



MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen
und Gräben mit Airborne Laserscanning Daten“

verfasst von / submitted by

Bastian Ritzberger BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium
Kartographie und Geoinformation

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	xiii
Kurzfassung	xiv
Abstract	xv
Vorwort	xvi
1 Einleitung	1
2 Airborne Laserscanning als Basis der Objektdetektion	7
2.1 Funktionsweise des Laserscannings	8
2.1.1 Messmethoden	8
2.1.2 Ablenkung durch Spiegel	9
2.2 Airborne Laserscanning	10
2.2.1 Komponenten	11
2.2.2 Laserstrahl	12
2.2.3 Wellenform und Mehrfachechos	14
2.2.4 Datenverarbeitung	16
2.3 Weiterverarbeitung in ein Digitales Geländemodell.....	17
2.3.1 Definitionen	17
2.3.2 Digitale Höhendaten	18
2.3.3 Filtering	19
2.4 Anwendungsgebiete von Airborne Laserscanning	21
3 Methoden der Objektdetektion aus Airborne Laserscanning Daten	23
3.1 Digitale Geländeanalyse	23
3.2 Visualisierung von Geländedaten	26
3.2.1 Schattiertes Reliefbild beziehungsweise Schummerung	27

3.2.2	Neigung (Slope).....	28
3.2.3	Ausrichtung (Aspect).....	30
3.2.4	Krümmung (Curvature).....	31
3.2.5	Trendbereinigung und Lokales Reliefmodell.....	33
3.2.6	Weitere Visualisierungsmöglichkeiten.....	34
3.3	Kantendetektion.....	36
3.3.1	Krümmung (Curvature).....	36
3.3.2	Faltung (Convolution).....	36
3.4	Bildanalyse.....	39
3.4.1	Klassifikation.....	39
3.4.2	Überwachte Klassifikation.....	40
3.4.3	Unüberwachte Klassifikation.....	40
3.4.4	Pixel- und objektbasierte Klassifikation.....	41
3.4.5	Methoden der Klassifizierung.....	42
3.5	Beispiele für die Verwendung der dargestellten Methoden.....	44
3.5.1	Automatisierte Detektion von möglichen Damm Gebieten durch digitale Geländeanalyse.....	44
3.5.2	Visualisierung von Bodendenkmälern durch Digitale Geländemodelle.....	45
3.5.3	Automatisierte Detektion von Geländebruchkanten mit Airborne Laserscanning Daten.....	46
3.5.4	Automatisierte Detektion von Bodendenkmälern durch objektorientierte Bildklassifikation.....	49
3.5.5	Automatisierte Detektion von Landformen durch objektorientierte Bildklassifikation.....	50
4	Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben.....	53
4.1	Geländekleinformen im Kontext der österreichischen Karten.....	53
4.1.1	Definitionen.....	53

4.1.2	Böschungen, Dämme und Gräben in den österreichischen Karten	57
4.1.3	Digitales Landschaftsmodell von Österreich.....	62
4.2	Internationaler Vergleich im Bereich der Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben	64
4.3	Untersuchungsgebiet.....	67
4.4	Daten.....	69
4.5	Softwarewahl	71
4.6	Parameter für die Detektion.....	72
4.7	Methodik.....	75
4.8	Profile.....	77
4.9	Visualisierungen des Untersuchungsgebiets.....	80
4.9.1	Schummerung.....	80
4.9.2	Neigung	81
4.9.3	Krümmung.....	82
4.9.4	Standardabweichung.....	83
4.10	Rasterbearbeitung.....	85
4.10.1	Filtern, Nachbarschaftsbeziehungen.....	86
4.10.2	Reklassifizierung	87
4.10.3	Raster verbinden	89
4.10.4	Einteilung von fließenden Gewässern, Verkehr und Rest.....	92
4.11	Kantendetektion	94
4.11.1	Vektorisierung (Polygone)	94
4.11.2	Löcher schließen.....	95
4.11.3	Nach Länge und Fläche selektieren.....	95
4.11.4	Maske der Krümmung.....	95
4.11.5	Ausdünnen.....	96

4.11.6	Vektorisierung (Linien)	96
4.12	Vektorbearbeitung	98
4.12.1	Detektierte Böschungen auf Kantenbereiche reduzieren.....	98
4.12.2	Räumlich verbinden.....	99
4.12.3	Zusammenführen und Höheninformation berechnen	100
4.12.4	Durchschnittliche Neigung der direkten Umgebung	101
4.12.5	Mittellinien-Berechnung und Entfernen der Siedlungsbereiche	102
4.13	Interpretation der Detektion	105
5	Zusammenfassung	111
5.1	Fragestellungen	111
6	Ausblick	115
6.1	Keilschraffen-Erzeugung und manuelle Nachbearbeitung	115
	Literatur	117
	Online Literatur.....	123
	Abkürzungsverzeichnis	126
	Anhang.....	127

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Gesuchte Geländekleinformen. Links: Böschung entlang einer Autobahn. Mitte: Graben entlang eines Baches. Rechts: Damm entlang eines Feldes. Quelle: eigene Erhebung.....	3
Abbildung 2, Messmethoden. Links: Lichtlaufzeitmessung, Rechts: Triangulation. Quelle: Beraldin et al. 2010: 3.....	8
Abbildung 3, Scan-Mechanismen. Quelle: Beraldin et al. 2010: 16.....	9
Abbildung 4, Funktionsweise von Airborne Laserscanning. Quelle: Beraldin et al. 2010: 20.....	10
Abbildung 5, On-board Komponenten eines Airborne Laserscanning Systems. Quelle: Beraldin et al. 2010: 22.....	11
Abbildung 6, Schwad und Footprint. Quelle: Beraldin et al. 2010: 25.....	13
Abbildung 7, Messverfahren und erhaltene Signale beim Auftritt auf einen Baum. Quelle: Harding 2018: 206.....	14
Abbildung 8, Datenverarbeitungsschema für ALS. Quelle: Beradin et al. 2010: 33.....	16
Abbildung 9, DSM (DOM) und DTM (DGM). Quelle: Pfeifer und Mandlbürger 2018: 352.....	17
Abbildung 10, Methoden, um Höhendaten zu strukturieren. Quelle: online unter http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/giswb/vol2/cp3/3-1.gif	18
Abbildung 11, Robuste Interpolation. a: originales Oberflächenmodell. b: grobes DOM. c: durch robuste Interpolation gefiltertes DGM. d: genaueres DOM, mit Autos. e: finales DGM. Quelle: Pfeifer et al. 2001.....	20
Abbildung 12, Hauptaufgaben der Digitalen Geländemodellierung. Quelle: Hutchinson, Gallant 2000: 30.....	24
Abbildung 13, Höhenwinkel bei der Erstellung einer Schummerung. Quelle: ArcGIS.....	27
Abbildung 14, kombiniertes, schattiertes Reliefbild. Links: quadratischer Wurzelbereich aus 16 verschiedenen Richtungen mit 45° Höhenwinkel. Rechts: RGB-Bild aus	

drei Richtungen (Rot: 315°, Grün 0°, Blau 45° Azimuth), 45° Höhenwinkel. Quelle: Kokalj et al. 2013: 106.....	28
Abbildung 15, Beispiel für die Berechnung der Neigung. Quelle: ArcGIS.....	29
Abbildung 16, Profilkrümmung im Gelände. A: konvexe Form, geringe Fließgeschwindigkeit, dadurch negativer Krümmungswert. B: konkave Form, beschleunigte Fließgeschwindigkeit, dadurch positiver Krümmungswert. C: lineare Oberfläche, Krümmungswert gleich 0. Quelle: ArcGIS.....	32
Abbildung 17, schematische Darstellung des Trend Removal Verfahrens. Quelle: Kokalj et al. 2013: 107	33
Abbildung 18, Berechnungsprinzipien Skyview Faktor (oben), positive Openness (Mitte), negativ Openness (unten). Quelle: Hesse 2016: 117	34
Abbildung 19, Schärfung eines Bildes durch Laplace-Filter. Quelle: Sablatnig und Zambanini: 49.....	37
Abbildung 20, Merkmalsraum zur Multispektral-Klassifizierung. Quelle: Albertz 2009: 156	40
Abbildung 21, Abgrenzung eines Moores. Links: Darstellung durch Landsat. Mitte: pixelbasiert. Rechts: Segmentierung und objektorientiert. Erkennbar ist sofort, dass bei der pixelbasierten Methode Ausreißer entstehen, da die Lage und Nachbarschaft ignoriert wird. Quelle: Blaschke 2000: 161	42
Abbildung 22, Minimum-Distance-Verfahren. Quelle: Albertz 2009: 160	43
Abbildung 23, Damm-Gebiet-Detektion von Wimmer Pfeifer und Hollaus 2019: 3	44
Abbildung 24, Bodendenkmalsuche in Hessen. von oben nach unten: Hügelgräberfeld, Landwehr und Meilerplätze, Ackerterrassen, Ringwall, römischer Gutshof. Schummerungen von links nach rechts: Schräglichtschummerung aus NW 30° Höhe, Gelände zweifach überhöht; Schräglichtschummerung aus SW mit 30° Höhe zweifach überhöht; Böschungsschummerung, Senkrechtbeleuchtung, 20- fach überhöht. Quelle: Gertloff 2011: 90.....	45
Abbildung 25, Geländebruchkanten-Detektion nach Brügelmann (2000: 113). Von links nach rechts: Krümmung (Curvature); klassifizierte Gebiete aus Krümmung; Verdünnung der Flächen; Raster-zu-Vektor.....	47

Abbildung 26, Detektion von Bruchkanten durch die Verschneidung von Ebenen aus ALS-Punktwolken. Links: Geländekante in XY-Ebene; Rechts: Ebenenpaaren mit 3D-Schnittgeraden und 3D-Punkten. Quelle: Briese 2004: 26.....	48
Abbildung 27, Klassifikationsergebnis Grabhügel mit eCognition. Grüne Kreise sind idealtypische Formen. Quelle: Meyer 2015.....	50
Abbildung 28, Darstellung eines Gebietes durch eine Schummerung eines DGMs (A) sowie durch eine geomorphometrische Karte (objektorientierte Bildklassifikation der Landschaft, B). Quelle: Jasiewicz und Stepinski 2013: 155	51
Abbildung 29, Aufbau eines Grabens. Quelle: Spektrum. Online unter: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/graben/6189 (27.05.2020)	53
Abbildung 30, charakteristische Dammquerschnitte. a: Eisenbahndamm, b: Straßendamm, c: Staudamm, d: Kanaldamm, e: Deich. Quelle: Striegler und Werner 1969: 14.....	54
Abbildung 31, Böschungsformen. Quelle: Geodata Zone. Online unter: http://www.geodz.com	55
Abbildung 32, Dämme und Gräben in den analogen österreichischen Karten. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.....	57
Abbildung 33, Graben und Damm in der ÖK50. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.....	57
Abbildung 34, Strichschraffen aus dem Zeichenschlüssel des KM50. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.....	58
Abbildung 35, Keilschraffen in der KM50. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.....	61
Abbildung 36, Aufbau DLM. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.....	62
Abbildung 37, manuelle Auswertung einer Böschungssituation in Schleswig-Holstein. Quelle: Carstensen 2020	66
Abbildung 38, Übersicht über das Untersuchungsgebiet. Oben: Orthophoto (roter Rahmen), unten: Geländemodell (roter Rahmen). Rechts oben jeweils die Orientierung mit einer Österreich-Karte (roter Rahmen = Untersuchungsgebiet).	

Daten: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Quelle: eigene Darstellung.....	68
Abbildung 39, Triangulierungsblatteinteilung. Quelle: BEV Blattschnitte	70
Abbildung 40, schematische Darstellung des praktischen Workflows. Quelle: eigene Darstellung.....	76
Abbildung 41, schattiertes Reliefbild aus dem Untersuchungsgebiet in Asten, Österreich. Links: Azimut 315 Grad, Rechts: Azimut 135 Grad. A: Graben eines Baches, B: Straßendamm, C: Böschung. Quelle: eigene Darstellung.....	80
Abbildung 42, Neigung aus dem Untersuchungsgebiet in Asten, Oberösterreich. A: Graben eines Baches, B: Straßendamm, C: Böschung. Quelle: eigene Darstellung.....	81
Abbildung 43, Profilkrümmung aus dem Untersuchungsgebiet in Asten, Oberösterreich. A: Graben eines Baches, B: Straßendamm, C: Böschung. Helle Werte bedeuten eine konkave Form, gleichbedeutend mit der Unterkante. Dunkle Werte bedeuten konvex, gleichbedeutend mit der Oberkante. Violette Gebiete deuten auf eine lineare Oberfläche hin. Quelle: eigene Darstellung	82
Abbildung 44, Neigung (links) und Profilkrümmung (rechts) im Untersuchungsgebiet im Mühlviertel, Oberösterreich. Anhand der Neigung erkennt man eine plastische Wiedergabe des Geländes ähnlich zu einer Schummerung, der Höhenunterschied ist deutlich erkennbar. Bei der Profilkrümmung werden nur konkave und konvexe Formen, also Änderungen in der Neigung dargestellt. Steile, aber gleichbleibende Neigung wird in der Profilkrümmung violett dargestellt, was bedeutet, dass die Form dieser Zelle im Vergleich zu den Nachbarzellen linear ist. Quelle: eigene Darstellung.....	83
Abbildung 45, Neigung (oben) und Standardabweichung (5x5 Window, unten) in einer steileren Region im Untersuchungsgebiet. Quelle: eigene Darstellung.....	84
Abbildung 46, unterschiedliche Filter (Moving Window, immer Mittelwert des Fensters) der Krümmung entlang einer Böschung. Oben links: ohne; Oben rechts: 3x3; Unten links: 5x5; Unten rechts: 10x10. Quelle: eigene Darstellung.....	86
Abbildung 47, Einteilung des Untersuchungsgebietes in flache (grün) und bergige (rot) Regionen. Eine grüne Zelle hat in einer Nachbarschaft von 50x50 Zellen	

zumindest 500 Nachbarzellen, die eine Neigung unter 7,5° aufweisen, rote nicht. Quelle: eigene Darstellung.....	88
Abbildung 48, Zellenstatistik von verschiedenen Rastern mit der Statistik SUM. Quelle: ArcGIS.....	89
Abbildung 49, Verbindung der Rasterbearbeitung, Beispiel aus dem UG. a: Lage in der ÖK50; b: flache Nachbarzellen (grün = mehr als 500 Nachbarzellen in 50x50 Nachbarschaft unter 7,5 Grad; rot = unter 500); c: flache Nachbarzellen aus b + Gebiete (schwarz) mit hoher Standardabweichung und unter 3000 m² Fläche; d: Neigung zwischen 12,5 und 60 Grad (braun); e: Gebiete, die den Wert „2“ aufweisen, also eine ausreichende Neigung haben und entweder ausreichend flache Nachbarzellen oder eine sehr hohe Standardabweichung (schwarz). Kleine Flächen (unter 300m² und unter 100 Meter Länge) wurden gelöscht. Quelle: eigene Darstellung.....	90
Abbildung 50, Ablauf der Rasterbearbeitung. Quelle: eigene Darstellung.....	91
Abbildung 51, Situation bei einer Kreuzung eines Bachs und einer Straße (Überführung). Oben, roter Kreis: Vermischung einer Verkehrs-Böschung mit einer Bach-Böschung. Unten: Aufteilen der unterschiedlichen Böschungen sowie "Erase" (Löschen) der Kreuzungsgebiete. Quelle: eigene Darstellung.....	93
Abbildung 52, Kantendetektion. a: Böschungen der Kategorie REST (weder an Bächen noch an Straßen); b: Vektorerzeugung (Polygon) aus Raster; c: Löcher schließen (erkennbar rechts oben); d: Löschen von kleineren Flächen (Minimum 100 m Länge und 300 m² Fläche; e: Krümmungs-Maske aus d; f: Klassifizierung von Ober- und Unterkante aus der Krümmung; g:Ausdünnen der Kanten auf eine Breite von einer Zelle; h: Vektorerzeugung (Linie) aus g. Quelle: eigene Darstellung.....	97
Abbildung 53, Situation einer Böschung mit Teilen ohne Kanten. Links: Böschung mit Teilen; Rechts: Böschung ohne Teile, durch Buffer-Methode gelöscht. Blaue Linien: Oberkante, Rote Linie: Unterkante, Hintergrund: Neigung. Quelle: eigene Darstellung	99
Abbildung 54, Ablauf der Vektorbearbeitung. Quelle: eigene Darstellung	104

Abbildung 55, Damm im Untersuchungsgebiet. Links: Keilschraffen in der ÖK50. Rechts: automatisierte Detektion. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung	106
Abbildung 56, Böschung im Untersuchungsgebiet. Links: Keilschraffe in der ÖK50. Rechts: automatisierte Detektion. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung	106
Abbildung 57, Damm im Untersuchungsgebiet, der die Höhenanforderung nicht erfüllt. Links: Damm in der ÖK50 dennoch eingezeichnet, Rechts: Profil des Dammes. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung.	107
Abbildung 58, Böschung im Untersuchungsgebiet, die alle Anforderungen erfüllt, jedoch nicht in der ÖK50 eingezeichnet ist. Links: automatisierte Detektion der Böschung. Rechts: Profil der Böschung. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung	107
Abbildung 59, Problemfall einer Böschungssituation mit vielen Unebenheiten und nicht nur einer Ober- und Unterkante. Links: automatisierte Detektion der Böschung. Türkis: Oberkanten, Gelb: Unterkanten, Schwarz: Profillinie. Rechts: Profil. Quelle: eigene Darstellung.....	108
Abbildung 60, Problemfall einer Böschungssituation mit Vermischungen mehrerer Fälle. Oben: automatisierte Detektion der Böschungen. Schwarz: Profillinie; Unten: Profil. Quelle: eigene Darstellung	109
Abbildung 61, Keilschraffen-Erzeugung. Oben links: Damm. Unten links: Graben. Rechts: Böschung. Quelle: eigene Darstellung	116
Abbildung 62, Schritt 1: Grundregeln erstellen und Raster zusammenführen. Glättung des DGMs, Neigung, Standardabweichung, Reklassifizierung.	127
Abbildung 63, Fortsetzung Schritt 1: Grundregeln erstellen.....	128
Abbildung 64, Schritt 2: Vermischungen vermeiden. Blaue Inputs (Verkehr, Bäche und Rahmen des Gebiets) wurden aus dem DLM des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen entnommen.	129
Abbildung 65, Schritt 3: Kantenberechnung durch Krümmung, Reklassifizierung und Ausdünnung	130

Abbildung 66, Oben: Schritt 4: Grundflächen auf Kantenbereiche reduzieren. Flächen ohne Kanten sollen gelöscht werden. Unten: Schritt 5: Abgleich der Längen der Kanten mit den Flächen.	131
Abbildung 67, Schritt 6 und 7: Höhenberechnung durch Differenzberechnung der Kanten sowie Unterscheidung von flachen und nichtflachen Gebieten.	132
Abbildung 68, Oben: Schritt 8: Neigung der Umgebungszellen berechnen. Unten: Schritt 9: Tabelle mit Attributen erweitern und Kleinformen entfernen, wo die Neigung der Nachbarzellen zu hoch ist.....	133
Abbildung 69, Oben: Schritt 10: Einfügen der Mittellinien-Länge. Diese wurde aus Lizenzgründen in ArcMap erstellt. Unten: Schritt 11: Abgleich der Mittellinien-Länge mit Ober- und Unterkanten	134
Abbildung 70, Oben: Ober- und Unterkanten Berechnung durch Teilen der Polygone entlang der Mittellinie in FME, Unten: Weg, um Verästelungen von Linien zu löschen (Generalisierung) in FME.....	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1, Fragestellungen und Methoden. Quelle: eigene Darstellung	6
Tabelle 2, Zusammenfassung der Visualisierungsmöglichkeiten. Unterstrichen sind die in der Arbeit besonders relevanten.	35
Tabelle 3, Parameter für die Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben. Quelle: eigene Darstellung	74
Tabelle 4, Profile der zu detektierenden Geländekleinformen Damm, Graben und Böschung. Quelle: eigene Darstellung.....	78
Tabelle 5, Profile zweier unklarer Situationen. Quelle: eigene Darstellung	79

Kurzfassung

Mit der Einführung des fluggesteuerten Airborne Laserscannings Ende der 1980er Jahre wurde die Geländeaufnahme durch bislang unerreichte Datendichten von mehreren Punkten pro m², einer Höhengenaugigkeit von ungefähr zehn Zentimeter und einer uneingeschränkten Datenaufnahme im Wald revolutioniert. Neben einer Reihe an Anwendungsmöglichkeiten – wie die Visualisierung von Bodendenkmälern in der Archäologie, der Kartierung von Korridoren und Leitungen, die sich im Wald befinden oder der Ausweisung von Überschwemmungsflächen – lassen sich mittlerweile hochgenaue Geländemodelle aus ALS-Daten ableiten. Diese Modelle werden in der vorliegenden Masterarbeit verwendet, um die Geländekleinformen Böschung, Damm und Graben automatisiert zu detektieren. Die gewonnenen Daten sollen im weiteren Verlauf als Grundlage für die Aufnahme in das Digitale Landschaftsmodell von Österreich dienen, woraus in Zukunft die österreichischen Karten automatisch abgeleitet werden. Neben den vielen Möglichkeiten, Objekte automatisch aus Geländemodellen zu detektieren, ergab eine intensive Literaturrecherche jedoch keinen vergleichbaren Ansatz, Böschungen, Dämme und Gräben eines ganzen Landes automatisiert zu erfassen. Die praktische Bewältigung der Problemstellung erfolgt in vier Phasen: Unterschiedliche Visualisierungen (1) erlauben einen ersten Überblick über die Daten und sind zudem als Ausgangsdaten für die folgende Rasterbearbeitung (2) relevant, in der Pixel bestimmten Schwellenwerten entsprechen müssen, um als Kleinform in Frage zu kommen. Danach werden bei der Kantendetektion (3) Ober- und Unterkanten detektiert, die vor allem für die spätere Höhenberechnung relevant und zudem ein klassisches Merkmal der gesuchten Formen sind. In der abschließenden Vektorbearbeitung (4) werden Höhen und Längen abgeglichen und die Formen generalisiert. Alle Schritte wurden in einem vorab definierten Untersuchungsgebiet in Österreich mit dem Model Builder aus ArcGIS umgesetzt und können im weiteren Verlauf für ganz Österreich durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine automatisierte Detektion ohne manuelle Nachbearbeitung nicht gänzlich möglich ist, eine hohe Trefferquote jedoch gewährleistet werden kann. Probleme entstehen vor allem dort, wo sich mehrere Formen vermischen oder Unebenheiten in der geneigten Fläche vorkommen, wodurch die Genauigkeit der Höhenberechnung aufgrund von mehreren Kanten nachlässt. Ein zukünftiges Forschungsfeld ist die automatisierte Erstellung von Keilschraffen mit den gewonnenen Daten.

Abstract

With the introduction of flight-controlled airborne laser scanning at the end of the 1980s, terrain surveying was revolutionized with previously unattainable data densities of several points per m², a height accuracy of around ten centimeter and unrestricted data recording in the forest. In addition to a range of possible applications – such as the visualization of monuments in archeology, the mapping of corridors and lines in the forest or the designation of flood plains – highly accurate digital terrain models can now be derived from ALS data. These models are used in the present master thesis to automatically detect the small terrain forms of embankments, dams and ditches. The data obtained will later serve as basis for inclusion in the digital landscape model of Austria, from which the Austrian maps will be automatically derived in the future. Despite the many possibilities of automatically detecting objects from terrain models, an intensive literature research did not reveal a comparable approach to automatic recording of embankments, dams and ditches of an entire country. The practical handling of the problem takes place in four phases: Different visualizations (1) allow an initial overview of the data and are also relevant as output data for the following raster processing (2), where pixels must meet certain threshold values in order to be considered as a small form. Then the edge detection (3) detects the upper and lower edges, which are primarily relevant for the subsequent height calculation and are also a classic feature of shapes we are looking for. In the final vector processing (4), heights and lengths are compared and the shapes are generalized. All steps were implemented in a previously defined study area in Austria with the Model Builder from ArcGIS and can in the further course be carried out throughout Austria. The results show that automated detection is not entirely possible without manual post-processing, but that a high hit rate can be guaranteed. Problems arise where several shapes are mixed or where there is unevenness in the inclined surface, which decreases the accuracy of the height calculation due to several edges. The future research field will be the automated creation of hachures with the data obtained.

Vorwort

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, mit Hilfe von Airborne Laserscanning Daten und eines Geoinformationssystems einen Algorithmus zu erstellen, der die Geländekleinformen Böschung, Damm und Graben automatisch detektieren kann. Dies wurde aus zwei Gründen umgesetzt: Zum einen, um die Abschlussanforderungen des 2018 begonnenen Masterstudiums Kartographie und Geoinformation der Universität Wien zu erfüllen, zum anderen um den Detailgrad des digitalen Landschaftsmodells sowie der österreichischen Karten zu erweitern. Nach meinem Sommerpraktikum im Jahr 2019 am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in der Abteilung Landschaftsinformation, wo ich erstmals mit dem digitalen Landschaftsmodell in Berührung kam, ermöglichte mir das erwähnte Amt im darauffolgenden Sommer 2020 die Chance, mich mit dieser spannenden Thematik in Form eines sechsmonatigen Praktikums in der Abteilung Kartographie auseinanderzusetzen. Die Möglichkeit, mit hochaktuellen und akkuraten Daten seine Masterarbeit abzuwickeln und im besten Fall ein Produkt zu erhalten, das auch dem Bundesamt im weiteren Verlauf von Nutzen sein kann, ist ein Privileg, für welches ich mich bei allen Kollegen und Mitarbeiter bedanken möchte. Besonderer Dank gilt dem stellvertretenden Leiter der Abteilung Kartographie, Gernot Felfernig, der mich durch die ganze Arbeit begleitet und mir viele wichtige Inputs gegeben hat. Zudem möchte ich mich bei meinem Universitäts-Betreuer Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl herzlich für die reibungslose Zusammenarbeit bedanken. Großes Dankeschön auch an meine Schwester Celia Ritzberger, die sich um das Lektorat dieser Arbeit gekümmert hat, an meine Eltern und an meine Großmutter, die mich immer in jeglicher Form unterstützt haben und besonders an meine langjährige Freundin Lisa, die all meine Sorgen wie ein Schwamm aufsog und immer für mich da war, wenn es mal nicht so lief.

Gendererklärung: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Masterarbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

1 Einleitung

Durch den sprunghaften Anstieg der Nachfrage nach datenverarbeitungsfähigen, geometrisch exakten und in einem einheitlichen Raumbezug definierten Geodaten hat sich die Generierung und Weiterverarbeitung dieser Daten in den letzten Jahren enorm verändert. In früheren Jahren wurden durch topographische Landesaufnahmen vorwiegend die Erstellung und Fortführung kartographischer Werke sichergestellt, heute werden alle möglichen Objekte als eigenständige Produkte angeboten und einzeln analysiert und weiterverarbeitet. (vgl. Paul 1997: 260)

Im Zuge dieser Entwicklung wurden am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Österreich nicht nur eine Reihe an Kartographischen Modellen (KM) unterschiedlichen Maßstabs erstellt, sondern es wird derzeit auch ein Digitales Landschaftsmodell (DLM) aufgebaut. Dieses spiegelt das Abbild der Erdoberfläche maßstabslos und in Vektorform wider. Es soll den Inhalt des österreichischen Grundkartenwerkes (ÖK50) abdecken. (vgl. Paul 1997: 261f) Während in der ÖK50 Kleinformen wie Böschungen, Dämme oder Gräben – zum Beispiel an Straßen oder Flüssen – mit einer eigenen Signatur vorhanden sind, sind diese im DLM bisher noch nicht erfasst worden und es dienen lediglich Höhenlinien und Höhenkoten als Geländeinformationen.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich auf der einen Seite mit den Möglichkeiten von Airborne Laserscanning Daten in Bezug auf Objektdetektionen, auf der anderen Seite mit der Erstellung eines Algorithmus zur automatisierten Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben. Die gesuchten Kleinformen kommen in der Natur unscheinbar in einer hohen Anzahl vor und sind deshalb per Hand aufwendig zu digitalisieren, weshalb sich eine automatisierte Detektion des derzeitigen und auch zukünftigen Zustandes empfiehlt. Die gewonnenen Daten sollen in das DLM einfließen, woraus in naher Zukunft neue, digital abgeleitete Karten entstehen. Die Informationsdichte wird durch die detektierten Geländekleinformen erweitert, zudem können die Formen auch als eigenständiges Produkt angeboten werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Weg zur automatisierten Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben zu finden. Dazu müssen Parameter definiert werden, ab

wann diese Geländekleinformen als solche bezeichnet und in die Geodaten aufgenommen werden können. Somit wird im Erstellungsprozess bereits auf die Generalisierung der Daten eingegangen. Zudem müssen die Methoden der automatisierten Detektion miteinander verglichen werden, um die effizienteste Methode hinsichtlich dieser Geländekleinformen herauszufinden.

Die automatische Detektion von Objekten jeglicher Art ist seit den hochauflösenden Satellitenbildern sowie der Gewinnung von detaillierten Punktwolken durch die Airborne Laserscanning (ALS) Methode gang und gäbe. Airborne und terrestrische Laserscanner erfassen die Geometrie sowie teilweise die Textur der sichtbaren Erdoberfläche. Diese Systeme arbeiten kontaktlos via Laserstrahlen und erstellen quantitative 3D-Punktwolken von einer bestimmten Oberfläche mit einer geringen Messunsicherheit. (vgl. Beraldin et al. 2010: 1) Durch Airborne Laserscanning automatisch gewonnene Daten besitzen eine besonders hohe Messpunktdichte von mehreren Punkten pro m² sowie eine Höhengenaugigkeit von unter zehn Zentimeter, wodurch äußerst detailreiche Geländehöhenmodelle abgeleitet werden und in den verschiedensten Bereichen angewandt werden können. Der Vorteil von Airborne Laserscanning Daten im Vergleich zu Satellitenbildern ist, dass das Laserlicht in der Lage ist, durch kleine Öffnungen in der Vegetationsdecke bis zum Boden zu gelangen. (vgl. Mandlbürger et al. 2009: 89) Das erste Hauptkapitel beschäftigt sich im Detail mit Airborne Laserscanning und deren Ableitung in digitale Geländemodelle.

Die digitale Geländeanalyse aus Airborne Laserscanning zählt laut Zhou, Lees und Tang (2008: 3) zu „einer der aktivsten Forschungsgruppen der Geoinformation“. Zu ihr zählen verschiedene Methoden der Objektdetektion, welche in Kapitel 3 vorgestellt werden. Eine Methode ist die Visualisierung von Geländedaten. Diese setzt sich mit der realistischen Wiedergabe von Oberflächen und Beleuchtungsquellen auseinander (vgl. Kokalj et al. 2013: 101f) und wird vor allem dazu verwendet, die Analyse von Geländemodellen zu unterstützen sowie um die Daten zu validieren (vgl. Hutchinson und Gallant 2000: 29). Vor allem in der Archäologie wird die Detektion durch Visualisierung von Objekten in den letzten Jahren vermehrt eingesetzt. Durch Airborne Laserscanning können unbekannt, in Waldgebieten gelegene Bodendenkmäler detektiert werden (vgl. Gertloff 2011: 86).

Eine weitere Methode, die im Zuge dieser Forschungsarbeit von großer Bedeutung ist, ist die Detektion von Geländekanten aus digitalen Geländemodellen. „Kanten kann man grob als jene Orte im Bild beschreiben, an denen sich die Intensität auf kleinem Raum und entlang einer ausgeprägten Richtung stark ändert. Je stärker sich die Intensität ändert, umso stärker ist auch der Hinweis auf eine Kante an der entsprechenden Stelle“ (Sablatnig und Zambanini 2013: 49). Kanten haben in dieser Arbeit vor allem deshalb eine große Bedeutung, weil sie für die gesuchten Formen ein notwendiger Parameter sind. Jede Böschung, jeder Damm und jeder Graben besitzt natürlich oder künstlich eine ausgeprägte Ober- oder Unterkante, wodurch dieses Kriterium eindeutig und ausschlaggebend ist.

Die Bildanalyse ist ebenfalls eine Methode, um Objekte aus Airborne Laserscanning Daten zu detektieren. Als Bildanalyse oder auch systematische Analyse des Bildinhaltes versteht man im Bereich der Geoinformation jene Verfahrensweise, welche die in den Luft- oder Satellitenbildern enthaltenen unterschiedlichen Informationen in einzelne Elemente zerlegt (analysiert) (vgl. Albertz 2009: 143). Einige Ansätze der Bildanalyse werden in dieser Arbeit eine wichtige Rolle spielen.



