

Geodiversität von Vorarlberg und Liechtenstein

Geodiversity of Vorarlberg and Liechtenstein

Arie C. Seijmonsbergen / Matheus G.G. De Jong /
Leo W.S. de Graaff / Niels S. Anders

■ Haupt



BRISTOL-STIFTUNG
Ruth und Herbert Uhl-Forschungsstelle
für Natur- und Umweltschutz

Bristol-Schriftenreihe Band 41



BRISTOL-STIFTUNG
Ruth und Herbert Uhl-Forschungsstelle
für Natur- und Umweltschutz

■ Haupt

Herausgeber/Editor
Ruth und Herbert Uhl-Forschungsstelle für Natur- und Umweltschutz,
Bristol-Stiftung, Zürich
www.bristol-stiftung.ch

Arie C. Seijmonsbergen, Matheus G.G. De Jong, Leo W.S. de Graaff, Niels S. Anders

Geodiversität von Vorarlberg und Liechtenstein

Geodiversity of Vorarlberg and Liechtenstein

! Haupt

Verantwortlich für die Herausgabe/Responsible for this edition
Bristol-Stiftung. Stiftungsrat: Dr. René Schwarzenbach, Herrliberg;
Dr. Mario F. Broggi, Triesen; Prof. Dr. Klaus Ewald, Gerzensee; Martin Gehring, Zürich

Managing Editor
Dr. Ruth Landolt, WSL, Birmensdorf

Adresse des 1. Autors/Contact
Arie C. Seijmonsbergen, Institute for Biodiversity and Ecosystems Dynamics, University of
Amsterdam, P.O. Box 94248, NL-1090 GE Amsterdam, A.C.Seijmonsbergen@uva.nl

Adresse der Koautoren/Co-authors see page 303

Layout
Jacqueline Annen, Maschwanden

Umschlag und Illustration/Jacket and Illustration
Atelier Silvia Ruppen, Vaduz

Zitierung/Citation
SEIJMONSBERGEN, A.C.; DE JONG, M.G.G.; DE GRAAFF, L.W.S.; ANDERS, N.S., 2014: Geodiver-
sität von Vorarlberg und Liechtenstein. Geodiversity of Vorarlberg and Liechtenstein. Zürich,
Bristol-Stiftung; Bern, Haupt. 304 S. 5 maps.

ISBN 978-3-258-07888-5 (Buch)
ISBN 978-3-258-47888-3 (E-Book)

Alle Rechte vorbehalten/All rights reserved
Copyright © 2014 Haupt Bern
Jede Art der Vervielfältigung ohne Genehmigung des Verlages ist unzulässig.
No part of this publication may be reproduced without the permission of the publisher.

www.haupt.ch

Die auf Seite 14 beschriebenen Karten, welche der gedruckten Ausgabe beiliegen, befinden
sich zuhinterst als Anhang.

Abstract

Geodiversity of Vorarlberg and Liechtenstein

Geodiversity – the natural range of geological, geomorphological and soil features – is the topic of this book. More precisely, geomorphological mapping techniques, which have been developed for capturing the geodiversity of mountainous areas, and a related method for assessing the value – the geoconservation potential – of the mapped landforms of these landscapes. The case studies presented cover the variety of mountain landscapes of Vorarlberg and Liechtenstein.

The first part of the book deals with methods of geomorphological mapping of high-relief areas. The classical, field-based, detailed, area-covering mapping method which was developed over the years by researchers at the University of Amsterdam, is nowadays combined with the analysis and interpretation of digital terrain models derived from LiDAR (Light Detection and Ranging) data in a geographical information system (GIS).

Geomorphological derivatives – land surface parameters – are calculated from the LiDAR data and are applied in digital geomorphological mapping in GIS. The geomorphological map, thus, has become a digital geodatabase, in which information acquired in the field is linked with data from many other sources. Data is stored in “layers”, which can be visualized individually and in a variety of combinations, in GIS.

Essential is that the mapping does not focus on unique or spectacular geomorphological features or groups of these only, but covers the total landscape, i.e. also the “common” sites in which people, animals and plants live. The assessment of the geoconservation potential is done for all landforms, i.e. inventories are made for entire selected areas. In GIS, the sites are assessed individually using a set of quantitative and qualitative weighting and ranking criteria, the most important of which are scientific relevance and frequency of occurrence. The resulting scores may be adjusted – downgraded or upgraded – by applying expert knowledge.

Case studies are presented in the second part of the book. Clusters of landforms highly valuable in terms of geoconservation potential have been selected and are discussed in detail in explanatory notes. The clusters cover a wide range of landscapes which are all typical for mountainous areas. The Gamperdonatal near Nenzinger Himmel, the tributary valleys of the Gamperdonatal, the Malbun region of Liechtenstein and the mountains around Lech show a high-alpine morphology, in which, among other features, moraines, meltwater deposits, fossil rock glaciers, gypsum-karst landforms and deep-seated mass movements are classified as highly valuable landscape elements. Ice-marginal landforms and deposits created during the final stages of deglaciation at the end of last ice age abound in the lower topographic settings of the southern Walgau region between Nenzing and Gurtis and on the eastern flank of the Rhine Valley in the municipalities of Götzis, Klaus, Fraxern and Weiler. All these landforms hold highly valuable information on the origin of the landscapes and the role of climate and climate change in landscape development.

Keywords: geodiversity, geoconservation, geomorphological mapping, GIS, Vorarlberg, Austria, Liechtenstein

Vorwort

Geomorphologische Phänomene umgeben uns allerorten, auch und besonders im Einzugsgebiet des Alpenrheintales. Sei es ein alter Prallhang des Rheins, eine späteiszeitliche Ablagerung, ein nacheiszeitlicher Bergsturz oder in Form eines Findlings.

Die wenigsten von uns vermögen die Landschaftswerdung bezüglich dieses Formenschatzes zu «lesen».

Die Prallhänge des Rheins und die Drumlins werden überbaut, der Findling in einen Garten abgeschleppt, die bucklige Welt der Moränen für eine Skipiste geplant.

Wir verlieren damit häufig unerkannt diesen Formenschatz und dies Tag für Tag, also höchste Zeit – ähnlich wie für die Artenvielfalt und die Biotope – ein entsprechendes Bewusstsein zu entwickeln. Die Geodiversität gilt es also ebenfalls zu erfassen, ganzheitlich zu verstehen und ihren wichtigen Formenschatz zu erhalten.

Forschende der Universität Amsterdam beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Geologie Vorarlbergs und angrenzender Gebiete. Sie haben Methoden der geomorphologischen Kartierung weiter entwickelt und sie auch in Fallstudien angewendet. Sie machen die früheren Vergletscherungsstadien, die verbliebenen Moränen, die Gipsdolinien, die Karstformen für uns alle interpretierbar. Alle diese Landformen bergen hochwertvolle Informationen in sich, die so zum Sprechen gebracht werden. Die abiotische Umwelt wird damit lebendig, zum lebendigen Archiv. Auffällig ist auch, dass die abiotischen und biotischen Elemente häufig in sich kausal verbunden sind. Die Existenz eines Moores ist beispielsweise mit solchen geomorphologischen Geschehnissen meist untrennbar verbunden.

Wir danken den niederländischen Forschern für ihre wertvollen und mit viel Begeisterung erbrachten langjährigen Aktivitäten. Wir freuen uns sie mit der Bristol-Stiftung ein Stück ihres Weges in ihrem Wirken unterstützen zu können. Mit der Bristol-Schriftenreihe im Haupt Verlag bieten wir ihnen überdies ein Forum für ihr Anliegen zum Erhalt der Geodiversität. Die Veröffentlichung soll mithelfen uns alle in den Talgemeinschaften für dieses Anliegen zu sensibilisieren.

Mario F. Broggi
Stiftungsrat Bristol-Stiftung, Zürich

Foreword

Geomorphological features are all around us in Vorarlberg and Liechtenstein. Just to name a few: the cutbanks of the Rhine, deposits from the last ice age, recent landslides or a single erratic block. Only few people know how to “read” the landscape, i.e. are able to recognize the outstanding and valuable landforms.

The landforms of the Rhine Valley are turned into housing developments, the occasional erratic block is towed away from a garden, the hummocks of a moraine landscape are leveled for a ski run. Unknowingly, slowly but steadily, the diversity of landforms disappears from our environment. No time to lose: we need to develop an understanding of the value of the diverse landforms, similar to our appreciation – and protection schemes – of biodiversity. We need to understand geodiversity and protect valuable landforms.

The University of Amsterdam has a long tradition of geological research in Vorarlberg and neighbouring areas. Methods of geomorphological mapping have been developed, and maps have been made of many areas. They document the glacial and post-glacial origin of the landscape. The landforms contain information on the history of the non-living environment, the maps are the archive, with their help the abiotic world can be brought to life. Notably, the biotic and abiotic landscapes often show a causal relationship. For instance, the occurrence of a bog is always determined by the nature of its substratum.

We thank the always enthusiastic Dutch researchers for their contributions over many decades. We, the Bristol-Stiftung, are pleased to support their work. And, to offer them a forum in the Bristol Series of the Haupt Verlag for presenting their case for the conservation of geodiversity. The publication will hopefully encourage all of us, living in the valleys of the Alps, to support it.

