): *Vertical landscape structure und functioning.* – In: BASTIAN, O. und STEINHARD, U. (Eds.): Development and Perspectives of Landscape Ecology. Dordrecht: Kluver Academic Publishers, 49-58.

LUNDBLAD, E.R.; WRIGHT, D.J.; MILLER, J.; LARKIN, E.M.; RINEHART, R.; NAAR, D.F.; DONAHUE, B.T.; ANDERSONS, S.M. & **BANTTISTA, T. (2006)**: *A benthic terrain classification scheme for American Samoa.* – In: Marine Geodesy 29, 89–111.

MACMILLAN, R.A. & **SHARY, P.A. (2009)**: *Landforms and Landform Elements in Geomorphometry.* – In: HENGL. T. & REUTER, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 227-254.

MÄRKER, M.; QUÉNÉHERVÉ, G.; BACHOFER, F. & **MORI, S. (2015)**: *A simple DEM assessment procedure for gully system analysis in the Lake Manyara area, northern Tanzania*. – In: Natural Hazards 79 (1), 235-253.

MÄRKER, M.; SCHILLACI, C. & **JAN KROPÁČEK, J. (2018)**: *Morphometric terrain analysis to explore present day geohazards and paleolandscape forms and features in the surroundings of the Melka Kunture prehistoric site, Upper Awash Valley, Central Ethiopia.* – In: AUC Geographica 53 (1), 10–19.

MANNSFELD, K. & **RICHTER, H. (**Hrsg., **1995): *Naturräume in Sachsen.*** (Forschungen zur deutschen Landeskunde Bd. 238) Dt. Akademie für Landeskunde. Trier: Selbstverlag.

MANNSFELD, K. (2005): *Naturräumliche Gliederung Sachsens – Ordnung der Mannigfaltigkeit.* – In: Landschaftsgliederungen in Sachsen. (Mitteilungen des Landesvereins Sächsischer Heimatschutz e. V., Sonderheft 2005) Dresden, 2-8.

MANNSFELD, K. & **SYRBE, R.-U. (Hrsg.) (2008)**: *Naturräume in Sachsen*. Dt. Akademie für Landeskunde. Leipzig: Selbstverlag.

MEYNEN, E. & **SCHMITHÜSEN, J. (**Hrsg., **1953-1962): *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands Band 1.*** (Unter Mitwirkung des Zentralausschusses für dt. Landeskunde). Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.

MIDGLEY, N.G.; TONKIN, T.N.; GRAHAM, D.J. & **COOK, S.J. (2018)**: *Evolution of high-Arctic glacial landforms during deglaciation.* – In: Geomorphology 311, 63–75.

Millard, K. & **Richardson, M. (2018)**: *Quantifying the relative contributions of vegetation and soil moisture conditions to polarimetric C-Band SAR response in a temperate peatland*. – In: Remote Sensing of Environment 206, 123-138.

Minár, J. & **Evans, I.S. (2008)**: *Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping*. – In: Geomorphology 95, 236–259.

Moore, I.D.; Grayson, R.B. & **Ladson, A.R. (1991)**: *Digital terrainmodelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. – In: Hydrological Processes 5, 3–30.

Mosalik, M.; Zagórski, P.; Łęczyński, L.; Ćwiąkała, J. & **Demczuk, P. (2018)**: *Morphological characterization of Rechercheforden (Bellsund, Svalbard) using marine geomorphometry.* – In: Polish Polar research 39 (1), 99-125.

Naga Jyothi, B.; Babu, G & **Murali Krishna, I. (2008)**: *Object Oriented and Multi-Scale Image Analysis: Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats – A Review*. – In: Journal of Computer Science 4 (9), 706-712.

Nakano, T.; Kamiya, I.; Tobita, M.; Iwahashi, J. & **Nakajima, H. (2014)**: *Landform Monitoring in an active Volcano by UAV and SFM-MVS Technique*. – In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-8, 2014 ISPRS Technical Commission VIII Symposium, 09 – 12 December 2014, Hyderabad, India, 71-75.

Neef, E. (1967): *Theoretische Grundlagen der Landschaftslehre*. Gotha: VEB Hermann Haack.

Nelson, A.; Reuter, H.I. & **Gessler, P. (2009)**: *DEM Production Methods and Sources*. – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 65-85.

Olaya, V. (2004): *A gentle Introduction to SAGA-GIS.* The SAGA User Group e.V. Göttingen.

Olaya, V. (2009): *Basic Land-Surface Parameters.* – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 141-169.

Pavano, F.; Catalano, S.; Romagnoli, G. & **Tortorici, G. (2017)**: *Hypsometry and relief analysis of the southern termination of the Calabrian arc, NE-Sicily (southern Italy)*. – In: Geomorphology 304, 74-88.

Pedersen, S.H. (2017): *Scaling-up Climate Change Effects in Greenland*. (Diss. Univ. Aarhus) Aarhus.

Penck, A. & **Brückner, E. (1901-1909)**: *Die Alpen im Eiszeitalter*. (3 Bände). Leipzig:Tauchnitz.

Pike, R.J. (1995): *Geomorphometry – progress, practice and prospect.* – In: Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 101, 221-238.

Pike, R.J.; Evans, I.S. & **Hengl, T. (2009)**: *Geomorphometry: A Brief Guide.* – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Hrsg.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 3-30.

Poessel, S.A.; Brandt, J.; Mendenhall, L.; Braham, M.A.; Lanzone, M.J.; McGann, A.J. & **Katzner, T.E. (2018)**: *Flight response to spatial and temporal correlates informs risk from wind turbines to the California Condor.* – In: The Condor: Ornithological Applications 120, 330–342.

Prensky, M. (2001): *Digital Natives, Digital Immigrants*. – In: On the Horizon, MCB University Press 9 (5), 1-6.

Putkinen, N.; Eyles, N.; Putkinen, S.; Ojala, A.; Palmu, J.-P.; Sarala, P.; Väänänen, T.; Räisänen, J.; Saarelainen, J.; Ahtonen, N.; Hannu Rönty, H.; Kiiskinen, A.; Rauhaniemi T. & **Tervo, T. (2017)**: *High-resolution LiDAR mapping of glacial landforms and ice stream lobes in Finland*. – In: Bulletin of the Geological Society of Finland, 1-18.

Quénéhervé, G.; Alle, M.; Schwab, A. & **Rosner, H.-J. (2015)**: *Geostatistische Modellierung der naturräumlichen Ordnung Baden-Württembergs*. – AGIT 2015, Angewandte Geoinformatik – Symposium und Expo, Salzburg, 8.-10. Juli 2015.

Quénéhervé, G.; Alle, M.; Schwab, A. & **Rosner, H.-J. (2016)**: *Modellierung der naturräumlichen Einheiten Baden-Württembergs mit Boosted Regression Trees*. – In: AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik 2-2016, 204-212.

R Development Core Team (2008): *R: A Language and Environment for Statistical Computing.* – In: R Foundation for Statistical Computing. Vienna.

Renners, M. (1991): *Geoökologische Raumgliederung der Bundesrepublik Deutschland*. (Forschungen zur dt. Landeskunde, Bd. 235) Trier: Selbstverlag Zentralausschuss für dt. Landeskunde.

Reuter, H.I.; Hengl, T., Gessler, P. & **Soille, P. (2009)**: *Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis*. – In: Hengl, T. & Reuter, H. (Eds.): Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. (Developments in Soil Science – Vol. 33) Amsterdam: Elsevier, 87-120.

Riadi, B.; Lumban-Gaol, Y.A. & **Windiastuti, R. (2018)**: *Spatial Modeling of Flood Risk in Karawang*. – In: Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal 3 (5), 200-206.

Richter, H. (1967): *Naturräumliche Ordnung.* – In: Neef, E. (Hrsg.): *Probleme der landschaftsökologischen Erkundung und naturräumlichen Gliederung*. (Wiss. Abhandlungen d. Geographischen Gesellschaft d. DDR, Bd. 5) Leipzig, 129-160.

Riley, S.J.; De Gloria, S.D. & **Elliot, R. (1999)**: *A Terrain Ruggedness that Quantifies Topographic Heterogeneity*. – In: Intermountain Journal of Science, Vol.5 (1-4), 23-27.

Röder, M.; Bastian, O. & **Syrbe, R.-U. (2005)**: *Landschaftsfunktionen und Leitbilder – praktische Anwendung von Naturraumeinheiten*. - In: Landschaftsgliederungen in Sachsen. (Mitteilungen des Landesvereins Sächsischer Heimatschutz e. V., Sonderheft 2005), 32-42.

Sach, V. (2007): *Eiszeit-Erbe – über die Torfmoore bei Bad Waldsee.* – In: Oberschwaben Naturnah. Zeitschrift des Bundes für Naturschutz Oberschwaben e.V. & des Naturschutzzentrums Bad Wurzach, 41-45.

Saha, K.; Wells, N. & **Munro-Stasiuk, M. (2011)**: *An object-oriented approach to automated landform mapping: A case studyof drumlins.* – In: Computers & Geosciences 37 (9), 1324-1336.

Salcher, B.C., Hinsch, R. & **Wagreich, M. (2010)**: *High-resolution mapping of glacial landforms in the North Alpine Foreland, Austria.* – in: Geomorphology 122, 283–293.

Sandner, E. (2002): *Kapitel 2.4; 3.2-3.3; 3.6-3.7* – In: Haase, G. & Mannsfeld, K. (Hrsg.): Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen. Dt. Akademie für Landeskunde. (Forschungen z. dt. Landeskunde, Bd. 250) Flensburg: Selbstverlag.

Sauter, A. M.; Sauter, W.& **Bendert, H. (2004)**: *Blended learning: effiziente Integration von E-Learning und Präsenztraining*. Neuwied u.a.: Luchterhand.

Scholer, M.N.; Leu, M & **Belthoff, J.R. (2018)**: *Patterns of co-occurrence in woodpeckers and nocturnal cavity-nesting owls within an Idaho forest.* – In: Avian Conservation and Ecology 13(1), 1-14.