Abbildung 1, Gesuchte Geländekleinformen. Links: Böschung entlang einer Autobahn. Mitte: Graben entlang eines Baches. Rechts: Damm entlang eines Feldes. Quelle: eigene Erhebung

Abbildung 1 zeigt die gesuchten Geländekleinformen, wie sie in der Natur vorkommen. Diese Bilder wurden vom Autor dieser Arbeit aufgenommen und befinden sich direkt im Untersuchungsgebiet, das im späteren Verlauf noch detaillierter beschrieben wird. Die

Geländekleinformen, die in der Arbeit enthalten sein sollen, sind Böschungen, Dämme und Gräben. Alle drei Formen wurden früher von den Topographen im Feld per Hand gezeichnet. Böschungen sind Formen, die klare Ober- und Unterkanten aufweisen und sich von ihrer Umgebung aufgrund einer größeren Geländeneigung unterscheiden. Dämme und Gräben sind im Grunde nur zwei Böschungen, die zusammengehören. Alle drei Formen haben gemeinsam, dass sie in den analogen österreichischen Karten derzeit mit sogenannten Keilschraffen geführt werden. Kapitel 4.1 gibt einen tieferen Einblick in Geländekleinformen im Kontext der österreichischen Karten.

Vorweg sei gesagt, dass es zwar genügend bestehende Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der automatisierten Objektdetektion gibt, es jedoch zum Zeitpunkt dieser Erstellung keinen Ansatz in der Literatur gibt, der sich mit der automatisierten Detektion von Geländekleinformen beschäftigt. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz ist also in diesem Forschungsbereich völlig neu und unterstreicht die Wichtigkeit und Problemstellung in Bezug auf die Herstellung und Führung von amtlichen Geobasisdaten im Kontext eines digitalen Landschaftsmodells.

Die Arbeit soll folgende Fragestellung und Arbeitsfragen beantworten:

- Lässt sich eine automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben mit den aktuellen Airborne Laserscanning Daten entsprechend den DLM-Qualitätsanforderungen umsetzen?
 - Wie werden Airborne Laserscanning Daten generiert? Wo und wie werden sie verwendet?
 - Was sind die konkreten Anforderungen seitens DLM hinsichtlich der Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben?
 - Welche Methoden der automatisierten Detektion existieren und wie unterscheiden sich diese? Welche davon kann in Bezug auf die automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben als effizienteste bezeichnet werden?

Um diese Forschungsfragen zu beantworten, ist die Masterarbeit folgendermaßen gegliedert:

Nach dieser Einleitung wird es insgesamt drei größere Hauptkapitel geben, gefolgt von einer umfangreichen Zusammenfassung, die die Beantwortung der Fragestellungen inkludiert. Das erste Hauptkapitel „*Airborne Laserscanning als Basis der Objektdetektion*“ beschäftigt sich dabei mit der Datenaufnahme durch flugzeuggesteuerte Laserscanner. Dem Leser werden zuerst allgemeine technische Aspekte von Laserscannern nähergebracht, anschließend soll verstärkt auf Airborne Laserscanning eingegangen werden. Nachdem die Funktionalität ausführlich erklärt wurde, werden im weiteren Verlauf des Kapitels abgeleitete Produkte – wie digitale Geländemodelle – erläutert.

Das zweite Hauptkapitel trägt den Namen „*Methoden der Objektdetektion aus Airborne Laserscanning Daten*“. Nachdem das erste Kapitel eine reine Literaturrecherche darstellt, ist dieses Kapitel als aktueller Stand der Forschung in Bezug auf die Objektdetektion einzuordnen und befasst sich somit schon intensiver und detailreicher mit den praktischen Fragestellungen dieser Forschungsarbeit. Es werden einige bereits bestehende Möglichkeiten der Detektion, wie die digitale Geländeanalyse, die Visualisierung von Geländedaten, die Kantendetektion und die Bildanalyse aufgezeigt und praktische Beispiele von wissenschaftlichen Papers vermittelt.

Nachdem die Funktionalität von Airborne Laserscanning sowie die Objektdetektion aus diesen Daten abgeklärt wurde, beginnt mit dem vierten Kapitel „*Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben*“ der praktische Teil der Arbeit. Hier werden zuerst Definitionen für die gesuchten Formen abgeklärt sowie Geländekleinformen im Kontext der österreichischen Kartenwerke betrachtet. Anschließend soll ein Vergleich mit den Nachbarländern Schweiz und Deutschland in Bezug auf die Detektion dieser Kleinformen gezogen werden. Danach werden für die Arbeit relevante Unterkapitel wie Untersuchungsgebiet, zur Verfügung stehende Daten, Softwarewahl, Parameter für die Detektion, Methodik sowie Profile der Formen beschrieben, die den Leser in die Ausgangssituation einführen soll, bevor anschließend die eigentliche Detektion beginnt. Hierbei werden Schritt für Schritt die verwendeten Methoden erklärt und mit schematischen Darstellungen vereinfacht visualisiert. Am Ende dieses Kapitels werden Ergebnisse des Untersuchungsgebietes veranschaulicht.

Abschließend werden in der „Zusammenfassung“ die Forschungsfragen und ihre Antworten durchleuchtet und ein genereller Überblick über die Arbeit gegeben. Es sollen Schlussfolgerungen gezogen, Probleme aufgezeigt sowie ein Ausblick auf bestehende und zukünftige Herausforderungen dieser Thematik gegeben werden. Tabelle 1 zeigt die Forschungsfragen sowie die dazugehörigen Methoden und wo diese in der Arbeit zu finden sind:

Fragestellung	Methode	Kapitel
<p><u>Hauptfragestellung:</u></p> <p>Lässt sich eine automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben mit den aktuellen Airborne Laserscanning Daten entsprechend den DLM-Qualitätsanforderungen umsetzen?</p>	<p>Verbindung von verschiedenen Methoden der Objektdetektion wie Kantendetektion, Bildanalyse sowie Visualisierung; Datenverarbeitung</p>	<p>4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14</p>
<p>Unterfrage:</p> <p>Wie werden Airborne Laserscanning Daten generiert? Wo und wie werden sie verwendet?</p>	<p>Literaturrecherche</p>	<p>2</p>
<p>Unterfrage:</p> <p>Was sind die konkreten Anforderungen seitens DLM hinsichtlich der Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben?</p>	<p>Literaturrecherche, persönliche Besprechungen, Eigeninitiative und Eigenverantwortung</p>	<p>4.6, 4.7</p>
<p>Unterfrage:</p> <p>Welche Methoden der automatisierten Detektion existieren und wie unterscheiden sich diese? Welche davon kann in Bezug auf die automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben als effizienteste bezeichnet werden?</p>	<p>Literaturrecherche, Vergleichen von bestehenden Forschungsarbeiten, Datenverarbeitung</p>	<p>3 4.7</p>

Tabelle 1, Fragestellungen und Methoden. Quelle: eigene Darstellung

2 Airborne Laserscanning als Basis der Objektdetektion

In diesem ersten Hauptkapitel werden die Grundmechaniken von Airborne Laserscanning Daten, die für die automatisierte Detektion verwendet werden, erläutert. Es soll den Leser in die inhaltliche Thematik der Datenakquirierung durch die Laser-Methode einführen und sämtliche theoretischen Hintergründe abdecken. Dabei sollen unter anderem die Prozessschritte, die zu einer fertigen Airborne Laserscanning Punktwolke führen, gekennzeichnet werden. Des Weiteren soll im Verlauf des Kapitels bereits auf die Anwendungsmöglichkeiten der Daten eingegangen werden. Hierbei wird zuerst die Ableitung in ein digitales Geländemodell, welches auch für die Detektion der Böschung, Dämme und Gräben essenziell ist, beschrieben. Außerdem wird auf weitere Daten, die aus den Airborne Laserscanning Daten abgeleitet werden können, eingegangen. Die Daten in dieser Arbeit stammen von den Bundesländern in Österreich und wurden zu einem homogenen, österreichweiten und hochauflösenden digitalen Geländemodell umgewandelt.

Als Literaturquellen dienen zwei Standardwerke der Lasermethoden: „Topographic Laser Ranging and Scanning“ von Jie Shan und Charles Toth aus dem Jahr 2018 sowie „Airborne and terrestrial laser scanning“ von George Vosselman und Hans-Gerd Maas aus dem Jahr 2010 sowie weitere kleinere Paper über Airborne und terrestrisches Laserscanning.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird Airborne Laserscanning zur Vereinfachung und besseren Lesbarkeit als ALS abgekürzt. Sämtliche Abkürzungen, die im Laufe der Arbeit verwendet werden, sind im Abkürzungsverzeichnis am Ende der Arbeit ersichtlich.

2.1 Funktionsweise des Laserscannings

Um die Methode der ALS-Daten im Kontext der automatisierten Geländedetektion zu durchleuchten, bedarf es einer gründlichen Erklärung der Datenaufnahme durch Laserscanning generell. Topographische Laser und Scanning Systeme durchliefen in diesem Jahrtausend eine unvergleichbare Entwicklung in der Geoinformation. Sie sind heute die wichtigste Methode der Datenerfassung, da es möglich ist, durch Airborne (ALS) und terrestrischem (TLS) Laserscanning hochgenaue 3D-Punktwolken in riesigen Mengen bei relativ geringer Komplexität zu erzeugen. (vgl. Petrie und Toth 2018: 1)

Kurz gesagt erfassen Airborne und terrestrische Laserscanner die Geometrie sowie teilweise die Textur der sichtbaren Erdoberfläche. Diese Systeme arbeiten kontaktlos durch Laserstrahlen und erstellen quantitative 3D-Punktwolken von einer bestimmten Oberfläche mit einer geringen Messunsicherheit. (vgl. Beraldin et al. 2010: 1)

2.1.1 Messmethoden

Um 3D-Oberflächen zu erzeugen, gibt es zwei aktive Messmethoden: die Lichtlaufzeitmessung sowie die Triangulationsmessung.

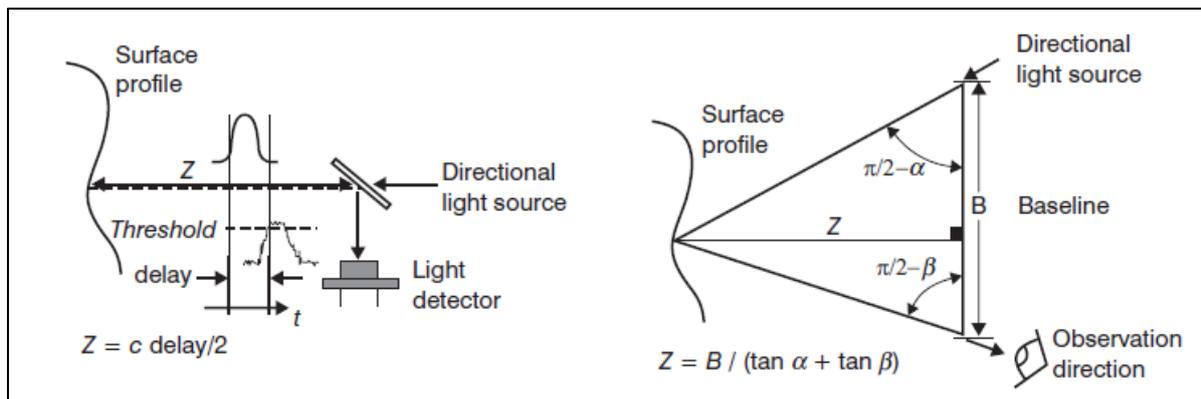


Abbildung 2, Messmethoden. Links: Lichtlaufzeitmessung, Rechts: Triangulation. Quelle: Beraldin et al. 2010: 3

In Abbildung 2 sind die beiden Messmethoden dargestellt. Da sich Licht in einem bestimmten Medium mit einer bekannten Geschwindigkeit bewegt, ist es relativ einfach und bequem durch die Zeitverzögerung – wenn sich Licht von der Quelle zum reflektierten Ziel und wieder zurückbewegt – die Entfernung zu messen. Diese Systeme werden als *time-of-flight* oder *lidar* (light detection and ranging) Systeme bezeichnet. Die Triangulationsmessung

verwendet das Kosinusetz, indem sie, wie in Abbildung 2 ersichtlich, ein Dreieck konstruiert. Dabei wird eine Beleuchtungsrichtung angewandt, die auf eine reflektierende Oberfläche sowie einer Beobachtung in einem bekannten Abstand von der Beleuchtung gerichtet ist. (vgl. Beraldin et al. 2010: 2)

2.1.2 Ablenkung durch Spiegel

Um eine dichte, detailreiche 3D-Punktwolke mit einem Laserstrahl zu akquirieren, muss der Laserstrahl bewegt und abgelenkt werden, um die gesamte Fläche abzudecken. Üblicherweise wird dies mit einem Spiegel umgesetzt. Bei terrestrischen Laserscannern zum Beispiel wird oft auf zwei orthogonal montierte Spiegel zurückgegriffen oder der Laserstrahl wird durch einen Abtastspiegel rotiert und abgelenkt. Beim ALS ist der Laserstrahl auf dem Flugzeug befestigt, die Abtastrichtung wird durch die Bewegungen des Flugzeugs bereitgestellt. Zudem ist ein GPS (global positioning system) oder ein IMU (inertial measurement unit) am Flugzeug installiert, um die Position und Orientierung zu messen. (vgl. ebd.: 16) Abbildung 3

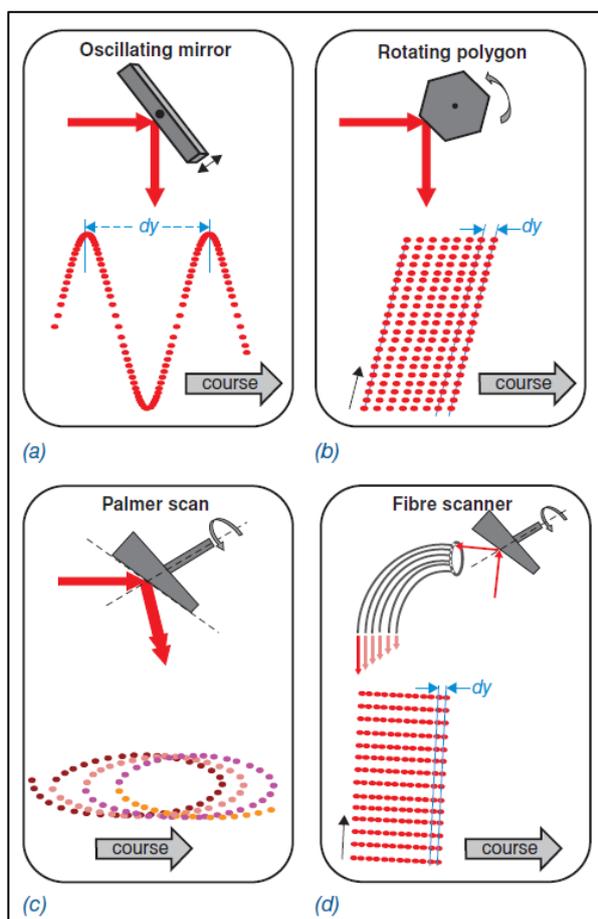


Abbildung 3, Scan-Mechanismen. Quelle: Beraldin et al. 2010: 16

zeigt vier Scan-Mechanismen nach Beraldin, Blais und Lohr 2010:

Der **oszillierende Spiegel** wird von einer Vielzahl an kommerziellen ALS verwendet. Der Laserstrahl wird durch den schwankenden Spiegel pendelförmig quer zur Flugrichtung abgelenkt, wodurch sich der Einstrahl- und Ausstrahlungswinkel ständig kontrolliert ändert.

Beim **rotierenden Polygonspiegel** wird ebendieser zur Strahlenablenkung verwendet. Die Scanlinien verlaufen parallel und sind im Vergleich zum oszillierenden Spiegel gleichmäßiger.

Beim **Palmer Scanner** ist die Vorrichtung, die den Laserstrahl ablenkt, so konstruiert, dass die Spiegelfläche und die Rotationsachse einen Winkel ungleich 90

Grad ergeben. Besonders im terrestrischen Scanverfahren wird diese Methode verwendet. Beim **Glasfaser-Scanner** werden Impulse vom Spiegel in benachbarte Glasfasern abgeleitet. Diese Form ist sehr stabil und erzeugt am Boden ein Punktmuster mit unterschiedlichen Abständen. (vgl. Beraldin et al. 2010: 16f)

2.2 Airborne Laserscanning

In den 1970er Jahren wusste man bereits, dass durch ALS Entfernungen zwischen Flugzeug und Oberfläche auf zirca einen Meter genau gemessen werden können. Trotzdem wurde die Methode erst Ende der 80er Jahre gängig, denn bis dahin war es nicht möglich, die Position von Flugzeug sowie einem beleuchtenden Punkt der Oberfläche über einen großen Bereich zu bestimmen. Mit der Verfügbarkeit von GPS konnten beide Parameter über große Bereiche mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden. (vgl. ebd.: 19f)

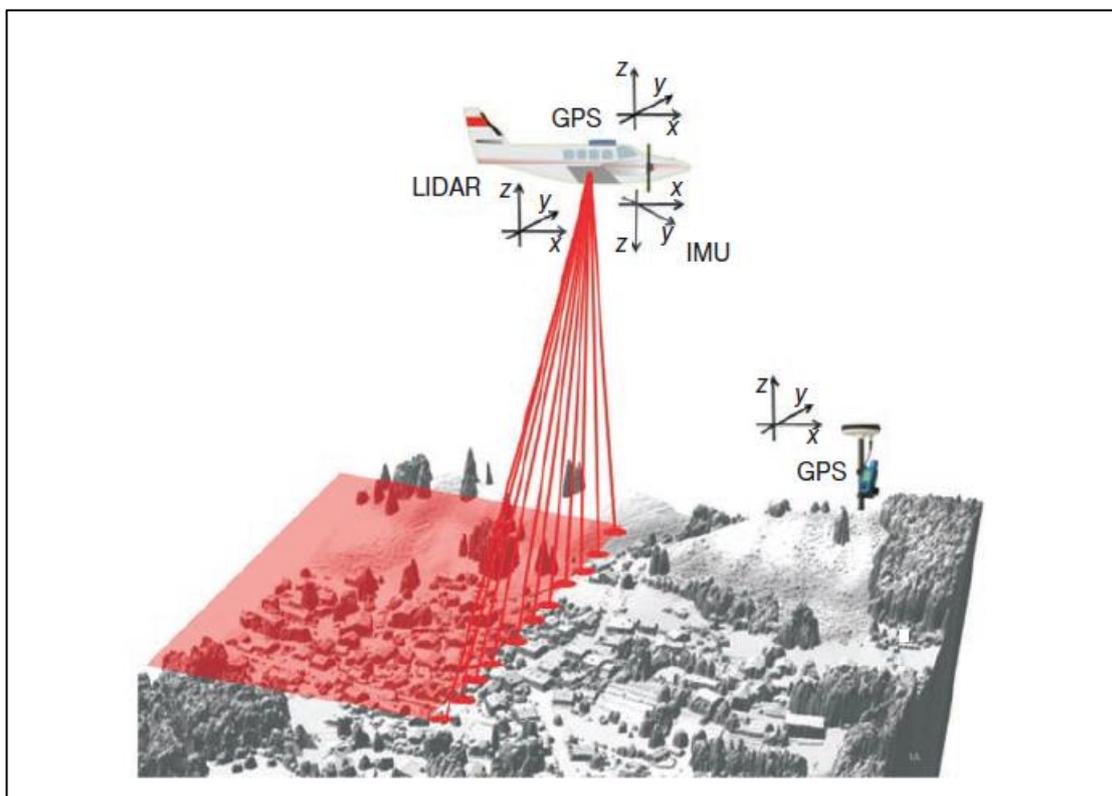


Abbildung 4, Funktionsweise von Airborne Laserscanning. Quelle: Beraldin et al. 2010: 20

Abbildung 4 zeigt die Funktionsweise eines ALS-Systems. Zur Durchführung der Datenaufnahme wird ein flugfähiges Gerät benötigt, auf dem der Laserstrahl angebracht werden kann. Zumeist wird die Aufnahme mit einem Flugzeug durchgeführt, es gibt allerdings auch Varianten mit einem Helikopter oder – seit neuestem – durch Drohnen,

sogenannte UAVs (unmanned aerial vehicle). Mit diesen können zwar nicht die Reichweiten von Flugzeugen garantiert werden, allerdings können kleine, spezielle Flächen detailreicher, kostengünstiger, schadstofffrei und schneller abgeflogen werden. (vgl. Petrie und Toth 2018: 132f)

2.2.1 Komponenten

Generell ist ein ALS-System von zwei Komponenten abhängig: Dem Lasersystem selbst, der den Abstand zu einem Punkt am Boden berechnet sowie eine GPS-Kombination, die die exakte Position und Orientierung des Systems misst (vgl. Beraldin et al. 2010: 21). Im Flugzeug gibt es noch verschiedene Komponenten, die kurz beschrieben werden sollen:

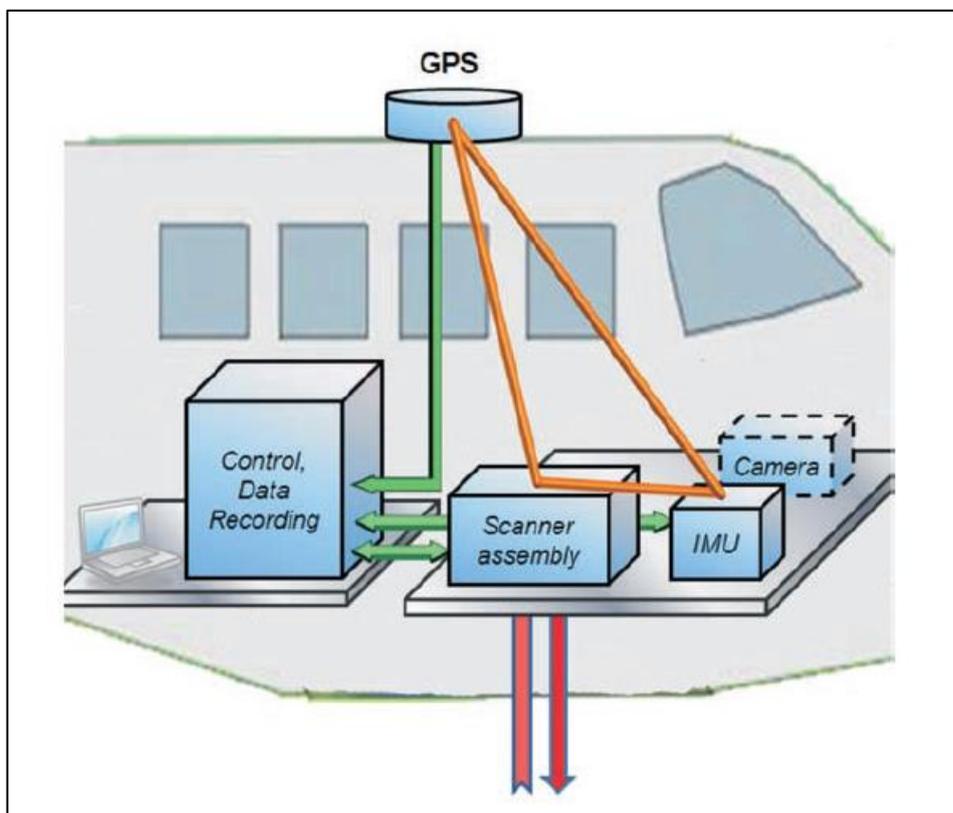


Abbildung 5, On-board Komponenten eines Airborne Laserscanning Systems. Quelle: Beraldin et al. 2010: 22

- Die **Scanner**-Zusammensetzung beinhaltet den Laser, die Scan-Methode sowie die Optik. Unter dem Laser ist im Flugzeug ein kleines Loch eingebaut, damit der Laser einen Strahl nach dem anderen in Richtung Oberfläche aussenden kann. Moderne ALS-Methoden können bis zu 50 Punkte pro m² aussenden.

-
- Die **GPS-Antenne** ist oben am Flugzeug befestigt, um eine uneingeschränkte Sicht zu den Satelliten zu gewährleisten.
 - Das **Lagemesssystem IMU** (inertial measurement unit) ist dazu da, die Flugbahnberechnung zu verbessern und ermöglicht eine Genauigkeit von bis zu zehn Zentimeter.
 - Die **Steuer- und Datenaufzeichnungseinheit** kontrolliert das gesamte System und speichert die gewonnenen Daten ab. Moderne Laserscanner senden pro Sekunde rund 300.000 Impulse aus und produzieren dadurch rund 20 Gigabyte an Daten pro Stunde. (vgl. Beraldin et al. 2010: 23)

Wie in Abbildung 4 erkennbar wird die GPS-Antenne vom Flugzeug durch eine GPS-Bodenstation vervollständigt, die man DGPS (differential GPS) nennt. DGPS-Stationen sind permanente und herkömmlich exakt vermessene Referenz-Stationen, die die Ungenauigkeit der GPS-Antenne durch atmosphärische Effekte kompensieren und so eine hohe Genauigkeit im Zentimeter-Bereich ermöglichen. Das Flugzeug und die Station sollten nicht weiter als 30 Kilometer entfernt sein. (vgl. ebd.: 23) Auch in Österreich gibt es ein DGPS, das APOS (Austrian Positioning System). Alle 37 Stationen sind zentimetergenau bestimmt und besitzen hochaktuelles geodätisches Equipment. (vgl. BEV: APOS) Eine weitere hochgenaue Positionsbestimmung ist in Österreich die EPOSA (Echtzeit-Positionierung Österreich). Diese entstand 2009 aus der Kooperation der Unternehmen Energie Burgenland AG, ÖBB Infrastruktur AG und Wiener Netze GmbH. Wie schon bei APOS ermöglicht EPOSA durch Korrektur der gängigen Satellitensysteme (GPS, BEIDOU, GALILEO, GLONASS) hochgenaue Korrekturdaten für den Anwender. Die verschiedenen Satellitensignale werden dabei in der Zentrale gemeinsam mit den Positionsdaten der Nutzer zusammengeführt und innerhalb einer Sekunde korrigiert. (vgl. EPOSA)

2.2.2 Laserstrahl

Der Laserstrahl hat generell zwei große Vorteile gegenüber der Mikrowellentechnologie: Zum einen können durch die hochenergetischen Impulse kurze Intervalle für die Entfernungsmessung realisiert werden, zum anderen ist die Wellenlänge relativ kurz (800-1550 Nanometer (vgl. Beraldin et al. 2010: 25)). Sie kann durch kleine Öffnungswinkel recht gut kollimiert (gebündelt) werden, besitzt also eine hohe Genauigkeit, wodurch eine präzise

Messung durchgeführt werden kann (vgl. Wehr und Lohr: 69). Scanning Lasersysteme, die die Entfernung messen können, heißen LaDAR (*Laser Detection And Ranging*) oder LiDAR (*Light Detection and Ranging*), wobei LiDAR in der Fachsprache öfter verwendet wird. Laser steht allgemein für “*light amplification by stimulated emission of radiation*”. (vgl. Wehr und Lohr: 69)

Physikalisch lässt sich das Prinzip eines Laserstrahls eines ALS-Systems recht einfach erklären: Ein Lichtsignal wird aus dem Laser ausgesandt, dieser ist nicht unendlich dünn, sondern breitet sich in Abhängigkeit der Flughöhe kreisförmig aus. Dieser Effekt wird durch den Wellencharakter von elektromagnetischer Strahlung hervorgerufen. Der Strahl tritt als Ellipse auf der Erdoberfläche aus, das Signal wird gestreut und wieder zurück zum Sensor reflektiert. Man spricht von einem Footprint. (vgl. Beraldin et al. 2010: 25) Durch den Spiegel wird der Strahl quer zur Flugrichtung abgelenkt, wodurch ein Geländestreifen entlang des Flugweges abgetastet wird. Die Breite dieser Streifen wird als swath oder Schwad bezeichnet. (vgl. Wagner et al. 2003: 225f) Abbildung 6 zeigt Schwad sowie Footprint bei ALS-Systemen.

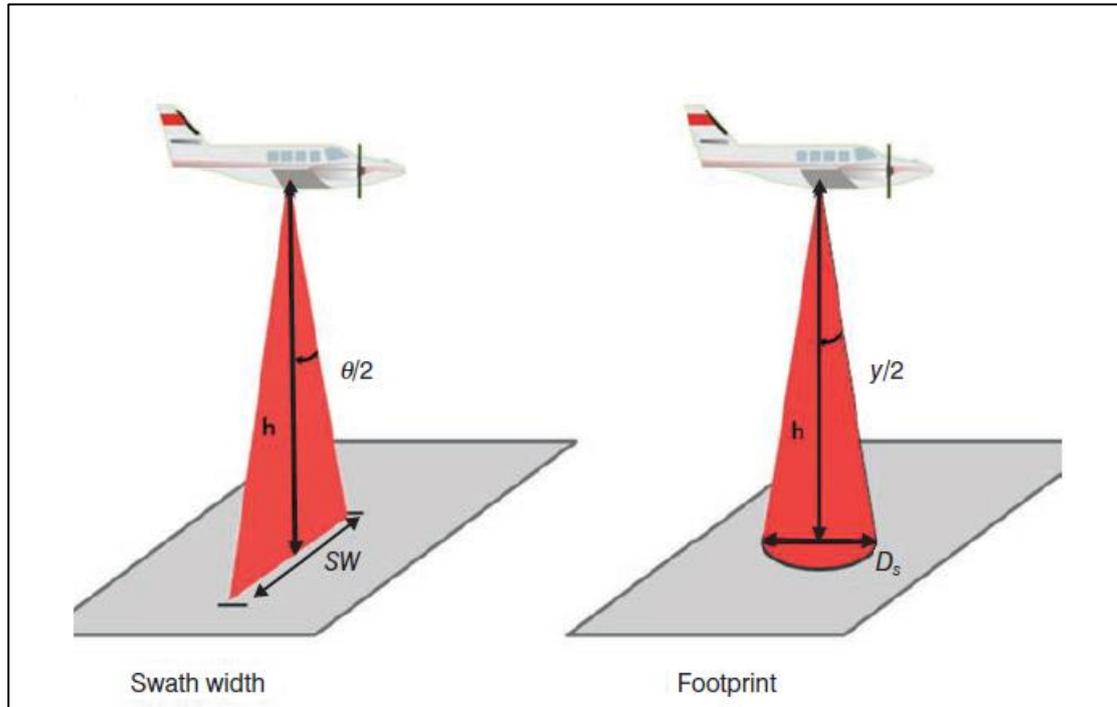


Abbildung 6, Schwad und Footprint. Quelle: Beraldin et al. 2010: 25

2.2.3 Wellenform und Mehrfachechos

Die Art und Weise, wie ein Laserstrahl zurück zum Sensor reflektiert wird, ist wesentlich für die Erstellung einer 3D-Punktwolke sowie für die Modelle, die aus dieser Punktwolke entstehen. Grundsätzlich gibt es vier spezielle Formen an der Oberfläche, die die Wellenform und Echos beeinflussen können. Der Detektor nimmt jeden Aufprall auf ein Objekt wahr und misst die Zeitabstände dieser. Dadurch ist es möglich, die Charakteristik der Objekte vertikal nachzubilden. Bei einem klaren, deutlichen Ziel wie ein Feld oder ein Gebäudedach kommt nur ein Echo zurück an den Scanner und somit gibt es auch nur einen Ausschlag, wodurch die Form des Objekts klar ist. Der Aufprall wird vom Detektor in Ausschläge gemessen. Sind diese Ausschläge um ein Vielfaches breiter relativ zum Aussende-Ausschlag, so bedeutet das, dass die gemessene Oberfläche höchstwahrscheinlich eine Neigung oder eine raue Oberfläche besitzt, da sich dadurch der Footprint vergrößert. (vgl. Harding 2018: 206) Grund dafür ist, dass bei einer flachen, ungeneigten Fläche wie einem Feld die Ausdehnung des Objekts in Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserstrahls klein gegenüber der Impulslänge ist. Bei einer geneigten Fläche kommt es zu einer stärkeren Streuung des Impulses und daher zu einem breiteren Footprint. (vgl. Wagner et al. 2003: 233f)

Es gibt allerdings auch Objekte, die mehrere Impulse zurück zum Scanner senden. Da sich der Impuls auf dem Weg zum Objekt ausbreitet, ist dafür eine Dachkante ein Beispiel. Hierbei wird ein Signal vom Boden sowie ein Signal von der Kante an den Scanner zurückgesendet. Spezieller sind die Mehrfachechos im Bereich der Vegetation. (vgl. Harding 2018: 206) Abbildung 7 zeigt die Entwicklung des Impulses beim Auftritt auf einen Baum:

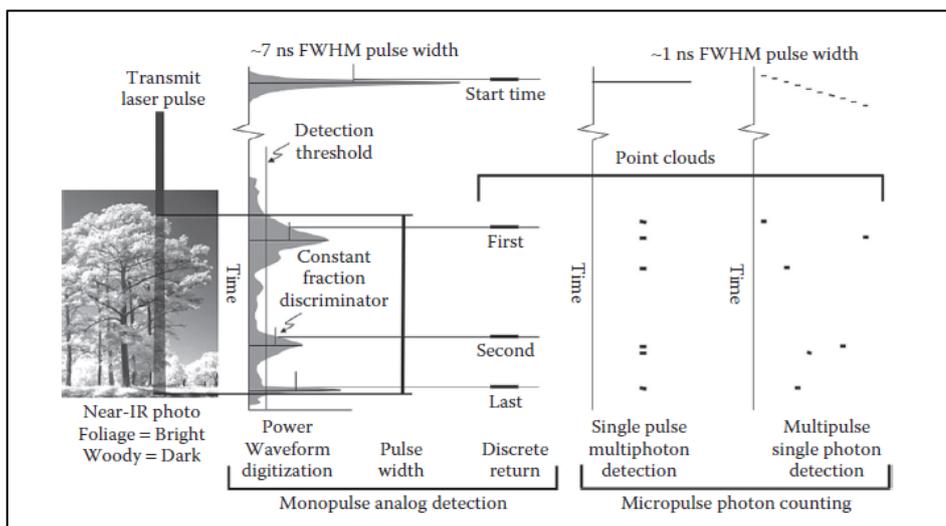


Abbildung 7, Messverfahren und erhaltene Signale beim Auftritt auf einen Baum. Quelle: Harding 2018: 206

Hierbei werden mehrere Signale zum Sender zurückgeschickt. Wie in Abbildung 7 erkennbar ist, lassen sich durch die verschiedenen Signale vertikale Strukturen der empfangenen Vegetation ableiten. Der Impuls trifft zuerst auf die Baumkrone und sendet ein Signal zurück. Da der Strahl breiter ist, gelangt dieser aber auch durch die Krone, trifft im weiteren Verlauf – vorausgesetzt der Baum ist durchlässig genug – auf Äste, Blätter und schlussendlich auf den Boden. Interessant sind vor allem der erste zurückgesendete Impuls und der letzte. Der erste Impuls kennzeichnet die Vegetation, der letzte die Oberfläche ohne Vegetation, was vor allem für weitere Ableitungen und Geländemodelle wichtig ist. (vgl. Harding 2018: 207) Es werden zwei Komponenten bei den neuen Messmethoden aufgenommen. Zum einen wird bei der time-of-flight Messung der Ort des Rückechos angezeigt, in der Abbildung 7 ist dies unter „discrete return“, wie diese Echosysteme außerdem genannt werden, ersichtlich. Dabei kann kein Rückschluss auf die Form des Objekts gegeben werden, es wird lediglich ein Stop-Signal ausgesandt. Bei der Fullwaveform Messmethode wird hingegen das Rückecho in Gigahertz aufgezeichnet, wodurch die komplette Form des Objekts aufgezeichnet werden kann. Dadurch ist es außerdem möglich, Häuser von Vegetation zu unterscheiden. (vgl. Beradin et al. 2010: 28)

Durch die verschiedenen Komponenten eines ALS-Systems sind die erhaltenen 3D-Punktwolken nicht frei von Fehler. Die Genauigkeiten in Bezug auf die detektierte Höhe – wenn man von einer Flughöhe von 2000 Meter ausgeht – liegen heute ungefähr bei fünf bis 20 Zentimeter, in Bezug auf die richtige Position bei 20 Zentimeter bis einen Meter. Nach Beradin et al. (2010: 29f) gibt es verschiedene Gründe, die die Genauigkeit beeinflussen können:

- fehlerhafte Kalibrierung von GPS, IMU oder Scanner,
- Fehler aufgrund begrenzter Genauigkeit der Flugwegrückerstattung,
- Fehler aufgrund der Komplexität der detektierten Objekte, vor allem in Bezug auf die Steigung,
- Fehler durch mehrfache Reflexionen,
- Fehler aufgrund von Koordinatentransformation und Geoidkorrektur.