Mario F. Broggi
Stiftungsrat Bristol-Stiftung, Zürich

Geodiversität von Vorarlberg und Liechtenstein

Inhalt

Abstract	5
Vorwort	7
Prolog	13
Dank	13
Namen und Karten	14
Theorie und Methoden	15
1 Einführung	15
1.1 Allgemeines	15
1.2 Geologischer Überblick	16
1.3 Geomorphologischer Überblick	18
2 Geomorphologische Karten	21
2.1 Geomorphologie und Karten	21
2.2 Die klassische geomorphologische Karte	21
2.3 Die computergenerierte geomorphologische Karte	24
2.4 Das morphogenetische Klassifikationsschema	25
3 Geokonservierung in Vorarlberg und Liechtenstein	27
3.1 Überblick	27
3.2 Verfahren zur Erfassung und Reihung der Morphogeotope	28
3.3 Das Gebiet Weienried: eine Fallstudie	32
4 Fortschritte bei der halbautomatischen geomorphologischen Kartierung	43
4.1 Einleitung	43
4.2 Digitales Geländemodell und Geomorphometrie	43
4.3 Objektbasierte Analyse und Klassifikationen	47
4.4 Beurteilung der Genauigkeit	48
4.5 Halbautomatische geomorphologische Kartierung im Gamptal	49
4.6 Diskussion	55
Ergebnisse	
5 Die Gemeinde Nenzing – südlicher Walgau und nördlicher Rätikon	57
5.1 Einleitung	57
5.2 Geomorphologische Karte	59
5.3 Inventar potenziell schützenswerter Morphogeotope	63
5.4 Cluster der Geodiversität und potenziell schützenswerte Morphogeotope	63
5.5 Zusätzliche potenziell schützenswerte Morphogeotope	84
6 Die Gemeinde Lech – östliches Vorarlberg	85
6.1 Einleitung	85
6.2 Geomorphologische Karte	89
6.3 Inventar potenziell schützenswerter Morphogeotope	89
6.4 Cluster der Geodiversität und potenziell schützenswerte Morphogeotope	91
6.5 Zusätzliche potenziell schützenswerte Morphogeotope	115

7 Die Gemeinden Götzis, Klaus, Fraxern und Weiler im Rheintal	117
7.1 Einleitung	117
7.2 Geomorphologische Karte	117
7.3 Inventar potenziell schützenswerter Morphogeotope	122
7.4 Cluster der Geodiversität und potenziell schützenswerte Morphogeotope	124
8 Malbun – Liechtenstein	131
8.1 Einleitung	133
8.2 Geomorphologische Karte	135
8.3 Inventar potenziell schützenswerter Morphogeotope	135
8.4 Cluster der Geodiversität und potenziell schützenswerte Morphogeotope	136
8.5 Zusätzliche potenziell schützenswerte Morphogeotope	141
9 Schlussbemerkungen und Ausblick	143
10 Zusammenfassung	145
11 Glossar	147
Literatur / References	297
Portraits der Autoren / Portraits of the authors	303
Beilagen	
I Legende geomorphologische Symbolkarte	
Legende geomorphologische Polygonkarte	
II Nenzinger Himmel	
Geomorphologische Karte	
Karte des Geokonservierungspotenzials	
III Gamptal-Eckskopf	
Geomorphologische Karte	
Karte des Geokonservierungspotenzials	
IV Götzis, Klaus, Fraxern & Weiler	
Geomorphologische Karte	
Karte des Geokonservierungspotenzials	
V Malbun	
Geomorphologische Karte	
Karte des Geokonservierungspotenzials	

Prolog

Geodiversität wird immer mehr nicht nur für Wissenschaftler sondern auch für ein breiteres Publikum und politische Entscheidungsträger interessant. Das Gegenstück in der biotischen Umwelt – die Biodiversität – hat in den letzten Jahrzehnten viel Aufmerksamkeit erhalten, und die Sorge um einen weltweiten Rückgang der biologischen Vielfalt als Folge menschlicher Aktivitäten wird von zahlreichen Menschen mit vielen lobenswerten Initiativen, welche die destruktiven Tendenzen stoppen oder umkehren möchten, geteilt. Die abiotische Umwelt wird seit jeher mit den nicht-lebenden natürlichen Ressourcen in einer konventionellen Weise gleichgesetzt: Wir erschliessen und verwenden diese Ressourcen, um uns eine komfortable Existenz zu verschaffen, was unbestritten ein vorrangiges Ziel ist. Der innere Wert der nicht-lebenden natürlichen Ressourcen – oder genauer «der abiotischen Landschaft» – gerät nur allmählich ins Rampenlicht. Der Fokus liegt gewöhnlich auf sehr kleinen Erscheinungen wie zum Beispiel einem grossen Findling, der unter Schutz gestellt wird, oder auf der Landschaft als Ganzes (Geopark-Initiative). Unser tägliches Leben spielt sich in der Regel in Landschaften auf einer Skala zwischen diesen beiden «Extremen» ab. Es sind diese Landschaften, die auch unsere Aufmerksamkeit verdienen, da viele von ihnen durch menschliche Aktivitäten unwiederbringlich zerstört zu werden drohen.

Eine Veränderung im Verständnis der abiotischen Landschaft ist im Gange. Das Konzept des Wertes wurde eingeführt. Es bezieht sich nicht auf die subjektive Vorstellung von Schönheit. Es ist viel mehr mit der Idee eines Archivs verknüpft: Eine Landschaft besteht aus Landformen, die durch natürliche Prozesse gebildet wurden, und diese Landformen enthalten Informationen über die Entstehungsweise der Landschaft. Bestimmte Landformen geben uns mehr Informationen über die Art und Weise, wie eine Landschaft gebildet wurde, als andere. Das Archiv kann hinsichtlich der Elemente, die die meisten Informationen über die Entstehungsweise der Landschaften enthalten, durchsucht werden. Diese können dann als die wertvollsten Stücke des Archivs betrachtet werden und unter Schutz gestellt werden.

Unsere Studie stellt eine Methode für die Beurteilung des Wertes von Landformen von Berggebieten vor. Sie basiert auf vielen Jahren Forschung und geomorphologischen Kartierungen von uns und von vielen Kollegen in den Alpen von Vorarlberg, Österreich, und den angrenzenden Gebieten der Schweiz, Liechtenstein und Deutschland. Die Anwendung unserer Methode, die sich auf moderne Informationstechnologie stützt, wird durch Inventare von wertvollen Landformen in einer Vielzahl von Bergregionen in Vorarlberg und Liechtenstein dargestellt. Die Detailliertheit und die Flächendeckung der Inventare sind so ausgelegt, dass sie bei der Planung durch die lokalen und regionalen Behörden verwendet werden können. Wir hoffen – und sind zuversichtlich – dass unsere Arbeit eine Brücke zwischen Forschung und Praxis schlägt.

Harry Seijmonsbergen, Mat De Jong und Koautoren

Dank

Die Veröffentlichung dieses Buches wurde durch die grosszügige finanzielle Unterstützung der Bristol-Stiftung ermöglicht. Wir bedanken uns insbesondere bei Dr. Mario F. Broggi, Stiftungsrat und Geschäftsführer der Ruth und Herbert Uhl-Forschungsstelle für Natur- und Umweltschutz in Schaan, Liechtenstein.

Weitere finanzielle Unterstützung, für die wir uns herzlich bedanken, erhielten wir von der Research Foundation for Alpine and Subalpine Environments (RFASE), und innerhalb des Projektes Virtual Lab for e-Science (vl-e) an der Universität Amsterdam. Dieses Projekt wird unterstützt durch einen BSIK Zuschuss des Dutch Ministry of Education, Culture and Science (OC&W), und ist Teil des ICT Innovationsprogramms des Ministry of Economic Affairs (EZ).

Während vieler Jahre erhielten wir finanzielle und praktische Unterstützung bei unseren Forschungsarbeiten in Vorarlberg von inatura Erlebnis Naturschau GmbH. Besonders danken

wir auch Dr. J. Georg Friebe von inatura für die sorgfältige Durchsicht und die Korrekturvorschläge zum deutschen Text des Buches.

Das Land Vorarlberg (www.Vorarlberg.at) hat uns grosszügigerweise erlaubt geografische Daten, die Luftbild Archive und LiDAR Daten, die vom VOGIS Server erhältlich sind, zu benutzen.

Für die Beilage V stellte uns das Amt für Bau und Infrastruktur in Liechtenstein (DEM © FL-Tiefbauamt), die digitalen Hintergrunddaten zur Verfügung; dafür bedanken wir uns.

Dr. Ruth Landolt, Managing Editor der Bristol-Schriftenreihe an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), hat uns bei der Vorbereitung des Manuskriptes für die Drucklegung beraten und begleitet. Wir danken ihr für die konstruktive Zusammenarbeit. Frau Jacqueline Annen hat das Buch gestaltet; auch an sie herzlichen Dank.

EDV-Unterstützung erhielten wir vom GIS-studio (www.gis-studio.nl) des Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics (IBED) der Universität Amsterdam. Frau Tamara Jonkman und Drs. Cindy Teeven halfen bei der Umwandlung der klassischen geomorphologischen Karten zu digitalen Polygonkarten; wir schätzen diese Beiträge sehr. Jan van Arkel (digital illustrator – IBED) half beim Erstellen der Beilage I, und der Abbildungen 2, 4, und 26.

Das englische Manuskript übersetzte Anne-Kathrin Peest, MSc student in earth sciences an der Universität Amsterdam ins Deutsche. Dr. Clemence Eisank (Universität Salzburg) redigierte Teile des deutschen Textes. Der englische Text wurde von Frau Stacy Shinneman geprüft. Wir bedanken uns bei all diesen Personen für ihren Beitrag.

Unsere Resultate beruhen auf jahrzehntelanger Forschungsarbeit in der Region durch Berufskollegen und Studenten der Universität Amsterdam. Wir sind ihnen dafür sehr dankbar. Wir möchten uns hier ebenfalls bei Kollegen anderer Forschungsinstitutionen bedanken mit welchen wir immer wieder im Feld gute Diskussionen hatten. Speziell erwähnen wir Dr. L.H. (Erik) Cammeraat, Drs. Jeroen Timmers, Drs. Stefan Fritz und die verstorbene Drs. Mirjam Vriend; einiges noch nicht veröffentlichtes Feldmaterial ist in unser Buch eingeflossen.

Zum Schluss danken wir unseren Familien, die während der letzten vier Jahre unsere Arbeit am Buch geduldig mitgetragen haben.

