Diplomarbeit zum Thema

Automatisierte Ableitung einer topographischen Bodenbedeckungskarte im subalpinen Bereich

ausgeführt am
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Institut für Geoinformation und Kartographie
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer
Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Georg Gartner

Dipl.-Ing.Dr. techn. Christian Briese
Mag. Dr. rer. nat. Bernhard Höfle

durch

Armin Klauser
Matrikelnr.: 0325701
email: armin.klauser@gmx.net
Weggensteinstraße 65, 39100 Bozen (Italien)

Wien, am 26. November 2009 Armin Klauser

Kurzfassung

Das luftgestützte Laserscanning (Airborne Laserscanning, kurz ALS) hat sich in den letzten Jahren zu einem Standardverfahren für die digitale Erfassung von Landschaften entwickelt. Wesentliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Methoden sind die hohe Qualität und Automatisierung bei der Erfassung und Auswertung der Daten des Geländes. Dies macht das ALS auch für die Ableitung von topographischen Karten interessant, dessen Herstellung und Aktualisierung heutzutage noch sehr teuer ist.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein automatisiertes Verfahren für die Ableitung einer großmaßstäbigen topographischen Karte (1:10.000 bzw. 1:25.000) auf Grundlage von Laserscanning-Daten und Orthophotos entwickelt. Das Verfahren ermöglicht die Ableitung einer Bodenbedeckung und Geländedarstellung, wobei zwischen den Klassen Wald, Latschen, Wiese, Fels und Geröll unterschieden wird. Die Ableitung der Bodenbedeckung erfolgt in zwei Schritten. Als erstes wird das Gelände mithilfe abgeleiteter Attribute der ALS-Punktwolke und des Orthophotos klassifiziert. Das Ergebnis der Klassifizierung wird anschließend in einem zweiten Schritt generalisiert. Dadurch können Karten mit unterschiedlichem Maßstab aus demselben Datenmaterial abgeleitet werden. Die Geländedarstellung hingegen besteht aus Höhenlinien, Schummerung und einer Felszeichnung, und wird auf Grundlage eines digitalen Geländemodelles (DGM) abgeleitet. Während die Berechnung der Höhenlinien und Schummerung mit Standardverfahren erfolgt, wurde für die Felsdarstellung eine neue automatisierte Methode entwickelt.
Das Verfahren wurde erfolgreich auf ein Testgebiet nördlich von Innsbruck (Tirol, Österreich) angewendet. Dabei konnten für die Bodenbedeckung gute Resultate erzielt werden. Ein Vergleich der automatisierten Karte mit Referenzkarten ergab eine flächenmäßige Übereinstimmung zwischen 86% und 93% (je nach Referenzkarte). Die automatisiert abgeleitete Felsdarstellung hingegen konnte nur teilweise überzeugen.

Nach einer kurzen Einleitung beginnt die Arbeit mit der Vorstellung der Grundlagen des ALS und der Orthophotoherstellung, und fasst die aktuell verfügbaren Methoden zur automatisierten Ableitung topographischen Karten zusammen. Es folgt eine genaue Beschreibung des entwickelten Verfahrens für die Ableitung der Bodenbedeckung und Geländedarstellung. Anschließend werden die Ergebnisse des Untersuchungsgebiet vorgestellt und diskutiert. Die Diplomarbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf noch offene Forschungsfragen.

Abstract

During the last years, airborne laser scanning (ALS) has become a standard method for the digital capturing of landscapes. Compared to conventional methods, some of its fundamental advantages are the highly automated procedures for the generation of high quality digital terrain models. Due to these capabilities, ALS is a suitable method for the derivation of topographic maps, which are still labour intensive and extensive for the original generation and the subsequent updating.

In this diploma thesis, an automated procedure has been developed in order to derive a large scale topographic map (1:10.000 resp. 1:25.000) from ALS data and orthophotos. This method allows the derivation of land cover (woods, mountain pines, meadows, rocks, boulders) and terrain depiction. Land cover derivation is generated in two steps. First, the area is classified by features derived form ALS data and orthophotos. In a second step, the result of the classification process is being generalised. By that manner, it is possible to derive maps with different scales from the same dataset. The depiction of the terrain is derived on the basis of a digital terrain model (DTM), and consists of contour lines, shading and a cartographic representation of rocks. Whereas traditional methods have been used for the calculation of the contour lines and shading, a new automated method has been developed for the representation of rocks.
The procedure is being applied to a test area, situated in the north of Innsbruck (Tyrol, Austria). Good results have been achieved in terms of the land coverage. A comparison of the automated map with reference maps resulted in an area-wise correctness of 86% and 93% respectively, depending on the reference map. On the other hand, the automated representation of rocks was only partly convincing.

After a short introduction, the thesis starts with some background information about ALS and orthophoto generation. Furthermore an overview on available automated methods for the generation of topographic maps is provided. The next part consists of a detailed description of the method developed for land cover derivation and terrain depiction. Subsequently, the practical results of the test area are presented and discussed. The final part of the thesis comprises a summary and provides an outlook into future research work.

Liste der Akronyme

ALS	Airborne Laserscanning
DGM	digitales Geländemodell
DOM	digitales Oberflächenmodell
GIS	Geographisches Informationsystem
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
nDOM	normiertes digitales Oberflächenmodell
POS	Positionierungs- und Orientierungssystem
TU Wien	Technische Universität Wien
QGis	Quantum GIS
VARI	Visible Atmospherically Resistand Index

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Grundlagen 5
2.1 Airborne Laserscanning (ALS) 5
2.2 Orthophoto 8

3 Stand der Forschung 10
3.1 Digitale Ableitung der Bodenbedeckung 10
3.1.1 Klassifikationsverfahren nach Le Bris und Boldo (2007) 10
3.1.2 Überwachte Parameterklassifikation nach Charaniya et al. (2004) 11
3.1.3 Überwachte Klassifikation nach Tymkow und Borkowski (2008) 12
3.2 Extraktion von Geländekanten aus ALS Daten 13
3.2.1 Kantenextraktion nach Briese (2004) 13
3.2.2 Vollautomatische Extraktionsmethode nach Briese et al. (2009) 14
3.3 Automatisierte Felszeichnung 15
3.3.1 Gerippelinienmethode nach Hurni (1995) 16
3.3.2 Felszeichnung nach Gondol et al. (2008) 17

4 Methoden 19
4.1 Abgeleitete Attribute 20
4.1.1 Topographische Modelle 20
4.1.2 Geländeneigung 22
4.1.3 Ebenenabweichung 22
4.1.4 Echoratio 23
4.1.5 Vegetationsindex VARI 24
4.2 Ableitung der Bodenbedeckung für unterschiedliche Maßstäbe 25
4.2.1 Klassifizierung der Bodenbedeckung 26
4.2.2 Generalisierung der Bodenbedeckung 31
4.3 Geländedarstellung 35
4.3.1 Höhenlinien 35
4.3.2 Schummerung 36
4.3.3 Felsdarstellung 36

5 Untersuchungsgebiet und Daten **41**
5.1 Untersuchungsgebiet Nordkette 41
5.2 ALS-Daten Nordkette 42
5.3 Orthophoto Nordkette 43
5.4 Referenzkarten 43

6 Ergebnisse **45**
6.1 Abgeleitete Attribute 45
6.2 Bodenbedeckung 48
6.2.1 Klassifizierung 48
6.2.2 Generalisierung der Bodenbedeckung 54
6.3 Geländedarstellung 56
6.3.1 Höhenlinien und Schummerung 56
6.3.2 Felszeichnung 57
6.4 Topographische Bodenbedeckungskarte 59

7 Diskussion **60**
7.1 Klassifizierung der Bodenbedeckung 61
7.2 Generalisierung der Bodenbedeckung 63
7.2.1 Vergleich der Generalisierungsvarianten 64
7.2.2 Vergleich mit Referenzkarten 67
7.3 Felszeichnung 75

8 Zusammenfassung und Ausblick **77**

Literaturverzeichnis **81**

Abbildungsverzeichnis **84**

Tabellenverzeichnis **85**

Anhang **86**

Lebenslauf **93**

1 Einleitung

Als topographische Karte gilt in einem sehr weiten und allgemeinen Sinne jede *"Karte, in der Situation, Gewässer, Geländeformen, Bodenbewachsung und eine Reihe sonstiger zur allgemeinen Orientierung notwendiger oder ausgezeichneter Erscheinungen den Hauptgegenstand bilden und durch Kartenbeschriftung eingehend erläutert sind"* (Internationale Kartographische Vereinigung 1973). Eine andere und kürzere Definition spricht von *"... Karten aller Maßstäbe, in denen die Landschaft charakteristisch vereinfacht dargestellt ist"* [Hake et al., 2002]. Wegen ihrer grundlegenden Bedeutung gehören die Herausgabe, Aktualisierung und Führung der Kartenwerke meist zu den öffentlichen Aufgaben (amtliche topografische Karten). Die Abbildung 1.1 (Links) zeigt das Orthophoto der Martinswand westlich von Innsbruck. Die zugehörige amtliche topographische Karte im Maßstab 1:50.000 (ÖK50) ist in der rechten Abbildung dargestellt.

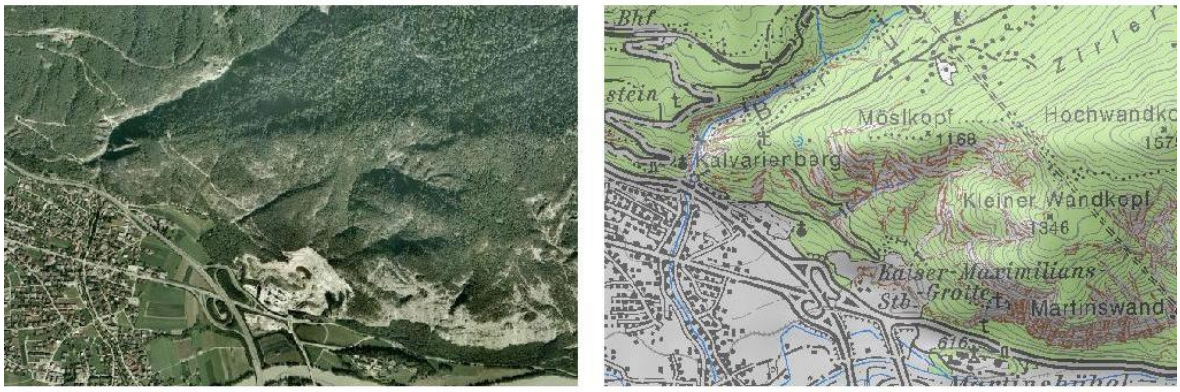

Abbildung 1.1: Links: Orthophoto der Martinswand westlich von Innsbruck; Rechts: topographische Karte ÖK50 des Orthophotos [Tiris, 2009]

Besonders in Gebirgsregionen gewinnen topographische Karten in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Der ständig wachsende Markt des weltweiten Alpintourismuses erhöht die Notwendigkeit von genaue Karten in Gebirgen [Alpenverein, 2009]. Während die Alpen durch die amtlichen topographischen Karten der verschiedenen Länder sehr gut abgedeckt sind, existiert für andere Länder der Erde oft nur unzureichendes Kartenmaterial. Bergsteiger müssen in solchen Regionen meist auf wenig hilfreiche großmaßstäbige Karten oder Satellitenbilder (z.B Google Earth) zurückgreifen. Nur in besonders interessanten Regionen wurden in den letzten Jahrzehnten durch ausländische Organisationen mit hohem finanziellen Aufwand topographische Karten erstellt (z.B. Expeditionskarten des Alpenvereins in Nepal, Bolivien, Pakistan).

Neben dem Einsatz als Orientierungs- und Planungsgrundlagen im Alpintourismus werden solche Karten in zunehmenden Maße in der Wissenschaft zur Analyse und Visualisierung von Problemen verwendet. Ein aktuelles Beispiel dafür ist der Klimawandel der Erde und dessen Auswirkungen auf die Gebirgsvegetation. In den Alpen könnte der Klimawandel weit reichende Folgen auf lebensnotwendige Wald-Funktionen haben, wie dem Schutz vor Lawinen, Hochwasser und Muren. Damit diese Veränderungen rechtzeitig erkannt werden können, bedarf es einer genauen Dokumentation der Vegetationsentwicklung [Umweltbundesamt, 2009].

Die Neuerstellung und Aktualisierung solcher topographischer Karten ist sehr aufwendig und teuer. Die Karten werden heute mithilfe einer photogrammetrische Luftbildauswertung (Einbild- und Mehrbildauswertung), sowie den Einsatz von terrestrischen Aufnahmeverfahren, wie GPS oder Tachymeter, erstellt. Trotz des Einsatzes von Computern sind nach wie vor manuelle Eingriffe und Korrekturen bei der Kartenherstellung erforderlich.

Neue Möglichkeiten für die Ableitung topographischer Karten eröffnen sich durch das Airborne Laserscanning (ALS). Diese relativ neue Technologie hat in den letzten Jahren die topographische Geländeaufnahme regelrecht revolutioniert. [Kraus, 2001] spricht sogar von einem Paradigmen-Wechsel in der Photogrammetrie. Die Vorteile des Laserscannings im Gegensatz zu den klassischen photogrammetrischen Auswerteverfahren liegen in der hochgenauen Erfassung von Gelände- und Landschaftsobjekten, und einer einfachen großteils automatisierten Auswertung. Durch die kombinierte automatisations-gestützte Verwendung der räumlichen Information aus ALS-Daten und den Grauwerten des Orthophotos könnte der bisherige Erstellungsprozess von topographischen Karten vereinfacht, und somit kostengünstiger werden.

Ziele der Diplomarbeit

In dieser Diplomarbeit soll der kombinierte Einsatz von ALS-Daten und Orthophotos für die Ableitung einer topographischen Karte untersucht werden. Die Arbeit wird auf die Ableitung der Bodenbedeckung und der Geländedarstellung im subalpinen Bereich (1500 bis 2500 Meter) beschränkt. Die Karte besteht somit aus folgenden Kartenelementen: Bodenbedeckung, Höhenlinien, Schummerung und Felszeichnung (siehe Abbildung 1.2). Daraus ergibt sich folgende Fragestellung:

> *Kann mithilfe von ALS-Daten und Orthophotos eine topographische Bodenbedeckungskarte des subalpinen Bereiches in großem Maßstab automatisiert abgeleitet werden?*

Das Ziel der Arbeit ist somit die Entwicklung eines möglichst automatisierten Verfahrens für die Ableitung einer Bodenbedeckungskarte inklusive einer Geländedarstellung. Unter automatisiert versteht man, dass zwischen dem Einlesen der Daten bis zur Kartenausgabe kaum interaktive Arbeit geleistet werden muss. Bei der Bodenbedeckung soll zwischen den Klassen *Wald, Latschen, Wiese, Fels* und *Geröll* unterschieden werden. Die Methode muss außerdem die Möglichkeit bieten,

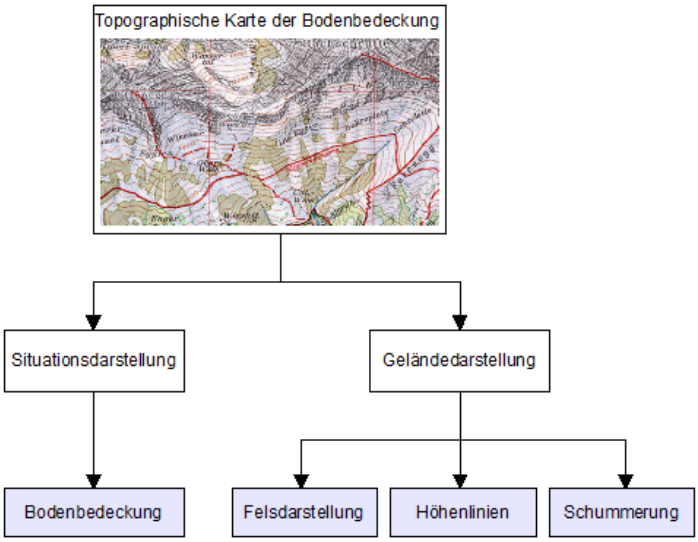

Abbildung 1.2: Kartenelemente der topographischen Bodenbedeckungskarte

großmaßstäbige Karten mit verschiedenen Maßstäben abzuleiten. Es sollen beispielsweise Karten im Maßstab 10.000, 1:25.000 oder 1:50.000 aus demselben Daten abgeleitet werden können.

Die entwickelten Methoden sollen anschließend an einem Untersuchungsgebiet getestet werden. Die erforderlichen Berechnungen werden mit der freien Software GRASS GIS (***G**eographic **R**esources **A**nalysis **S**upport **S**ystem*) durchgeführt. GRASS GIS ist ein Geographisches Informationssystem (GIS) für das Management, Modellierung und Visualisierung räumlicher Vektor- und Rasterdaten unterschiedlicher Formate [GRASS, 2009]. Die Software verfügt über mehr als 300 raster- und vektor-orientierte Funktionalitäten, welche jeweils in einem eigenen Modul ausgeführt werden. Eine Übersicht über die wichtigsten Befehle ist in [Dassau et al., 2005] zu finden. Im Zuge dieser Arbeit wurde GRASS GIS als Erweiterung des freien Geodatenviewer Quantum GIS (Version 0.11.0) verwendet. Dadurch wird der Vorteil einer einfachen Bedienung und ansprechenden Visualisierung von Quantum GIS mit den umfangreichen Funktionen von GRASS GIS kombiniert. Genauere Informationen dazu sind im Internet unter folgenden Adressen zu finden:

GRASS http://grass.osgeo.org

Quantum GIS http://www.qgis.org

Aufbau der Diplomarbeit

Im zweiten Kapitel wird das Prinzip des Airborne Laserscannings und der Orthophotoherstellung beschrieben. Es folgt in Kapitel 3 eine Übersicht aktueller Forschungsarbeiten, welche für die Ableitung der Bodenbedeckungskarte von Bedeutung sind. Im vierten Kapitel werden die entwickelten Methoden für die automatisierte Ableitung der Bodenbedeckung und Geländedarstellung vorgestellt. Kapitel 5 zeigt das Untersuchungsgebiet der Nordkette nördlich von Innsbruck. Außerdem werden die verwendeten ALS-Daten, das Orthophoto und die verfügbaren Referenzkarten für die Beurteilung der Ergebnisse präsentiert. Im sechsten Kapitel werden die Zwischenergebnisse und die fertige Karte für das Untersuchungsgebiet dargestellt. Die Ergebnisse werden im Anschluss in Kapitel 7 analysiert und beurteilt. Es werden auch Aussagen über die Qualität der automatisierten Karten durch einen Vergleich der Ergebnisse mit den Referenzkarten gemacht. Im letzten Kapitel schließlich folgt eine Zusammenfassung und der Ausblick für zukünftige Entwicklungen. Der Quellcode für GRASS GIS ist am Ende der Arbeit im Anhang beigefügt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird das Prinzip des Airborne Laserscannings (Kapitel 2.1) und des Orthophotos (Kapitel 2.2) beschrieben. Die ALS-Daten und das Orthophoto bilden die Basis der automatisiert abgeleiteten topographischen Bodenbedeckungskarte (siehe Kapitel 1). Die hier beschriebenen Grundlagen sind für das Verständnis der folgenden Kapitel hilfreich.

2.1 Airborne Laserscanning (ALS)

Das Airborne Laserscanning (ALS), oft auch als LIDAR (Light detection and ranging) bezeichnet, ist ein optisches aktives System zur Erfassung von Landschaftsoberflächen. Dabei wird das Gelände von einem Flugzeug mithilfe eines Laserstrahles punktförmig in Streifen abgetastet (siehe Abbildung 2.1). Es hat sich in den letzten Jahren zu einer Standardverfahren für die Erfassung von topographischen Daten entwickelt [Maas, 2005].

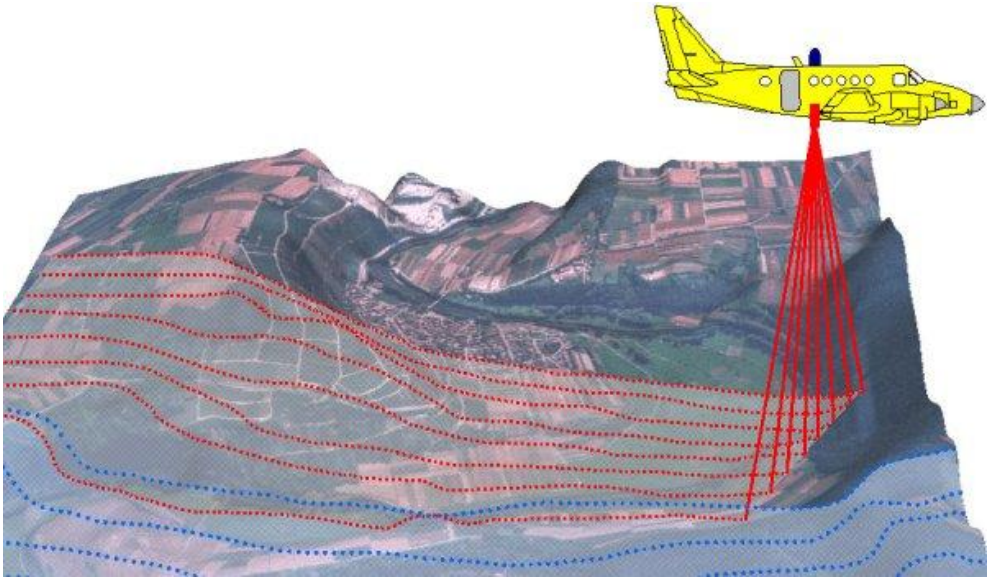

Abbildung 2.1: Streifenweise Datenerfassung (Rote und blaue Punkte) mittels eines Lasers aus dem Flugzeug [Hanover, 2009]

ALS System

Mithilfe eines Laserstrahles wird die Entfernung zwischen dem Laserscanner und der jeweiligen Objektoberfläche, an der der Laserstrahl reflektiert wird, gemessen. Es existieren zwei Methoden für die optische Entfernungsmessung: die Laufzeitmessung und die Messung der Phasenverschiebung [Kern, 2002]. Das Prinzip der Laufzeitmessung hat sich von den beiden Methoden im praktischen Einsatz bei den ALS-Systemen bewehrt. Die Entfernungsmessung erfolgt dabei durch die Messung der Zeitspanne, die zwischen dem Aussenden des Laserimpulses und dem erfassen des reflektierten Laserechos verstreicht. Die Entfernung kann nach folgender Formel bestimmt werden [Kraus, 2004]:

$$s = \frac{t \cdot v_g}{2} \tag{2.1}$$

mit s ··· Entfernung zwischen Laserscanner und dem Objekt
t ··· Laufzeit des Impulses
v_g ··· Gruppengeschwindigkeit des Lichtes

Neben der Laufzeit wird der Ablenkwinkel des Laserstrahles senkrecht zur Flugrichtung des Flugzeuges registriert. Für die Umwandlung dieser Polarkoordinaten in ein übergeordnetes Koordinatensystem benötigt man zusätzlich die Position und räumliche Lage des Scanners. Diese Messgrößen werden mittels eines dynamischen Positionierungs- und Orientierungssystem (POS), typischerweise bestehend aus einem Satellitenpositionierungssystem (GNNS) und einer inertialen Messeinrichtung (IMU), ermittelt.

Wie bereits zuvor beschrieben, wird der Laserstrahl an der Oberflächenstruktur im Gelände reflektiert und anschließend im Messgerät registriert. Trifft der Laserstrahl auf Vegetation, so werden Teile des Strahles an unterschiedlichen Stellen zurückgeworfen. In Abbildung 2.2 sind verschiedene Reflektionen an einem Baum dargestellt: Der Strahl wird an der Baumkrone, den Ästen und am Boden reflektiert. Der Laserscanner empfängt somit mehrere Laser-Echos, welche durch die Zeitdifferenz die unterschiedlichen Höhen der gescannten Oberfläche beschreiben.

Das empfangene Signal kann auf unterschiedliche Arten verspeichert werden. Es wird zwischen diskreten und full-waveform ALS-Systemen unterschieden. Bei diskreten Systemen wird das Signal in mehrere Echos zerlegt. Normalerweise wird zwischen dem ersten Echo (*first echo*) und dem letzten Echo (*last echo*) unterschieden, wobei neuere Systeme auch Zwischen-Echos bestimmen können. Im Unterschied dazu wird bei full-waveform Scannern das gesamte empfangene Signal des Laserstrahles erfasst und gespeichert [Wagner et al., 2006].

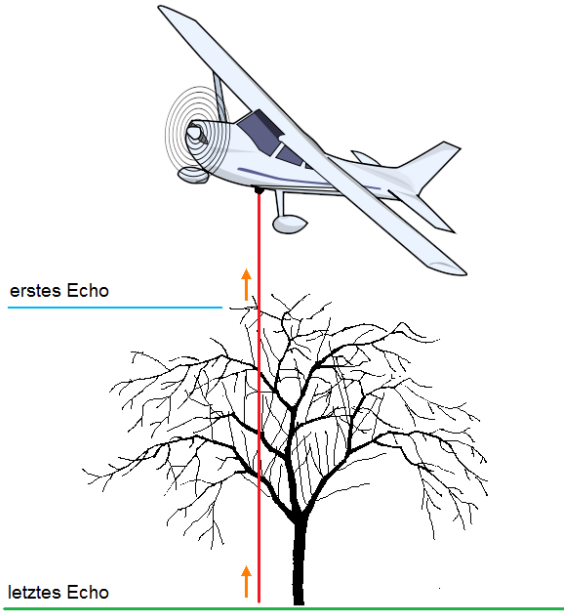

Abbildung 2.2: Erstes und letztes Echo am Beispiel eines Baumes

Georeferenzierung

Bei der Georeferenzierung werden aus den Messgrößen Koordinaten berechnet. Dazu werden den Polarkoordinaten aus dem Laserscanner die Orientierungsparameter und Position der GPS/IMU-Einheit zugeordnet. Anschließend können für jedes Laser-Echo XYZ-Koordinaten nach der Formel 2.2 berechnet werden. Dieser Vorgang wird als direkte Georeferenzierung bezeichnet [Kraus, 2004].

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0(t) \\ Y_0(t) \\ Z_0(t) \end{pmatrix} + R_{\omega(t)\phi(t)\chi(t)} \begin{pmatrix} 0 \\ s(t) \cdot sin(\pm\alpha(t) \\ s(t) \cdot cos(\alpha(t)) \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

mit	X, Y, Z	$\cdots$	Objektkoordinaten des Laserpunktes
	$X_0(t), Y_0(t), Z_0(t)$	$\cdots$	Scannerposition zum Zeitpunkt t
	$R_{\omega(t)\phi(t)\chi(t)}$	$\cdots$	Drehmatrix zum Zeitpunkt t
	$s(t)$	$\cdots$	Entfernung zwischen Scanner und dem Objekt zum Zeitpunkt t
	$\alpha(t)$	$\cdots$	Ablenkwinkel des Laserstrahles zum Zeitpunkt t

Als Objektkoordinatensystem kommt entweder ein globales Koordinatensystem (z.B. WGS84) oder das Landeskoordinatensystem in Frage. Die Transformation zwischen den Koordinatensystemen kann mit den einschlägigen Datumstransformationsformeln unter Beachtung des Geoides erfolgen [Kraus et al., 1996].

Nach dieser direkten Georeferenzierung der Punktwolke sollten die verwendeten Parameter der relativen und absoluten Orientierung in einem zweiten Schritt kontrolliert und verbessert wer-

den. Für diese Feingeoreferenzierung stellte [Kager, 2004] ein Konzept mittels Pass- und Verknüpfungsebenen vor. Die Verwendung von Ebenen (z.B Dachflächen) anstelle von Punkten ist darauf zurückzuführen, dass zwischen zwei Flugstreifen keine identen Punkte existieren.

Das Ergebnis der Georeferenzierung ist eine dreidimensionale Punktwolke des Vermessungsgebietes. Diese Punktwolke kann anschließen für die Ableitung von verschiedenen Produkten, wie das Oberflächenmodell und das Geländemodell, verwendet werden (siehe Kapitel 4.1).

2.2 Orthophoto

Als Orthophoto werden maßstabsgetreue verzerrungsfreie photographische Abbildungen der Erdoberfläche bezeichnet. Sie werden auf Grundlage von analogen oder digitalen Luftbildern erstellt.

Sie finden überall dort Anwendung, wo auch Karten verwendet werden. In GIS Systemen werden sie beispielsweise für die Orientierung der Nutzer und die Visualisierung räumlicher Sachinformation eingesetzt. Orthophotos sind aber auch für die Erstellung von Karten nützlich. Sie werden dabei als Digitalisierungsgrundlage verwendet, oder werden durch das Einfügen von Karteninformationen, wie z.B. Kartennamen, als Kartenersatz eingesetzt. [Wikipedia, 2009a].

Für die Herstellung von Orthophotos werden Luftbilder so entzerrt, dass deren Geometrie überall einer Orthogonalprojektion entspricht. Die Orthophotoherstellung erfolgt nach folgendem Prinzip [Kraus, 2004]:

1. In der XY-Ebene des Orthophotos wird eine Bildmatrix ausgebreitet. Die gewählte Rasterweite entspricht der Auflösung des Orthophotos.
2. Für jeden Rasterpunkt des Orthophotos wird ein Höhenwert aus dem digitalen Geländemodell interpoliert ($X, Y \rightarrow X, Y, Z$).
3. Mithilfe der Kollinearitätsgleichung mit den bekannten Elementen der inneren und äußeren Orientierung des Luftbildes wird für jeden Rasterpunkt des Orthophotos (X,Y) ein zugehöriger Punkt im Luftbild bestimmt ($X, Y, Z \rightarrow \xi, \eta$).

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 - c\frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \\ \eta &= \eta_0 - c\frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \tag{2.3}$$

mit	ξ, η	$\cdots$	Bildkoordinaten der verzerrten Luftbildes
	ξ_0, η_0	$\cdots$	Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes H
	X, Y, Z	$\cdots$	Koordinaten der Rasterpunkte des Orthophotos
	X_0, Y_0, Z_0	$\cdots$	Koordinaten des Aufnahemzentrums
	r_{ik}	$\cdots$	Elemente der Rotationsmatrix
	c	$\cdots$	Kamerakonstante

4. Im letzten Schritt wird für jedes Koordinatenpaar der dazu passende Grauwert mittels Grauwertinterpolation aus dem Luftbild bestimmt.

Das Prinzip der Entzerrung ist vereinfacht in Abbildung 2.3 dargestellt. Es zeigt, wie mithilfe der Höheninformation aus dem Geländemodell die erfassten Punkte im Luftbild (a',b') entzerrt werden (a,b).

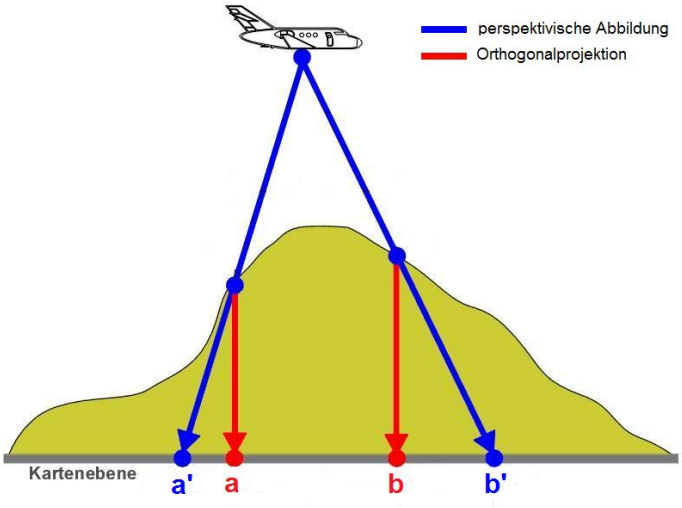

Abbildung 2.3: Entzerrung der perspektivischen Abbildung des Luftbildes (Blau) durch die Orthogonalprojektion des Orthophotos (Rot). Nach [Wikipedia, 2009a]

3 Stand der Forschung

Als vorbereitende Maßnahme für die Diplomarbeit wurde eine Internet- und Literaturrecherge durchgeführt. Es wurde speziell nach aktuellen Forschungsarbeiten gesucht, welche sich mit der Ableitung der Bodenbedeckung und der Geländedarstellung beschäftigen. Auf den folgenden Seiten wird eine Auswahl der Publikationen präsentiert.

Am Anfang dieses Kapitels werden Methoden für die Ableitung der Bodenbedeckung aus ALS-Daten und Orthophotos vorgestellt (Kapitel 3.1). Es folgen Verfahren für die Extraktion von Geländekanten aus ALS-Punktwolken (Kapitel 3.2). Im Anschluss werden noch automatisierte Methoden für die Erstellung einer digitalen Felszeichnung präsentiert (Kapitel 3.3).

3.1 Digitale Ableitung der Bodenbedeckung

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben wurde, soll die topographische Karte eine Bodenbedeckung erhalten. In diesem Abschnitt werden drei Methoden für eine automatisierte Ableitung der Bodenbedeckung vorgestellt. Während die Ableitung bei der ersten Methode ausschließlich auf Basis von Orthophotos erfolgt (Kapitel 3.1.1), verwenden die beiden folgenden Verfahren zusätzlich ALS-Daten (Kapitel 3.1.2 und 3.1.3).

3.1.1 Klassifikationsverfahren nach Le Bris und Boldo (2007)

Diese semi-automatische Verfahren wurde für die Ableitung von Wald, Weide, Fels und Geröll in Gebirgsregionen entwickelt. Die Klassifikation erfolgt dabei auf Grundlage von Orthophotos und Zusatzinformationen. Folgende Zusatzinformationen werden verwendet: Schatteninformation (abgeleitet aus dem Geländemodell und dem Sonnenstand), Vegetationsindex , Geländeneigung, Geländehöhe und Landbedeckungsinformationen aus der CORINE Land Cover 2000 (CLC2000) Datenbank (siehe [IES, 2009]). Diese Zusatzinformationen werden verwendet, um Unstimmigkeiten aufgrund von Schatten, Wolken oder radiometrischen Ähnlichkeiten der Klassen auszugleichen.

Das Verfahren wird in zwei Schritte eingeteilt [Bris und Boldo, 2007]:

1. Segmentierung:
   Im Orthophoto werden homogene Bereiche gesucht. Es wird die Segmentierungsmethode nach [Guigues, 2004] verwendet.

2. Klassifizierung:
   Für die Bestimmung der Klasse für jedes Segment wird ein MAP-Klassifizierungsalgorithmus verwendet. Nähere Informationen dazu sind in [Trias Sanz, 2006] zu finden.

Die Methode wurde an einem Untersuchungsgebiet in den Alpen und Pyrenäen getestet. In Abbildung 3.1 ist das Ergebnis für das Testgebiet der Pyrenäen dargestellt. Dabei konnten in den Pyrenäen 87% der Pixel richtig klassifiziert werden, in den Alpen 67%. Der Unterschied in der Qualtät der Klassifizierung beider Testgebiete ist laut Autor auf die schwere Trennung der Klassen im alpinen Raum, und auf die schlechteren Orthophots zurückzuführen. Das Ergebnis ist somit wesentlich von der Qualität der Luftbilder abhängig. Weiters konnten, besonders in den Alpen, Geröllflächen und Felsen nicht gut erkannt werden. Ein Vorteil dieser Methode hingegen ist die hohe Verfügbarkeit von Orthophotos. Im Gegensatz zu den beiden folgenden Methoden (Kapitel 3.1.2 und 3.1.3) sind keine weiteren Daten, wie ALS-Daten, erforderlich.

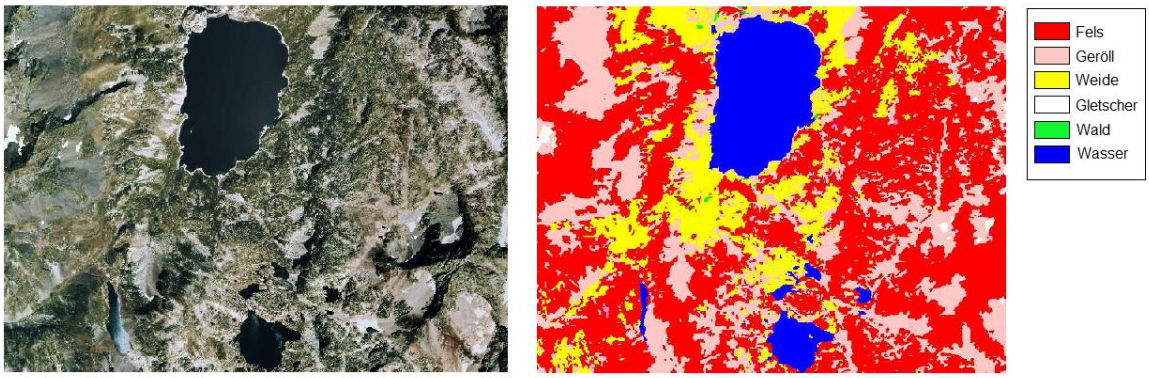

Abbildung 3.1: Klassifikation nach [Bris und Boldo, 2007] des Pyrenäen-Testgebietes. Links: Orthophoto; Rechts: Ergebnis der Klassifizierung

3.1.2 Überwachte Parameterklassifikation nach Charaniya et al. (2004)

Dies ist eine der ersten Publikationen, bei welcher die Bodenbedeckung aus ALS-Daten und Orthophotos abgeleitet wird. Das Verfahren unterscheidet zwischen den Klassen Wald, Wiese, Dächer und Straßen. Fünf unterschiedliche Merkmale werden für die Klassifikation verwendet: normiertes Oberflächenmodell, Höhenvariation, Höhendifferenz zwischen ersten und letzten Echo, Intensitätswerte des Laserstrahls und ein Helligkeitswert des Luftbildes. Als Klassifikationsverfahren wird die Maximum-Likelihood-Methode eingesetzt [Wikipedia, 2009b].

Die Klassifikation wurde für verschiedene Kombinationen der Merkmale getestet (siehe Abbildung 3.2). Die linke Abbildung zeigt das Ergebnis der Klassifikation aus den Höheninformationen der ALS-Daten. Dabei konnten Häuser und Dächer großteils richtig erkannt werden, während die Wiese und Straßen teilweise falsch sind. Die mittlere Abbildung zeigt das Ergebnis bei der zusätzlichen Verwendung von Intensitätswerten aus dem Laserscan. Der Großteil der Karte konnte richtig klassifiziert werden. Noch bessere Ergebnisse konnten nur durch die Verwendung aller Attribute erzielt werden (Rechts). Dabei wurden 85% der Pixel richtig klassifiziert.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass man im Gegensatz zu der Methode nach [Bris und Boldo, 2007] nicht mehr auf qualitativ hochwertige Orthophotos angewiesen ist. Außerdem kann die ALS-Befliegung unabhängig vom Stand der Sonne durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.1).

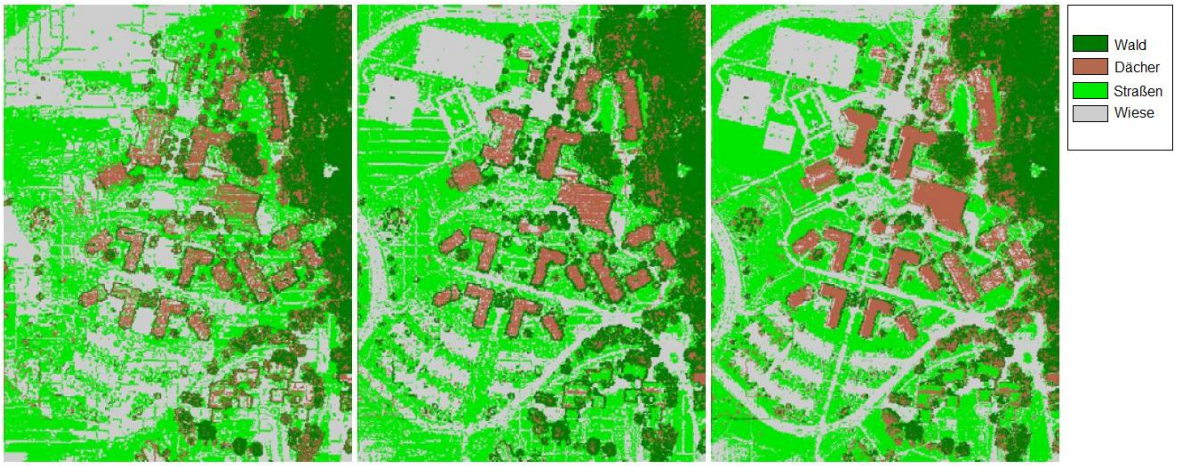

Abbildung 3.2: Ergebnisse der Klassifikation nach [Charaniya et al., 2004]. Links: nur Höheninformation aus ALS; Mitte: alle ALS-Daten; Rechts: alle Daten

3.1.3 Überwachte Klassifikation nach Tymkow und Borkowski (2008)

Im Gegensatz zu der Klassifikationsmethode nach [Charaniya et al., 2004] leitet [Tymkow und Borkowski, 2008] 17 unterschiedliche Bodenbedeckungsklassen aus ALS-Daten und Luftbildern ab. Genauere Informationen bezüglich der verwendeten Klassen sind leider nicht bekannt. Es wurden folgende Daten für die Klassifikation verwendet: Normiertes Oberflächenmodell, Höhenvariation, Höhendifferenz zwischen ersten und letzten Echo, Intensitätswerte, ein Modell der Vegetationsdichte, sowie RGB-Grauwerte und Texturen für jede Klasse (GLCM = Grey Tone Spatial Dependency Matrix). Genauere Informationen dazu sind in [Tymkow und Borkowski, 2008] zu finden.