Fehler dieser Art vermeidet man am besten mit einer sorgfältig durchgeführten Flugplanung. Dazu zählt auf der einen Seite ein korrekt kalibriertes Setup, besonders in Bezug auf die Orientierung und Position. Die Genauigkeit dieser hängt vor allem von IMU und GPS ab,

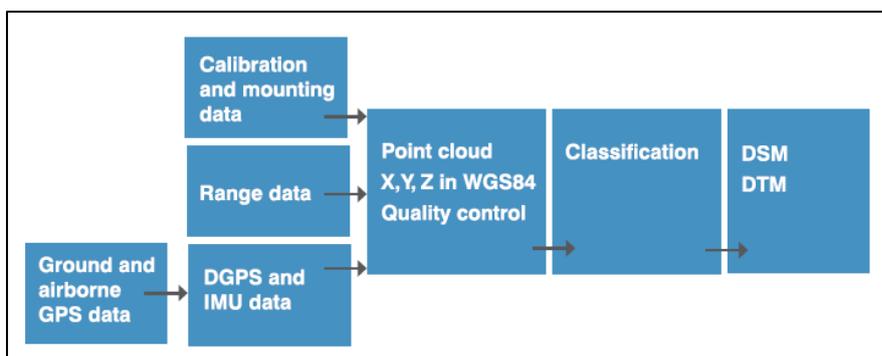
zudem ist es wichtig, in der Nähe des Flugzeuges immer eine DGPS-Station zu haben. Auf der anderen Seite ist der Zeitpunkt des Fluges wichtig. Ziel des Fluges muss sein, hochgenaue Daten zu erhalten, weshalb man sich darauf einstellen muss, was man möchte und was das Ziel beeinflussen kann (Blätterbestand, schneebedeckte Gebiete, Nebel, Regen, Stürme...). ALS-Messungen können auch in der Nacht durchgeführt werden und durchdringen Wolken. Zudem ist wichtig, dass immer mindestens zwei DGPS-Bodenstationen innerhalb von 30 Kilometer sind, sollte eine Station ausfallen oder inkorrekt sein. (vgl. Beradin et al. 2010: 32)

2.2.4 Datenverarbeitung

Nach einer Befliegung durch ein ALS-System stehen dem Anwender eine Menge an Daten zur Verfügung:

- die GPS-Bodenstationsdaten,
- die GPS und IMU-Daten des Flugzeugs,
- die Scanner-Daten inklusive Echo-Zählungen sowie Abstandsmessungen und Wellenformen. (vgl. Beradin et al. 2010: 32)

Im ersten Schritt der Datenverarbeitung werden die GPS-Daten des Flugzeuges durch die DGPS-Daten der Bodenstation korrigiert. Danach werden diese Daten genutzt, um die IMU Messungen bestmöglich zu verbessern. Es werden die Flugbahn wiederhergestellt sowie die Höhendaten optimiert. Anschließend werden Flugbahn-Daten und die Entfernungsmessungen zusammengeführt, wobei hier alle Korrekturdaten (atmosphärische, Kalibrierung) bereits einfließen. Zudem werden die berechneten X, Y, Z Koordinaten von WGS84 in ein endgültiges Koordinatensystem umgewandelt. Die Koordinaten sind in diesem Fall die 3D-Punktwolken, das Ergebnis einer ALS-Befliegung. Aufgrund der Mehrfachechos wird abschließend die Punktwolke noch klassifiziert und je nach gewünschtem Modell abgeleitet, mehr dazu in Kapitel 2.3. Abbildung 8 zeigt den Datenverarbeitungs-Workflow in



zusammengefasster Form nach Beradin et al. (2010: 33):

Abbildung 8, Datenverarbeitungsschema für ALS. Quelle: Beradin et al. 2010: 33

2.3 Weiterverarbeitung in ein Digitales Geländemodell

In Kapitel 2.1 und 2.2 wurde die Funktionsweise von ALS genau beschrieben. Wie in Abbildung 8 jedoch ersichtlich ist, bedarf es weiterer Schritte, um die gewonnenen Daten auch in der Praxis einsetzen zu können. In diesem Unterkapitel werden die Produkte Digitales Geländemodell sowie Digitales Oberflächenmodell erklärt. Anschließend sollen jedoch alle Möglichkeiten erläutert werden, wie sich Höheninformationen digital darstellen lassen. Die verwendeten Daten in dieser Arbeit – um Böschungen, Dämme und Gräben zu detektieren – stammen zwar aus einer ALS 3D-Punktwolke, diese wurde allerdings in ein österreichweites, homogenes Digitales Geländemodell umgewandelt.

2.3.1 Definitionen

Ein **Digitales Geländemodell** (DGM, im englischen Digital Terrain Model (DTM)) ist laut Briese (2010: 135) eine mathematische Repräsentation – zum Beispiel ein Modell – der unbedeckten Erdoberfläche. Diese kennzeichnet den festen Boden der Erdoberfläche, welcher entweder durch Gebäude, Vegetation, oder spätestens die Atmosphäre nach außen hin abgegrenzt ist. Gebäude und Vegetation zählen also nicht dazu und werden gefiltert. Pfeifer und Mandlbürger (2018: 350) definieren ein digitales Geländemodell geometrischer: „Ein DGM ist eine kontinuierliche Funktion, die von der planimetrischen 2D-Position auf die Geländehöhe $z = f(x, y)$ abgebildet wird.“

Das **Digitale Oberflächenmodell** (DOM, im englischen Digital Surface Model (DSM)) kennzeichnet hingegen laut Briese (2010: 135) den höchsten Punkt, der von oben erkennbar ist und beinhaltet somit Bäume und Gebäude. Abbildung 9 kennzeichnet den Unterschied von DGM und DOM nach Pfeifer und Mandlbürger (2018: 352):

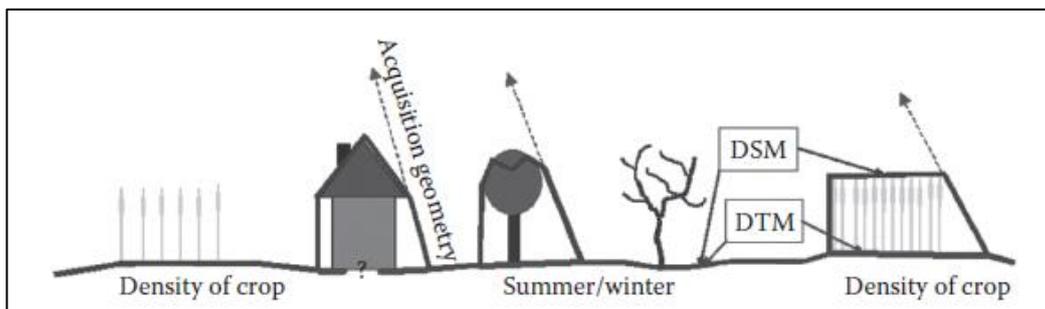


Abbildung 9, DSM (DOM) und DTM (DGM). Quelle: Pfeifer und Mandlbürger 2018: 352

2.3.2 Digitale Höhendaten

Digitale Höhendaten aus Airborne Laserscanning Daten lassen sich im Grunde in drei verschiedene Datenstrukturen weiterverarbeiten. In dieser Arbeit werden hauptsächlich die bereits erwähnten digitalen Geländemodelle verwendet, die beiden anderen Methoden sollen allerdings auch kurz Erwähnung finden, da sie in der Geoinformation eine fundamentale Rolle spielen.

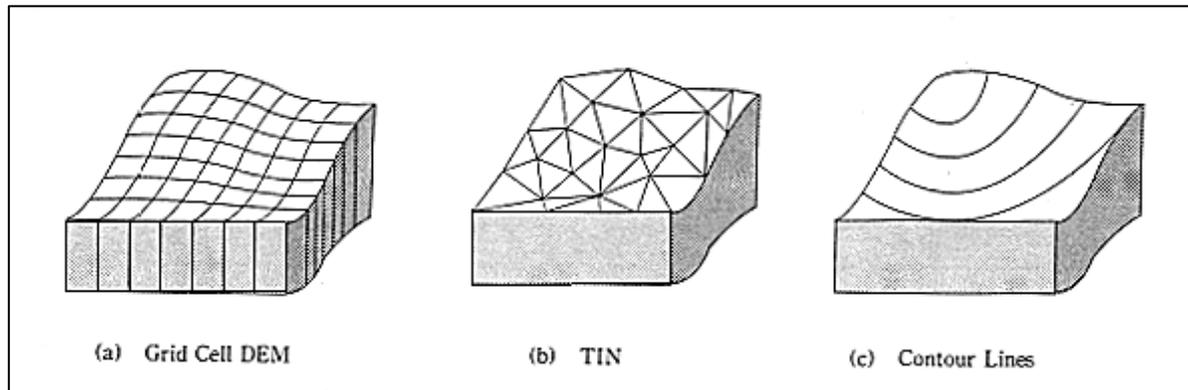


Abbildung 10, Methoden, um Höhendaten zu strukturieren. Quelle: online unter http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/giswb/vol2/cp3/3-1.gif

Abbildung 10 zeigt die drei verschiedenen Methoden, um Höhendaten darzustellen. A zeigt die laut Wilson und Gallant (2000) häufigste Methode, die Gitterzelle. Hierbei werden einfache Höhenmatrizen aufgezeichnet, die topologische Beziehungen zwischen Datenpunkten aufzeigen, wodurch diese Methode einfach, schlicht und gleichbleibend ist. Natürlich entstehen dadurch auch Nachteile. Gitterzellen sind stark abhängig von ihrer Auflösung, also der Größe der Zellen. Je weitläufiger, desto mehr Details gehen verloren, je kleiner, desto körniger und rechenintensiver wird das Geländemodell. Des Weiteren können bei großen Zellen abrupte Veränderungen der Oberfläche nicht dargestellt werden. Besonders in den letzten Jahren sind allerdings vermehrt immer kleinere, detailreichere Geländemodelle mit Rasterzellen teilweise bereits unter einem Meter entstanden, um diesen Nachteilen entgegenzuwirken. (vgl. Wilson und Gallant 2000: 4)

B zeigt ein TIN, ein Triangulated irregular network beziehungsweise eine Dreiecksvermaschung. Es werden demnach Dreiecke aus den Punkten der Ausgangsdaten erstellt. Diese Punkte sind mit einer Reihe von Kanten verbunden, wodurch ein Netz aus Dreiecken gebildet wird. (vgl. ArcGIS: TIN) Es werden benachbarte Punkte miteinander

verbunden, üblicherweise werden TINs mit der Delauney Dreiecksvermaschung konstruiert. Die besten TINs erfassen oberflächenspezifische Punkte wie Spitzen, Grate und Neigungsbrüche und bilden ein unregelmäßiges Netzwerk von Punkten. (vgl. Wilson und Gallant 2004: 4)

Die dritte Methode, um Höhendaten zu strukturieren, sind, wie in Abbildung 10 ersichtlich, Netzwerke aus Höhenlinien. Dabei werden Landformen in kleine, unregelmäßig geformte Flächen anhand der Höhenlinien eingeteilt. Besonders in der Hydrologie wird diese Variante häufiger verwendet, um beispielsweise komplexe dreidimensionale Fließgleichungen in eine Reihe eindimensionaler Gleichungen zu reduzieren und so die Auswertung zu erleichtern. (vgl. ebd.: 4)

2.3.3 Filtering

Für die Gewinnung eines DGMs aus den ALS-Daten ist es essenziell, die unbedeckte Erde aus der gesamten Information zu filtern beziehungsweise zu klassifizieren. Da es sich um eine Vielzahl an Daten handelt, wird dieser Schritt der Datenverarbeitung durch automatisierte Algorithmen durchgeführt. Die Problemstellung liegt darin, zuerst die Punktdaten zu klassifizieren. Jeder Punkt hat 3D-Koordinaten (X, Y, Z) und wird aufgrund seiner Position in einer der beiden Klassifizierungsgruppen eingeteilt, nämlich Gelände oder nicht-Gelände. Bei der richtigen Klassifikation wird auch darauf geachtet, sämtliche verfügbare Datensätze zu verwenden. Ein Flugzeug, das ALS-Daten aufnimmt, überschneidet seine angeflogenen Streifen, wodurch mehrfache Blickrichtungen auf die Oberfläche möglich sind und somit das Eindringen in die Baumkrone leichter fällt. Außerdem wird die Genauigkeit der Daten erhöht. (vgl. Briese 2010: 137f)

Es gibt eine Vielzahl an Methoden, um ALS-Daten zu filtern. Diese sollen nun kurz aufgezählt werden:

- **Simple Filters:** Wie der Name bereits vorweg nimmt, handelt es sich hierbei um die einfachste und unpräziseste Methode, von ALS-Daten auf die unbedeckte Erdoberfläche zu schließen. Simple Filter verwenden in einem bestimmten Gebiet immer die kleinste Anhöhe. Es wird also der niedrigste Punkt als Rasterhöhe eines Gebietes bestimmt, wodurch eine Menge an Fehlern entstehen können. Bei geneigtem

Gelände wird die Höhe zu niedrig ausfallen, zudem ist es mehr oder weniger bloß eine Annahme über das Gelände und daher sehr ungenau. (vgl. Pfeifer und Mandlbürger 2018: 355)

- **Morphologische Filter:** Diese Gruppe der Filtermethoden ist mathematischer Natur und abhängig von Erosion und Dilation. Dabei werden maximale Höhendifferenzen eines Strukturelements in Bezug auf die Entfernung gemessen. (vgl. Briese 2010: 140)
 - **Progressive Verdichtung:** Hierbei wird der Boden mit immer mehr Punkten befüllt und dabei klassifiziert. Es ist also ein Step-by-Step Workflow. Dabei wird auf ein triangular irregular network (TIN) zurückgegriffen. (vgl. ebd.: 144)
 - **Oberflächenbasierte Filterung:** Ähnlich zur progressiven Verdichtung wird eine Rekonstruktion der Oberfläche durch die Punkte durchgeführt, allerdings wird bei der oberflächenbasierten Filterung zuerst mit allen Punkten gearbeitet und danach werden Punkte, die nicht ins Modell passen, nach und nach entfernt. (vgl. ebd.: 145)
- Abbildung 11 zeigt eine Methode der oberflächenbasierten Filterung nach Pfeifer et al. (2001), genannt „Robuste Interpolation“. Es wurde eingeführt, um große Gebäude schnell und einfach auszudünnen:

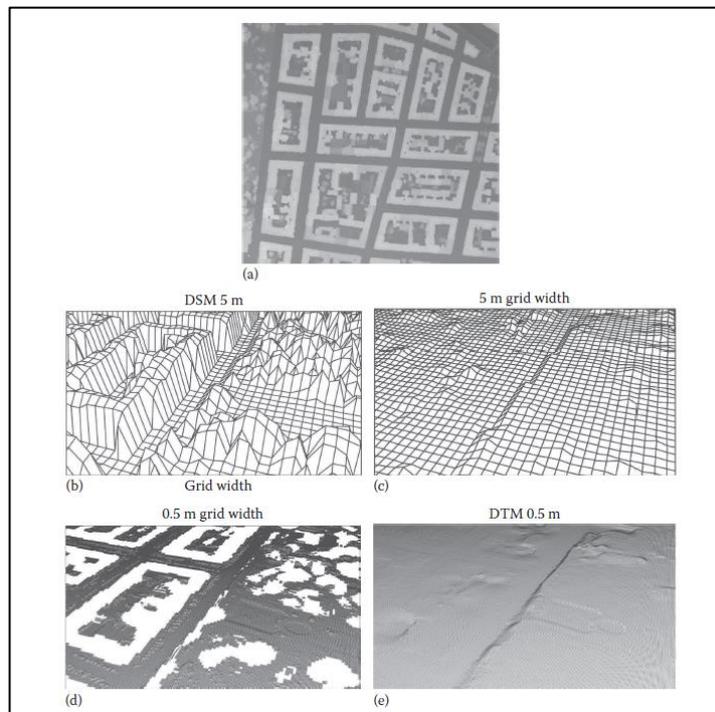


Abbildung 11, Robuste Interpolation. a: originales Oberflächenmodell. b: grobes DOM. c: durch robuste Interpolation gefiltertes DGM. d: genaueres DOM, mit Autos. e: finales DGM. Quelle: Pfeifer et al. 2001

-
- **Segmentbasierte Filterung:** Abschließend sei noch die segmentbasierte Methode erwähnt, bei der benachbarte Punkte mit ähnlichen Eigenschaften als Segmente verwendet werden. Dabei soll das Problem überwunden werden, dass individuelle Punkte falsch gefiltert werden. Punkte werden zuerst segmentiert und anschließend klassifiziert. (vgl. Briese 2010: 148)

Der post-processing-Workflow ist im Allgemeinen mit Sicherheit der zeitaufwändigste und somit ist es auch logisch, dass die Entwicklung in den letzten Jahren nicht in Bezug auf die Komponenten der Laserscanner gesetzt wurde, sondern viel mehr im Bereich der Software-Entwicklung. Man kann davon ausgehen, dass die Datenverarbeitungszeit in etwa die dreifache Dauer der Datenakquisition einnimmt. (vgl. Wehr und Lohr 1999: 80)

2.4 Anwendungsgebiete von Airborne Laserscanning

Nachdem die technischen Grundlagen in den vorangegangenen Kapiteln abgesteckt wurden, sollen nun abschließend einige Anwendungsgebiete von ALS in kurzer Form angeführt werden. Die ALS hat die Geländeaufnahme durch bislang unerreichte Datendichten von mehreren Punkten pro m² sowie Höhengenaugigkeit von ungefähr zehn Zentimeter revolutioniert. ALS-Daten dienen im Groben als präzise geometrische Datengrundlage für Gefahrenzonenplanung, Ausweisung von Überschwemmungsflächen oder wasserbiologische Fragestellungen. (vgl. Mandlbürger et al. 2009: 89) Weitere Anwendungsmöglichkeiten durch ALS sollen hier nach Wehr und Lohr (1999: 81) kurz Erwähnung finden:

- allgemein zur Digitalen Geländemodell-Erstellung,
- Visualisierung von Bodendenkmälern in der Archäologie,
- Kartierung von Korridoren wie Straßen, Eisenbahnlinien, Pipelines oder Wasserstraßenlandschaften, die sich im Wald oder Wasser befinden,
- Kartierung von elektrischen Leitungen und Türmen, die sich im Wald befinden,
- Bestimmung und Messungen von Küstengebieten oder Dünen, Zeitreihe von Erosionserscheinungen oder Küstenveränderungen,
- hochgenaue und detailreiche Messanwendungen wie Hochwasserkartierungen oder Volumenberechnungen in Tagebauminen oder Straßenmodellierung und -design,

-
- Erstellung von 3D-Modellen, die nicht nur im GIS-Bereich verwendet werden, sondern auch für Videospiele oder Filme von Bedeutung sein können,
 - automatisierte Gebäude-Extraktion,
 - Stadtplanung und mikroklimatische Modelle,
 - schnelle Kartierung und Schadensbewertung nach natürlichen Katastrophen, z. B. nach Hurrikans, Erdbeben, Erdrutsche usw.,
 - Messungen von Schnee-, Eis- und Gletschergebieten,
 - Ableitung von Vegetationsparametern, z. B. Baumhöhe, Kronendurchmesser, Baumdichte, Biomasseschätzung, Bestimmung der Waldgrenzen.

3 Methoden der Objektdetektion aus Airborne Laserscanning Daten

In diesem Hauptkapitel sollen bereits bestehende Methoden der Objektdetektion und Extraktion durchleuchtet werden. Es soll zum einen allgemein auf die digitale Geländeanalyse, die laut Zhou, Lees und Tang (2008: 3) zu „einer der aktivsten Forschungsgruppen der Geoinformation zählt“, eingegangen werden, zum anderen sollen im zweiten Abschnitt des Kapitels Methoden aufgezeigt werden, wie Daten aus digitalen Geländemodellen visualisiert beziehungsweise detektiert und im weiteren Verlauf gewonnen werden. Zu diesen Methoden zählt unter anderem die Generierung von Kanten aus einem Digitalen Geländemodell, was im Bereich der Böschungen, Dämme und Gräben von großer Bedeutung ist. Auch auf die Bildanalyse, im speziellen auf die objektbasierte Klassifikation, soll näher eingegangen und Beispiele aufgezeigt werden. Methoden der Visualisierung von Geländedaten können ebenso helfen, Böschungen, Dämme oder Gräben zu filtern. Am Ende des Kapitels soll klar sein, in welcher Art Objekte anhand des Geländes detektiert werden können und wie dies bereits passiert, wie zum Beispiel im Bereich der Archäologie.

3.1 Digitale Geländeanalyse

Durch die in Kapitel 2 beschriebene Grundbasis des Airborne Laserscannings und die daraus entstehenden digitalen Geländemodelle (Kapitel 2.3.1) ist es mittlerweile möglich, die Oberfläche der Erde digital durch große Mengen an regelmäßig oder unregelmäßig verteilter Punkte beziehungsweise Pixel zu präsentieren, zu visualisieren und vor allem zu analysieren, anstatt sich auf herkömmliche kartographische Techniken wie Höhenschichtlinien zu verlassen (vgl. Zhou et al. 2008: 3). Vorteile der digitalen Geländemodelle gegenüber den Höhenschichtlinien liegen auf der Hand:

- eine deutlich höhere Repräsentation von unterschiedlichen Geländeformen,
- die Genauigkeit der Daten ist höher sowie
- die Möglichkeit der Automatisierung sowie der Visualisierung von Echt-Zeit Prozessen ist deutlich leichter umzusetzen. (vgl. ebd.: 3)

Nun ist es allerdings von Nöten, den Begriff der digitalen Geländeanalyse richtig zu definieren und einzuordnen. Zhou, Lees und Tang (2008: 3) meinen dazu, dass „die effektive Nutzung eines Digitalen Geländemodells (DGM oder im englischen DTM für *Digital Terrain Model*) mehr Aufwand benötigt als die Interpretation von herkömmlichen Karten. [...] Um Oberflächen-Eigenschaften aus Digitalen Höhenmodellen (DHM oder im englischen DEM für *Digitale Elevation Model*) abzuleiten, bedarf es auch Methoden und Techniken, um die Informationen daraus zu gewinnen. [...] Diese Methoden und Techniken werden im Allgemeinen als *digital terrain analysis* (DTA, oder im deutschen digitale Geländeanalyse) bezeichnet.“

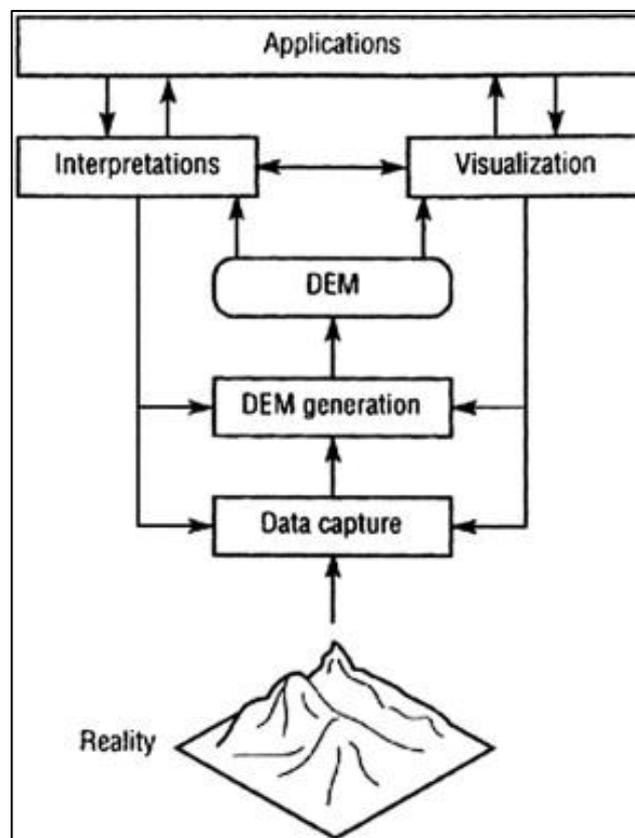


Abbildung 12, Hauptaufgaben der Digitalen Geländemodellierung. Quelle: Hutchinson, Gallant 2000: 30

Nach Hutchinson und Gallant (2000) ist das Gelände einer der wichtigsten Bausteine, um die Oberfläche der Erde sowie auch atmosphärische Prozesse zu verstehen sowie zu analysieren. Versteht man das Gelände, so kann man auch einen Rückschluss auf die genannten Prozesse schließen und umgekehrt. Das digitale Geländemodell steht folglich im Zentrum der in Abbildung 12 gezeigten Grafik, da es für die Repräsentation des Geländes maßgeblich verantwortlich ist. Zudem stehen DGMs im Zentrum, weil sie auf der einen Seite durch die

Daten, die aus der Realität entstehen (zum Beispiel aus Airborne Laserscanning Daten) generiert werden und auf der anderen Seite fundamental für die Visualisierung des Geländes sowie die Interpretation und im weiteren Verlauf die Analyse sind. (vgl. Hutchinson und Gallant 2000: 29)

Im Bereich der Geländeanalyse gibt es verschiedene Anwender. Zum Beispiel verwenden Geomorphologen die Geländeanalyse, um morphologische Strukturen zu erkennen sowie geomorphologische Prozesse der Erdoberfläche zu simulieren. Im Bereich der Hydrologie werden Höhenmodelle verwendet, um Abflussrichtungen und -modelle zu beschreiben und diese zu analysieren. Auch in der Geografie allgemein werden Statistiken von Geländeoberflächen immer öfter genutzt. (vgl. ebd.: 4) In der Archäologie werden mit Hilfe von digitalen Höhenmodellen Bodendenkmäler herausgefiltert (vgl. Meyer 2015: 250). Alle Anwender haben jedoch gemein, Objekte aus digitalen Oberflächenmodellen abzuleiten (vgl. Zhou et al. 2008: 4).

Vor allem im Bereich der verschiedenen Visualisierung von Geländedaten, auf die im Folgekapitel eingegangen wird, wurde in der GIS-Welt insbesondere in den frühen 2000ern großen Wert gelegt. Dazu zählt auch die eben erwähnte Filterung von Bodendenkmälern aus digitalen Höhenmodellen. Im Bereich der Geländeanalyse und im weitesten Sinne damit einhergehend im Bereich der Feature-Extraktion aus Geländedaten wurde erst im weiteren Verlauf in Reaktion auf die geringere Unterstützung in kommerziellen GIS Software Paketen reagiert. Dazu wurde im Jahr 2006 die *TADTM, die Terrain Analysis and Digital Terrain Modelling* Initiative gegründet. Im Zuge dessen wurden Forschungsgruppen eingesetzt, die vor allem im Bereich der Geländeanalyse bereits viel Erfahrung aufweisen. Es wurden Kommunikations-Plattformen sowie internationale Workshops gegründet und Fachartikel veröffentlicht. Diese Artikel beinhalten vor allem Methoden zur Feature-Extraktion, Klassifikation von Oberflächen sowie allgemeine Modelle mit Digitalen Geländemodellen, zum Beispiel im Bereich von Landcover-Daten oder in der Geomorphologie. (vgl. ebd.: 4f)

Einige Beispiele sollen im Kapitel 3.5 nähergebracht werden, wenn allgemein auf Methoden und bereits bestehende Arbeiten im Bereich der Objektdetektion sowie der Extraktion aus Geländemodellen eingegangen werden.

3.2 Visualisierung von Geländedaten

Auch wenn die Visualisierung von Böschungen, Gräben und Dämme allein nicht ausreicht, um einen österreichweiten, vektorisierten Datensatz zu erhalten, so ist es doch auf der einen Seite der erste Schritt, um sich mit den Daten vertraut zu machen und auf der anderen Seite ist eine visuelle Betrachtung der Kleinformen eine wichtige Grundbasis für die Erstellung des Algorithmus. Zudem sind die Visualisierungen von Neigung und Krümmung im weiteren Verlauf der Arbeit ein unbedingt notwendiger Bestandteil, da Böschungen, Dämme und Gräben besonders durch diese Parameter klassifiziert werden können. Diese erhaltenen Werte der Pixel in den Rasterbildern legen Grenzwerte fest, ob Böschungen, Dämme und Gräben als solche klassifiziert werden können oder nicht.