Namen und Karten

In diesem Text werden Namen von Dörfern, Weilern, Flüssen und Berggipfeln verwendet, um die Lage der Land- und Ablagerungsformen zu beschreiben. Die Namen und deren Schreibweise richten sich nach den offiziellen topografischen Karten des Österreichischen Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen, Wien (Online-Version unter <http://www.bev.gv.at/> und <http://www.austrianmap.at/>) beziehungsweise des Landesamts für Vermessung und Geoinformation, Feldkirch (<http://www.vorarlberg.at/atlas/>).

Für die Region Malbun in Liechtenstein und die benachbarte Gemeinde Nenzing wurden folgende Karten verwendet (siehe auch: <http://geodaten.llv.li/geoshop/public.html>):

Fürstentum Liechtenstein, Topographische Karte, Blatt 3, 1:10000, Herausgeber:

Regierung des Fürstentums Liechtenstein Vaduz.

Fürstentum Liechtenstein, Topographische Karte, Blatt 4, 1:10000, Herausgeber:

Regierung des Fürstentums Liechtenstein Vaduz.

Für Malbun wurden die folgenden topografischen Karten der Schweiz, welche vom Bundesamt für Landestopografie veröffentlicht wurden (Wabern, Schweiz; www.swisstopo.admin.ch/ und kartenportal.mapranksearch.com/), ebenfalls konsultiert:

Blatt 1136 Drei Schwestern (1:25000)

Blatt 1156 Schesaplana (1:25000)

Theorie und Methoden

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Heutzutage erkennen Regierungen, Einwohner und Besucher von Bergregionen an, dass Ökosysteme Vitalfunktionen haben, und dass Raubbau vermieden werden muss, um Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Ökosysteme wurden bereits im Jahr 1971 von Odum (1971) als die integrierte und interagierende biotische und abiotische Umwelt eines bestimmten Gebietes definiert.

Menschen leben und arbeiten in Ökosystemen. Ihre Funktionen und Dienste decken ein breites Spektrum ab: von der Landwirtschaft (Ackerbau, Viehzucht und Forstwirtschaft) über die Wasserversorgung (Trinkwasser, Bewässerung und Wasserkraft), den Bergbau und industrielle Tätigkeiten sowie den Tourismus bis zur Speicherung von Kohlenstoff in Boden und Vegetation. Ökosysteme haben auch eine geo-archivierende Funktion, da sie Auskunft über die Erdgeschichte geben. Das ist nicht nur ein Ziel an sich, sondern es kann auch helfen, Naturkatastrophen und vom Menschen verursachte Veränderungen zu verstehen und mögliche Massnahmen zu treffen.

Der angemessene Umgang mit Ökosystemen im Sinne eines Gleichgewichts zwischen Nutzung und Erhaltung ist heutzutage und auch in Zukunft von grösster Bedeutung. Innerhalb der abiotischen Umwelt nimmt das Konzept der Geodiversität eine zentrale Stelle im Bereich der Konservierung ein. Sie wird von GRAY (2004; siehe auch EBERHARD 1997; SHARPLES 2002; BUREK und PROSSER 2008) definiert als «die natürliche Bandbreite (Diversität) an geologischen (Gesteine, Minerale, Fossilien), geomorphologischen (Landformen, Prozesse) und bodenkundlichen Erscheinungen. Sie umfasst Vergesellschaftungen, Beziehungen, Eigenschaften, Interpretationen und Systeme». Konservierung, oder genauer «Geokonservierung», ist somit die Erhaltung der Geodiversität, das heisst das aktive Management von Geodiversität, um sicher zu stellen, dass ihre Qualität erhalten bleibt (siehe BUREK und HOPE 2006).

Verbunden mit Geodiversität ist das Konzept der geomorphologischen Standorte (oder *Morphogeotope*). Gemäss der *International Association of Geomorphologists Working Group on Geomorphological Sites* (IAG 2005), sind Morphogeotope Teile der Geosphäre, die eine besondere Bedeutung im Verständnis der Erdgeschichte darstellen. Als solche verdienen sie besondere Aufmerksamkeit im Landschaftsmanagement. Der Begriff «Geotop» wird in Mitteleuropa häufig verwendet. So zum Beispiel von STÜRM (2005), der sich «auf unterscheidbare Komponenten der Landschaft mit einem herausragenden geologischen, geomorphologischen oder geoökologischen Wert» bezieht. «Sie (Geotope) sind Relikte der Erdgeschichte oder geben einen guten Einblick in die Geschichte der Erde, die Evolution des Lebens, das Klima oder die Landschaft.»

Unser Ansatz zur Geokonservierung ist geomorphologischer Art. Landformen stehen im Mittelpunkt unserer Beurteilung des Geokonservierungspotenzials. In unserer Arbeit ist der Begriff «Morphogeotop» nicht allein auf einmalige oder «spektakuläre» geomorphologische Objekte oder Gruppen von Objekten beschränkt, sondern umfasst auch die «normalen» Standorte, an denen Menschen, Tiere und Pflanzen leben (SEIJMONSBERGEN *et al.* 2009, 2010). Die gesamte abiotische Landschaft mit allen einzelnen Landformen und ihren Zusammenhängen wird auf der Grundlage von detaillierten geomorphologischen Informationen bewertet. Morphogeotope oder Gruppen von Morphogeotopen in einer Landschaft werden aufgrund einer Reihe von Gewichtung- und Reihungskriterien, in Abhängigkeit vom gewählten Bezugsrahmen (vgl. EMBLETON 1984), als schützenswert eingestuft. Der Vorteil dieser Arbeitsweise ist, dass zum Beispiel ein Morphogeotop, das auf lokaler oder regionaler Ebene, aber nicht auf globalem Niveau signifikant ist, als wichtig eingestuft werden kann und lokal

oder regional zum schützenswerten Gebiet werden kann. Sobald ein schützenswertes Morphogeotop offiziell von den Behörden im Rahmen des Gesetzes unter Schutz gestellt wird, nennen wir es ein geschütztes Morphogeotop oder ein Geokonservierungsstandort.

Die Entwicklung unseres Ansatzes wurde durch zwei Faktoren bestimmt: 1) unser langfristiges Engagement bei geomorphologischen Kartierungen und dem zufolge die Verfügbarkeit von flächendeckenden, geomorphologischen Karten in detaillierten Massstäben für grosse Teile von Vorarlberg und Liechtenstein (SEIJMONSBERGEN *et al.* 2009), und 2) die Nachfrage auf kommunaler und regionaler Ebene in Vorarlberg nach detaillierten Informationen zur Unterstützung der Raumplanung und des Landschaftsmanagements.

Bewertungsmethoden fokussieren in der Regel auf Landschaften, die schon gut dafür bekannt sind, einzigartig oder «speziell» zu sein (vgl. z. B. STÜRM 1994; SHARPLES 2002; GRAY 2004; PRALONG 2005; GONGGRIJP 2005; siehe auch diverse Beiträge in CORATZA und PANIZZA 2009). Der Beurteilungsprozess dient dann im Wesentlichen zur wissenschaftlichen Dokumentation und zur Begründung für die Unterschutzstellung des Gebietes. Das flächendeckende Verfahren, das wir verwenden, stellt sicher, dass insbesondere kleine Landformen, die weniger bekannt oder übersehen worden sind, berücksichtigt und in die Bewertung einbezogen werden.

Die hier verwendete Methode ermöglicht uns, a) Morphogeotope in konsistenter Weise mit geländebasierten und computergenerierten geomorphologischen Informationen zu identifizieren und abzugrenzen und b) eine Reihung in Bezug auf Signifikanz für die Geokonservierung mit gut definierten Gewichtung- und Reihungskriterien in einem Geografischen Informationssystem (GIS) zu erstellen.

Wir präsentieren zunächst eine kurze Zusammenfassung der Geologie und der allgemeinen Landschaftsentwicklung in Vorarlberg und Liechtenstein (Abschnitt 1.2 und 1.3), als Rahmen unserer Arbeit im Bereich Geokonservierung. Anschliessend geben wir einen Überblick über die Methoden zur Herstellung von geomorphologischen Beständen, die die Grundlage für unsere Beurteilung des Geokonservierungspotenzials der Landformen darstellen (Kap. 2). Weiter erklären wir das Bewertungsverfahren mit einem Beispiel aus dem Weienried-Gebiet im Norden Vorarlbergs (Kap. 3). In Kapitel 4 wird ein auf dem neuesten Stand der Technik basierender Überblick über die Entwicklung einer Methode zur computergestützten geomorphologischen Kartierung vorgestellt. Kapitel 5 bis 8 beschäftigen sich mit Anwendungen der geomorphologischen Kartierung und der Bewertung des Geokonservierungspotenzials. Das letzte Kapitel (Kap. 9) beinhaltet Schlussbemerkungen und Reflexionen über die Entwicklungen im Bereich der Geodiversität.

1.2 Geologischer Überblick

Die Landschaften von Vorarlberg und Liechtenstein zeichnen sich durch eine grosse Vielfalt auf einer kleinen Fläche aus. Dies spiegelt zum Teil die komplexe Geologie des Gebietes wieder. Ohne ein grundlegendes Verständnis der Art und des Vorkommens der Gesteine im Untergrund ist eine Bewertung des Geokonservierungspotenzials der Landschaften und Landschaftselemente nicht möglich.

Es würde den Rahmen dieses Buches übersteigen, bei der Geologie Vorarlbergs stark ins Detail zu gehen. Wir präsentieren nur einen kurzen Überblick, welcher im Wesentlichen auf FRIEBE (2007a) basiert. Wir verweisen auf OBERHAUSER (1998) für diejenigen, die an Einzelheiten interessiert sind. Die Geologie von Liechtenstein wird im Detail von ALLEMANN (1953/1985, 2002) beschrieben. Relevante Aspekte der Geologie des Gesteinsuntergrundes werden in den Fallstudien (Kap. 5–8) erläutert.