Schleicher, Y. (2010): *Didaktischer Schwerpunkt: Geographische Fragestellungen.* – In: Schleicher, Y. (Hrsg.): Diercke multimediale Methoden, mit Beiträgen von I. Bartels, C. Bantleon, L. Püschel, B. Richter & Y. Schleicher. Braunschweig: Westermann, 18-19.

Schlüchter, C. (2009): *Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM).* Karte 1 : 500 000. Bern.

Schreiner, A. (1974): *Erläuterungen zum Blatt Landkreis Konstanz mit Umgebung: Geologische Karte 1 : 50 000 von Baden-Württemberg.* Hrsgg. vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg. Stuttgart.

Schreiner, A. ([3]1992): *Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee: Geologische Karte 1 : 50 000 von Baden-Württemberg.* Hrsgg. vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg. Freiburg / Stuttgart.

Schröder, W. & **Schmidt, G. (2000)**: *Raumgliederung für die Geoökologische Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder.* – In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung – Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 12 (4), 237-243.

Schulze, U.; Kanwischer, D. & **Reudenbach, C. (2012)**: *Technikzentrierte Softwareschulung und/oder problemorientierte Denkweise? Theoretische Überlegungen und didaktische Analysen zur geographischen GIS-Ausbildung.* – In: Hüttermann, A.; Kirchner, P.; Schuler, S. & Krieling, K. (Hrsg.): *Räumliche Orientierung. Räumliche Orientierung, Karten und Geoinformation im Unterricht.* Tagungsband zum HGD-Symposium in Ludwigsburg (Geographiedidaktische Forschungen, Bd. 49). Braunschweig: Westermann, 299-307.

Schwab, A. (1998): *Digitale Geländemodelle im Grundkurs Informatik*. – Schriftliche Arbeit zur zweiten Staatsprüfung für die Laufbahn des höheren Schuldienstes (Gymnasien) am Staatl. Seminar für Schulpädagogik in Freiburg (unveröff.).

Schwab, A. (2000): *Reliefanalytische Verfahren zur Abschätzung nächtlicher Kaltluftbewegungen*. Freiburger Geographische Hefte 61 (Diss. Univ. Freiburg). Freiburg.

Schwab, A. (2018): *Auf den Spuren der Flussgeschichte im Alpenvorland. Wie sich Flüsse im Spät- und Postglazial entwickelt haben*. – In: Praxis Geographie 48 (12-2018), 43-47.

Schwab, A. (2013): *Als die Argen noch zur Donau floss.* – In: Im Oberland 24 (2), 4-12.

Schwab, A. (2014): *Wie die Argen ihren Weg zum Bodensee fand.* – In: Im Oberland 25 (1), 3-12.

Schwab, A. (2015): *Regionale Klimaanalyse Donau-Iller*. Wissenschaftlicher Abschlussbericht. – Regionalverband Donau-Iller (Hrsg.): Grundlagen zur Gesamtfortschreibung des Regionalplans Donau-Iller. Ulm

Schwab, A. & **Zachenbacher, D. (2009)**: *Wissenschaftlicher Abschlussbericht der Regionalen Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO)*. Klimaatlas für die Region Bodensee-Oberschwaben. – Regionalverband Bodensee-Oberschwaben (Hrsg.), Landkreise Bodenseekreis, Ravensburg, Sigmaringen.

Schwab, A. & **Meiershofer, S. (2012)**: *Mit virtuellen Lernmodulen auf den Spuren der Eiszeiten. Ein Lernangebot für Schülerinnen und Schüler der Sek II.* – In: geographie heute 33 (303), 22-27.

Seyfried, H.; Simon, T.; Beckenbach, E. & **Müller, T. (2019)**: *Der Südwesten im digitalen Geländemodell*. Wie LiDAR-Daten unsere Sicht auf die Welt verändern. (Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, Bd. 4.) Neustadt an der Aisch: VDS (Verlagsdruckerei Schmidt).

Shary, P.A. (1995): *Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures.* – In: Mathematical Geology 27 (3), 373-390.

Silva, J. M. F; Oka-Fiori, C. & **Silveira, D. T. (2017)**: *Índice de Diversidade de Formas de Relevo do Setor Norte da Apa da Serra da Esperança (PR) com Emprego de Técnica de Classificação Geomorfométrica / Landforms Diversity Index of The Northern Sector of Environmental Protection Area of Serra da Esperança (Parana State, Brazil) With the Use of Geomorphometric Classification*. – In: Revista do Departamento de Geografia, Volume Especial – Eixo 6, 112-123.

Skentos, A. (2018a): *Topographic Postition Index based Landform Analysis of Messaria (Ikaria Island, Greece).* – In: Acta Geobalcania 4 (1), 7-15.

Skentos, A. (2018b): *Combining Digital Elevation Data, Expert Knowledge and GIS for Geomorphological Mapping; the Case Study of Mount Hymettus, Athens, Greece.* – In: Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series 18 (1), 23-32.

Sookhan, S.; Eyles, N. & **Putkinen, N. (2016)**: *LiDAR-based volume assessment of the origin of the Wadena drumlin field, Minnesota, USA*. – In: Sedimentary Geology 338, 72-83.

Stahr, K.; Kandeler, E.; Herrmann, L. & **Streck, T. (³2016)**: *Bodenkunde und Standortlehre*. Stuttgart-Hohenheim: Ulmer.

Steinbach, D. (2019): *Alter Wein in „digitalen" Schläuchen?. Einsatz digitaler Lernprodukte im Geographieunterricht*. – In: Praxis Geographie 49 (12-2019), 48-53.

Steiner, C. (2009): *Materie oder Geist? Überlegungen zur Überwindung dualistischer Erkenntniskonzepte aus der Perspektive einer Pragmatischen Geographie.* – In: Berichte zur dt. Landeskunde 84 (2), 129-142.

Steiner, C. (2015): *Mensch-Umwelt-Systeme in der Geographie – zur metatheoretischen Möglichkeit einer grundlegenden Systemkompetenz.* – In: Gryl, I.; Schlottmann, A. & Kanwischer, D. (Hrsg.): Mensch : Umwelt : System – Theoretische Grundlagen und praktische Beispiele für den Geographieunterricht. (Praxis Neue Kulturgeographie). Berlin u.a.: LIT, 23-42.

Steinhardt, U.; Barsch, H. & **Blumenstein, O. (²2012)**: *Lehrbuch der Landschaftsökologie.* Heidelberg: Spektrum.

Stepišnik, U.; Klun, M.I. & **Repe, B. (2017)**: *Assessment of Educational Potential of Geodiversity on Example of Cernika Polja, Slovenia.* – In: Dela 47, 23-39.

Stokes, C. R.; Tarasov, L. & **Dyke, A. S. (2012)**: *Dynamics of the North American Ice Sheet Complex during its inception and build-up to the Last Glacial Maximum.* – In: Quaternary Science Reviews 50 (2012), 86-104.

Stokes, C. R.; Fowler, A. C.; Clark, C. D.; Hindmarsh, R. C. & **Spagnolo, M. (2013)**: *The instability theory of drumlin formation and its explanation of their varied composition and internal structure*. – In: Quaternary Science Reviews 62 (2013), 77-96.

Strahler, A. & **Strahler, A. (³2005)**: *Physische Geographie.* Stuttgart-Hohenheim: Ulmer.

Syrbe, R.-U. (1999): *Raumgliederungen im mittleren Maßstab.* In: Zepp, H. & Müller, M. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Erfassungsstandards*. (Forschungen z. dt. Landeskunde). Flensburg, 463-489.

Syrbe, R.-U. (2002): *Kapitel 3.1, 3.4, &3.5* – In: Haase, G. & Mannsfeld, K. (Hrsg.): *Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen*. Dt. Akademie für Landeskunde. (Forschungen z. dt. Landeskunde, Bd. 250) Flensburg: Selbstverlag.

Syrbe, R.-U. (2004): *Das Recherchesystem für die Naturräume des Freistaates Sachsen.* – In: J. Strobl, T. Blaschke und G. Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2004, Beiträge zum 16. AGIT-Symposium Salzburg. Heidelberg: Wichmann, 680-689.

Syrbe, R.-U. (2005): *Die Naturraumkarte des Freistaates Sachsen.* – In: Landschaftsgliederungen in Sachsen. Mitteilungen des Landesvereins Sächsischer Heimatschutz e.V., Sonderheft 2005, 9-24.

Thierer, A. & **Alle, M. (2017)**: *WebGIS und digitale Orientierung*. Materialien zur Lehrer-Fortbildung des RP Tübingen am 21. Feb. 2017 am Albert-Einstein-Gymnasium Ulm. (unveröff.)

Travis, M.R., Elsner, G.H., Iverson, W.D. & **Johnson, C.G. (1975)**: *VIEWIT: computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning*. – In: Report PSW-11. Berkeley, CA.

Vapnik, V.N. (1995): *The nature of statistical learning theory.* New York, NY: Springer.

Vapnik, V.N. (1999): *An overview of statistical learning theory.* – In: Neural Networks, IEEE Transactions 10 (5), 988–999.

Vasconcelos, V.V.; Koontanakulvong, S.; Suthidhummajit, C.; Martins Jr., P.P. & **Hadad, R.M. (2017)**: *Analysis of spatial–temporal patterns of water table change as a tool for conjunctive water management in the Upper Central Plain of the Chao Phraya River Basin, Thailand.* – In: Applied Water Science 7 (1), 245-262.

Vetter, M; Barnikel, F.; Pingold, M. & **Plötz, R. (2012)**: *Untersuchung zur Verwendung digitaler und analoger Karten im Erdkundeunterricht unter besonderer Berücksichtigung der Raumorientierung*. – In: Hüttermann, A.; Kirchner, P.; Schuler, S.; Driehling, K. (Hrsg.): Räumliche Orientierung. Räumliche Orientierung, Karten und Geoinformation im Unterricht. Braunschweig: Westermann, 227-241.

Walz, U.; Hoechstetter, S.; Drăguţ, L. & **Blaschke, T. (2016)**: *Integrating time and the third spatial dimension in landscape structure analysis*. – In: Landscape Research 41 (3), 279-293.