Die Methode der Kartierung beziehungsweise der Datengewinnung von Landformen oder Geländedaten aus Visualisierungen ist in den Geowissenschaften weit verbreitet. Sie wird in der Geologie, in der Hydrologie, in der Geomorphologie oder auch in der Vulkanologie eingesetzt. Früher, als es noch keine Möglichkeiten wie die homogene Datengewinnung von Geländedaten aus Airborne Laserscanning gab, wurden diese Formen noch per Hand direkt im Feld von Topographen gezeichnet. Natürlich ist dies nicht nur eine subjektive Arbeit, die von Topograph zu Topograph abweichen kann, sondern auch mit einem enormen Zeit- und Ressourcenaufwand verbunden, besonders wenn man an die Aktualisierung der Daten denkt. In all diesen Anwendungsgebieten wird mittlerweile im ersten Schritt auf die Visualisierung des Geländes gesetzt, um die Prozesse zu verstehen und analysieren und insbesondere beschleunigen zu können. (vgl. Smith und Clark 2005: 885)

Generell lässt sich die Visualisierung wissenschaftlich in ein Feld eingliedern, welches sich mit der realistischen Wiedergabe von Oberflächen und Beleuchtungsquellen auseinandersetzt. Das Ziel liegt darin, durch graphische Mittel Informationen visuell zu präsentieren. Daten sollen, um anschaulich präsentiert zu werden, mit verschiedenen Methoden verglichen werden. Große Datensätze sollen so homogen wie möglich dargestellt werden, zudem soll der Anwender mit dem Know-how ausgestattet sein, wie die Daten akquiriert wurden und welche Fehler bei der Filterung, wie zum Beispiel entstehende Artefakte im Digitalen Geländemodell, entstehen können. (vgl. Kokalj et al. 2013: 101f) Abbildung 12 zeigt, dass die Visualisierung von Digitalen Geländemodellen vor der Erstellung von Applikationen liegt und somit als

Zwischenschritt bezeichnet werden kann. Die Visualisierung wird vor allem verwendet, um die Analyse von Geländemodellen zu unterstützen sowie um die Daten zu validieren (vgl. Hutchinson und Gallant 2000: 29).

Es sollen nun im Folgenden die gängigsten Methoden, die zur Visualisierung von Geländekleinformen angewandt werden und somit auch für diese Arbeit von Bedeutung sind, vorgestellt werden.

3.2.1 Schattiertes Reliefbild beziehungsweise Schummerung

Laut Kokalj et al. (2013) verfügen schattierte Reliefbilder über den besten visuellen Effekt von allen Möglichkeiten der Visualisierung. Während Kartographen die Schummerung sowie auch die Schraffen von Geländekleinformen in früheren Jahren stets per Hand und somit wiederum einen subjektiven, künstlerischen Stil in jede Karte eingebaut haben, können schattierte Reliefbilder in der heutigen Zeit in geographischen Informationssystemen (GIS) automatisch erzeugt werden. Ein schattiertes Reliefbild zeigt, wie die Oberfläche der Erde einkommendes Licht anhand von physikalischen Gesetzen reflektiert. (vgl. Kokalj et al. 2013: 103) Wie das digitale Geländemodell angezeigt wird, hängt von der Beleuchtungsrichtung ab. Der Anwender kann dabei die Einstellungen für den Höhenwinkel sowie Horizontalwinkel (Azimut) einstellen. Aus diesen Parametern sowie aus der Neigung und Richtung des Geländes wird der Einfallswinkel berechnet, der die Schummerung entstehen lässt. (vgl. Hesse 2016: 113)

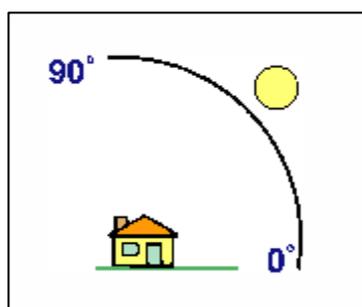


Abbildung 13, Höhenwinkel bei der Erstellung einer Schummerung. Quelle: ArcGIS

Abbildung 13 zeigt das Einfallen des Sonnenlichtes über dem Horizont. Dieser Wert liegt immer zwischen 0 Grad (Sonne befindet sich am Horizont) und 90 Grad (Sonne steht im Zenit). Typischerweise werden in GI-Systemen 45 Grad als Standardwert angegeben. Die Einstellung des Azimuts bezieht sich auf die relative Stellung der Sonne am Horizont und

liegt immer zwischen 0 und 360 Grad. 0 Grad steht für Norden, 90 Grad für Osten, 180 Grad für Süden und 270 Grad für Westen. (vgl. ArcGIS) Schummerungen haben in der Visualisierung den Nachteil, dass sie recht subjektiv sowie von der Beleuchtungsrichtung abhängig sind. So entsteht es häufig, dass bestimmte Bereiche in einem Bild stark schwarz oder überstrahlt dargestellt werden. Zudem kann es bei südlicher Beleuchtung zu optischen Täuschungen, sogenannten Reliefumkehrungen kommen. (vgl. Hesse 2016: 113)

Um die Reliefdarstellung durch Schummerungen zu verbessern, werden mehrere Reliefdarstellungen mit unterschiedlichen Beleuchtungen zu einem RGB-Bild übereinandergelegt (Abbildung 14) oder der Mittelwert, das Maximum oder das Minimum aus verschiedenen Beleuchtungen zu einem Bild kombiniert. (vgl. Kokalj et al. 2013: 105f)

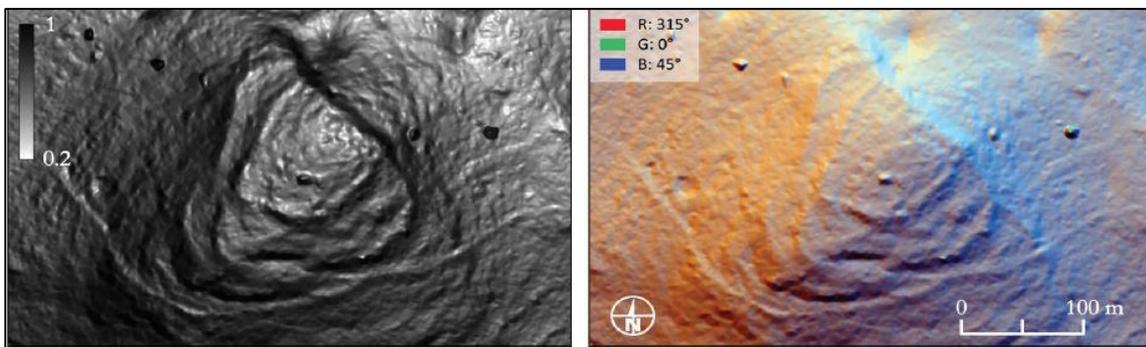


Abbildung 14, kombiniertes, schattiertes Reliefbild. Links: quadratischer Wurzelbereich aus 16 verschiedenen Richtungen mit 45° Höhenwinkel. Rechts: RGB-Bild aus drei Richtungen (Rot: 315°, Grün 0°, Blau 45° Azimuth), 45° Höhenwinkel. Quelle: Kokalj et al. 2013: 106

Schattierte Reliefbilder haben nicht nur das Problem, dass sie sehr subjektiv sind, sie geben auch noch keine Rückschlüsse darauf, wie steil das Gelände ist beziehungsweise wie sich das Relief allgemein verhält, denn sie zeigen das Gelände rein in Bezug auf die Beleuchtung. So können zwar Dämme, Gräben und Böschungen rein visuell betrachtet beziehungsweise vermutet werden, allerdings können die Parameter, die diese Kleinformen ausmachen, nicht miteinbezogen werden.

3.2.2 Neigung (Slope)

Die nun folgenden Visualisierungsmethoden haben einen deutlich größeren Einfluss auf die Detektion von Geländekleinformen wie Böschungen, Dämme und Gräben, da sie nicht subjektiv sind und sie sich direkt auf die Topographie der Oberfläche beziehen. Sie alle werden nach Gallant und Wilson (2000) in die Gruppe der Oberflächenableitungen klassifiziert.

Die wichtigste Oberflächenableitung in Bezug auf die Fragestellung dieser Arbeit ist die Neigung. Böschungen werden durch eine größere Geländeneigung in Bezug auf die Umgebung charakterisiert. Dies trifft im selben Ausmaß auf Dämme und Gräben zu, da Böschungen bloß die geneigten Flächen dieser Kleinformen sind. Kommen diese geneigten Flächen nur auf einer Seite vor, so sind dies Böschungen.

Die Neigung – im englischen *Slope* – misst die Veränderung der Höhe aus dem digitalen Geländemodell in Richtung des steilsten Abstiegs (vgl. Gallant und Wilson 2000: 53). Sie wird durch die erste Ableitung des digitalen Geländemodells berechnet. Jede Zelle wird durch den maximalen Wert der Veränderungen in Bezug auf die Nachbarschaftszellen berechnet und kann in Grad oder Prozent angegeben werden. (vgl. Kokalj et al. 2013: 108) Zhou und Liu bezeichnen die Neigung als einer der wichtigsten geomorphologischen Parameter, da sie nicht nur das Relief und generell die Struktur der Oberfläche beschreibt, sondern auch in hydrologischen Modellen, Erdrutschüberwachungen oder Bodennutzungsplanungen als Parameter unerlässlich ist (vgl. Zhou und Liu 2008: 284).

Sieht man sich die Neigung anhand eines Beispiels an, so wird die zentrale Zelle „e“ in Abbildung 15 ermittelt, indem zuerst die Änderungsrate in x-Richtung und anschließend die Änderungsrate in y-Richtung berechnet. Danach werden die beiden Ergebnisse in die Formel der Neigung eingesetzt:

a	b	c
d	e	f
g	h	i

50	45	50
30	30	30
8	10	10

Abbildung 15, Beispiel für die Berechnung der Neigung. Quelle: ArcGIS

$$\text{Neigung in Grad} = \tan^{-1} \left(\sqrt{\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2} \right) * 180/\pi$$

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 * x_cellsize)$$

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 * y_cellsize)$$

Für das Beispiel in Abbildung 15 sieht dies folgendermaßen aus (vgl. ArcGIS):

$$\begin{aligned}[dz/dx] &= ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 * x_cellsize) \\ &= ((50 + 60 + 10) - (50 + 60 + 8)) / (8 * 5) \\ &= (120 - 118) / 40 \\ &= 0.05\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}[dz/dy] &= ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 * y_cellsize) \\ &= ((8 + 20 + 10) - (50 + 90 + 50)) / (8 * 5) \\ &= (38 - 190) / 40 \\ &= -3.8\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Neigung in Grad} &= \tan^{-1}(3.80032) * 57.29578 \\ &= 1.31349 * 57.29578 \\ &= \underline{\underline{75.25762}}\end{aligned}$$

Die Neigung für die mittlere Zelle aus Abbildung 15 beträgt demnach rund 75 Grad. Diese Methode wird automatisiert auf alle Zellen angewandt. Kokalj et al. merken allerdings an, dass die Information der Neigung alleine nicht ausreicht, um Geländekleinformen zu detektieren, da unabhängig davon, ob steigend oder fallend, die Werte mit der gleichen Farbe angezeigt werden. Um positive/konvexe (Damm) beziehungsweise negative/konkave (Graben) Features voneinander unterscheiden zu können, bedarf es weiterer Parameter. (vgl. Kokalj et al. 2013: 108)

3.2.3 Ausrichtung (Aspect)

Ausrichtung oder im Englischen Aspect kann als die Orientierung der Neigung angesehen werden. Jede Zelle wird wie schon bei der Neigung in Bezug zu den acht Nachbarzellen gesetzt. Die maximale Änderungsrate der Neigungsrichtung wird in Grad zwischen 0 und 360 als Wert angegeben. Zeigt die Neigung Richtung Norden, so liegt der Wert um 0 Grad, zeigt er Richtung Süden, so liegt er in etwa bei 180 Grad. Das Werkzeug wird zum Beispiel dafür verwendet, geeignete Nordhänge von Skipisten zu finden oder Regionen zu bestimmen, die

von einer starken Schneeschmelze, welche an Südhängen stärker auftritt, betroffen sind, um Evakuierungsprozesse zu beschleunigen. (vgl. ArcGIS)

Die Ausrichtung kann in Bezug auf die Geländekleinformen wichtig sein, um die Richtung zu bestimmen, wohin eine Böschung verläuft, hat aber allgemein in dieser Masterarbeit eine untergeordnete Rolle.

3.2.4 Krümmung (Curvature)

Neben der Neigung ist die Krümmung der wichtigste Parameter, wenn es um die Identifikation von Geländekleinformen wie Böschungen, Dämme und Gräben geht. Während die Neigung die erste Ableitung des Geländes darstellt, basiert die Krümmung auf der zweiten Ableitung. Es wird also die Rate der Veränderung einer ersten Ableitung herangezogen, üblicherweise der Neigung oder in eher selteneren Fällen der Ausrichtung. Die Krümmung kann daher als die Neigung der Neigung bezeichnet werden. (vgl. Gallant und Wilson 2000: 56)

Es werden hauptsächlich zwei Arten der Krümmung generiert, nämlich die *Plan Curvature* und die *Profile Curvature*. *Plan Curvature* behandelt die Veränderungsrate der Ausrichtung entlang einer Kontur und ist für diese Arbeit weniger relevant im Vergleich zur *Profile Curvature*, welche die Veränderungsrate der Neigung anhand eines Abflussmodells berechnet. Sie wird vor allem in Fließgeschwindigkeitsberechnungen oder Transportprozessen von Sedimenten verwendet. Die Oberflächenkrümmung kann als die Krümmung einer Linie betrachtet werden, die durch den Schnittpunkt einer Ebene und der topografischen Oberfläche gebildet wird. Je stärker die Kurve dieser Linie ist, desto stärker ist auch der Krümmungswert. Daraus ergibt sich, dass entlang einer Ebene oder an einem Hang, wo sich die Neigung kaum verändert, der Krümmungswert gleich 0 ist, während ein starker Anstieg bzw. Abfall der Neigung für einen hohen positiven oder negativen Wert sorgt. (vgl. ebd.: 57)

Typischerweise sind also besonders an der Ober- und Unterkante der Neigung hohe Krümmungswerte zu erwarten. An der Unterkante ist die Krümmung konkav, an der Oberkante konvex. Da die Profilkrümmung an ein Fließmodell geknüpft ist, bedeutet konkav, dass die Geschwindigkeit hier beschleunigt wird, wodurch der Wert an der Unterkante immer

positiv sein muss. Die Oberkante einer Böschung ist hingegen konvex gekrümmt, wodurch sich die Fließgeschwindigkeit verlangsamt und der Wert immer negativ sein muss. Ist der Wert gleich 0, so ist die Oberfläche als linear anzusehen. (vgl. ArcGIS) Smith und Clark (2005) merken dazu an, dass dadurch anhand von großen Regionen Rückschlüsse auf Hangbrüche, Gräben oder Grate gezogen werden können. Die Krümmung erlaubt es dem Betrachter, lokale Variationen der Topografie zu erkennen. Zudem ist das Bild nicht wie beim schattierten Reliefbild aus einer bestimmten Richtung beleuchtet, wodurch keine Subjektivität entsteht, was einen erheblichen Vorteil darstellt. (vgl. Smith und Clark 2005: 894)

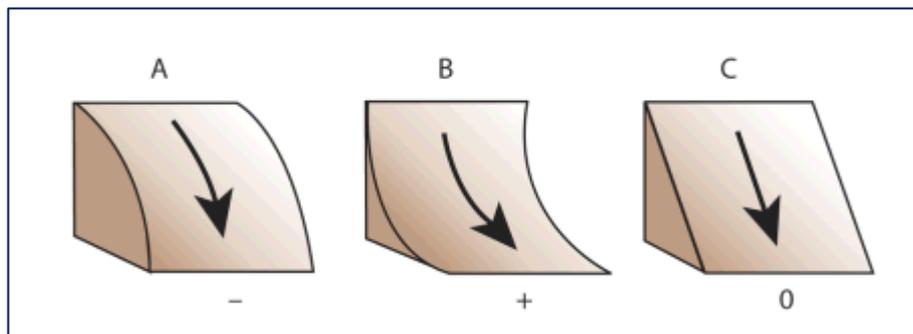


Abbildung 16, Profilkrümmung im Gelände. A: konvexe Form, geringe Fließgeschwindigkeit, dadurch negativer Krümmungswert. B: konkave Form, beschleunigte Fließgeschwindigkeit, dadurch positiver Krümmungswert. C: lineare Oberfläche, Krümmungswert gleich 0. Quelle: ArcGIS

Daraus ergibt sich, dass Böschungen, Dämme und Gräben aufgrund der starken Veränderung der Neigung an Ober- und Unterkante eine ähnliche Gestalt der Krümmung und dadurch auch ähnliche Krümmungswerte aufweisen. Aus der Böschungsdefinition geht hervor, dass Ober- und Unterkanten deutlich ausgeprägt sind.

Während die Neigung alle Zellen unabhängig von ihrer Gestalt beziehungsweise Form wiedergibt, zeigt die Krümmung eher die Oberflächenstrukturen auf. Dies ist für die in dieser Arbeit gesuchten Kleinformen vor allem in höhergelegenen Regionen von entscheidender Bedeutung. Hier kommen oft Neigungen vor, die den Idealen einer Böschung, eines Dammes oder eines Grabens entsprechen würden, allerdings die Krümmungswerte ausgibt, die wie in Abbildung 16, Beispiel C aussehen.

3.2.5 Trendbereinigung und Lokales Reliefmodell

Besonders die Archäologie ist oft mit dem Problem konfrontiert, dass gesuchte Formen oft viel kleiner sind als die Landformen, auf denen sie liegen. Eine Möglichkeit, nicht allein die Höheninformation von großräumigen Landschaften wiederzugeben, ist die sogenannte Trendbereinigung oder im englischen *Trend Removal* beziehungsweise im weiteren Verlauf die Erstellung eines Lokalen Reliefmodells. (vgl. Kokalj et al. 2013: 107)

Abbildung 17 zeigt die Trendbereinigung in einer schematischen Darstellung. Dadurch werden die Höhenvariationen von großflächigen Formen, wie Berge, Kuppen, Dämme oder Gräben gelöscht und nur die kleinräumigen, lokalen Höheninformationen bleiben im sogenannten lokalen Reliefmodell übrig (vgl. Kokalj et al. 2013: 107). Das Modell wird erstellt, indem zuerst ein Tiefpassfilter des digitalen Geländemodells erzeugt wird. Die Weite der Filterung (üblich sind 3x3 oder 5x5 Filter) bestimmt die räumliche Skalierung der Oberflächenformen im späteren Reliefmodell. Dieses geglättete Geländemodell wird danach vom ursprünglichen, ungeglätteten Modell subtrahiert. Dadurch werden großräumige topographische Formen eliminiert und es bleiben kleinräumige Erhebungen (positive Werte) beziehungsweise Vertiefungen (negative Werte) übrig. (vgl. Hesse 2010: 68)

Hesse geht in seinen Forschungen zu dieser Thematik allerdings noch einen Schritt weiter, denn lokale Erhebungen oder Vertiefungen werden in einem Geländemodell mit der Methode der Trendbereinigung nur geglättet und nicht gänzlich eliminiert. Um diese zu entfernen, werden die Koordinaten-Höhenwerte der Punkte extrahiert, die entlang der Differenzkarte 0 sind, dort, wo sich keine Abweichungen zwischen Geländemodell und geglättetem Geländemodell befinden. Diese Punkte werden mit den Höhenwerten interpoliert, wodurch

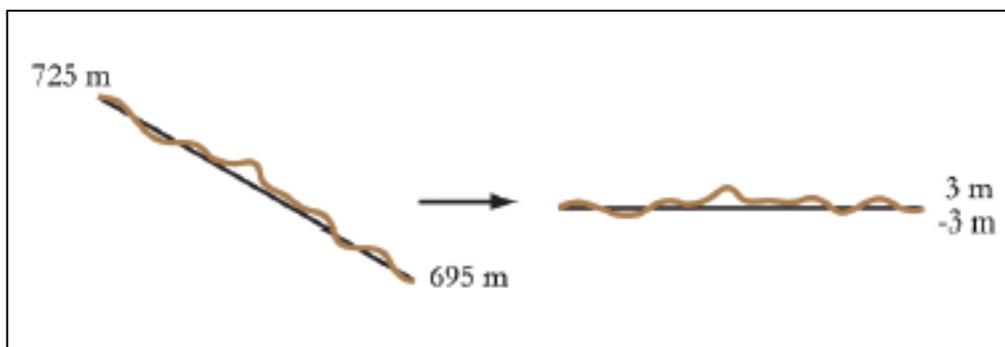


Abbildung 17, schematische Darstellung des Trend Removal Verfahrens. Quelle: Kokalj et al. 2013: 107

ein bereinigtes Geländemodell ohne kleinräumige Anomalien entsteht. Laut Hesse können mit dem lokalen Reliefmodell relative Höhen deutlich besser gemessen werden als mit der Trendbereinigung. (vgl. Hesse 2016: 118f)

3.2.6 Weitere Visualisierungsmöglichkeiten

Den Möglichkeiten in der Visualisierung von Geländedaten sind kaum Grenzen gesetzt. Einige weitere Beispiele, die in der praktischen Arbeit nicht angewandt werden, sollen hier noch kurz Erwähnung finden.

- **Skyview Factor:** Hier wird laut Hesse (2016) „eine diffuse Beleuchtung durch eine auf dem jeweiligen Pixel zentrierte und über dieser aufgewölbten, gleichmäßig hellen Hemisphäre simuliert.“ Die Helligkeit mancher Pixel wird dadurch verringert, weil Teile des „Himmels“ durch umliegendes Relief verdeckt werden. Pixel an Hängen und in Hohlformen erhalten dadurch niedrigere Werte als Pixel in exponierteren Lagen. Strukturen, die auf fast horizontalen Flächen geringe Höhenunterschiede aufweisen, können nicht gut dargestellt werden. (vgl. Hesse 2016: 114f)

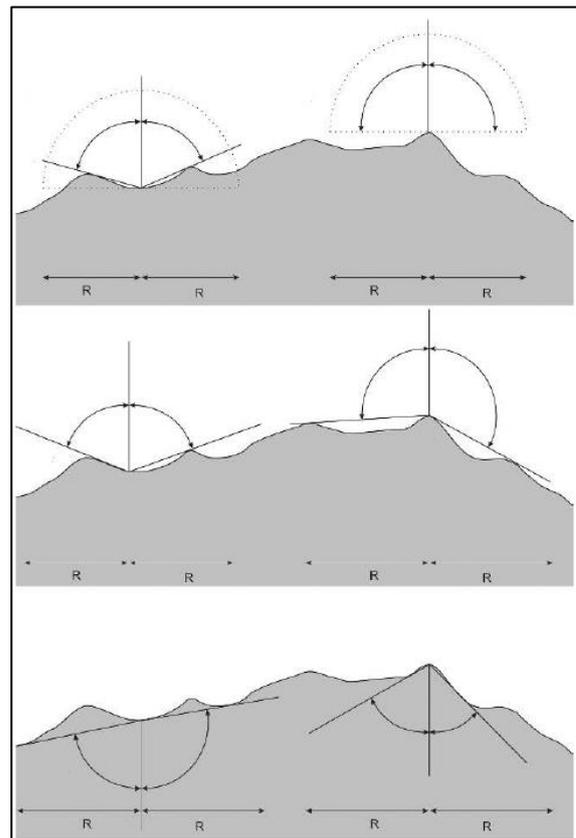


Abbildung 18, Berechnungsprinzipien Skyview Faktor (oben), positive Openness (Mitte), negative Openness (unten). Quelle: Hesse 2016: 117

- **Openness:** Im Vergleich zum Skyview Factor wird bei der Openness nicht eine aufgespannte Hemisphäre als Beleuchtung verwendet, sondern eine auf den Pixel zentrierte Sphäre. Dabei wird anhand einer einstellbaren Anzahl radialer Linien der durch die umgebende Topographie begrenzte maximale Zenitwinkel ausgerechnet. Der Mittelwert dieser Winkel kennzeichnet den positiven Openness. Die Berechnung kann allerdings auch auf den Nadir bezogen werden, wodurch dann der negative Openness entsteht. (vgl. Hesse 2016: 114)

Tabelle 2, Zusammenfassung der Visualisierungsmöglichkeiten. *Unterstrichen sind die in der Arbeit besonders relevanten.*

Methode	Kurzfassung	Eigenschaften
Schattiertes Reliefbild / Schummerung	zeigt, wie die Oberfläche der Erde einkommendes Licht anhand von physikalischen Gesetzen reflektiert	subjektives Verfahren; zeigt Gelände anhand der gewählten Beleuchtungsrichtung; für Geländekleinformen rein visueller Aspekt
<u>Neigung</u>	misst die Veränderung der Höhe aus dem Digitalen Geländemodell in Richtung des steilsten Abstiegs; erste Ableitung der Geländedaten	objektives Verfahren; bezieht sich direkt auf Gelände (Steigung oder Gefälle in Bezug auf die Nachbarzellen); keine Aussage über konkave/konvexe Formen
Ausrichtung	Orientierung der Neigung	Änderungsrate der Neigung (zwischen 0 und 360°); Richtung, wohin ein Hang zeigt
<u>Krümmung</u>	Neigung der Neigung; zweite Ableitung der Geländedaten	objektives Verfahren; Profil-Krümmung zeigt Abflussmodell und kann Aussage über konkave und konvexe Formen geben; wichtig für Kantenberechnung
Trendbereinigung / Lokales Reliefbild	statt großflächigen Höhenangaben kleinräumige, lokale Höheninformationen	verbessert die Mikrotopographie, aber keine Aussage mehr über allgemeine Topographie
Skyview-Factor	diffuse Beleuchtung durch eine auf dem jeweiligen Pixel zentrierte und über dieser aufgewölbten, gleichmäßig hellen Hemisphäre	subjektives Verfahren; Abhängig vom Suchradius, bezieht sich nur auf „himmlische“ Sphäre
Openness	Beleuchtung durch eine auf dem jeweiligen Pixel zentrierte Sphäre	subjektives Verfahren; abhängig vom Suchradius, bezieht aber ganze Sphäre ein

3.3 Kantendetektion

Die Kantendetektion ist im Bereich der digitalen Geländeanalyse weit verbreitet. Kanten sind umgangssprachlich abrupte Änderungen der Oberflächennormale, zum Beispiel Tischkanten. In digitalen Bildern hingegen sind Kanten markante Stellen mit einer durch lokalen Veränderung hervorgerufenen höheren Intensität oder Farbe. Diese Diskontinuitäten im Bild werden durch die Schärfe des Bildes deutlicher wiedergegeben. Strukturen wie Böschungen, Dämme und Gräben, können dadurch leichter erkannt werden. Sablatnig und Zambanini definieren Kanten in der Bildverarbeitung folgendermaßen: „Kanten kann man grob als jene Orte im Bild beschreiben, an denen sich die Intensität auf kleinem Raum und entlang einer ausgeprägten Richtung stark ändert. Je stärker sich die Intensität ändert, umso stärker ist auch der Hinweis auf eine Kante an der entsprechenden Stelle. Die Stärke der Änderung bezogen auf die Distanz ist aber nichts anderes als die erste Ableitung“ (Sablatnig und Zambanini 2013: 49).

Es gibt verschiedene Ansätze, Kanten aus Geländemodellen abzuleiten, einige davon sollen nun erläutert und in den Kontext von Böschungen, Dämmen und Gräben implementiert werden.

3.3.1 Krümmung (Curvature)

Die Krümmung von Geländedaten (die zweite Ableitung der Höhe oder auch die Neigung der Neigung) ist nicht nur – wie bereits in Kapitel 3.2.4 beschrieben – eine gute Möglichkeit, um Geländekleinformen zu detektieren, sie ist auch sehr gut geeignet, um Kanten in diesen Formen herauszubekommen. Da die Funktionsweise der Kantendetektion durch die Krümmung bereits in Kapitel 3.2.4 beschrieben wurde, soll sie hier nur als Methode erwähnt werden.

3.3.2 Faltung (Convolution)

Die Faltung ist eine weitere Methode der Kantendetektion. Sie ist gleichzusetzen mit einer Filterung der Pixelwerte, indem diese scharf- oder weichgezeichnet werden (vgl. ArcGIS). Das Schärfen ist oft notwendig, um Strukturen deutlicher voneinander abzugrenzen, um

Unschärfe zu kompensieren oder nachfolgenden Schärfeverlusten entgegenzuwirken. Üblich werden bei der Schärfung die hochfrequenten Bildanteile geschärft, die bereits für den Schärfeeindruck verantwortlich sind. Schärfungen werden im zweidimensionalen Bereich mit der zweiten Ableitung in horizontaler und vertikaler Richtung mit dem Laplace-Operator berechnet. Diese beiden Ableitungen werden in einer zweidimensionalen Funktion ($f(x,y)$) miteinander addiert. Die Richtungslänge von x und y variiert dabei von 3 bis 5 oder auch 7. Das Ergebnis des Laplace-Filters wird vom ursprünglichen Bild abgezogen, um die entsprechende Schärfung zu erhalten. (vgl. Sablatnig und Zambanini 2013: 49)

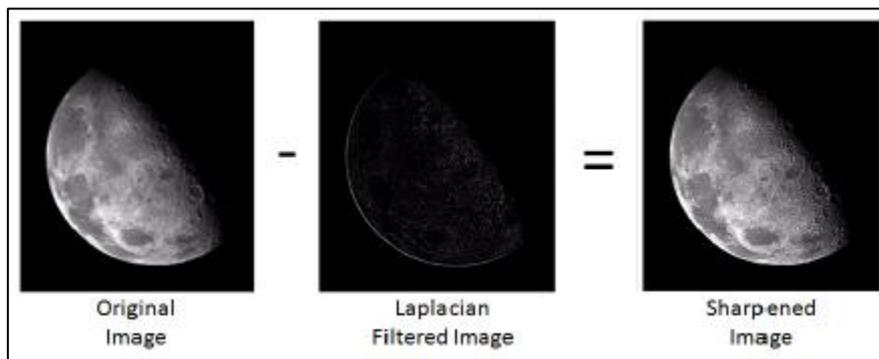


Abbildung 19, Schärfung eines Bildes durch Laplace-Filter. Quelle: Sablatnig und Zambanini: 49

Filter werden dazu verwendet, um die Qualität der Bilder zu verbessern. Wie bereits erwähnt ist die Filterungsgröße abhängig von der Richtungslänge. Diese Länge wird durch ein bewegtes, überlappendes Kernel – eine Nachbarschaft – berechnet. Üblich sind 3x3, 5x5 oder 7x7 Nachbarschaften. Die Pixel werden bei der Faltung also auf Grundlage der Gewichtung ihrer Nachbarn gefiltert. (vgl. ArcGIS)

Es gibt eine Vielzahl an Kantendetektionsfilter. Dies können in richtungsabhängig und -unabhängig unterschieden werden. Bei den **Gradienten basierten Kantendetektion** spricht man von einer richtungsabhängigen Detektion. Horizontale Gradientenfilter reagieren am stärksten auf Änderungen der Helligkeit in horizontaler Richtung, bei vertikalen Gradientenfiltern ist die Detektion bei vertikalen Kanten stärker. Beim Gradientenfilter handelt es sich um die erste Ableitung. Die bereits angesprochenen und häufig verwendeten **Laplace Filter** sind richtungsunabhängig und Ergebnisse der zweiten Ableitung. Dabei wird wieder die lokale Krümmung gemessen. Laplace Filter sind relativ rauschanfällig, weshalb vorab eine Glättung zur Rauschunterdrückung angewendet werden sollte. Dies findet zumeist gleich in Kombination statt, zum Beispiel mit dem Laplacian-of-Gaussian-Operator (LoG), der

zuvor mit einem Gauß-Filter glättet und anschließend mit dem Laplacian Filter die zweite Ableitung berechnet. (vgl. Sabaltnig und Zambanini 2013: 51)

Ein weiterer bekannter Vertreter ist der **Canny Operator**. Im Unterschied zu den meisten Filtern, die auf Intensitätsunterschiede in der Nachbarschaftsregion reagieren, versucht der Canny Operator über einen größeren Horizont Unterschiede wahrzunehmen. Dabei werden zunächst Kanten auf unterschiedlichen Auflösungsebenen gesucht und anschließend an jeder Position entschieden, welche Kante auf welcher Ebene dominiert. Ziel ist es, die Anzahl falscher Kantenmarkierungen zu verkleinern, Kanten natürlich so gut wie möglich zu lokalisieren sowie nur eine Markierung pro Kante zu finden. (vgl. Sabaltnig und Zambanini 2013: 52)

3.4 Bildanalyse

Als Bildanalyse oder auch systematische Analyse des Bildinhaltes versteht man im Bereich der Geoinformation jene Verfahrensweise, welche die in den Luft- oder Satellitenbildern enthaltenen unterschiedlichen Informationen in einzelne Elemente zerlegt (analysiert). Hierzu zählen Entwässerungssysteme, Erosionserscheinungen und die in dieser Masterarbeit detektierten Oberflächenformen wie Böschungen, Dämme und Gräben. (vgl. Albertz 2009: 143) Die Bildanalyse zählt zu den letzten Schritten in der Kette der Bildverarbeitung. Einige der Schritte wurden in dieser Arbeit bereits thematisiert. Zu Beginn jeder Bildverarbeitung steht die Aufnahme der Daten, zum Beispiel durch Airborne Laserscanning. Anschließend werden die Daten bearbeitet – zum Beispiel gefiltert – um danach analysiert zu werden. (vgl. Jähne 1997: 12f)

Im Vergleich zur Bildinterpretation, welche ein menschliches Auswerteverfahren ist, handelt es sich bei der Digitalen Bildauswertung oder Bildanalyse um Computerverfahren, die mehr oder weniger ohne menschlichen Beobachter auskommen. Das Ziel besteht darin, Bildinhalte durch automatische Verfahren darzustellen. Man bezeichnet dieses Verfahren als Maschinelles Sehen oder Computer Vision. (vgl. Albertz 2009: 154) Allgemein werden bei der digitalen Bildauswertung thematische Information aus einem Fernerkundungsdatensatz durch einen Rechner, der mathematisch-statistische Techniken anwendet, herausgefiltert (vgl. Lillesand und Kiefer 2000: 485f).