Die Grenze zwischen den Westalpen und Ostalpen verläuft durch Vorarlberg und Liechtenstein. In der geologischen Vergangenheit befand sich der Ablagerungsraum der Gesteine der Westalpen am südlichen Rand des ehemaligen Kontinents Laurasia, zu dem das heutige Europa gehörte. Von diesem durch das Tethys-Meer und den Penninischen Ozean getrennt,

Tektonische Übersicht 1 : 500 000

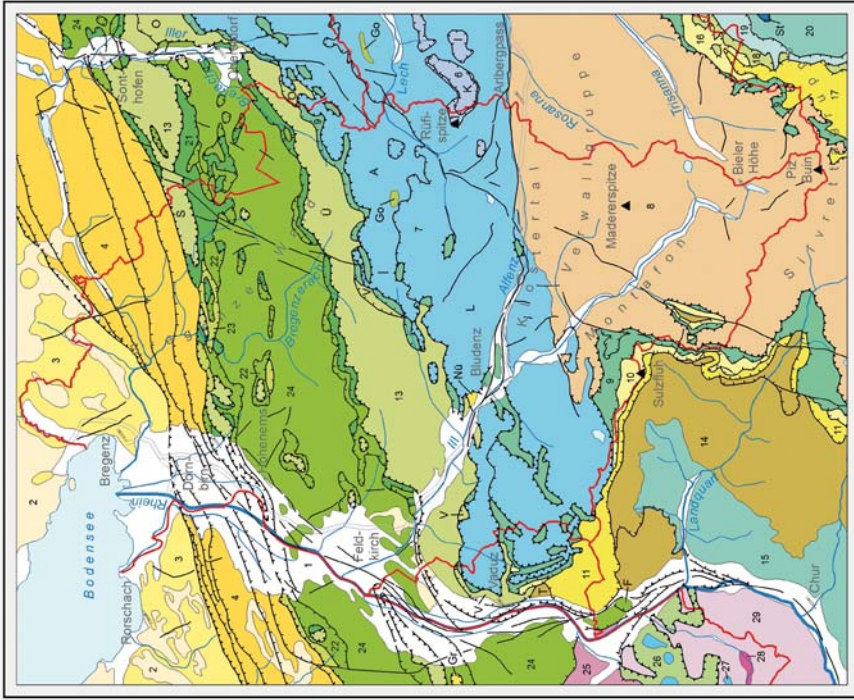


Abb. 1. Tektonische Übersichtskarte (Quelle: Geologische Bundesanstalt Wien; siehe auch FRIEBE 2007a).

bildeten sich die Gesteine der Ostalpen auf der Adriatischen (Apulischen) Platte, die ursprünglich zum grossen Superkontinent Gondwana gehörte. Afrika war Teil des letzteren.

Die Kollision der Kontinente beziehungsweise Platten führte letztendlich zur Bildung der Alpen. Dabei wurden Gesteine unterschiedlicher Herkunft in Decken übereinander geschoben, sie wurden verfaltet und durch Verwerfungen verstellt. Die Ozeane und Meere verschwanden.

Die wichtigsten tektonischen Einheiten der Ostalpen Vorarlbergs sind das Silvrettakristallin und die Nördlichen Kalkalpen. Westalpine Grosseinheiten sind das Helvetikum und der Flysch. Sie treten in Zonen auf, die sich von Südwesten nach Nordosten erstrecken, wie in der tektonischen Karte dargestellt (Abb.1).

Die Gesteine der Molassezone, die im nördlichen Teil Vorarlbergs vorkommen, gehören weder zu den West- noch zu den Ostalpen. Sie beinhalten den Abtragungsschutt der aufsteigenden Alpen. Dieser lagerte sich in der Endphase der Gebirgsbildung in einem Vorlandbecken ab. Der südliche Teil der Molassezone wurde in den späteren Stadien der kontinentalen Kollision in den Gebirgsbau mit einbezogen und tektonisch verformt. Hierbei entstanden die Subalpine Molasse und die Aufgerichtete Molasse. Die Subalpine Molasse, mit vor allem den älteren Ablagerungen, wurde gefaltet und teilweise seitlich verlagert. Die jüngeren Ablagerungen waren weniger von der Deformation betroffen. Sie wurden in Richtung Vorland gekippt.

Das Silvrettakristallin besteht vorwiegend aus Gneisen, Glimmerschiefern und Amphiboliten des variszischen Grundgebirges aus dem Paläozoikum. Die Nördlichen Kalkalpen bestehen überwiegend aus Kalksteinen und Dolomiten, die sich im Mesozoikum in einem marinen Bereich auf der unter Wasser liegenden Apulischen Platte ablagerten. Nur die ältesten Gesteine dieser Einheit wurden in einem kontinentalen Ablagerungsraum gebildet. In die Schichtfolge eingeschaltet finden sich auch evaporitische Gesteine. Im Mesozoikum war auch der südliche Rand des europäischen Teils von Laurasia von einem flachen Meer bedeckt, in dem sich die Kalke und Mergel des Helvetikums bildeten. Der Vorarlberger Flysch wiederum besteht grösstenteils aus mergeligen Sandsteinen und Tonsteinen. In der Oberkreide und im Tertiär wurden diese durch Trübestrome in einer tiefen Senke des Penninischen Ozeans zwischen dem Europäischen Vorland und der Apulischen Platte abgelagert. Die Ablagerungen der Molassezone bestehen aus unterschiedlichen Mengen von Konglomeraten, Sandsteinen, Tonsteinen und Mergelsteinen, welche wechselnd in marinen und kontinentalen Räumen abgelagert wurden.

1.3 Geomorphologischer Überblick

Die Landschaften von Vorarlberg und Liechtenstein, das heisst die Assoziationen von Landformen, sind das Ergebnis von Wechselwirkungen endogener und exogener Prozesse. Endogene Prozesse haben ihren Ursprung im Inneren der Erde. Generell sind sie für die grossen Formen der Erdoberfläche, wie zum Beispiel Gebirgsketten verantwortlich. Sie wirken über längere Zeiträume. Exogene Prozesse dagegen haben ihren Ursprung an oder nahe der Erdoberfläche und stehen unter starkem Einfluss von Klima und Klimawandel. Die Wirkungen von Flüssen und Gletschern sind beispielsweise exogene Prozesse. Ebenso ist eine Massenbewegung, eine von der Schwerkraft angetriebene Hangabtragung, ein wichtiger exogener Prozess. Und natürlich auch Karst, das heisst die Auflösung von Karbonatgesteinen und bestimmten Arten von evaporitischen Ablagerungen wie Gips unter dem Einfluss von meteorischem Wasser, sowie periglaziale Prozesse, die in den höheren Bergregionen unter kalten Bedingungen für die Produktion von Gesteinstrümmern und für die Bildung von Blockgletschern verantwortlich sind. Die exogenen Prozesse finden im Vergleich zu den endogenen Prozessen über einen viel kürzeren Zeitraum statt.

Die Berge und Täler von Vorarlberg und Liechtenstein sind beispielhafte Resultate der Wechselwirkung von endogenen und exogenen Prozessen: Eine Vielzahl von Landschaften wurde über einen geologisch kurzen Zeitraum gebildet. Flüsse und Gletscher, in Kombination

mit Massenbewegungen, sind die primären Ursachen, die für die Schaffung von Tälern und damit von Bergkämmen und Gipfeln verantwortlich sind (Abb. 2). Ihre Tätigkeit erfolgt in einem Bereich, dessen Lage, Grossform und Höhe aus endogenen Prozessen resultiert.

Die Epirogenese der Alpen, das heisst die langsame Hebung der tektonisch deformierten Gesteinsmassen, hat nach JÄCKLI (1985) vor etwa 4 Millionen Jahren begonnen. Die dabei entstandene von West nach Ost verlaufende plateauartige Aufwölbung wurde allmählich von Flüssen erodiert. Das Hauptflussnetz wurde von der geologischen Struktur, zum Beispiel von Faltungsachsen und tektonischen Störungszonen, bestimmt. Vor allem während der letzten zwei Millionen Jahre wechselte sich fluviale Aktivität mit glazialer Aktivität als Funktion der globalen Klimaveränderungen ab. Die Wirkung von Flüssen und Gletschern war und ist vor allem erosiv, wobei die Produkte weitgehend in das Vorland und darüber hinaus transportiert werden. Eine geringere Menge wird, vorübergehend, in den Alpen in fluvialen, deltaischen und lakustrischen Sedimenten in einer Vielzahl von Landformen wie zum Beispiel Talfüllungen, Terrassen und Schwemmfächern gespeichert. Ein noch kleinerer Anteil ist in eiszeitlichen Ablagerungen wie Ablations- und Grundmoränen konserviert. Massenbewegungen tragen ständig zur Gestaltung und Umgestaltung der Landschaft bei. Die heutige Hebung der Alpen wird allgemein als gering eingeschätzt. Flüsse, Gletscher und Massenbewegung gestalten jedoch weiterhin die Landschaft neu und werden dies auch mit wechselnder Intensität in der Zukunft tun. Auf einer geologischen Zeitskala ist das «Schicksal» der Alpen eine flache Topografie mit niedrigen Bergen und Hügeln, wobei der Grossteil der Erosionsprodukte von grossen Flüssen in die Meere rund um Europa transportiert wird.