Wardenga, U. (1995): *Geographie als Chorologie. Zur Genese und Struktur von Alfred Hettners Konstrukt der Geographie*. Stuttgart: Steiner.

Wehberg, J.; Bock, M.; Weinzierl, T.; Conrad, O.; Böhner, J.; Stellmes, M. & **Landschreiber, L. (2013)**: *Terrain-based Landscape Structure Classification in Relation to Remote Sensing Products and Soil Data for the Okavango Catchment* – In: Biodiversity and Ecology 5, 221–233.

Wood, J. (1996): *The geomorphological characterization of digital elevation models.* (PhD Thesis Univ. of Leicester) Leicester.

Yu, P.; Eyles, N. & **Sookhan, S. (2015)**: *Automated drumlin shape and volume estimation using high resolution LiDAR imagery (Curvature Based Relief Separation): A test from the Wadena Drumlin Field, Minnesota.* – In: Geomorphology 246 (2015), 589–601.

Žabota, B.; Repe, B. & **Kobal, M. (2018)**: *Influence of digital elevation model resolution on rockfall modelling*. – In: Geomorphology 328, 183-195.

Zepp, H. & **Müller, M. (1999)**: *Landschaftsökologische Erfassungsstandards. Ein Methodenbuch*. Dt. Akademie für Landeskunde. Flensburg: Selbstverlag.

Internetquellen

Alle, M. & **Schwab, A. (2017)**: *Semiautomatisierte Modellierungen der Naturräume im Alpenvorland Oberschwabens*. – 60. Dt. Kongress für Geographie. Tübingen, http://bit.ly/2VFqJVb. (Zugriff: 20.7.2021)

Filderstadt (2018): *Landschaftsplan 2030 – Entwurf*, erstellt von der Gruppe für ökologische Gutachten (GÖG) Detzel & Matthäus, Stuttgart, https://www.filderstadt.de/site/Filderstadt-Internet-2019/get/params_E62736152/15041538/LP%202030%20Begr%C3%BCndung%20Entwurf%2014-09-2018.pdf (Zugriff: 17.7.2021)

GO (2021) – Gesellschaft Oberschwaben, http://www.gesellschaft-oberschwaben.de/cms/ (Zugriff: 25.6.2021)

IBBW (2021) – Institut für Bildungsanalysen Baden-Württemberg: Landesbildungsserver – Fachportal Geographie, Desktop-GIS – https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/gesellschaftswissenschaftliche-und-philosophische-faecher/geographie/material/geographische-informationssysteme/desktop-gis (Zugriff: 27.7.2021)

Jenness, J. (2006): *Topographic Position Index (TPI) v.1.3a. – TPI_Documentation.pdf.* – http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm (Zugriff: 30.7.2021).

Landschaftspark Bodensee-Oberschwaben (2003): *Gesamtdarstellung*, erstellt von FUTOUR und HAGE+HOPPENSTEDT PARTNER, München / Rottenburg, http://www.hhp-raumentwicklung.de/materialien/up/LP_BO/Gesamtdarstellung.pdf (Zugriff: 17.6.2021).

Lary, D.J. (2010): *Artificial Intelligence in Geoscience and Remote Sensing* – In: Imperatore, P. & Riccio, D. (Eds.) Geoscience and Remote Sensing, New Achievements. Vukovar / Napoli. - https://dl.gisman.ir/Ebooks/Free/2010/Geoscience_and_Remote_Sensing_New_Achievements_www.GISman.ir.pdf (Zugriff: 13.7.2021)

LUBW-Daten- und Kartendienst (2021), https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/ (Zugriff: 4.6.2021)

OP (2021) – Oberschwaben-Portal, Lernmodule zur Geographie und Geomorphologie, http://www.oberschwaben-portal.de/elomm.html (Zugriff: 4.6.2021)

RVBO (2021) – Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, https://www.rvbo.de/ (Zugriff: 9.6.2021)

Schwab, A. & **Meiershofer, S. (2015)**: *Das oberschwäbische Gewässernetz*. Weingarten, Online-Lernmodul www.oberschwaben-portal.de (Zugriff: 17.2.2020)

Weiss, A. D. (2000): *Topographic Position and Landforms Analysis*. http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf (Zugriff: 16.4.2020)

8 Anhang

Übersicht

I. Übersicht über die Daten-DVD im Anhang

II. OBTA-Landschaftsklassen (2. Ebene) → Naturraum-IDs

III. OBTA-Groß-Landschaftsklassen (3. Ebene) → Naturraum-IDs

IV. Zuordnung: Naturraum-IDs

V. Vergleich Naturräume (GRAUL und Kollegen) mit OBTA-Landschaften

VI. Lernmodule zum BaWü-GIS – Arbeitsblätter

I. Übersicht über die Daten-DVD im Anhang

1. Digitale Version dieser Arbeit [Dissertation_Markus_Alle_2021.pdf]
2. Karten
   - I. Übersichtskarte – Relief des Untersuchungsgebiets
   - II. Ergebniskarten
     - a) OBTA-Ebene 1
     - b) OBTA-Ebene 2
     - c) OBTA-Ebene 3
   - III. Räumliche Dichte kuppig-hügeliger Till-Landformen und Endmoränenformen im Untersuchungsgebiet
   - IV. Naturräume im Untersuchungsgebiet nach GRAUL und Kollegen
   - V. Übereinstimmungskarte: Naturräume vs. OBTA-Ebenen 2 und 3
3. BaWü-GIS mit sämtlichen Geodaten

II. OBTA-Landschaftsklassen (2. Ebene) → Naturraum-IDs

Tab. 7: Übersetzungstabelle: OBTA-Klassifikation → Naturräumliche Gliederung (nach GRAUL 1952, HUTTENLOCHER 1959, BENZING 1964 & DONGUS 1991).

Landschaftsklasse (OBTA – 2. Ebene)	**Naturraum-ID** (GRAUL und Kollegen)
Becken JML	1
Schotter im Becken JML	2
Moorflächen im Becken JML	3
Kuppig-hügelig im Becken JML	4
Becken AML	10
Schotter im Becken AML	11
Moorflächen im Becken AML	12
Schmelzwasserrinnen AML	13
Kleines Becken / Tal	20
Kuppig-hügelig in Kl. Becken / Tal	21
Steile Kerbtäler / Tobel	22
Flachwellige Till-Landschaft AML	30
Endmoränen-Landschaft	40
Flachwellige Till-Landschaft JML	41
Kuppig-hügelige Till-Landschaft	42
Schotter-Ebene	98
Molasse-Bergland	99

III. OBTA-Großlanschaftsklassen (3. Ebene) → Naturraum-IDs

Tab. 8: Übersetzungstabelle: OBTA-Klassifikation → Naturräumliche Gliederung (nach GRAUL 1952, HUTTENLOCHER 1959, BENZING 1964 & DONGUS 1991).

Groß-Landschaftsklasse (OBTA – 3. Ebene)	**Naturraum-ID** (GRAUL und Kollegen)
Ebene	1
Becken-Landschaft	2
Tal-/Kleine Becken-Landschaft	3
Till-Landschaft	4
Molasse-Bergland	5

IV. Zuordnung: Naturraum-IDs

Tab. 9: Übersetzungstabelle: Naturräume (nach GRAUL 1952, HUTTENLOCHER 1959, BENZING 1964 & DONGUS 1991) zu OBTA-IDs (2. Ebene).

Naturraum (nach GRAUL und Kollegen)	**Zusatz-Info**	**ID**
Tettnanger Drumlinfeld	Kuppig-hüg. Till-Landformen	42
Südliche Schussenbecken-Terrasse		0
Südöstliche Schussenbecken-Terrasse	Anthropogene Strukturen	0
Terrassen, Auen u. Deltas von Rotach, Schussen u. Argen		20
Südwestliche Schussenbecken-Terrasse		0
Reitnauer Drumlinfeld	Kuppig-hüg. Till-Landformen	42
Moränenwälle u. Drumlins v. Esseratsweiler-Wolfertshofen		42
Oberteuringer Drumlinrücken	Kuppig-hüg. Till-Landformen	42
Meersburger Drumlinrücken	Kuppig-hüg. Till-Landformen	42
Nordwestliche Schussenbecken-Randterrasse		0
Neukircher Moränenwälle und Drumlins	Kuppig-hüg. Till-Landformen	42
Mittleres Argental		40
Nordöstliche Schussenbecken-Randterrasse		0
Terrasse von Amtzell		0
Nördliches Leiblachbecken		40
Umfließungsrinne von Obereisenbach		20
Tal der Oberen Argen		20
Ratzenrieder Moränenwälle und Drumlins	Endmoränenformen IWEM	42
Tal der Unteren Argen		20
Berger Höhe		0
Wangener Terrasse		98
Becken von Karbach		40
Beurener Zungenbecken	Große Moorflächen	14
Jungendmoränen von Beuren-Isny-Auers	Endmoränenformen AeWEM	40
Insyer Zungenbecken	Große Moorflächen	14
Zungenbecken und Moränenwälle von Kißlegg	Große Moorflächen; IWEM	0
Nördliche Schussenbecken-Randterrasse		0
Föhrenried		0
Rinkenburger Hügelland	Endmoränenformen IWEM	30
Röschenwald		0
Durlesbacher Tobel		22
Kümmerazhofer Wald		0
Erbisreuter Moorsenke		0
Südlicher Altdorfer Wald	Endmoränenformen AeWEM	40
Tobel der Wolfegger Ach		22
Homberg-Höchsten	Flachwellig, Tobel	41
Becken von Altshausen-Waldsee		20
Gehrenberg		1
Heiligenberg-Höchster Bergland		41
Tobel von Deggenhausen	Deggenhauser Aach	22
Umfließungsrinne Markdorf-Frickingen		20