3.4.1 Klassifikation

Ausgangspunkt der Klassifizierung in der digitalen Bildauswertung war die Analyse multispektraler Daten. Es geht dabei um die Unterscheidung verschiedener Objektklassen aufgrund vorliegender Messdaten von Multispektralscanner, die vor allem in der Fernerkundung eingesetzt werden. Diese Kategorie, die auch Multispektral-Klassifizierung genannt wird, fällt allgemein in die Kategorie der Mustererkennung. Der Grundgedanke liegt darin, dass unterschiedliche Objekte auch unterschiedliche Reflexionseigenschaften aufweisen und so die Pixel in eigene Bereiche des Merkmalraums klassifiziert werden können. Im Idealfall lassen sich Punkthaufen mit eindeutigen Grenzen unterscheiden, wie es in Abbildung 20 erkennbar ist. (vgl. Albertz 2009: 155f)

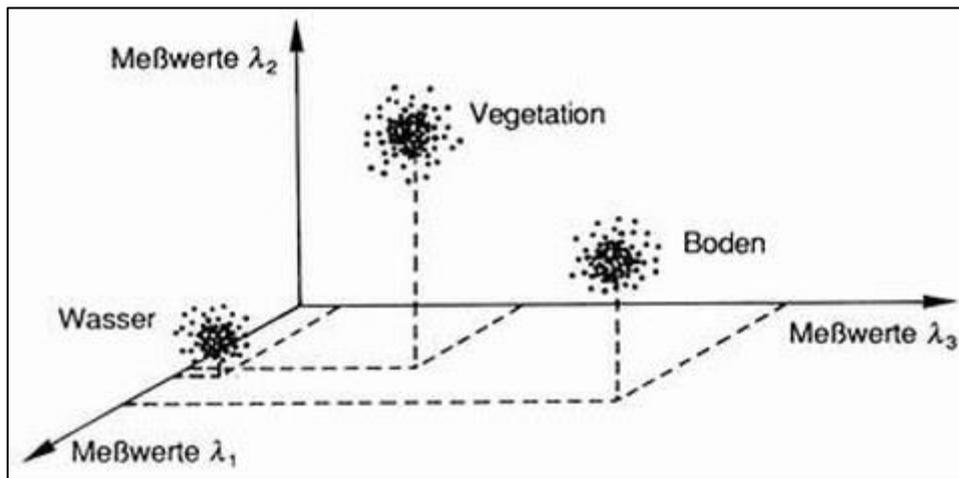


Abbildung 20, Merkmalsraum zur Multispektral-Klassifizierung. Quelle: Albertz 2009: 156

3.4.2 Überwachte Klassifikation

Um derart zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten, bedarf es einen zusätzlichen Gebrauch von Vorinformationen. Es muss bekannt sein, dass die einzelnen Punkthaufen die entsprechenden Objektklassen charakterisieren. Dafür benutzt man sogenannte Trainingsgebiete oder auch Referenzflächen, welche vorab definiert werden und von denen bekannt ist, welcher Klasse sie zugehören. Dieses Verfahren bezeichnet man als Überwachte Klassifizierung. (vgl. Albertz 2009: 157) Unter Überwachung versteht man in diesem Zusammenhang die vorherige Bestimmung der Cluster (Punkthaufen in Abbildung 20) im Merkmalsraum mit bestimmten Objekten, wodurch die Anzahl der Klassen, der Ort und die Ausdehnung bekannt sind (vgl. Jähne 1997: 563).

3.4.3 Unüberwachte Klassifikation

Demgegenüber steht die Unüberwachte Klassifikation oder auch Cluster-Analyse (vgl. Albertz 2009: 158). Bei dieser Klassifikation wird keine Kenntnis über die zu klassifizierenden Objekte vorausgesetzt. Die Muster im Merkmalsraum werden aus den zu klassifizierenden Objekten berechnet. Die Anzahl der Klassen ist vorab nicht bekannt, wodurch eine klare Trennung laut Jähne (1997: 563) möglicherweise weniger gut wird, jedoch ist die Methode objektiver als die subjektive Überwachte Klassifikation. Weitere Vorteile der Überwachten Klassifikation sind z. B. die Fähigkeit, die Arten von Landbedeckungsübergängen, die aufgetreten sind, explizit zu erkennen sowie die Robustheit gegenüber den verschiedenen atmosphärischen Einflüssen. Unüberwachte Klassifikationen

werden hingegen verwendet, wenn keine genauen Felddaten vorliegen, um Trainingsgebiete zu definieren. (vgl. Bruzzone und Prieto 2000: 1171)

3.4.4 Pixel- und objektbasierte Klassifikation

Allgemein können zwei Typen von Klassifizierungsprozeduren unterschieden werden, nämlich die pixelbasierte und die objektbasierte Klassifikation (vgl. Jähne 1997: 556). Die pixelbasierte Variante wurde bereits in den 70er Jahren eingesetzt. Daten bestehen aus Pixeln, also aus quadratischen Bildelementen. Die Pixel werden nach verschiedenen Vorverarbeitungsschritten und einer Georeferenzierung klassifiziert – ähnliche Pixel werden dabei unabhängig von Überwacher oder Unüberwacher Klassifikation der gleichen Klasse zugeordnet. Dieses Verfahren ist eine statistische Betrachtung. Pixel mit gleichen Reflexionswerten gelangen unabhängig von der Position im Bild in die gleichen Klassen. (vgl. Blaschke 2000: 159)

Das Problem dieser Methoden liegt einerseits an den sogenannten Mischpixeln. Das sind Bildwerte, die sich aus unterschiedlichen Merkmalen von Objekten zusammensetzen, was die Genauigkeit der pixelbasierten Methode stark beeinflusst. Andererseits sind statistische Analysen ein weiteres Problem, da Pixel nicht zur gleichen Klasse wie der Nachbarpixel gezählt werden, also keine räumliche Abhängigkeit genutzt wird. (vgl. Blaschke 2000: 159f)

Die heute weitaus effizientere und häufiger benutzte Methode ist die objektorientierte Klassifikation. Bei dieser Methode werden Mischpixel, Topologie-Probleme sowie Nachbarschaftsbeziehungen miteinbezogen (vgl. De Kok et al. 1999: 1). Die objektorientierte Klassifikation ist stark mit dem Begriff der Segmentierung verknüpft. Hierfür werden in einem Bild voller Pixel zusammengehörige Strukturen zu einer gemeinsamen Gruppe klassifiziert. Gehören also benachbarte Pixel einer Gruppe bzw. einem Objekt an, so werden sie zusammengefasst, segmentiert. Zu den wichtigsten Parametern der Segmentierung zählen Nachbarschaft und Homogenitätskriterien, welche aufzeigen sollen, ob die zusammengefassten Segmente auch wirklich homogen sind. (vgl. Baatz 1997: 2) Jähne (1997: 556) bezeichnet die Segmentierung als eine Extrahierung von lokalen Objektmerkmalen, also eine Unterscheidung von Objekten in Bezug auf den Hintergrund oder in Bezug auf andere Objekte.

Pixelbasierte Klassifikationen beinhalten weder topologische Nachbarschaftsbeziehungen, noch können sie über die Form der Objekte etwas aussagen. Um die Landschaftsanalyse zu erweitern braucht es laut Dragut und Blaschke die objektbasierte Klassifikation, um Formen, exakte Positionen und Größen von Objekten zu bestimmen. (vgl. Dragut und Blaschke 2006: 333)

Dennoch ist es wichtig, die objektorientierte Klassifikation von der Segmentierung zu unterscheiden. In der Hierarchie der Bildanalyse ist die Segmentierung nämlich einen Schritt vor der Klassifikation anzubringen. Es werden hierbei noch keine Klassen per se gebildet, sondern lediglich die Geometrie der zu klassifizierenden Objekte. Somit ist eine richtige Zuordnung zu den Klassen bereits von der Segmentierungsqualität abhängig. Bei der Segmentierung wird ein Bild auf Grundlage der Pixelwerte eingeteilt. Diese Einteilung weist eine Topologie – zum Beispiel Fläche und Umfang – und Lagebeziehungen, jedoch noch keine thematischen Bezüge auf. (vgl. Neubert 2005: 26)

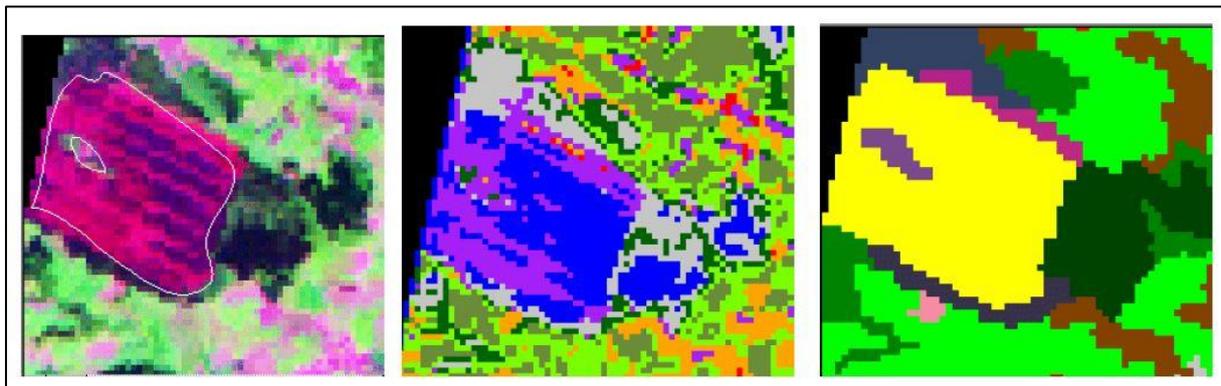


Abbildung 21, Abgrenzung eines Moores. Links: Darstellung durch Landsat. Mitte: pixelbasiert. Rechts: Segmentierung und objektorientiert. Erkennbar ist sofort, dass bei der pixelbasierten Methode Ausreißer entstehen, da die Lage und Nachbarschaft ignoriert wird. Quelle: Blaschke 2000: 161

3.4.5 Methoden der Klassifizierung

Im Bereich der Bildanalyse gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren der Klassifizierung, welche überwacht, unüberwacht, pixel- oder objektorientiert sein können. Die wichtigsten sollen in diesem Kapitel kurz Erwähnung finden.

Das **Minimum-Distance-Verfahren** ist ein überwachtes, einfaches Verfahren, das keine hohen Rechenzeiten in Anspruch nimmt. Es werden zuvor Trainingsgebiete erstellt und daraus anschließend die Mittel der Messwerte in den Spektralkanälen jeder Objektklasse berechnet. Nun wird von jedem Bildelement der Abstand zum Mittelpunkt dieser Kanäle der vordefinierten Klassen berechnet. Die Pixel werden danach den Klassen zugeordnet, bei denen der Abstand am geringsten ist. (vgl. Albertz 2009: 160)

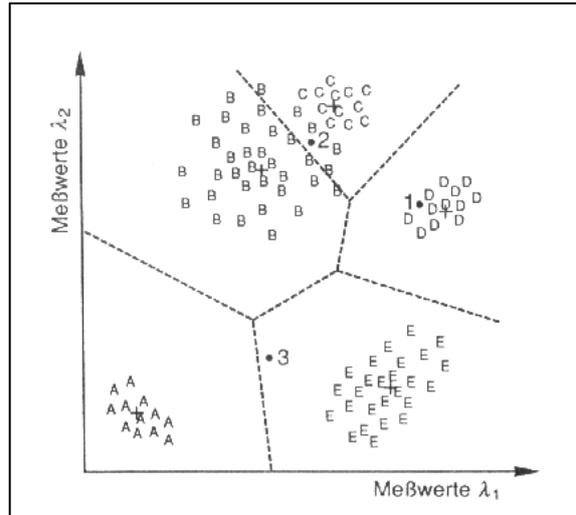


Abbildung 22, Minimum-Distance-Verfahren. Quelle: Albertz 2009: 160

Das **Quaderverfahren**, oder auch *Parallelepiped/Box Classifier*, ist der Minimum-Distance-Methode recht ähnlich, mit dem Unterschied, dass in den Kanälen eine Ober- und eine Untergrenze für die Objektklassen definiert wird, was zu rechteckigen Boxen führt, denen die Pixel zugeordnet werden. Überschneidungen werden vermieden, indem zusätzliche Abgrenzungen der Boxen erstellt werden. Gehören die Pixel keinem vordefinierten Rechteck an, bleiben sie unklassifiziert außen vor. (vgl. ebd. 2009: 160f)

Das **Maximum-Likelihood-Verfahren**, das Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit, ist eine Methode, die besonders häufig verwendet wird. Dabei werden aufgrund von statistischen Kenngrößen der zuvor durch Trainingsgebiete (\rightarrow überwachtes Verfahren) definierten Klassen die Wahrscheinlichkeiten berechnet, zu welcher Klasse die einzelnen Pixel zugeordnet werden. (vgl. ebd. 2009: 159)

Weitere Methoden sind die **Cluster-Analyse**, die **Baumförmige Klassifizierung** oder **Künstliche Neuronale Netze (KNNs)**. Besonders letztere, auch bekannt unter Machine Learning oder im weiteren Verlauf Deep Learning, haben in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung erlebt. Künstliche Neuronale Netze sind auf Grundlage des menschlichen Gehirns sowie des menschlichen Nervensystems entstanden. Verschiedene Elemente (Neuronen) sind untereinander verbunden und bilden ein Netz. (vgl. Walczak und Cerpa 2003: 631) Neuronale Netze wurden in dieser Masterarbeit aus verschiedenen Gründen nicht

verwendet. Zum einen wurde bei der intensiven Literaturrecherche kein vergleichbarer Ansatz gefunden, der diese Problemstellung durch KNNs bewältigt. Auch die Kommunikation mit den Nachbarländern (Kapitel 4.2) zeigte keinerlei Ansätze von Deep Learning. Des Weiteren fehlt dem Autor schlichtweg das notwendige Know-how, um die Problematik auf diese Weise zu lösen, weshalb eine andere, flexible Methode verwendet wurde, um die Parameter Schritt für Schritt abzuarbeiten. Dies soll allerdings nicht bedeuten, dass künstliche neuronale Netze nicht in der Lage sind, Böschungen, Dämme und Gräben zu detektieren.

3.5 Beispiele für die Verwendung der dargestellten Methoden

Dieses Kapitel kann als Stand der Forschung im Bereich der Detektion von Geländekleinformen betrachtet werden. Es sollen verschiedene Methoden aus diversen Papers vorgestellt werden, die sich mit ähnlichen Thematiken dieser Arbeit befassen. Dabei werden für die vier dargestellten Methoden – Digitale Geländeanalyse, Visualisierung von Geländedaten, Detektion von Kanten sowie Bildanalyse – jeweils Beispiele herangezogen, die der Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben nahekommen. In Kapitel 4.2 wird außerdem ein Vergleich zu den Nachbarländern Deutschland und Schweiz gezogen.

3.5.1 Automatisierte Detektion von möglichen Damm Gebieten durch digitale Geländeanalyse

2019 beschäftigten sich Wimmer, Pfeifer und Hollaus von der Technischen Universität Wien mit der Fragestellung zur automatisierten Detektion von möglichen Damm Gebieten. Es geht dabei also nicht primär um eine Detektion von bereits vorhandenen Oberflächenformen für die Erweiterung eines Kartenwerks beziehungsweise eines digitalen Landschaftsmodells, allerdings handelt es sich hierbei um eine Detektion durch digitale Geländeanalyse im Kontext von Dämmen und Gräben.

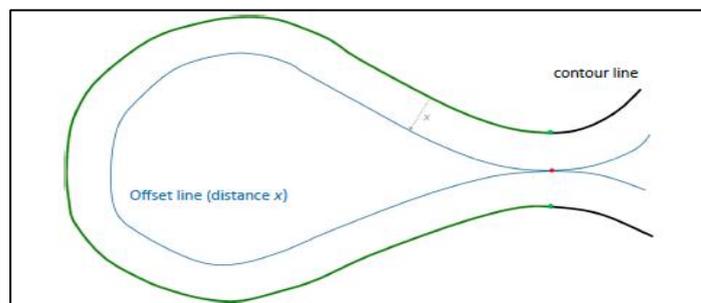


Abbildung 23, Damm-Gebiet-Detektion von Wimmer Pfeifer und Hollaus 2019: 3

Die Methode beschreibt einen Weg, um mögliche Wasserrückhaltebecken an der Oberfläche zu detektieren. Als Datensatz wird ein digitales Geländemodell verwendet, aus dem Ein-Meter Höhenschichtlinien extrahiert wurden. Diese Linien erhalten einen Offset von einer bestimmten Distanz, also eine parallele „Einrückung“. Schneiden sich diese Offset-Linien selbst und ist die originale Höhenschichtlinie ausreichend gebogen, so wird die darin enthaltene Fläche als Retentionsbecken detektiert, wo ein Damm zur Wasserstauung gebaut werden könnte. (vgl. Wimmer, Pfeifer und Hollaus 2019: 3) Dies zeigt eines von vielen Beispielen, wie man mit digitalen Geländemodellen bestimmte Bereiche der Erdoberfläche detektieren kann.

3.5.2 Visualisierung von Bodendenkmälern durch Digitale Geländemodelle

Die Visualisierung von Bodendenkmälern in der Archäologie ist einer der häufigsten Anwendungsgebiete von digitalen Geländemodellen. Viele Paper oder Dissertation beschäftigen sich mit dieser Thematik, da durch die hochauflösenden Geländemodelle bis dato unbekannte Bodendenkmäler in Wäldern oder auch in abgelegenen Gebieten detektiert werden können. (vgl. Gertloff 2011: 86) In Deutschland wurde die Visualisierung eingesetzt, um Bodendenkmäler, welche ein Teil der zu erhaltenden und schützenden Kultur sind, für die Denkmalpflege zu detektieren. Besonders Gebiete im Wald sind noch wenig durch Geländeinspektion erkundet worden und insbesondere hier sind die Denkmäler noch gut erhalten, da sie nicht so stark vom Menschen oder der Natur in Mitleidenschaft gezogen werden. Da digitale Geländemodelle im Vergleich zur Flugprospektion, die sich mit Luftbildern beschäftigt, die Vegetation ausschließen kann

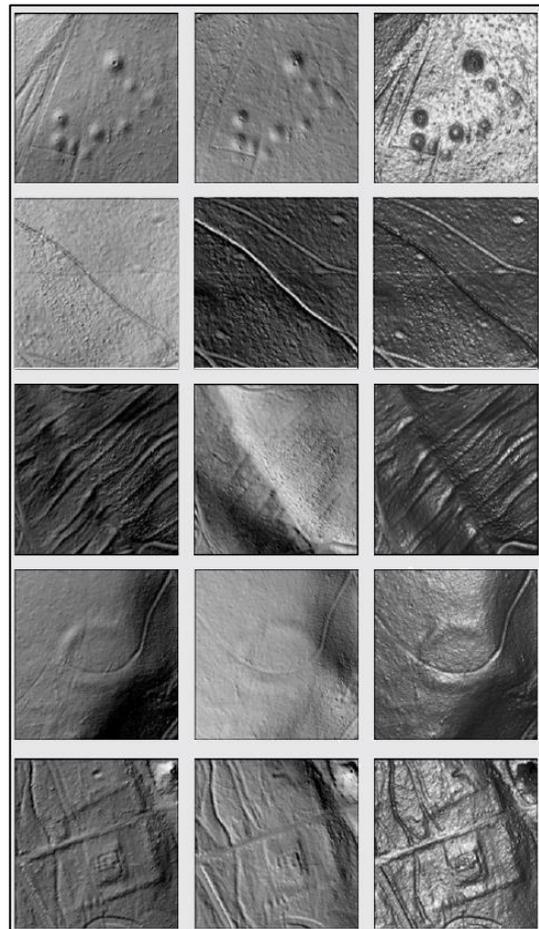


Abbildung 24, Bodendenkmalsuche in Hessen. von oben nach unten: Hügelgräberfeld, Landwehr und Meilerplätze, Ackerterrassen, Ringwall, römischer Gutshof. Schummerungen von links nach rechts: Schräglightschummerung aus NW 30° Höhe, Gelände zweifach überhöht; Schräglightschummerung aus SW mit 30° Höhe zweifach überhöht; Böschungsschummerung, Senkrechtbeleuchtung, 20-fach überhöht. Quelle: Gertloff 2011: 90

(vgl. dazu Kapitel 2.3), wurde dies in den letzten Jahren eine völlig neue Alternative in der Archäologie. In Hessen wurde diese Methode mit der Schräglichtschummerung von einem Geländemodell mit einem Meter Auflösung durchgeführt und anschließend wurden die erkennbaren Denkmäler durchmustert. Es wurden Grabhügel, römische Gebäude, ein Ringwall sowie ehemalige Ackerterrassen detektiert (siehe Abbildung 24). (vgl. Gertloff 2011: 87)

An der Universität Wien hat sich Nina Hofer in ihrer Masterarbeit (2019) ebenfalls mit der Visualisierung von archäologischen Formen auseinandergesetzt. Dabei wurden viele unterschiedliche Methoden der Visualisierung miteinander verglichen, wie zum Beispiel die in Kapitel 3.2 beschriebenen Schräglichtschummerung, Neigung, Sky-View-Faktor, Openness, Lokales Reliefmodell oder die Krümmung. Als Resümee der Arbeit konnte gezeigt werden, dass keine Methode zu einhundert Prozent sämtliche Formen perfekt erkennen kann, sondern dass eine Mischung der Methoden von Vorteil sei. Die Schräglichtschummerung kann als bester Allrounder bezeichnet werden, das lokale Reliefmodell funktioniert sehr gut in flachen Gebieten beziehungsweise gleichbleibenden Neigungen, Sky-View-Faktor und Openness sind gut für Spezialfälle wie Hohlwege oder Bergbaugruben. (vgl. Hofer 2019: 102f)

3.5.3 Automatisierte Detektion von Geländebruchkanten mit Airborne Laserscanning Daten

In der Literatur gibt es zwei Wege, wie Geländekanten automatisiert extrahiert werden können, nämlich rasterbasiert anhand der zweiten Ableitung – dies ist die gängigste Methode – oder durch direkte Modellierung aus der Airborne Laserscanning Punktwolke heraus. Im Folgenden sollen nun einige Beispiele aus Arbeiten zu dieser Thematik aufgezeigt werden. Allgemein sei noch gesagt, dass Geländebruchkanten ein wichtiger Indikator für Böschungen, Dämme und Gräben sind und diese auch dadurch charakterisiert werden.

Regine Brügelmann (2000) war eine der ersten, die sich mit der Detektion von Geländebruchkanten auseinandergesetzt hat. In ihrer Arbeit „*Automatic Breakline Detection from Airborne Laser Range Data*“ aus dem Jahr 2000 verwendet sie eine rasterbasierte Methode der zweiten Ableitung, in diesem Fall der Krümmung. Bruchkanten sind eine

wichtige Ergänzung für die Genauigkeit von Geländemodellen und deren Visualisierung. Vor allem in großmaßstäbigen Fragestellungen, zum Beispiel bei der Berechnung von Wasserhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten, bei Überschwemmungen im Bereich der Wasserwirtschaft oder im Bereich der exakten Straßenplanung. Bruchkanten können bei diesen Fragestellungen helfen, um zusätzliche Informationen über das Gelände zu gewinnen. Zudem können Bruchkanten bei der Datenreduktion hilfreich sein. Geländeinformationen können ebenso durch die in Kapitel 2.3.2 beschriebenen TIN-Modellierungen in Form von Dreiecksvermaschung dargestellt werden. Durch Bruchkanten werden diese exakter dargestellt. Bei der verwendeten Methode handelt es sich um eine kantenbasierte Segmentierung. Dabei sollen signifikante Oberflächendiskontinuitäten aus den Pixeln der Krümmung detektiert werden. Es werden Hypothesentests durchgeführt, wobei Kanten als die Ränder von homogenen Regionen bezeichnet werden. (vgl. Brügelmann 2000: 109)

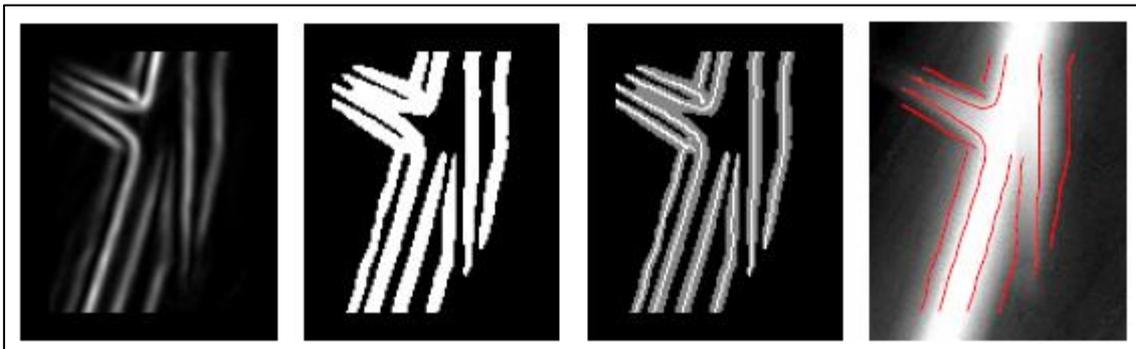


Abbildung 25, Geländebruchkanten-Detektion nach Brügelmann (2000: 113). Von links nach rechts: Krümmung (Curvature); klassifizierte Gebiete aus Krümmung; Verdünnung der Flächen; Raster-zu-Vektor

Rutzinger, Höfle und Kringer (2012) haben sich mit der gleichen Methode beschäftigt. Bruchkanten werden laut ihnen verwendet, „um die charakteristischen Informationen zu Diskontinuitäten im Prozess der DTM-Filterung und -Interpolation beizubehalten und zu verfeinern“ (Rutzinger et al. 2012: 33). Bruchkanten sind Orte mit der höchsten Information bezüglich der Variabilität von Höhendaten und dadurch perfekt geeignet, um das Gelände sowie die geomorphologischen Prozesse und Formen zu beschreiben. Der Workflow sieht ähnlich aus wie bei Brügelmann. Zuerst wird über die zweite Ableitung die Krümmung berechnet, anschließend werden hohe Werte, die für Ober- und Unterkanten verantwortlich sind, durch einen vom Anwender definierten Grenzwert reklassifiziert. Danach werden die Pixel zu einer Linie ausgedünnt und anschließend in Vektordaten umgewandelt. Eine automatisierte Detektion von Bruchkanten ist, wie schon bei den Ergebnissen von

Brügelmann, durchaus möglich, die Genauigkeit der Ergebnisse hängt jedoch stark von den Daten selbst sowie von den gesetzten Parametern (Filtergrößen) und Grenzwerten (Krümmungsgrenzwert) ab und ist dadurch ein recht subjektives Verfahren. (vgl. Rutzinger et al. 2012: 41) Weitere Arbeiten haben den Ansatz der Rasterisierung ebenso verfolgt, wie zum Beispiel Anna Lundgren in ihrer Masterarbeit „*Development of a method for mapping the highest coastline in Sweden using breaklines extracted from high resolution digital elevation models*“ oder Cracknell et al. (2013) mit „*Estimating Bedding Orientation From High-Resolution Digital Elevation Models*“.

Im Vergleich zum Ansatz der Rasterisierung, die eine vorherige Klassifikation der Höhendaten sowie eine Festlegung von Grenzwerten voraussetzt, was zu Ungenauigkeiten durch Glättungen führen kann, werden beim Verfahren von Christian Briese aus dem Jahr 2004 die Geländekanten direkt aus der Airborne Laserscanning Punktwolke detektiert. Dabei werden zuerst potenzielle Startsegmente detektiert. Jedem Punkt der Punktwolke wird eine geschätzte Fläche zweiter Ordnung zugewiesen, wodurch wiederum die positiven und negativen Krümmungswerte abgeleitet werden können. Dann werden, wie schon bei der Rasterisierung, geeignete Schwellenwerte gesetzt. Die geschätzten Ebenen werden anschließend verschnitten. Die Geraden der Schnitte beschreiben eine Tangente an die Geländekante. Dann wird die Vor- und Rückrichtung extrapoliert und der Prozess bis zum gesetzten Abbruchskriterium (zum Beispiel Schnittwinkel unter 10 Grad) wiederholt. (vgl. Mandlbürger et al. 2009: 91)

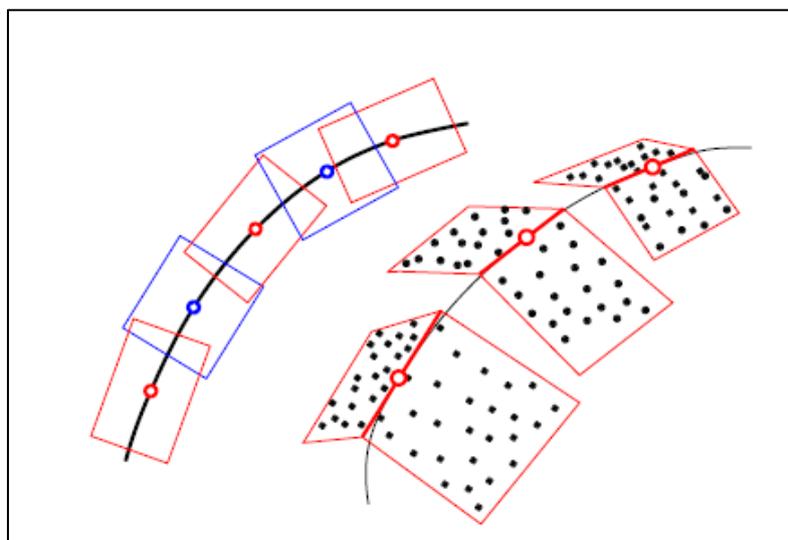


Abbildung 26, Detektion von Bruchkanten durch die Verschnidung von Ebenen aus ALS-Punktwolken. Links: Geländekante in XY-Ebene; Rechts: Ebenenpaaren mit 3D-Schnittgeraden und 3D-Punkten. Quelle: Briese 2004: 26

3.5.4 Automatisierte Detektion von Bodendenkmälern durch objektorientierte Bildklassifikation

Im Vergleich zur in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Visualisierung von Bodendenkmälern und der anschließenden Kartierung ist die automatisierte Detektion von Bodendenkmälern mehr oder weniger frei von Subjektivität. Meyer (2015) schreibt dazu, dass trotz mittlerweile verschiedener Visualisierungstechniken, die ohne simulierte Beleuchtungsquellen auskommen, immer noch eine hohe Anzahl an Fehlern bei der anschließenden Kartierung passieren und zudem ein massiver Zeitaufwand entsteht. Fehlerquellen können falsche Bildschirmdarstellungen sein, wodurch Verdachtsfälle schlichtweg übersehen werden. (vgl. Meyer 2015: 2) Nina Hofer (2019) hingegen meint, dass die Subjektivität und das Experimentieren einen wichtigen Prozess in der Detektion von Bodendenkmälern darstellen, da verschiedene Methoden, Parameter und Grenzwerte miteinander in Beziehung gesetzt werden und die Methoden allgemein bewertet werden, wodurch die Interpretation an die Gegebenheiten angepasst werden kann (vgl. Hofer 2019: 103).