Die letzte grosse Vergletscherung von Vorarlberg und Liechtenstein hat etwa zwischen 32 000 und 14 700 Jahren vor heute im Oberen Würm stattgefunden (DE JONG *et al.* 2011). Bei maximaler Ausdehnung waren die Talgletscher zu einer Eismasse verschmolzen, über der nur einige der höchsten Gipfel als Nunataks herausragten. Die erosive Tätigkeit der Gletscher gestaltete die Landschaft um, die in ihren groben Umrissen bereits durch die Einwirkung von Wasser und Eis in den vorangegangenen Kalt- und Warmzeiten gebildet wurde. Dies wird zum Beispiel durch das Vorkommen von älteren Ablagerungen in den unteren Strecken von Tälern wie dem Gamperdonatal dokumentiert (DE GRAAFF *et al.* 2007). Diese Ablagerungen wurden nur teilweise durch Gletscher im Oberen Würm erodiert, wobei die ältere glaziale Talsohle in einer gewissen Tiefe unter der heutigen Oberfläche liegt (siehe das Walgau Vergletscherungsmodell in Abbildung 6 in DE GRAAFF *et al.* (2007); siehe auch Abschnitt 5.2). Mit dem Abklingen der Vergletscherung, die ihren Hochstand vor etwa 23 400 Jahren hatte (DE JONG *et al.* 2011), etablierten sich allmählich wieder die Flüsse in der Region.

Beispiele für die Wechselwirkung zwischen den rückschmelzenden Gletschern und den Flüssen, die sich im eisfreien Bereich allmählich entwickelten, werden von DE JONG *et al.* (1995) für den Vorderen Bregenzerwald, von DE GRAAFF (1992) für das Rhein- und das Illtal und von SEIJMONSBERGEN (1992) für den südlichen Walgau beschrieben. Grosse Mengen von Moränen und sonstigen Ablagerungen wurden von den sich entwickelnden Flüssen überarbeitet. Zuerst wurden Eisrandterrassen gebildet, und bald danach die fluvialen Terrassen und Schwemmfächerterrassen, auf denen viele der Städte und Dörfer von Vorarlberg (z. B. auf der östlichen Rheintalflanke, im Vorderen Bregenzerwald und im Walgau) zu finden sind.

Zeitgleich mit dem Abschmelzen der Gletscher nahmen die Massenbewegungen zu. Die kräftige Erosion durch die Eiskörper führte an vielen Stellen zu übersteilen und instabilen Felshängen. Massenbewegungen traten auf, sobald das Gelände eisfrei wurde, und auch später waren und sind sie ein wichtiger landformender Prozess. Aus vielen Beispielen sei der grosse Sturzstrom im Lecknertal (SEIJMONSBERGEN *et al.* 2005) im östlichen Vorarlberg erwähnt, sowie der grosse Bergsturz von Triesen/Triesenberg in Liechtenstein, der um und nach 11 500 Jahren vor heute aufgetreten ist.

Permafrostbedingungen existierten während einiger Zeit in jenen Bereichen, die eisfrei wurden und wo die jährliche Niederschlagsmenge unter 2200 mm lag. Dies wird durch das Vorkommen fossiler Blockgletscher im südlichen Walgau und im Lechquellengebirge belegt (DE JONG und KWADIJK 1988; SEIJMONSBERGEN 1992).

Auflösung durch meteorisches Wasser führte zu unregelmässigen, «zerfressenen» Oberflächen in Karbonatgesteinen, zum Beispiel auf dem Plateau des Gottesackers und beim Körpersee im nordöstlichen Vorarlberg. Oberflächennahe Auflösung von Gips formte unzugängliche Gipslöcherlandschaften wie in der Nähe von Oberlech (Kap. 6). Unterirdische Auflösung von Gips hatte an mehreren Stellen den Zerfall der darüber liegenden Schichten und die Bildung grosser Einsturzdolinen zur Folge. Das Kessiloch, ein 200 m breites und 70 m tiefes Loch am Nordhang des Schillerkopfs (2006 m), an der Grenze zwischen dem Gamperdonatal und dem Brandnertal, ist ein schönes Beispiel für diesen Vorgang (SEIJMONSBERGEN 1992; siehe auch Abschnitt 5.4).

Heute kommen vereinzelt noch kleine Tal- oder Kargletscher im Südosten Vorarlbergs in der Silvretta vor, wie zum Beispiel der Ochsentaler Gletscher und der Vermuntgletscher. Glaziale Erosion spielt zurzeit eine untergeordnete Rolle. Fluviale Prozesse und Massenbewegungen sind jedoch in ganz Vorarlberg und Liechtenstein immer noch sehr aktiv. Obwohl es verständlicherweise grosse Bemühungen gibt diese Prozesse zu steuern und zu reduzieren, ist ihr Einfluss auf die Veränderung der Landschaft immer noch sehr beachtlich.

Mit unserem geomorphologischen Ansatz zur Geokonservierung werden wir bestimmte Landformen in Vorarlberg und Liechtenstein näher in den folgenden Kapiteln beschreiben. Der Schwerpunkt wird auf Landformen liegen, die wir als besonders im Sinne eines hohen Geokonservierungspotenzials erachten: wie etwa Landformen, die aus «speziellen» Prozessen oder einer Kombination von Prozessen entstanden sind und/oder Landformen, die einen hohen Stellenwert für die Rekonstruktion der Landschaftsbildung oder des Klimas der Vergangenheit haben.

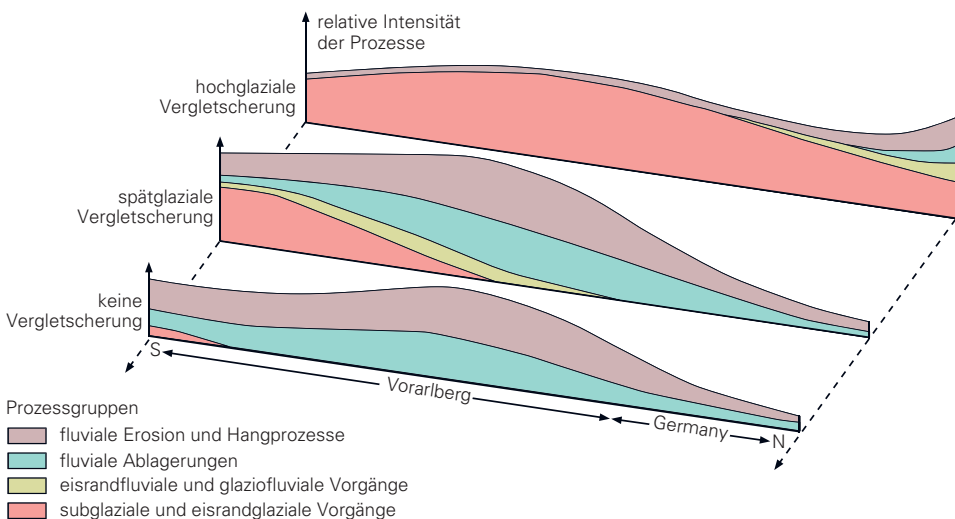


Abb. 2. Die relative Wichtigkeit der geomorphologischen Prozesse als Funktion von Ort und Zeit in Vorarlberg und dem angrenzenden deutschen Alpenvorland.

2 Geomorphologische Karten

2.1 Geomorphologie und Karten

Geomorphologie kann lose als das Studium von Landformen und den ihnen zugrunde liegenden geologischen Prozessen definiert werden (FAIRBRIDGE 1968). Geomorphologie verbindet Form, Material und Genese. Form bezieht sich auf die äussere Form von Landschaften und Landschaftselementen, Material auf den Untergrund, das heisst die konsolidierten und nicht konsolidierten Gesteine, die die Oberfläche der Landformen unterlagern, und Genese auf die vergangenen und gegenwärtigen Prozesse, die die Landformen kreiert haben. Geomorphologie ist die Wissenschaft, auf der unser Ansatz zur Identifizierung und Bewertung der Signifikanz der Landschaften und Landschaftselemente gegründet ist. Karten – auf Papier oder digital – sind ein wesentlicher Bestandteil der Geomorphologie.

Nach DE GRAAFF *et al.* (1987) und GUSTAVSSON *et al.* (2006) ist eine geomorphologische Karte mehr als nur eine Möglichkeit zur Darstellung von Daten. Sie ist auch eine Synthese von Forschungsergebnissen: Die Kartierung zeigt das geomorphologische Umfeld auf, das heisst die Ansammlung von Landformen, die unerlässlich für das Verständnis von einzelnen Landformen und Landschaften ist. Ein wichtiger Aspekt der geomorphologischen Karte ist, dass sie als wesentliche Grundlage für weitere Arbeiten dient. Abgeleitete oder thematische Karten können durch Hervorhebung bestimmter geomorphologischer Merkmale oder durch das Aufzeigen angewandter Aspekte der Geomorphologie, zum Beispiel Karten der potenziell schützenswerten Morphogeotopen, generiert werden. In unserer Studie haben wir zwei Arten von geomorphologischen Karten verwendet. Die erste ist die sogenannte klassische geomorphologische Karte, die zweite definieren wir als die computergenerierte geomorphologische Karte. Beide Karten dienen als Eingabe für die Beurteilung des Geokonservierungspotenzials von Landschaftselementen. Wie im weiteren Verlauf beschrieben, sind diese Arten von Karten in der heutigen Kartierungspraxis eng verknüpft.

2.2 Die klassische geomorphologische Karte

Klassische geomorphologische Karten sind Darstellungen von Landformen, das heisst von äusseren Formen, darunter liegenden Materialien und prägenden Prozessen, die auf Papier erzeugt und dargestellt werden. Symbole und Farben werden in verschiedenen Kombinationen verwendet um die Landschaft zu visualisieren. Eine Vielzahl von Punktsymbolen, Linien und Polygonen wird benutzt, um scharfe, graduelle oder eher diffuse geomorphologische Grenzen zu dokumentieren. Die einzelnen Schritte beim Erstellen einer klassischen Karte werden in Abbildung 3 beschrieben. Eine Fülle von Karten von verschiedenen Umgebungen wurde von den verschiedensten Interpreten, mit häufig unterschiedlichen geomorphologischen Hintergründen und Forschungsschwerpunkten, erstellt (GILEWSKA und KLIMEK 1968; MAARLEVELD *et al.* 1974; DEMEK und EMBLETON 1978; SALOMÉ *et al.* 1982; EVANS 1990; KLIMASZEWSKI 1990; GUSTAVSSON *et al.* 2006; SEIJMONSBERGEN 2013; VERSTAPPEN 2011).