Als Klassifikationsmethode wurde die Maximum-Likelihood-Methode (MLM), ein künstliches neuronales Netz (ANN = Artificial neural networks) und die Nächste-Nachbarn-Klassifikation (KNN = k-Nearest-Neighbor-Algorithmus) getestet.

Die Klassifikation wurde für unterschiedliche Kombinationen aus den ALS-Daten und dem Luftbild durchgeführt. Als Testgebiet dienten ALS-Daten der Befliegung des Flusses Widawa in Südpolen. Die durchgeführten Experimente zeigten, dass die Attribute aus den ALS-Daten für eine Klassifikation der Bodenbedeckung nicht ausreichen. Besonders für die Klassifikation der verschiedenen Vegetationsklassen sind zusätzliche Daten erforderlich. Die zusätzliche Verwendung des Luftbildes verbesserte die Ergebnisse deutlich. Der flächenmäßige Vergleich mit Referenzdaten zeigte, dass die besten Ergebnisse durch Verwendung aller ALS- und Luftbilddaten erzielt werden konnten.
Als Klassifikationsmethode lieferte die Maximum-Likelihood-Methode und das künstliche neuronale Netz ähnlich gute Ergebnisse. Laut [Tymkow und Borkowski, 2008] ist die Nächste-Nachbarn-Klassifikation hingegen für diese spezielle Anwendung nicht geeignet.

3.2 Extraktion von Geländekanten aus ALS Daten

Geländekanten sind für eine authentische Abbildung des Geländes in topographischen Karten von großer Bedeutung. Sie werden einerseits als Teil der Felsdarstellung verwendet (siehe Kapitel 4.3.3), andererseits sind sie für die Ableitung von hochgenauen Geländemodellen erforderlich. Solche Modelle werden beispielsweise für hydrologische Untersuchungen, wie Überschwemmungssimulationen, verwendet. Allgemein kann zwischen zwei Verfahren unterschieden werden:

- Rasterbasierte Kantenextraktion
- Extraktion der Geländekanten aus der Punktwolke

Bei der rasterbasierten Extraktion werden die Geländekanten mithilfe von Methoden der Bildverarbeitung (z.B. Laplace Operator) detektiert. Eine Übersicht von einigen verfügbaren Methoden ist in [Brügelmann, 2000] zu finden. Als Grundlage für die Anwendung der Rasteroperationen werden zuvor erstellte (gefilterte) digitale Geländemodelle verwendet.
Alternativ dazu können Kanten auch direkt aus der ungefilterten Punktwolke extrahiert werden. Der Vorteil dieser Methoden im Gegensatz zu der rasterbasierten Methoden besteht darin, dass der Informationsverlust durch die Rasterung des Geländemodelles wegfällt [Briese et al., 2009]. Auf den folgenden Seiten wird ein semi-automatisches Verfahren für die Extraktion von Geländekanten aus der ungefilterten Punktwolke vorgestellt (Kapitel 3.2.1). Es folgt eine vollautomatische Variante in Kapitel 3.2.2, welche eine Erweiterung der ersten vorgestellten Methode ist.

3.2.1 Kantenextraktion nach Briese (2004)

Die Methode nach [Briese, 2004] ist ein Verfahren für die Extraktion von dreidimensionalen Geländenkanten aus einer unklassifizierten ALS-Punktwolke. Als Eingangsdaten werden genäherte zweidimensionale Geländekanten benötigt (z.B. durch rasterbasierte Kantendetektion).

Das Prinzip der Methode ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Entlang der genäherten Geländekanten werden Flächenpaare aus den Laserpunkten innerhalb bestimmter Bufferzonen berechnet. Der Einfluss von Punkten oberhalb der Geländeoberfläche auf die Flächenparameter wird durch die Verwendung von robusten Ausgleichsmethoden reduziert. Über die Schnittkurve dieser Flächen können anschließend dreidimensionale Segmente der Geländekante bestimmt werden.

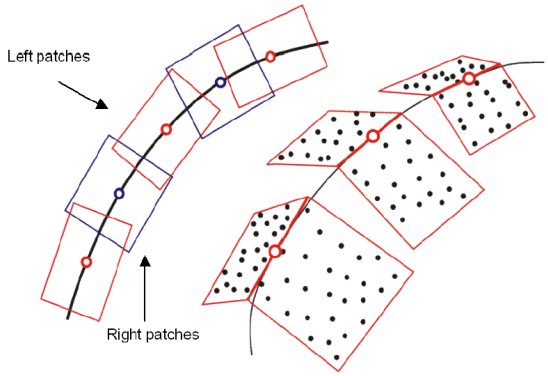

Abbildung 3.3: Modellierung der Geländekanten durch die Verschneidung von Ebenenpaaren [Briese, 2004]

Als Erweiterung zur Verwendung von genäherten zweidimensionalen Geländekanten wird ein semi-automatisches Verfahren vorgestellt, welches die Geländekanten mithilfe von genäherten Startsegmenten oder Startpunkten ableitet (*3D Breakline Growing*). Es läuft nach folgendem Prinzip ab:

1. Berechnung der Flächenpaare für das aktuelle Segment. Am Anfang wird dafür das vorgegebene Startsegement oder der Startpunkt der Geländekante verwendet.
2. Mithilfe der Richtung der Geländekante werden durch Extrapolation neue Segmente abgegrenzt
3. Die Punkte innerhalb der eingegrenzten neuen Bereiche werden exportiert. Für diese Bereiche wird das Verfahren aus Schritt 1 wiederholt.

Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Ausgleichung der Flächenpaare scheitert oder ein bestimmter Grenzwert erreicht wurde (zB. ein Grenzwert für den Schnittwinkel zwischen den beiden Flächen).

Die Methode wurde auf größere Testgebiete erfolgreich angewendet. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass Startsegmente oder Startpunkte erforderlich sind, welche manuell ermittelt werden müssen.

3.2.2 Vollautomatische Extraktionsmethode nach Briese et al. (2009)

Diese Methode erweitert das Verfahren nach [Briese, 2004] um eine automatische Geländekantendetektion. Das Verfahren kann somit vollautomatisch dreidimensionale Geländekanten aus

einer unklassifizierten ALS-Punktwolke oder Raster-Daten ableiten.

Für die automatische Detektion potenzieller Geländekanten wird für jeden Laserpunkt eine Quadrik mit einer Auswahl von Punkten seiner Nachbarschaft berechnet. Mithilfe der Hauptachsentransformation können die minimale und maximale Krümmung, sowie die Richtungen der Krümmungen bestimmt werden. Anhand dieser Informationen kann nun jeder Punkt als Kantenpunkt oder Geländepunkt klassifiziert werden. Die automatisch detektierten Geländekantensegmente werden anschließend als Startsegmente für die Erweiterung der Geländekanten nach der Methode von [Briese, 2004] verwendet (siehe Kapitel 3.2.1).

Das Ergebnis einer solchen Geländekantenextraktion ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die linke Abbildung zeigt die automatisch detektierten Geländekanten des Testgebietes. Im rechten Bild hingegen ist das fertige Ergebnis nach der automatischen Vervollständigung der Kanten dargestellt.

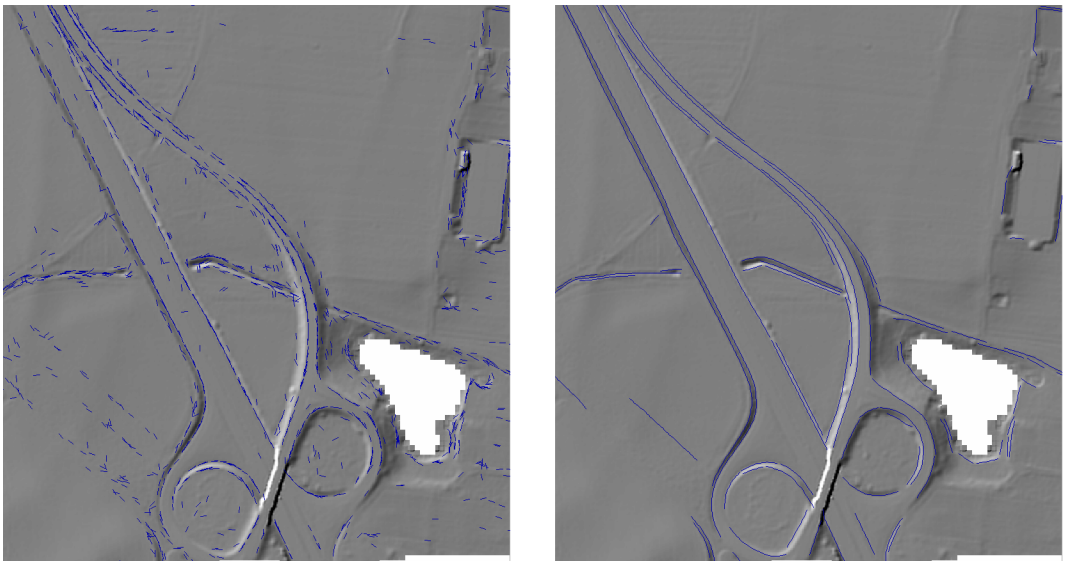

Abbildung 3.4: Links: Ergebnis der automatischen Geländekantendetektion; Rechts: Vervollständigung der Geländekantensegmente der linken Abbildung [Briese et al., 2009]

3.3 Automatisierte Felszeichnung

Die Darstellung von Fels in Gebirgskarten ist eine der schwersten Aufgaben bei der Erstellung von topographischen Karten [Hurni, 1995]. Das Problem dabei liegt in der Komplexität der Felsstrukturen und dessen präzise Abbildung für eine Karte. Die Arbeit kann nur von speziell ausgebildeten Kartographen durchgeführt werden und ist somit mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden. Nach Angaben des Schweizer Bundesamtes für Landestopographie beansprucht die Ausarbeitung einer Felsgravur eines Landeskartenblattes in etwa 2000 bis 6000 Arbeitsstunden und würde 200.000 bis 500.000 Euro kosten [Hurni, 1995].

Die erwähnte Komplexität der Felszeichnung führt dazu, dass automatisiert abgeleitete Darstellungen nicht an die Qualität und Ästhetik der freien künstlerischen Felsdarstellung herankommen. Sie sind jedoch eine interessante Alternative für schlecht erschlossenen Gebiete oder bei eingeschränkten finanziellen Mitteln. Auf den folgenden Seiten werden zwei Methoden für eine automatisierte Felszeichnung vorgestellt.

3.3.1 Gerippelinienmethode nach Hurni (1995)

[Hurni, 1995] entwickelte ein semi-automatisches Programm für die Erstellung der Felszeichnung der Halbinsel Methana in Griechenland. Es wurde für die Darstellung von kleineren Felswänden und Felsbändern ohne komplizierte morphologische Strukturen entwickelt. Das Programm lässt sich in vier Teilaspekte unterteilen:

1. *Lichtmodell:* Die Strichstärken werden je nach Exposition in Abhängigkeit eines vereinfachten Lichtmodelles unter Nordwest-Beleuchtung variiert.
2. *Kantenstriche/Formstriche:* Als Eingangsdaten müssen die Ober- und Unterkanten der Felsflächen digitalisiert werden und dieselbe Anzahl an Stützpunkten aufweisen. Diese werden als Grundlage für Formstriche verwendet, welche zwischen den zugehörigen Stützpunkten generiert werden.
3. *Strichrauheit:* Die Strichstärke wird unregelmäßig variiert, um ein natürliches, raues Erscheinungsbild zu erzeugen.
4. *Kavität:* Die Ober- und Unterkanten können durch die Angabe einer Kavität (Wölbung) an den natürlichen Verlauf angepasst werden (Radius und Kavitätsart).

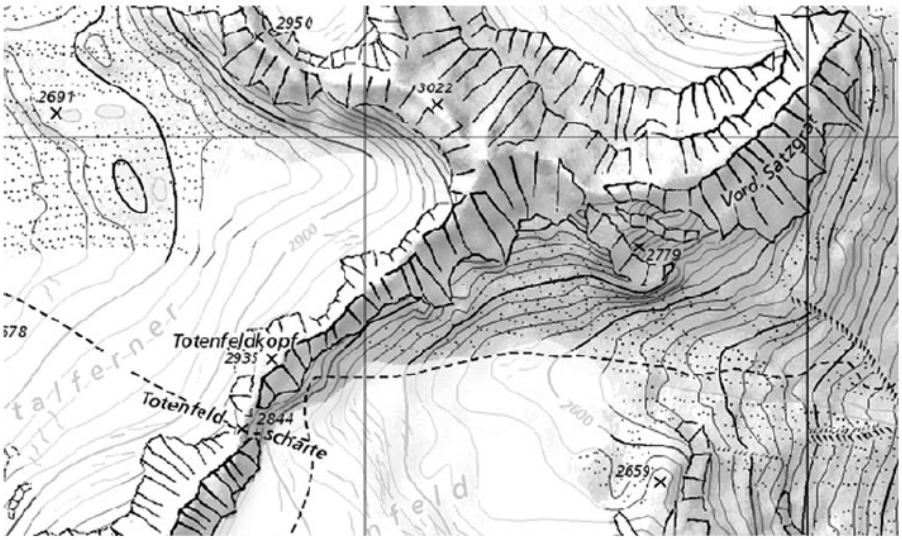

Abbildung 3.5: Gerippelinienmethode nach [Hurni, 1995] angewendet auf ein Testgebiet des Silvrettagebirges

Der große Nachteil der Methode ist, dass manuell digitalisierte Geländeober- und Unterkanten als Ausgangsdaten erforderlich sind (siehe Punkt 2). Eine vollautomatische Ableitung der Felsdarstellung ist somit nicht möglich. Außerdem wurde das Programm für kleine Felsstrukturen entwickelt und kann nur bedingt für größere Felsflächen im alpinen Bereich eingesetzt werden. Dies wurde anhand einer Testkarte 1:25.000 im Silvrettagebirge an der österreichischen Grenze demonstriert (siehe Abbildung 3.5). Das Ergebnis der Felsdarstellung macht einen etwas unfertigen und „leeren“ Eindruck, und kann somit nur bedingt als eigenständige Felsdarstellung verwendet werden. Trotzdem könnte das Resultat als Ausgangspunkt einer manuellen Felsdarstellung dienen.

3.3.2 Felszeichnung nach Gondol et al. (2008)

[Gondol et al., 2008] veröffentlichte ein Verfahren für die Erstellung von Felszeichnungen, welches im Gegensatz zu der zuvor vorgestellten Gerippelinienmethode nach [Hurni, 1995] vollautomatisch abläuft. Seine Methode soll weiterentwickelt werden und im Zuge der Neuerstellung von Karten im Maßstab 1:25.000 und 1:50.000 der *French National Mapping Agengy* eingesetzt werden.

Das Verfahren läuft nach folgendem Prinzip ab:

1. Die Felsflächen der Karte werden in Abhängigkeit der Geländeneigung und Exposition in homogenen Bereiche eingeteilt.
2. Für jeden Bereich wird die mittlere Neigung und Orientierung des Geländes berechnet
3. Die Felsbereiche werden schraffiert. Die Ausrichtung der Schraffur ist von der Orientierung und der Geländeneigung abhängig. Die Schraffur besteht aus unregelmäßigen Linien, welche in Fallrichtung des Geländes ausgerichtet sind.
4. Geländeoberkanten und Unterkanten werden extrahiert (unbekannte Extraktionsmethode). Die Oberkanten werden mit einer schwarzen unregelmäßigen Linie dargestellt, während die Unterkante grau eingefärbte wird.
5. Alle Geländebereiche über 45° werden mit einer dunkelgrauen Schummerung hinterlegt.

In Abbildung 3.6 (Rechts) ist das Ergebnis der Felszeichnung für ein Testgebiet in den Pyrenäen in der Nähe von Ossau dargestellt. Eine Bewertung des automatischen Ergebnisses im Vergleich zur handgezeichneten Variante ist sehr schwer. Ein großer Nachteil dieser recht simplen Methode ist jedoch, dass die Schraffuren nur auf Grundlage der Geländeneigung ermittelt werden. Wichtige morphologische Strukturen für die Orientierung im Gelände, wie markante Felskanten, werden nicht berücksichtigt.

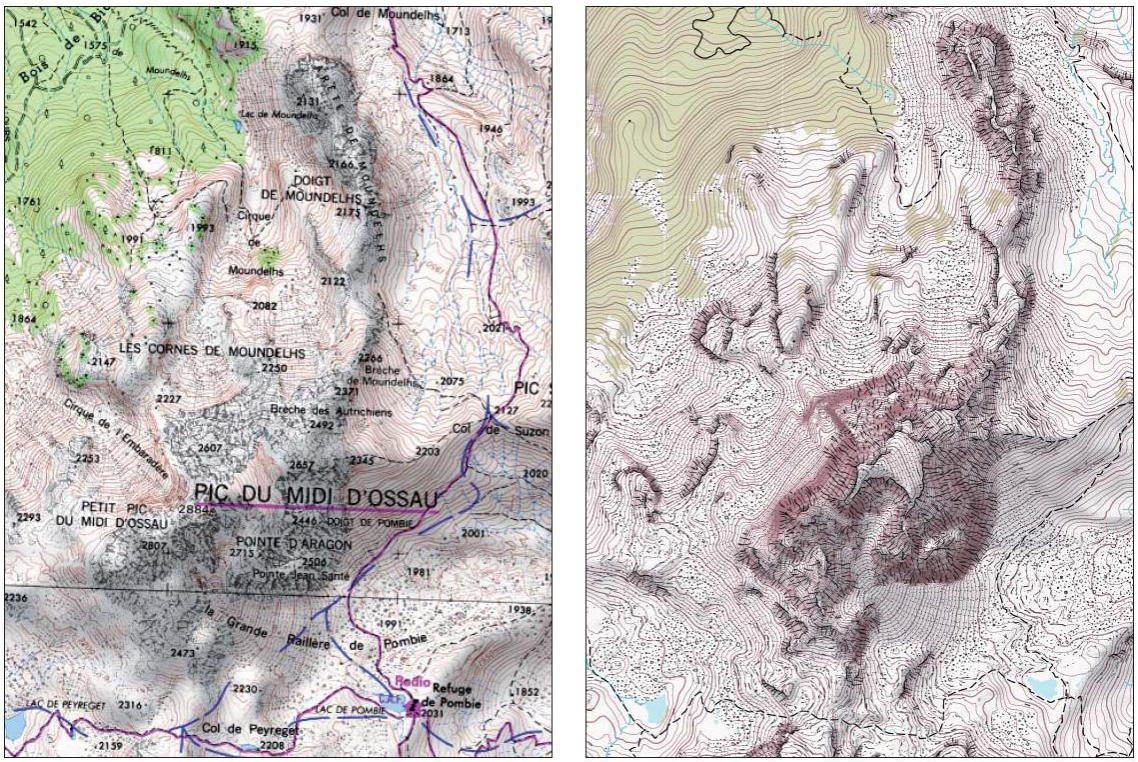

Abbildung 3.6: Vergleich der automatisierten Karte 1:25.000 nach [Gondol et al., 2008]. Links: Handgezeichnete Karte; Rechts: digital erzeugte Karte [Gondol et al., 2008]

4 Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Methoden für die automatisierte Erstellung der topographischen Bodenbedeckungskarte vorgestellt. Wie in Kapitel 1 bereits beschrieben wurde, soll die Karte eine Bodenbedeckung und Geländedarstellung enthalten. Die Karte setzt sich somit aus folgenden Kartenelementen zusammen: *Bodenbedeckung (Wald, Latschen, Wiese, Fels, Geröll), Felszeichnung, Schummerung* und *Höhenlinien*.

Als Grundlage für die Ableitung der Bodenbedeckung werden ALS-Daten und Orthophotos verwendet. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass eine Klassifikation der Bodenbedeckung auf Basis von reinen ALS-Daten nicht erfolgreich ist (siehe Kapitel 6.2.1). Für die Ableitung der Geländedarstellung hingegen sind nur die Laserdaten erforderlich.

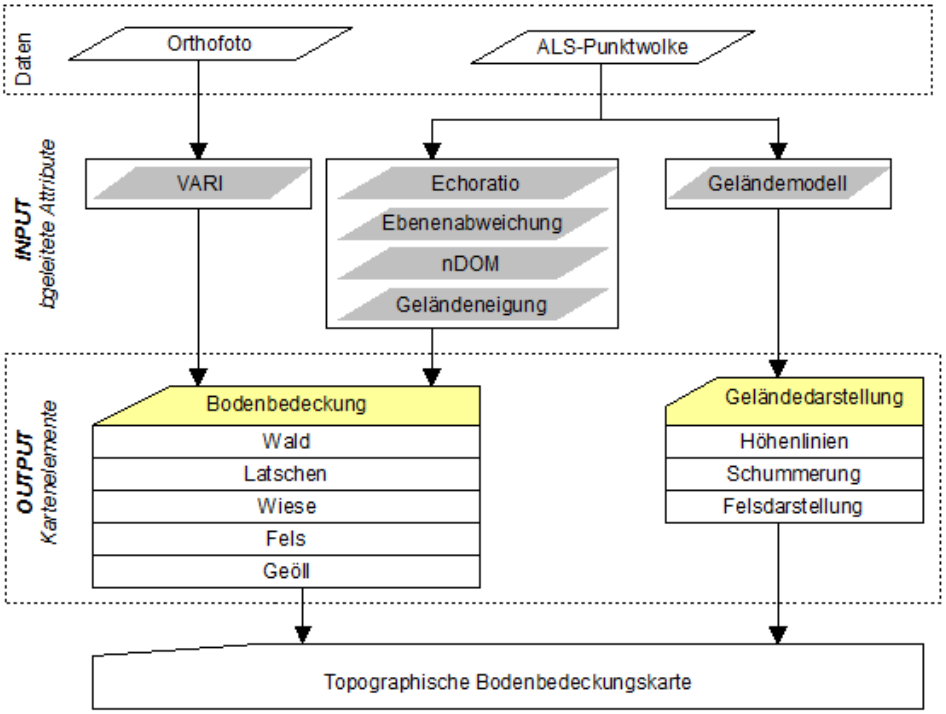

Abbildung 4.1: Flussdiagramm der Erstellung der topographischen Bodenbedeckungskarte

Eine Übersicht des Ablauf der Kartenerstellung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Sie zeigt, welche Ausgangsdaten (Grau) für die Ableitung der einzelnen Kartenelemente (Gelb) verwendet werden. Der Erstellung der Karte wird in drei Schritte unterteilt:

1. Ableitung von Attributen aus den ALS-Daten und dem Orthophoto (Kapitel 4.1)
2. Ableitung der Bodenbedeckung (Kapitel 4.2)
3. Ableitung der Geländedarstellung (Kapitel 4.3)

4.1 Abgeleitete Attribute

In diesem Abschnitt werden die abgeleiteten Attribute aus der ALS-Punktwolke und des Orthophotos vorgestellt. Während für die Ableitung der Geländedarstellung ein digitales Geländemodell ausreicht, müssen für die Bodenbedeckung zusätzliche Merkmale bestimmt werden (siehe Abbildung 4.1). Die vorgestellten Methoden nach [Charaniya et al., 2004] und [Tymkow und Borkowski, 2008] in Kapitel 3.1 verwenden dafür Höhendifferenzen (normiertes Oberflächenmodell, Höhendifferenz aus erstem und letzten Echo), eine Höhenvariation des digitalen Oberflächenmodelles, ein Modell der Vegetationsdichte, Intensitätswerte, und Grauwerte/Texturen aus dem Orthophoto.

Erste Tests mit Daten aus dem Untersuchungsgebiet (siehe Kapitel 5.2) haben jedoch gezeigt, dass für die Aufgabenstellung dieser Arbeit z.T. andere Merkmale erforderlich sind. So ist beispielsweise der Einsatz eine Modells der Vegetationsdichte aufgrund der geringeren Punktdichte nicht sinnvoll. Auch stehen keine Intensitätsinformationen der Punkte zur Verfügung. Die Wahl fiel schließlich auf folgende Attribute: normiertes Oberflächenmodell (Kapitel 4.1.1), Geländeneigung (Kapitel 4.1.2), Ebenenabweichung (Kapitel 4.1.3), Echoratio (Kapitel 4.1.4), und Vegetationsindex VARI (Kapitel 4.1.5).

4.1.1 Topographische Modelle

Es wird grundsätzlich zwischen drei topographischen Modellen unterschieden: Das *digitale Oberflächenmodell* (DOM), das *digitale Geländemodell* (DGM) und das *normierte digitale Oberflächenmodell* (nDOM).

Das digitale Oberflächenmodell (engl. Digital Surface Model) ist ein Modell der Oberfläche der Erde (siehe Abbildung 4.2). Es enthält typischerweise Kunstbauten, Vegetation, sowie sonstige feste oder bewegliche Objekte (z.B. Autos). Für die Erstellung werden ausschließlich die bereinigten ersten Echos der Punktwolke verwendet. Die Oberflächenbeschreibung erfolgt mittels einer Interpolationsmethode (z.B. gleitende Schägebene).
Das digitale Geländemodell (engl. Digital Terrain Model) hingegen ist ein Modell der Erdoberfläche ohne Kunstbauten und Vegetation (siehe Abbildung 4.2). Für die Ableitung werden nur die

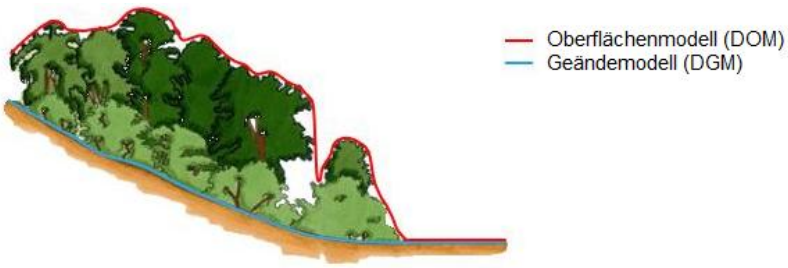

Abbildung 4.2: Topographische Modelle der Erdoberfläche (DGM und DOM)

letzten Echos verwendet. Nachdem diese Punkte jedoch nicht immer am Boden liegen, kann das Geländemodell nicht direkt aus den Punkten abgeleitet werden. Es ist eine sogenannte Filterung der letzten Echo-Punkte notwendig. In [Kraus, 2004] ist dafür ein iteratives Verfahren vorgestellt, wobei eine ausgleichende Fläche durch die gewichteten Laserpunkte gelegt wird. Weitere Filter-Methoden und ein Vergleich der Methoden ist in [Sithole und Vosselman, 2004] zu finden.
Durch die Normierung des digitalen Oberflächenmodelles durch das digitales Geländemodell wird das normierte digitale Oberflächenmodell erstellt (nDOM=DOM-DGM). Es enthält nur die Kunstbauten und Vegetation der Erdoberfläche.

Abbildung 4.3 zeigt die drei topographischen Modelle für ein alpines Testgebiet im Bereich der Waldgrenze. Das digitale Oberflächenmodell (Oben Rechts) und Geländemodell (Unten links) ist durch eine Schummerung dargestellt. Das normierte digitale Oberflächenmodell (nDOM) ist unten rechts mittels einer Höhencodierung abgebildet.

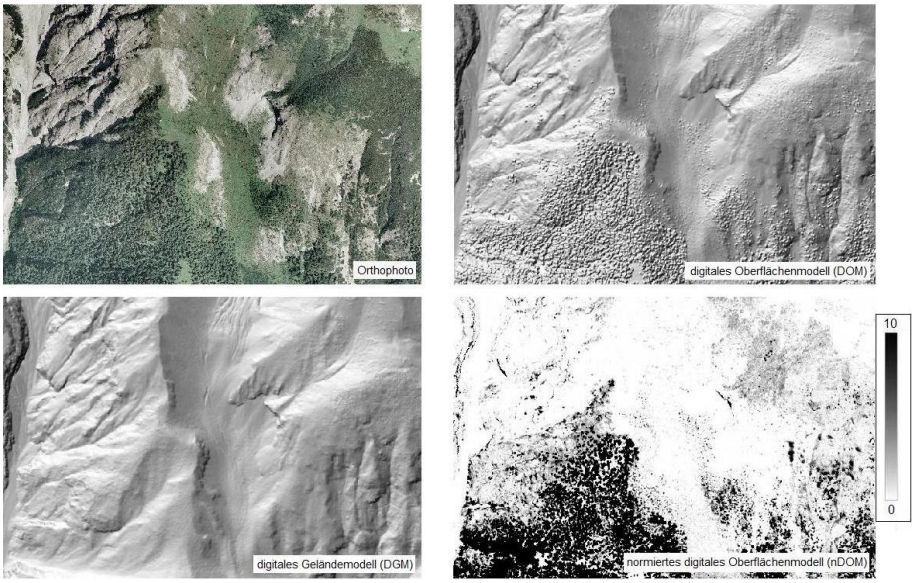

Abbildung 4.3: Topographisches Modelle eines alpinin Testgebietes bei einer Rasterauflösung von 2 Metern. Oben Links: Orthophoto; Oben Rechts: Schummerung des DOMs; Unten Links: Schummerung des DGMs; Unten Rechts: nDOM

4.1.2 Geländeneigung

Die Geländeneigung wird aus dem digitalen Geländemodell (DGM) berechnet. Die Geländeneigung für jede Rasterzelle entspricht der Neigung einer ausgleichenden Ebene, welche aus der Höhe der Rasterzelle und seinen unmittelbaren Nachbarn bestimmt wird. Die Größe der Nachbarschaft kann normalerweise frei bestimmt werden.

Abbildung 4.4 zeigt die Geländeneigung für das alpine Testgebiet in Abbildung 4.3. Die Berechnung erfolgte mit einer 3er Nachbarschaft.

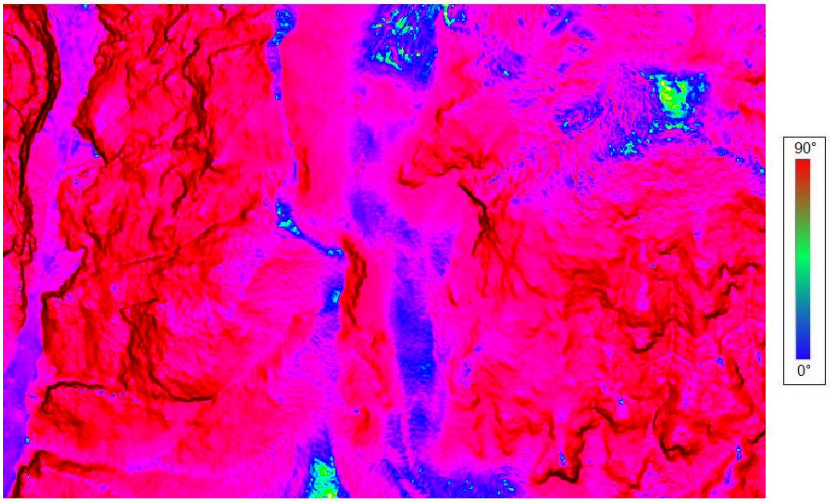

Abbildung 4.4: Geländeneigung des alpinen Testgebietes aus Abbildung 4.3, Rasterweite 2 Meter

4.1.3 Ebenenabweichung

Die Ebenenabweichung ist ein Parameter für die Beschreibung der Höhenvariation auf Grundlage der ALS-Punktwolke. Das Prinzip der Ebenenabweichung ist in Abbildung 4.5 anhand des Aufrisses einer Punktwolke dargestellt. Es wird für jeden Punkt eine ausgleichende Ebene mithilfe der Punkte innerhalb einer festen 3D-Distanz berechnet. Die Ebenenabweichung des Punktes entspricht dabei der Standardabweichung der ermittelten Ebene.

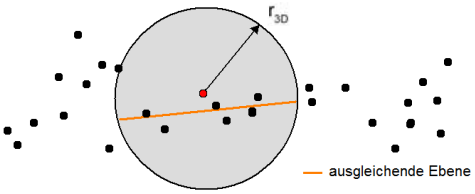

Abbildung 4.5: Prinzip der Ebenenabweichung anhand des Aufrisses einer Punktwolke

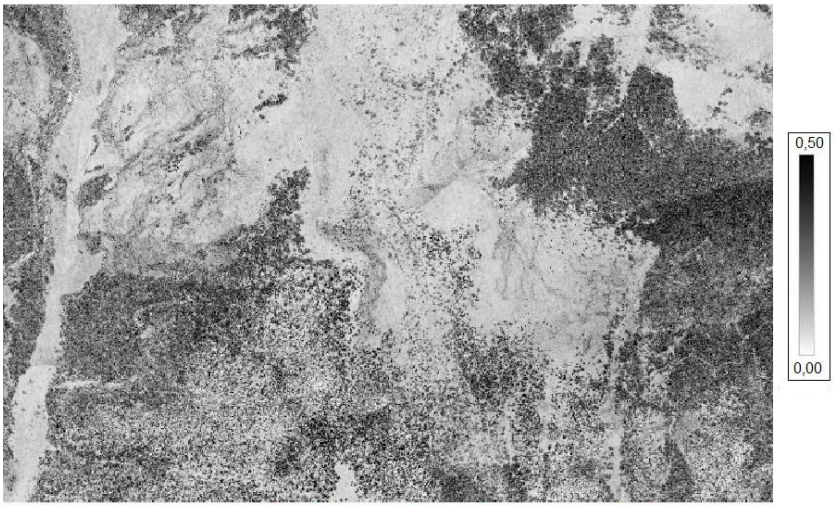

Abbildung 4.6: Ebenenabweichung des alpinen Testgebietes aus Abbildung 4.3, Rasterweite 2 Meter

Abbildung 4.6 zeigt die Ebenenabweichung für das in Abbildung 4.3 dargestellte alpine Testgebiet. Auffällig ist, dass die Ebenenabweichung bei niedriger Vegetation, wie Sträucher und Latschen, am höchsten ist, während im bewaldeten Gebiet und in ebenen Bereichen der Wert geringer ist.

4.1.4 Echoratio

Die Echoratio ist ein Parameter für die Beschreibung der Rauheit und der lokalen Transparenz von Objektoberflächen auf Grundlage der ALS-Punktwolke. Sie wurde erstmals von [Rutzinger et al., 2007a] für die Trennung von Vegetation und Gebäuden eingesetzt und wurde anschließend von [Höfle et al., 2009] modifiziert. Die Echoratio wird für jeden Punkt berechnet und ist folgendermaßen definiert [Höfle et al., 2009]:

$$Echoratio[\%] = \frac{n_{3D}}{n_{2D} * 100,0} \tag{4.1}$$

mit n_{3D} ··· Anzahl von Punkten innerhalb einer festen Distanz im 3D-Raum (Kugel)
n_{2D} ··· Anzahl von Punkten innerhalb derselben Distanz im 2D-Raum (vertikaler Zylinder mit unendlicher Höhe)

Als Distanz wird der doppelte mittlere Punktabstand der ALS-Punktwolke vorgeschlagen. Dies garantiert, dass ausreichend Punkte für die Berechnung der Echoratio vorhanden sind. In Abbildung 4.7 (Links) ist das Prinzip der Echoratio dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass im ebenen Gelände und am Boden ein Echoratio-Wert von 100% erreicht wird. Im Gegensatz dazu wird bei Vegetation, oder beispielsweise auch an Dachkanten, aufgrund der höhenmäßigen Verteilung der Punkte ein wesentlich geringerer Wert erreicht. Die Abbildung 4.7 (Rechts) zeigt das Ergebnis des Vegetationsindexes für das alpine Testgebiet aus Abbildung 4.3.

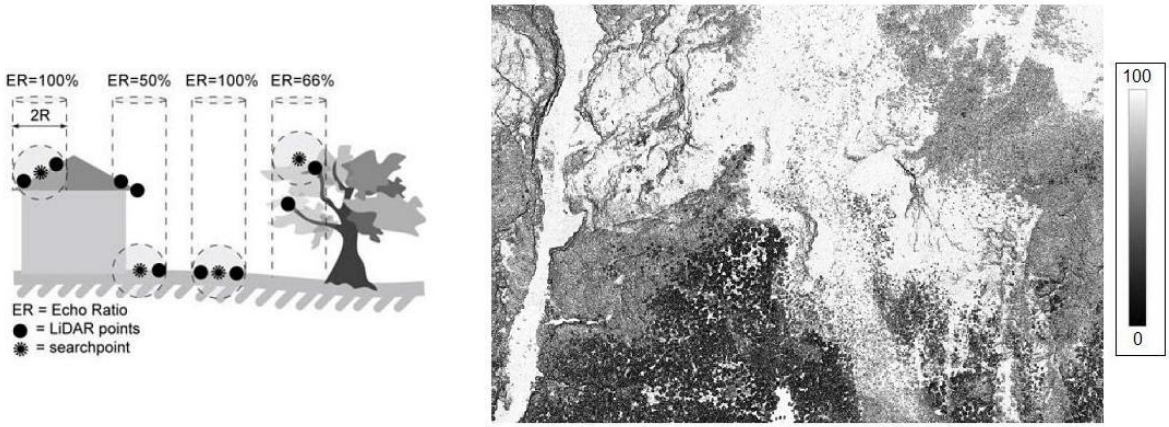

Abbildung 4.7: Links: Echoratio am Beispiel von unterschiedlichen Landschaftsobjekten [Höfle et al., 2009]; Rechts: abgeleiteter Echoratio des alpinen Testgebietes, Rasterweite 2 Meter

4.1.5 Vegetationsindex VARI

Der verwendete Vegetationsindex ist das einzige Attribut, welches im Gegensatz zu den vorherigen Merkmalen auf Basis des Orthophotos berechnet wird. Vegetationsindizes im Allgemeinen sind Parameter für die Detektion und Überwachung von Vegetation auf der Erdoberfläche. Der bekannteste Vegetationsindex ist der *Normalized Differenced Vegetation Index*, kurz NDIV, welcher aus Reflektionen im nahen Infrarotbereich (NIR) und im roten sichtbaren Bereich berechnet wird [Rouse et al., 1973].

Der hier verwendete Vegetationsindex VARI (*Visible Atmospherically Resistand Index*) hingegen ist ein Indizes auf Grundlage eines RGB-Orthophotos (kein Infrarotband erforderlich). Er wurde erstmals von [Gitelson et al., 2002] verwendet und wird nach folgender Formel berechnet:

$$VARI = \frac{\rho_{green} - \rho_{red}}{\rho_{green} + \rho_{red} - \rho_{blue}} \tag{4.2}$$

mit $VARI$ ··· Vegetationsindex
ρ_{Rot} ··· Roter Spektralbereich des Lichtes
ρ_{Grn} ··· Grüner Spektralbereich des Lichtes
ρ_{Blau} ··· Blauer Spektralbereich des Lichtes

Abbildung 4.8 zeigt den abgeleiteten Vegetationsindex für das alpine Testgebiet aus Abbildung 4.3. Es zeigt, dass vegetationslose Bereiche eine negativen Wert aufweisen, während Vegetationsflächen positive Werte erhalten.

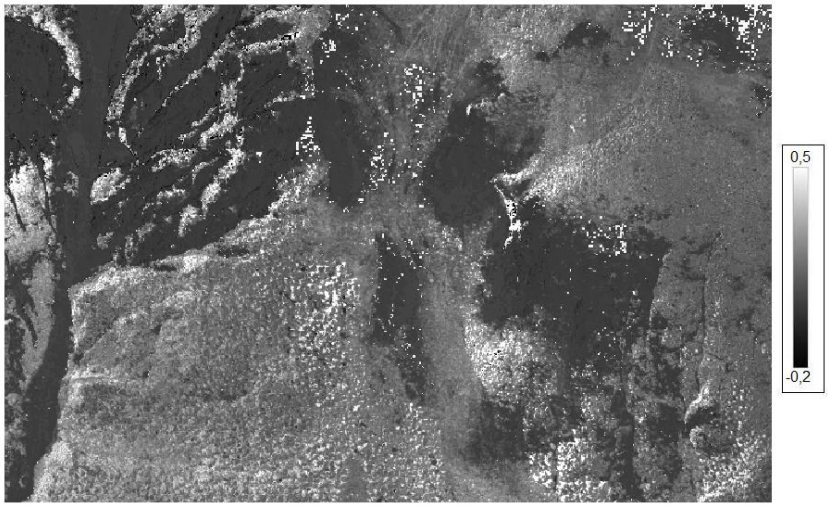

Abbildung 4.8: Vegetationsindex VARI des alpinen Testgebietes aus Abbildung 4.3, Rasterweite 2 Meter

4.2 Ableitung der Bodenbedeckung für unterschiedliche Maßstäbe

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Methoden für die Ableitung der Bodenbedeckung aus den ALS-Daten und Orthophotos vorgestellt. Wie in Kapitel 1 bereits beschrieben wurde, wird die Karte auf den subalpinen Bereich (1500 bis 2500 Meter) eingegrenzt. Es wird dabei zwischen folgenden Klassen unterschieden: *Wald, Latschen, Wiese, Fels*, und *Geröll* (siehe Abbildung 4.9).