Meyer hat sich in seiner Masterarbeit mit einer automatisierten, objektorientierten Bildklassifikation von Bodendenkmälern auseinandergesetzt, um menschliche Fehler sowie den zeitlichen Aufwand zu minimieren. Als Ausgangsdaten dient eine berechnete Difference Map, ein durch Trendbereinigung (Kapitel 3.2.5) geglättetes digitales Geländemodell, das nur die kleinräumigen Erhebungen und Vertiefungen darstellt. Die Software für die objektorientierte Bildklassifikation ist eCognition, die in vielen Arbeiten ähnlicher Thematik verwendet wird. Albertz (2009) erwähnt die Software auch in „*Einführung in die Fernerkundung*“. eCognition arbeitet mit einer Segmentierung der Daten, die durch die zuvor erstellte Klassifizierung vorausgeht. Pixel, die benachbart sind und hinsichtlich definierter Eigenschaften gleichartig sind, werden zusammengefasst. Dadurch entstehen anders als bei der pixelorientierten Klassifikation Objekte, die Nachbarschaftsbeziehungen aufweisen. (vgl. Albertz 2009: 161f) Auf die Objekte werden verschiedene Eigenschaften wie Größe, Form oder der durchschnittliche Pixelwert berechnet. Meyer definiert in seiner Arbeit Klassen, die auf die verschiedenen Bodendenkmäler ausgerichtet sind. Zum Beispiel gibt es Grabhügel, die „klein, rund und ausschließlich von niedrigeren Objekten umgeben sind“ oder Gräben von Turmhügel, die „lang, schmal rund und von höheren Bereichen umgeben sind“. eCognition zeigt am Ende der Erfassung GIS-kompatible Verdachtsfälle an, die interpretiert werden

müssen. Verdachtsfälle werden durch die Software sortiert, je nachdem wie stark sie dem Idealtyp entsprechen. Die angewandten Regeln können wie bei einem Model-Builder oder einem Skript für beliebige Gebiete verwendet werden. Am Ende des Tages steht also auch eine Nachbearbeitung der automatisierten Daten am Programm. Die erhaltenen Daten wurden mit Referenzdaten verglichen, eine Trefferquote von 90 bis 100 % wurde erlangt. Die Ergebnisse der Klassifikation mit eCognition hängt natürlich auch von mehreren Faktoren wie dem Erosionsgrad der Strukturen, den Klassifikationseinstellungen in eCognition sowie der Datenqualität ab. (vgl. Meyer 2015: 4-6)

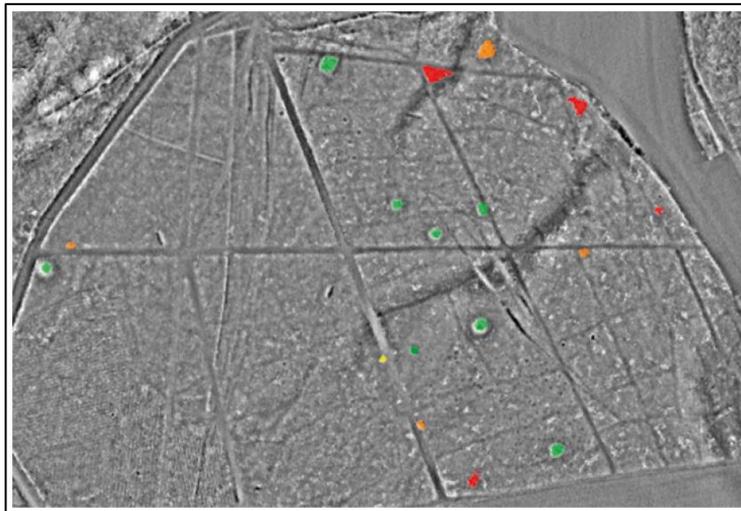


Abbildung 27, Klassifikationsergebnis Grabhügel mit eCognition. Grüne Kreise sind idealtypische Formen. Quelle: Meyer 2015

3.5.5 Automatisierte Detektion von Landformen durch objektorientierte Bildklassifikation

Ein weiteres Anwendungsgebiet der objektorientierten Bildklassifikation ist die automatisierte Detektion von Landformen. Wie schon beim Beispiel zur automatisierten Detektion von Bodendenkmälern sind auch hier die Beweggründe für eine automatisierte Detektion der hohe Zeitaufwand sowie die Subjektivität, die bei der manuellen Digitalisierung im Feld oder durch Hilfe von Stereo-Luftbildern entstehen. Dragut und Blaschke (2006) bezeichnen diese Ergebnisse als weder transparent noch reproduzierbar. Bei diesem Verfahren werden verschiedene Layer als Informationsquellen verwendet: Neigung, Profilkrümmung, Geländemodell sowie Trendbereinigung, wodurch die Segmentation als Multiskala Bildklassifikation bezeichnet werden kann. Für die Klassifikation wurden neun Klassen definiert, alle verschiedene Arten von Neigungen oder Oberflächenkrümmungen wie

Steilhang, Seitenhang oder Gipfel. Für die Klassen wurden Parameter festgelegt, beim Steilhang zum Beispiel über 45 Grad. Wie bereits beim vorherigen Beispiel wurde die Software eCognition verwendet und dadurch Verdachtsfälle automatisiert detektiert, weshalb diese Methode natürlich auch wiederum abhängig von den Daten sowie den Klassifikationseinstellungen ist. (vgl. Dragut und Blaschke 2006: 331f) Nicht nur in der kommerziellen Software eCognition lassen sich objektorientierte Bildklassifikationen durchführen. Auch die frei zugängliche Software SAGA bietet dies an. Der Ansatz beruht auf einer Wachstumsanalyse (Region Growing). Dabei werden Nachbarschaftspixel mit ähnlichen Eigenschaften zu homogenen Objekten zusammengefügt. Gestartet wird dabei bei sogenannten Seedpixeln. Die Definition dieser ist der wichtigste Schritt, da dadurch die Qualität der anschließenden Segmentierung beeinflusst wird. (vgl. Böhner et al. 2006: 34) Während es bei diesen Forschungsarbeiten vor allem um die Klassifikation beziehungsweise Abgrenzung der Landschaft allgemein geht, sollen in dieser Masterarbeit spezielle, kleinere Landschaftsformen extrahiert werden. Es soll also nicht ganz Österreich in verschiedene Landschaftsformen eingeteilt werden (wie in Abbildung 28), sondern nur einzelne Teile von Österreich, die eine Vielzahl an Parametern überstehen, detektiert werden.

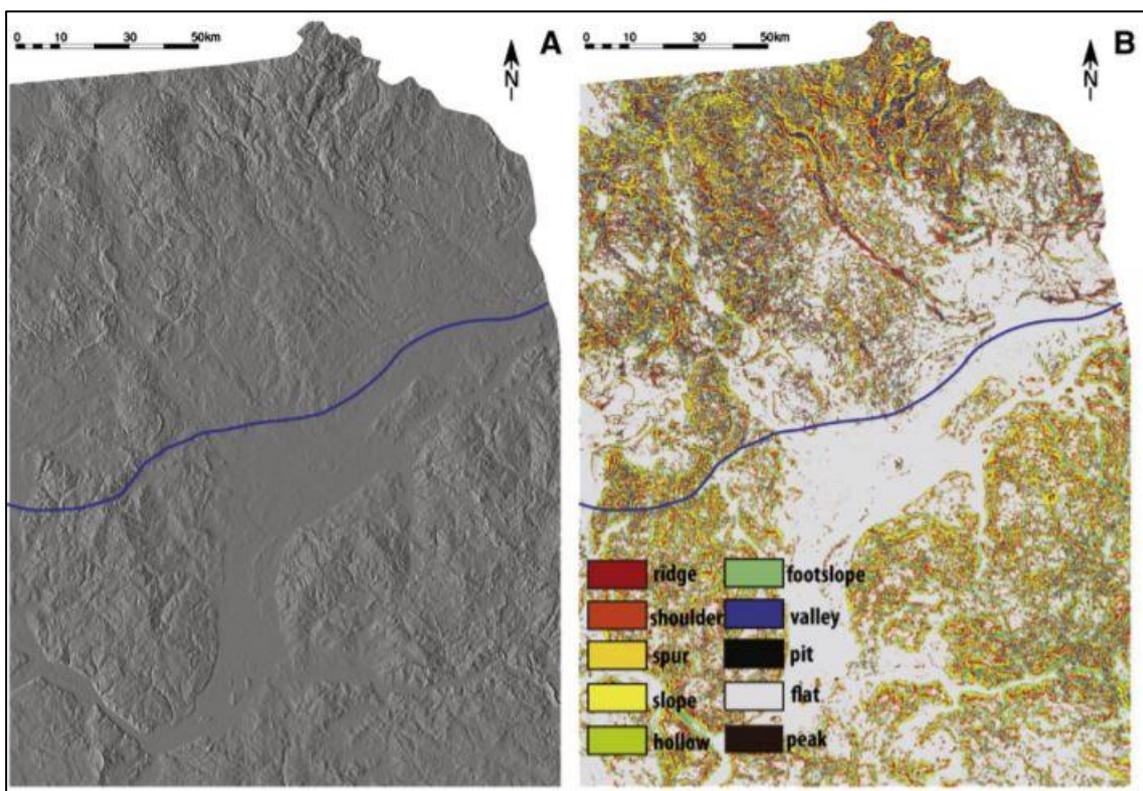


Abbildung 28, Darstellung eines Gebietes durch eine Schummerung eines DGMs (A) sowie durch eine geomorphometrische Karte (objektorientierte Bildklassifikation der Landschaft, B). Quelle: Jasiewicz und Stepinski 2013: 155

Die durchgeführte Literaturanalyse zeigt auf der einen Seite ein breites Spektrum an Möglichkeiten, Objekte aus Airborne Laserscanning Daten zu detektieren – zum Beispiel durch Visualisierung unterschiedlicher Geländemodelle oder durch eine automatisierte Detektion durch objektorientierte Bildklassifikation –, auf der anderen Seite jedoch wurde in der umfassenden Recherche keine gleichwertige Arbeit in Bezug auf die Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben gefunden. Dies zeigt zum einen die Schwierigkeit dieser Arbeit, zum anderen aber auch die Wichtigkeit dieser Problemstellung, die noch nicht weit genug erforscht wurde. Im nachfolgenden Kapitel 4 wird der Stand der Forschung durch zwei Vergleiche mit den Nachbarländern Deutschland und der Schweiz erweitert.

4 Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben

Dieses Kapitel soll dem Leser die dargestellten Methoden der Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben in einem ausgewählten Untersuchungsgebiet in Österreich näherbringen. Ziel dieser Arbeit ist es, diese Formen zu detektieren, damit sie im späteren Verlauf in das digitale Landschaftsmodell sowie anschließend in automatisch erstellte digitale Karten einfließen können und allgemein als eigenständiges, vektorisiertes Produkt zur Verfügung stehen. Zu Beginn wird auf die angesprochenen Geländekleinformen im Kontext der österreichischen Karten eingegangen. Es sollen vorab Definitionen für die Formen getroffen werden und anschließend das Digitale Landschaftsmodell von Österreich kurz beschrieben wird. Danach wird der bereits angesprochene internationale Vergleich nähergebracht, bevor die eigentliche Detektion beginnt. Es werden das Untersuchungsgebiet und die zur Verfügung stehenden Daten vorgestellt, die Parameter für die Detektion aufgelistet sowie die Methodik beschrieben. Danach wird Schritt für Schritt die Detektion erklärt und am Ende dieses Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert und analysiert. Das Kapitel kann als Hauptteil der Arbeit angesehen werden und soll die Forschungsfragen in Bezug auf die Machbarkeit der Detektion beantworten.

4.1 Geländekleinformen im Kontext der österreichischen Karten

4.1.1 Definitionen

Zu Beginn sollen Böschungen, Dämme und Gräben definiert werden. Ein **Graben** ist ein abgesunkenes langgestrecktes Krustensegment, das an den Längsseiten von gegeneinander geneigten Abschiebungen – sogenannten Grabenrandverwerfungen – begrenzt wird (Abbildung 29). Ein Graben bildet morphologisch eine Senke, wenn der Graben nicht durch Abtragung der Grabenschultern eingeebnet wurde. (vgl. Spektrum)

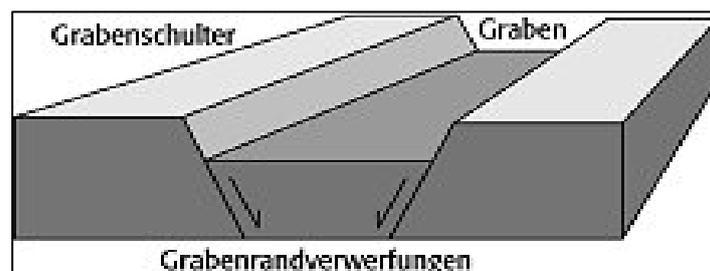


Abbildung 29, Aufbau eines Grabens. Quelle: Spektrum. Online unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/graben/6189> (27.05.2020)

Ein Graben kann auch ein offener, künstlicher Wasserlauf mit einer Sohlbreite von kleiner als zwei Metern sein. Dieser kann verschiedene Funktionen erfüllen, wie die Entwässerung oder Vorflut, d.h. dem Ableiten und Weiterleiten von Wasser aus kleineren Gräben oder Dränen. Ein Graben kann auch unmittelbar zur Bewässerung oder als Zuleiter dienen. (vgl. Spektrum)

Ein **Damm** wird als Fundament für Verkehrswege und als Absperreinrichtung für Wasserbauten bezeichnet. Dämme haben in der Geschichte der Menschheit einen großen Einfluss genommen. In China, Indien oder Ägypten wurden im Altertum zahlreiche Dammbauwerke für Speicheranlagen zu Bewässerungszwecken errichtet, im Mittelalter dienten in Europa Staudämme bereits als Kraftgewinnung sowie Aufbereitungsanlagen im Bergbau. (vgl. Striegler und Werner 1969: 13)

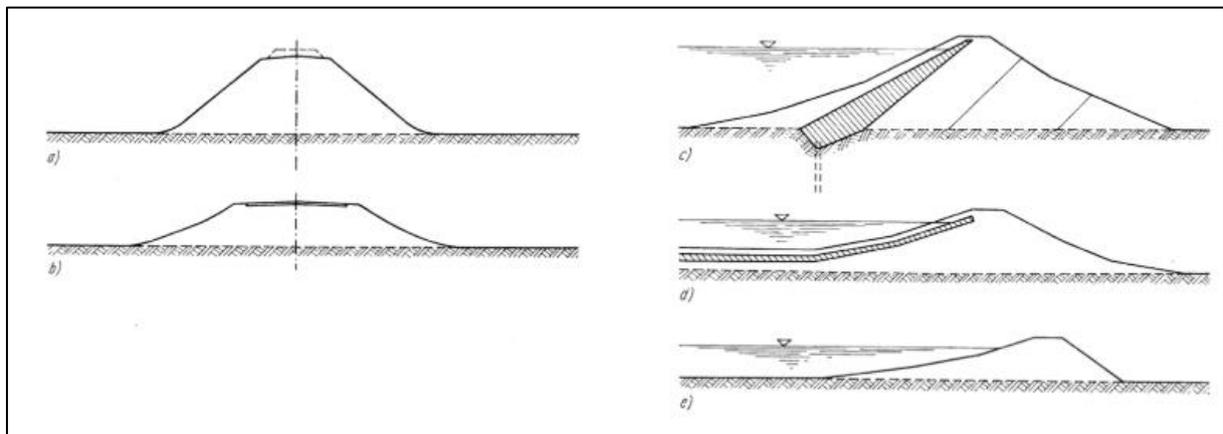


Abbildung 30, charakteristische Dammschnitte. a: Eisenbahndamm, b: Straßendamm, c: Staudamm, d: Kanaldamm, e: Deich. Quelle: Striegler und Werner 1969: 14

Abbildung 30 zeigt verschiedene Dammtypen im Querschnitt. Dämme werden nach Striegler und Werner (1969: 14) in drei Hauptgruppen eingeteilt:

1. Verkehrsdämme für den Eisenbahnbau und den Straßenbau
2. Wasserdämme für Kanalbauten, Binnenwasserstraßen, Speicherbauten, Wasserkraftanlagen, Hochwasserschutzbecken sowie Deiche bei Flüssen und Seen
3. Sondergebiete wie Bergbau und Metallurgie für Absatzbecken und Schutzanlagen

Ein Dammkörper dient vor allem als Fundament zur Übertragung der Verkehrsbelastung auf den tragfähigen Untergrund unter Berücksichtigung der Tragfähigkeit und Standsicherheit des Dammkörpers sowie zur Absperrung von Wasser über die gesamte Talbreite zur Erzeugung eines Stauraumes, der als Speicher verwendet wird. (vgl. ebd.: 18)

Im kartographischen Kontext ist die Bezeichnung der „**Böschung**“ häufiger anzutreffen. Böschungen sind immer Teile von Dämmen und Gräben, nämlich die geneigten Flächen. Kommt eine geneigte Fläche nur einseitig vor, so ist dies weder ein Graben noch ein Damm, sondern eine Böschung. Böschungen werden laut GeoData Zone folgendermaßen definiert: „Geländeanschnitt, der zwei Flächen, die sich auf unterschiedlichem Niveau befinden und eine geringere Neigung aufweisen, miteinander verbindet. Die Böschung unterscheidet sich von ihrer Umgebung insbesondere durch eine größere Geländeneigung (Neigungsänderung $>1,5^\circ$). Die Oberkante ist deutlich ausgeprägt. Die Unterkante kann ebenfalls dieses Merkmal aufweisen oder allmählich auslaufen“ (Geodata Zone 2010). All diese Parameter sollen auch in der späteren Detektion dieser Flächen einfließen.

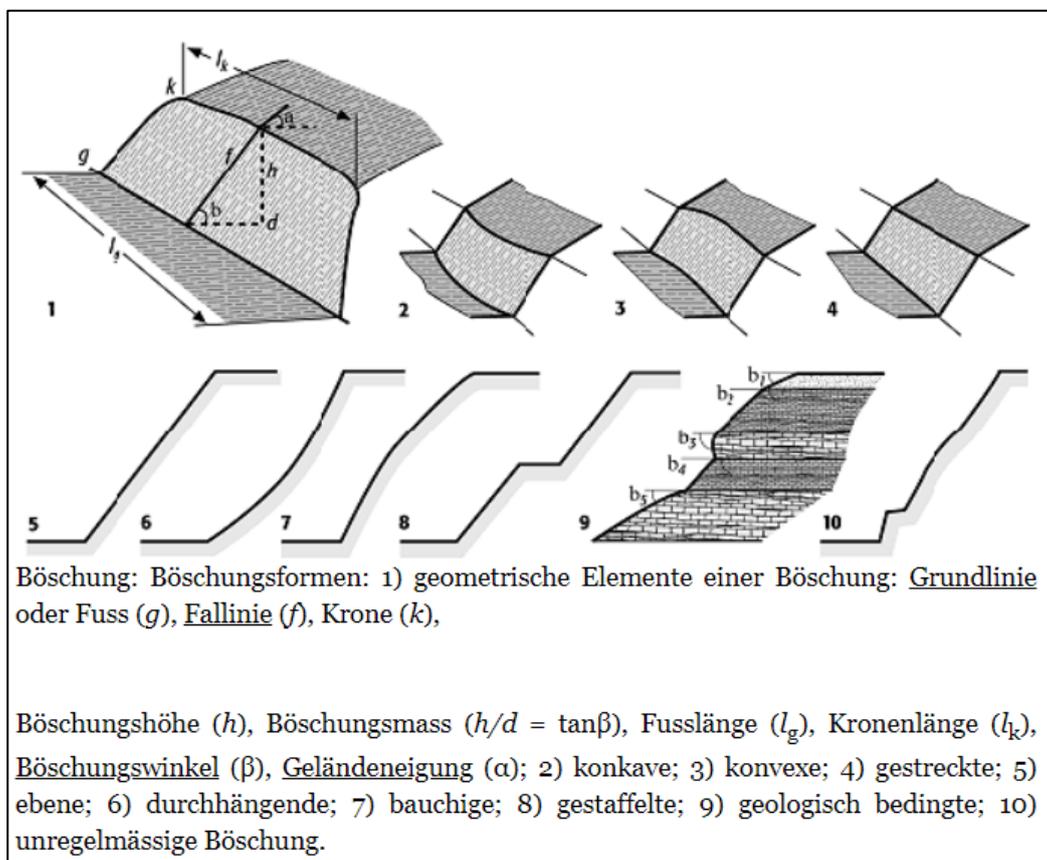


Abbildung 31, Böschungsformen. Quelle: Geodata Zone. Online unter: <http://www.geodz.com>

Schulz (2003) definiert Böschungen folgendermaßen: „Böschungen bestehen im Zusammenhang mit natürlichen oder künstlichen Geländesprüngen, wobei die Böschungsneigungen und die Höhenunterschiede wesentlich sind. Die Neigungen werden in Grad gegen die Horizontale oder als Steigungsverhältnis – z.B. 1:2 (1 m Höhenunterschied

auf 2 m horizontaler Länge) – angegeben. Böschungen entstehen durch geomorphologische Vorgänge (z.B. Erosion, Bodenhebung, Sedimentation) oder bauliche Maßnahmen (z.B. Dammschüttungen, Einschnitte, Baugruben). Die Bewertung ihrer Standsicherheit ist eine geotechnische Aufgabe. Gelegentlich wird zwischen dem "Hang" = natürliche Böschung und der "Böschung" = Böschung einer künstlich hergestellten Aufschüttung unterschieden, ohne dass es dafür einen besonderen Grund bei Fragen der Standsicherheit gibt. Zu Böschungen gehören ihre Oberflächen, aber auch die darunter liegenden Erd- und Felsmassen, soweit sie mit abtreibenden Kräften behaftet sind“ (Schulz 2003: 1).

Auf der Oberfläche der Erde gibt es eine Menge dieser Kleinformen. Sind diese unter zehn Meter hoch, so können sie durch die Höhenschichtlinien selbst in vielen großmaßstäbigen Karten nicht gezeigt werden. Sie können natürlich, aber auch künstlich entstanden sein und verursachen im Allgemeinen scharfe Kanten beziehungsweise Brüche im sonst gleichmäßigen Profil. Besonders künstlich kommen diese Formen häufiger vor, zum Beispiel bei Straßen, Flüssen, Dämmen, Deichen, Gräben oder stufenartigen Reihen in kultivierten Feldern oder Weinbergen. Auch in Bergbaugebieten kommen Böschungen an Tunnel- und Mieneneingängen häufig vor. Künstliche Böschungen sind im Normalfall geometrisch regelmäßig. Die Oberflächen sind also gleichmäßig geneigt, Ober- und Unterkanten sind im Vergleich zum restlichen Gelände deutlich ausgeprägt. (vgl. Imhof und Steward 2015: 283 und 285)

In dieser Masterarbeit sollen all jene Formen, die durch die Höhenlinien nicht erkennbar sind, detektiert werden. In den österreichischen Karten herrscht eine Äquidistanz, also der Abstand der Höhenlinien, von 20 Meter, wenn allerdings starke Einschnitte innerhalb dieser Linien vorherrschen, werden sogenannte Zwischenlinien eingesetzt, um diese zu erkennen. Die detektierten Formen sollen zwischen drei und zehn Meter hoch sein, relativ gleichmäßig geneigte Flächen aufweisen sowie klare Ober- und Unterkanten aufweisen. Diese Werte und Parameter wurden zum einen aufgrund der Methoden, wie früher Topographen diese Formen eingezeichnet haben, aufgestellt und zum anderen mit dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen direkt abgesprochen, um für eine möglichst effiziente und richtige Detektion zu sorgen. Die Parameter zur genauen Detektion der Formen werden in Kapitel 4.6 näher betrachtet.

4.1.2 Böschungen, Dämme und Gräben in den österreichischen Karten

Böschungen, Dämme und Gräben sind in den analogen österreichischen Karten bereits in einer Vielzahl – vor allem in großmaßstäbigen Karten – vorhanden. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, diese Geländekleinformen in einem DGM automatisiert zu detektieren und anschließend als Vektorform zur Verfügung zu stellen. Die Signatur der Dämme und Gräben sieht in den analogen Karten folgendermaßen aus:



Abbildung 32, Dämme und Gräben in den analogen österreichischen Karten. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

Wie in Abbildung 32 ersichtlich, ist ein **Damm** in einer ÖK50 (österreichische Karte im Maßstab 1: 50.000) mit Zacken nach außen visualisiert, während ein **Graben** Zacken nach innen aufweist. Einseitige Zacken kennzeichnen **Böschungen**. Zudem gibt es noch eine weitere Unterteilung der Gräben in künstlich und natürlich. Allgemein können in der Detektion keine Unterscheidungen zwischen künstlich und natürlich getroffen werden. Im Kartenbild sieht das folgendermaßen aus:



Abbildung 33, Graben und Damm in der ÖK50. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

Böschungen, Dämme und Gräben in den österreichischen Karten weisen noch weitere Unterscheidungen und Parameter auf. Allgemein werden Geländekleinformen nach Heriszt (2001: 430f) in Keilschraffen und Strichschraffen eingeteilt:

- **Strichschraffen** werden in der ÖK50 braun dargestellt und betreffen vor allem abgerundete Geländekleinformen wie Flussterrassen. Diese zumeist alten, geologischen Formen weisen eine weniger scharfkantige Kronenkante auf. Abbildung 34 zeigt Strichschraffen in der heutigen Karte:

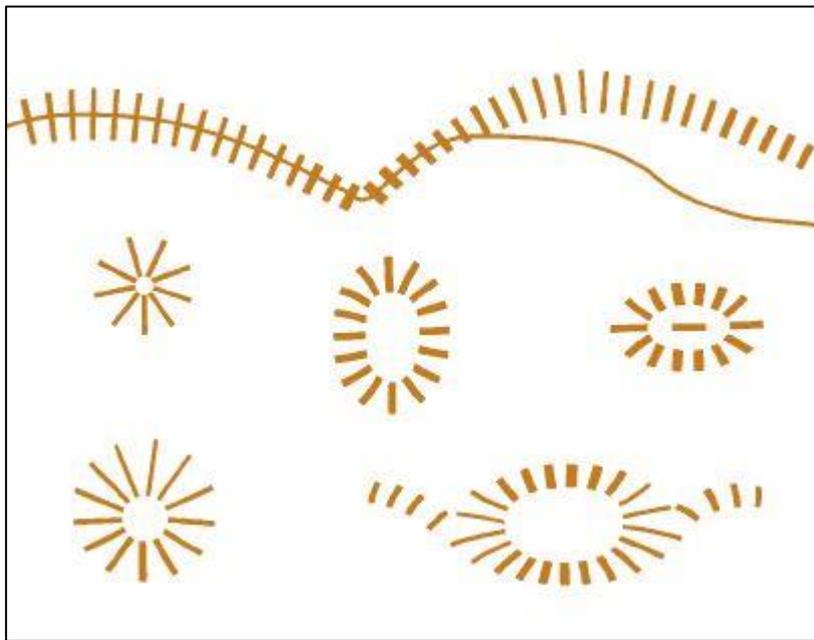


Abbildung 34, Strichschraffen aus dem Zeichenschlüssel des KM50. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

- Die **Keilschraffen** werden wiederum in zwei Kategorien eingeteilt:
 - Auf der einen Seite finden wir die natürlichen Formen wie Geländeterrassen oder Bruchufer. Diese werden in den Karten braun dargestellt und werden dann eingesetzt, wenn die Höheninformation durch Höhenlinien und -koten nicht ausreichend dargestellt werden kann. Man kann diese Formen als die in der Masterarbeit detektieren Böschungen bezeichnen, die allerdings auch künstlich vorkommen können.
 - Auf der anderen Seite gibt es die in den Karten schwarz dargestellten künstlichen Keilschraffen. Diese Formen kommen in der Masterarbeit am häufigsten vor, weil sie vor allem bei Straßen oder Gewässern sehr häufig künstlich errichtet wurden. Abbildung 35 auf der nächsten Seite zeigt eine

genauere Darstellung aller Keilschraffen, die in den österreichischen Karten vorkommen und auch in dieser Masterarbeit detektiert werden sollen (vgl. Heriszt 2001: 430f).

Schwarze Keilschraffen werden in den österreichischen Karten nur dann dargestellt, wenn ihr relativer Höhenunterschied zum angrenzenden Gelände mehr als drei Meter beträgt. Auch werden keine Formen, die mehr als zehn Meter Höhenunterschied aufweisen, als solche in der Karte dargestellt. Dies sollte ohnehin durch die Höhenlinien passieren. Ist dies nicht der Fall, so werden Strichschraffen verwendet, die aber nicht wirklich Böschungen, Dämme oder Gräben ähneln. In der Masterarbeit sollen hauptsächlich die Formen, die durch Keilschraffen dargestellt werden, detektiert werden. Nur in Ausnahmefällen werden Böschungen, Dämme und Gräben bei Unterschreitungen der Drei-Meter-Grenze oder Überschreitung der Zehn-Meter-Grenze trotzdem dargestellt. Entlang von Verkehrswegen werden Dämme und senkrecht verlaufenden **Stützmauern** immer in schwarzen Keilschraffen dargestellt, wodurch eine Unterscheidung nicht möglich ist. (vgl. Heriszt 2001: 433f)

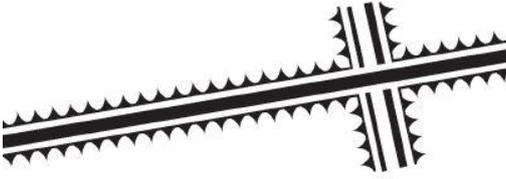
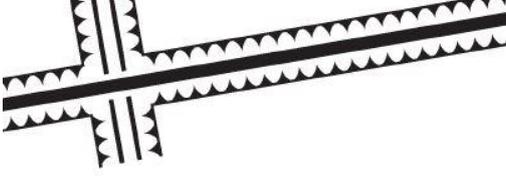
Weitere Geländekleinformen in der Kategorie der Dämme sind **Schutzdämme**. Diese werden gebaut, um die Ufergebiete vor Überschwemmungen zu schützen. Auch hier werden nur Dämme in der Karte visualisiert, die mindestens drei Meter hoch sind, dauerhaft errichtet sind und eine entsprechende Kronenbreite aufweisen. (vgl. ebd.: 250)

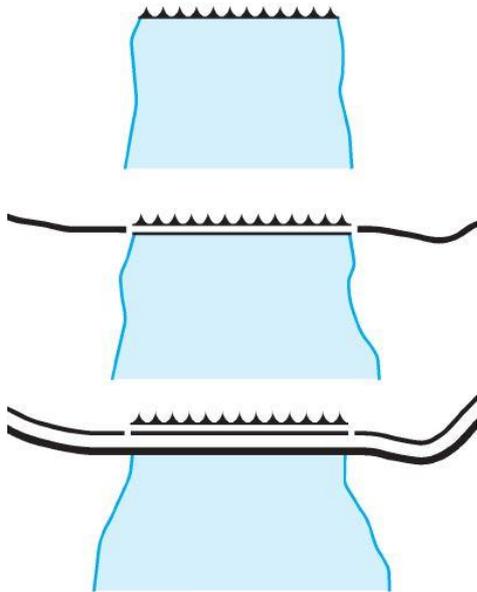
Erwähnenswert sind noch **Leitwerke**, welche ebenso mit einer Signatur versehen sind. Als Leitwerke bezeichnet man im Wasserbau einen Längsdamm im Fluss, der über die Mittelwasserlinie reicht, zur Einschränkung des Fließquerschnittes dient und somit der Strömung eine bestimmte Richtung gibt. Zudem werden sie auch als nachträgliche Verbindung von Buhnenköpfen in den Fluss eingebaut, um so etwaige für die Schifffahrt störende Wirbelbindungen zu vermeiden. (vgl. ebd.: 251)

Äußerst häufig kommen Dämme entlang von Straßen durch sogenannte **Aufdämmungen** vor. Diese dienen dem Niveauegleich von Verkehrswegen, zudem können Vertiefungen im Gelände überbrückt werden. Im Gegenteil zur Aufdämmung, wo der Verkehrsweg höher gelegt wird, gibt es auch die Signatur der **Einschnitte** und **Hohlwege**, die Erhöhungen im Gelände überwinden sollen und ebenfalls zum Niveauegleich verwendet werden. Des

Weiteren gibt es noch Signaturen für **Stütz- und Futtermauern**. Dies sind steile, künstliche Bauten, die den Verkehrsweg absichern, die Stützmauern talseitig, die Futtermauern bergseitig. Alle vier Formen werden in den analogen Karten oft generalisiert, da es entlang von Straßen in den Karten oft Platzprobleme gibt. Zudem sind sie schwer von den oben genannten Böschungen und Dämmen zu unterscheiden. (vgl. ebd.: 210f) Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen sieht vor, diese straßenbegleitenden Signaturen zumindest in kleineren Maßstäben in Zukunft aus Generalisierungsgründen wegzulassen.