Naturraum (nach GRAUL und Kollegen)	**Zusatz-Info**	**ID**
Arnacher Jungendmoränen	Endmoränenformen AeWEM	40
Ziegelberg	Endmoränenformen AeWEM	41
Becken von Gospoldshofen		10
Haidgauer Heide		11
Waldseeer Jungendmoränen		40
Riedtal		98
Weites Ried		98
Mühlhausener Platte		98
Wilhelmsdorfer Zungenbecken und Pfrunger Ried	Gr. Moorfl., anthr. Strukturen	3
Ilmenseebecken		20
Altmoränenplatten um das Wurzacher Ried	Flachwellige Till-Landformen	30
Tal der Wurzacher Ach		20
Leutkircher Heide	Anthropogene Strukturen	98
Südliches Leiblachbecken		20
Jungendmoränen von Beuren-Isny-Auers	Endmoränenformen AeWEM	40
Rinne von Altmannshofen-Großholzleute		13
Rinnen von Grünenbach und Wengen		20
Friesenhofener Terrasse		0
Hohe (Südliche) Adelegg	Molasse-Bergland	99
Nordwestliche Adelegg	Molasse-Bergland	99
Wuchzenhofener Schotterplatten und Moränen		30
Sonneneck, Riedholzer Kugel und Laubenberg		99
Haslach Platten	Flachwellige Till-Landformen	30
Erolzheimer Feld		30
Oberes Illergrieß		30
Illerbeurer Illertal		20
Jungendmoränen des Wagenharts u. der Atzenberger Höhe		40
Überlinger Hügelland	Kuppig-hüg. Till-Landf.; Tobel	42
Stockacher Bergland	Molasse-Bergland, Tobel	99
Andelsbachplatten	Anthropogene Strukturen	30
Selgetsweiler-Aach-Linzer Moorsenke	Große Moorflächen; AeWEM	20
Oberlinzgauer Hügelland	IWEM, Eisrandlagen	0
Jungendmoränen von Pfullendorf	Endmoränenformen AeWEM	40
Fulgenstädter Platten		30
Ostrachrinne	Anthropogene Strukturen	13
Fulgenstätter Platten		30
Schwarzachtal	Große Moorflächen	13
Kanzachplatten	Reliktische Drumlins (Riß)	30
Niederterrasse östlich von Mengen		10
Riedlinger Becken	Würmzeitliche Schotter	10
Östliche Hegau-Alb		0
Denkinger Platten		30
Wurzacher Ried	Gr. Moorfl., anthr. Strukturen	12
Sigmaringer Talweitung	Schmelzwasserrinne	0
Altmoränen nördlich der Donau		30
Heiligenberg		99

V. Vergleich Naturräume (Graul und Kollegen) mit OBTA-Landschaften

Der Vergleich erfolgte auf der 3. OBTA-Klasse (Landschaften).

Die **zweite** und **dritte** Spalte zeigen jeweils die Zahl der Punkte und den entsprechenden Anteil, die insgesamt pro Klasse ermittelt wurden.

Die **vierte** Spalte gibt die Zahl der in beiden Klassifikationen übereinstimmenden Punkte pro Klasse an.

Spalten **fünf** und **sechs** zeigen den jeweiligen Anteil an der zugehörigen Klassifikation.

Tab. 10: **Vergleichsdaten: Naturräume und OBTA-Landschaften**.

Bezeichnung (Klasse)	Punkte (Natur-räume)	Anteil	Punkte (OBTA)	Anteil	Überein-stimmung	Anteil Naturräume	Anteil an OBTA
Ebenen (1)	104	1,04%	303	3,03%	54	51,92%	18,43%
Becken (2)	1.967	19,67%	2.041	20,41%	1227	62,38%	60,12%
Täler (3)	1.075	10,75%	1.646	16,46%	514	47,81%	31,23%
Till (4)	5.424	54,24%	5.572	55,72%	4538	83,63%	81,41%
Molasse (5)	442	4,42%	437	4,37%	282	63,80%	64,53%
K. Ü.(0)	988	9,88%	1	0,01%	0	0%	0%
GESAMT	10.000	100%	10.000	100%	6615		

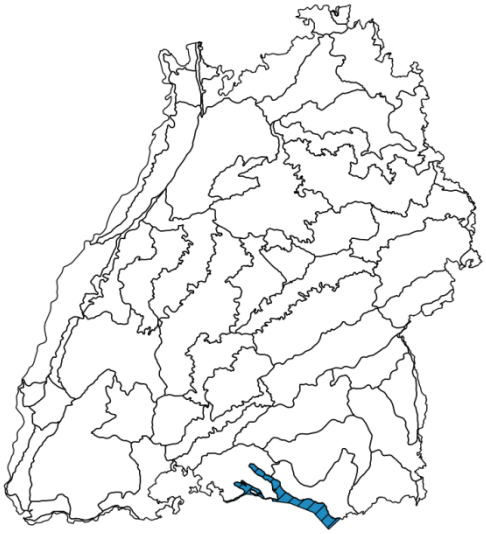
(K. Ü. = Keine Übereinstimmung)

VI. Lernmodule zum BaWü-GIS – Arbeitsblätter

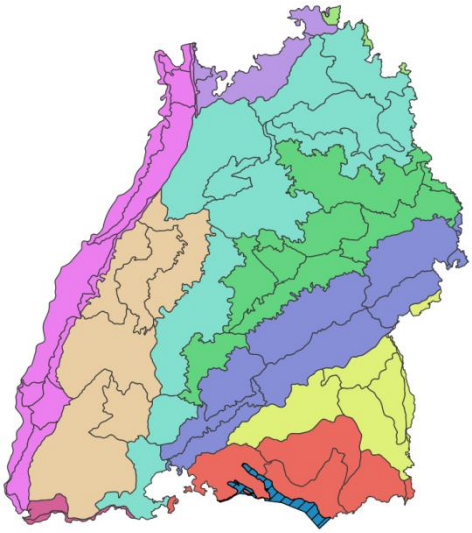
Übersicht:

(1) Übersicht - Geodaten im BaWü-GIS (*Lehrer*innen*)
(2) Übersicht - QGIS- & Datendownload, Installation QGIS, Öffnen von Geodaten (*Lehrer*innen*)
(3) AB – Schichstufenlandschaft (Profilskizze VS → TUT) (*Kursstufe*)
(4) AB - Alpenvorland – Glaziale Landformen prägen Landschaften (*Kursstufe*) [4 S.]
(5) AB - Differenzierung: Vergleich mit hochauflösenden Oberflächendaten (*Kursstufe*)
(6) AB - Die Landschaften Baden-Württembergs mit QGIS analysieren (*Kl. 5*) [5 S.]

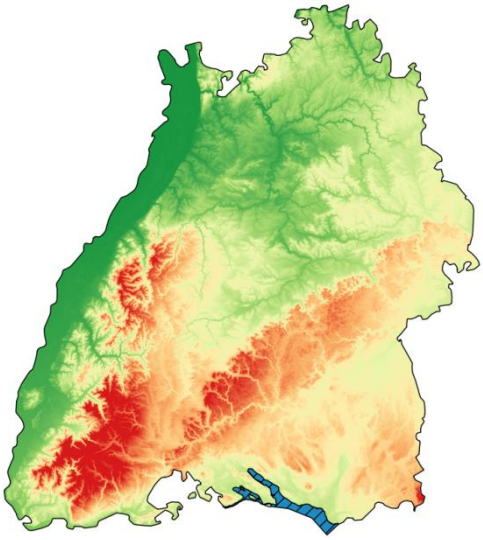
(1) Übersicht Geodaten im BaWü-GIS *(Lehrer*innen)*



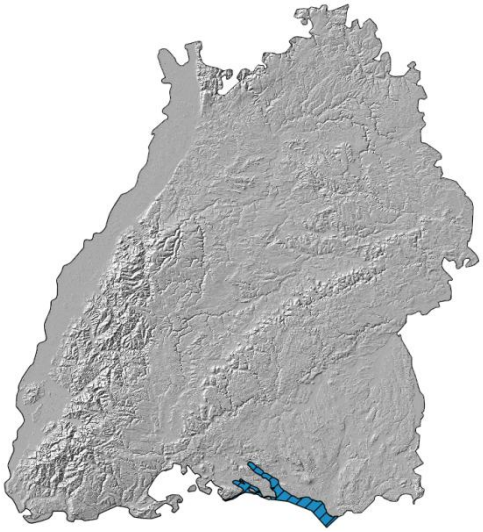
1: Naturräume (4. Ordnung)



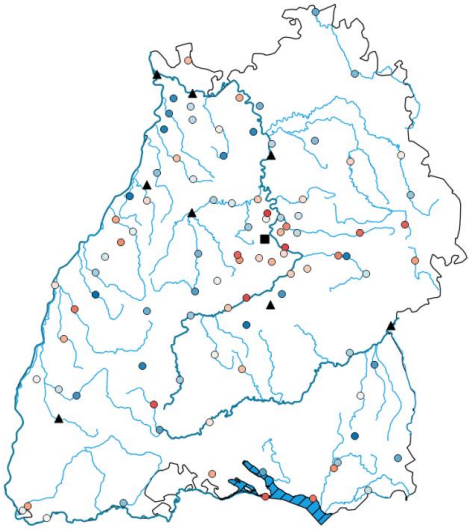
2: Großlandschaften (3. Ord. zum Vergleich)



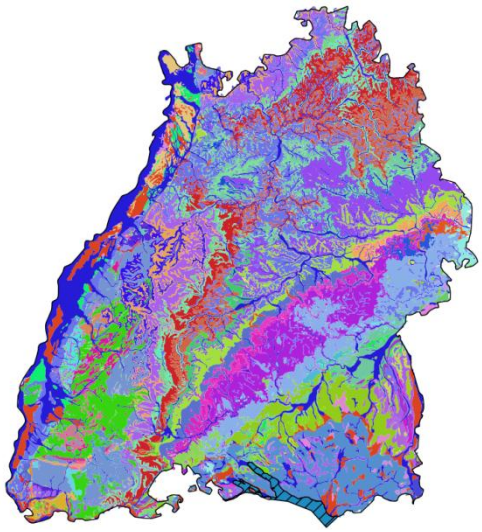
3: DGM 90



4: Schummerung



5: Flusssysteme und Städte



6: Geologische Haupteinheiten

(2) *Übersicht* QGIS-Download, Installation & erstes Starten, Geodaten- & WMS-Download & laden in QGIS *(Lehrer*innen)*

a) **Download & Installation von „QGIS“** – (Kostenfreie und open-source Software)

Es bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

1. Download einer ***Desktop-Version***. Diese ist auf dem PC zu installieren und kann nur dort genutzt werden. Dazu doppelklicken Sie die heruntergeladene Datei und folgen dem Installationsprogram.