Abbildung 4.9: Vegetationsklassen der topographischen Karte

Das Besondere an dem hier vorgestellten Verfahren ist, dass das Ergebnis der Karte durch eine Generalisierung für den Zielmaßstab aufbereitet wird. Dadurch können aus denselben Daten großmaßstäbige Karten mit unterschiedlichen Maßstab abgeleitet werden. Aus diesem Grund wird der Ablauf in zwei Schritte unterteilt:

1. Klassifizierung (Kapitel 4.2.1)
2. Generalisierung (Kapitel 4.2.2)

Im ersten Schritt wird die Klassifizierungskarte mithilfe der Attribute aus Kapitel 4.1 abgeleitet. Dieses Ergebnis wird anschließend in einem zweiten Schritt für den Zielmaßstab generalisiert.

4.2.1 Klassifizierung der Bodenbedeckung

Bei der Klassifizierung wird für jedes Pixel der Karte eine Klasse bestimmt. Allgemein wird zwischen zwei unterschiedlichen Verfahren unterschieden [Kiel, 2009]:

- überwachte Klassifizierung
- unüberwachte Klassifizierung

Bei der überwachten Klassifizierung (supervised classification) werden vom Benutzer für jede Klasse sogenannte Trainingsgebiete eingegrenzt, welche für die Bestimmung der Klassengrenzen verwendet werden. Im Gegensatz dazu werden bei der unüberwachten Klassifikation (unsupervised classification) automatisch Cluster gebildet, die Wertegruppierung basierend auf ähnlichen statistischen Eigenschaften entsprechen. Nachträglich muss die Bedeutung der einzelnen Cluster ermittelt werden.

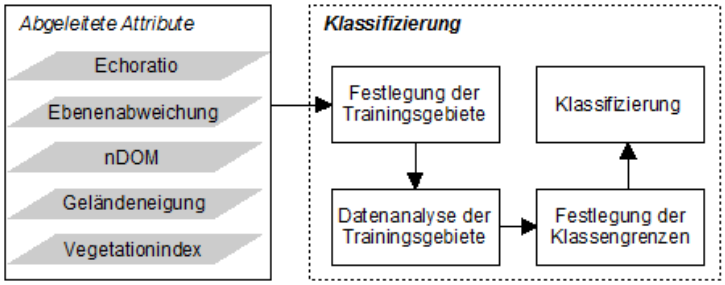

Abbildung 4.10: Flussdiagramm des verwendeten überwachten Klassifizierungsverfahrens

Das hier verwendete Verfahren ist ein sehr einfaches überwachtes Klassifizierungsverfahren. Die Klassenabgrenzung erfolgt dabei mithilfe von Trainingsdaten, welche aus dem Untersuchungsgebiet entnommen werden. Die Klassifizierung wird in folgende Schritte unterteilt (siehe Abbildung 4.10):

1. Festlegung der Trainingsgebiete
2. Datenanalyse der Trainingsgebiete
3. Festlegung der Klassengrenzen
4. Klassifizierung des Untersuchungsgebietes

Alternativ zu dem hier verwendeten Verfahren könnten auch andere Methoden für die Klassifikation verwendet werden. Ein häufig verwendetes Verfahren ist die Maximum-Likelihood-Methode [Wikipedia, 2009b]. Dieses Klassifikationsverfahren wurde auch für die Ableitung der Bodenbedeckung von [Charaniya et al., 2004] und [Tymkow und Borkowski, 2008], welche in Kapitel 3.1 beschrieben wurden, verwendet.

4.2.1.1 Festlegung der Trainingsgebiete

Bevor die Klassifizierung durchgeführt werden kann, müssen Trainingsgebiete in den Daten eingegrenzt werden. Sie bilden die Grundlage für die anschließende Datenanalyse (siehe Kapitel 4.2.1.2) und Klassenabgrenzung (siehe Kapitel 4.2.1.3).

Die Festlegung erfolgt mithilfe der Orthophotos. Dabei wird nach Bereichen gesucht, welche eindeutig einer der Klasse zugeordnet werden können. Diese Bereiche werden eingegrenzt und als Trainingsdaten verwendet. Abbildung 4.11 zeigt die Entnahme eines kleinen Trainingsgebietes am Beispiel einer 50x50 Meter großen Waldfläche. Nach der Eingrenzung (Rotes Rechteck) werden die verwendeten Attribute für den festgelegten Bereich extrahiert.

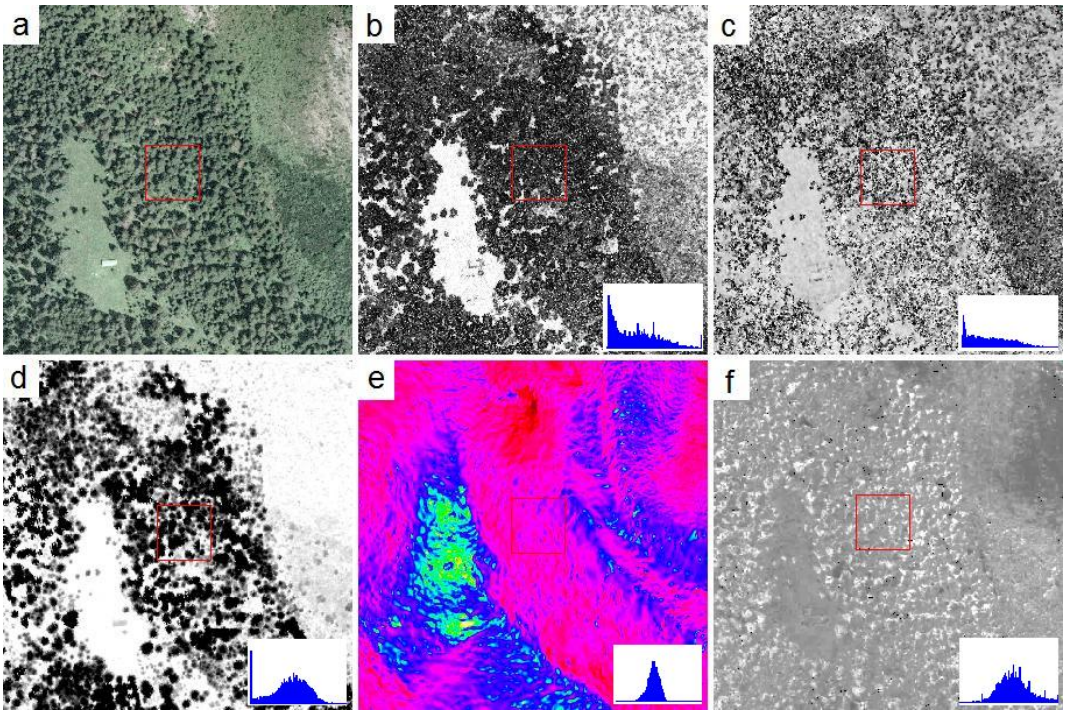

Abbildung 4.11: Trainingsdatenentnahme von Wald einer 50x50 Meter großen Fläche (rotes Quadrat). a: Orthophoto; b: Echoratio; c: Ebenenabweichung; d: nDOM; e: Geländeneigung; f: VARI

4.2.1.2 Datenanalyse der Trainingsgebiete

Die zuvor entnommenen Daten aus den Trainingsgebieten (siehe Kapitel 4.2.1.1) werden nun analysiert. Das Ziel dieser Analyse ist es, geeignete Merkmale für eine eindeutige Abgrenzung der Klassen zu bestimmen. Diese Information ist anschließend für die automatisierte Berechnung der Klassengrenzen in Kapitel 4.2.1.3 erforderlich.

Die Analyse der Trainingsdaten erfolgt auf Grundlage von Histogrammen. Sie zeigen die Häufigkeitsverteilung der Klassen über den gesamten Wertebereich der Attribute an. In diesen Hi-

stogrammen wird nun nach Klassen gesucht, welche sich überhaupt nicht bzw. nur über einen kleinen Bereich des Rechtswertes überschneiden. Solche Klassen können eindeutig über das entsprechende Attribut getrennt werden. Um den Einfluss von Ausreißern zu minimieren, wird zusätzlich ein Mindestwert für die Häufigkeit festgelegt.

Die Vorgehensweise bei der Datenanalyse soll nun anhand eines konkreten Beispiels erklärt werden. Abbildung 4.12 zeigt das Histogramm von simulierten Echoratio-Daten. Es sind drei verschiedene Klassen (Wald, Latschen, Wiese) mit einem Datenumfang von jeweils 10.000 Rasterzellen dargestellt. Der Minimalwert der Häufigkeit wird auf 25 festgelegt. Das Histogramm zeigt, dass sich die Klassen Wald & Wiese, sowie Latschen & Wiese nicht bzw. nur über einen geringen Wertebereich überlappen. Diese Klassen können somit eindeutig über die Echoratio abgegrenzt werden. Im Gegensatz dazu ist eine Trennung zwischen Wald und Latschen aufgrund des großen Überlappungsbereiches (ca. 30% bis 70%) nicht möglich.

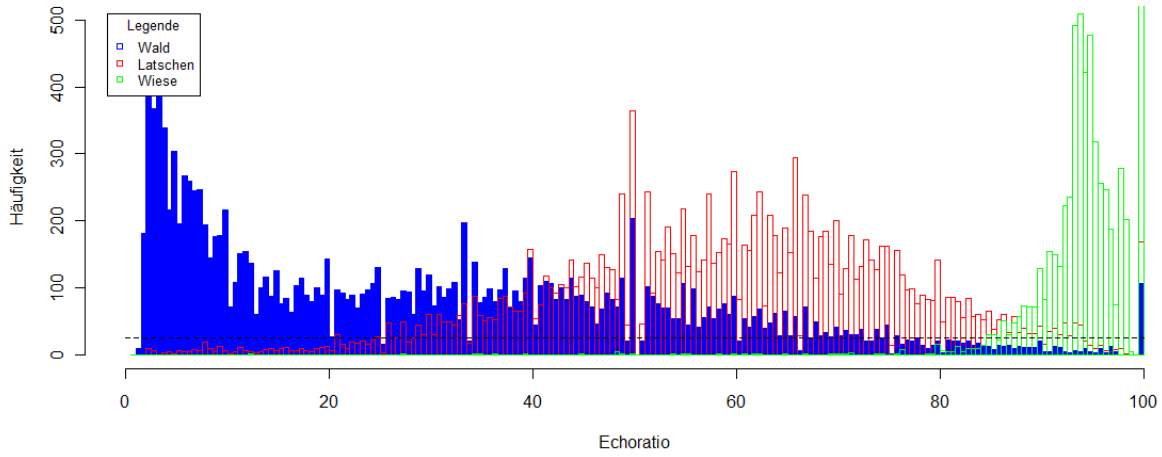

Abbildung 4.12: Histogramm von simulierten Echoratio-Daten

Dieser Vorgang wird für alle Klassen und Attribute durchgeführt. Das Ergebnis der Datenanalyse ist eine Liste von Merkmalen für jede Klasse, durch welche sie sich von den anderen Klassen abgrenzt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich jede Klasse durch mindestens ein Attribut von jeder anderen Klassen unterscheidet. Ist dies nicht der Fall, können Klassifizierungsfehler auftreten.

4.2.1.3 Festlegung der Klassengrenzen

Als nächstes werden nummerische Werte für die Klassengrenzen der Attribute bestimmt. Dafür wird je Klasse ein Erwartungswert und Streuungsmaß pro Merkmal bestimmt. Aufgrund der unsymmetrischen Verteilung der Daten werden nur robuste Parameter verwendet (Median und Quantile). Diese Parameter ermöglichen die Einführung von Klassengrenzen in Form eines zulässigen Minimal- und Maximalwertes für jedes Attribut. Als Minimal- und Maximalwert werden

das 5%-Quantil und 95%-Quantil verwendet, sodass jede Klasse auf 90% der Datenwerte eingeschränkt wird (Formel 4.3, 4.4).

$$R_{\mathrm{min,i}} = Q_{0.05}(K_{\mathrm{i}}) \tag{4.3}$$

$$R_{\mathrm{max,i}} = Q_{0.95}(K_{\mathrm{i}}) \tag{4.4}$$

mit $R_{\mathrm{min,i}}$ ··· Minimaler zulässiger Wert der Klasse K_{i}
$R_{\mathrm{max,i}}$ ··· Maximaler zulässiger Wert der Klasse K_{i}
$Q_{0.05}$ ··· 0.05-Quantil der Klasse K_{i}
$Q_{0.95}$ ··· 0.95-Quantil der Klasse K_{i}

Eine Sonderregel gilt für all jene Klassen, dessen Wertebereich eines Attributes sich mit dem einer anderen Klassen in geringen Maße überschneidet (siehe Datenanalyse in Kapitel 4.2.1.2). Für diese Klassen werden die Grenzwerte aus Formel 4.5 anstelle der entsprechenden Minimal- oder Maximalwerte verwendet. Dabei wird die Distanz zwischen den Medianen der Klassen aufgrund ihrer Streuung aufgeteilt.

$$R_{\mathrm{ij}} = med(K_{\mathrm{i}}) + \frac{med(K_{\mathrm{j}}) - med(K_{\mathrm{i}})}{IQR(K_{\mathrm{i}}) + IQR(K_{\mathrm{j}})} \cdot IQR(K_{\mathrm{i}}) \tag{4.5}$$

mit R_{ij} ··· Trennwert zwischen den Klassen K_{i} und K_{j}, wenn $med(K_{\mathrm{j}}) > med(K_{\mathrm{i}})$
$med(K_{\mathrm{i}})$ ··· Median der Klasse K_{i}
$IQR(K_{\mathrm{i}})$ ··· Quartilabstand (interquartile range): $IRQ = Q_{0.75} - Q_{0.25}$

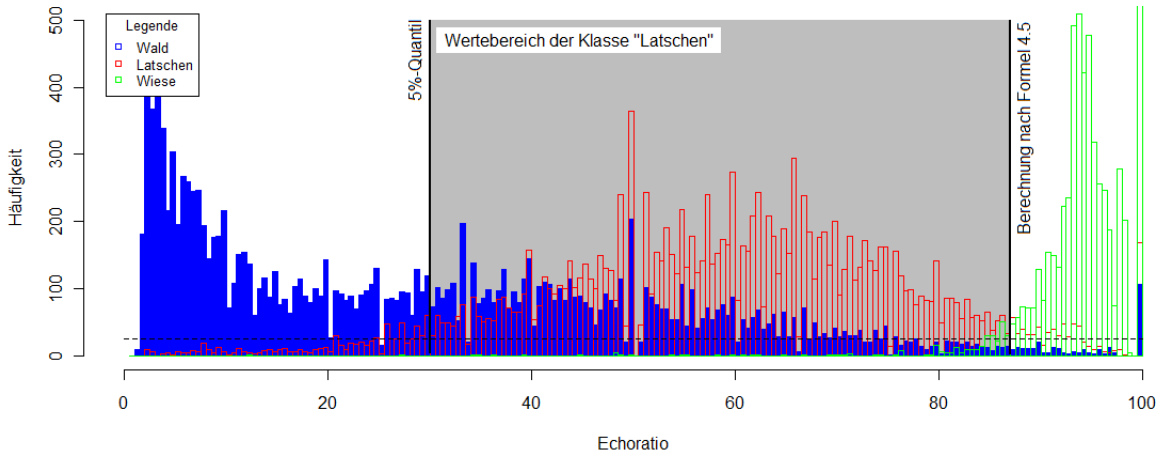

Abbildung 4.13: Histogramm für die Bestimmung der Grenzen der Klasse *Latschen* anhand der simulierten Echoratio-Daten aus Abbildung 4.12

Die Vorgangsweise soll nun an konkreten Beispiel für die Bestimmung der Grenzen der Klasse *Latschen* erklärt werden (siehe Abbildung 4.13). Für das dargestellte Histogramm werden dieselben simulierten Echoratio-Daten benutzt, welche in Abbildung 4.12 verwendet wurden. Das Histo-

gramm zeigt, dass als unterere Klassengrenze, aufgrund des großen Überlappungsbereiches mit der Klasse Wald, das 5%-Quantil verwendet wird. Im Bereich der oberen Grenze überschneiden sich die Latschen nur geringfügig mit der Klasse Wiese. Eine Trennung zwischen den beiden Klassen über der Echoratio ist somit möglich. Aus diesem Grund wird Formel 4.5 für die Berchnung des oberen Grenzwertes verwendet.

4.2.1.4 Klassifizierung des Untersuchungsgebietes

Mithilfe der berechneten Klassengrenzen der Trainingsgebiete aus Kapitel 4.2.1.3 wird das gesamte Untersuchungsgebiet klassifiziert. Abbildung 4.14 (Links) zeigt das Ergebnis der Klassifizierung für ein Testgebiet. Die Rasterzellen sind in Abhängigkeit von den zugeordneten Klassen unterschiedlich eingefärbt.

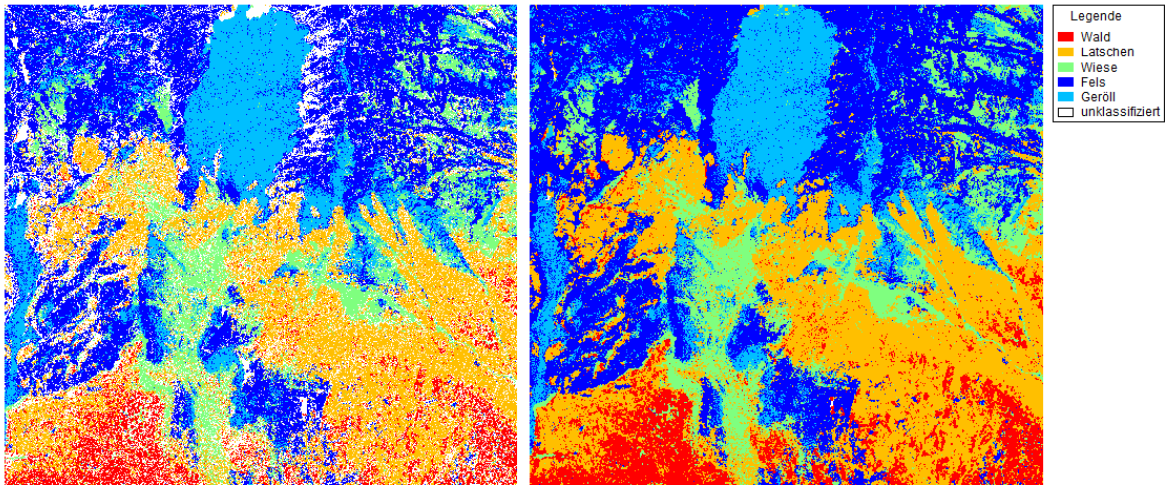

Abbildung 4.14: Links: Ergebnis der Klassifizierung eines Testgebietes; Rechts: Klassifizierungskarte nach dem Auffüllen unklassifizierter Bereiche der linken Karte

Neben den eingefärbten Bereichen in der Testkarte sind auch unklassifizierte Bereiche (Weiß) zu finden. Diese Pixel sind Restobjekte der Klassifikation, denen aufgrund von Ausreißern in den Daten keine der bestehenden Klassen zugeordnet werden konnte. Für diese Rasterzellen wird in einem zweiten Schritt über Nachbarschaftsbeziehungen eine Klasse bestimmt. Dabei werden die Klassen der Nachbarzellen innerhalb eines festgelegten Bereiches aufgelistet, und die häufigste Klasse wird für das klassenlose Pixel übernommen. In Abbildung 4.15 ist diese Vorgangsweise für das Pixel Nr. 72 mit einer 5er Nachbarschaft dargestellt. Die rote Klasse kommt am häufigsten vor und wird somit für die Rasterzelle übernommen (Rot: 11, Blau: 8, Orange: 2). Das Ergebnis dieser „Lückenfüllung“ für das Testgebiet in Abbildung 4.14 (Links) mittels einer 5er Nachbarschaft ist in Abbildung 4.14 (Rechts) dargestellt.

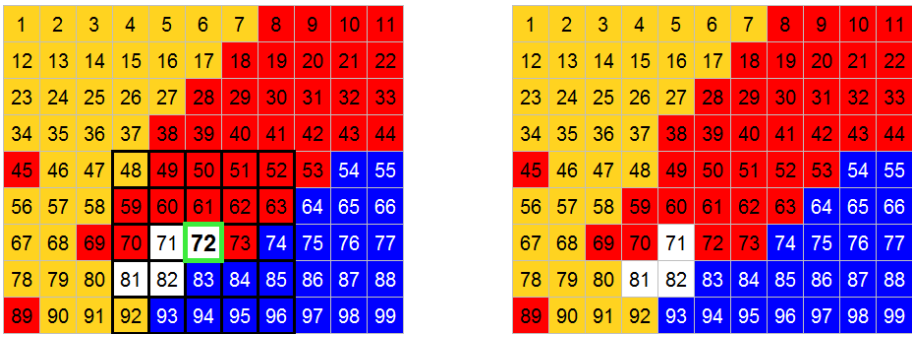

Abbildung 4.15: Festlegen einer Klasse für das nicht-klassifizierte Pixel Nr. 72 (weiß) mittels einer 5er Nachbarschaft. Links: Ausgangssituation; Rechts: Ergebnis

4.2.2 Generalisierung der Bodenbedeckung

In diesem Abschnitt werden Methoden für die kartographische Generalisierung der Klassifizierungskarte aus Kapitel 4.2.1 vorgestellt. Die Generalisierung ermöglicht die Ableitung von großmaßstäbigen Karten mit unterschiedlichem Maßstab. So können beispielsweise Karten 1:10.000 und 1:25.000 aus demselben Datenmaterial abgeleitet werden (siehe Kapitel 6).

Der gesamte Generalisierungsprozess kann in eine Liste von logischen Operationen unterteilt werden, welche auch als Generalisierungsmaßnahmen bezeichnet werden. Eine ausführliche Übersicht über die Generalisierungsmaßnahmen und dessen Anwendung ist in [Mackaness et al., 2007] zu finden.

Die Generalisierung der Bodenbedeckungskarte dieser Arbeit soll mit der freien Software GRASS GIS durchgeführt werden. Deshalb muss zunächst festgestellt werden, welche Methoden in der Software implementiert sind. Es stehen folgende Operatoren für die Raster- und Vektorgeneralisierung zur Verfügung:

- Resampling (Raster, GRASS-Modul *r.resamp.stats*):
  Die Auflösung einer Rastergrafik wird reduziert, indem die Rasterzellen zusammengefasst und reklassifiziert werden (siehe Abbildung 4.16). Die neue Klasse der Pixel kann über den Mittelwert, Median, häufigstes Element, Minimum, Maximum, Quantile, Summe, Varianz oder Standardabweichung aus den alten Werten bestimmt werden.

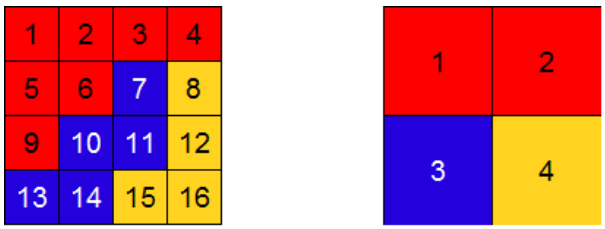

Abbildung 4.16: Resampling einer Rasterkarte (Methode: häufigstes Element innerhalb der neuen Zelle)

- Reklassifikation (Raster, GRASS-Modul *r.neighbors*):
  Mithilfe der Reklassifikation wird für jedes Pixel aufgrund seiner Nachbarzellen eine neue Klasse zugewiesen. Die Größe der berücksichtigten Nachbarschaft kann frei gewählt werden. Folgende Optionen stehen zur Verfügung: Mittelwert, Median, häufigster Wert, Minimum, Maximum, Standardabweichung, Summe, und Varianz.
- Linienvereinfachung (Vektor, GRASS-Modul *v.generalize*):
  Die Linienvereinfachung, oft auch als Linienfilterung bezeichnet, ist der am häufigsten angewendete Generalisierungsoperator. Dabei wird die Anzahl der Stützpunkte der Linie reduziert, ohne den Verlauf des Generalisierungobjektes zu verändern. In GRASS GIS sind folgende Vereinfachungsalgorithmen implementiert: Douglas-Peucker Algorithmus, Vereinfachungsalgorithmus nach Lang, Reumann-Witkam Algorithmus, und der Algorithmus nach Boyle.
- Linienglättung (Vektor, GRASS-Modul *v.generalize*):
  Im Zuge der Linienglättung wird die Linie geglättet, wobei der ursprüngliche Verlauf möglichst beibehalten werden soll. In GRASS GIS sind folgende Glättungsalgorithmen implementiert: Chaiken's Algorithmus, McMaster's Algorithmus, Hermite Interpolation und Snake Algorithmus.
- Linienverdrängung (Vektor, GRASS-Modul *v.generalize*):
  Bei der Linienverdrängung werden sich kreuzende oder zu nahe beieinander liegende Linien gegenseitig verschoben.
- Selektion/Eliminierung (Vektor, GRASS-Modul *v.clean*):
  Dabei werden Vektor-Objekte aufgrund bestimmter Kriterien selektiert oder eliminiert. In GRASS GIS können Objekte aufgrund ihrer Fläche und Länge selektiert/eliminiert werden.

Die Software GRASS GIS enthält somit die wichtigsten grundlegenden Generalisierungsoperatoren. Nachteilig wirkt sich das Fehlen eines Algorithmus für das Zusammenfassen von Vektorobjekten aus. Die Anwendung ist somit eingeschränkt.

Aufgrund der implementierten Befehle werden zwei unterschiedliche Varianten für die Generalisierung der Bodenbedeckungskarte vorgestellt. Sie unterscheiden sich im wesentlichen am Generalisierungszeitpunkt bei der Erstellung der Karte.

4.2.2.1 Generalisierungsvariante 1

In Abbildung 6.8 ist der Ablauf der Erstellung der Bodenbedeckungskarte nach der ersten Generalisierungsvariante dargestellt. Diese Variante zeichnet sich dadurch aus, dass sämtliche Generalisierungsmaßnahmen nach der Erstellung der Klassifizierungkarte angewendet werden.

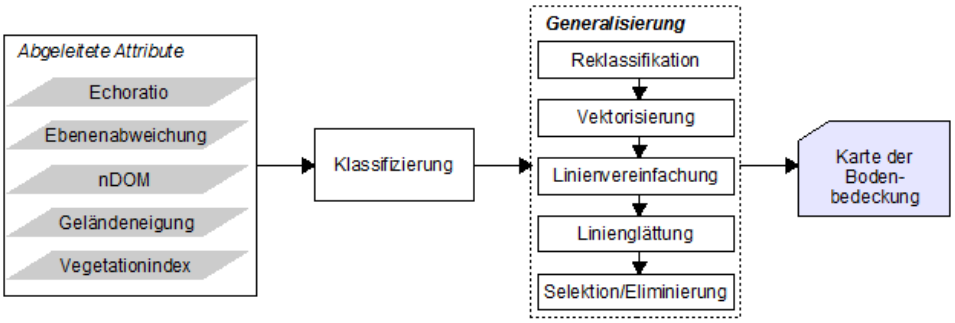

Abbildung 4.17: Flussdiagramm der Generalisierungsvariante 1

Die Generalisierung wird in folgende Schritte unterteilt:

1. Reklassifikation:
   Die Klassifizierungkarte wird reklassifiziert. Dazu wird eine dreier Nachbarschaft mit der Option *häufigster Wert* verwendet. Durch mehrmalige Anwendung werden die Grenzen leicht geglättet, jedoch nicht verschoben. Außerdem werden kleine Inselflächen in der Rasterkarte entfernt, wodurch die Rechenzeit der folgenden Generalisierungsmaßnahmen verkürzt wird.

2. Vektorisierung:
   Die reklassifizierte Rasterkarte wird in eine Vektorkarte umgewandelt, damit anschließend die Liniengeneralisierungsoperatoren auf die Karte angewendet werden können.

3. Linienvereinfachung:
   Die Linienvereinfachung wird nach dem Algorithmus nach Lang durchgeführt [Melbourne, 2009]. Unerklärlicherweise war dies der einzige Vereinfachungsalgorithmus, welcher bei Generalisierung in GRASS GIS für große Gebiete ein Ergebnis lieferte. Die Ursache für das Scheitern der anderen Algorithmen konnte nicht gefunden werden.

4. Linienglättung:
   Die Linienglättung erfolgt mit dem Snake-Glättungsalgorithmus [Kass et al., 1987]. Es wurden auch Versuche mit den anderen Algorithmen durchgeführt, wobei die erzielten Resultate sehr ähnlich waren.

5. Selektion/Eliminierung:
   Es werden alle Flächen unterhalb einer maßstabsabhängigen Mindestfläche gelöscht.

Die wichtigsten Schritte dieser Variante sind die Linienvereinfachung und Linienglättung. Die Reklassifikation, welche als erstes auf die Rasterkarte angewendet wird, ist für das Ergebnis der Generalisierung nicht von Bedeutung, reduziert jedoch die Rechenzeit für die folgenden Schritte.

4.2.2.2 Generalisierungsvariante 2

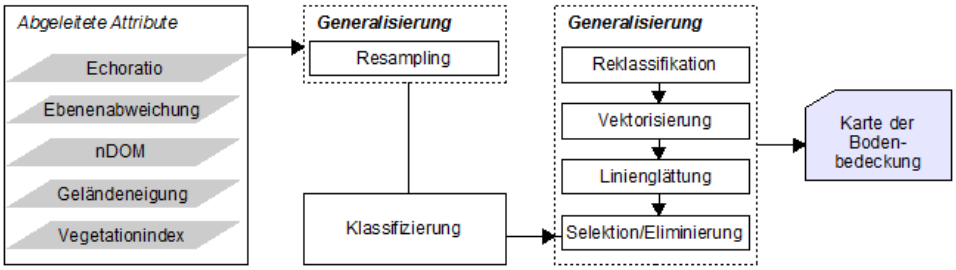

Abbildung 4.18: Flussdiagramm der Generalisierungsvariante 2

Bei der zweiten Generalisierungvariante werden Generalisierungsmaßnahmen sowohl vor, als auch nach der Erstellung der Klassifizierungskarte ausgeführt (siehe Abbildung 4.18). Die Generalisierung wird in folgende Schritte unterteilt:

1. Resampling:
   Beim Resampling wird die Auflösung des Datenmaterials in Abhängigkeit des Zielmaßstabs der Karte reduziert (Formel 4.6). Dabei werden mehrere Pixel zu einer neuen Rasterzelle zusammengefasst werden (siehe Abbildung 4.16 auf Seite 31). Als Methode für das Resampling wird der Mittelwert verwendet. Eine Ausnahme bildetet der Vegetationsindex, bei welchem aufgrund der vielen Schattenflächen der Median verwendet wird (Ausreißer).

2. Erstellung der Klassifizierungskarte:
   Die Karte wird nach dem Verfahren aus Kapitel 4.2.1 erstellt. Die Rasterauflösung der Bodenbedeckungskarte entspricht der einheitlichen Auflösung des resampelten Datenmaterials.

3. Reklassifikation:
   Die Karte wird über eine dreier Nachbarschaft mit der Option *häufigster Wert* mehrfach reklassifiziert.

4. Vektorisierung:
   Die Klassifizierungskarte, welche im Rasterformat vorliegt, wird in eine Vektorkarte umgewandelt.

5. Linienglättung:
   Die Linienglättung erfolgt mit dem Snake-Glättungsalgorithmus [Kass et al., 1987].

6. Selektion/Eliminierung:
   Es werden alle Flächen unterhalb einer maßstabsabhängigen Mindestfläche gelöscht.

Der Schwerpunkt der Generalisierung der zweiten Variante liegt im Resampling der Ausgangsdaten. Die Rasterweite wird dabei so gewählt, dass der Grenzverlauf der anschließend klassifizierten

Karte nicht weiter generalisiert werden muss. Die Linienglättung im 5. Schritt ist ausschließlich für die Glättung des gestuften Grenzverlaufes aufgrund der Vektorisierung zuständig. Die optimale Rasterweite wird nach folgender Formel bestimmt:

$$A_{Ziel}[m] = M * \frac{2}{10000}[m] \tag{4.6}$$

mit A_{Ziel} ··· optimale Rasterweite des resampelten Datenmaterials
M ··· Zielmaßstab

4.3 Geländedarstellung

Neben der Bodenbedeckung (siehe Kapitel 4.2) soll die topographische Karte auch eine Geländedarstellung erhalten. Die Schwierigkeit dabei ist, dass mit einfachen Mitteln das dreidimensionale Gelände in einer zweidimensionalen Karte ansprechend visualisiert werden soll. In der modernen Kartographie werden dafür folgende Elemente verwendet: *Höhenlinien, Schummerung* und *Felsdarstellung*.

4.3.1 Höhenlinien

Die Höhenlinien sind das wichtigste Element für die Darstellung des Geländes. Sie sind gedachte horizontal verlaufende Linien, die alle Geländepunkte gleicher Meereshöhe miteinander verbinden. Dadurch wird das Relief einer Landschaft geometrisch exakt wiedergeben.

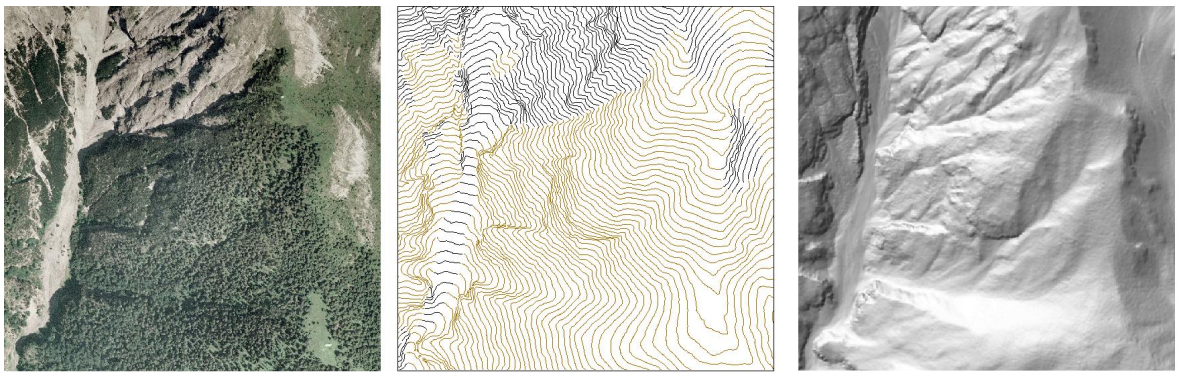

Abbildung 4.19: Links: Orthophoto eines Testgebietes; Mitte: Höhenlinien des Testgebietes bei einer Äuqidistanz von 10 Meter; Rechts: Schummerung des DGMs bei Nordwest-Beleuchtung (315°/45°)

Die Ableitung der Höhenlinien erfolgt auf Grundlage des digitalen Geländemodelles. Dieses wird zunächst auf eine geeignete Auflösung resampelt (siehe Generalisierungsmaßnahmen in Kapitel 4.2.2). Die gewählte Rasterweite ist abhängig vom Zielmaßstab der Karte und wird nach Formel 4.6 auf Seite 35 berechnet. Dadurch wird verhindert, dass eine nachträgliche Generalisierung

erforderlich ist. Aus diesem resampelten digitalen Geländemodell können die Höhenlinien direkt abgeleitet werden. Für die bessere Unterscheidung von Vegetationsflächen und vegetationslosen Bereichen werden die Höhenlinien zusätzlich eingefärbt: Braune Linien kennzeichnen Bereiche mit Bewuchs, während schwarze Höhenlinien bei den Klassen Fels und Geröll verwendet werden. Abbildung 4.19 (Mitte) zeigt die Höhenlinien einer Testkarte.

4.3.2 Schummerung

Die Schummerung unterstützt den Betrachter mittels einer Flächentönung bei der Modellierung des Geländes. Der Grauwert wird durch die Beleuchtung des Geländes mit einer imaginären Lichtquelle erzeugt.

Als Berechnungsgrundlage wird ein digitales Geländemodell verwendet. Es gelten dabei dieselben Regeln wie für die Ableitung der Höhenlinien in Kapitel 4.3.1. Als Lichtquelle wird in der Kartographie normalerweise eine Nordwest-Beleuchtung (Azimut 315°, Höhenwinkel 45°) verwendet. Eine Erhebung erscheint so am Nordwest-Hang hell und am Südost-Hang dunkel. Abbildung 4.19 (Rechts) zeigt die Schummerung eines Testgebietes.

4.3.3 Felsdarstellung

Für die Darstellung von Felsen in Karten werden spezielle Felszeichnungen verwendet. Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt wurde, gewinnen automatisch erzeugte Felszeichnungen immer mehr an Bedeutung. Es wurden zwei Methoden einer digitalen Felszeichnung vorgestellt. Die Methode nach [Hurni, 1995] hat den Nachteil, dass das Verfahren nur semi-automatisch abläuft. Es sind die Geländeober- und Unterkanten als Eingangsdaten erforderlich. Die Felsdarstellung nach [Gondol et al., 2008] hingegen ist eine vollautomatische Methode, welche jedoch keine morphologischen Strukturen, wie Geländekanten berücksichtigt.

Aus diesem Grund wurde eine eigene Methode der Felsdarstellung entwickelt. Sie ist eine Abwandlung und Vereinfachung der analogen Felsdarstellung nach [Brandstätter und Brandstätter, 1977]. Die Felszeichnung setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Höhenlinienscharung
2. Geländekanten
3. Strukturzeichnung
4. Schummerung

Bevor die Felsdarstellungmethode jedoch genauer erklärt wird, muss zunächst abgeklärt werden, welche Bereiche der Karte eine Felszeichnung erhalten sollen. Bei den heute üblichen Methoden werden die Bereiche meist am Computer mithilfe von Orthophotos manuell selektiert. Die Suche

nach geeigneten unabhängigen Parametern für eine eindeutige Abgrenzung gestaltete sich jedoch als äußerst schwierig. Die Wahl fiel schließlich auf eine Abgrenzung über der Geländeneigung auf Basis des digitalen Geländemodelles. Es wurden folgende Abgrenzungen gewählt:

- Vegetationslose Klassen (Fels, Geröll): Geländeneigung > 40°
- Vegetationsklassen (Wald, Latschen, Wiese): Geländeneigung > 50°

Der Grenzwert im vegetationslosen Bereich wurde auf 40° Geländeneigung festgesetzt. Im Bereich der Vegetationsklassen wurde der Grenzwert um weitere 10° erhöht, um die erhöhten Bodenfestigkeit aufgrund von Wurzeln zu berücksichtigen.
Es sei angemerkt, dass die hier gewählten Abgrenzungswerte nur als Richtwerte zu betrachten sind und nicht sehr genau sind. Die gewählten Werte wurden punktweise im Datensatz überprüft und zusätzlich oberflächlich mit den Felsbereichen der ÖK50 und der Alpenvereinskarten abgeglichen (siehe Kapitel 5). Wünschenswert wären weitere Untersuchungen für die Bestimmung zusätzlicher und genauerer Trennparameter.

Höhenlinienscharung

Bei vielen gängigen Felsdarstellungen, z.B. bei der Schweizer Karte [swisstopo, 2009] oder bei der Österreichischen Karte [BEV, 2009], werden die Höhenlinien im Felsbereich meist bis auf die Zählhöhenlinien entfernt. Leonhard Brandstätter kommentierte dies folgendermaßen:

> *„Scharung, im Darstellungswert schon vor etwa 130 Jahren erkannt, wird heute, da wir von ihr vermessungstechnisch erst richtig Besitz ergriffen haben, von den Kartengestaltern nicht geschätzt, eher nachhaltig demoliert. Sie verstehen es nicht, aus diesem einfachsten, verlässlichsten und genauesten Darstellungsmittel (die Superlative ist hier voll berechtigt!) ohne Umschweife eine visuell durchwegs auffassbares Kartenbild abzuleiten“*, [Brandstätter, 1973]

Bei der vorgestellten Felsdarstellung soll die Höhenlinienscharung das Grundelement der Bergformendarstellung bilden und über den gesamten Felsbereich durchgeführt werden. Die anderen Elemente (Geländekanten, Strukturzeichnung, und Schummerung) sind ausschließlich für die Erläuterung der Scharung zuständig und haben keinerlei selbständige Darstellungsabsichten.