Kommen Dämme oder Gräben nur einseitig vor, so werden die Zacken in der Karte auch nur auf dieser einen Seite dargestellt. Ist dies der Fall, spricht man von einer **Böschung**. In den österreichischen Karten werden diese Formen in der Legende nicht extra erwähnt. Abbildung 35 zeigt nun die Formen zusammenfasst:

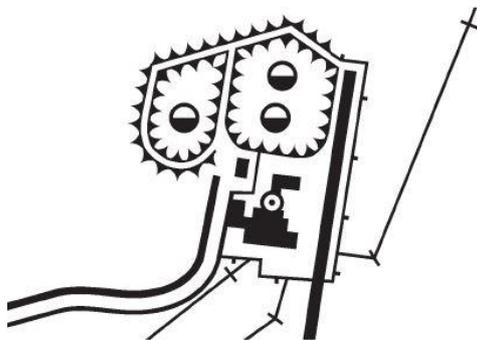
	Stützmauer
	Stützmauer
	Futtermauer
	Futtermauer
	Aufdämmung
	Einschnitt
 <i>ZW</i>	Ziegelwerk mit Schlot
 <i>LG</i>	Lehmgrube
 <i>SG</i>	Sandgrube, Schottergrube
 <i>Stb.</i>	Steinbruch



Staumauer
- ohne Weg

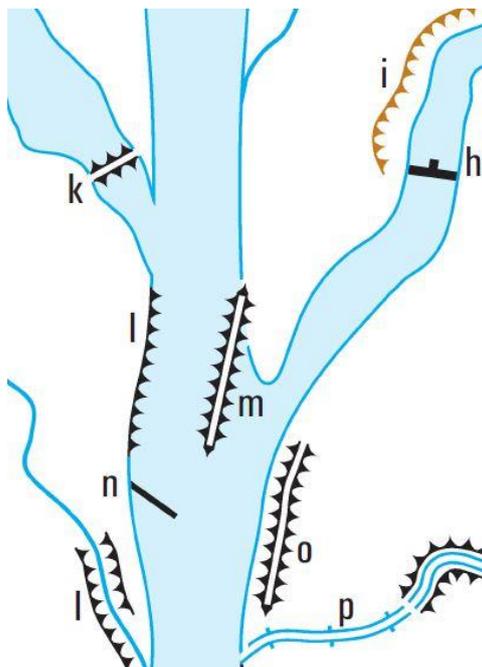
Staumauer
- mit Weg

Staumauer
- mit Straße



Wärmeleistung

(Keilschraffen bei Gewässer aus dem Zeichenschlüssel der KM50 entnommen):



i: Bruchufer

k: Sperrwerk

l: Uferböschung

m: Leitwerk

o: Schutzdamm

Abbildung 35, Keilschraffen in der KM50. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

4.1.3 Digitales Landschaftsmodell von Österreich

Das Digitale Landschaftsmodell von Österreich beinhaltet das Abbild der Erdoberfläche nach topographischen Gesichtspunkten und besteht aus Daten in Vektorform, die maßstabslos sind und nicht generalisiert wurden. Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen baut dieses System momentan neben einer Reihe kartographischer Modelle, welche in Form von Rasterinformationen auf Basis der gescannten Druckoriginale der Österreichischen Kartenwerke vorliegen, auf. (vgl. Paul 1997: 260) Dieses Unterkapitel beschreibt das DLM, in welches die gewonnenen Daten der Masterarbeit später einfließen werden.

Abbildung 36 zeigt den Aufbau des DLMs. Diese sieben Bereiche kennzeichnen die Objektbereiche. Jeder Bereich hat weitere Gruppen, welche wiederum Objektarten aufweisen. Jedes Objekt weist also eine gewisse Struktur auf. Beispiele für die Gruppen des Bereichs Verkehr sind Straßen, Wege, Bahnen oder der Flugverkehr, dazugehörige Arten zu Straßen wären Autobahnen, Bundesstraßen, etc. Alle Objekte sind in Gauß-Krüger-Koordinaten in der Datenbank abgespeichert, wodurch beliebige raumbezogene Anwendungen gewährleistet sind. Das DLM stellt einen flächendeckenden, bundesweiten, einheitlichen, datenverarbeitungsfähigen maßstabslosen Nachweis des Staatsgebietes in interessensneutraler Form dar. (vgl. Paul 1997: 261f)

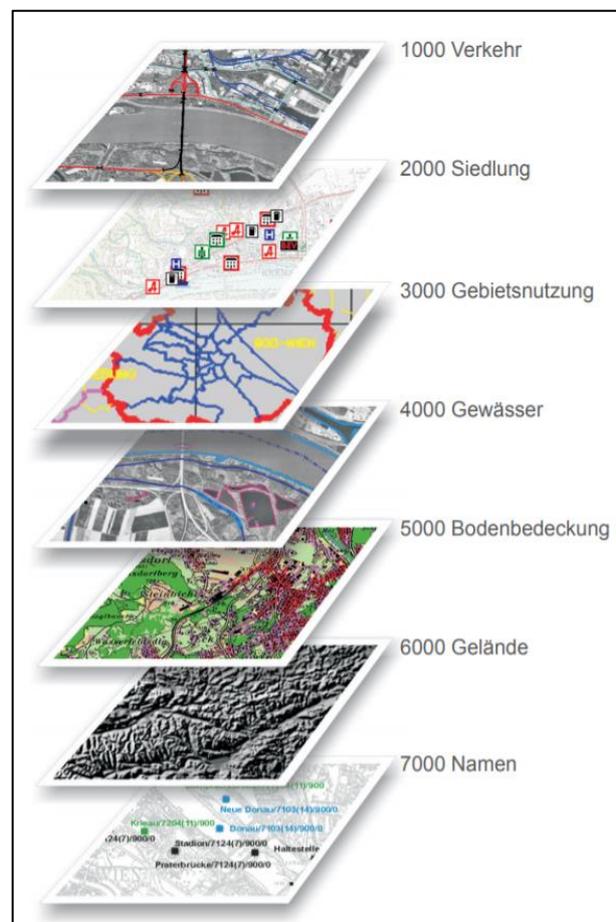


Abbildung 36, Aufbau DLM. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

Dämme und Gräben fallen in den Objektbereich Gelände. Anzumerken ist, dass der Objektbereich Gelände unabhängig von den restlichen Objektbereichen als digitale Geländehöhendatenbank (DHDB) geführt wird. Die Höhen in dieser Datenbank sind durch

Registrierung paralleler Profile an photogrammetrischen Auswertegeräten entstanden. Diese wurden über die Jahre verbessert und enthalten bereits markante Geländestrukturen wie diskrete Höhenpunkte, Formenlinien oder Bruchlinien, aber keinen eigenen Datensatz als Kleinformen, wo Dämme und Gräben hineinfallen würden. (vgl. Paul 1997: 263) Dies unterstreicht die Wichtigkeit dieser Arbeit, da diese Formen in der doch schon hohen Detaildichte der Digitalen Landschaftsmodelle noch nicht enthalten sind. Somit kann durch diese Erhebung ein Beitrag geleistet werden, um das genaue Abbild der Erdoberfläche Österreichs in digitaler Form zu erweitern.

Um die Detailtiefe und Genauigkeit des DLMs hochzuhalten müssen die Daten bestmöglich aktualisiert werden, da topographische Informationen der Erdoberfläche mehr oder weniger nur zum Zeitpunkt ihrer Erfassung wirklich aktuell sind. Zudem nimmt die Qualität der digitalen Information Jahr für Jahr zu und erwartet allgemein höhere Genauigkeitsansprüche als analoge Werke, da diese generalisiert werden. So nützt ein sorgfältig und gut strukturiertes Landschaftsmodell nichts, wenn es nicht dementsprechend am neuesten Stand gehalten wird.

Beim Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen gibt es drei Aktualisierungsschritte:

- Die laufende, ereignisgesteuerte Aktualisierung (LAKT): Diese betrifft Objektarten, die aufgrund ihrer Bedeutung oder häufigen Veränderung kontinuierlich aktuell bleiben müssen. Hierzu zählt das Verkehrsnetz, das Gewässernetz, Änderungen im Bereich des Umweltschutzes (Kraftwerke, Kläranlagen) oder Veränderungen mit überregionaler Bedeutung (Luftfahrthindernisse, Seilbahnanlagen, Grenzübergänge). Die Art dieser Aktualisierung ist somit ereignisorientiert und ohne festen Zyklus. Die Datenerfassungsmethode findet via mobilen GIS und GNSS-basiert statt. (vgl. ebd.: 264)
- Die jährliche Aktualisierung (JAKT): Diese betrifft punktförmig modellierte Objektarten der Objektbereiche Verkehr und Siedlung (Abbildung 36) mit postalischer Adresse. Bezogen werden diese Daten von unterschiedlichen Registerquellen wie Apothekenregister oder Wohnungsregister. (vgl. Mittermaier 2019: 50)
- Die flächenhafte Aktualisierung (FAKT): Alle Objektarten, die nicht in die LAKT und JAKT fallen und trotzdem gemäß dem gesetzlichen Auftrag zur topographischen Landesaufnahme auf ihre Gegenwartsnähe überprüft werden (vgl. Paul 1997: 265). Die Aktualisierung wird zyklisch alle drei Jahre im Innen- und Außendienst

durchgeführt. Das aktuelle Orthofoto wird dabei mit dem aktuellen Stand des DLMs verglichen. Jene Fälle, die im Innendienst nicht geklärt werden können, werden im Außendienst erledigt. (vgl. Mittermaier 2019: 53)

4.2 Internationaler Vergleich im Bereich der Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben

In Kapitel 3.5 wurde der aktuelle Stand der Forschung dieser Thematik behandelt. Da die meisten Arbeiten im Bereich der Objektdetektion eher im großmaßstäbigen Bereich arbeiten und allgemein Böschungen, Dämme und Gräben zumeist eher kartographische Elemente als Werkzeuge der Analyse darstellen, gibt es in der Literatur keine vergleichbare Detektion dieser Geländekleinformen. Deshalb sollen nun internationale Vergleiche – in diesem Fall mit den beiden Ländern Deutschland und der Schweiz – gezogen werden.

Anders als in Österreich wird das digitale Landschaftsmodell von Deutschland, das ATKIS (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem), dezentral von den Vermessungsverwaltungen der Bundesländer jeweils einzeln geführt und zu einem gemeinsamen Modell quartalsweise an das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie abgegeben. Die Daten können dann im Bund für etwaige Pflichtaufgaben verwendet und zudem länderübergreifend abgegeben werden. Wie das österreichische Pendant besteht auch das deutsche Landschaftsmodell aus unterschiedlichen Objektbereichen und Objektartengruppen mit unterschiedlichen Attributen. Die Aktualisierung findet je nach Dringlichkeit (Spitzenaktualisierung drei, sechs oder zwölf Monate; allgemeine Aktualisierung in einem fünfjährigen Zeitraum) statt. (vgl. Laggner 2016: 178).

In Bezug auf Geländekleinformen wurden diese – anders als in Österreich – bereits im Objektartenkatalog des Basis-DLM berücksichtigt. In der Objektartgruppe „Reliefformen“ sind die beiden Objektarten „Böschung, Kliff“ sowie „Damm, Wall, Deich“ enthalten. Eine Böschung wird in der *Dokumentation der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland* (AdV) folgendermaßen definiert:

„Böschung ist die zwischen zwei verschieden hoch gelegenen Ebenen geneigte Geländeoberfläche künstlichen oder natürlichen Ursprungs.“ Die Erfassungskriterien in

Deutschland sind ein Höhenunterschied von mehr als drei Metern, in flachem Gelände zumindest höher als ein Meter sowie eine Länge von mindestens 200 Meter. Der AdV definiert die Objektart „Damm, Wall, Deich“ so:

„Damm, Wall, Deich ist eine aus Erde oder anderen Baustoffen bestehende langgestreckte Aufschüttung, die Vegetation tragen kann.“ Es werden alle Hochwasserdeiche vollständig erfasst, bei den übrigen werden die Kriterien des Höhenunterschieds von mindestens drei Metern sowie einer Länge von mehr als 200 Metern in den Datenbestand aufgenommen. Darüber hinaus werden Dämmen, Wällen und Deichen noch weitere Arten als Werte beigefügt. Dazu zählen Hochwasser-, Haupt-, Überlauf-, Leit-, Polder-, Schlaf-, Mittel- und Binnendeich sowie der Wall und der Knick. Deiche haben in der Regel die Aufgabe, vor Hochwasser bzw. Überschwemmungen zu schützen. Ein Wall hingegen ist ein zumeist künstliches, langgestrecktes sowie schmales Landschaftselement, ein Knick ist ein Wall, der von Vegetation wie Sträuchern oder einzelnen Bäumen bewachsen ist. Den Vektorformen werden auch noch Funktionen als Attribute mitgegeben, zum Beispiel, ob es sich um einen Damm handelt, auf dem ein Verkehrsweg führt, der für den Hochwasserschutz da ist oder der vor Lärm schützt. (vgl. AdV 2018: 293f) Interessant sind diesbezüglich vor allem die Angaben „über drei Meter“, was bedeutet, dass nach oben hin keine Beschränkungen vorliegen.

Die zuvor beschriebenen Ausführungen betreffen den Grundbestand des digitalen Landschaftsmodells, was aber nicht gleichzeitig bedeutet, dass alle Objektarten bereits fertig modelliert sind. Ralf Wegener vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen meint dazu in einem vom Autor dieser Arbeit durchgeführten E-Mail-Verkehr, dass ihm kein Bundesland in Deutschland bekannt ist, welches diese Objektart im Basis-DLM bereits führt und es auch noch keine automatisierte Ableitung dieser gibt. Ein Prozess, um die Geländekanten automatisiert zu erfassen, ist derzeit in Planung. Ziel dabei ist es, aus einem Geländemodell durch bestimmte Parameter wie Neigung die Geländeober- und unterkanten mit einer gemittelten Höhenangabe zu detektieren, um die Höhe zu erhalten. (vgl. Wegener 2020) Einen völlig anderen Ansatz in Deutschland wählte das Bundesland Schleswig-Holstein. Laut dem Mitarbeiter Norbert Carstensen des Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein waren beim Start der Überlegungen, Böschungen oder Dämme automatisiert abzuleiten, die zur damaligen Zeit verfügbaren Methoden nicht

produktionsreif, da für die Ergebnisse erhebliche manuelle Nachbesserungen notwendig gewesen wären. Schleswig-Holstein setzt daher auf eine visuelle Interpretation und interaktive 3D-Erfassung aus einem Stereobild-Modell. Seit 2015 wird dies mit der Software Trimble (DTMASTER, *CreateEmbankment*, zu Deutsch „erstelle Böschung“) umgesetzt. Ende 2020 soll ein qualitätsgeprüfter Datenbestand der Böschungen vorliegen. Abbildung 37 zeigt eine Auswertung einer derartigen Situation. (vgl. Carstensen 2020)



Abbildung 37, manuelle Auswertung einer Böschungssituation in Schleswig-Holstein. Quelle: Carstensen 2020

In der Schweiz hat man sich mit dieser Thematik bereits 2013 beschäftigt. Es wurde ein Forschungsprojekt zusammen mit der Universität Zürich ausgeführt, um die Machbarkeit der automatisierten Detektion von Böschungen zu überprüfen. Wie schon in Niedersachsen beruht die Methode auf einer digitalen Geländeanalyse. Parameter wie Neigung, Krümmung, flache Nachbarzellen oder die Höhe (im flachen Gelände mehr als drei Meter und im steilen Gelände mehr als sechs Meter) sollen die Fälle detektieren. Die Ausgangsdaten waren das Schweizer Geländemodell swissalti3D mit zwei Meter Auflösung. Tobias Kellenberger, Leiter Prozess Innovation sowie Leiter NPOC für Satellitenbilder des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo meinte dazu jedoch, dass „aus prozeduralen Gründen damals diese Methode nicht operationalisiert wurde“. In der Zwischenzeit jedoch wurde das verfügbare Geländemodell besser und ein weiterer Versuch mit dem erstellten Algorithmus wurde gestartet. Es musste jedoch festgestellt werden, dass sich die Methode so nicht umsetzen lässt. Es müsste von Grund auf neu programmiert werden. Die Schweizer haben geplant, diese Thematik im Jahr 2020 wieder aufzunehmen, obwohl „Böschungen nach unserer Meinung ein kartographisches

Element darstellen und nicht in einem klassischen Landschaftsmodell (wie swissTLM3D) geführt werden sollen“ (vgl. Kellenberger 2020). Alle drei dargestellten Methoden zeigen allerdings deutlich die Schwierigkeit der Umsetzung dieser Thematik.

4.3 Untersuchungsgebiet

Allgemein soll die vorgestellte Methode im weiteren Verlauf für ganz Österreich angewendet werden. Die gewonnenen Daten sollen in das digitale Landschaftsmodell von Österreich (DLM) einfließen, als eigenständiger Datensatz zur Verfügung stehen sowie die digitalen kartographischen Modelle unterschiedlicher Maßstäbe erweitern. Karten sollen in Zukunft automatisch generalisiert und abgeleitet werden. Natürlich wird bei der Umsetzung von ganz Österreich mit einer Fläche von rund 84.000 km² (vgl. WKO) und einer stark heterogenen Topographie (die Alpen nehmen fast zwei Drittel der Landesfläche ein (vgl. ÖTK 2018)), wodurch eine Vielzahl an Böschungen, Dämme und Gräben vermutet werden können, ein enormer Rechenaufwand von Nöten sein. Deshalb wurde ein Untersuchungsgebiet ausgewählt, welches im Idealfall das Relief von Österreich in einem kleinen Ausschnitt repräsentiert. Das Gebiet befindet sich zu einem Großteil in Oberösterreich, ein kleiner Teil im südöstlichen Ausschnitt gehört zu Niederösterreich. Es kommen sämtliche für die Arbeit relevanten Oberflächenstrukturen vor:

- flaches Gebiet (Siedlungsgebiete wie Enns, Mauthausen oder Asten)
- steiles, hügeliges Gebiet (südliches Mühlviertel)
- eine Vielzahl an Gewässern (Flüsse wie Enns und Donau, aber auch kleine Bäche und Seen)
- Verkehrswege jeglicher Art (Autobahn, Bundesstraßen, Landesstraßen, Eisenbahn)

Abbildung 38 zeigt das Untersuchungsgebiet in der Nähe der oberösterreichischen Landeshauptstadt Linz hinterlegt mit Orthophotos und dem digitalen Geländemodell. Dem Autor ist diesbezüglich bewusst, dass kein besonders steiles oder hohes Gebirge in diesem Gebiet vorkommt. Es wurde auch deshalb gewählt, da eine hügelige, aber trotzdem nicht allzu hochgebirgs-lastige Region für die Detektion der gesuchten Geländekleinformen besser geeignet ist, da die gesetzten Parameter in Hochgebirgslagen wenige bis gar keine Böschungen, Dämme oder Gräben entdecken würde. Tests diesbezüglich wurden im Anschluss an diese Arbeit durchgeführt.

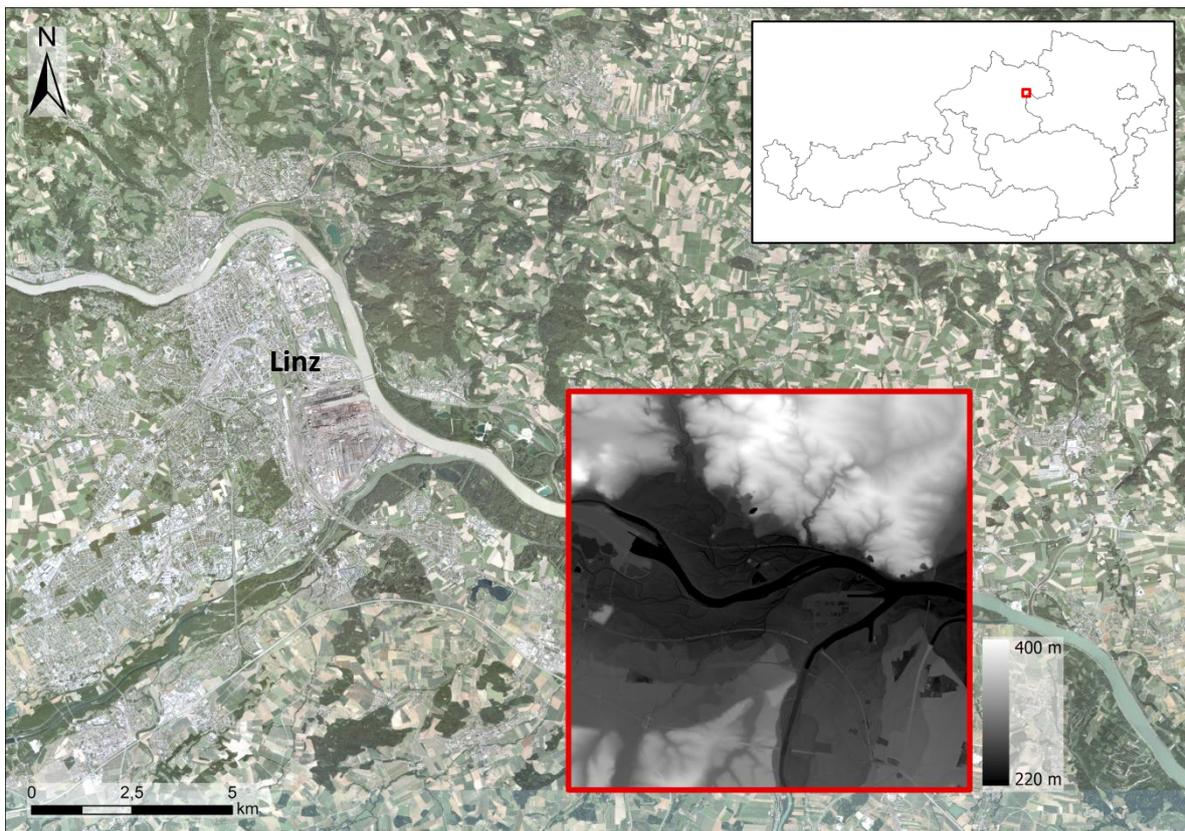
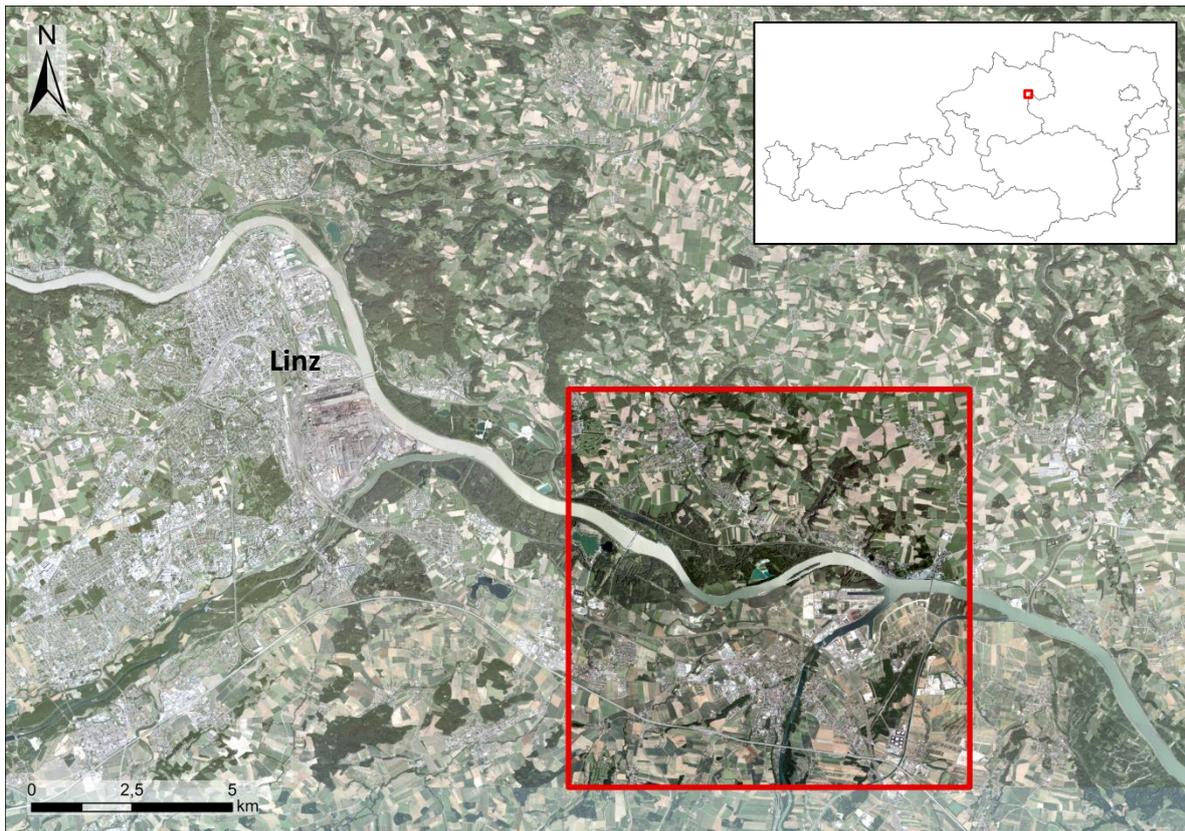


Abbildung 38, Übersicht über das Untersuchungsgebiet. Oben: Orthophoto (roter Rahmen), unten: Geländemodell (roter Rahmen). Rechts oben jeweils die Orientierung mit einer Österreich-Karte (roter Rahmen = Untersuchungsgebiet). Daten: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Quelle: eigene Darstellung

4.4 Daten

Die zur Verfügung stehenden Daten stammen allesamt vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) beziehungsweise von den Bundesländern Österreich. Insgesamt stehen drei Datensätze zur Verfügung:

- DGM – Digitales Geländemodell der Erdoberfläche von Österreich ohne Bewuchs
- DLM – Digitales Landschaftsmodell von Österreich
- KM50-R – Kartographisches Modell (Raster) im Maßstab 1:50.000

Der wichtigste Datensatz ist sicherlich das digitale **Geländemodell**, da aus diesem die notwendigen Geländeinformationen wie Neigung, Krümmung oder Höhe abgeleitet werden können. Dem BEV steht seit Februar 2020 ein österreichweites, homogenes, hochauflösendes DGM mit einem Meter (ein Pixel = 1x1 Meter) Auflösung basierend auf ALS-Daten der Bundesländer zur Verfügung. Das Modell ist zwar hinsichtlich der Auflösung homogen, es kann allerdings vorkommen, dass die Daten von zum Beispiel Vorarlberg aktueller sind als von Kärnten. Airborne Laserscanning Aufnahmen sind auch immer eine Kostenfrage. Mit der Zeit ändern sich auch die technischen Aspekte, und ein Meter Auflösung von 2005 ist nicht gleich ein Meter Auflösung von 2019. (vgl. Felfernig 2020)

Die Geländemodelle liegen in unterschiedlichen Blattschnitten vor. Für das Untersuchungsgebiet wurde der Schnitt Triangulierungsblatt verwendet. Allgemein wird am BEV das österreichische Staatsgebiet durch eine winkeltreue Zylinderprojektion (Gauß-Krüger) auf eine Ebene gebracht. Der Nullmeridian dieser Projektion liegt auf der kanarischen Insel Ferro, das Bundesgebiet Österreich wird in drei 3°-breite Meridianstreifen (1,5° östlich und westlich des Bezugsmeridians) abgebildet. Die Bezugsmeridiane sind: 28° (M28), 31° (M31) und 34° (M34) östlich von Ferro. Um negative y-Koordinaten zu vermeiden, wurde das Gauß-Krüger-Koordinatensystem in Österreich in das Bundesmeldenetz verwandelt, den Rechtswerten der drei Bezugsmeridiane wurden runde Werte zugewiesen. Aus den Meridianstreifen leiten sich die bereits erwähnten Triangulierungsblätter ab. Die Streifen werden durch Längs- und Querstreifen in diese Blätter eingeteilt. Alle drei Meridianstreifen werden zu beiden Seiten in je 15 Längsstreifen von zehn Kilometer Breite unterteilt. Querstreifen werden ebenso ausgehend vom Äquator in je zehn Kilometer Breite eingeteilt, wodurch die Triangulierungsblätter entstehen. Die Nummern dieser leiten sich von den

Nebeneinanderstellungen von Längs- und Querstreifen ab. Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit hat die Nummer 5435, ist also der 54. Längsstreifen und der 35. Querstreifen und besitzt eine Fläche von 100 km² (10 km x 10 km). In Österreich gibt es 1048 dieser Triangulierungsblätter. (vgl. BEV: Koordinatensysteme und Blattschnitte)

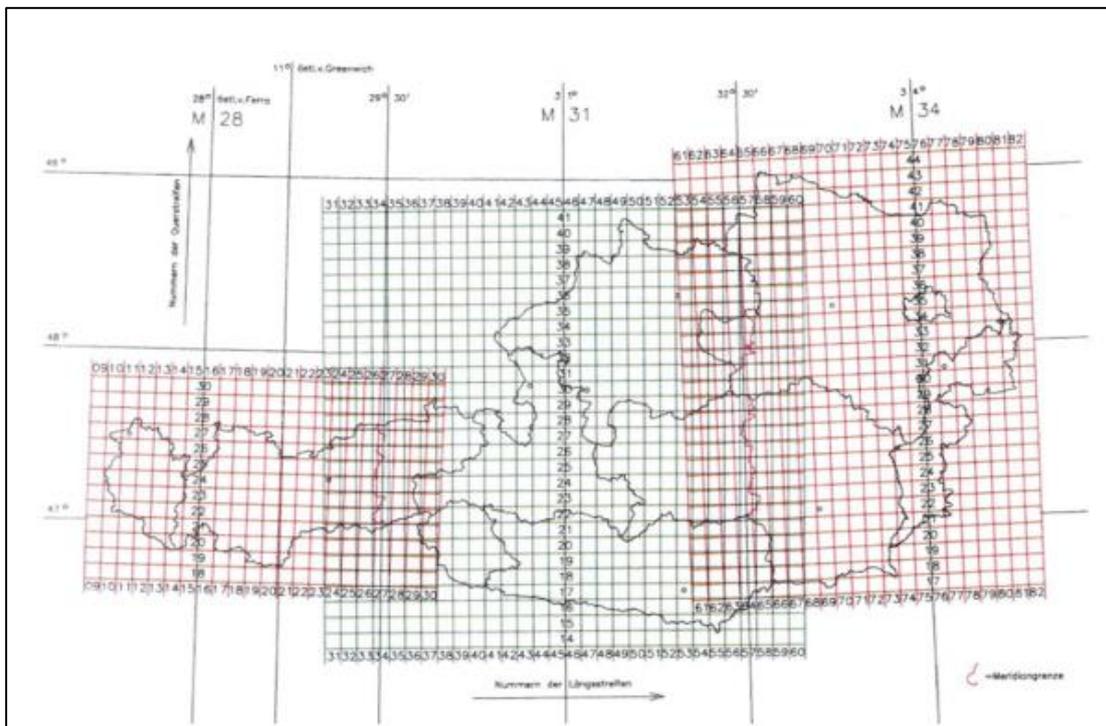


Abbildung 39, Triangulierungsblatteinteilung. Quelle: BEV Blattschnitte

Die Daten des **digitalen Landschaftsmodells** (DLM, Kapitel 4.1.3) sind dazu da, um Böschungen, Gräben und Dämme entlang von Bächen sowie entlang von Straßen vorab zu filtern und getrennt zu betrachten. Zudem werden Häuser aus dem DLM verwendet, da die Kleinformen nicht direkt an Häusern liegen sollen. Kapitel 4.9 wird dies näher behandeln.

Das **Kartographische Modell** 1:50.000 in Rasterformat zeigt das österreichische Staatsgebiet im Maßstab 1.50.000 in einer digitalen Karte. Diese sind maßstabsbezogen generalisiert. (vgl. BEV: Kartographisches Modell) Für die Detektion von Geländekleinformen ist dieser Datensatz eine Art Referenz, da wie in Kapitel 4.1.2 die gesuchten Kleinformen damals analog bereits eingezeichnet wurden. Die Detektion ist aber natürlich subjektiv, da sie von Topograph zu Topograph unterschiedlich interpretiert wurde. Zudem sind sie an den Maßstab 1.50.000 angepasst und dementsprechend stark generalisiert. Als visueller Vergleichswert sind diese Raster aber dennoch brauchbar.