   → **Version 3.4.11** *„Madeira“* – *https://qgis.org/downloads/QGIS-OSGeo4W-3.4.11-1-Setup-x86_64.exe*

2. Download einer ***portablen Version***, welche z.B. von einem USB-Stick gestartet werden kann. Hierbei ist keine Installation notwendig – die heruntergeladene Software ist direkt einsatzfähig. Die heruntergeladene Datei ist gezippt. Vor dem Start ist sie zunächst zu entpacken: Rechtsklick auf die Zip-Datei > 7-Zip > „Entpacken nach …“ (Ordner) wählen > Software aus dem gewählten Ordner starten.

   → **Version 2.14.0** *„Essen“* (portable) – *http://pkg.sourcepole.ch/download/QGIS-Portable-CH.zip*

(Zugriff: 24.5.2020)

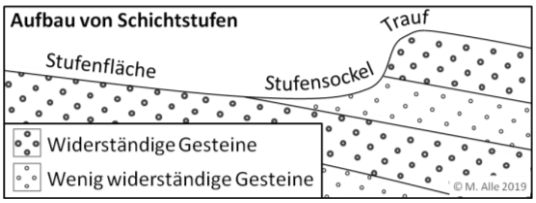
b) **Erstes Starten von QGIS**

1. Bei der ***Desktop-Version*** befindet sich entweder ein Symbol (ein sogenannter Icon) auf dem Desktop, das doppelgeklickt wird, oder Sie finden den Icon unter Start > Programme > QGIS.
2. Beim Nutzen einer ***portablen Version*** ist im heruntergeladenen Ordner mit der Software die Datei „qgis.bat“ doppelzuklicken. Hier kann es beim ersten Starten bis zu zwei Minuten dauern (künftige Starts erfolgen dann aber schneller – also nicht verzweifeln!)

c) **Geodaten-Download –** (Direktlinks zum Datendownload)

1. **DGM 90 –** SRTM 2021 - *http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/*
2. **Schummerungs-Darstellung –** abgeleitet aus dem DGM 90 (SRTM)
3. **Geologische Haupteinheiten –** LGRB BW 2021 – *http://maps.LGRB BW-bw.de/*
4. **Naturräume** (auf Basis von MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962, 3. & 4. Ordnung)
   LUBW 2021 – *https://t1p.de/k869*
   (Grundlage: Daten aus dem Umweltinformationssystem (UIS) der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg).
5. **Flusssysteme (> 40 km Länge) –** LUBW 2020 – *https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/api/navigatorurl/show?globalId=naturLand.Naturr%C3%A4ume.nais%3A%24SYSTEM%7BCADENZAWEB_GEODOWNLOAD%7Did%3D7*
   (Grundlage: Daten aus dem Umweltinformationssystem (UIS) der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg).
6. **Städte (> 20.000 Einwohner) –** Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2020 – *http://sg.geodatenzentrum.de/web_download/vg/vg250-ew_3112/gk3/shape/vg250-ew_3112.gk3.shape.ebenen.zip* © GeoBasis-DE / BKG 2021 (Daten verändert).

(3) Schichtstufenlandschaft – Profilskizze VS → TUT *(Kursstufe)*



Bei der Entstehung der ***Schichtstufenlandschaft*** sind ***endogene*** und ***exogene Prozesse*** beteiligt. Im ***BaWü-GIS*** finden Sie dazu zwei Datensätze: ***Schichstufenland-Gebiet*** und ***Profil_VS_TUT***.

→ Aktivieren Sie beide Dateien und zoomen Sie auf das Schichtstufenland-Gebiet. Stellen Sie unter der Datenanzeige den ***Längenmaßstab 1:200.000*** ein. Nutzen Sie zusätzlich das ***DGM 90***, die ***Schummerung*** sowie die ***Geologischen Haupteinheiten***, indem Sie mit dem **Info-Button** die jeweiligen Höhen und Einheiten entlang der Profillinie abfragen.

(Die Entfernung zwischen Villingen-Schwenningen (VS) und Tuttlingen (TUT) beträgt ca. 28 km.)

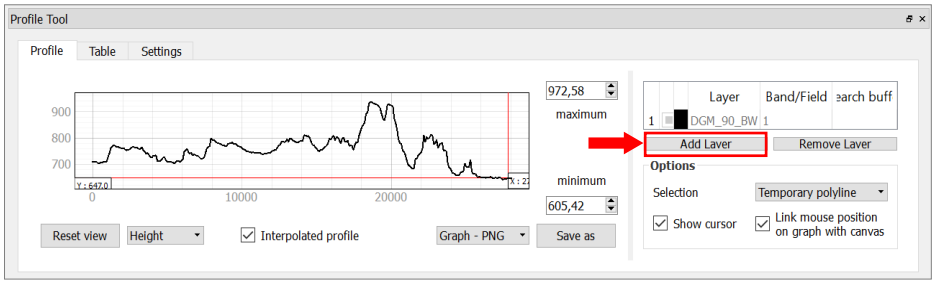
Arbeitsaufträge (Einzel-/Partnerarbeit):

1. Erstellen Sie mit QGIS ein Höhenprofil (VS → TUT) nach der *Anleitung* unten.
2. Übertragen Sie das Höhenprofil grob auf die *Vorlage* unten (*Höhenmaßstab 1:10.000*).
3. Verzeichnen Sie wichtige geologische Schichten und tragen Sie die wichtigsten Oberflächenformen ein und erklären Sie deren Entstehung.

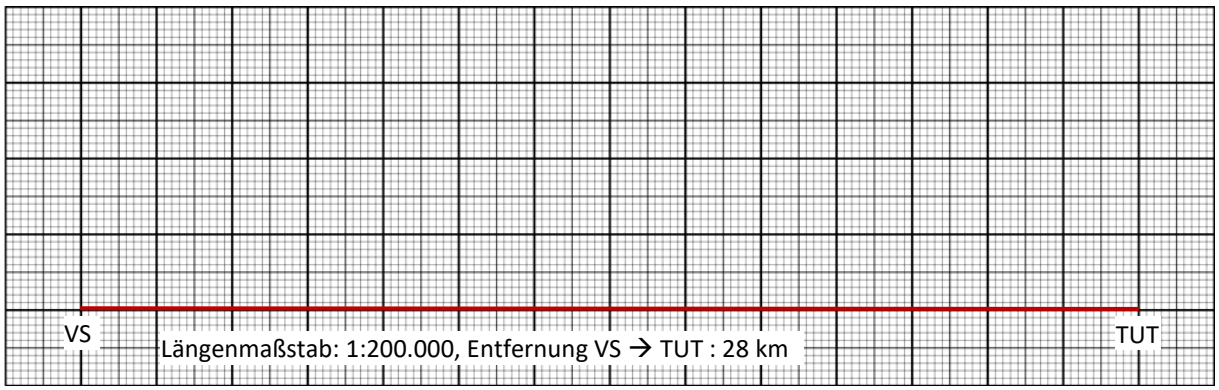
Anleitung: Erstellen eines automatischen Höhenprofils (VS → TUT) mit QGIS

→ Führen Sie einen Rechtsklick auf die Leiste **Veränderung der Daten (3)** aus und setzen Sie im Dropdownmenü einen Haken bei der ***Erweiterungswerkzeugleiste*** (unter der Rubrik ***Werkzeugkästen***). Nun erscheinen in der Veränderungsmenü einige neue Buttons.

→ Öffnen Sie die Routine **Terrain profile** . Erstellen Sie eine Linie von VS nach TUT. Ein Doppeklick beendet die Linienoperation. Wählen sie im **Verwaltungsmenü (2)** das ***DGM 90*** aus und klicken im Menü **Profile Tool** den Button ***Add Layer***. Nun erscheint das erstellte Höhenprofil.