Folgende Regeln werden bei der Erstellung der Höhenlinienscharung berücksichtigt:

- Die Zählhöhenlinien werden über den gesamten Felsbereich durchgezogen.
- Die Normalhöhenlinien werden nur in sehr steilen Bereichen weggelassen. Die Werte der maximal zulässigen Geländeneigung für Normalhöhenlinien wird mithilfe der Formel 4.7 berechnet [Brandstätter, 1983].

$$tan(\alpha) = \frac{a}{h \cdot m} \tag{4.7}$$

mit α ··· maximale Geländeneigung für die Normalhöhenlinien
a ··· Äquidistanz der Höhenlinien
h ··· Minimaler erkennbarer Linienabstand im der Karte (normalerweise 0,2 mm)
m ··· Maßstab

Geländekanten

Die Geländekanten sind für eine Visualisierung der morphologischen Strukturen des Geländes sehr wichtig. Die Extraktion von Geländekanten aus ALS-Daten kann entweder auf Grundlage von abgeleiteten Rasterdaten, oder direkt aus der Punktwolke erfolgen (siehe Kapitel 3.2). Nachdem diese Arbeit mit der Software GRASS GIS durchgeführt werden soll, wird eine rasterbasierte Methode verwendet. Die Kanten werden dabei aus den Krümmungen des digitalen Geländemodelles (Raster) abgeleitet (GRASS Modul: *r.param.scale*). Eine ähnliche Methode für GRASS GIS ist in [Rutzinger et al., 2007b] zu finden. Folgende Krümmungen werden verwendet:

- Krümmung der Schnittkurve zwischen einer horizontalen Ebene und dem digitalen Geländemodell (positive Krümmung: Konvex, negative Krümmung: Konkav):
  Die Schnittkurve wird innerhalb eines frei definierbaren Bereiches über eine Kreisbogen approximiert (abhängig vom gewählten Zielmaßstab). Über diesen Krümmungsparameter werden Einschnitte in das Gelände und Kämme erfasst. Die Krümmung wird nach folgender Formel berechnet:

  $$\kappa = \frac{1}{R} \tag{4.8}$$

  mit κ ··· Krümmung des Digitalen Geländemodelles
  R ··· Radius des approximierten Kreisbogens
- Krümmung der Schnittkurve zwischen dem digitalen Geländemodell und einer Fläche, welche über die Vertikalachse und der Richtung des maximalen Gradienten definiert ist (positive Krümmung: Konvex, negative Krümmung: Konkav):
  Dieser Krümmungsparameter extrahiert markante Felsober- und Unterkanten.

Über diese beiden Krümmungen werden die Kanten extrahiert. Abbildung 4.20 zeigt das Ergebnis der Kantenextraktion für ein Testgebiet. Für eine ansprechende Visualisierung werden zusätzlich die Grauwerte der Kanten in Abhängigkeit der Exposition leicht variiert.
Das Resultat der Kantenextraktion ist nur teilweise zufriedenstellend. Die Kanten bestehen aus vielen kleinen Flächen, und sind großteils nicht miteinander verbunden. Vermutlich besser geeignet wäre die Verwendung der Methode von [Briese et al., 2009], welche in Kapitel 3.2 vorgestellt wurde.

Abbildung 4.20: Ergebnis der Kantenextraktion eines Testgebietes mit Berücksichtigung eines Lichtmodelles (315°/45°)

Strukturzeichnung

Mittels der Strukturzeichnung wird der Bereich zwischen den Geländekanten durch eine Schattierung aufgefüllt. Dafür wird die horizontale Krümmung des digitalen Geländemodelles aus Kapitel 4.3.3 verwendet. Es werden konvexe Bereiche eingefärbt, während die konkaven Bereiche farblos bleiben.

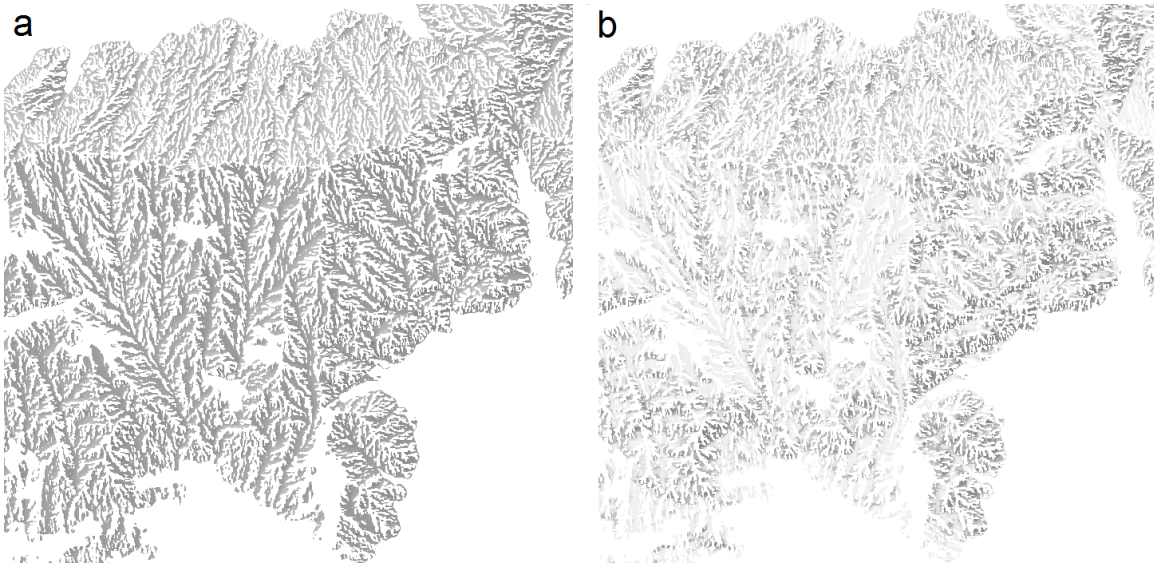

Abbildung 4.21: Ergebnis der Strukturzeichnung eines Testgebietes:
a: Strukturzeichnung mit Berücksichtigung eines Lichtmodelles (315°/45°)
b: Strukturzeichnung mit Berücksichtigung eines Lichtmodelles (315°/45°) und der Geländeneigung

Der Farbwert wird zusätzlich in Abhängigkeit von der Exposition und Geländeneigung verändert. Abbildung 4.21 (a) zeigt die Strukturzeichnung eines Testgebietes, bei welchem der Grauwert nur aufgrund der Exposition leicht verändert wird. In der rechten Abbildung hingegen wurde sowohl die Exposition, als auch eine Abschwächung des Farbwertes aufgrund der Geländeneigung berücksichtigt. Dadurch soll erreicht werden, dass die Strukturzeichnung nur in steilen Gebieten erkennbar ist.

Schummerung

Um der Felszeichnung den letzten Schliff zu geben, werden die Geländekanten und die Strukturzeichnung mit einer Schummerung hinterlegt. Die Lichtquelle wird an der Position 315°/45° fixiert. Das Ergebnis der Felsdarstellung eines Testgebietes mit allen Elementen (Höhenlinienscharung, Geländekanten, Strukturzeichnung und Schummerung) ist in Abbildung 4.22 dargestellt.

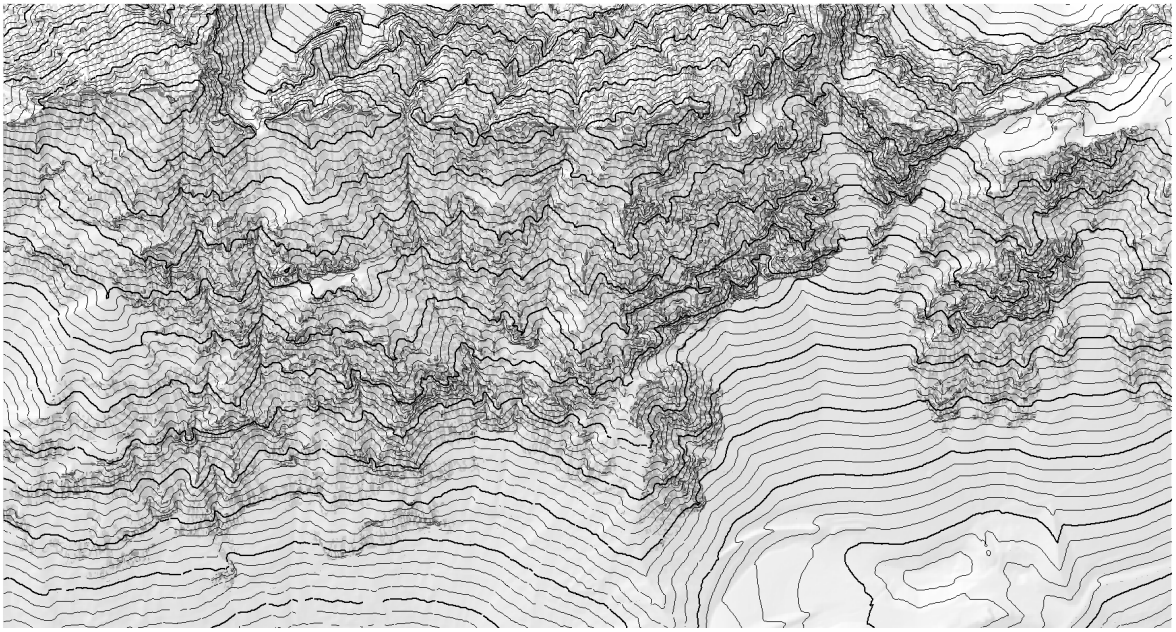

Abbildung 4.22: Felsdarstellung eines Testgebietes mit Höhenlinienscharung, Gländekanten, Strukturzeichnung und Schummerung

5 Untersuchungsgebiet und Daten

Im ersten Teil dieses Kapitels wird das Untersuchungsgebiet für die Ableitung der Bodenbedeckungskarte vorgestellt (Kapitel 5.1). Es folgen eine Beschreibung der verwendeten ALS-Daten (Kapitel 5.2) und des Orthophotos (Kapitel 5.3). Am Ende werden noch die Referenzkarten für die Beurteilung der automatisiert erstellten Karte vorgestellt (Kapitel 5.4).

5.1 Untersuchungsgebiet Nordkette

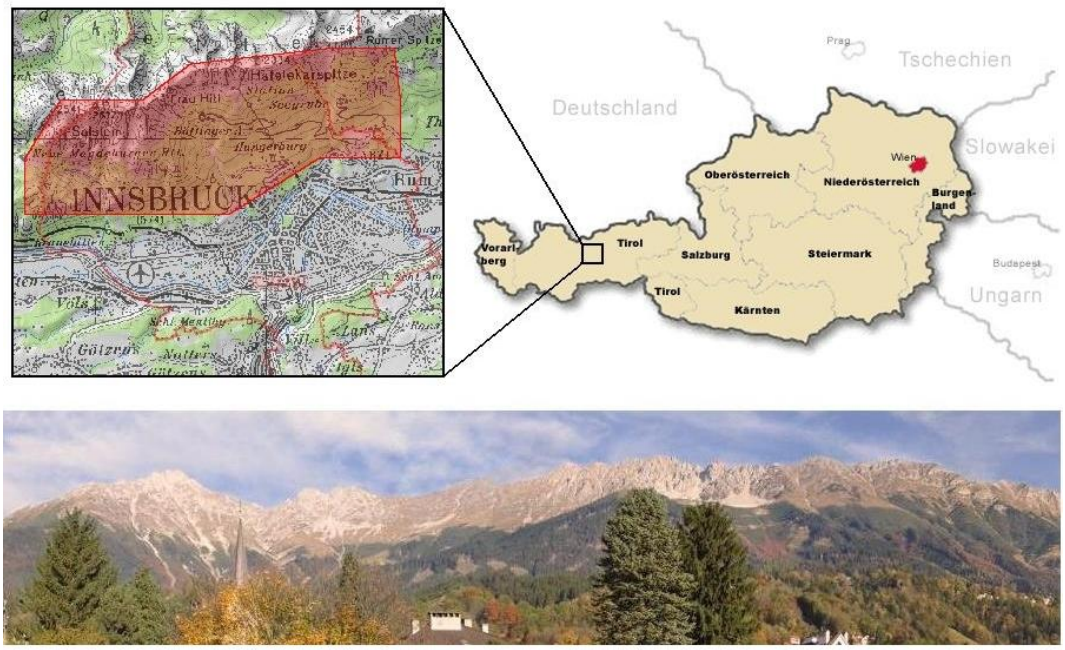

Abbildung 5.1: Oben: Untersuchungsgebiet nördlich von Innsbruck; Unten: Panoramabild des Untersuchungsgebietes, Sicht von Innsbruck

Das Untersuchungsgebiet liegt etwas nördlich von Innsbruck (in Tirol, Österreich). Es ist rund 5 x 11 Kilometer groß und umfasst eine Fläche von 41 km^2 (siehe Abbildung 5.1 oben, roter Bereich). Das Gebiet reicht vom Waldrand an der nördlichen Stadtgrenze von Innsbruck bis zu den Gipfeln der Nordkette auf über 2000 Metern.

Die Nordkette ist der südlichste Teil des Karwendelgebirges, welches zu den nördlichen Kalkalpen gehört. Das Gebirge besteht überwiegend aus mächtigen Kalksteinfolgen und teilweise Dolomit. Der höchste Punkt des Gebietes ist der Kleine Solstein mit 2637 Metern.

Das Untersuchungsgebiet umfasst verschiedene Vegetationsstufen [Multimedial, 2009]. Von der Talsohle aus beginnend gibt es Eichen- und Förenwälder. Auf rund 1200 Metern gehen diese in Fichtenwälder über, welche bis zur alpinen Baumgrenze reichen. Es folgen Latschenflächen bis etwa 2000 Meter. Besonders interessant für die Bodenbedeckungskarte sind die Übergänge zwischen dem Fichtenwald und Latschen auf 1500 bis 1800 Meter, und zwischen Latschen und alpinen Rasen/Fels auf etwa 2000 Meter. Weiters umfasst das Untersuchungsgebiet weitläufige Fels- und Geröllflächen aus Kalkstein. Die Felsen sind aufgrund der dortigen klimatischen Bedingungen sehr zerklüftet. Die Landschaft entspricht somit einer typischen Alpenlandschaft des subalpinen Bereiches und ist als Untersuchungsgebiet für die Ableitung der topographischen Bodenbedeckungskarte bestens geeignet.

5.2 ALS-Daten Nordkette

Die verwendeten ALS-Daten wurden von der Abteilung Geoinformation des Landes Tirol zur Verfügung gestellt. Die Daten stammen aus einer Befliegung der Nordkette im Juli 2005 durch die Firma TopScan (Deutschland). In Abbildung 5.2 sind die Trajektorien der Flugstreifen dargestellt.

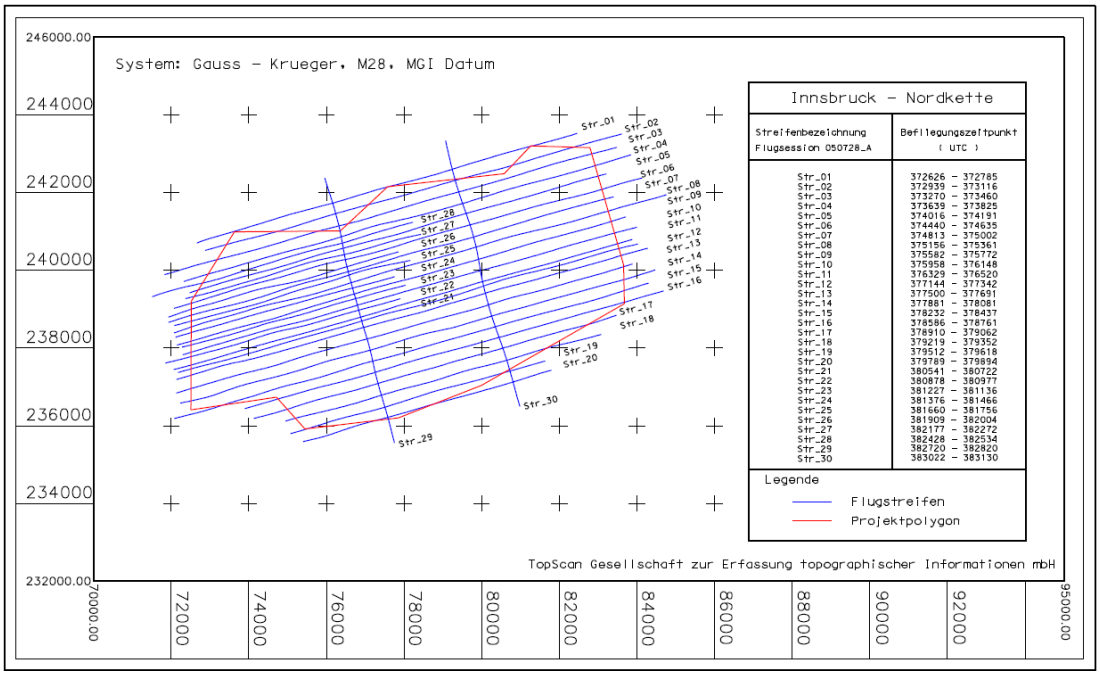

Abbildung 5.2: Übersicht über die Flugstreifen der Befliegung Nordkette (TopScan GmbH)

Als Scanner wurde der ALS-Scanner ALTM 1225 der kanadischen Firma Optec eingesetzt. Der Scanner ermöglicht die Bestimmung des ersten und letzten Echos. Die mittlere Flughöhe aller Streifen betrug 1000 Meter über Grund bei einer Scanfrequenz von 23 kHz und einem maximalen Scanwinkel von ±20°. Die mittlere Punktdichte im Untersuchungsgebiet liegt bei 2,58 Punkten/m^2 bei absoluten Genauigkeiten von ± 30 cm in der Lage und ± 15 cm in der Höhe.
Zur Verfügung gestellt wurden die Punktwolke (getrennt nach *first-echo* und *last-echo*), sowie ein digitales Oberflächenmodell (DOM) und ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer Rasterweite von 1 Meter.

5.3 Orthophoto Nordkette

Abbildung 5.3: Orthophoto des Untersuchungsgebietes

Das RGB-Orthophoto wurde, analog den ALS-Daten, von der für Abteilung Geoinformation des Landes Tirol zur Verfügung gestellt. Die Aufnahmen stammen aus dem Jahr 2005 und haben eine Rasterweite von 25 cm. In Abbildung 5.3 sind die zusammengefügten Orthophotos des Untersuchungsgebietes dargestellt.

5.4 Referenzkarten

Für die Beurteilung und Bewertung der automatisiert abgeleiteten Karte sind Referenzkarten erforderlich (siehe Kapitel 7.2.2). Neben dem bereits vorgestellten Orthophoto wird das Untersuchungsgebiet durch die Österreichischen Karten (ÖK25V) und den Alpenvereinskarten abgedeckt.

Österreichische Karte (ÖK25V)

Die Österreichische Karte 1:25.000V (ÖK25V) ist eine Vergrößerung der ÖK50 (1:50.000), welche das topographische Grundkartenwerk Österreichs darstellt [BEV, 2009]. Die Karten sind in als UTM- (Universal Transverse Mercator) und BND-Karten (Bundesmeldenetz) erhältlich.

Die Karten unterscheiden zwischen den Klassen Wald, Latschen und Geröll. Weiters ist eine Felszeichnung vorhanden. Wiesen/Weiden sind jedoch nicht als eigene Klassen abgegrenzt.

Das Untersuchungsgebiet wird durch die Karten *2222 Ost* und *2224 West* abgedeckt. Die letzte Aktualisierung der Karte erfolgte im Jahr 2003, mit einzelnen Nachträgen im Jahre 2006. Genauere Informationen bezüglich des Erhebungszeitpunktes und letzten Aktualisierung der dargestellten Bodenbedeckung sind nicht vorhanden. Abbildung 5.4 (Links) zeigt einen Ausschnitt der ÖK25V - 2224 West.

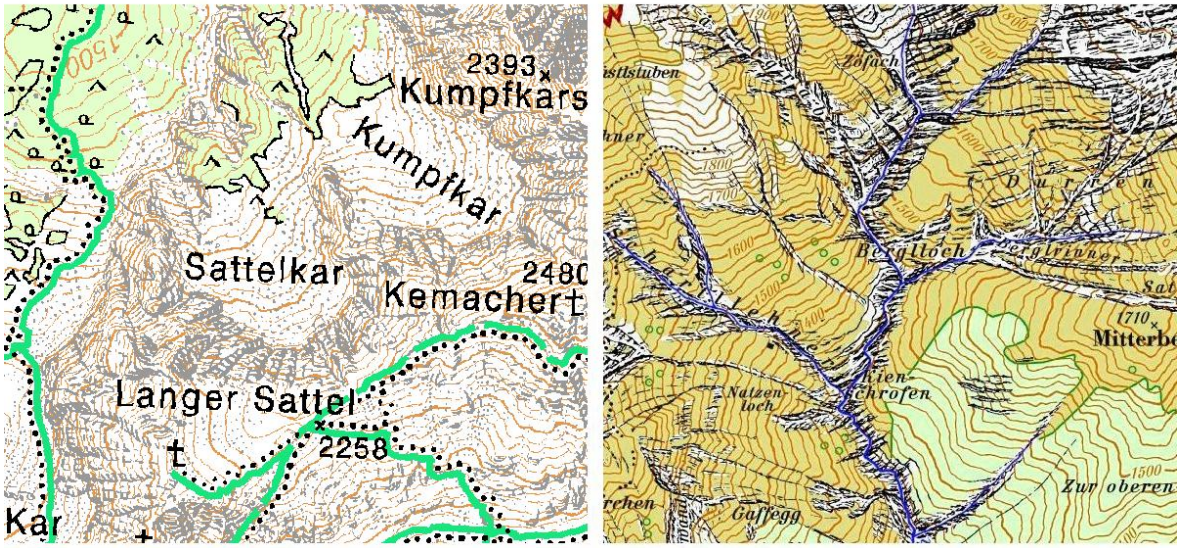

Abbildung 5.4: Links: Ausschnitt der ÖK25V - 2224 West, ©BEV; Rechts: Ausschnitt der Alpenvereinskarte 5/1 1:25.000, ©Alpenverein

Alpenvereinskarte

Alpenvereinskarten sind topographische Wanderkarten speziell für alpine Bereiche [Alpenverein, 2009]. Im Gegensatz zur Österreichischen Karte ist sie im Maßstab 1:25.000 verfügbar. Sie unterscheiden zwischen den Klassen Wald, Latschen, Wiese, Fels und Geröll.

Das Untersuchungsgebiet wird durch die Karten 5/1 und 5/2 des Karwendelgebirges abgedeckt. Die Karten stammen aus dem Jahr 1933, mit der letzten Aktualisierung im Jahre 2005. Genauere Informationen stehen nicht zur Verfügung. Abbildung 5.4 (Rechts) zeigt einen Ausschnitt der Alpenvereinskarte 5/1.

6 Ergebnisse

Für das Untersuchungsgebiet aus Kapitel 5 wurden topographische Bodenbedeckungskarten im Maßstab 1:10.000 und 1:25.000 abgeleitet. In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der Attribute vorgestellt (Kapitel 6.1). Es folgen Ergebnisse der Bodenbedeckung (Kapitel 6.2) und Geländedarstellung (Kapitel 6.3). Am Ende des Kapitels wird noch die automatisiert abgeleitete topographische Bodenbedeckungskarte präsentiert (Kapitel 6.4).

6.1 Abgeleitete Attribute

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der abgeleiteten Attribute aus Kapitel 4.1 vorgestellt. Die gewählte Rasterweite der Attributkarten wurde mit 1 Meter festgelegt. Die Auflösung entspricht jener der topographischen Modelle (DGM und DOM), welche vom Land Tirol zur Verfügung gestellt wurden (siehe Kapitel 5.2).

Die Abbildung 6.1 zeigt die topographischen Modelle des Untersuchungsgebietes (10940x5000 Pixel). Sie wurden vom Land Tirol zur Verfügung gestellt und wurden nicht neu berechnet. Die oberste Abbildung zeigt die Schummerung des abgeleiteten digitalen Oberflächenmodells bei einer gewählten Lichtquelle von (315°/45°). Es folgt in der Mitte das digitale Geländemodell, ebenfalls als Schummerung dargestellt. Die unterste Abbildung hingegen zeigt das digitale normierte Oberflächenmodell, welches aus den beiden oberen Modellen abgeleitet wurde.

In Abbildung 6.2 sind drei weitere Attribute des Untersuchungsgebietes dargestellt. Ganz oben ist die Geländeneigung dargestellt, welche mittels einer 3er Nachbarschaft aus dem digitalen Geländemodell berechnet wurde. Es folgt in der Mitte die Ebenenabweichung. Sehr auffällig in dieser Abbildung ist der "gestreifte" Verlauf des Ergebnisses, vor allem im Bereich des Waldes. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Berechnung der Ebenenabweichung mithilfe von Punkten innerhalb einer festen 3D-Distanz erfolgt (siehe Kapitel 4.1.3), andererseits könnten die Streifen durch Restfehler der Georeferenzierung verursacht werden. Berechnet wurde die Ebenenabweichung mithilfe der Software *roughness.exe* (Version 0.3.0) des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien. Als 3D-Distanz wurde 1,5 Meter verwendet.
Die Echoratio des Untersuchungsgebietes ist in Abbildung 6.2 (Unten) dargestellt. Sie wurde analog der Ebenenabweichung mir der Software *roughness.exe* berechnet (gewählte Distanz: 1,5 m). Sowohl die Ebenenabweichung, als auch die Schummerung, wurden durch das Zusammenfassen der Punktattribute innerhalb eines Rasters in eine Rasterkarte umgewandelt.

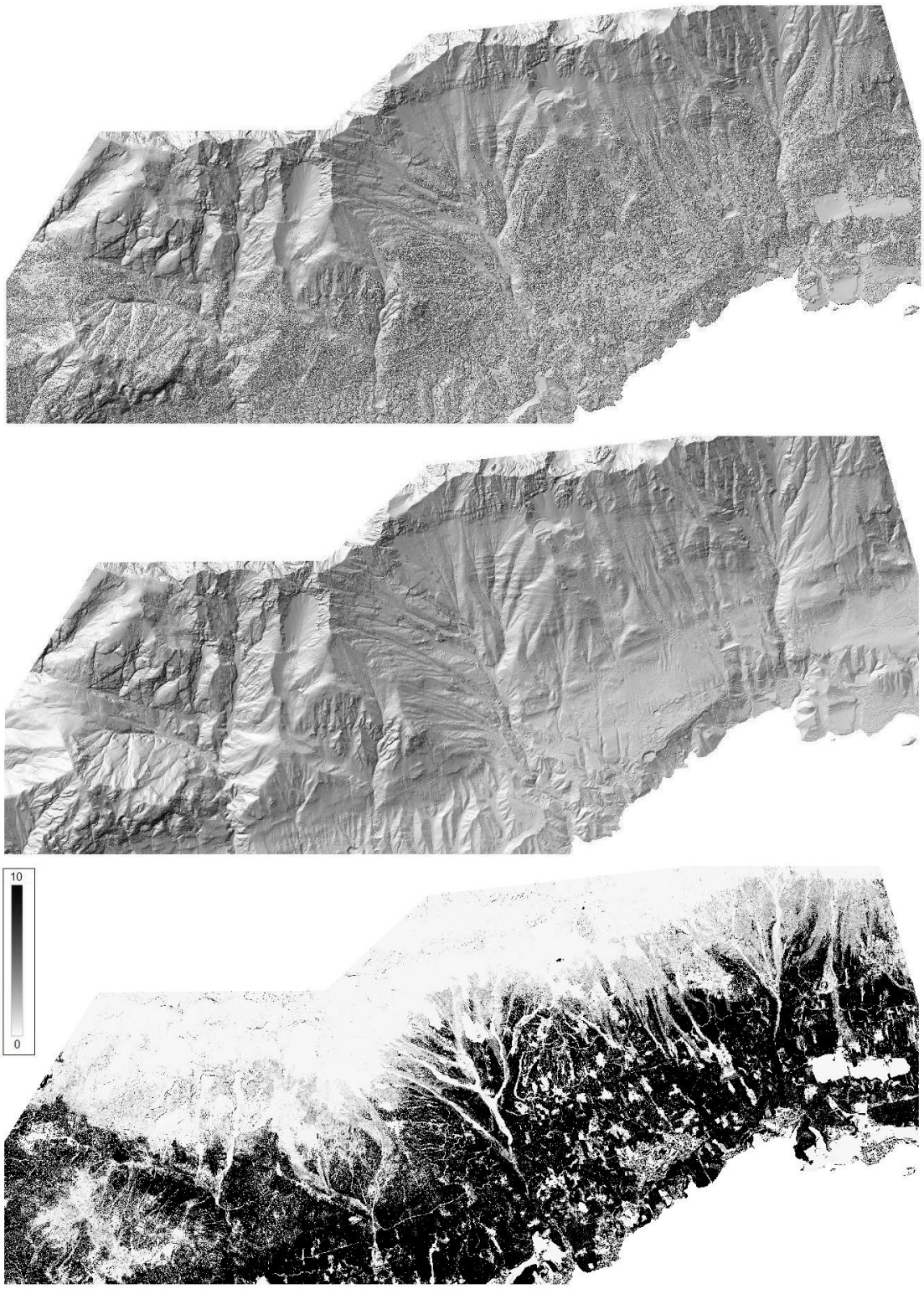

Abbildung 6.1: Topographische Modelle des Untersuchungsgebietes bei einer Rasterweite von 1 Meter. Oben: Schummerung DOMs (315°/45°); Mitte: Schummerung DGMs (315°/45°); Unten: nDOM

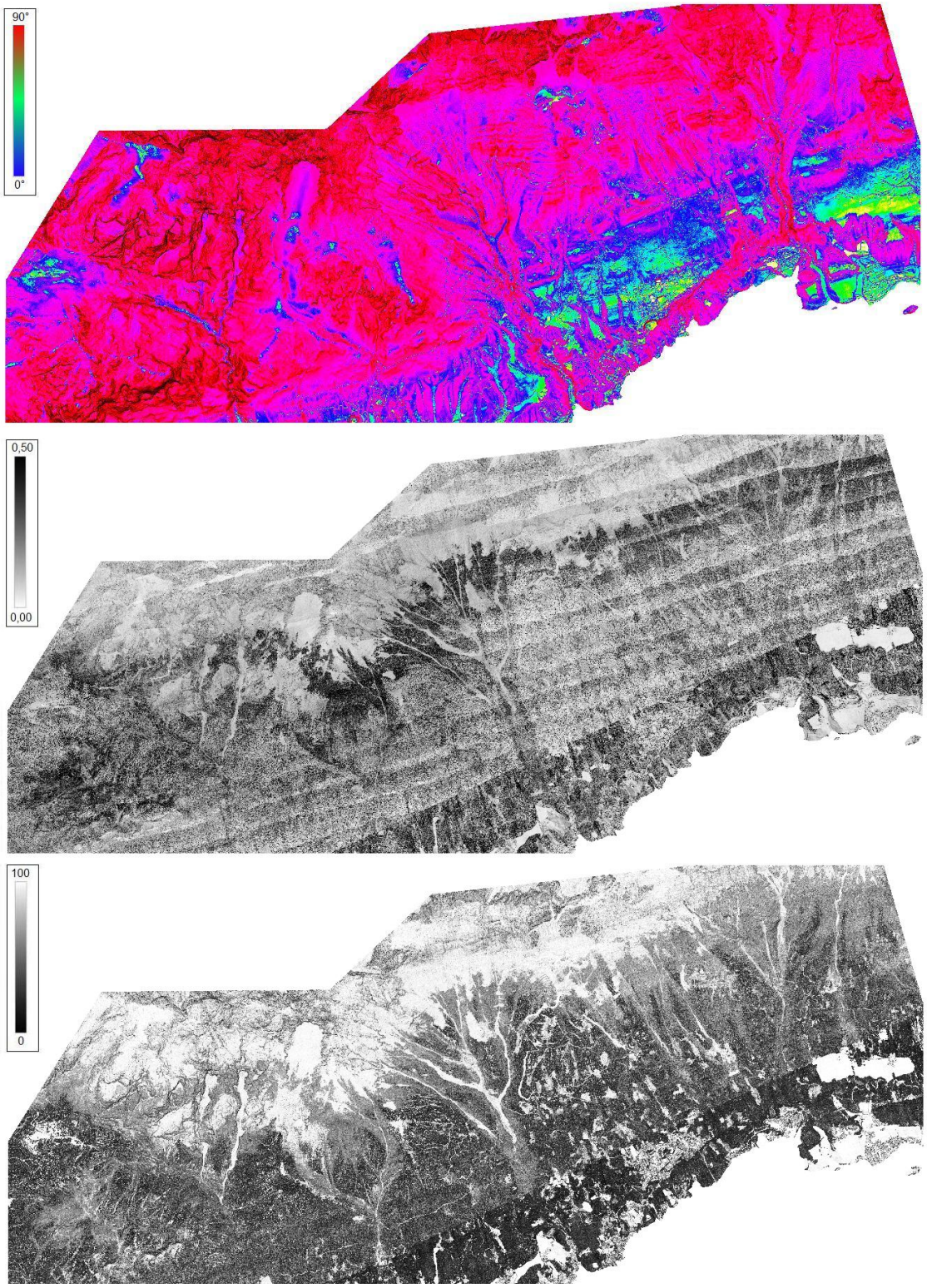

Abbildung 6.2: Attribute des Untersuchungsgebietes, Rasterweite 1 Meter. Oben: Geländeneigung; Mitte: Ebenenabweichung; Unten: Echoratio

Abbildung 6.3: Vegetationsindex VARI des Untersuchungsgebietes für eine Rasterweite von 1 Meter

Der Vegetationsindex VARI des Untersuchungsgebietes ist schließlich in Abbildung 6.3 dargestellt. Nachdem das Orthophoto eine Auflösung von 0,25 Meter hat (siehe Kapitel 5.3), wurde das Ergebnis des Vegetationsindexes auf die einheitliche Rasterweite der abgeleiteten Attribute resampelt (0,25 m → 1 Meter). Als Methode für das Resampeln wurde der Median verwendet, damit der Einfluss von Schattenflächen auf das Ergebnis möglichst gering ist.

6.2 Bodenbedeckung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der abgeleiteten Bodenbedeckung vorgestellt. Wie in Kapitel 4.2 bereits beschrieben wurde, erfolgt die Erstellung in zwei Schritten: Im ersten Schritt wird eine Klassifizierungskarte für das Untersuchungsgebiet erstellt (Kapitel 6.2.1), welche anschließend in einem zweiten Schritt für die Zielmaßstäbe 1:10.000 und 1:25.000 aufbereitet wird (Kapitel 6.2.2).

6.2.1 Klassifizierung

Bevor das Untersuchungsgebiet klassifiziert werden kann, müssen Trainingsdaten für die Bestimmung der Klassengrenzen extrahiert werden (siehe Kapitel 4.2.1). Als Trainingsgebiete wurden je Klasse sechs Bereiche von jeweils 50x50 Metern bestimmt (Rasterweite: 1 m). Jede Klasse wird somit von einer Stichprobe im Umfang von 15.000 Rasterzellen pro Merkmal dargestellt.
Die entnommenen Trainingsdaten wurden anschließend analysiert. Wie in Kapitel 4.2.1.2 beschrieben wurde, erfolgte die Datenanalyse mithilfe von Histogrammen der verschiedenen Merkmale. Die Histogramme der Attribute für die Trainingsdaten sind in den Abbildungen 6.4 und 6.5) dargestellt.

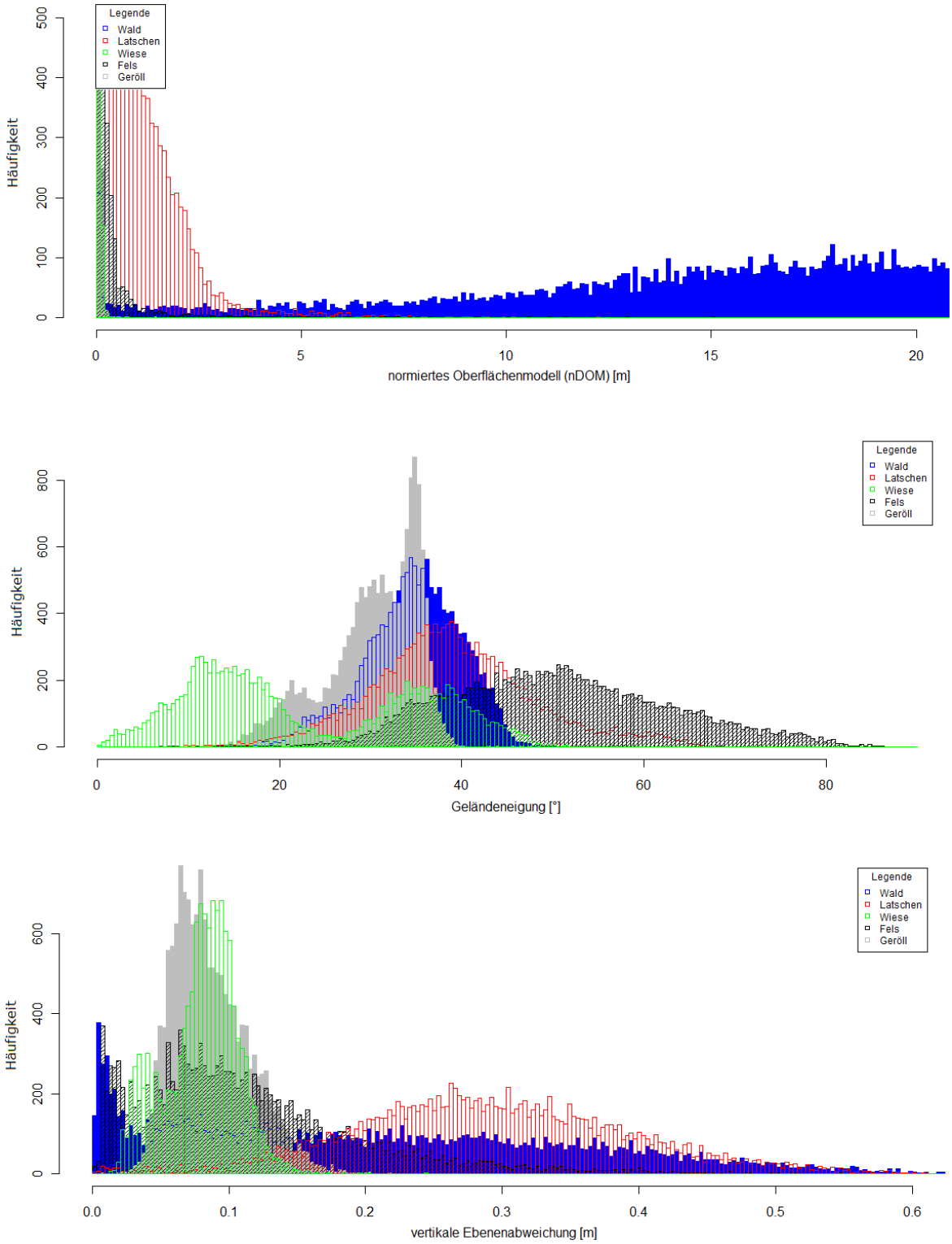

Abbildung 6.4: Histogramme der Trainingsdaten des Untersuchunsgebietes. Oben: digitales normiertes Oberflächenmodell; Mitte: Geländeneigung; Unten: Ebenenabweichung

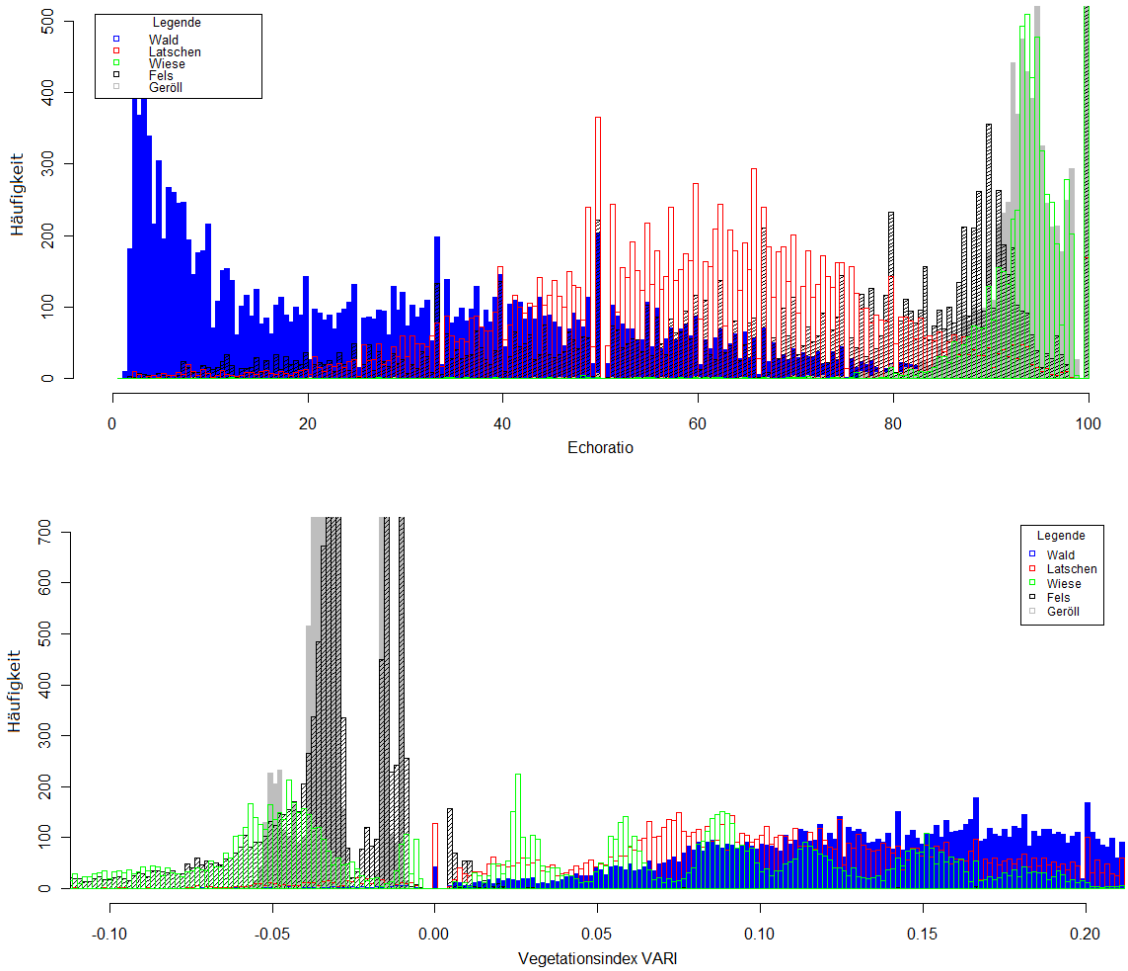

Abbildung 6.5: Histogramme der Trainingsdaten des Untersuchunsgebietes. Oben: Echoratio; Unten: Vegetationsindex VARI

Klasse	**Klassenabgrenzungsattribute**		
Wald	normiertes Oberflächenmodell	→	Latschen, Wiese
	Vegetationsindex	→	Fels, Geröll
Latschen	Echoratio und Ebenenabweichung	→	Wiese
	normiertes Oberflächenmodell	→	Wald
	Vegetationsindex	→	Fels, Geröll
Wiese	Echoratio und Ebenenabweichung	→	Wiese
	normiertes Oberflächenmodell	→	Wald
	Vegetationsindex	→	Fels, Geröll
Fels	Vegetationsindex	→	Wald, Latschen, Wiese
Geröll	Vegetationsindex	→	Wald, Latschen, Wiese

Tabelle 6.1: Eindeutige Abgrenzung der Klassen über die verwendeten Attribute

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Sie zeigt eine Übersicht der Klassen und der Attribute, mit dessen Hilfe sie eindeutig abgegrenzt werden können. Die Ergebnisse können folgendermaßen interpretiert werden:

- Die Daten aus der Punktwolke (Echoratio, Ebenenabweichung und nDOM) ermöglichen eine Trennung der Vegetationsklassen Wald, Latschen und Wiese.
- Die Klassen Fels und Geröll können über die Punktwolke nicht von den Vegetationsklassen Wald, Latschen und Wiese abgegrenzt werden. Für diese Abtrennung werden zusätzliche Attribute benötigt. In dieser Arbeit erfolgte die Trennung auf Grundlage des Vegetationsindexes VARI. Eine eindeutige Abgrenzung der Klassen durch die ausschließliche Verwendung der verfügbaren ALS-Daten ist somit nicht möglich.
- Die Klassen Fels und Geröll können weder über die Punktwolke, noch über das Orthophoto eindeutig getrennt werden, weil sich die Wertebereich der Attribute beider Klassen großteils überschneiden (siehe Histogramme in Abbildung 6.4 und 6.5). Zusätzliche Attribute sind erforderlich.