Unsere klassische Karte von Vorarlberg und Liechtenstein ist im Wesentlichen eine feldbasierte, flächendeckende Bestandsaufnahme im detaillierten Massstab von 1:10000. Die Legende ist ein «Baukasten» von Symbolen und Farben (DE GRAAFF *et al.* 1987; Abb. 4, Beilage I). Derzeit stehen 35 dieser Karten der Öffentlichkeit zur Verfügung, die ungefähr 750 km² von Vorarlberg abdecken (DE GRAAFF *et al.* 1987; SEIJMONSBERGEN 1992; VAN NOORD 1996). Weitere Karten sind in Manuskript-Form vorhanden.

Angewandte Karten werden von klassischen Karten durch Extraktion (Übersetzung) der relevanten Informationen und durch Darstellung dieser Informationen in separaten Karten, zum Beispiel als *Overlay*-Karten, erstellt. Beispiele sind die geotechnischen Karten und die

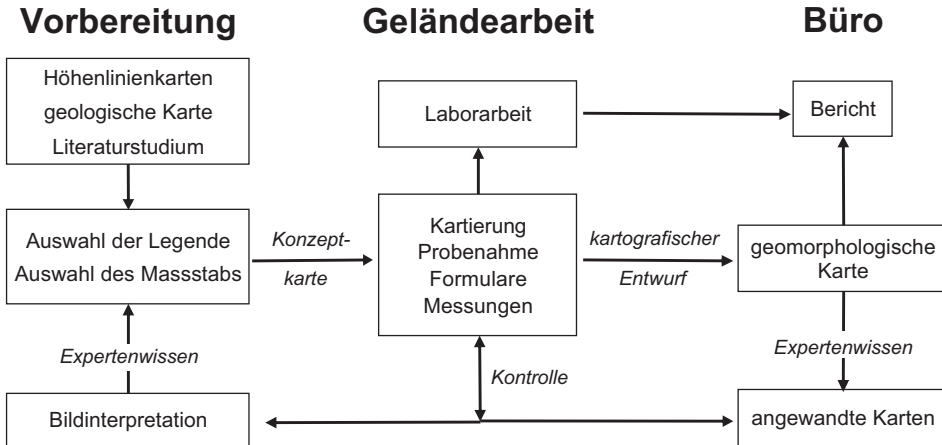


Abb. 3. Ablaufdiagramm des Verfahrens zur Erstellung von klassischen geomorphologischen Karten vor, während und nach der Feldarbeiten. Die Karten dienen als Basis für abgeleitete Karten wie zum Beispiel Karten der potenziell schützenswerten Morphogeotope (aus SEIJMONSBERGEN 2013).

Naturgefahrenkarten, die von SEIJMONSBERGEN (1992) aus den klassischen geomorphologischen Karten der Gemeinde Nenzing in Vorarlberg, die im Gelände unter Verwendung der in Abbildung 4 (Beilage I) gezeigten Legende aufgenommen worden waren, abgeleitet wurden. Dies sind Papierkarten, die auf traditionelle Weise gemacht worden sind: Einheiten wurden von dem Experten per Hand auf der geomorphologischen Karte abgegrenzt, um sie auf der abgeleiteten Karte darzustellen.

Ebenso können Karten der potenziell schützenswerten Morphogeotope auch aus diesen Karten abgeleitet werden. Ein Protokoll zur Erzeugung solcher Karten aus unseren gelände-basierten geomorphologischen Karten im heutigen GIS-Umfeld wurde von SEIJMONSBERGEN *et al.* (2009) vorgestellt. Ein wesentlicher Schritt ist die Umwandlung von Symbolen und Farben auf geomorphologischen Papierkarten zu einer polygonbasierten digitalen geomorphologischen Karte (Abschnitt 2.4). Die Beurteilung des Geokonservierungspotenzials, des Schutzwertes, wird im GIS unter Verwendung der letzteren Karte und einer Reihe von Klassifikationskriterien durchgeführt. Das Verfahren wird in Abschnitt 3.2 erläutert und mit einem Beispiel aus dem Weienried-Gebiet in Möggers im nördlichen Vorarlberg illustriert (Abschnitt 3.3). In den Kapiteln 5, 6, 7 und 8 wird die Methodik jeweils für die Gemeinde Nenzing im Walgau, für die Gemeinde Lech im Lechquellengebirge, für die Gemeinden Götzis, Klaus, Fraxern und Weiler auf dem östlichen Rheintalhang, und für die Region Malbun in Liechtenstein beschrieben und angewandt.

Legende geomorphologische Symbolkarte

Entwässerung					
	Fluss, Gerinne		feuchtes Gelände		Wasserfall
	zeitweises Gerinne		Quelle		See
	ehemaliges Gerinne		Quelle, gefasst		Strudelloch
	Ponor				

Morphographie - Morphometrie					
	Hangsymbol (mit Neigung)		Hangknick, ausgeprägt (mit Neigungen)		Kerbtal
	Steilkante oder Oberkante Hang: a < 10 m hoch, b > 10 m hoch, ausgeprägt		Hangknick, wenig ausgeprägt (mit Neigungen)		Erosionsrinne
	c ausgeprägte Steilkante > 10 m		Rücken, Hügel		Nische
	d Steilkante, hoch, sehr steil > 10 m		Becken, Hohlform		flaches Gelände
	Wasserscheide, eng				
	Wasserscheide, breit				

Materialien					
	Moor, anmooriges Gelände		Murschuttmaterial		feinkörnige Seeablagerungen (eiszeitlich)
	Talboden, feinkörnig		Hangschutt, oberflächliche Decke		eisrandfluvial, glazifluvial ohne Transportrichtung
	Talboden, feinkörnig, aktiv		Hangschutt, formbedingend		eisrandfluvial, glazifluvial Langsachsen = Transportrichtung
	Talboden, grobkörnig, Langsachsen = Transportrichtung blau = aktiv		Protalus Rampart Ablagerungen		Blockgletscherablagerungen
		Schwemmfächerablagerungen Langsachsen = Transportrichtung		Solifluktionsmaterial	
			Grosßblöcke (>0,5 m³) Bergsturzmaterial		Grundmoräne

Vorgänge - Entstehung					
	blau: Hydrographie; Karst (Karbonatgestein)		Murgang		Steinstreifen
	violet: Karst (Sulfatgesteine)		a kleine Doline (Kalkstein) b Karren (Kalkstein)		Sattel nach Eistransfluenz
	braun: fluviale Erosion; Hangprozesse; Moor		Solifluktion: a Lappen, b Rinne, c Fächer		Steinbruch [S], Kiesgrube [K], Tongrube [T]
	olivgrün: eisrandfluvial, glazifluvial		Rutschung, Sackung: a klein, b groß		a Weg b Pfad c Haus
	grün: Flußablagerungen		Zerrkluft: a klein, b groß		
	hellgrün: spätglazialer Schutt- bzw. Schwemmfächer (Gelände eisfrei)				
	orange: subglazial Sund eisrandglazial				
	schwarz: Zahlenangaben; Anthropogen				

Abb. 4. Legende der klassischen geomorphologischen Karte von Vorarlberg und Liechtenstein (nach de GRAAFF *et al.* 1987). Siehe auch Beilage 1.

2.3 Die computergenerierte geomorphologische Karte

Die computergenerierte geomorphologische Karte ist eine digitale Ansammlung von georeferenzierten Daten, die skalunenabhängig Informationen über die Geomorphometrie/Morphographie der Erdoberfläche, die Verteilung des Oberflächenmaterials und die landschaftsbildenden Prozesse bietet. Sie wird heutzutage durch eine Beurteilung der Genauigkeit ergänzt (SEIJMONSBERGEN 2013). Rohdaten und Informationen werden in einer (Geo-)Datenbank, die georeferenzierte Raster-, Vektor- und tabellarische Daten enthält, gespeichert. Diese Daten können zum Beispiel in GIS abgefragt, analysiert und visualisiert werden. Der

Tab. 1. Gegenüberstellung der klassischen geomorphologischen Karte mit der computergenerierten geomorphologischen Karte (nach SEIJMONSBERGEN 2013).