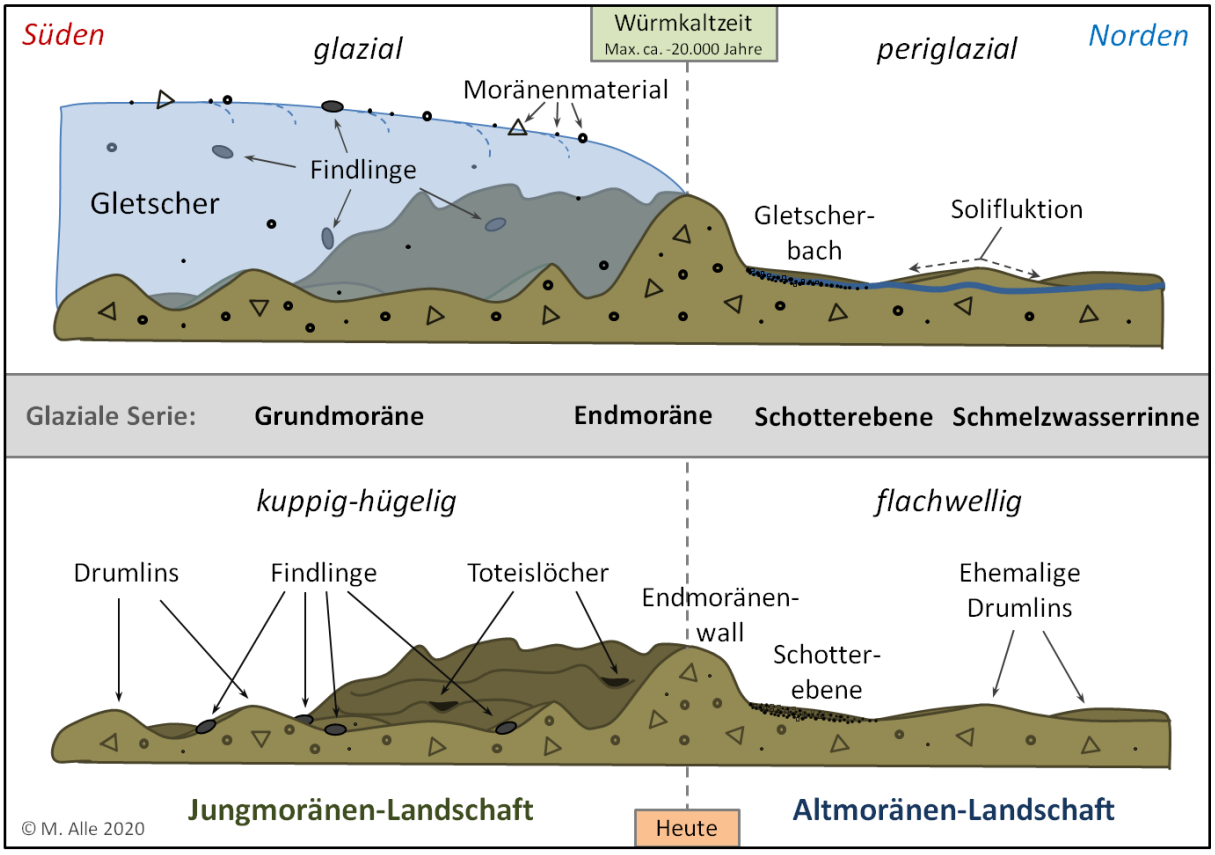
Vorlage: Profilskizze VS → TUT



(4) Alpenvorland – Glaziale Landformen prägen Landschaften *(Kursstufe)*

Das Alpenvorland wurde während der letzten gut 2 Millionen Jahre von mehreren ***Kaltzeiten*** geprägt. Während dieser drangen die Gletscher aus den Alpen weit in ihr Vorland vor. Sie hinterließen bis heute sichtbare ***glaziale*** Landformen wie ***Zungenbecken*** mit Mooren, ***Findlinge***, ***Drumlins***, ***Toteislöcher***, ***Endmoränenwälle*** sowie ***Schotterebenen*** und ***Schmelzwasserrinnen***. Das Modell der ***Glazialen Serie*** (siehe Abbildung unten) zeigt dies anschaulich.

Die Bereiche, welche von den Gletschern der letzten Kaltzeit (Würm) geprägt wurden, nennt man ***Jungmoränenlandschaft***. Alle älteren, weiter nördlich gelegenen, einst ebenfalls vergletscherten Gebiete werden ***Altmoränenlandschaft*** genannt. Sie wurden während der Würmzeit nicht mehr von den Eismassen überfahren. Hier herrschten ***periglaziale*** Bedingungen mit ***Permafrost***-Böden und ***Solifluktions***-Prozessen (sogenanntes „Bodenfließen"), welche die einst kuppig-hügelige Landschaft mit Drumlins in eine flachwellige verwandelten. Dabei werden die obersten Bodenschichten Stück für Stück hangabwärts transportiert. Die folgende Abbildung verdeutlicht glaziale und periglaziale Prozesse und die heutige Situation.



Seit ca. 11.700 Jahren herrschen in ganz Süddeutschland ***postglaziale*** Bedingungen. Die ***warmzeitliche*** Periode wird Holozän genannt und dauert bis heute an.

Einige der Landformen sind im DGM erkennbar und können mit Hilfe von GIS erfasst werden. Sie prägen die ***Glaziallandschaft***. Während der folgenden Übungen analysieren Sie digital die Teillandschaften des baden-württembergischen Alpenvorlands anhand ihrer Oberflächenformen und geologischen Einheiten. Zum Schluss vergleichen Sie ihre Teillandschaften mit der offiziellen Einteilung.

(4) Alpenvorland – Glaziale Landformen prägen Landschaften *(Kursstufe)*

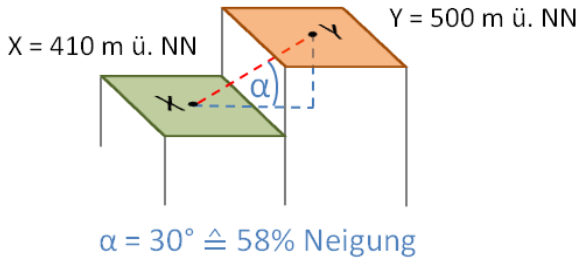
Arbeitsaufträge: Ziel ist die **Erfassung glazialer Landformen / Landschaften**.

1. Informieren Sie sich auf dem ***Oberschwabenportal*** über die Landschaftsgeschichte des Alpenvorlands. → Bearbeiten Sie dazu Lernmodule „**Vielfalt der Landschaftsformen**“ und „**Das südliche Oberschwaben**“. [http://oberschwaben-portal.de/lernmodule.html]
2. Arbeiten Sie nun mit dem ***BaWü-GIS*** und folgenden **GIS-Daten** (DGM 90, Schummerung, geologische Haupteinheiten). Entscheiden sie selbst, welche Daten Sie wie nutzen. (*Verändern Sie hierzu die Layer-Transparenz → Doppelklick auf Layer > Transparenz*) → Erfassen Sie damit typische glaziale Landformen (aufgrund von Form und / oder Nachbarschaft).
3. Zeichnen Sie die erfassten glazialen Landformen / Landschaften farbig in die ***Karte*** (*AB 5*) ein und erstellen Sie dazu eine passende ***Legende***.
4. Lassen Sie in QGIS die ***Hangneigung*** für Baden-Württemberg berechnen und nutzen Sie diese für Ihre weiteren Analysen. (*Hintergründe & Anleitung → **Extrablatt** zu AB 5*)
5. Notieren sie in der ***Tabelle*** unten, welche Geodaten bei der Einteilung hilfreich waren
6. Vergleichen Sie danach ihre Ergebnisse mit den offiziellen Teillandschaften (Naturräumen). Dazu laden Sie die Datei ***BW_Großlandsch_3_Ord***.
7. Arbeiten Sie Gemeinsamkeiten / Unterschiede zu Ihrer Einteilung heraus und notieren sie diese in der ***Tabelle*** in der Spalte ***Weitere Notizen***.

Landform / Landschaft	Hilfreiche Geodaten bei der Erfassung	Weitere Notizen
Drumlinfelder / kuppig-hügelige Landschaft		
Endmoränen		
(Zungen-)Becken		
Schotterebenen		
Schmelzwasserrinnen		

(4) *EXTRABLATT*: Hintergründe und Anleitung zur Berechnung der (Hang-)Neigung in QGIS *(Kursstufe)*

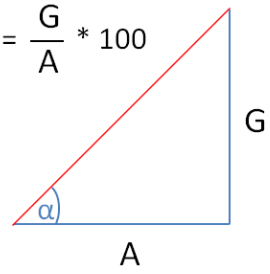
Die **Hangneigung** (eng. **Slope**) ist einer der wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Erdoberfläche und von Landformen. Mathematisch betrachtet stellt sie die Steigung (1. Ableitung) zwischen zwei benachbarten Geländepunkten dar. Die Hangneigung wird in QGIS auf Basis eines Digitalen Geländemodells berechnet. Die folgenden Abbildungen und Erklärungen verdeutlichen (vereinfacht) die Neigungsverhältnisse zwischen zwei benachbarten Pixeln.



Die **Punkte X** und **Y** entsprechen den **Mittelpunkten** der beiden Pixel. Der **Neigungswinkel** zwischen beiden entspricht der **Hangneigung**. QGIS berechnet die Neigung eines Pixels zu jedem der direkten 8 Nachbarpixel. Der größte Neigungswert wird anschließend als Hangneigung für das entsprechende Pixel eingesetzt.

$$\text{Neigung } [\%] = \frac{G}{A} * 100$$

$$\tan \alpha = \frac{G}{A}$$



G steht für die **Gegenkathete**, also den absoluten **Höhenunterschied** beider Punkte X und Y.

A steht für die **Ankathete**, also die **Pixelgröße**.

Für die Hangneigung gilt: Hohe Werte bedeuten steileres Gelände, niedrigere Werte bedeuten flacheres Gelände. Die folgende Anleitung zeigt Ihnen, wie Sie in QGIS die Hangneigung berechnen können.

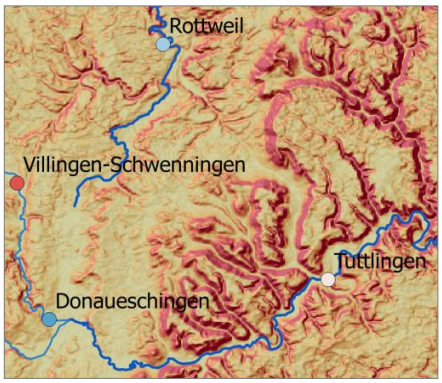
Anleitung: **Berechnung der (Hang-)Neigung Baden-Württembergs in QGIS**.

1. Wählen Sie in der Werkzeugleiste folgende Kombination: *Raster > Geländeanalyse > Neigung*
2. Im nun erscheinenden Fenster wählen Sie als …
   … *Geländehöhenlayer*: **DGM_90_BW** (alternativ DGM 25)
   … *Ausgabelayer*: **Neigung_90_BW** (bzw. Neigung_25_BW) (Speicherort: Ordner mit Arbeitsdaten)
   Behalten Sie alle weiteren Voreinstellungen bei und bestätigen mit OK. Nach kurzer Berechnung erscheint der neue Layer **Neigung_90_BW** (bzw. Neigung_25_BW) in [°].
3. Für das menschliche Auge ist eine farbliche Darstellung aussagekräftiger. Dazu doppelklicken Sie den Layer **Neigung_90_BW** (bzw. Neigung_25_BW), wählen *Stil > Einkanalpseudofarbe* aus.