Mithilfe dieser Informationen konnten anschließend die Klassengrenzen mit den Formeln in Kapitel 4.2.1.3 bestimmt werden. Die berechneten Grenzen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Für die Berechnung des verwendeten VARI-Grenzwertes von -0,009 wurden die Vegetationsklassen und vegetationslosen Klassen jeweils zu einer neuen Klassen zusammengefasst. Der Trennwert wurde anschließend nach Formel 4.5 berechnet.

Klasse	**Attribut**	**Bedingung**
Wald	Echoratio	< 73.8 %
	Ebenenabweichung	< 0.48 m
	nDOM	> 2.25 m
	VARI	$-0.009 < VARI < 0.408$
Latschen	Echoratio	$30.0 < ER \leq 84.2$ %
	Ebenenabweichung	$0.15 < EA < 0.47$ m
	nDOM	≤ 2.25 m
	VARI	$-0.009 < VARI < 0.630$
Wiese	Echoratio	> 84.17 %
	Ebenenabweichung	≤ 0.15 m
	nDOM	$< 0.07m$
	VARI	$-0.009 < VARI < 0.500$
Fels und Geröll	Echoratio	> 25.6 %
	Ebenenabweichung	< 0.28 m
	nDOM	$< 0.28m$
	VARI	$-0.114 < VARI \leq -0.009$

Tabelle 6.2: Klassengrenzen der Trainingsgebiete nach den Formeln 4.3, 4.4 und 4.5 aus Kapitel 4.2.1.3

Wie bereits erklärt wurde, konnten keine eindeutigen Trennparameter zwischen den Klassen Fels und Geröll gefunden werden. Bei der Betrachtung der Histogramme in den Abbildungen 6.4 und 6.5 fällt jedoch auf, dass der Wertebereich der Attribute von Geröll stets in jenem von Fels enthalten ist. Die Klasse Geröll kann somit als eine Untergruppe von der Klasse Fels betrachtet werden. Die Trennung der Klassen erfolgte deshalb nach folgendem Prinzip:
Als erstes wird die gemeinsame Klasse Fels und Geröll aus den Daten abgeleitet. Aus dieser Klasse wird anschließend das Geröll herausgefiltert. Die Klassengrenzen für Geröll werden dabei mit den Formeln 4.3 und 4.4 bestimmt (siehe Tabelle 6.3).

Klasse	**Attribut**	**Bedingung**
Fels und Geröll	Echoratio	> 25.6 %
	Ebenenabweichung	< 0.28 m
	nDOM	$< 0.28m$
	VARI	$-0.114 < VARI \leq -0.009$
Geröll	Echoratio	> 88.5 %
	Ebenenabweichung	< 0.14 m
	nDOM	< 0.07 m
	VARI	$-0.0479 < VARI \leq -0.009$
	Geländeneigung	$< 38°$

Tabelle 6.3: Klassengrenzen der Klasse Geröll nach den Formeln 4.3 und 4.4 aus Kapitel 4.2.1.3

Als nächstes wurde mit den Klassengrenzen aus Tabelle 6.2 und 6.3 das gesamte Untersuchungsgebiet klassifiziert. Aufgrund der beiden vorgestellten Generalisierungsvarianten in Kapitel 4.2.2, müssen Klassifizierungkarten mit unterschiedlicher Rasterauflösung abgeleitet werden. Während bei der ersten Methode die Generalisierung nach der Erstellung der Klassifizierungskarte erfolgt, ist bei der zweiten Methode ein vorheriges resampeln des Datenmateriales erforderlich. Für die Karten im Maßstab 1:10.000 und 1:25.000 wurden somit drei unterschiedliche Klassifizierungskarten erstellt:

- Klassifizierungkarte mit einer Rasterauflösung von 1 Meter (erforderlich für die Bodenbedeckungskarten 1:10.000 und 1:25.000, Variante 1)
- Klassifizierungkarte mit einer Rasterauflösung von 2 Meter (erforderlich für die Bodenbedeckungskarte 1:10.000, Variante 2)
- Klassifizierungkarte mit einer Rasterauflösung von 5 Meter (erforderlich für die Bodenbedeckungskarte 1:25.000, Variante 2)

In Abbildung 6.6 ist das Ergebnis der Klassifizierung des gesamten Untersuchungsgebietes dargestellt (Rasterweite 1 m). Der untere Bereich der Abbildung zeigt einen Ausschnitt (schwarzes Rechteck) für die drei unterschiedlich abgeleiteten Klassifizierungkarten.

Im letzten Schritt wurden die klassenlosen Bereiche der Karten über eine 5er Nachbarschaft mit der Option *häufigster Wert* aufgefüllt (siehe Kapitel 4.2.1.4). Das Ergebnis für das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Eine Analyse der Daten folgt in Kapitel 7.1.

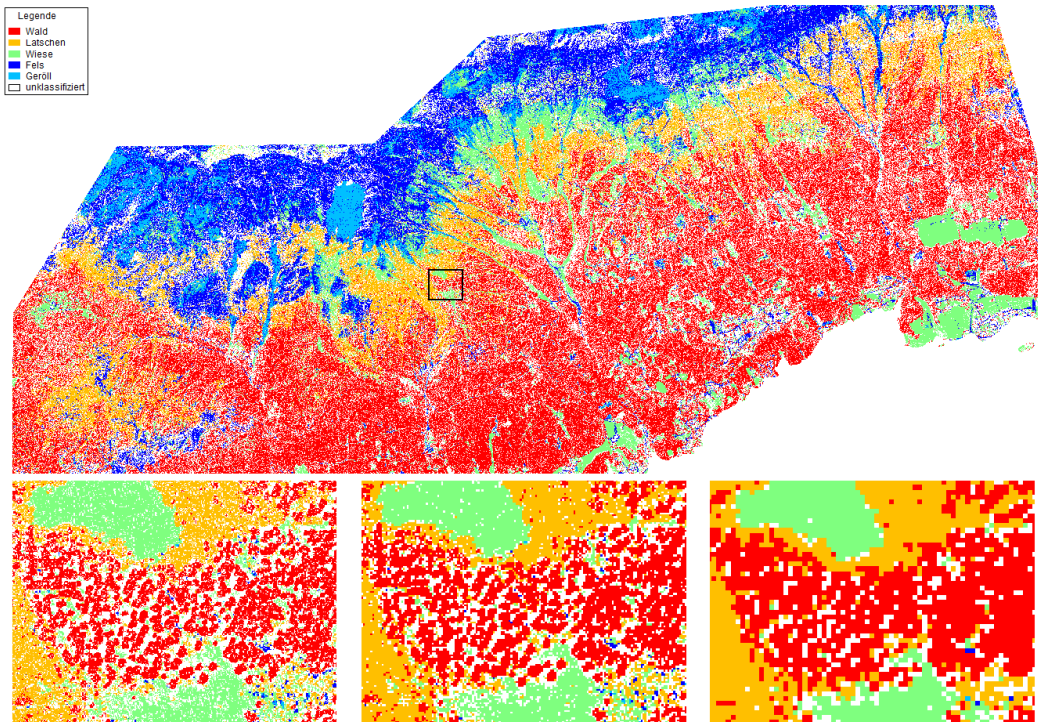

Abbildung 6.6: Oben: Klassifizierungskarte des Untersuchungsgebietes, 1 Meter Rasterweite. Unten Links: Ausschnitt, 1 Meter; Unten Mitte: Ausschnitt, 2 Meter; Unten Rechts: Ausschnitt, 5 Meter

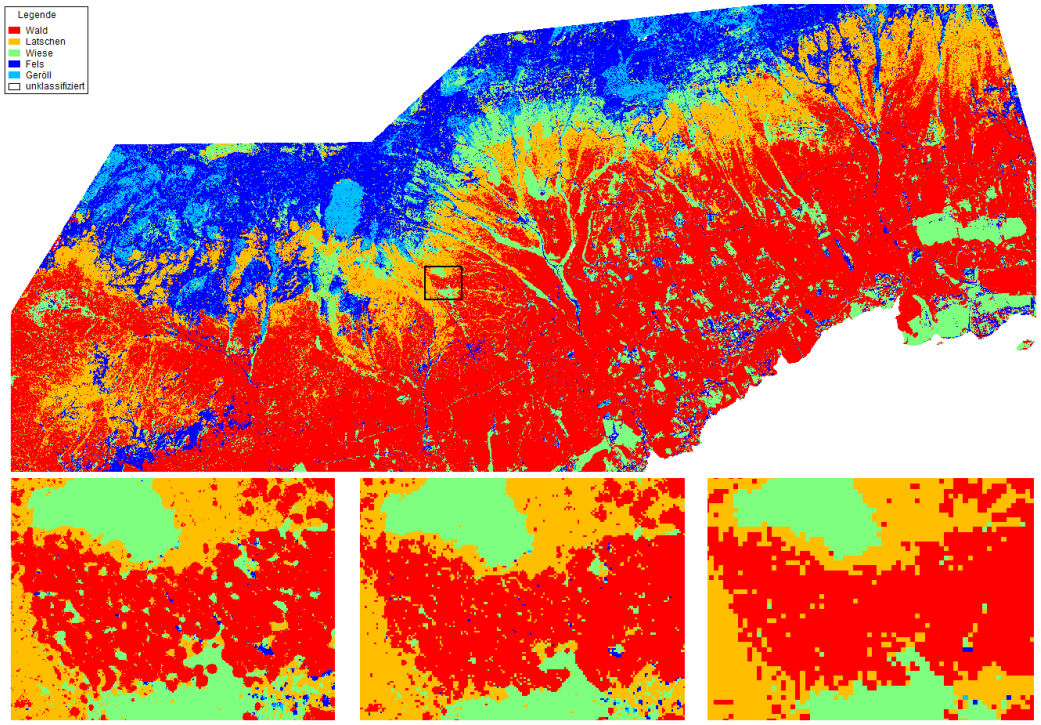

Abbildung 6.7: Oben: Lückenlose Klassifizierungskarte, 1 Meter Rasterweite; Unten Links: Ausschnitt, 1 Meter; Unten Mitte: Ausschnitt, 2 Meter; Unten Rechts: Ausschnitt, 5 Meter

6.2.2 Generalisierung der Bodenbedeckung

Aus den erstellten Klassifizierungskarten (siehe Abbildung 6.7) sollen nun Karten im Maßstab 1:10.000 und 1:25.000 abgeleitet werden. In Kapitel 4.2.2 wurden dafür zwei Varianten der Generalisierung vorgestellt. Insgesamt wurden somit vier unterschiedliche Karten der Bodenbedeckung erstellt.

Generalisierungsvariante 1

Diese Variante zeichnet sich dadurch aus, dass sämtliche Generalisierungsmaßnahmen nach der Erstellung der Klassifizierungkarte angewendet werden (siehe Kapitel 4.2.2.1).

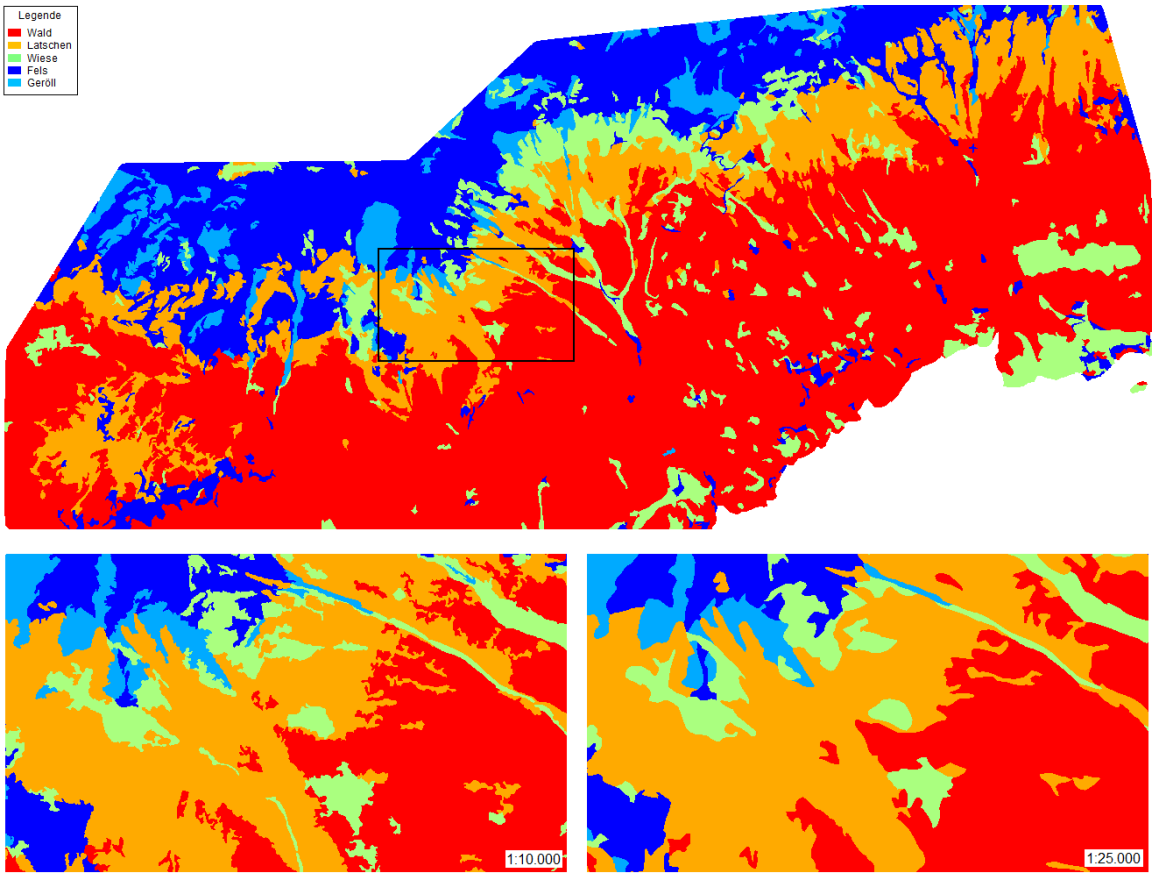

Abbildung 6.8: Generalisierte Bodenbedeckungskarte nach Variante 1. Oben: generalisierte Bodenbedeckungskarte 1:25.000; Unten links: Ausschnitt 1.10.000; Unten rechts: Ausschnitt 1:25.000

Für die Bodenbedeckungskarten der ersten Generalisierungsvariante wurden folgende Parameter verwendet:

- Reklassifikation: 10fache Anwendung einer 3er Nachbarschaft (häufigster Wert)
- Linienvereinfachung mit der Methode nach Lang [Melbourne, 2009]:
  Karte 1:10.000: threshold=2.5 lookahead=8, Karte 1:25.000: threshold=7.5 lookahead=8

- Linienglättung mit dem Snake-Algorithmus [Kass et al., 1987]:
  Karte 1:10.000: alpha=0.1 beta=0.1, Karte 1:25.000: alpha=0.2 beta=0.2
- Selektion/Eliminierung:
  Karte 1:10.000: F > 1000 m^2, Karte 1:25.000: F > 2000 m^2

Abbildung 6.8 zeigt das Ergebnis der ersten Generalisierungsvariante für das gesamte Untersuchungsgebiet. Im unteren Abschnitt der Abbildung sind vergrößerte Ausschnitte der Karten im Maßstab 1:10.000 und 1:25.000 dargestellt. Eine Interpretation und Beurteilung der Daten erfolgt in Kapitel 7.2.1.

Generalisierungsvariante 2

Bei der zweiten Generalisierungvariante werden Generalisierungsmaßnahmen sowohl vor, als auch nach der Erstellung der Klassifizierungskarte ausgeführt (siehe Kapitel 4.2.2.1).

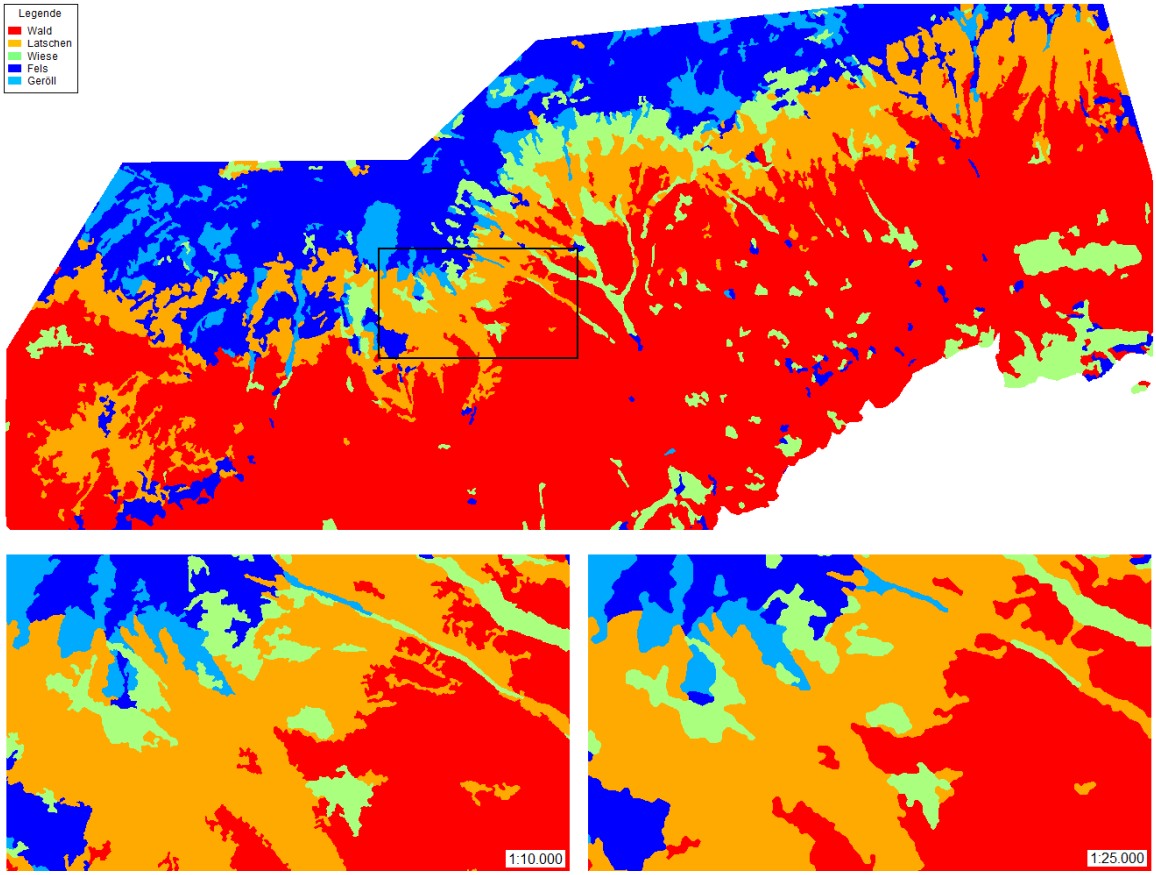

Abbildung 6.9: Generalisierte Bodenbedeckungskarte nach Variante 2. Oben: generalisierte Bodenbedeckungskarte 1:25.000; Unten links: Ausschnitt 1.10.000; Unten rechts: 1:25.000

Für die Bodenbedeckungskarten der zweiten Generalisierungsvariante wurden folgende Parameter verwendet:

- Resampling der abgeleiteten Attribute (Formel 4.6 auf Seite 35):
  Karte 1:10.000: 1 m → 2 m, Karte 1:25.000: 1 m → 5 m
- Reklassifikation: 10fache Anwendung einer 3er Nachbarschaft (häufigster Wert)
- Linienglättung mit dem Snake-Algorithmus [Kass et al., 1987]:
  Karte 1:10.000: alpha=0.1 beta=0.1, Karte 1:25.000: alpha=0.2 beta=0.2
- Selektion/Eliminierung:
  Karte 1:10.000: $F > 1000\ m^2$, Karte 1:25.000: $F > 2000\ m^2$

Abbildung 6.9 zeigt das Ergebnis der zweiten Generalisierungsvariante. Im unteren Abschnitt der Abbildung sind vergrößerte Ausschnitte der Karten im Maßstab 1:10.000 und 1:25.000 dargestellt. Eine Interpretation und Beurteilung der Daten erfolgt in Kapitel 7.2.1.

6.3 Geländedarstellung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Geländedarstellung für das Untersuchungsgebiet vorgestellt. Wie in Kapitel 4.3 bereits beschrieben wurde, besteht die Geländedarstellung aus folgenden Elementen: *Höhenlinien, Schummerung* und *Felszeichnung*.

6.3.1 Höhenlinien und Schummerung

Die Berechnung der Höhenlinien und der Schummerung erfolgte auf Grundlage des resampelten digitalen Geländemodelles (DGM) mit einer Rasterweite von 2 Metern (1:10.000) und 5 Metern (1:25.000) (siehe Kapitel 4.3.1). Als Äquidistanz der Höhenlinien wurden 10 Meter (1:10.000) und 20 Meter (1:25.000) verwendet. Für die Berechnung der Schummerung wurde eine imaginäre Lichtquelle an der Position 315°/45° angenommen.

Abbildung 6.10 (Oben) zeigt die Schummerung und die Höhenlinien des Untersuchungsgebietes. Im unteren Teil der Abbildung sind Ausschnitte (gelbes Rechteck) der Ergebnisse 1:10.000 und 1:25.000 dargestellt. Wie bereits in Kapitel 4.3.1 beschrieben wurde, werden die Höhenlinien für eine bessere Visualisierung der Vegetationsklassen unterschiedlich eingefärbt: Braune Linien kennzeichnen Bereiche mit Bewuchs, während schwarze Höhenlinien bei den Klassen Fels und Geröll verwendet werden.

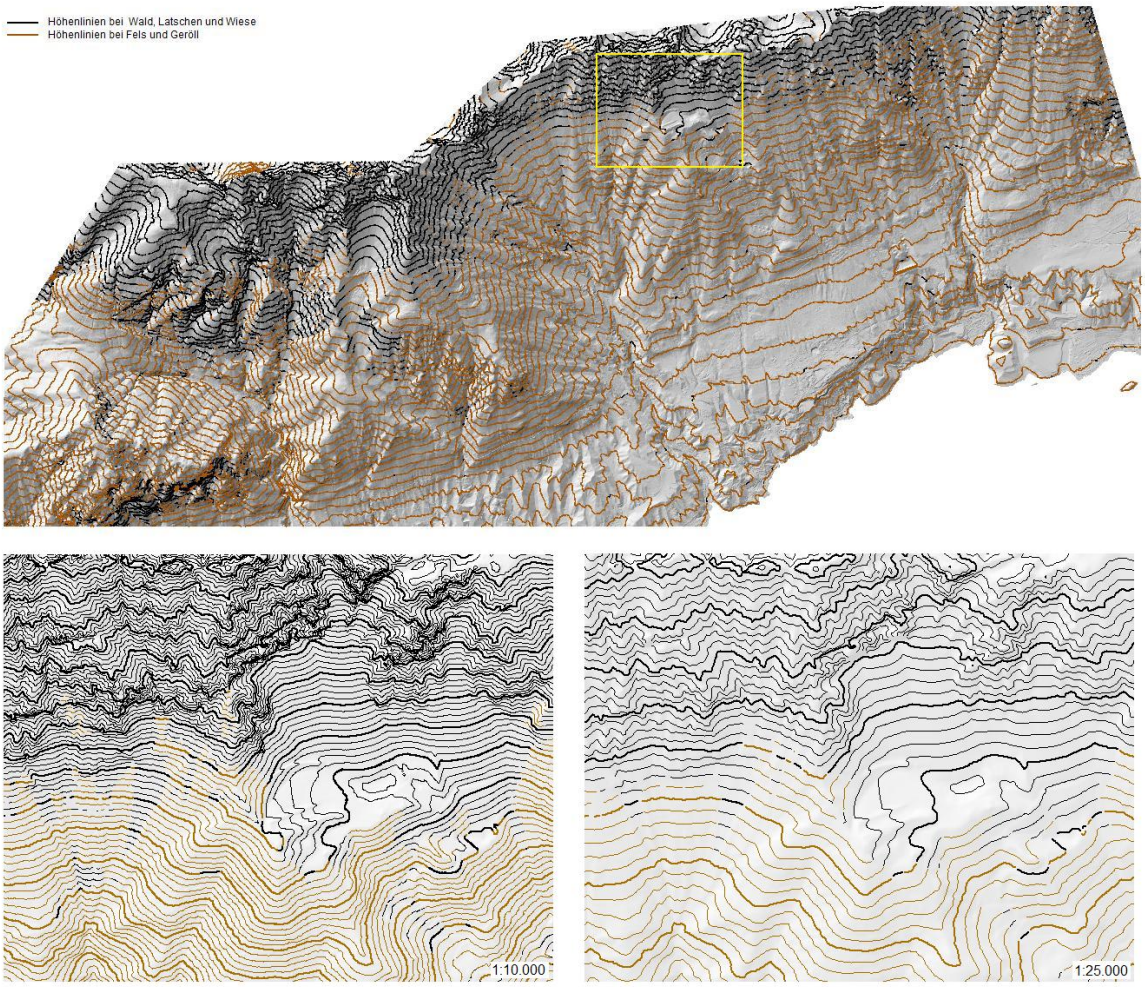

Abbildung 6.10: Oben: Schummerung und Höhenlinien des Untersuchungsgebietes; Unten links: Ausschnitt 1:10.000; Unten rechts: Ausschnitt 1:25.000

6.3.2 Felszeichnung

Es wurden Felszeichnungen für den Maßstab 1:10.000 und 1:25.000 erstellt. Die Felszeichnung besteht aus folgenden Elementen: *Höhenlinien, Geländekanten, Strukturzeichnung* und *Schummerung* (siehe Kapitel 4.3.3). Grundlage für die Ableitung bildete für die Karte 1:10.000 das digitale Geländemodell mit 1 Meter Rasterweite, und für die Karte 1:25.000 ein resampeltes Modell mit 2 Meter Rasterweite.

Die folgende Abbildung zeigt Ausschnitte der Felszeichnung des Untersuchungsgebietes. In Abbildung 6.11 ist die Felszeichnung im Maßstab 1:10.000 dargestellt. Die Felsdarstellung im Maßstab 1:25.000 hingegen ist in Abbildung 6.12 visualisiert. Eine Interpretation und Bewertung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 7.3.

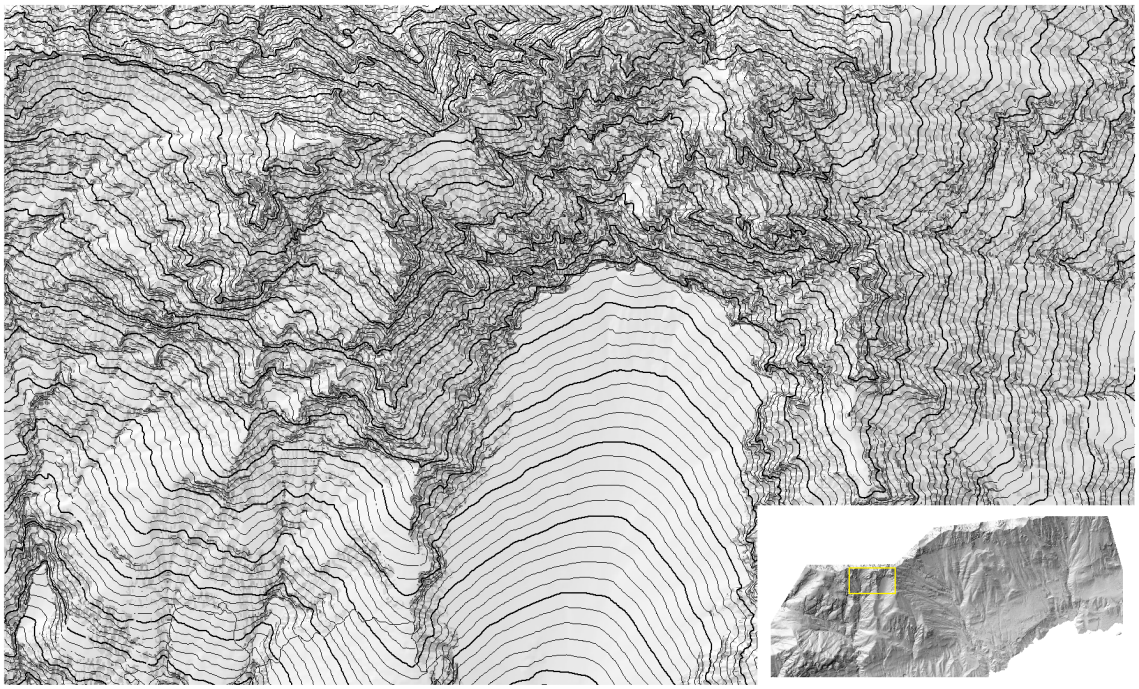

Abbildung 6.11: Ausschnitt der Felszeichnung 1:10.000 des Untersuchungsgebietes

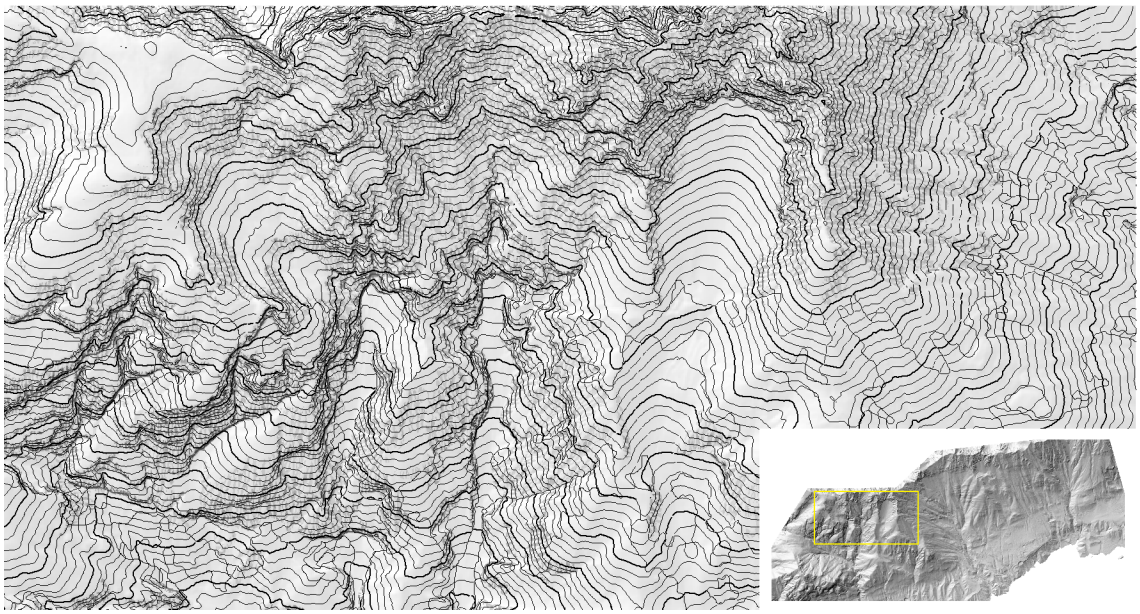

Abbildung 6.12: Ausschnitt der Felszeichnung 1:25.000 des Untersuchungsgebietes

6.4 Topographische Bodenbedeckungskarte

Für die Erstellung der topographischen Bodenbedeckungskarte werden nun die Ergebnisse der Bodenbedeckung (siehe Kapitel 6.2) und Geländedarstellung (siehe Kapitel 6.3) zusammengefügt. Ein Ausschnitt des Resultates für die Karte 1:25.000 nach Generalisierungsvariante 1 ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Die Farben der Bodenbedeckung wurden dabei an der Alpenvereinskarte orientiert (siehe Kapitel 5.4). Die gesamten Ergebnisse der Karten 1:10.000 und 1:25.000 sind der Diplomarbeit als pdf-File beigelegt.

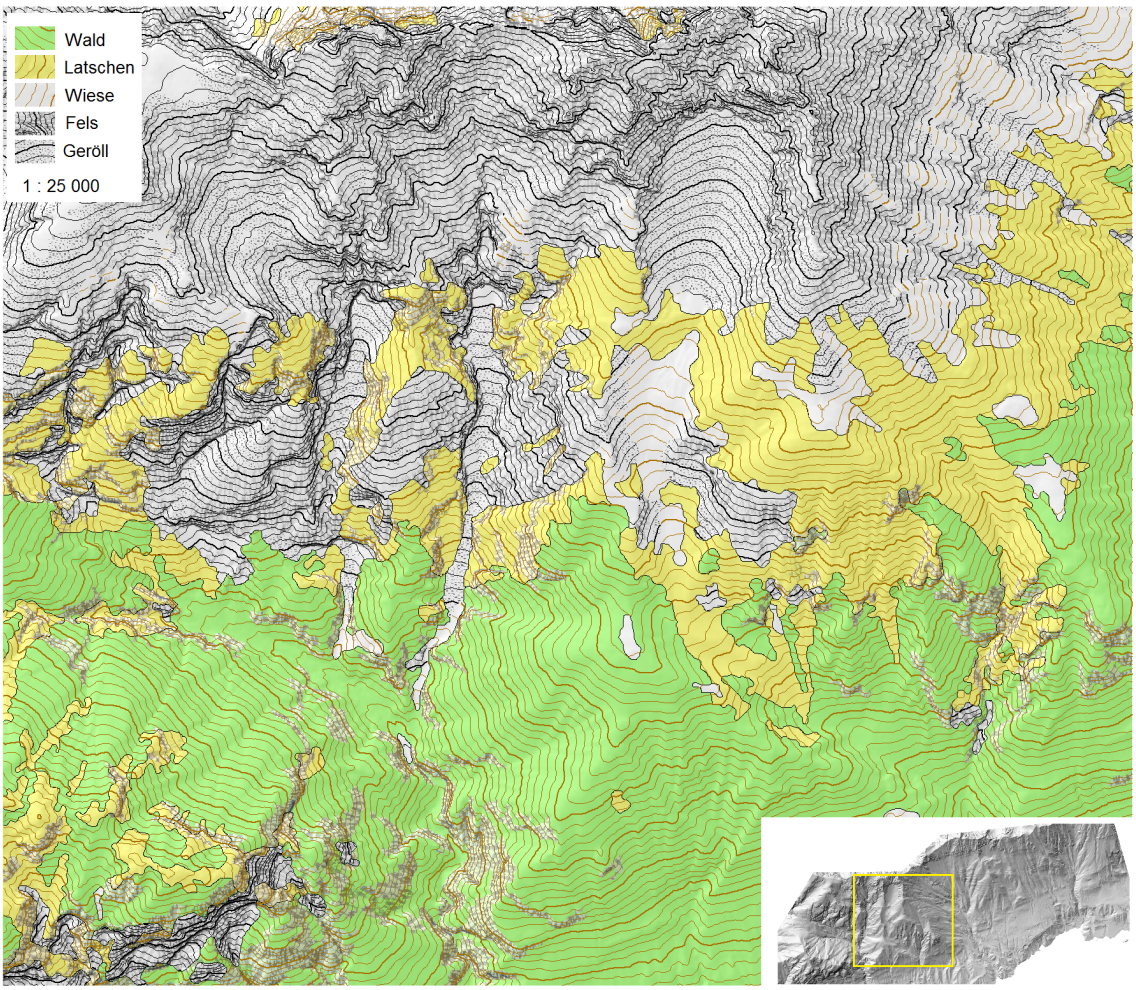

Abbildung 6.13: Ausschnitt der topographischen Bodenbedeckungskarte des Untersuchungsgebietes im Maßstab 1:25.000 nach Generalisierungsvariante 1

7 Diskussion

Dieses Kapitel beinhaltet eine Diskussion der Ergebnisse der erstellten topographischen Bodenbedeckungskarten. Im Zuge dieser Arbeit wurden Karten im Maßstab 1:10.000 und 1:25.000 aus ALS-Daten und Orthophotos abgeleitet (siehe Kapitel 6). Die Karten setzten sich aus folgenden Elementen zusammen: *Bodenbedeckung, Höhenlinien, Schummerung* und *Felszeichnung*.

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der Bodenbedeckung und Felszeichnung genauer betrachtet. Die Resultate der Höhenlinien und Schummerung hingegen werden nicht näher analysiert. Genauere Untersuchungen dazu sind in [Hurni, 1995] zu finden.

Um den Umfang der Analyse einzuschränken, wird ein Gebiet innerhalb des Untersuchungsgebietes eingegrenzt. Der Bereich ist 4000 x 2400 Meter groß, enthält alle Klassen, und ist durch Referenzkarten vollständig abgedeckt. In Abbildung 7.1 ist das Orthophoto des Analysegebietes (gelbes Rechteck) dargestellt.