Klassische geomorphologische Karte	Digitale geomorphologische Informationslayer	
	Digitale klassische Karten/Aktualisierte digitale Karten	(Halb-)automatische Landschaftskartierung/Identifizierung von spezifischen geomorphologischen Erscheinungen
Geomorphologische Papierkarte	Geomorphologische Information als digitale Vektor-/Rasterdaten	
Symbol- und farbbasierte Legende	Symbole auf Basis von <i>Style sets</i>	Rasterbasierte Karte
Inhalt einer Papierkarte basiert auf Expertenwissen	Inhalt basiert auf Digitalisierungen durch Experten und angepasste Legenden	Automatische Kartierung mit Hilfe von digitalen Geländemodellen (DGM) und/oder Luftbildern, unter Verwendung von Expertenregeln
Morphometrie/Morphographie dargestellt durch Linien und Symbole	Morphometrie/Morphographie dargestellt durch digitale Linien und Symbole oder durch einzelne GIS-Layer mit Höheninformation	Morphometrie/Morphographie ersetzt durch einzelne Layer mit detaillierten Höheninformationen (DGM und/oder digitale Höhenlinien)
Materialien und Prozesse/Genese visualisiert mit Symbolen und/oder Farben	Materialien und Prozesse/Genese visualisiert mit digitalen Symbolen und/oder Farben	Materialien, Prozesse und Genese wenig beachtet
Kartierung zeitaufwändig, Expertenwissen des Geländes erforderlich Händisch gezeichnete Symbole Aktualisierung erfordert erneutes Drucken der Karte (zeitaufwendig, kostspielig)	Zeiteffiziente Erstellung der Karte, geringere Subjektivität Digitale Punkt- und Liniensymbole sowie Polygone; automatische Farbcodierung Aktualisierung schnell und zeiteffizient	Schnelle und objektive Erstellung von DGM-basierten Rasterkarten (<i>Land Surface Parameter</i> (LSP)) Schnelle Aktualisierung unter Verwendung von vordefinierten Regelsätzen und Modellen
Fixer Massstab für Kartierung und Visualisierung	Erstellung der Karte und Visualisierung in einem GIS unabhängig vom Massstab	Kartierung unabhängig von der Zellgröße des DGMs
Kombination mit anderen Informationslayern arbeitsaufwendig und schwierig	Integration und Analyse mit anderen Informationslayern einfach durchzuführen	
Angewandte Karten, die in thematische Karten übersetzt werden	Schnelle und reproduzierbare Anwendungen von den Geodatenbanken und analytischen GIS-Werkzeugen	
Keine Angaben über Zuverlässigkeit/Genauigkeit	Genauigkeit nimmt zu durch Aktualisierung der digitalen Karten	Beurteilung der Genauigkeit meist Teil des automatischen Kartierungsverfahrens

Begriff «Karte» hat sich als etwas unpassend für diese Datenbanken herausgestellt. Bequemlichkeitshalber, nutzen wir ihn dennoch. Ein treffenderer Begriff ist digitale, geomorphologische Informationsschichten oder *-layer* (Tab. 1). Die Daten und *Layer* sind Teil einer Geodatenbank, die andere Arten von Informationen, zum Beispiel eine Bewertung des Geokonservierungspotenzials enthält.

Klassische geomorphologische Karten können in einem relativ einfachen Verfahren in GIS-basierte Karten und somit in computergenerierte geomorphologische Karten umgewandelt werden (siehe Abschnitt 2.4).

Mittlerweile werden ebenfalls grundlegend neue, halbautomatische und computerbasierte Kartierungstechniken entwickelt (ANDERS *et al.* 2011; Under Review; Tab. 1; Kapitel 4). Diese Entwicklung wird stark durch neue quantitative Techniken zur Analyse von Landschaften und Veränderungen in der Landschaft, die Verfügbarkeit von hochauflösenden digitalen Daten der Erdoberfläche, wie Laser-Höhenmessungsdaten (LiDAR, siehe Kapitel 4), und die ständig steigende Leistungsfähigkeit der Computer beeinflusst (SEIJMONSBERGEN 2013). Die wesentlichen Objekte der geomorphologischen Untersuchungen (Form, Material und Genese von Landformen) bleiben unverändert, aber der praktische Ansatz ist sehr verschieden vom traditionellen Weg der Erstellung von Karten. Kapitel 4 veranschaulicht den neuesten Stand der Technik in diesem Bereich der angewandten Forschung, durch eine «Karte» des Gamptals, eines Seitentals des Gamperdonats.

Kapitel 6 befasst sich mit der Bewertung des Geokonservierungspotenzials für die Gemeinde Lech im Osten Vorarlbergs. Das geomorphologische Inventar, das der Beurteilung zugrunde liegt, ist zu einem Teil auf klassischen Feldaufnahmen basiert und zum anderen Teil computerbasiert.

2.4 Das morphogenetische Klassifikationsschema

Die Legende von unserer klassischen geomorphologischen Karte für Berggebiete (Abb. 4) wurde zu einem morphogenetischen Klassifikationsschema umgewandelt, so dass geomorphologische Einheiten auf der symbol- und farbbasierten klassischen Karte identifiziert und abgegrenzt werden können (SEIJMONSBERGEN *et al.* 2009). Das Schema ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Grenzen der einzelnen Einheiten der klassischen geomorphologischen Karten werden im GIS digitalisiert und codiert. Die Polygone, die so entstehen, sind die grundlegenden Einheiten der digitalen geomorphologischen Karte: Die klassische geomorphologische Karte wird so in eine computergenerierte geomorphologische Karte umgewandelt. Abgeleitete Karten basieren auf den Polygonen. Sie sind zum Beispiel die Morphogeotope, die hinsichtlich ihres Geokonservierungspotenzials geprüft werden können, wie in Kapitel 3 erläutert.

Neun Hauptprozessgruppen werden im morphogenetischen Klassifikationsschema unterschieden: Glazial, Fluvial, Massenbewegung, Periglazial, Organisch, Karst, Äolisch und Anthropogen, zu welcher Wasser als separate Gruppe hinzugefügt wird. Dreiunddreißig Klassen oder Typen von Landformen und Ablagerungen, die im GIS jeweils mit eigener Farbe und Code belegt sind, werden definiert.

Das Klassifikationsschema wurde so konzipiert, dass neue Klassen hinzugefügt werden können oder dass in anderen Bereichen, in denen andere Prozesse wirken können, auch eine Anwendung möglich wird (siehe SEIJMONSBERGEN *et al.* 2010).

Das Klassifikationsschema ist auch die Legende der Karten, die als *Layer* mit digitalen geomorphologischen Informationen, unter Verwendung der halbautomatischen und computerbasierten Kartierungstechnik, erstellt werden. Dies wird in Kapitel 4 näher erläutert.

Tab. 2. Das morphogenetische Klassifikationsschema (nach SEIJMONSBERGEN *et al.* 2009). Die Standardkriterien, die in der Bewertung des Geokonservierungspotenzials benutzt wurden, werden für die einzelnen Klassen auch aufgezeigt. Siehe Text für weitere Erläuterungen.

Spalten: 1: Hauptprozessgruppen; 2: GIS-Code der Klassen von Morphogeotopen; 3: Code-Erklärung; 4: In GIS verwendete Farben für die Klassen von Morphogeotopen; 5–8: Standardwerte für die in GIS verwendeten Gewichtungs- und Reihungskriterien.

Prozesse	GIS Kodierung	Landformen und Ablagerungstypen	GIS Farbe	Wissenschaft- liche Bedeutung (1-4-7)	Häufigkeit des Auftretens (1-3-5)	Vulnera- bilität (1-2-3)	Zerstö- rung (1-2-3)
Glazial im Allgemeine	1111	glazial erodiertes Anstehendes		1	1	1	3
	1112	glazial erodierte quartäre Ablagerungen		7	5	2	3
	1211	von Grundmoräne s.l. unterlagerte Landform		4	3	3	3
	1221	von Ablationsmoräne s.l. unterlagerte Landform		7	5	2	3
	1222	von (glazi-)fluvialer Erosion gebildete Landform		7	5	2	3
	1223	von (glazi-)fluvialen Ablagerungen unterlagerte Landform		7	5	2	3
	1224	von Seeablagerungen unterlagerte Landform		7	5	3	3
Fluvial	2111	fluvial gebildetes Tal; von fluvialer Erosion geprägter Hang		1	1	3	3
	2211	(sub-)rezentes Flussbett		1	5	3	3
	2212	fluviale Terrasse (inkl. kleine Steilkante)		4	5	2	3
	2213	Schuttfächer, Murgangfächer (inkl. Terasse)		4	3	1	3
	2214	von Seeablagerungen unterlagerte Landform		1	5	3	3
Massenbe- wegung	3111	Hang mit tiefgründiger Massenbewegung		4	5	2	3
	3112	Hang mit oberflächlicher Massenbewegung (Abtragung)		1	1	3	3
	3211	von Hangschutt unterlagerte Landform		1	1	2	3
	3212	Hang mit oberflächlicher Massenbewegung (Ablagerung)		1	3	1	3
	3213	Protalus Rampart		4	5	2	3
Periglazial	4111	von Zerbrechen und Zerfallen geprägte Oberfläche		4	5	2	3
	4211	Blockgletscher		7	5	2	3
Organisch	5111	von organischen Ablagerungen unterlagerte Landform		7	5	3	3
Karst	6111	stark von Karst geprägte Oberfläche in Karbonatgestein		1	5	1	3
	6211	stark von Karst geprägte Oberfläche in Sulfatgestein		4	5	3	3
	6212	von Karst geprägtes Sulfatgestein mit Bedeckung von glazialen Ablagerungen		4	5	3	3
	6213	von Karst geprägtes Sulfatgestein mit Bedeckung von Hangablagerungen		4	5	3	3
	6214	sehr grosse Einsturzdoline		4	5	1	3
	6215	Aufschluss in Breccie		4	5	2	3
Aeolisch	7111	von aeolischen Ablagerungen unterlagerte Landform		4	5	3	3
Wasser	8111	See und Ablagerungen		4	5	1	3
	8112	breiter Fluss		1	5	1	3
	8113	Stausee und Ablagerungen		1	5	1	3
	8114	Gletscher		7	5	3	3
Anthropogen	9111	planiertes Gelände		1	5	1	1
	9112	Grube, Steinbruch		4	5	1	1

3 Geokonservierung in Vorarlberg und Liechtenstein

3.1 Überblick

Das erste Inventar von potenziell schützenswerten Morphogeotopen in Vorarlberg wurde von DE GRAAFF *et al.* (1988) in enger Zusammenarbeit mit dem Naturmuseum des Landes Vorarlberg, der inatura Dornbirn (vormals Vorarlberger Naturschau) initiiert und hergestellt. «Wertvolle» Landschaften (zu jener Zeit Geotope genannt) wurden in Vorarlberg mit dem Ziel beschrieben, Informationen über Geokonservierung in die lokale Planung mit einzubeziehen. Die Lokalitäten wurden von Experten, basierend auf ihrer langen Erfahrung in Kartierungen in diesem Gebiet, ausgewählt.