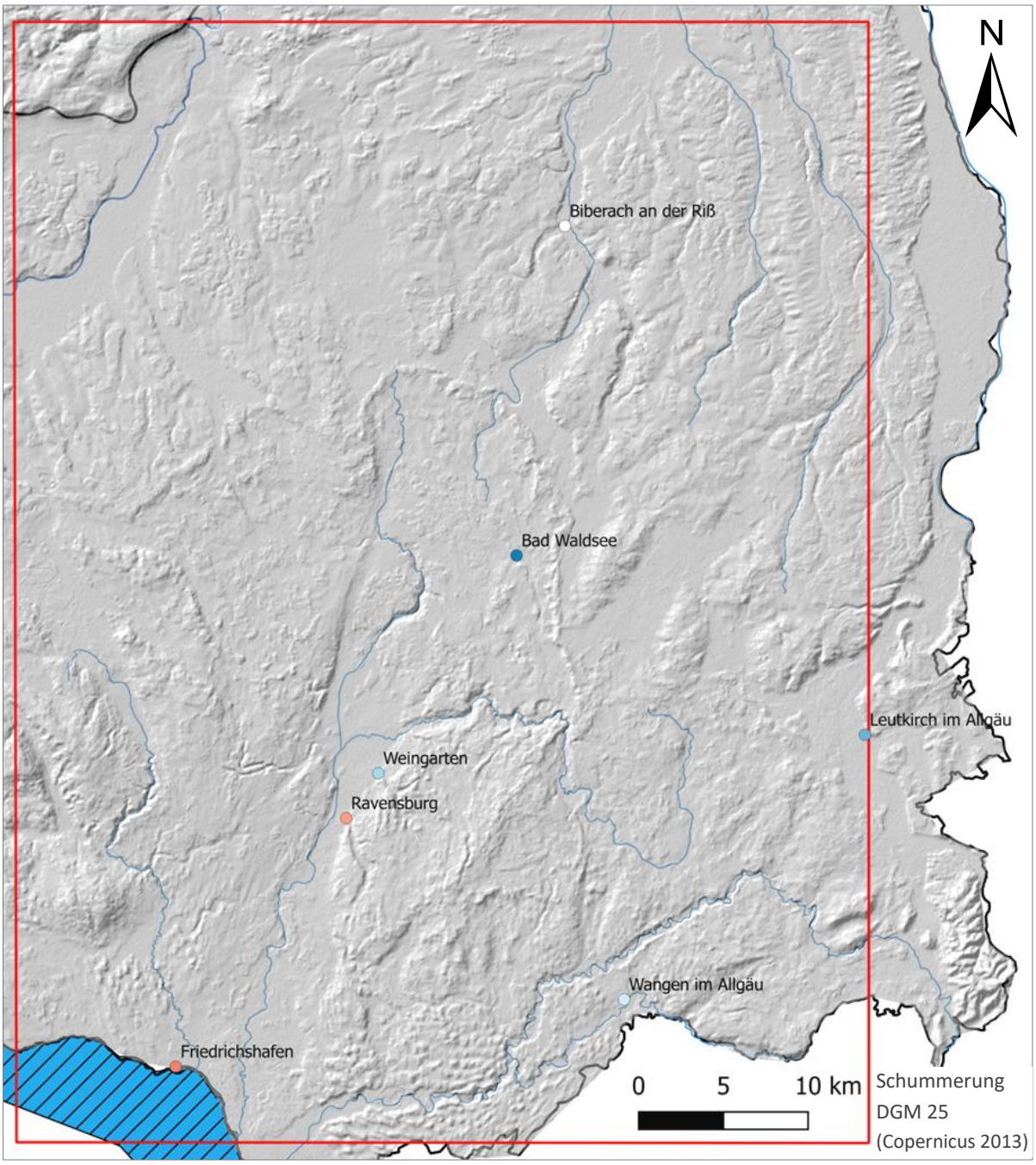
   Im selben Dialogfenster wählen Sie …
   … *Neue Farbabbildung generieren > YlOrRd*
   … *Modus: Gleiches Intervall, 16 Klassen*
   … *Ausdehnung: Aktuell > Laden > Klassifizieren (oben)*

   Bestätigen Sie mit OK. Nun erscheint eine farbige Darstellung der Hangneigung für Baden-Württemberg.

   Die Abbildung rechts zeigt die Neigungskarte für den Bereich zwischen Villingen-Schwenningen und Tuttlingen. Der Albtrauf weist z.B. hohe Neigungswerte (*rot*) auf.



(4) **Karte – Glaziallandschaft im südwestdeutschen Alpenvorland** *(Kursstufe)*



Legende:

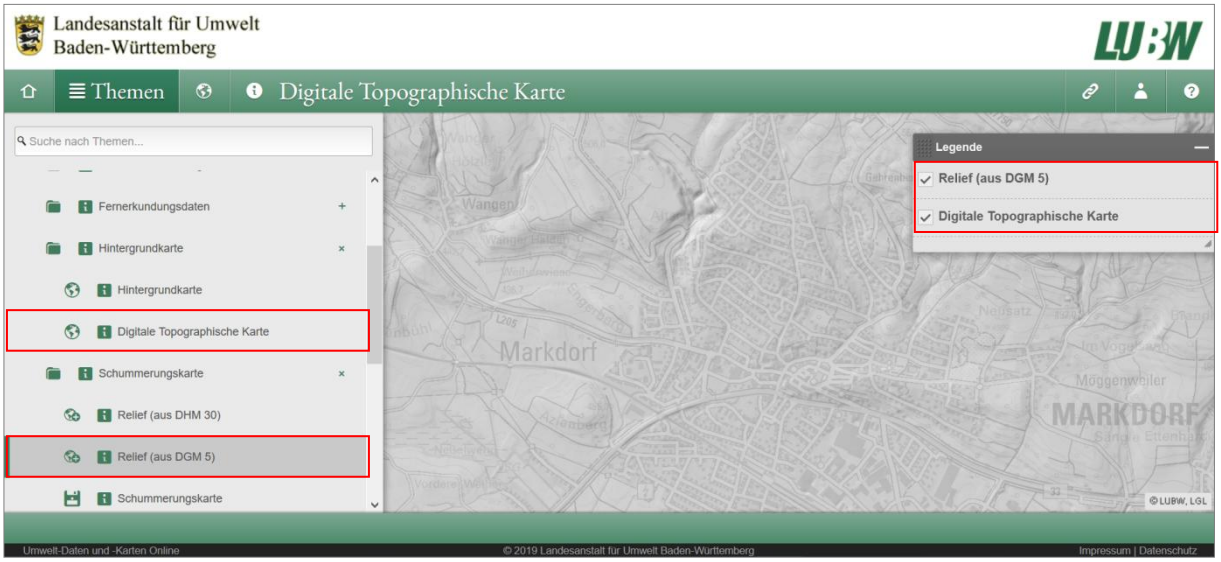
Drumlinfelder / kuppig-hügelig		Schotterebenen	
Endmoräne		Schmelzwasserrinnen	
(Zungen-)Becken		Jungmoränenlandschaft	
Altmoränenlandschaft			

Copernicus data and information policy Regulation (EU) No 1159/2013 of 12 July 2013. With funding by the European Union.

(5) *Angebot für Schnelle*: Vergleich mit hochauflösenden Daten *(Kursstufe)*

Arbeitsaufträge: Ziel ist der Vergleich Ihrer Landformen und Teillandschaften mit hochauflösenden Daten

1. Informieren Sie sich dazu beim ***Daten- und Kartendienst der LUBW*** in Regionen, in denen Sie noch unsicher sind.
   [*https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/index.xhtml#*
   ODER folgende Stichworte in Google eingeben: „*Kartendienst LUBW*“]
2. Wählen Sie dazu unter der Rubrik „Themen“ (siehe Abb. unten) folgende Layer aus:
   - Geobasisdaten > Schummerungskarte > **Relief (aus DGM 5)** und
   - Geobasisdaten > Hintergrundkarte > **Digitale Topographische Karte**.



Screenshot der Seite des Daten- und Kartendienstes der LUBW.
(Die relevanten Eingaben sind rot markiert. Zugriff: 13.1.2020)

(6) Großlandschaften Baden-Württembergs mit QGIS analysieren *(Kl. 5)*

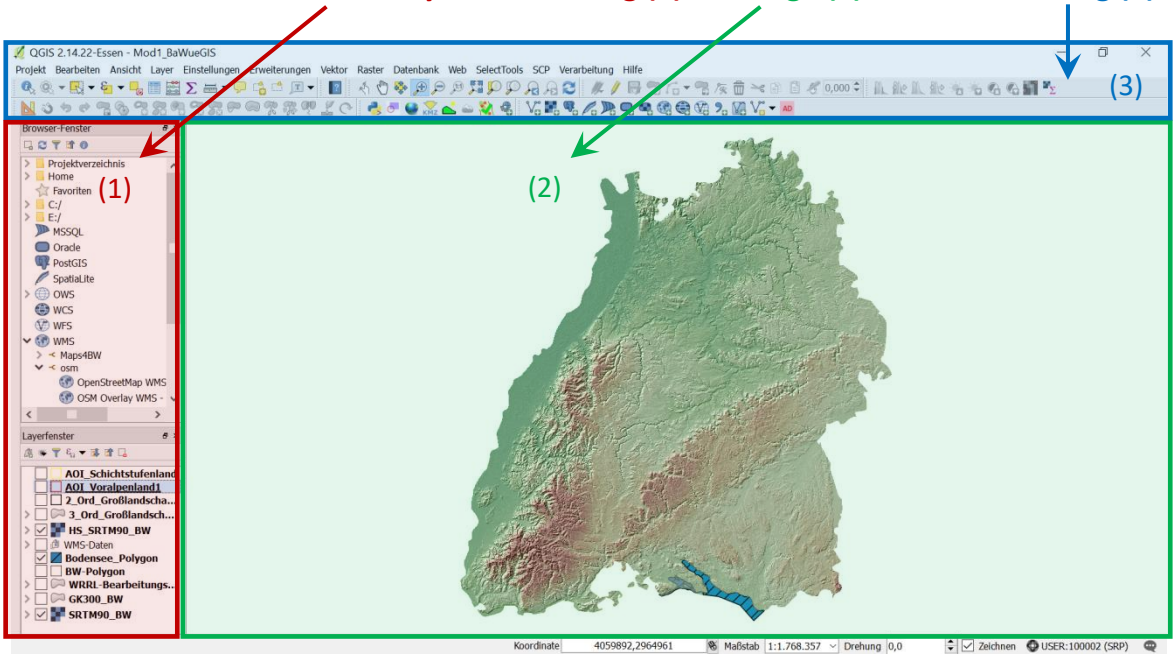
Baden-Württemberg besteht aus sehr abwechslungsreichen **Landschaften**. Dabei spielen **Landformen** wie **Hügel**, **Täler**, **Berge** oder **Ebenen** eine wichtige Rolle. Insgesamt geht es um 6 Landschaften in unserem Bundesland: *Alpenvorland*, *Schwäbische Alb*, *Schwäbisches Schichtstufenland*, *Schwarzwald*, *Oberrheinisches Tiefland* und *Odenwald*. Auf diesem Arbeitsblatt findest du eine Anleitung, um diese Landschaften digital zu untersuchen und dein Wissen über Baden-Württemberg weiter zu vertiefen.