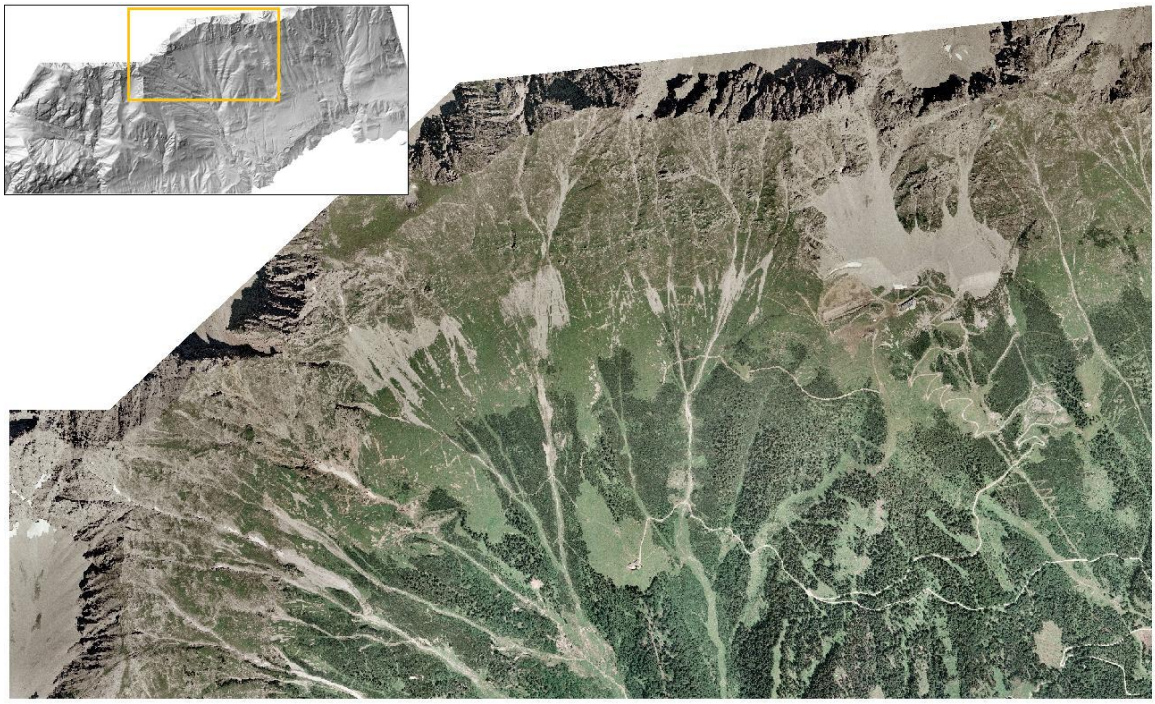

Abbildung 7.1: Orthophoto des Analysegebietes (4000x2400 Meter). Oben Links: Übersicht des Untersuchungsgebietes

7.1 Klassifizierung der Bodenbedeckung

Die Ergebnisse der Klassifizierung des Untersuchungsgebietes in Kapitel 6.2.1 haben gezeigt, dass nicht alle Rasterzellen einer Klasse zugeordnet werden konnten. In Abbildung 7.2 (Links) ist das Ergebnis der Klassifizierung für das Analysegebiet dargestellt. Sie zeigt z.T größere unklassifizierte Bereiche, vor allem im Bereich der Klassen Fels und Geröll.

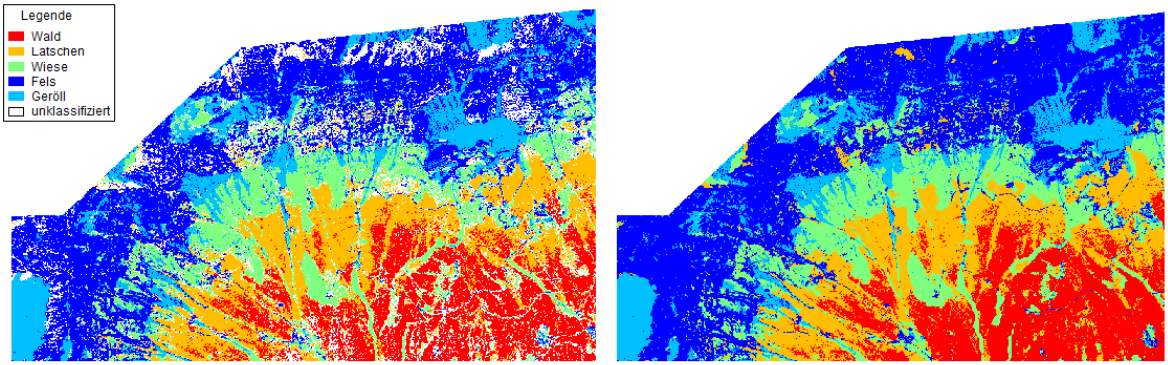

Abbildung 7.2: Links: Klassifizierungskarte des Analysegebietes, Rasterweite 5 Meter; Rechts: aufgefüllte Karte, Rasterweite 5 Meter

Der Anteil an unklassifizierten Rasterzellen in den Karten mit verschiedener Rasterweiten ist in Tabelle 7.1 festgehalten. Die Tabelle zeigt, dass der Anteil unklassifizierter Pixel von 32 % bei einer Auflösung von einem Meter doch recht hoch ist. Durch die Vergrößerung der Rasterweite bei der Klassifizierung können die unklassifizierten Zellen stark reduziert werden kann.

	1 m	**2 m**	**5 m**
klassifizierte Pixel:	27 965 863 (68 %)	7 845 071 (74 %)	1 349 046 (82 %)
unklassifizierte Pixel:	12 971 420 (32 %)	2 398 290 (23 %)	290 111 (18 %)
Summe:	40 937 283 (100 %)	10 243 361 (100 %)	1 639 157 (100 %)

Tabelle 7.1: Anteil an unklassifizierten Pixeln des gesamten Untersuchungsgebietes

Die punktuelle Überprüfung unklassifizierter Bereiche hat zwei Ursachen für eine gescheiterte Klassifikation ergeben (die gewählte Rasterweite hat keinen Einfluss):

- Widerspruch zwischen dem nDOM und den Parametern Echoratio/Ebenenabweichung
- Schattenbereiche im Orthophoto

Widersprüche zwischen den Informationen aus dem normierten Oberflächenmodell (nDOM) und den Parametern Echoratio und Ebenenabweichung sind vor allem im Grenzbereich zwischen den ebenen Klassen (Wiese, Geröll, Fels) und den Klassen Latschen/Wald zu finden. Während das nDOM in diesen Bereichen ein ebenes Gelände signalisiert, ist laut Echoratio und Ebenenabweichung ein unebenes Gelände vorhanden. Der Grund liegt in der Definition der beiden Rauheitsparameter, welche aus den umliegenden Punkten innerhalb eines bestimmten Einflussbereichs

berechnet werden (siehe Kapitel 4.1). Dieses Problem ist deutlich in Abbildung 7.3 zu erkennen. Der rasche Wechsel zwischen den Klassen Latschen und Wiese führt dazu, dass vor allem im rechten Teil des Ausschnittes eine Klassifizierung der Wiese scheiterte.

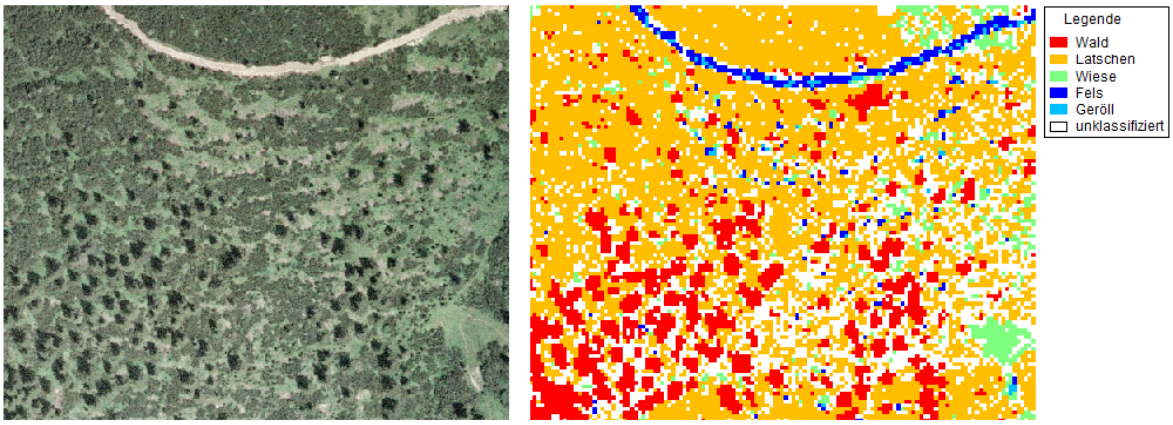

Abbildung 7.3: Links: Orthophoto eines Ausschnittes des Analysegebietes; Rechts: Gescheiterte Klassifizierung aufgrund von Widersprüchen zwischen dem nDOM und Echoratio/Ebenenabweichung, Rasterweite 1 Meter

Während die Widersprüche zwischen dem nDOM und den Rauheitsparametern nur kleine lokale Probleme verursachen, führen die Schatten der Orthophotos teilweise zu einem großflächigen Scheitern der Klassifizierung. In Abbildung 7.4 sind die Folgen der Schatten am Beispiel einer Felswand dargestellt. Das mittlere Bild zeigt das Resultat der Klassifikation. Man erkennt deutlich, dass im Schatten der Felswände keine Klassenzuordnung stattfinden konnte, bzw. die zugewiesenen Klassen falsch sind. Der Grund dafür sind die hohen positiven Werte für den Vegetationsindex VARI in den Schattenbereichen. Wird im Schatten der obere Grenzwert der Klassen unterschritten (siehe Tabelle 6.2), kann das entsprechende Pixel fälschlicherweise als Vegetationsklasse Wiese oder Latschen erkannt werden. Die Folge ist, dass beim anschließenden auffüllen der klassenlosen Pixeln im Schatten Wiese und Latschen anstelle von Fels erkannt werden (rechtes Bild). Eine mögliche Lösung für dieses Problem wäre das Löschen der klassifizierten Pixel in den Schättenflächen. Die Schattenflächen des Orthophotos könnten durch eine Schattensimulation mit dem digitalen Oberflächenmodell und dem Sonnenstand zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahme bestimmt werden.

In Abbildung 7.1 hingegen sind die Auswirkungen des Schattens bei einem Wald dargestellt. Die Schatten am Waldrand führen zu einem Scheitern der Klassifikation (Mitte). Beim anschließenden auffüllen der klassenlosen Bereiche (rechtes Bild) werden diese Pixel oftmals fälschlicherweise als Waldflächen erkannt. Im schlimmsten Fall führt dies dazu, dass die Waldgrenze um einige Meter verlegt wird, oder dass Einschnitte in den Wald, wie z.B. Straßen oder kleine Lichtungen, als Wald klassifiziert werden.

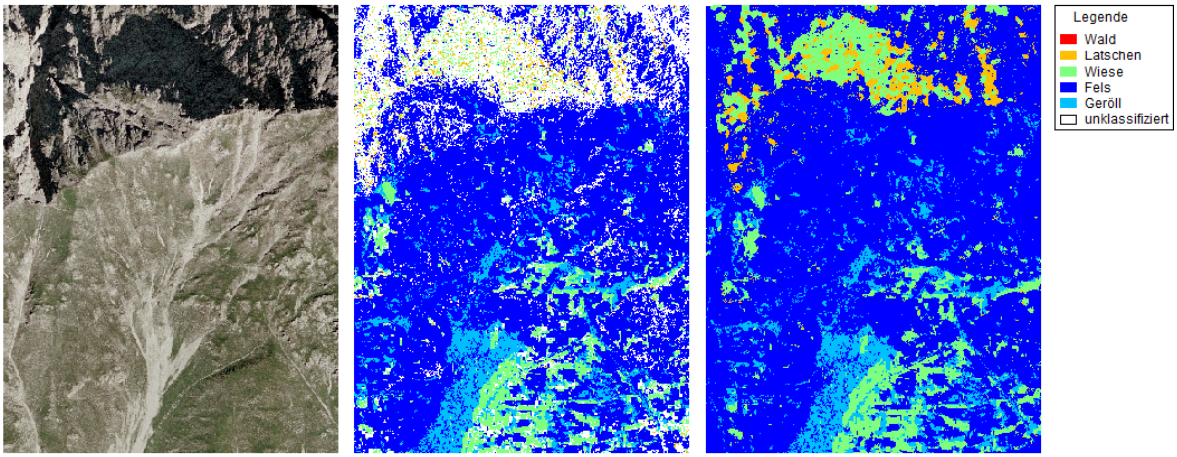

Abbildung 7.4: Falsche Klassifizierung im Schatten einer Felswand (Rasterauflösung 1 Meter). Links: Orthophoto; Mitte: Klassifizierungskarte; Rechts: aufgefüllte Klassifizierungkarte

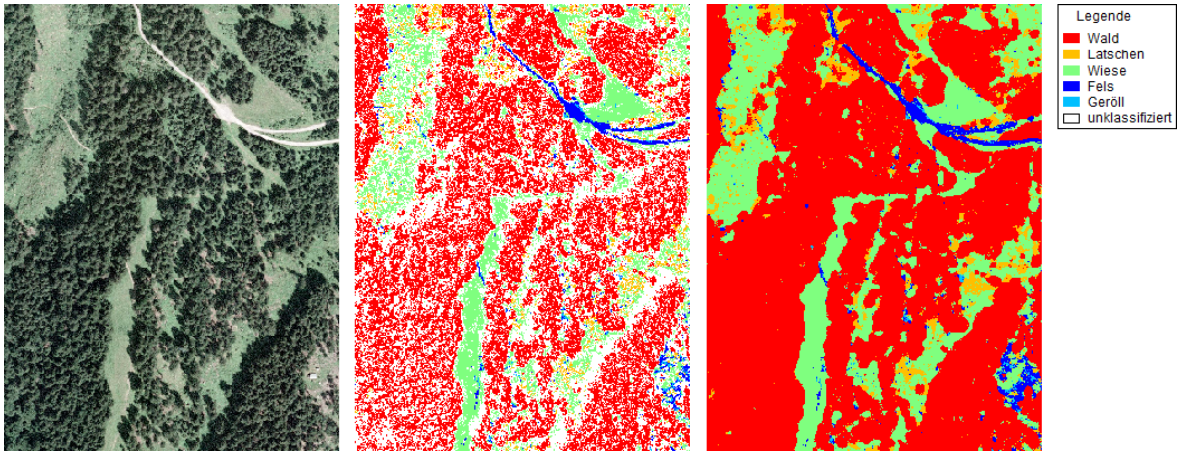

Abbildung 7.5: Klassifizierung im Schatten bei Wäldern (Rasterauflösung 1 Meter). Links: Orthophoto; Mitte: Klassifizierungskarte; Rechts: aufgefüllte Klassifizierungkarte

7.2 Generalisierung der Bodenbedeckung

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der Generalisierung untersucht. Die Analyse erfolgt in zwei Schritten:

1. Vergleich der Generalisierungsvarianten (Kapitel 7.2.1):
   Der Vergleich wird ausschließlich für die Karten 1:25.000 durchgeführt, weil diese im Gegensatz zu den Karten 1:10.000 einen höheren Grad der Generalisierung aufweisen.

2. Vergleich mit Referenzkarten (Kapitel 7.2.2):
   Die generalisierten Karten werden mit den Referenzkarten verglichen, um Aussagen über die Qualität des Ergebnisses zu erhalten. Für diesen Vergleich werden auch nur die Karten 1:25.000 verwendet, weil Referenzkarten mit größerem Maßstab nicht verfügbar sind.

7.2.1 Vergleich der Generalisierungsvarianten

Für den Vergleich der beiden Varianten werden die Karten im Maßstab 1:25.000 überlagert. Für diesen visuellen Vergleich wird das gesamte Untersuchungsgebiet verwendet, um Trends in den beiden Grenzverläufen besser erkennen zu können. In Abbildung 7.6 und 7.7 sind die beiden Varianten nach Klassen getrennt dargestellt. Die erste Variante ist als blaue Fläche, die zweite als Rote Linie visualisiert.

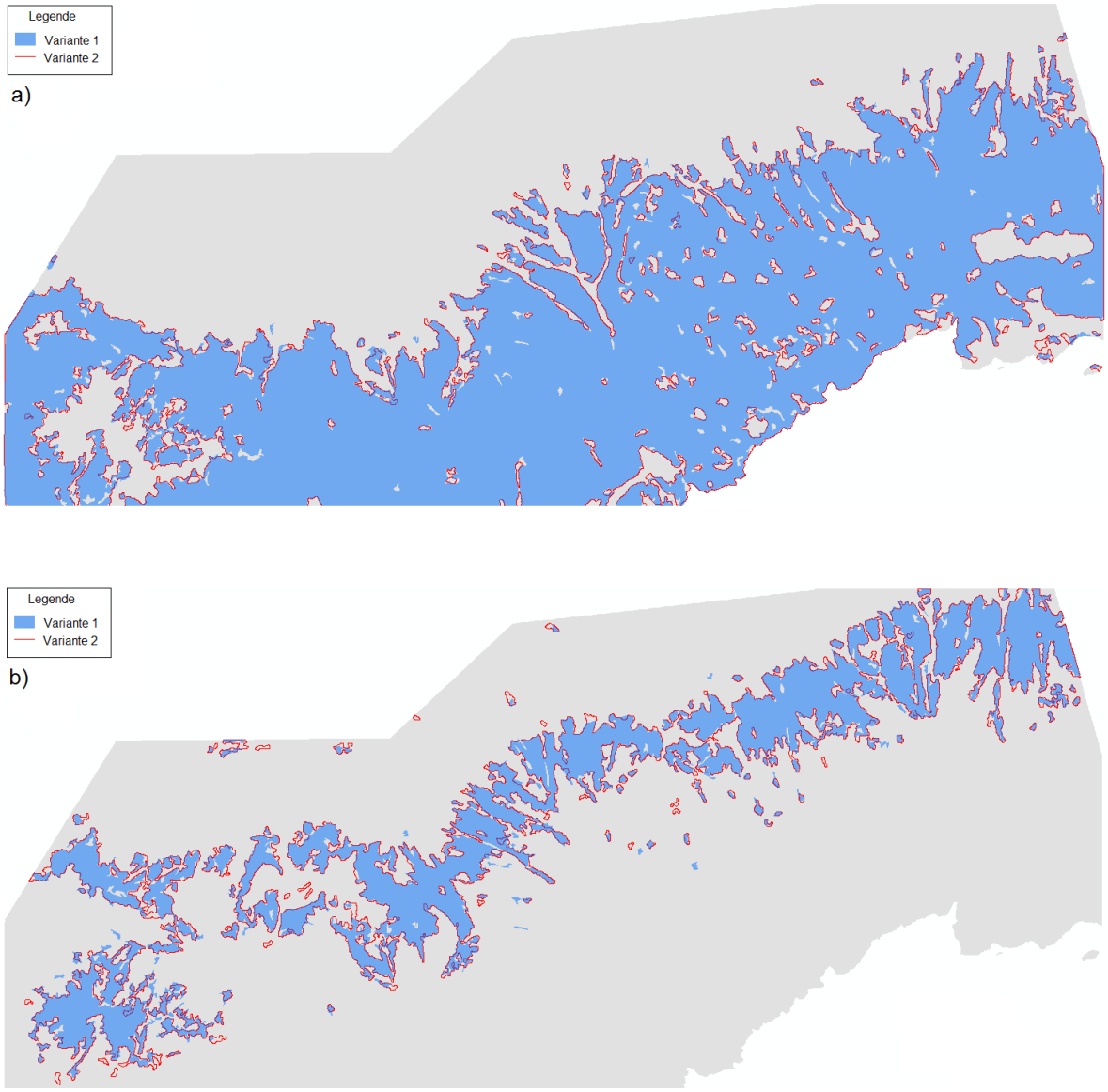

Abbildung 7.6: Überlagerung der Generalisierungsvarianten im Maßstab 1:25.000. a) Wald; b) Latschen

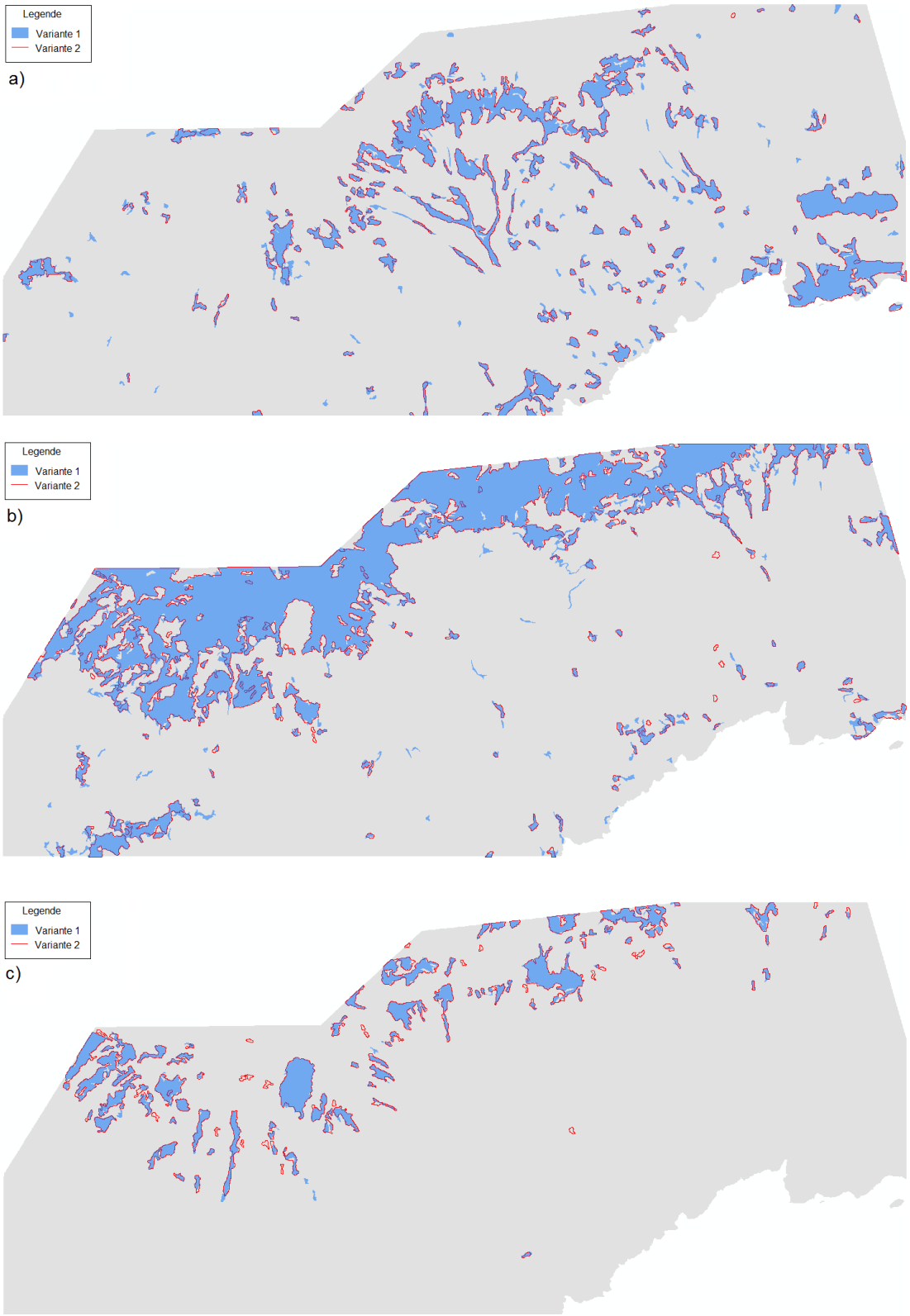

Abbildung 7.7: Überlagerung der Generalisierungsvarianten im Maßstab 1:25.000ö. a) Wiese; b) Fels; c) Geröll

Die Abbildungen 7.6 und 7.7 zeigen, dass der Grenzverlauf der beiden Generalisierungsvarianten sehr ähnlich ist. Die Unterschiede beschränken sich meist auf kleine lokale Unstimmigkeiten. Folgende Beobachtungen wurden gemacht:

- Bei Wald- und Latschenflächen werden längliche schmale Einschnitte (z.B. Lichtungen, Feuerschneißen) durch die Variante 1 wesentlich besser erkannt.
- Die 2. Variante enthält mehrere kleine Geröllflächen, welche durch die 1. Variante nicht erkannt wurden. Dies ist nicht erwünscht, weil Geröllflächen mithilfe der Daten nicht eindeutig abgegrenzt werden können. Kleine Geröllflächen sollten vermieden werden.

Die Generalisierungsvariante 1 schneidet somit bei dem visuellen Vergleich der beiden Karten etwas besser ab. Große Unterschiede zwischen den Varianten konnten jedoch nicht gefunden werden.

Für die Bestimmung eines nummerischen Wertes für die Übereinstimmung der beiden Varianten werden Flächenbilanzen erstellt (Tabelle 7.2 und 7.3). Sie enthalten eine Auflistung der Flächenanzahl, der Flächensumme und Umfangsumme je Klasse. Die angeführten Prozentangaben beziehen sich auf den entsprechenden Anteil der jeweiligen Gesamtsumme. Die Bilanz wurde, im Gegensatz zum visuellen Vergleich der Varianten, nur für das Analysegebiet erstellt, damit die Ergebnisse anschließend auch mit dem Referenzmaterial verglichen werden können (siehe Kapitel 7.2.2).

Klasse	**Flächenanzahl**	**Fläche [m^2]**	**Umfang [m]**
Wald	18	1351112 (17,4%)	27063 (13,9%)
Latschen	36	1348663 (17,3%)	37941 (19,5%)
Wiese	53	1327196 (17,1%)	52747 (27,2%)
Fels	18	2940582 (37,8%)	45935 (23,7%)
Geröll	42	812811 (10,4%)	30422 (15,7%)
Summe	167	7780364 (100,0%)	194108 (100,0%)

Tabelle 7.2: Flächenbilanz der Bodenbedeckungskarten 1:25.000, Generalisierungvariante 1

Klasse	**Flächenanzahl**	**Fläche [m^2]**	**Umfang [m]**
Wald	14	1390937 (17,9%)	24611 (14,2%)
Latschen	24	1415444 (18,2%)	35818 (20,7%)
Wiese	42	1255885 (16,1%)	43212 (24,9%)
Fels	17	2858050 (36,7%)	38457 (22,2%)
Geröll	42	860048 (11,1%)	31322 (18,1%)
Summe	139	7780364 (100,0%)	173420 (100,0%)

Tabelle 7.3: Flächenbilanz der Bodenbedeckungskarten 1:25.000, Generalisierungvariante 2

Klasse	Anzahl	Fläche [m^2]	Umfang [m]
Wald	-4	39825 (0,5 %)	-2452 (1,4 %)
Latschen	-12	66781 (0,9 %)	-2123 (1,2 %)
Wiese	-11	-71311 (0,9 %)	-9535 (5,5 %)
Fels	-1	-82532 (1,1 %)	-7478 (4,3 %)
Geröll	0	47237 (0,6 %)	900 (0,5 %)

Tabelle 7.4: Differenz der Flächenbilanzen 1:25.000: Variante 2 - Variante 1

Als nächstes werden Differenzen aus den beiden Flächenbilanzen gebildet. Das Ergebnis ist in Tabelle 7.4 aufgelistet. Die Tabelle zeigt, dass die beiden Generalisierungsvarianten eine sehr hohe flächenmäßige Übereinstimmung von 96% erreichen. Weiters ist ersichtlich, dass bei der zweiten Variante der Anteil an Wald-, Latschen- und Geröllflächen etwas höher ist. Diese Zahlen bestätigt somit die vorherigen Beobachtungen des visuellen Vergleiches der beiden Karten. Die Differenz aus dem Umfang zeigt, dass die erste Variante etwas „bewegter“ ist. Die Differenz kann jedoch auch auf die erhöhte Flächenanzahl der ersten Varianten zurückzuführen sein.
Ein Nachteil des hier verwendeten nummerischen Vergleiches auf Grundlage von Flächensummen ist, dass vorhandene Unterschiede zwischen den Varianten durch die Differenzbildung herausgemittelt werden können. Eine bessere Alternativ wäre ein Vergleich der beiden Varianten anhand der Verschneidungsflächen.

Zusammenfassend geht die erste Generalisierungsvariante als knapper Sieger hervor. Die Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Karten sind jedoch sehr gering, weshalb beide Methoden für den praktischen Einsatz geeignet sind.

7.2.2 Vergleich mit Referenzkarten

Es folgt ein Vergleich der generalisierten Ergebnisse mit den Referenzkarten im Maßstab 1:25.000. Dafür wird die erste Generalisierungsvariante ausgewählt, weil sie beim Vergleich der Varianten in Kapitel 7.2.1 etwas besser abgeschnitten hat. Folgende Referenzkarten stehen zur Verfügung (siehe Kapitel 5): *Orthophoto, Alpenvereinskarte, ÖK25V*.

Die Alpenvereinskarte und die ÖK25V wurden eingescannt, georeferenziert und anschließend digitalisiert. Mithilfe des Orthophotos wurde zusätzlich eine Karte digitalisiert, welche in etwa dem Maßstab 1:25.000 entspricht.

Keine dieser drei Referenzkarten ist für den Vergleich optimal. Die Bodenbedeckung der Alpenvereinskarte und der ÖK25V wurde wahrscheinlich vor vielen Jahren erhoben und ist somit nicht mehr auf den aktuellsten Stand (siehe Kapitel 5.4). Die Karte aus dem Orthophoto hingegen wurde am Computer manuell digitalisiert und ist somit ein subjektives Ergebnis.

Orthophoto

Als erstes wird die automatisierte Karte der Bodenbedeckung mit der digitalisierten Karte des Orthophotos verglichen. Die Ergebnisse der beiden Karten sind in Abbildung 7.8 dargestellt.

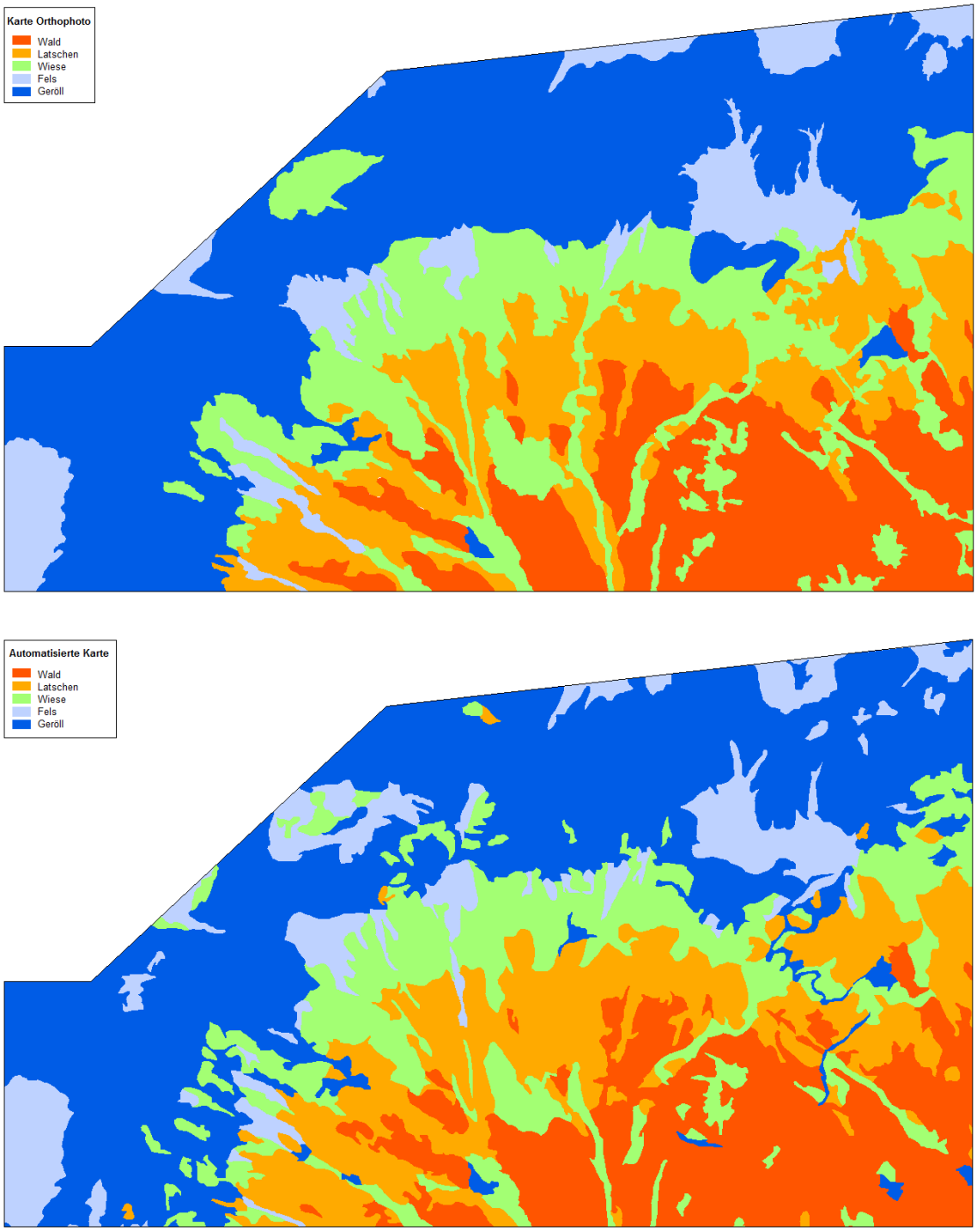

Abbildung 7.8: Oben: digitalisierte Karte aus dem Orthophoto; Unten: automatisierte Karte

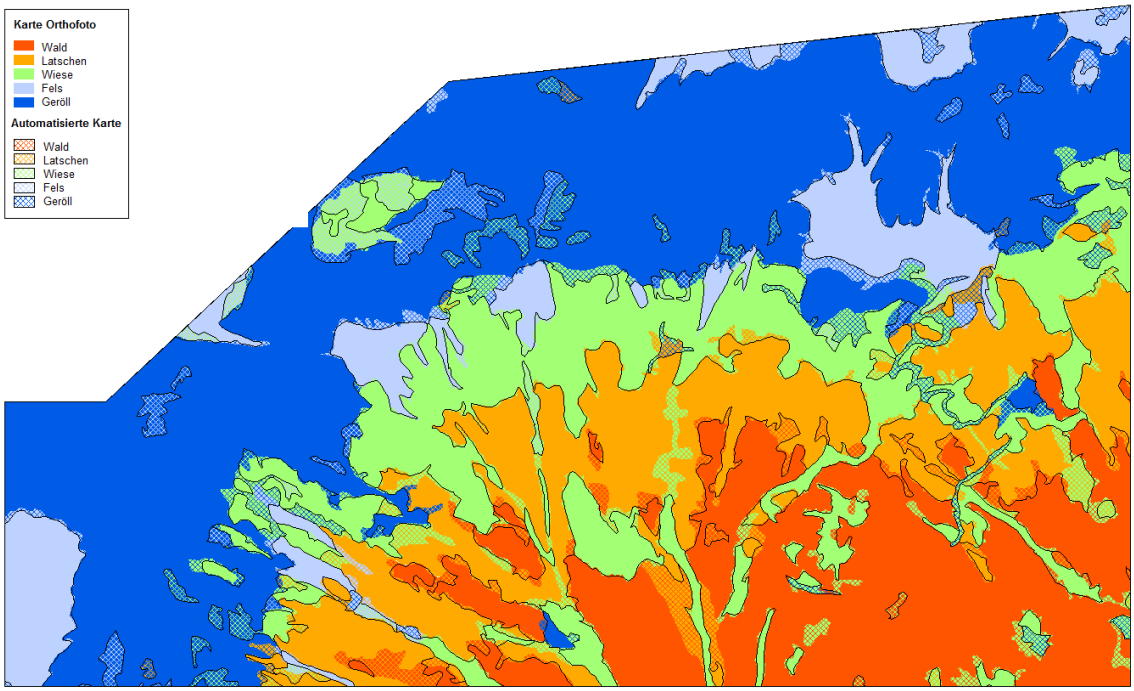

Abbildung 7.9: Vergleich der automatisierten Karte mit der digitalisierten Karte des Orthophotos

In Abbildung 7.9 ist die erstellte Karte (Schraffur) mit der digitalisierten Karte aus dem Orthophoto (eingefärbte Flächen) überlagert. Die Abbildung zeigt, dass beide Karten relativ gut übereinstimmen. Die Unterschiede bei Wald- und Latschenflächen betreffen kleine Lichtungen und Einschnitte, welche bei der automatisierten Karte nicht richtig erkannt wurden. Größeren Unterschiede sind bei der Klasse Geröll vorhanden. In mehreren Bereichen der Karte wurden Fels- und Wiesenflächen fälschlicherweise als Geröll erkannt.

Klasse	**Flächenanzahl**	**Fläche [m2]**	**Umfang [m]**
Wald	16	1308118 (16,8%)	26991 (16,2%)
Latschen	23	1231000 (15,8%)	37976 (22,9%)
Wiese	25	1573542 (20,2%)	53361 (32,1%)
Fels	4	2975613 (38,2%)	25435 (15,3%)
Geröll	16	692091 (8,9%)	22385 (13,5%)
Summe	84	7780364 (100,0%)	166148 (100,0%)

Tabelle 7.5: Flächenbilanz der digitalisierten Karte aus dem Orthophoto

Für die Bestimmung eines nummerischen Wertes der Übereinstimmung beider Karten werden Flächenbilanzen erstellt (siehe Tabelle 7.2 und 7.5). Die Differenzen der beiden Bilanzen sind in Tabelle 7.6 dargestellt. Es wurde dabei das gleiche Prinzip wie für den Vergleich der Generalisierungsvarianten in Kapitel 7.2.1 angewendet.

Klasse	Anzahl	Fläche [m^2]	Umfang [m]
Wald	-2	-42994 (0,6 %)	-72 (0,0 %)
Latschen	-13	-117663 (1,5 %)	35 (0,0 %)
Wiese	-28	246346 (3,2 %)	614 (0,3 %)
Fels	-14	35031 (0,5 %)	-20500 (10,6 %)
Geröll	6	-120720 (1,6 %)	-8037 (4,1 %)

Tabelle 7.6: Differenz der Flächenbilanzen: Orthophotokarte - Variante 1

Die Tabellen ergeben eine hohe flächenmäßige Übereinstimmung der beiden Karten von 93 %. Die größten Unterschiede der beiden Karten betreffen die Klassen Wiese, Geröll und Latschen. Weiters fällt auf, dass die automatischen Karte eine wesentlich größere Anzahl an Flächen aufweist.

Alpenvereinskarte

Obwohl die Alpenvereinskarte neben den Klassen Wald, Latschen, Geröll auch Fels und Wiese unterscheidet, konnten diese im Zuge der Digitalisierung nicht genau abgegrenzt werden. Aus diesem Grund enthält die digitalisierte Alpenvereinskarte nur die Klassen Wald, Latschen und Geröll. Das Ergebnis der Digitalisierung ist in Abbildung 7.10 dargestellt. Das entsprechende Ergebnis der automatisierten Karte ist in Abbildung 7.11 zu finden.