Weitere Arbeiten wurden von DE GRAAFF *et al.* (2003) im Hinteren Bregenzerwald durchgeführt. Bestandsaufnahmen der «wertvollen» Landformen wurden im Gebiet Auenfeld-Gaisbühlalpe, in den Gemeinden Lech und Schröcken, in einem Gebiet östlich von der Damülser Mittagspitze in den Gemeinden Mellau und Damüls, und in einem Gebiet östlich des Diedamskopf in den Gemeinden Schoppernau und Bezau durchgeführt. Die Bewertung beruht auf detaillierten geländebasierten geomorphologischen Karten unter Verwendung von Kriterien, die denen von DE GRAAFF *et al.* (1988) entsprechen.

Ein Protokoll für die Beurteilung des Geokonservierungspotenzials befindet sich in SEJMONSBERGEN *et al.* (2009; Tab. 3). Es wurde entwickelt, um in GIS mit polygonbasierten, digitalen Karten, die von den klassischen geländebasierten geomorphologischen Karten abgeleitet wurden, angewendet zu werden. Es wird jetzt auch verwendet, um das Geokonservierungspotenzial der polygonalen Einheiten, welche mit computerbasierten Techniken «kartiert», das heisst extrahiert und klassifiziert wurden, zu beurteilen. Die Einheiten der Karte werden gewichtet und in Bezug auf das Geokonservierungspotenzial mit gut definierten quantitativen und qualitativen Kriterien gereiht. Das Protokoll wurde für die vorliegende Studie aktualisiert und erweitert (Abschnitt 3.2).

Tab. 3. Protokoll zur Bewertung des Geokonservierungspotenzials von Morphogeotopen (nach SEJMONSBERGEN *et al.* 2009).

Schritte	Input	Aktion	Output
1	Geomorphologische Karte: klassische oder computerbasierte; morphogenetisches Klassifikationsschema (Tab. 2)	Identifikation von homogenen Einheiten Codierung und Färbung der Polygone	Morphogeotope Digitale geomorphologische Karte
2	Gewichtungs- und Reihungsschema (Tab. 4)	Quantitative Gewichtung und Reihung anhand primärer Kriterien Quantitative Gewichtung und Reihung anhand sekundärer Kriterien	Signifikanzniveau (gering, mässig, hoch)
3	Zusätzliche Beurteilungskriterien	Qualitative Gewichtung und Reihung anhand zusätzlicher Kriterien; Beurteilung durch Experten	Endgültiges Signifikanzniveau (gering, mässig, hoch)
4	Gereimte Morphogeotope	Auswahl von schützenswerten Morphogeotopen	Geschützte Morphogeotope (Geokonservierungsstandorte)

3.2 Verfahren zur Erfassung und Reihung der Morphogeotope

Das Protokoll von SEIJMONSBERGEN *et al.* (2009) für die Gewichtung und Reihung der Morphogeotope wurde aktualisiert und für die vorliegende Studie erweitert. Der Bezugsrahmen für die Bewertung der Morphogeotope in der vorliegenden Studie sind das Land Vorarlberg und das Fürstentum Liechtenstein und nicht die Welt, Europa, ein Land oder eine bestimmte Region innerhalb Vorarlberg (vgl. EMBLETON 1984). Für jede Einheit der digitalen geomorphologischen Karte, das heisst für jedes Morphogeotop, wird die Signifikanz innerhalb dieses Bezugsrahmens unter Anwendung quantitativer und qualitativer Bewertungskriterien beurteilt. Die Beurteilung wurde standardisiert und erfolgt mit Hilfe der Attributtabelle in der GIS-Software und unter Verwendung eines Gewichtungs- und Reihungsschemas. Gewichtung und Reihung bilden die Grundlage für die Auswahl von schützenswerten Morphogeotopen.

Tab. 4. Quantitative Beurteilungskriterien sowie die Matrix der Gewichtungs- und Reihungsmethodik. Siehe Text zur Erläuterung. Morphogeotope mit einem Wert in Klammern kommen nicht vor.

A: Primäre Kriterien			Wissenschaftliche Bedeutung		
			gering	mittel	hoch
			1	4	7
Häufigkeit des Auftretens	hoch	1	2	(5)	(8)
	mittel	3	4	7	(10)
	gering	5	6	9	12

B: Sekundäre Kriterien			Zerstörung		
			beträchtlich	mässig	keine
			1	2	3
Vulnerabilität	gering	1	2	3	4
	mittel	2	3	4	5
	hoch	3	4	5	6

C: Gewichtung und Reihung		Primäre Kriterien					
		2	4	6	7	9	12
Sekundäre Kriterien	2	4	6	8	9	11	14
	3	5	7	9	10	12	15
	4	6	8	10	11	13	16
	5	7	9	11	12	14	17
	6	8	10	12	13	15	18

Geokonservierungspotenzial					
4–8	geringe Signifikanz	9–13	mässige Signifikanz	14–18	hohe Signifikanz

Wir verwenden vier Merkmale oder Faktoren im quantitativen Teil des Gewichtungs- und Reihungsprotokolls: wissenschaftliche Bedeutung, Häufigkeit des Auftretens, Zerstörung und Vulnerabilität (vgl. BRUSCHI und CENDRERO 2005; CORATZA und GIUSTI 2005; CARTON *et al.* 2005; PRALONG 2005; SERRANO und GONZÁLEZ-TRUEBA 2005). Wissenschaftliche Bedeutung und Häufigkeit des Auftretens sind die primären Merkmale. Als geoökologische Faktoren haben sie in unserem Ansatz die höchste Gewichtung. Zerstörung und Vulnerabilität, die mit sozioökonomischen Faktoren wie Infrastruktur, Wasser- und Landnutzung verknüpft sind, werden als weniger wichtige Faktoren bewertet. Sie bekommen daher eine geringere Gewichtung. Basierend auf unserer langjährigen Erfahrung in Vorarlberg und den angrenzenden Bergregionen haben wir für wissenschaftliche Bedeutung, Häufigkeit des Auftretens und Vulnerabilität verschiedene Stufen der Bedeutung für die unterschiedlichen *Typen* von Landformen und Ablagerungen des morphogenetischen Klassifikationsschemas unterschieden, mit fixen Werten für jede Stufe (Tab. 4). Die Gewichtung der Zerstörung wird für die *einzelnen* Polygone vorgenommen. Die Gewichtung aller Morphogeotope (Polygone) ist in der GIS-Software automatisiert und die Reihung wird automatisch generiert. Die Reihung der *einzelnen* Polygone kann durch Einstellen der automatisch zugewiesenen Gewichtung für ein oder mehrere Merkmale in der Attributtabelle, falls erforderlich aufgrund von spezifischen Kenntnissen über die einschlägigen Landformen und Ablagerungen, geändert werden.

Wissenschaftliche Bedeutung ist das wichtigste quantitative Kriterium. Die Bewertung beruht auf den folgenden Überlegungen: Eine bestimmte Landform oder Ablagerung hat einen besonderen Wert bei der Rekonstruktion der Landschaftsentwicklung oder, genauer gesagt, enthält Informationen über die klimatischen Bedingungen zur Zeit ihrer Entstehung. Sie trägt somit zu einem besseren Verständnis der Abläufe und Muster des Klimawandels bei. Andererseits kann eine Landform oder Ablagerung ein «Paradebeispiel» eines geomorphologischen Prozesses oder einer Gruppe von Prozessen sein und ist als solche wissenschaftlich relevant. Wir unterscheiden drei Stufen von Bedeutung: gering, mittel und hoch; mit numerischen Werten von 1, 4 respektive 7. Es überrascht nicht, dass die Gruppe der glazialen Landformen und Ablagerungen in den Gebirgsregionen von Vorarlberg und Liechtenstein mit einer hohen wissenschaftlichen Bedeutung eingestuft wird.

Die Häufigkeit des Auftretens ist ein Mass für die Einzigartigkeit einer Landform oder Ablagerung. Je häufiger eine bestimmte Landform oder Ablagerung vorkommt, desto weniger einzigartig ist sie. Wir unterscheiden drei Stufen von Häufigkeit des Auftretens: gering, mittel und hoch, mit den numerischen Werten 5, 3 respektive 1.

Wissenschaftliche Bedeutung und Häufigkeit des Auftretens von Morphogeotopen sind die primären quantitativen Parameter im Gewichtungs- und Reihungsprotokoll (Tab. 4). Ersteres ist am wichtigsten und umfasst den grösseren Bereich an numerischen Werten. Die Kombination der Werte der wissenschaftlichen Bedeutung und der Häufigkeit des Auftretens in einer Matrix (Tab. 4) erzeugt einen Satz von Ergebnissen, die die Grundlage für eine Reihung bilden. Wir unterscheiden drei Ränge in der Matrix: die Werte 2 und 4 sind von niedrigem Rang, die Werte 6 und 7 von mittlerem Rang und die Werte 9 und 12 sind von hohem Rang. Die Reihung der Morphogeotope in dieser Matrix ist ein guter Indikator für das Geokonservierungspotenzial. Wir haben jedoch Vulnerabilität und Zerstörung als zusätzliche, sekundäre quantitative Kriterien in unserem Bewertungsprotokoll für eine höhere Genauigkeit und eine bessere Differenzierung hinzugefügt.

Vulnerabilität bezieht sich darauf, ob menschliche Aktivitäten Auswirkung auf eine Landform oder eine Ablagerung haben können. Folgende Fragen sind zu beantworten: Kann menschliche Aktivität die Landform negativ beeinflussen? Wird sie ganz oder teilweise selbst bei geringer menschlicher Aktivität zerstört werden? Die negativen Auswirkungen des menschlichen Handelns auf Morphogeotope variieren: Bestimmte Morphogeotope werden wahrscheinlich durch sehr geringe menschliche Aktivität bereits vollständig zerstört und weisen eine hohe Vulnerabilität auf, während andere weniger anfällig sind. Drei Stufen der Vulnerabilität können unterschieden werden: gering (Wert 1), mittel (Wert 2) und hoch (Wert 3).