Dabei nutzt du ein **Digitales Geländemodell (DGM)**, welches die **Erdoberfläche** digital abbildet. So bekommst du fast einen 3D-Eindruck von dieser. Zusätzlich arbeitest du mit weiteren digitalen **Geodaten**. Diese geben dir Zusatzinformationen wie z.B. über die Lage von **Städten** und **Flüssen**. Dazu benötigst du eine spezielle **Software**: ein **Geographisches Informationssystem (GIS)**. Unsere Software heißt **QGIS**.

In den folgenden Aufgaben lernst du die Software QGIS, die Geodaten und die verschiedenen Landschaften genauer kennen. *Viel Spaß dabei!*

1. **Starten** der **GIS-Software „QGIS“** und **Öffnen** des GIS-Projekts

→ Doppelklicke die Datei „***Mod_BaWue-GIS_BW***“aus dem Ordner **Daten/QGIS_Kl5**
Nach kurzer Zeit erscheint ein dreigeteiltes Fenster (siehe Abbildung unten).
Dieses dient zur **Daten- und Layer-Verwaltung (1)**, **-Anzeige (2)** und **-Bearbeitung (3)**.



Übersicht über die Grafische Benutzeroberfläche der Software QGIS.

(*Wichtig! Denke daran, dein Projekt in regelmäßigen Abständen zu speichern!*)

Info: Was bedeuten die Begriffe „***Daten / Dateien***“ und „***Layer***“?
Daten / Dateien kennst Du schon von der Arbeit mit dem PC. Du findest sie im **Browserfenster**.
Layer heißen die Daten im GIS. Es gibt Raster- und Shape-Layer. Du findest sie im **Layerfenster**.

(6) Großlandschaften Baden-Württembergs mit QGIS analysieren *(Kl. 5)*

2. Vertrautmachen mit den **Daten und Funktionen von QGIS**

> Verändere die Reihenfolge der Layer, indem du sie im **Verwaltungsmenü (1)** an eine andere Position ziehst. Auch das ***An- und Ausblenden*** der Daten kann Übersicht verschaffen.
[*Tipp*: Rasterlayer am besten ganz nach unten, Shape-Layer ganz nach oben!]

> Klappe die ***Legende*** zu den jeweiligen Layern auf, indem du auf die „**>**“-Symbole links neben diesen klickst. Informiere dich damit über die jeweilige Bedeutung der Farben.

> Nutze die Werkzeuge zur **Veränderung der Daten (3)** für folgende Operationen: ***Hinein- und Hinauszoomen – Volle Ausdehnung – Zoom vor / Zoom zurück***.

> Der ***Info-Button*** zeigt dir Zusatzinfos zu den jeweils gewählten Layern an.
*(Wichtig! Wähle dazu zunächst im **Verwaltungsmenü (1)** den entsprechenden Layer. Z.B. **Flüsse_BW**, wenn dich Dinge wie der Name oder die Länge eines Flusses interessiert.)*

*Na, hast du dich etwas mit QGIS und den Geodaten vertraut gemacht? – Dann kann es jetzt losgehen! Wenn du dir noch unsicher bist, frage deine Nebensitzer*innen oder deine*n Lehrer*in!*

Arbeitsauftrag: Wir starten mit ein paar **Topographie-Übungen**. Nutze dazu den Info-Button.

1. Der längste Fluss Baden-Württembergs heißt _____ und seine Länge beträgt _____ km.
   Er entspringt bei _____ .
2. Die kleinste der 9 Großstädte des Landes heißt _____ und hat _____ Einwohner.
   Sie liegt nördlich der Großlandschaft _____ .
3. Die südlichste Großstadt des Bundeslandes heißt _____ und hat _____ Einwohner.
   Sie liegt westlich der Landschaft _____ .

(6) Großlandschaften Baden-Württembergs mit QGIS analysieren *(Kl. 5)*

3. Großlandschaften Baden-Württembergs kennenlernen

Nun geht es darum, die 6 Großlandschaften Baden-Württembergs kennenzulernen. In deinem Schulbuch findest du interessante Informationen dazu. Die folgenden Übungen ermöglichen dir einen neuen Blick auf die Großlandschaften und ihre Ausstattung.

Diese **Leitfragen** helfen dir:

- *Wie sind die jeweiligen Landschaften ausgestattet?*
- *Wie unterscheiden sie sich von der jeweiligen Nachbarlandschaft?*
- *Welche Rauminformationen helfen einem dabei, das herauszufinden?*

Arbeitsaufträge:

1. Informiere dich über die ***Lage und Grenzen der 6 Großlandschaften*** Baden-Württembergs. Nutze dabei die Geodaten des BaWü-Gis (***BW_Großlandsch_2_Ord***) und deine Kenntnisse aus dem Unterricht.
2. Informiere dich nun über die jeweilige ***landschaftliche Ausstattung***, indem du die Geodaten abwechselnd ein- und ausblendest. Diese sind besonders wichtig:
   - Infos über die **Oberflächenformen** (***DGM_90_BW*** und ***Schummerung_DGM_90_BW***)
   - **Gesteine** im Untergrund (***Geologische Haupteinheiten_BW***)
3. Vergleiche sie mit den Flächen der 6 Großlandschaften.
   TIPP: Nutze dazu den Info-Button *und verändere die Transparenz (Doppelklick auf den jeweiligen Layer > Transparenz > z.B. 50%)*
4. **Wahlaufgabe** (*bearbeite **a.** ODER **b.***)
   a. Lies dir die besonderen Merkmale der Großlandschaften und die verwendeten Geodaten in der Tabelle auf der Rückseite aufmerksam durch, vergleiche sie mit deinen eigenen Beobachtungen und trage die fehlenden Begriffe in die Lücken ein. (*Standard*)
   b. Notiere besondere Merkmale (häufig vorkommende Gesteine, charakteristische Oberflächenformen, Gebirge, Täler, Lage und Anzahl von Städten etc.) der jeweiligen Großlandschaften in die Tabelle auf der Rückseite. Trage auch ein, welche Geodaten dafür hilfreich sind. (*Anspruchsvoll*)
5. Erstelle ***5 Screenshots*** von verschiedenen aussagekräftigen Layer-Kombinationen (z.B. Großlandschaften + Schummerung + DGM). Einen Screenshot erstellst du mit der Taste *„Drucken“*. Öffne nun eine neue WORD-Datei, füge jeden Screeshot auf einer neuen Seite ein („Strg + v“). Zum Schluss speicherst du die Datei ab.
   Herzlichen Glückwunsch! Du hast deine erste **eigene GIS-Karte** erstellt!

a

(6) Großlandschaften Baden-Württembergs mit QGIS analysieren *(Kl. 5)*

Großlandschaft	Besondere Merkmale	Hilfreiche Geodaten
Alpenvorland	- **Kuppig-hügelige Landschaft** - **_____sedimente (Würm & Riß)** - **_____ im Süden**	- **DGM, Schummerung** - **Geologische Haupteinheiten** - **_____-Polygon**
Schwäbische Alb	- **Relativ hohe Geländehöhen** - **_____ Fluss-Täler** - **Jura-Gesteine** - **Städte meist am _____**	- **DGM, Schummerung** - **Flüsse** - **Geol. Haupteinheiten** - **Städte**
Schwäbisches Schichtstufenland	- **Landschaft mit _____** - **Viele unterschiedliche Gesteinsarten** - **_____ Städte**	- **DGM, Schummerung** - **Geologische Haupteinheiten** - **Städte**
Schwarzwald	- **Relativ _____ Geländehöhen** - **_____ Täler** - **Städte am _____** - **Viel Wald**	- **DGM** - **Schummerung** - **Städte**
Oberrheinisches Tiefland	- **Flache Landschaft mit geringen Geländehöhen** - **Häufig _____-sedimente** - **_____ Städte**	- **DGM** - **Geologische Haupteinheiten** - **Städte**
Odenwald	- **Relativ flache Landschaft** - **Mittlere Geländehöhe** - **_____** - **Viel Wald**	- **Schummerung** - **DGM** - **Geol. Haupteinheiten**

b

(6) Großlandschaften Baden-Württembergs mit QGIS analysieren *(Kl. 5)*

Großlandschaft	Besondere Merkmale	Hilfreiche Geodaten
Alpenvorland	- Kuppig-hügelige Landschaft - Moränensedimente (Würm & Riß) - Bodensee im Süden	- DGM, Schummerung - Geologische Haupteinheiten - Bodensee-Polygon
Schwäbische Alb	- Relativ hohe Geländehöhen - Tief eingeschnittene Fluss-Täler - Jura-Gesteine - Städte meist am Rand	- DGM, Schummerung - Flüsse - Geol. Haupteinheiten - Städte
Schwäbisches Schichtstufenland	- Landschaft mit Geländestufen - Viele unterschiedliche Gesteinsarten - Besonders viele Städte	- DGM, Schummerung - Geologische Haupteinheiten - Städte
Schwarzwald	- Relativ hohe Geländehöhen - Stark zerklüftete, steile Täler - Städte am Rand - Viel Wald	- DGM - Schummerung - Städte
Oberrheinisches Tiefland	- Flache Landschaft mit geringen Geländehöhen - Häufig Hochwassersedimente - Besonders viele Städte	- DGM - Geologische Haupteinheiten - Städte
Odenwald	- Relativ flache Landschaft - Mittlere Geländehöhe - Buntsandstein - Viel Wald	- Schummerung - DGM - Geol. Haupteinheiten