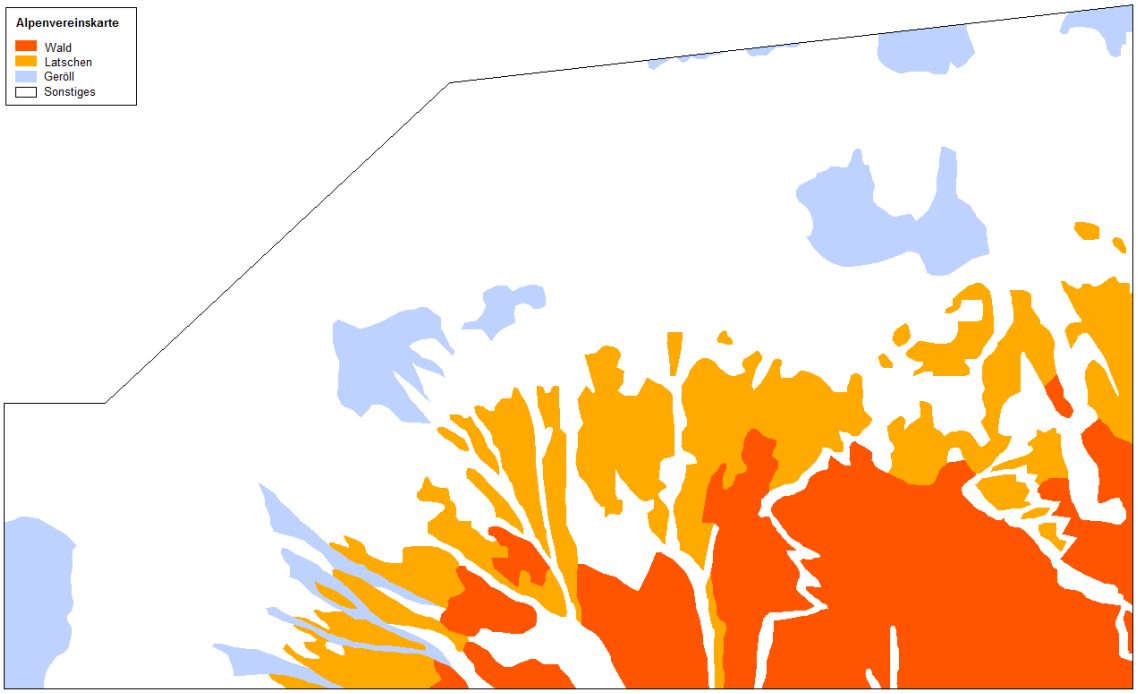

Abbildung 7.10: Digitalisierte Karte der Bodenbedeckung des Alpenvereins

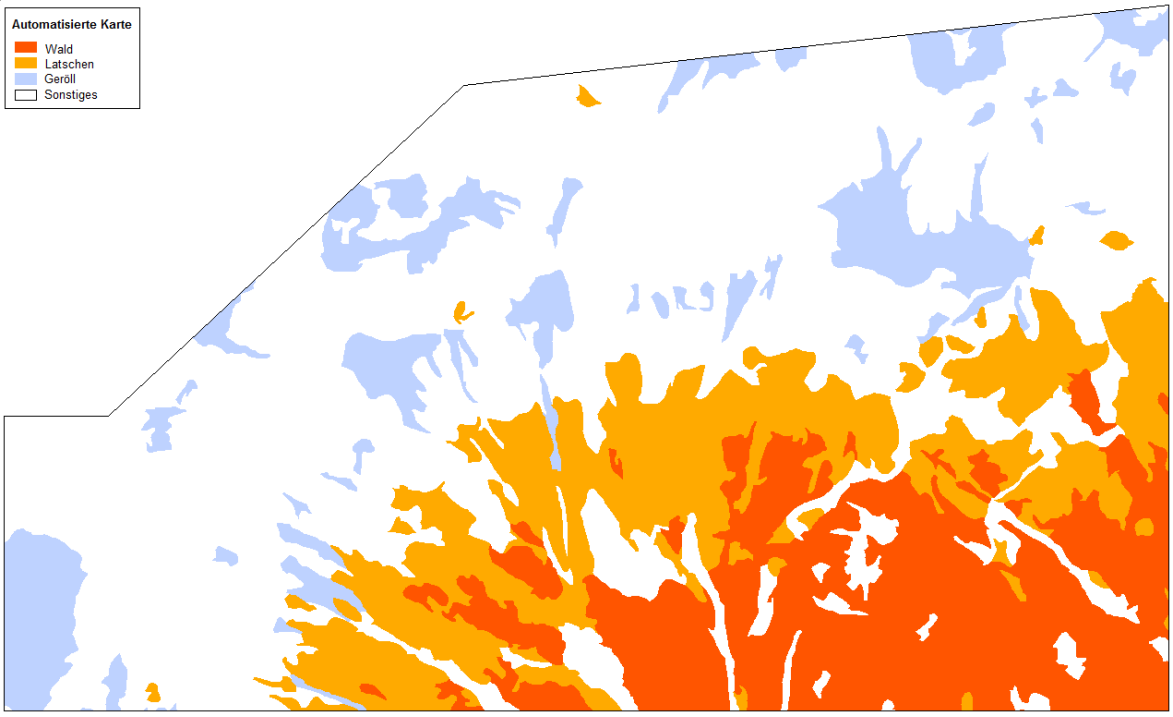

Abbildung 7.11: Automatisierte Karte der Bodenbedeckung

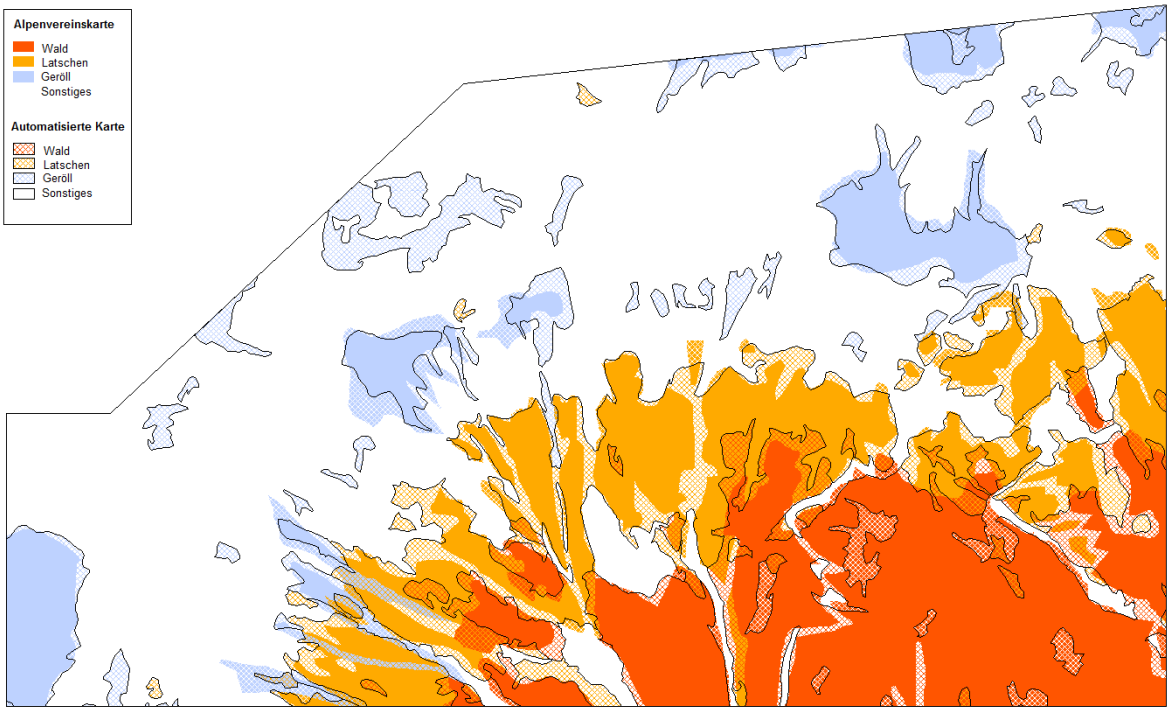

Abbildung 7.12: Vergleich der automatisierten Karte mit der Alpenvereinskarte

In Abbildung 7.12 sind die Alpenvereinskarte und die automatisiertet Karte überlagert. Sie zeigt zum Teil größere Unterschiede zwischen den Karten. Die vorhandenen Differenzen der Vegetationsklassen sind wahrscheinlich großteils auf die verschiedenen Erhebungszeitpunkte der Bodenbedeckung zurückzuführen (Alpenvereinskarte: Unbekannt, ALS-Befliegung: 2005). So ist beispielsweise in der Alpenvereinskarte im mittleren unteren Bereiche eine Einschneidung im Wald dargestellt, welche im Orthophoto nicht erkennbar ist. Es könnte sich dabei um eine ehemalige Skipiste handeln, welche inzwischen zugewachsen ist.
Neben den Differenzen bei der Vegetation gibt es auch größere Unterschiede bei der Klasse Geröll. Die automatisierte Karte enthält sehr viele kleine Geröllflächen, welche in der Alpenvereinskarte nicht enthalten sind. Bei den größeren Geröllflächen hingegen verlaufen die Grenzen in beiden Karten z.T. sehr unterschiedlich.

Klasse	**Flächenanzahl**	**Fläche [m2]**	**Umfang [m]**
Wald	8	1287796 (16,6%)	16142 (14,3%)
Latschen	28	1072823 (13,8%)	30465 (27,1%)
Geröll	10	610121 (7,8%)	15814 (14,1%)
Sonstiges	7	4809624 (61,8%)	50080 (44,5%)
Summe	53	7780364 (100,0%)	112501 (100,0%)

Tabelle 7.7: Flächenbilanz der digitalisierten Alpenvereinskarte

Klasse	**Anzahl**	**Fläche [m^2]**	**Umfang [m]**
Wald	-10	-63316 (0,8 %)	-27960 (14,4 %)
Latschen	-8	-275840 (3,5 %)	-7476 (3,9 %)
Geröll	-32	-202690 (2,6 %)	-14608 (7,5 %)
Sonstiges	-64	541846 (7,0 %)	-48602 (25,0 %)

Tabelle 7.8: Differenz der Flächenbilanzen: Alpenvereinskarte - Variante 1

Die Flächenbilanz der Alpenvereinskarte ist in Tabelle 7.7 aufgelistet. Die Differenz der Flächenbilanzen beider Karten hingegen ist in Tabelle 7.8 dargestellt. Sie zeigt eine flächenmäßige Übereinstimmung der Karten von 86%. Auffällig ist der große Unterschied in der Anzahl der Flächen. Dies deutet auf einen höheren Grad der Generalisierung der Alpenvereinskarte hin.

Österreichische Karte ÖK25V

Die Österreichische Karte ÖK25V unterscheidet zwischen den Klassen Wald, Latschen, Fels, Geröll. Bei der Digitalisierung der Karte konnten jedoch nur die Klassen Wald und Latschen abgegrenzt werden, sodass der Vergleich auf diese beiden Klassen eingegrenzt werden musste (siehe Abbildung 7.13).

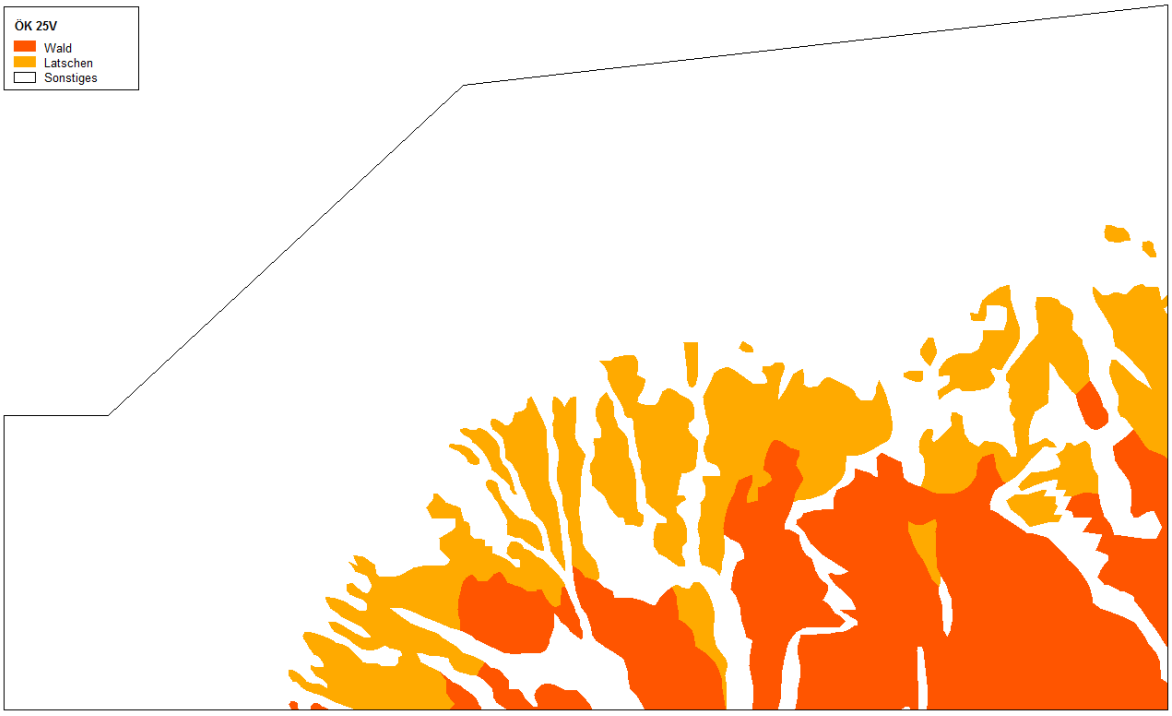

Abbildung 7.13: Digitalisierte Karte der Bodenbedeckung der ÖK25V

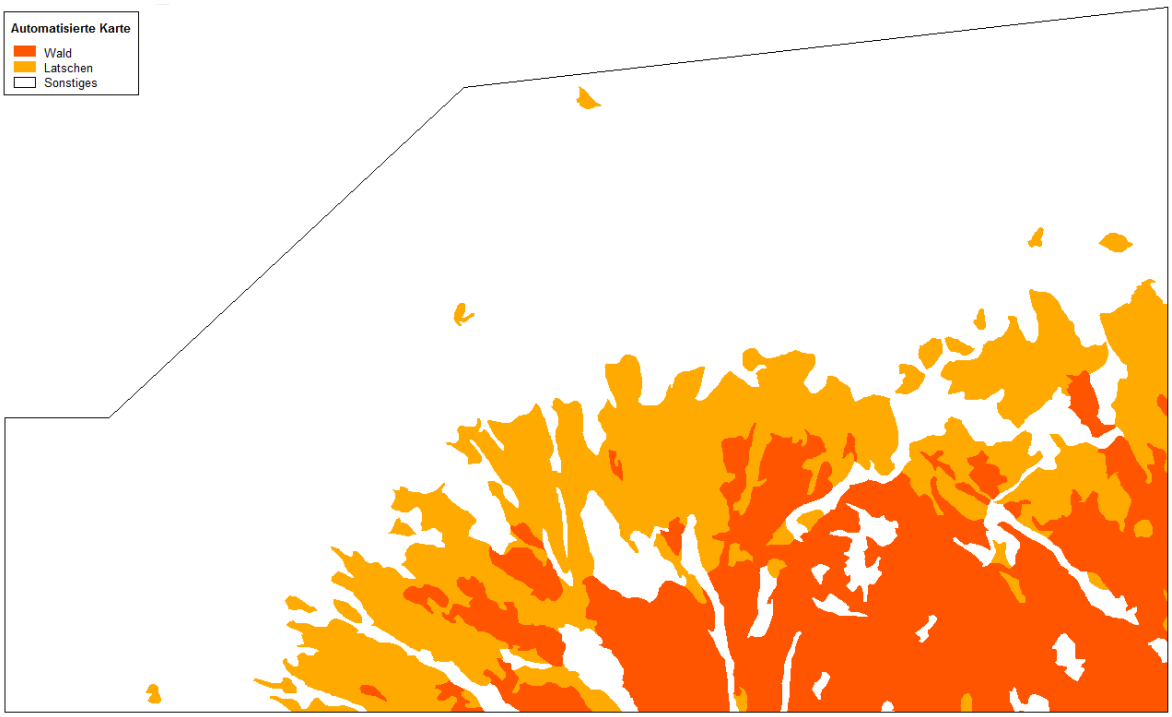

Abbildung 7.14: Automatisierte Karte der Bodenbedeckung

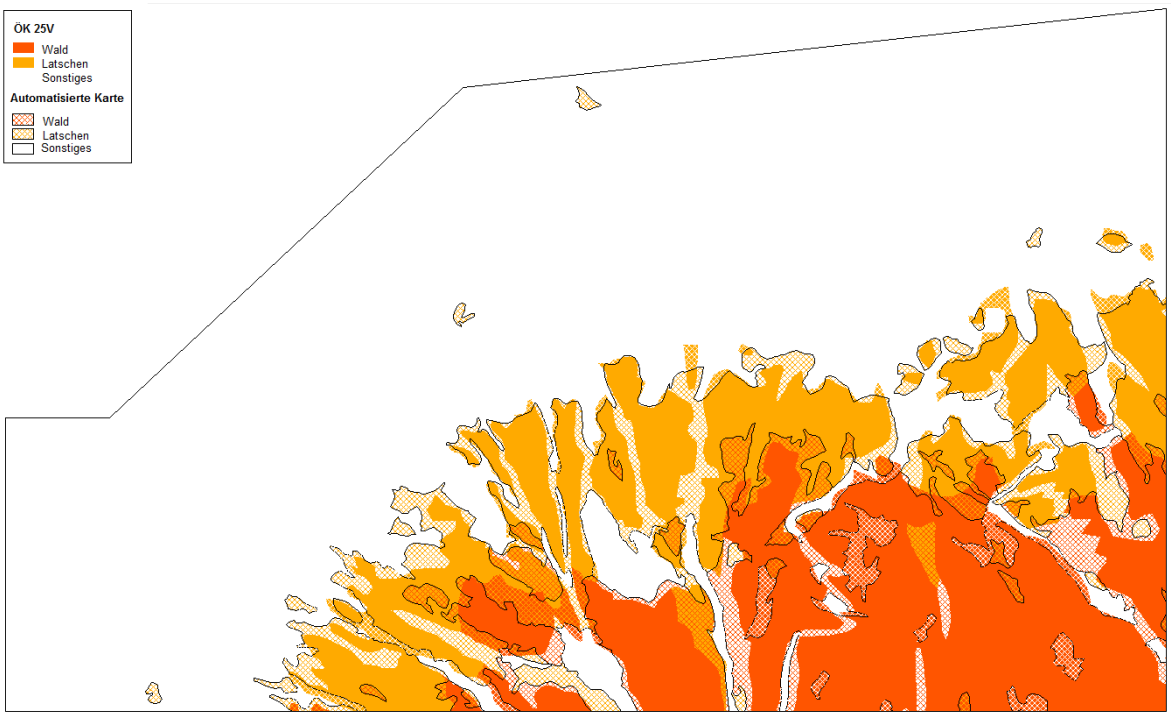

Abbildung 7.15: Vergleich der automatisierten Karte mit der ÖK25V

In Abbildung 7.15 ist die ÖK25V (Abbildung 7.14) mit der automatisierte Karten (Abbildung 7.14) überlagert.
Beim Vergleich der digitalisierten Karten der ÖK25V (Abbildung 7.13) mit der des Alpenvereins (Abbildung 7.10) fällt auf, dass die Vegetationsgrenzen der Österreichischen Karte und der Alpenvereinskarte sehr ähnlich sind, obwohl beide einen unterschiedlichen Maßstab haben. Die Vermutung liegt auf der Hand, dass die Bodenbedeckung der beiden Karten aus derselben Datengrundlage erstellt wurde (ÖK25V als Grundlage der Alpenvereinskarte). Die Ergebnisse des Vergleiches entsprechen somit denen der Alpenvereinskarte.

Die Flächenbilanz der ÖK25V ist in Tabelle 7.9 aufgelistet. Die Differenzen aus den beiden Flächenbilanzen in Tabelle 7.10 ergeben eine flächenmäßige Übereinstimmung der Karten von 91%. Dieser Wert wird durch den hohen Anteil von 70% an „Sonstigen Flächen“ verfälscht und ist somit nicht aussagekräftig.

Klasse	**Flächenanzahl**	**Fläche [m2]**	**Umfang [m]**
Wald	9	1252087 (16,1%)	16813 (19,2%)
Latschen	22	1097161 (14,1%)	28591 (32,6%)
Sonstiges	5	5431116 (69,8%)	42357 (48,3%)
Summe	36	7780364 (100,0%)	87761 (100,0%)

Tabelle 7.9: Flächenbilanz der ÖK25V

Klasse	Anzahl	Fläche [m^2]	Umfang [m]
Wald	-9	-99025 (1,3 %)	-10250 (5,3 %)
Latschen	-14	-251502 (3,2 %)	-9350 (4,8 %)
Sonstiges	-108	350527 (4,5 %)	-86747 (44,7 %)

Tabelle 7.10: Differenz der Flächenbilanzen: ÖK25V - Variante 1

Fazit

Der Vergleich mit Referenzkarten hat gezeigt, dass die automatisch abgeleitete Bodenbedeckung recht genau ist. So konnte eine flächenmäßig Übereinstimmungen zwischen 86% und 93% mit den Referenzkarten erziehlt werden. Interessant wäre noch ein zusätzlicher Vergleich der Bodenbedeckung 1:10.000 mit Referenzdaten. Aufgrund der fehlenden Karten konnte dies aber nicht durchgeführt werden.

7.3 Felszeichnung

Die Beurteilung der automatisierten Felsdarstellung (siehe Kapitel 4.3.3) ist sehr schwer. Es gibt keine genauen Kriterien, nach welchen eine Bewertung erfolgen kann. Damit dennoch Aussagen über die Qualität gemacht werden können, wird das Ergebnis mit anderen Felszeichnungen verglichen. Als Referenzkarte wird dafür die Karte des Alpenvereins verwendet. Die Österreichische Karte ÖK25V hingegen ist für den Vergleich nicht geeignet, weil sie eigentlich nur eine vergrößerte Karte im Maßstab 1:50.000 ist.

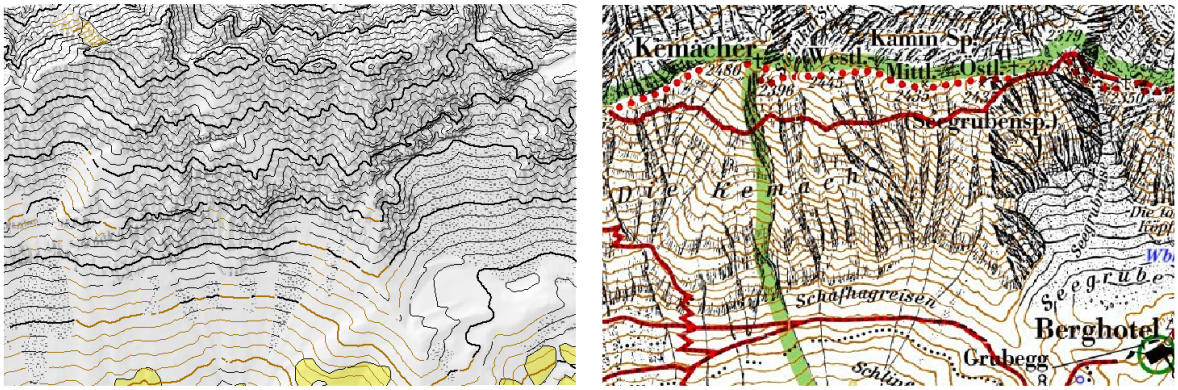

Abbildung 7.16: Ausschnitt der Felszeichnung des Untersuchungsgebietes 1:25.000. Links: automatisierte Karte; Rechts: Alpenvereinskarte, ©Alpenverein

In Abbildung 7.16 sind Ausschnitte der beiden Karten gegenübergestellt. Die linke Abbildung zeigt die automatisierte Felsdarstellung, während in der rechten Abbildung die Alpenvereinskarte dargestellt ist. Die Grafik zeigt, dass in der automatisierten Darstellung Steilwände und wichtige markante Strukturen teilweise nicht gut erkennbar oder nur schwach angedeutet sind. Außerdem

fällt es meist schwer, Felsen von sonstigem Gelände zu unterscheiden. Besonders wichtig wäre dies z.B. bei einer Wanderkarte, damit gefährliche Zonen erkannt werden können. Ein Vorteil der automatischen Karte hingegen ist, dass das Gelände etwas plastischer wirkt. Die Felszeichnung des Alpenvereinskarte wirkt hingegen etwas zu überladen.

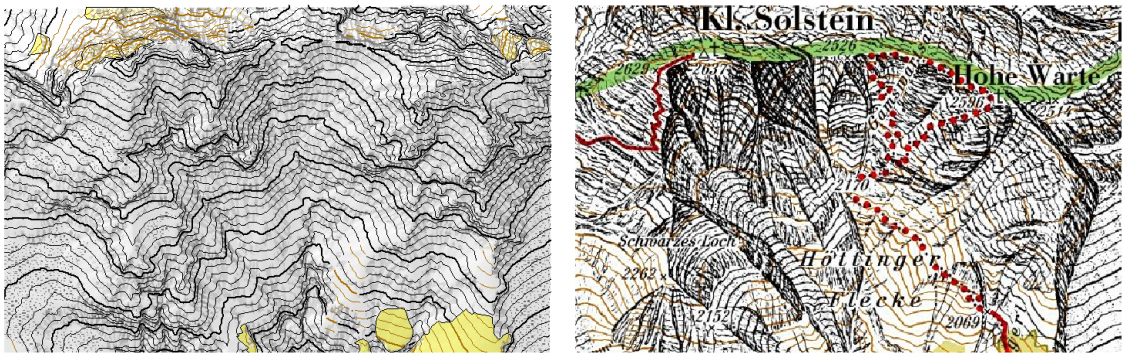

Abbildung 7.17: Ausschnitt der Felszeichnung des Untersuchungsgebietes 1:25.000. Links: automatisierte Karte; Rechts: Alpenvereinskarte, ©Alpenverein

Die Abbildung 7.17 zeigt einen weiteren Ausschnitt aus beiden Karten. Auch hier kann die automatische Felszeichnung nicht überzeugen (persönliche Meinung des Autors). Man kann mithilfe dieser Karte kaum Rückschlüsse auf die Felsen in der Natur ziehen. Es fehlen Geländekanten und sonstige morphologische Felsstrukturen. An diesem Punkt sei jedoch auch angemerkt, dass die Alpenvereinskarte in diesem Ausschnitt extrem überfüllt ist, und auch keine anschauliche Darstellung des Geländes ermöglicht.

Zusammenfassend ist das Ergebnis der automatischen Felszeichnung nicht besonders gut. Die Felsen sind nur schwer als solche erkennbar, und markante Strukturen im Fels werden nur begrenzt dargestellt. Trotz aller Nachteile könnte diese Methode eine interessante Alternative für die Ableitung einer Felszeichnung in unerschlossenen Gebieten oder bei eingeschränkten finanziellen Mitteln sein.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde ein automatisiertes Verfahren für die Ableitung einer topographischen Karte (Bodenbedeckung und Geländedarstellung) auf Grundlage von ALS-Daten und Orthophotos vorgestellt. Das Verfahren wurde erfolgreich auf ein Untersuchungsgebiet nördlich von Innsbruck angewendet. Die eingangs gestellte Frage, ob die Karte aus ALS-Daten und Orthophotos abgeleitet werden kann, kann ohne Zweifel mit einem Ja beantwortet werden.

Bei der Bodenbedeckung wurde zwischen den Klassen Wald, Latschen, Wiese, Fels und Geröll unterschieden. Die Ableitung erfolgte in zwei Schritten (siehe Kapitel 4.2). Als erstes wurde das Gelände mithilfe abgeleiteter Attribute der ALS-Punktwolke und des Orthophotos klassifiziert (siehe Kapitel 4.2.1). Folgende Attribute wurden dafür verwendet: Normiertes Oberflächenmodell (nDOM), Geländeneigung, Ebenenabweichung und Echoratio aus der Punktwolke, sowie der Vegetationsindex VARI aus dem Orthophoto. Anschließend wurde das Ergebnis der Klassifizierung in einem zweiten Schritt durch eine Generalisierung für den Zielmaßstab der Karte aufbereitet (siehe Kapitel 4.2.2). Es wurden dafür zwei Varianten vorgestellt, welche sich im wesentlichen am Zeitpunkt der Generalisierung unterscheiden.
Für das Untersuchungsgebiet konnten dabei gute Ergebnisse erzielt werden (siehe Kapitel 6). Ein Vergleich der automatisierten Bodenbedeckungskarte mit Referenzkarten ergab eine flächenmäßige Übereinstimmung zwischen 86% und 93%, unabhängig von der gewählten Generalisierungsvariante. Trotz der guten Ergebnisse kann das entwickelte Verfahren in einigen Punkten verbessert werden, besonders im Bereich der Klassifizierung. So konnten die Klassen Fels und Geröll durch die verwendeten Attribute der ALS-Punktwolke und des Orthophotos nicht eindeutig getrennt werden. Die Folge war, dass Klassifizierungsfehler zwischen den Klassen nicht ausgeschlossen werden konnten. Weiters führte der Vegetationsindex VARI aufgrund von Schatten im Orthophotos zu einem z.T. großflächigem Scheitern der Klassifizierung (z.B. bei Felswänden oder am Waldrand). Aus diesem Grund wären weitere Merkmale für die Klassifizierung sehr hilfreich. So könnten beispielsweise kalibrierte Intensitätswerte der Laserpunkte die Grauwerte des Orthophotos ersetzten. Entsprechende Untersuchungen wären wünschenswert. Außerdem könnte durch die Verwendung einer anderen Klassifizierungsmethode ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden.

Neben der Bodenbedeckung wurde auch eine Geländedarstellung abgeleitet. Sie besteht aus Höhenlinien, Schummerung und einer Felszeichnung, und wurde auf Grundlage eines digitalen Geländemodelles abgeleitet (siehe Kapitel 4.3). Während für die Berechnung der Höhenlinien und

Schummerung herkömmlichen Verfahren verwendet wurden, wurde für die Felsdarstellung eine neue Methode entwickelt. Sie enthält zusätzlich zu den Höhenlinien und der Schummerung eine Strukturzeichnung und Geländekanten, welche auf Grundlage von Krümmungen des digitalen Geländemodelles abgeleitet wurden.
Die Ergebnisse der automatisierten Felsdarstellung des Untersuchungsgebietes konnten nur zum Teil überzeugen (siehe Kapitel 6). Wichtige mophologische Strukturen im Fels können nur teilweise richtig erkannt werden. Es fehlen außerdem wichtige Geländekanten, welche für die Modellierung des Geländes wichtig wären. Während für die Kantenextraktion bereits erfolgversprechendere Methoden existieren (siehe Kapitel 3.2), sollten sich zukünftige Projekte auf eine Verbesserung der Strukturzeichnung konzentrieren. So könnte die Struktur des vorgestellten Ergebnisses beispielsweise durch eine Vektorisierung mit anschließender Linienglättung verfeinert werden.

Fazit

Mit dem vorgestellten automatisierten Verfahren konnten für das Untersuchungsgebiet bereits durchaus interessante Ergebnisse erzielt werden. Das Verfahren kann auch für andere Gebiet angewendet werden, sofern die Parameter der Klassifikation, Generalisierung und Felsdarstellung angepasst werden. Durch zusätzliche Verbesserungen im Bereich der Klassifizierung und Felsdarstellung könnten die vorgestellten Methoden in naher Zukunft auch für den praktischen Einsatz interessant werden.

Literaturverzeichnis

Alpenverein (2009). Homepage des österreichischen Alpenvereins. Webseite. http://www.alpenverein.at/portal/index.php.

BEV (2009). Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Webseite. www.bev.gv.at.

Brandstätter, L. (1973). *Die Alpenvereinskarte der Hochköniggruppe und die Tradition*. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte. Ergänzungsheft zum Alpenvereinsjahrbuch.

Brandstätter, L. (1983). *Gebirgskartographie, Die Kartographie und ihre Randgebiete, Band 2*. Franz Deuticke Verlag.

Brandstätter, L. und Brandstätter, G. (1977). *Gosuakamm - Dachsteingruppe 1:10.000 und 1:20.000, Photogrammetrische und kartographische Bearbeitung (Beispiele einer neuzeitlichen Hochgebirgskartographie)*. Österreichische Akademie der Wissenschaften.

Brügelmann, R. (2000). Automatic breakline detection from airborne laser range data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, B3, Amsterdam*.

Briese, C. (2004). Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXV, B3, Istanbul, Turky*.

Briese, C., Mandlburger, G., Ressl, C., und Brockmann, H. (2009). Automatic break line determination for the generation of a dtm along the river main. In *ISPRS Workshop Laserscanning '09", IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8*.

Bris, A. L. und Boldo, D. (2007). Extraction of land cover themes from aerial ortho-images in mountainous areas using external information. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (3/W49A)*.

Charaniya, A. P., Manduchi, R., und Lodha, S. K. (2004). Supervised parametric classification of aerial lidar data. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshos*.

Dassau, O., Holl, S., Neteler, M., und and, D. M. R. (2005). *Eine Einführung in den praktischen Umgang mit dem Freien Geographischen Informationssystem GRASS 6.0*. GDF Hannover bR.

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., und Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote sensing estimation of vegetation fraction. In *Remote Sensing of Environment 2002*.

Gondol, L., Bris, A. L., und Lecordix, F. (2008). Cartography of high mountain areas – testing of a new digital cliff drawing method. *Workshop "High Mountain Cartographyin Lenk, Switzerland*.

GRASS (2009). Homepage der Software GRASS GIS. Webseite. http://grass.itc.it/.

Guigues, L. (2004). Modeles multi-echelles pour la segmentation d'images. *Ecole Doctorale Sciences et Ingenierie del'Universite de Cergy-Pontoise*. PhD thesis.

Hake, G., Grünreich, D., und Meng, L. (2002). *Kartographie – Visualisierung raum-zeitlicher Informationen (8.Auflage)*. Walter de Gruyter.

Hanover, I. L. U. (2009). Begriffserklärung ALS. Webseite. http://www.ikg.uni-hannover.de/.

Höfle, B., Mücke, W., Dutter, M., Rutzinger, M., und Dorninger, P. (2009). Detection of building regions using airborne lidar – a new combination of raster and point cloud based gis methods. In *International Conference on Applied Geoinformatics, Salzburg*.

Hurni, L. (1995). *Modellhafte Arbeitsabläufe zur digitalen Erstellung von topographischen und geologischen Karten und dreidimensionalen Visualisierungen*. Institut für Kartographie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

IES (2009). Image 2000 & corine land cover 2000 project. Webseite. http://image2000.jrc.ec.europa.eu/.

Kager, H. (2004). Discrepancies between overlapping laser scanning strips- simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. In *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress, Istanbul*.

Kass, M., Witkin, A., und Terzopoulos, D. (1987). Snakes: Active contour models. In *International Journal of Computer Vision*.

Kern, F. (2002). Terrestrisches Laserscanning - kurz & bündig. Webseite. http://www.architekturvermessung.de.

Kiel, U. (2009). Kurzfassung: Klassifikation von Satellitenbildern. http://www.uni-kiel.de/forum-erdkunde/hintergr/fe/klassif/kakurzfa.htm.

Kraus, K. (2001). Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. In *21. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Konstanz, Deutschland*.

Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie, Band 1*. de Gruyter Lehrbuch.

Kraus, K., Jansa, J., und Kager, H. (1996). *Photogrammetrie: Photogrammetrie 2. Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Gruyter.

Maas, H. G. (2005). Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning. In *Kartographische Nachrichten, Vol. 55, Heft 1, S. 3-11*.

Mackaness, W. A., Ruas, A., und Sarjakoski, L. T. (2007). *Generalisation of geographic information: Cartographic modelling and applications*. International cartographic association (ICA).

Melbourne, U. (2009). Linienvereinfachung nach Lang. Webseite. http://www.sli.unimelb.edu.au/gisweb/LGmodule/LGLangVisualisation.htm.

Multimedial, T. (2009). Vegetationszonen und Höhenstufen. Webseite. http://www.tirolmultimedial.at/tmm/themen/0301.html.

Rouse, J., H., R., Schell, J. A., und Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In *Proc. ERTS-1 Symposium 3rd, Greenbelt*.

Rutzinger, M., Höfle, B., und Pfeifer, N. (2007a). Detection of high urban vegetation with airborne laser scanning data. In *Proceedings Forestsat 2007, Montpellier, France.*

Rutzinger, M., Maukisch, M., Petrini-Monteferri, F., und Stötter, J. (2007b). Development of algorithms for the extraction of linear patterns (lineaments) from airborne laser scanning data. In *Geomorphology for the Future*.

Sithole, G. und Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point cloudsstar, open. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 59*.

swisstopo (2009). Bundesamt für Landestopografie swisstopo. Webseite. http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home.html.

Tiris (2009). Tiroler Rauminformationssystem. Webseite. http://tiris.tirol.gv.at/web/index.cfm.

Trias Sanz, R. (2006). Semi-automatic rural land cover classification from high-resolution remote sensing images: Executive summary. PhD-execsum.

Tymkow, P. und Borkowski, A. (2008). Land cover classification using airborne laser scanning data and photographs. In *XXIth ISPRS Congress: Silk Road for Information from Imagery*.

Umweltbundesamt (2009). Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wald. Webseite. http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/gesundheit/auswirkungen/.

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., und Studnicka, N. (2006). Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pages 100–102.

Wikipedia (2009a). Definition von Orthofoto. Webseite. http://de.wikipedia.org/wiki/Orthofoto.

Wikipedia (2009b). Maximum-Likelihood-Methode. Webseite. http://de.wikipedia.org/wiki/Maximum-Likelihood-Methode.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Topographische Karte der Martinswand westlich von Innsbruck 1
1.2 Kartenelemente der topographischen Bodenbedeckungskarte 3

2.1 Streifenweise Datenerfassung mittels eines Lasers aus dem Flugzeug 5
2.2 Erstes und letztes Echo am Beispiel eines Baumes 7
2.3 Entzerrung der perspektivischen Abbildung des Luftbildes durch die Orthogonalprojektion des Orthophotos 9

3.1 Klassifikation nach [Bris und Boldo, 2007] des Pyrenäen-Testgebietes 11
3.2 Ergebnisse der Klassifikation nach [Charaniya et al., 2004] 12
3.3 Modellierung der Geländekanten durch die Verschneidung von Ebenenpaaren . . . 14
3.4 Konzept für die Beschreibung von Geländekanten nach [Briese, 2004] 15
3.5 Gerippelinienmethode nach [Hurni, 1995] angewendet auf ein Testgebiet des Silvrettagebirges 16
3.6 Vergleich der automatisierten Karte 1:25.000 nach [Gondol et al., 2008] 18

4.1 Flussdiagramm der Erstellung der topographischen Bodenbedeckungskarte 19
4.2 Topographische Modelle der Erdoberfläche (DGM und DOM) 21
4.3 Topographisches Modelle eines alpinen Testgebietes 21
4.4 Geländeneigungskarte des alpinen Testgebietes 22
4.5 Prinzip der Ebenenabweichung 22
4.6 Ebenenabweichung des alpinen Testgebietes 23
4.7 Prinzip der Echoratio 24
4.8 Vegetationsindex VARI des alpinen Testgebietes 25
4.9 Vegetationsklassen der topographischen Karte 25
4.10 Flussdiagramm des verwendeten überwachten Klassifizierungsverfahrens 26
4.11 Trainingsdatenentnahme am Beispiel Wald 27
4.12 Histogramm von simulierten Echoratio-Daten 28
4.13 Histogramm für die Bestimmung der Grenzen der Klasse *Latschen* 29
4.14 Ergebnis der Klassifizierung eines Testgebietes 30
4.15 Festlegen einer Klasse für nicht-klassifizierte Pixel 31
4.16 Resampling einer Rasterkarte 31

4.17 Flussdiagramm der Generalisierungsvariante 1 33
4.18 Flussdiagramm der Generalisierungsvariante 2 34
4.19 Geländedarstellung eines Testgebietes 35
4.20 Ergebnis der Kantenextraktion 39
4.21 Ergebnis der Strukturzeichnung eines Testgebietes 39
4.22 Felsdarstellung eines Testgebietes 40

5.1 Untersuchungsgebiet nördlich von Innsbruck 41
5.2 Übersicht über die Flugstreifen der Befliegung Nordkette 42
5.3 Orthophoto des Untersuchungsgebietes 43
5.4 Referenzkarten des Untersuchungsgebietes 44

6.1 Topographische Modelle des Untersuchungsgebietes 46
6.2 Attributkarten des Untersuchungsgebietes 47
6.3 Vegetationsindex VARI des Untersuchungsgebietes 48
6.4 Histogramme der Trainingsdaten 49
6.5 Histogramme der Trainingsdaten 50
6.6 Klassifizierungskarte des Untersuchungsgebietes 53
6.7 Aufgefüllte Klassifizierungskarte des Untersuchungsgebietes 53
6.8 Generalisierte Bodenbedeckungskarte nach Variante 1 54
6.9 Generalisierte Bodenbedeckungskarte nach Variante 2 55
6.10 Schummerung und Höhenlinien des Untersuchungsgebietes 57
6.11 Ausschnitt der Felszeichnung 1:10.000 des Untersuchungsgebietes 58
6.12 Ausschnitt der Felszeichnung 1:25.000 des Untersuchungsgebietes 58
6.13 Ausschnitt der topographischen Bodenbedeckungskarte 59

7.1 Orthophoto des Analysegebietes 60
7.2 Ergebnis der Klassifizierung des Analysegebietes 61
7.3 Gescheiterte Klassifizierung von Wald und Wiese 62
7.4 Falsche Klassifizierung im Schatten einer Felswand 63
7.5 Klassifizierung im Schatten bei Wäldern 63
7.6 Überlagerung der Generalisierungsvarianten im Maßstab 1:25.000 64
7.7 Überlagerung der Generalisierungsvarianten im Maßstab 1:25.000 65
7.8 Oben: digitalisierte Karte aus dem Orthophoto; Unten: automatisierte Karte 68
7.9 Vergleich der automatisierten Karte mit der digitalisierten Karte des Orthophotos . 69
7.10 Digitalisierte Karte der Bodenbedeckung des Alpenvereins 70
7.11 Automatisierte Karte der Bodenbedeckung 71
7.12 Vergleich der automatisierten Karte mit der Alpenvereinskarte 71
7.13 Digitalisierte Karte der Bodenbedeckung der ÖK25V 73
7.14 Automatisierte Karte der Bodenbedeckung 73

7.15 Vergleich der automatisierten Karte mit der ÖK25V 74
7.16 Ausschnitt der Felszeichnung des Untersuchungsgebietes 1:25.000 75
7.17 Ausschnitt der Felszeichnung des Untersuchungsgebietes 1:25.000 76

Tabellenverzeichnis

6.1 Eindeutige Abgrenzung der Klassen über die verwendeten Attribute 50
6.2 Klassengrenzen der Trainingsgebiete 51
6.3 Klassengrenzen der Klasse Geröll 52

7.1 Anteil an unklassifizierten Pixeln des gesamten Untersuchungsgebietes 61
7.2 Flächenbilanz der Bodenbedeckungskarten 1:25.000, Generalisierungvariante 1 . . 66
7.3 Flächenbilanz der Bodenbedeckungskarten 1:25.000, Generalisierungvariante 2 . . 66
7.4 Differenz der Flächenbilanzen 1:25.000: Variante 2 - Variante 1 67
7.5 Flächenbilanz der digitalisierten Karte aus dem Orthophoto 69
7.6 Differenz der Flächenbilanzen: Orthophotokarte - Variante 1 70
7.7 Flächenbilanz der digitalisierten Alpenvereinskarte 72
7.8 Differenz der Flächenbilanzen: Alpenvereinskarte - Variante 1 72
7.9 Flächenbilanz der ÖK25V 74
7.10 Differenz der Flächenbilanzen: ÖK25V - Variante 1 75

Anhang

Quelltext GRASS GIS

```
#—— ECHORATIO und EBENENABWEICHUNG aus Punktwolke ableiten
#input:  Koordinatenfile der Punktwolke [x,y,z] (pkt_all.xyz)
#output: Koordinatenfile der Punktwolke mit Echoratio und Ebenenabweichung [x,y,z,er,ea] (pkt_all.xyze)
v.tree.points points=pkt.xyz fs=" " -r output=pkt_all.xyz zrange=(650,4000)
roughness -i pkt_all.xyz -o pkt_all.xyze -r 1.5 -n -999 -m 0.2 -14 -6


#—— DATENIMPORT IN GRASS GIS UND VORBEREIUNG
#—— DIGITALES GELÄNDEMODELL IMPROTIEREN:
#input:  Geländemodelle *.asg (Auflösung 1 m) werden importiert und zu einem Geländemodell zusammengefasst
#output: Geländemodell des gesamten Untersuchungsgebietes (data_dgm_1m)
g.region res=1
r.in.arc input=2324_100.asg type=FCELL mult=1.0 output=dgm_2324_100 --o
r.in.arc input=2324_101.asg type=FCELL mult=1.0 output=dgm_2324_101 --o
r.in.arc input=2325_102.asg type=FCELL mult=1.0 output=dgm_2325_102 --o
r.in.arc input=2325_103.asg type=FCELL mult=1.0 output=dgm_2325_103 --o
r.in.arc input=2424_100.asg type=FCELL mult=1.0 output=dgm_2424_100 --o
r.in.arc input=2425_102.asg type=FCELL mult=1.0 output=dgm_2425_102 --o
r.mapcalc "tmp_dgm_2325_103_1m=if(dgm_2325_103!=0,dgm_2325_103,-999)"
r.null map=tmp_dgm_2325_103_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dgm_2325_102_1m=if(dgm_2325_102!=0,dgm_2325_102,-999)"
r.null map=tmp_dgm_2325_102_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dgm_2324_101_1m=if(dgm_2324_101!=0,dgm_2324_101,-999)"
r.null map=tmp_dgm_2324_101_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dgm_2324_100_1m=if(dgm_2324_100!=0,dgm_2324_100,-999)"
r.null map=tmp_dgm_2324_100_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dgm_2424_100_1m=if(dgm_2424_100!=0,dgm_2424_100,-999)"
r.null map=tmp_dgm_2424_100_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dgm_2425_102_1m=if(dgm_2425_102!=0,dgm_2425_102,-999)"
r.null map=tmp_dgm_2425_102_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dgm_1m=if(tmp_dgm_2325_103_1m!=-999,tmp_dgm_2325_103_1m,if(tmp_dgm_2325_102_1m!=-999,tmp_dgm_2325_102_1m,
 if(tmp_dgm_2324_101_1m!=-999,tmp_dgm_2324_101_1m,if(tmp_dgm_2324_100_1m!=-999,tmp_dgm_2324_100_1m,
 if(tmp_dgm_2424_100_1m!=-999,tmp_dgm_2424_100_1m,if(tmp_dgm_2425_102_1m!=-999,tmp_dgm_2425_102_1m,-999))))))"
r.mapcalc "data_dgm_1m=if(tmp_dgm_1m>650,tmp_dgm_1m,-999)"
r.null map=data_dgm_1m setnull=-999
#—— DIGITALES OBERFLÄCHENMODELL IMPROTIEREN:
#input:  Oberflächenmodelle *.asg (Auflösung 1 m) werden importiert und zu einem Oberflächenmodell zusammengefasst
#output: Oberflächenmodell des gesamten Untersuchungsgebietes (data_dom_1m)
g.region res=1
r.in.arc input=dom_2324_100.asg type=FCELL mult=1.0 output=dom_2324_100
r.in.arc input=dom_2324_101.asg type=FCELL mult=1.0 output=dom_2324_101
r.in.arc input=dom_2325_102.asg type=FCELL mult=1.0 output=dom_2325_102
r.in.arc input=dom_2325_103.asg type=FCELL mult=1.0 output=dom_2325_103
r.in.arc input=dom_2424_100.asg type=FCELL mult=1.0 output=dom_2424_100
r.in.arc input=dom_2425_102.asg type=FCELL mult=1.0 output=dom_2425_102
r.mapcalc "tmp_dom_2325_103_1m=if(dom_2325_103!=0,dom_2325_103,-999)"
r.null map=tmp_dom_2325_103_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dom_2325_102_1m=if(dom_2325_102!=0,dom_2325_102,-999)"
r.null map=tmp_dom_2325_102_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dom_2324_101_1m=if(dom_2324_101!=0,dom_2324_101,-999)"
r.null map=tmp_dom_2324_101_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dom_2324_100_1m=if(dom_2324_100!=0,dom_2324_100,-999)"
r.null map=tmp_dom_2324_100_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dom_2424_100_1m=if(dom_2424_100!=0,dom_2424_100,-999)"
r.null map=tmp_dom_2424_100_1m null=-999
r.mapcalc "tmp_dom_2425_102_1m=if(dom_2425_102!=0,dom_2425_102,-999)"
r.null map=tmp_dom_2425_102_1m null=-999
```

```
r.mapcalc "data_dom_1m=if(data_dgm_1m>650,if(tmp_dom_2325_103_1m!=-999,tmp_dom_2325_103_1m,if(tmp_dom_2325_102_1m!=-999,
 tmp_dom_2325_102_1m, if(tmp_dom_2324_101_1m!=-999,tmp_dom_2324_101_1m,if(tmp_dom_2324_100_1m!=-999,tmp_dom_2324_100_1m,
 if(tmp_dom_2424_100_1m!=-999,tmp_dom_2424_100_1m,if(tmp_dom_2425_102_1m!=-999,tmp_dom_2425_102_1m,-999))))),-999)"
r.null map=data_dom_1m setnull=-999
#-- NORMIERTES OBERFLÄCHENMODELL BERECHNEN
#input: digitales Geländemodell (data_dgm_1m), digitales Geländemodell (data_dom_1m)
#output: normiertes Oberflächenmodell (data_ndom_1m)
g.region res=1
r.mapcalc "data_ndom_1m=data_dom_1m-data_dgm_1m"
#-- GELÄNDENEIGUNG BERECHNEN
#input: digitales Geländemodell (data_dgm_1m)
#output: Geländeneigungskarte (data_slope_1m)
g.region res=1
r.slope.aspect elevation=data_dgm_1m slope=data_slope_1m
#-- VEGETATIONSINDEX VARI IMPROTIEREN
#input: Orthofotos *jpg
#output: Orthofoto (data_ortho) und Vegetationsindex (data_v_1m) des gesamten Untersuchungsgebietes
g.region res=0.25
r.in.gdal -o input=2324-5001_200509.jpg output=ortho_2324_5001
r.in.gdal -o input=2324-5100_200509.jpg output=ortho_2324_5100
r.in.gdal -o input=2324-5101_200509.jpg output=ortho_2324_5101
r.in.gdal -o input=2325-5203_200509.jpg output=ortho_2325_5203
r.in.gdal -o input=2325-5302_200509.jpg output=ortho_2325_5302
r.in.gdal -o input=2325-5303_200509.jpg output=ortho_2325_5303
r.in.gdal -o input=2424-5000_200509.jpg output=ortho_2424_5000
r.in.gdal -o input=2424-5001_200509.jpg output=ortho_2424_5001
r.in.gdal -o input=2425-5202_200509.jpg output=ortho_2425_5202
r.in.gdal -o input=2425-5203_200509.jpg output=ortho_2425_5203
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5001.green=if(ortho_2324_5001.green>=0,ortho_2324_5001.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5001.red=if(ortho_2324_5001.red>=0,ortho_2324_5001.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5001.blue=if(ortho_2324_5001.blue>=0,ortho_2324_5001.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5100.green=if(ortho_2324_5100.green>=0,ortho_2324_5100.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5100.red=if(ortho_2324_5100.red>=0,ortho_2324_5100.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5100.blue=if(ortho_2324_5100.blue>=0,ortho_2324_5100.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5101.green=if(ortho_2324_5101.green>=0,ortho_2324_5101.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5101.red=if(ortho_2324_5101.red>=0,ortho_2324_5101.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2324_5101.blue=if(ortho_2324_5101.blue>=0,ortho_2324_5101.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5203.green=if(ortho_2325_5203.green>=0,ortho_2325_5203.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5203.red=if(ortho_2325_5203.red>=0,ortho_2325_5203.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5203.blue=if(ortho_2325_5203.blue>=0,ortho_2325_5203.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5302.green=if(ortho_2325_5302.green>=0,ortho_2325_5302.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5302.red=if(ortho_2325_5302.red>=0,ortho_2325_5302.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5302.blue=if(ortho_2325_5302.blue>=0,ortho_2325_5302.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5303.green=if(ortho_2325_5303.green>=0,ortho_2325_5303.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5303.red=if(ortho_2325_5303.red>=0,ortho_2325_5303.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2325_5303.blue=if(ortho_2325_5303.blue>=0,ortho_2325_5303.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2424_5000.green=if(ortho_2424_5000.green>=0,ortho_2424_5000.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2424_5000.red=if(ortho_2424_5000.red>=0,ortho_2424_5000.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2424_5000.blue=if(ortho_2424_5000.blue>=0,ortho_2424_5000.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2424_5001.green=if(ortho_2424_5001.green>=0,ortho_2424_5001.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2424_5001.red=if(ortho_2424_5001.red>=0,ortho_2424_5001.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2424_5001.blue=if(ortho_2424_5001.blue>=0,ortho_2424_5001.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2425_5202.green=if(ortho_2425_5202.green>=0,ortho_2425_5202.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2425_5202.red=if(ortho_2425_5202.red>=0,ortho_2425_5202.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2425_5202.blue=if(ortho_2425_5202.blue>=0,ortho_2425_5202.blue,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2425_5203.green=if(ortho_2425_5203.green>=0,ortho_2425_5203.green,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2425_5203.red=if(ortho_2425_5203.red>=0,ortho_2425_5203.red,-999)"
r.mapcalc "tmp_ortho_2425_5203.blue=if(ortho_2425_5203.blue>=0,ortho_2425_5203.blue,-999)"
r.null map=tmp_ortho_2324_5001.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5001.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5001.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5100.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5100.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5100.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5101.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5101.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2324_5101.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5203.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5203.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5203.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5302.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5302.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5302.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5303.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2325_5303.red null=-999
```

```
r.null map=tmp_ortho_2325_5303.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2424_5000.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2424_5000.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2424_5000.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2424_5001.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2424_5001.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2424_5001.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2425_5202.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2425_5202.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2425_5202.blue null=-999
r.null map=tmp_ortho_2425_5203.green null=-999
r.null map=tmp_ortho_2425_5203.red null=-999
r.null map=tmp_ortho_2425_5203.blue null=-999
r.mapcalc "data_ortho.green=if(data_dgm_1m>650,if(tmp_ortho_2324_5001.green!=-999,tmp_ortho_2324_5001.green,
 if(tmp_ortho_2324_5100.green!=-999,tmp_ortho_2324_5100.green,if(tmp_ortho_2324_5101.green!=-999,
 tmp_ortho_2324_5101.green,if(tmp_ortho_2325_5203.green!=-999,tmp_ortho_2325_5203.green,
 if(tmp_ortho_2325_5302.green!=-999,tmp_ortho_2325_5302.green,if(tmp_ortho_2325_5303.green!=-999,
 tmp_ortho_2325_5303.green,if(tmp_ortho_2424_5000.green!=-999,    tmp_ortho_2424_5000.green,
 if(tmp_ortho_2424_5001.green!=-999,tmp_ortho_2424_5001.green,if(tmp_ortho_2425_5202.green!=-999,
 tmp_ortho_2425_5202.green,if(tmp_ortho_2425_5203.green!=-999,tmp_ortho_2425_5203.green,-999))))))))),-999)"
r.null map=data_ortho.green setnull=-999
r.mapcalc "data_ortho.red=if(data_dgm_1m>650,if(tmp_ortho_2324_5001.red!=-999,tmp_ortho_2324_5001.red,
 if(tmp_ortho_2324_5100.red!=-999,tmp_ortho_2324_5100.red,if(tmp_ortho_2324_5101.red!=-999,tmp_ortho_2324_5101.red,
 if(tmp_ortho_2325_5203.red!=-999,tmp_ortho_2325_5203.red,if(tmp_ortho_2325_5302.red!=-999,tmp_ortho_2325_5302.red,
 if(tmp_ortho_2325_5303.red!=-999,tmp_ortho_2325_5303.red,if(tmp_ortho_2424_5000.red!=-999,tmp_ortho_2424_5000.red,
 if(tmp_ortho_2424_5001.red!=-999,tmp_ortho_2424_5001.red,if(tmp_ortho_2425_5202.red!=-999,tmp_ortho_2425_5202.red,
 if(tmp_ortho_2425_5203.red!=-999,tmp_ortho_2425_5203.red,-999))))))))),-999)"
r.null map=data_ortho.red setnull=-999
r.mapcalc "data_ortho.blue=if(data_dgm_1m>650,if(tmp_ortho_2324_5001.blue!=-999,tmp_ortho_2324_5001.blue,
 if(tmp_ortho_2324_5100.blue!=-999,tmp_ortho_2324_5100.blue,if(tmp_ortho_2324_5101.blue!=-999,tmp_ortho_2324_5101.blue,
 if(tmp_ortho_2325_5203.blue!=-999,tmp_ortho_2325_5203.blue,if(tmp_ortho_2325_5302.blue!=-999,tmp_ortho_2325_5302.blue,
 if(tmp_ortho_2325_5303.blue!=-999,tmp_ortho_2325_5303.blue,if(tmp_ortho_2424_5000.blue!=-999,tmp_ortho_2424_5000.blue,
 if(tmp_ortho_2424_5001.blue!=-999,tmp_ortho_2424_5001.blue,if(tmp_ortho_2425_5202.blue!=-999,tmp_ortho_2425_5202.blue,
 if(tmp_ortho_2425_5203.blue!=-999,tmp_ortho_2425_5203.blue,-999))))))))),-999)"
r.null map=data_ortho.blue setnull=-999
r.mapcalc "tmp_v_1=((data_ortho.green/0.1-data_ortho.red/0.1)/(data_ortho.green/0.1+data_ortho.red/0.1-data_ortho.blue/0.1))"
r.neighbors input=tmp_v_1 output=tmp_v_2 method=median size="7"
r.mapcalc "data_v=if(tmp_v_1<=-0.5,tmp_v_2,if(tmp_v_1>1,tmp_v_2,tmp_v_1))"
g.region res=1
r.resamp.stats input=data_v output=tmp_v_1m method=median
r.mapcalc "data_v_1m=if(tmp_v_1m!=0,tmp_v_1m*1,-0.5)"
#-- ECHORATIO IMPROTIEREN
#input:  Punktwolke mit Echoratio [x,y,z,er,ea] (pkt_all.xyze)
#output: Echoratio als Rasterbild (data_er_1m)
g.region res=1
r.in.xyz input=pkt_all.xyze output=t_er method=min fs=" " z=5 zrange=(-650,4000) --o
r.mapcalc "data_er_1m=if(data_dgm_1m>650,t_er,-999)"
r.neighbors input=data_er_1m output=tmp_er_1m method=minimum size="3" --o
r.null map=data_er_1m null=-999
r.mapcalc "data_er_1m_fill=if(data_er_1m==-999 && data_dgm_1m>650,tmp_er_1m,data_er_1m)"
r.null map=data_er_1m setnull=-999
#-- EBENENABWEICHUNG IMPROTIEREN
#input:  Punktwolke mit Echoratio [x,y,z,er,ea] (pkt_all.xyze)
#output: Ebenenabweichung als Rasterbild (data_pl_1m)
g.region res=1
r.in.xyz input=pkt_all.xyze output=t_pl method=mean fs=" " z=4 zrange=(-650,4000) --o
r.mapcalc "data_pl_1m=if(data_dgm_1m>650,t_pl,-999)"
r.neighbors input=data_pl_1m output=tmp_pl_1m method=average size="3" --o
r.null map=data_pl_1m null=-999
r.mapcalc "data_pl_1m_fill=if(data_pl_1m==-999 && data_dgm_1m>650,tmp_pl_1m,data_pl_1m)"
r.null map=data_pl_1m setnull=-999


#-- BODENBEDECKUNG
#input:  Echoratio (data_er_1m), Ebenenabweichung (data_pl_1m), nDOM (data_ndom_1m), Geländeneigung (data_slope_1m), VARI
      (data_v_1m), DGM (data_dgm_1m)
#output: Vektorkarte der Bodenbedeckung (map_cat)
#-- KARTE 1:10.000, Variante 1
r.mapcalc "t_cat_wald=if(data_er_1m_fill<73.82 && data_pl_1m_fill<0.4755 && data_ndom_1m>2.25 && data_dgm_1m<2100 &&
      data_v_1m>-0.0085 && data_v_1m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_lat=if(data_er_1m_fill>30.00 && data_er_1m_fill<=84.17 && data_pl_1m_fill>0.152 && data_pl_1m_fill<0.4677 &&
      data_ndom_1m<=2.25 && data_dgm_1m>1200 && data_dgm_1m<2700 && data_v_1m>-0.0085 && data_v_1m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_wiese=if(data_er_1m_fill>84.17 && data_pl_1m_fill<=0.152 && data_ndom_1m<0.07 && data_v_1m>-0.0085 &&
      data_v_1m<0.30 && data_ortho.green<210,1,0)"
```

```
r.mapcalc "t_cat_geroell=if(data_er_1m_fill>88.46 && data_pl_1m_fill<0.138 && data_ndom_1m<0.07 && data_slope_1m<38.25 &&
      data_slope_1m>20.02 && data_v_1m<=-0.0085,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_fels=if(t_cat_geroell==0 && data_er_1m_fill>25.64 && data_pl_1m_fill<0.2783 && data_ndom_1m<0.28 &&
      data_v_1m>-0.1143 && data_v_1m<=-0.0085,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_final=if(t_cat_fels==1,1,if(t_cat_geroell==1,2,if(t_cat_wiese==1,3,if(t_cat_lat==1,4,if(t_cat_wald==1,5,0)))))"
r.null map=t_cat_final setnull=0
r.neighbors input=t_cat_final output=t_final method=mode size="5" --o
r.neighbors input=t_final output=t_final2 method=mode size="5" --o
r.null map=t_cat_final null=0
r.mapcalc "t_cat_neigh1=if(t_cat_final==0 && data_dgm_1m>650,t_final2,t_cat_final)"
r.neighbors input=t_cat_neigh1 output=t_cat_neigh2 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh2 output=t_cat_neigh3 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh3 output=t_cat_neigh4 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh4 output=t_cat_neigh5 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh5 output=t_cat_neigh6 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh6 output=t_cat_neigh7 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh7 output=t_cat_neigh8 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh8 output=t_cat_neigh9 method=mode size="3" --o
r.mapcalc "t_cat_neigh10=if(data_dgm_1m>650,t_cat_neigh9,-999)"
r.null map=t_cat_neigh10 setnull=-999
r.to.vect input=t_cat_neigh10 output=t_cat_vec featur=area --o
v.clean input=t_cat_vec output=t_clean1 tool=rmarea thresh=2000 --o
v.dissolve input=t_clean1 output=t_cat col=value --o
v.build map=t_cat option=build
v.generalize input=t_cat output=t_gen method=lang threshold=2.5 look_ahead=5 type=boundary --o --v -c
v.build map=t_gen option=build
v.generalize input=t_gen output=t_gen2 method=snakes alpha=0.1 beta=0.1 --o
v.build map=t_gen2 option=build
v.clean input=t_gen2 output=map_cat tool=rmarea thresh=2000 --o
#-- KARTE 1:10.000, Variante 2
g.region res=2
r.resamp.stats input=data_dgm_1m output=t_dgm_2m method=average --o
r.mapcalc "data_dgm_2m=if(t_dgm_2m!=0,t_dgm_2m*1,-999)"
r.resamp.stats input=data_dom_1m output=t_dom_2m method=average --o
r.mapcalc "data_dom_2m=if(t_dom_2m!=0,t_dom_2m*1,-999)"
r.resamp.stats input=data_er_1m_fill output=t_er_2m_fill method=average --o
r.mapcalc "data_er_2m_fill=if(t_er_2m_fill!=0,t_er_2m_fill*1,-999)"
r.resamp.stats input=data_pl_1m_fill output=t_pl_2m_fill method=average --o
r.mapcalc "data_pl_2m_fill=if(t_pl_2m_fill!=0,t_pl_2m_fill*1,-999)"
r.null map=data_pl_2m null=-999
r.mapcalc "data_pl_2m_fill=if(data_pl_2m==-999 && data_dgm_1m>650,tmp_pl_2m,data_pl_2m)"
r.null map=data_pl_2m setnull=-999
r.resamp.stats input=data_v output=t_v_2m method=median --o
r.mapcalc "data_v_2m=if(t_v_2m!=0,t_v_2m*1,-999)"
r.null data_v_2m setnull=-999
r.resamp.stats input=data_ortho.green output=t_green_2m method=average --o
r.mapcalc "data_green_2m=if(t_green_2m!=0,t_green_2m*1,-999)"
r.mapcalc "data_ndom_2m=data_dom_2m-data_dgm_2m"
r.slope.aspect elevation=data_dgm_2m slope=data_slope_2m --o
r.mapcalc "t_cat_wald=if(data_er_2m_fill<73.82 && data_pl_2m_fill<0.4755 && data_ndom_2m>2.25 && data_dgm_2m<2100 &&
      data_v_2m>-0.0085 && data_v_2m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_lat=if(data_er_2m_fill>30.00 && data_er_2m_fill<=84.17 && data_pl_2m_fill>0.152 && data_pl_2m_fill<0.4677 &&
      data_ndom_2m<=2.25 && data_dgm_2m>1200 && data_dgm_2m<2700 && data_v_2m>-0.0085 && data_v_2m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_wiese=if(data_er_2m_fill>84.17 && data_pl_2m_fill<=0.152 && data_ndom_2m<0.07 && data_v_2m>-0.0085 &&
      data_v_2m<0.30 && data_ortho.green<210,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_geroell=if(data_er_2m_fill>88.46 && data_pl_2m_fill<0.138 && data_ndom_2m<0.07 && data_slope_2m<38.25 &&
      data_slope_2m>20.02 && data_v_2m<=-0.0085,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_fels=if(t_cat_geroell==0 && data_er_2m_fill>25.64 && data_pl_2m_fill<0.2783 && data_ndom_2m<0.28 &&
      data_v_2m>-0.1143 && data_v_2m<=-0.0085,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_final=if(t_cat_fels==1,1,if(t_cat_geroell==1,2,if(t_cat_wiese==1,3,if(t_cat_lat==1,4,if(t_cat_wald==1,5,0)))))"
r.null map=t_cat_final setnull=0
r.neighbors input=t_cat_final output=t_final method=mode size="5" --o
r.neighbors input=t_final output=t_final2 method=mode size="5" --o
r.null map=t_cat_final null=0
r.mapcalc "t_cat_neigh1=if(t_cat_final==0 && data_dgm_1m>650,t_final2,t_cat_final)"
r.neighbors input=t_cat_neigh1 output=t_cat_neigh2 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh2 output=t_cat_neigh3 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh3 output=t_cat_neigh4 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh4 output=t_cat_neigh5 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh5 output=t_cat_neigh6 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh6 output=t_cat_neigh7 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh7 output=t_cat_neigh8 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh8 output=t_cat_neigh9 method=mode size="3" --o
r.mapcalc "t_cat_neigh10=if(data_dgm_1m>650,t_cat_neigh9,-999)"
r.null map=t_cat_neigh10 setnull=-999
```

```
r.to.vect input=t_cat_neigh10 output=t_cat_vec featur=area -s --o
v.clean input=t_cat_vec output=t_cat_clean tool=rmarea thresh=1000 --o
v.generalize -c input=t_cat_clean output=t_cat_final method=snakes alpha=0.1 beta=0.1 --o
v.build map=t_cat_final option=build
v.clean input=t_cat_final output=t_cat_clean2 tool=rmarea thresh=1000 --o
v.dissolve input=t_cat_clean2 output=map_cat col=value --o
#-- KARTE 1:25.000, Variante 1
g.region res=1
r.mapcalc "t_cat_wald=if(data_er_1m_fill<73.82 && data_pl_1m_fill<0.4755 && data_ndom_1m>2.25 && data_dgm_1m<2100 &&
      data_v_1m>-0.0085 && data_v_1m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_lat=if(data_er_1m_fill>30.00 && data_er_1m_fill<=84.17 && data_pl_1m_fill>0.152 && data_pl_1m_fill<0.4677 &&
      data_ndom_1m<=2.25 && data_dgm_1m>1200 && data_dgm_1m<2700 && data_v_1m>-0.0085 && data_v_1m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_wiese=if(data_er_1m_fill>84.17 && data_pl_1m_fill<=0.152 && data_ndom_1m<0.07 && data_v_1m>-0.0085 &&
      data_v_1m<0.30 && data_ortho.green<210,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_geroell=if(data_er_1m_fill>88.46 && data_pl_1m_fill<0.138 && data_ndom_1m<0.07 && data_slope_1m<38.25 &&
      data_slope_1m>20.02 && data_v_1m<=-0.0085,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_fels=if(t_cat_geroell==0 && data_er_1m_fill>25.64 && data_pl_1m_fill<0.2783 && data_ndom_1m<0.28 &&
      data_v_1m>-0.1143 && data_v_1m<=-0.0085,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_final=if(t_cat_fels==1,1,if(t_cat_geroell==1,2,if(t_cat_wiese==1,3,if(t_cat_lat==1,4,if(t_cat_wald==1,5,0)))))"
r.null map=t_cat_final setnull=0
r.neighbors input=t_cat_final output=t_final method=mode size="5" --o
r.neighbors input=t_final output=t_final2 method=mode size="5" --o
r.null map=t_cat_final null=0
r.mapcalc "t_cat_neigh1=if(t_cat_final==0 && data_dgm_1m>650,t_final2,t_cat_final)"
r.neighbors input=t_cat_neigh1 output=t_cat_neigh2 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh2 output=t_cat_neigh3 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh3 output=t_cat_neigh4 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh4 output=t_cat_neigh5 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh5 output=t_cat_neigh6 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh6 output=t_cat_neigh7 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh7 output=t_cat_neigh8 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh8 output=t_cat_neigh9 method=mode size="3" --o
r.mapcalc "t_cat_neigh10=if(data_dgm_1m>650,t_cat_neigh9,-999)"
r.null map=t_cat_neigh10 setnull=-999
r.to.vect input=t_cat_neigh10 output=t_cat_vec featur=area --o
v.clean input=t_cat_vec output=t_clean1 tool=rmarea thresh=2000 --o
v.dissolve input=t_clean1 output=t_cat col=value --o
v.build map=t_cat option=build
v.generalize input=t_cat output=t_gen method=lang threshold=7.5 look_ahead=8 type=boundary --o --v -c
v.build map=t_gen option=build
v.generalize input=t_gen output=t_gen2 method=snakes alpha=0.2 beta=0.2 --o
v.build map=t_gen2 option=build
v.clean input=t_gen2 output=map_cat tool=rmarea thresh=2000 --o
v.out.ogr input=map_cat type=area layer=1 format=ESRI_Shapefile dsn=C:/Users/Armin/Documents/Diplomarbeit/export
      olayer=map_cat_25_v1_cut -e -c
#-- KARTE 1:25.000, Variante 2
g.region res=5
r.resamp.stats input=data_dgm_1m output=t_dgm_5m method=average --o
r.mapcalc "data_dgm_5m=if(t_dgm_5m!=0,t_dgm_5m*1,-999)"
r.resamp.stats input=data_dom_1m output=t_dom_5m method=average --o
r.mapcalc "data_dom_5m=if(t_dom_5m!=0,t_dom_5m*1,-999)"
r.resamp.stats input=data_er_1m_fill output=t_er_5m_fill method=average --o
r.mapcalc "data_er_5m_fill=if(t_er_5m_fill!=0,t_er_5m_fill*1,-999)"
r.resamp.stats input=data_pl_1m_fill output=t_pl_5m_fill method=average --o
r.mapcalc "data_pl_5m_fill=if(t_pl_5m_fill!=0,t_pl_5m_fill*1,-999)"
r.null map=data_pl_5m null=-999
r.mapcalc "data_pl_5m_fill=if(data_pl_5m==-999 && data_dgm_1m>650,tmp_pl_5m,data_pl_5m)"
r.null map=data_pl_5m setnull=-999
r.resamp.stats input=data_v output=t_v_5m method=median --o
r.mapcalc "data_v_5m=if(t_v_5m!=0,t_v_5m*1,-999)"
r.null data_v_5m setnull=-999
r.resamp.stats input=data_ortho.green output=t_green_5m method=average --o
r.mapcalc "data_green_5m=if(t_green_5m!=0,t_green_5m*1,-999)"
r.mapcalc "data_ndom_5m=data_dom_5m-data_dgm_5m"
r.slope.aspect elevation=data_dgm_5m slope=data_slope_5m --o
r.mapcalc "t_cat_wald=if(data_er_5m_fill<73.82 && data_pl_5m_fill<0.4755 && data_ndom_5m>2.25 && data_dgm_5m<2100 &&
      data_v_5m>-0.0085 && data_v_5m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_lat=if(data_er_5m_fill>30.00 && data_er_5m_fill<=84.17 && data_pl_5m_fill>0.152 && data_pl_5m_fill<0.4677 &&
      data_ndom_5m<=2.25 && data_dgm_5m>1200 && data_dgm_5m<2700 && data_v_5m>-0.0085 && data_v_5m<0.30,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_wiese=if(data_er_5m_fill>84.17 && data_pl_5m_fill<=0.152 && data_ndom_5m<0.07 && data_v_5m>-0.0085 &&
      data_v_5m<0.30 && data_ortho.green<210,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_geroell=if(data_er_5m_fill>88.46 && data_pl_5m_fill<0.138 && data_ndom_5m<0.07 && data_slope_5m<38.25 &&
      data_slope_5m>20.02 && data_v_5m<=-0.0085,1,0)"
r.mapcalc "t_cat_fels=if(t_cat_geroell==0 && data_er_5m_fill>25.64 && data_pl_5m_fill<0.2783 && data_ndom_5m<0.28 &&
      data_v_5m>-0.1143 && data_v_5m<=-0.0085,1,0)"
```

```
r.mapcalc "t_cat_final=if(t_cat_fels==1,1,if(t_cat_geroell==1,2,if(t_cat_wiese==1,3,if(t_cat_lat==1,4,if(t_cat_wald==1,5,0)))))"
r.null map=t_cat_final setnull=0
r.neighbors input=t_cat_final output=t_final method=mode size="5" --o
r.neighbors input=t_final output=t_final2 method=mode size="5" --o
r.null map=t_cat_final null=0
r.mapcalc "t_cat_neigh1=if(t_cat_final==0 && data_dgm_1m>650,t_final2,t_cat_final)"
r.neighbors input=t_cat_neigh1 output=t_cat_neigh2 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh2 output=t_cat_neigh3 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh3 output=t_cat_neigh4 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh4 output=t_cat_neigh5 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh5 output=t_cat_neigh6 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh6 output=t_cat_neigh7 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh7 output=t_cat_neigh8 method=mode size="3" --o
r.neighbors input=t_cat_neigh8 output=t_cat_neigh9 method=mode size="3" --o
r.mapcalc "t_cat_neigh10=if(data_dgm_1m>650,t_cat_neigh9,-999)"
r.null map=t_cat_neigh10 setnull=-999
r.to.vect input=t_cat_neigh10 output=t_cat_vec featur=area -s --o
v.clean input=t_cat_vec output=t_cat_clean tool=rmarea thresh=2000 --o
v.generalize -c input=t_cat_clean output=t_cat_final method=snakes alpha=0.2 beta=0.2 --o
v.build map=t_cat_final option=build
v.clean input=t_cat_final output=t_cat_clean2 tool=rmarea thresh=2000 --o
v.dissolve input=t_cat_clean2 output=map_cat col=value --o


#-- HÖHENSCHICHTLINIEN ABLEITEN
#-- 1:10.000
g.region res=2
v.to.rast input=t_cat_clean output=t_cat type=area column=value --o
r.mapcalc "t_dgm_fels_1=if(data_slope_2m<79,if(t_cat==1 || t_cat==2,data_dgm_2m,-999),-999)"
r.mapcalc "t_dgm_fels_2=if(t_cat==1 || t_cat==2,data_dgm_2m,-999)"
r.null t_dgm_fels_1 setnull=-999
r.null t_dgm_fels_2 setnull=-999
r.contour input=t_dgm_fels_1 step=10 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_fels_10 --o
r.contour input=t_dgm_fels_2 step=50 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_fels_50 --o
r.mapcalc "t_dgm_rest_1=if(data_slope_2m<79,if(t_cat!=1 && t_cat!=2,data_dgm_2m,-999),-999)"
r.mapcalc "t_dgm_rest_2=if(t_cat!=1 && t_cat!=2,data_dgm_2m,-999)"
r.null t_dgm_rest_1 setnull=-999
r.null t_dgm_rest_2 setnull=-999
r.contour input=t_dgm_rest_1 step=10 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_rest_10 --o
r.contour input=t_dgm_rest_2 step=50 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_rest_50 --o
#-- 1:25.000
g.region res=5
v.to.rast input=t_cat_clean output=t_cat type=area column=value --o
r.mapcalc "t_dgm_fels_1=if(data_slope_5m<76,if(t_cat==1 || t_cat==2,data_dgm_5m,-999),-999)"
r.mapcalc "t_dgm_fels_2=if(t_cat==1 || t_cat==2,data_dgm_5m,-999)"
r.null t_dgm_fels_1 setnull=-999
r.null t_dgm_fels_2 setnull=-999
r.contour input=t_dgm_fels_1 step=20 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_fels_20 --o
r.contour input=t_dgm_fels_2 step=100 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_fels_100 --o
r.mapcalc "t_dgm_rest_1=if(data_slope_5m<76,if(t_cat!=1 && t_cat!=2,data_dgm_5m,-999),-999)"
r.mapcalc "t_dgm_rest_2=if(t_cat!=1 && t_cat!=2,data_dgm_5m,-999)"
r.null t_dgm_rest_1 setnull=-999
r.null t_dgm_rest_2 setnull=-999
r.contour input=t_dgm_rest_1 step=20 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_rest_20 --o
r.contour input=t_dgm_rest_2 step=100 minlevel=10 maxlevel=10000 output=cont_rest_100 --o


#-- SCHUMMERUNG ABLEITEN
#-- 1:10.000
g.region res=2
r.shaded.relief map=data_dgm_2m shadedmap=data_shade_2m altitude=45 azimuth=315 zmult=1 scale=1
#-- 1:25.000
g.region res=5
r.shaded.relief map=data_dgm_5m shadedmap=data_shade_5m altitude=45 azimuth=315 zmult=1 scale=1


#-- FELSZEICHNUNG ERSTELLEN
#-- 1:10.000
g.region res=2
v.to.rast input=t_cat_clean output=t_cat type=area column=value --o
g.region res=1
r.param.scale input=data_dgm_1m param=planc size=5 output=t_fels_par_planc c_tol=0.01 --o
r.param.scale input=data_dgm_1m param=longc size=5 output=t_fels_par_longc c_tol=0.01 --o
r.mapcalc "t_fels_1=if(data_slope_2m>40 && (t_cat==1 || t_cat==2),1,if(data_slope_2m>50 && (t_cat!=1 || t_cat!=2)))"
r.neighbors input=t_fels_1 output=t_fels_2 method=mode size=7 --o
```

```
r.to.vect input=t_fels_2 output=t_fels_3 featur=area --o
v.clean input=t_fels_3 output=t_fels_4 tool=rmarea thresh=1000 --o
v.to.rast input=t_fels_4 output=t_fels_bereich_25 type=area column=value --o
r.mapcalc "map_fels_kanten_10=if(t_fels_bereich_25==1 && t_fels_par_planc >0.5,data_shade_2m+100,if(t_fels_bereich_25==1 &&
      t_fels_par_planc <-0.5,data_shade_2m+100,if(t_fels_bereich_25==1 && t_fels_par_longc <-0.5,data_shade_2m+100,0)))"
r.null map=map_fels_kanten_10 setnull=0
r.mapcalc "map_fels_10_1=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_2m>60 && t_fels_par_planc >0,(data_shade_2m+100)/2,0)"
r.mapcalc "map_fels_10_2=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_2m>50 && data_slope_2m<=60 &&
      t_fels_par_planc >0,(data_shade_2m+100)/2,0)"
r.mapcalc "map_fels_10_3=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_2m>45 && data_slope_2m<=50 &&
      t_fels_par_planc >0,(data_shade_2m+100)/2,0)"
r.mapcalc "map_fels_10_4=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_2m<=45 && t_fels_par_planc >0,(data_shade_2m+100)/2,0)"
r.null map=map_fels_10_1 setnull=0
r.null map=map_fels_10_2 setnull=0
r.null map=map_fels_10_3 setnull=0
r.null map=map_fels_10_4 setnull=0
r.mapcalc "map_fels2_10=if(t_fels_bereich_25==1 && t_cat!=1 && t_cat!=2,data_shade_2m,0)"
r.null map=map_fels2_10 setnull=0
#-- 1:25.000
g.region res=5
v.to.rast input=t_cat_clean output=t_cat type=area column=value --o
r.shaded.relief map=data_dgm_5m shadedmap=data_shade_5m altitude=45 azimuth=315 zmult=1 scale=1 --o
g.region res=2
r.param.scale input=data_dgm_1m param=planc size=5 output=t_fels_par_planc c_tol=0.01 --o
r.param.scale input=data_dgm_1m param=longc size=5 output=t_fels_par_longc c_tol=0.01 --o
r.mapcalc "t_fels_1=if(data_slope_5m>40 && (t_cat==1 || t_cat==2),1,if(data_slope_5m>50 && (t_cat!=1 || t_cat!=2)))"
r.neighbors input=t_fels_1 output=t_fels_2 method=mode size=7 --o
r.to.vect input=t_fels_2 output=t_fels_3 featur=area --o
v.clean input=t_fels_3 output=t_fels_4 tool=rmarea thresh=2500 --o
v.to.rast input=t_fels_4 output=t_fels_bereich_25 type=area column=value --o
r.mapcalc "map_fels_kanten_25=if(t_fels_bereich_25==1 && t_fels_par_planc >0.5,data_shade_5m+100,if(t_fels_bereich_25==1 &&
      t_fels_par_planc <-0.5,data_shade_5m+100,if(t_fels_bereich_25==1 && t_fels_par_longc <-0.5,data_shade_5m+100,0)))"
r.null map=map_fels_kanten_25 setnull=0
r.mapcalc "map_fels_25_1=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_5m>60 && t_fels_par_planc >0,(data_shade_5m+100)/2,0)"
r.mapcalc "map_fels_25_2=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_5m>50 && data_slope_5m<=60 &&
      t_fels_par_planc >0,(data_shade_5m+100)/2,0)"
r.mapcalc "map_fels_25_3=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_5m>45 && data_slope_5m<=50 &&
      t_fels_par_planc >0,(data_shade_5m+100)/2,0)"
r.mapcalc "map_fels_25_4=if(t_fels_bereich_25==1 && data_slope_5m<=45 && t_fels_par_planc >0,(data_shade_5m+100)/2,0)"
r.null map=map_fels_25_1 setnull=0
r.null map=map_fels_25_2 setnull=0
r.null map=map_fels_25_3 setnull=0
r.null map=map_fels_25_4 setnull=0
r.mapcalc "map_fels2_25=if(t_fels_bereich_25==1 && t_cat!=1 && t_cat!=2,data_shade_5m,0)"
r.null map=map_fels2_25 setnull=0
```

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Armin Klauser
Geburtsdatum:	17.10.1984
Geburtsort:	Bozen, Italien
Staatsbürgerschaft:	Italienisch

Bildungsweg

1989 - 1994:	Volksschule, Bozen
1994 - 1997:	Mittelschule, Bozen
1997 - 2003:	Oberschule für Geometer *P. Anich* in Bozen, Fachrichtung Vermessungswesen
2003 - 2009:	Universitätsstudium an der Technischen Universität Wien (TU Wien) Fachrichtung: Vermessung und Geoinformation Studienzweig: Geoinformation

Titel

2003:	Geometer (Matura)
2006:	Staatliche Geometerprüfung (Italien)
2009:	Dipl. Ing. für Vermessungswesen