4.5 Softwarewahl

Wie in dieser Arbeit schon das eine oder andere Mal erwähnt, wird die Detektion der Geländekleinformen in einem GIS stattfinden. GIS ist die Abkürzung für Geoinformationssystem und kann allgemein als jegliche computergestützte Fähigkeit zur unterschiedlichen Bearbeitung von räumlichen Daten angesehen werden (vgl. Bernhardsen 2002: 4). Im Grunde enthält es vier Funktionen: Dateneingabe, Datenverwaltung, Datenanalyse, Visualisierung. Laut Jordan (2007) sind wesentliche Bestandteile eines GIS mittlerweile digitale Modelle geographischer Höhendaten. In GI-Systemen werden diese auf unterschiedliche Art verwendet:

- hydrologische Modelle einschließlich Hochwassersimulation, Abgrenzung und Analyse von Wassereinzugsgebiete und Entwässerungsnetze,
- Modellierung von Bodenerosion und Sedimenttransport,
- Abgrenzung und Untersuchung physiographischer Einheiten,
- **geomorphologische Bewertung und Detektion von Landformen,**
- zivile, technische und militärische Anwendungen wie Standort- und Routenauswahl, Bewertung der Erdbehrschgefahr, Sichtbarkeitsanalyse und
- fernerkundete Bildverbesserung für die 3D-Analyse. (vgl. Jordan 2007: 1)

GIS-Software, wie zum Beispiel ArcGIS von Esri oder SAGA (Kapitel 3.5.5) kann diese Analysen meist problemlos durchführen, wodurch sie auch für diese Forschungsarbeit sehr geeignet sind (vgl. Jordan 2007:1).

Neben üblicher GIS-Software wie ArcGIS und SAGA wird auch noch FME (Feature Manipulation Engine) als Software verwendet. FME ist ein Werkzeug, um effizient und automatisiert Geodaten in verschiedene Formate zu übersetzen sowie zu verarbeiten (vgl. tydac.ch). Vor allem in der Verarbeitung der Vektordaten kann FME in dieser Forschungsarbeit von Bedeutung sein. Sowohl ArcGIS (es wird hauptsächlich mit ArcGIS Pro gearbeitet) als auch FME (beide sind kostenpflichtig) stehen dem Autor aufgrund der vorhandenen Lizenzen des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen zur freien Verfügung.

4.6 Parameter für die Detektion

In Kapitel 4.1.2 wurde bereits auf die Vorgehensweise der Topographen eingegangen, nach welchen Kriterien die gesuchten Geländekleinformen gezeichnet und in den Kartenbestand aufgenommen wurden. Heriszt (2001) meint dazu, dass die Entscheidung, welche Signatur auf die jeweilige Form zutrifft, zum großen Teil dem Topographen überlassen wurde und ein „gewisser Spielraum“ bleibt. Des Weiteren wurde im Werk erwähnt, dass die Unterscheidung der verschiedenen Geländekleinformen „nicht immer einfach“ ist und in der Natur „der Übergang von einigermaßen scharfen zu stumpfen, abgerundeten Kronenkanten vielfach fließend und nicht immer eindeutig festzulegen ist“ (Heriszt 2001: 432 und 436). Nun sind aber bei einer automatisierten Detektion keine individuellen Entscheidungsfindungen einzelner Fälle möglich, die gesuchten Formen müssen durch einheitliche Parameter detektiert werden. Die Subjektivität ist dadurch vorab beim sogenannten *Thresholding* (*Schwellenwert*) vorhanden. Rutzinger et al. (2007) haben sich damit in ihrer Arbeit über die Detektion von Oberflächendiskontinuitäten aus Airborne Laserscanning Daten beschäftigt. Aus digitalen Geländemodellen wurden, wie bereits in Kapitel 3.3.1 erwähnt, Krümmungen der Oberfläche berechnet, um Ober- und Unterkanten von Landformen zu erhalten. Wichtig ist nun herauszufinden, ab welchen Werten die Pixel als Diskontinuitäten gezählt werden. Um Rauschen der Geländemodelle zu verhindern sowie Nachbarschaftsbeziehungen miteinzubeziehen werden Filter (*Moving Window*) angewandt. Hier beginnt der erste Teil der Entscheidungsfindung. Die Größe des Filters hängt von den Formen ab, die detektiert werden sollen. Ist das Fenster zu klein, sorgen kleinere Strukturen in den gesuchten Formen für ein Rauschen, ist das Fenster aber zu groß, werden Diskontinuitäten verallgemeinert, es bleiben nur noch Hauptstrukturen übrig und vor allem wird die Größe der Nachbarschaft auch schon ein Faktor, denn bei 10x10 bedeutet dies bei einer Auflösung von 1x1 Meter, dass in einem Bereich von 10x10 Meter gesucht wird, was für Kleinformen bereits zu groß ist. Nachdem eine geeignete Filtergröße nach längerem Testen sowie visueller Interpretation gefunden wurde, kommt die eigentliche Schwellenwertsetzung ins Spiel. Es müssen nun Werte gefunden werden, ab wann die Pixel als Kanten gezählt werden können. (vgl. Rutzinger et al. 2007: 4) Wenn Pixelwerte mit einem vorgegebenen Schwellenwert verglichen werden, um Segmente in Bilddaten zu erhalten, so bezeichnet man dies laut Chaubey (2016) als „*Global Thresholding*“ (Chaubey 2016: 2). Hatte also der Topograph im Feld laut Heriszt einen

„gewissen Spielraum“, so kann man auch die geeignete Schwellenwertsetzung als „Spielen mit den Werten“ betrachten.

Im Vergleich zur Arbeit von Rutzinger et al. geht es in dieser Forschungsarbeit nicht allgemein um Diskontinuitäten in der Oberfläche, sondern bereits um bestimmte Formen, nämlich geneigte Kleinformen wie Böschungen, Dämme und Gräben. Somit ist klar, dass die Detektion nicht allein von den Krümmungswerten abhängt, sondern einige weitere Parameter die gesuchten Flächen detektieren sollen. Auch hier sind Entscheidungen von Schwellenwerten notwendig. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Parameter, die für die Detektion gewählt wurden und die dazugehörigen Schwellenwerte, die durch verschiedene Auswertungen vorab getestet wurden:

Parameter	Schwellenwerte
Neigung	12,5° bis 60°, durchschnittliche Neigung mindestens 15°
Flache Nachbarzellen (große Fläche)	jede Zelle muss in einer Nachbarschaft von 50x50 Zellen zumindest 500 flache (< 7,5° Neigung) Nachbarzellen aufweisen → dient zur Abgrenzung von ebenen und bergigen Regionen
Standardabweichung	muss > als 0,65 in einem 5x5 Filter sein, wenn flache Nachbarzellen zu wenig sind
Krümmung (Profil Curvature)	muss > als 8 in einem 3x3 Filter bei Unterkante sein
	muss < als -8 in einem 3x3 Filter bei Oberkante sein
Höhe (in flachen Gebieten)	zwischen 2,5 und 10 Meter in flachen Gebieten (mehr als 500 flache Nachbarzellen in 50x50 Nachbarschaft)

Höhe (in steilen Gebieten)	zwischen 4 und 10 Meter in nicht-flachen Gebieten (unter 500 flache Nachbarzellen in 50x50 Nachbarschaft)
Höhe (entlang von Bächen)	zwischen 4 und 10 Meter entlang von Bächen, da dort eine gewisse Tiefenerosion immer vorhanden ist
Flache Nachbarzellen (kleine Fläche, direkte Umgebung)	durchschnittliche Neigung der angrenzenden Umgebung muss $< 10^\circ$ sein oder durchschnittliche Neigung der Böschung muss 15° höher sein als angrenzende Umgebung der Kanten
Länge	mindestens 50 Meter
Bäche, Straßen	müssen getrennt betrachtet werden, um Vermischungen zu vermeiden
Siedlungsgebiet	nicht direkt angrenzend an Häuser

Tabelle 3, Parameter für die Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben. Quelle: eigene Darstellung

4.7 Methodik

Die in Kapitel 4.6 enthaltene Tabelle der Parameter zeigt, dass mitunter alle Methoden der Objektdetektion aus Kapitel 3 verwendet werden, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Grundlegend handelt es sich um eine digitale Geländeanalyse, die Klassifizierungsschritte der Bildanalyse beinhaltet. Aus Visualisierungen von Höhendaten – wie zum Beispiel Neigung und Krümmung – werden Rasterdaten in Form einer baumförmigen Klassifizierung extrahiert. Bei dieser kann der Bearbeiter die bereits erwähnten Schwellenwerte setzen, um so Schritt für Schritt zu entscheiden, ob ein Pixel als Böschung-, Damm-, oder Grabenpixel klassifiziert wird oder nicht. Diese Klassifizierungsmethode ist im Gegensatz zu anderen recht flexibel, da verschiedene Kriterien interaktiv gesetzt werden können, wodurch natürlich der Arbeitsaufwand höher wird. (vgl. Albertz 2009: 161) Geländeanalyse, Visualisierung und Bildklassifikation sorgen also dafür, ob ein Pixel entweder der Kategorie „Böschung, Damm oder Graben“ oder „keine Böschung, kein Graben und kein Damm“ zugeordnet wird. Dieser Abschnitt kann allgemein als „*Rasterbearbeitung*“ bezeichnet werden.

Nun legt die Tabelle der Parameter allerdings fest, dass Böschungen, Dämme und Gräben zur angrenzenden Fläche einen Höhenunterschied von 2,5 bis 10 Metern beziehungsweise von 4 bis 10 Metern in nicht-flachen Gebieten aufweisen müssen. Hier kommt die in Kapitel 3.3 vorgestellte Methoden zur Verwendung, nämlich die „*Kantendetektion*“. Durch die Krümmung werden Ober- und Unterkanten berechnet und der mittlere Höhenunterschied dieser beiden Kanten ausgerechnet. Dieser und weitere Schritte (wie die Generalisierung der Daten, Längenberechnung (der Abstand der Keilschraffen in den österreichischen Karten beträgt 25 Meter, es müssen zumindest zwei davon vorkommen, wodurch die Mindestlänge mit 50 Meter festgelegt wurde), Nachbearbeitung, kartographische Aufbereitung) können allgemein als „*Vektorbearbeitung*“ bezeichnet werden, wobei die Kantendetektion grundsätzlich aus Raster durchgeführt wird und somit zwischen Raster- und Vektorverarbeitung steht. Aufgrund der notwendigen manuellen Nachbearbeitung ist eine vollständig automatische Detektion, bei der die gewonnenen Daten sofort ins DLM wandern, nicht möglich, wodurch dieser Workflow als halbautomatisch angesehen werden kann. In den Kapiteln 4.9 und 4.10 wird die Vorgehensweise detaillierter beschrieben. Abbildung 40 zeigt den Workflow der praktischen Forschungsarbeit:

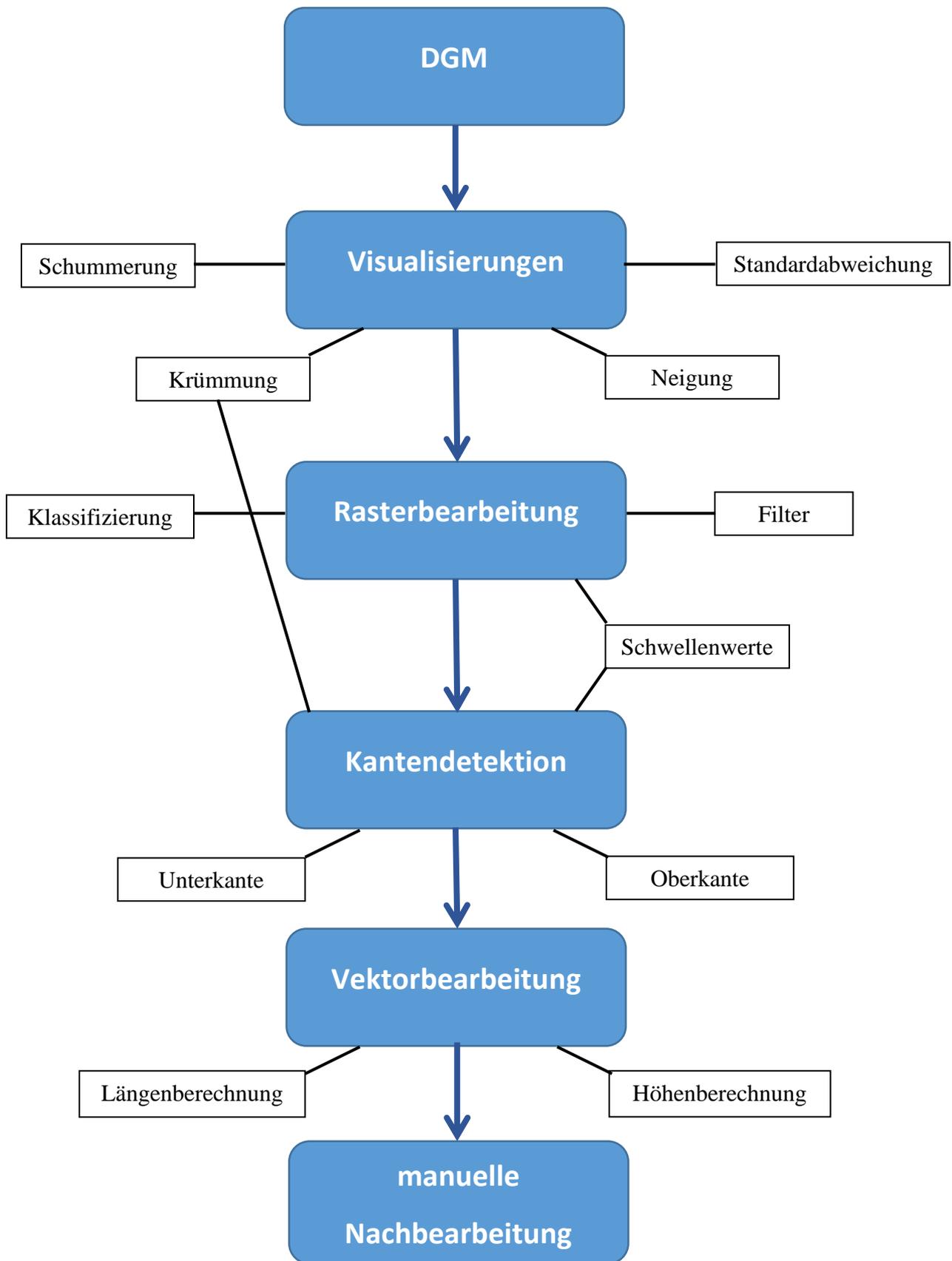
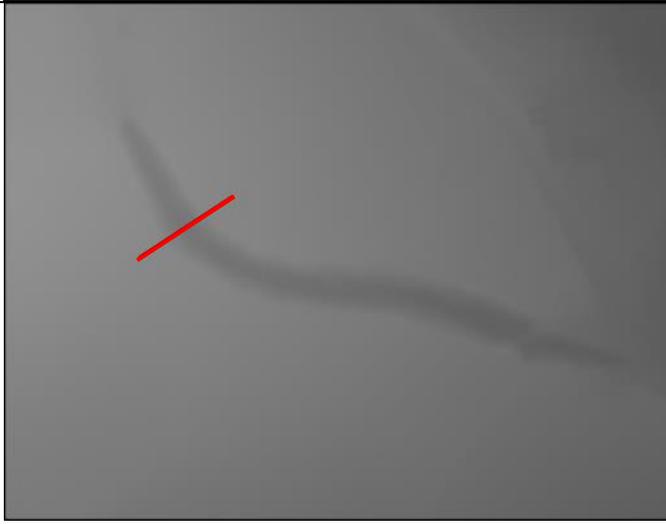
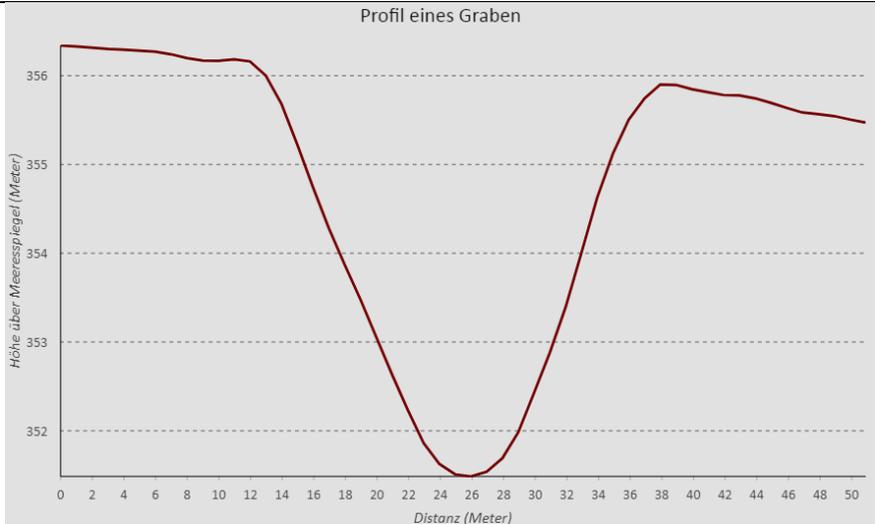


Abbildung 40, schematische Darstellung des praktischen Workflows. Quelle: eigene Darstellung

4.8 Profile

Geländeform	Ort im Digitalen Geländemodell mit Profilinie	Profile (West nach Ost)																																																						
<p>Damm</p>		<p>Profile (West nach Ost)</p> <p>Profil eines Dammes</p>  <table border="1"> <caption>Data for Dam Profile</caption> <thead> <tr> <th>Distanz (Meter)</th> <th>Höhe über Meeresspiegel (Meter)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>246.2</td></tr> <tr><td>5</td><td>246.3</td></tr> <tr><td>10</td><td>245.8</td></tr> <tr><td>15</td><td>245.8</td></tr> <tr><td>20</td><td>248.5</td></tr> <tr><td>25</td><td>249.2</td></tr> <tr><td>30</td><td>249.5</td></tr> <tr><td>35</td><td>249.3</td></tr> <tr><td>40</td><td>249.2</td></tr> <tr><td>45</td><td>248.0</td></tr> <tr><td>50</td><td>246.0</td></tr> <tr><td>55</td><td>245.5</td></tr> <tr><td>60</td><td>245.6</td></tr> <tr><td>65</td><td>245.7</td></tr> </tbody> </table>	Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)	0	246.2	5	246.3	10	245.8	15	245.8	20	248.5	25	249.2	30	249.5	35	249.3	40	249.2	45	248.0	50	246.0	55	245.5	60	245.6	65	245.7																								
Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)																																																							
0	246.2																																																							
5	246.3																																																							
10	245.8																																																							
15	245.8																																																							
20	248.5																																																							
25	249.2																																																							
30	249.5																																																							
35	249.3																																																							
40	249.2																																																							
45	248.0																																																							
50	246.0																																																							
55	245.5																																																							
60	245.6																																																							
65	245.7																																																							
<p>Graben</p>		<p>Profil eines Graben</p>  <table border="1"> <caption>Data for Ditch Profile</caption> <thead> <tr> <th>Distanz (Meter)</th> <th>Höhe über Meeresspiegel (Meter)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>356.2</td></tr> <tr><td>2</td><td>356.1</td></tr> <tr><td>4</td><td>356.0</td></tr> <tr><td>6</td><td>355.9</td></tr> <tr><td>8</td><td>355.8</td></tr> <tr><td>10</td><td>355.7</td></tr> <tr><td>12</td><td>355.6</td></tr> <tr><td>14</td><td>354.5</td></tr> <tr><td>16</td><td>353.5</td></tr> <tr><td>18</td><td>352.5</td></tr> <tr><td>20</td><td>351.8</td></tr> <tr><td>22</td><td>351.5</td></tr> <tr><td>24</td><td>351.5</td></tr> <tr><td>26</td><td>351.5</td></tr> <tr><td>28</td><td>351.8</td></tr> <tr><td>30</td><td>352.5</td></tr> <tr><td>32</td><td>353.5</td></tr> <tr><td>34</td><td>354.5</td></tr> <tr><td>36</td><td>355.5</td></tr> <tr><td>38</td><td>355.8</td></tr> <tr><td>40</td><td>355.8</td></tr> <tr><td>42</td><td>355.7</td></tr> <tr><td>44</td><td>355.6</td></tr> <tr><td>46</td><td>355.5</td></tr> <tr><td>48</td><td>355.4</td></tr> <tr><td>50</td><td>355.3</td></tr> </tbody> </table>	Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)	0	356.2	2	356.1	4	356.0	6	355.9	8	355.8	10	355.7	12	355.6	14	354.5	16	353.5	18	352.5	20	351.8	22	351.5	24	351.5	26	351.5	28	351.8	30	352.5	32	353.5	34	354.5	36	355.5	38	355.8	40	355.8	42	355.7	44	355.6	46	355.5	48	355.4	50	355.3
Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)																																																							
0	356.2																																																							
2	356.1																																																							
4	356.0																																																							
6	355.9																																																							
8	355.8																																																							
10	355.7																																																							
12	355.6																																																							
14	354.5																																																							
16	353.5																																																							
18	352.5																																																							
20	351.8																																																							
22	351.5																																																							
24	351.5																																																							
26	351.5																																																							
28	351.8																																																							
30	352.5																																																							
32	353.5																																																							
34	354.5																																																							
36	355.5																																																							
38	355.8																																																							
40	355.8																																																							
42	355.7																																																							
44	355.6																																																							
46	355.5																																																							
48	355.4																																																							
50	355.3																																																							

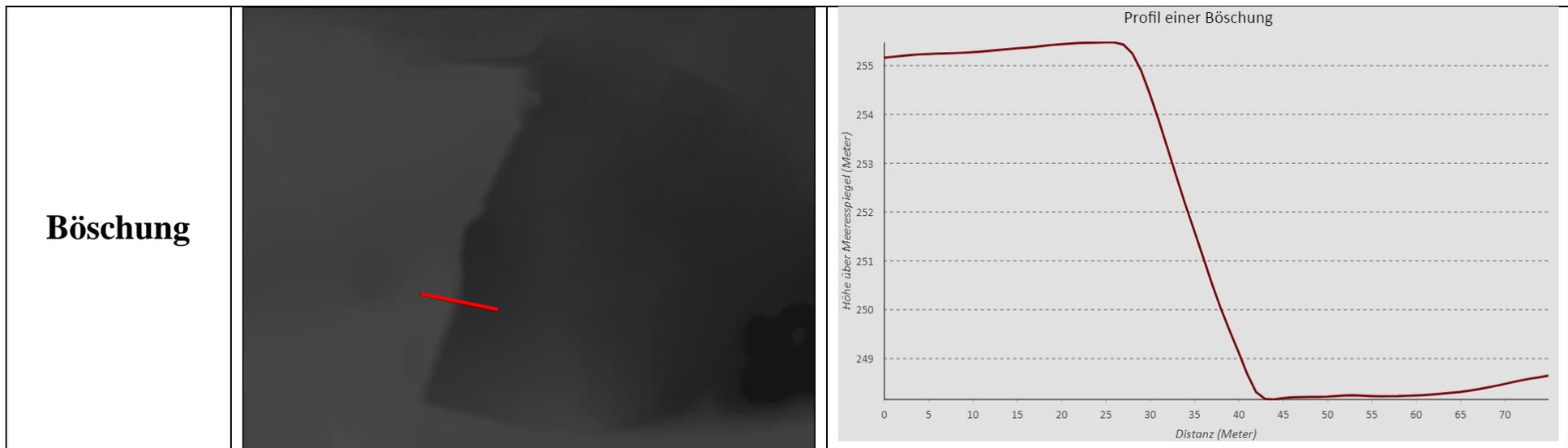


Tabelle 4, Profile der zu detektierenden Geländekleinformen Damm, Graben und Böschung. Quelle: eigene Darstellung

Die in Tabelle 4 dargestellten Fälle zeigen Idealfälle der Detektion. Vor allem in Bergregionen können allerdings unklare Fälle vorkommen, die für Probleme bei der Entscheidungsfindung sorgen können. Tabelle 5 zeigt eine Grabenstruktur sowie eine Böschung, die beide eine Vielzahl an Ober- und Unterkanten enthalten, was für die Höhenberechnung ein großes Problem darstellt. Des Weiteren ist es allgemein schwierig, derartige Fälle als komplett „richtig“ oder komplett „falsch“ darzustellen, was bereits verdeutlicht, dass eine automatisierte Detektion eines ganzen Landes ohne jegliche Nachbearbeitung zu teilweise falscher Detektion führen wird. Die beiden Strukturen sind zwar in der Summe höher als die Grenze von zehn Meter, allerdings stellt sich natürlich die Frage, wie dies behandelt wird, wenn sogenannte Böschungen in der Böschung vorkommen. Dies ist eines der größten Probleme dieser Forschungsarbeit.

Um die Strukturen im Geländemodell klarer zu erkennen, wurden bei einigen Bildern die Gamma-Werte des Bildes verändert. Die Profile erhält man in ArcGIS, in dem man eine Linie zeichnet und dieser mit „Interpolate Shape“ Höhenwerte aus dem Geländemodell interpoliert.

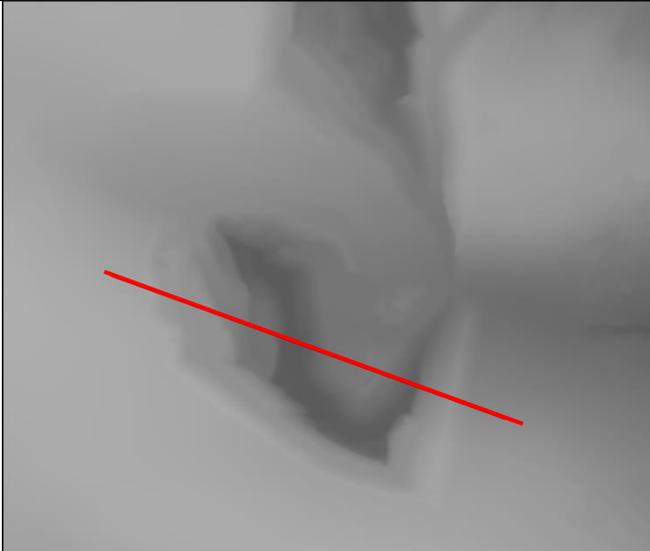
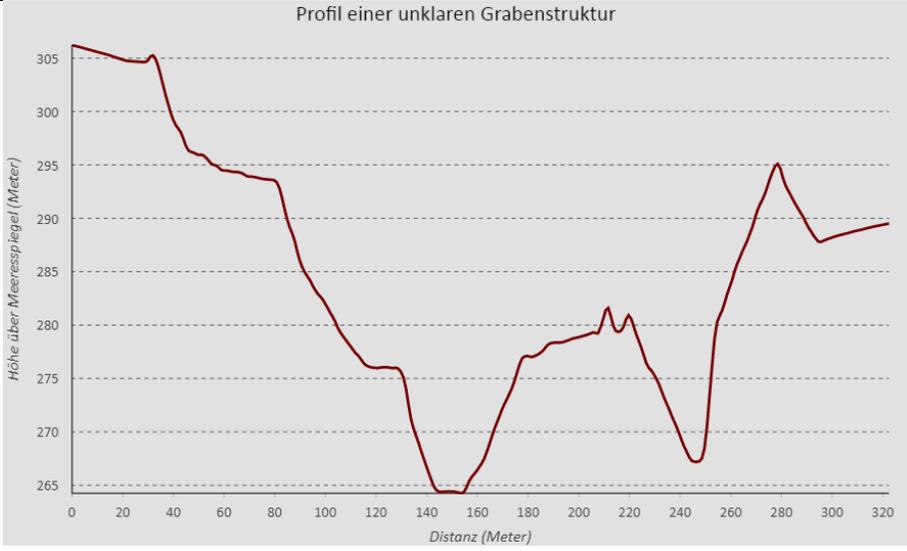
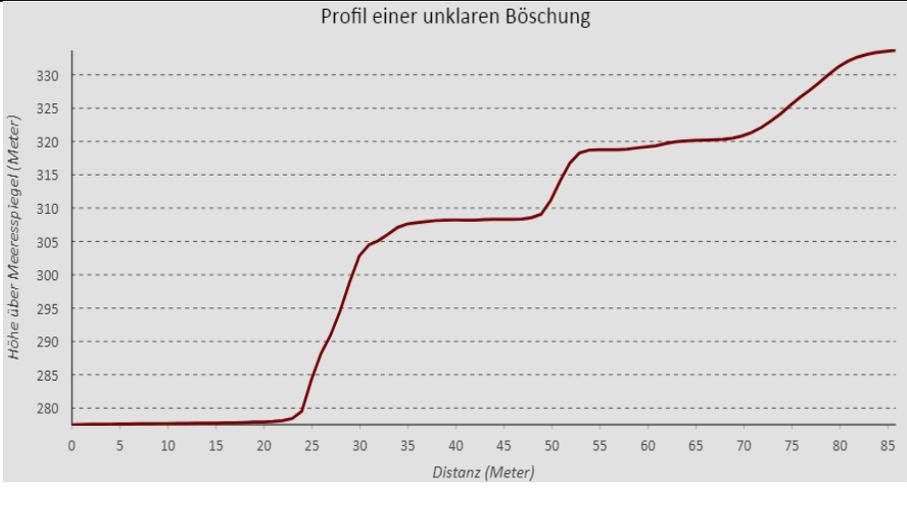
<p>Graben</p>		<p>Profil einer unklaren Grabenstruktur</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data for 'Profil einer unklaren Grabenstruktur'</caption> <thead> <tr> <th>Distanz (Meter)</th> <th>Höhe über Meeresspiegel (Meter)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>305</td></tr> <tr><td>20</td><td>304</td></tr> <tr><td>40</td><td>298</td></tr> <tr><td>60</td><td>295</td></tr> <tr><td>80</td><td>294</td></tr> <tr><td>100</td><td>285</td></tr> <tr><td>120</td><td>276</td></tr> <tr><td>140</td><td>265</td></tr> <tr><td>160</td><td>268</td></tr> <tr><td>180</td><td>278</td></tr> <tr><td>200</td><td>280</td></tr> <tr><td>210</td><td>282</td></tr> <tr><td>220</td><td>280</td></tr> <tr><td>240</td><td>268</td></tr> <tr><td>260</td><td>285</td></tr> <tr><td>280</td><td>295</td></tr> <tr><td>300</td><td>288</td></tr> <tr><td>320</td><td>290</td></tr> </tbody> </table>	Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)	0	305	20	304	40	298	60	295	80	294	100	285	120	276	140	265	160	268	180	278	200	280	210	282	220	280	240	268	260	285	280	295	300	288	320	290
Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)																																							
0	305																																							
20	304																																							
40	298																																							
60	295																																							
80	294																																							
100	285																																							
120	276																																							
140	265																																							
160	268																																							
180	278																																							
200	280																																							
210	282																																							
220	280																																							
240	268																																							
260	285																																							
280	295																																							
300	288																																							
320	290																																							
<p>Böschung</p>		<p>Profil einer unklaren Böschung</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data for 'Profil einer unklaren Böschung'</caption> <thead> <tr> <th>Distanz (Meter)</th> <th>Höhe über Meeresspiegel (Meter)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>280</td></tr> <tr><td>10</td><td>280</td></tr> <tr><td>20</td><td>280</td></tr> <tr><td>25</td><td>285</td></tr> <tr><td>30</td><td>305</td></tr> <tr><td>35</td><td>308</td></tr> <tr><td>40</td><td>308</td></tr> <tr><td>45</td><td>308</td></tr> <tr><td>50</td><td>308</td></tr> <tr><td>55</td><td>318</td></tr> <tr><td>60</td><td>319</td></tr> <tr><td>65</td><td>320</td></tr> <tr><td>70</td><td>320</td></tr> <tr><td>75</td><td>325</td></tr> <tr><td>80</td><td>330</td></tr> <tr><td>85</td><td>330</td></tr> </tbody> </table>	Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)	0	280	10	280	20	280	25	285	30	305	35	308	40	308	45	308	50	308	55	318	60	319	65	320	70	320	75	325	80	330	85	330				
Distanz (Meter)	Höhe über Meeresspiegel (Meter)																																							
0	280																																							
10	280																																							
20	280																																							
25	285																																							
30	305																																							
35	308																																							
40	308																																							
45	308																																							
50	308																																							
55	318																																							
60	319																																							
65	320																																							
70	320																																							
75	325																																							
80	330																																							
85	330																																							

Tabelle 5, Profile zweier unklarer Situationen. Quelle: eigene Darstellung

4.9 Visualisierungen des Untersuchungsgebiets

Wie aus der schematischen Übersicht in Kapitel 4.7 hervorgeht, ist der erste Schritt der Forschungsarbeit aus dem digitalen Geländemodell unterschiedliche Visualisierungen abzuleiten, um sich allgemein mit den Daten vertraut zu machen sowie die gesuchten Geländekleinformen visuell zu betrachten und bereits erste Rückschlüsse daraus zu ziehen. Bevor Neigung, Krümmung und Standardabweichung berechnet werden, wird vorab jedoch das Tool „*Focal Statistics*“ verwendet. Das digitale Geländemodell hat eine recht hohe Auflösung von einem Meter, ist allerdings dadurch auch recht körnig. Durch das Tool der „*Focal Statistics*“ – bzw. zu Deutsch der Schwerpunkt-Statistik – wird für jede Eingabezellenposition eine Statistik der Werte innerhalb einer angegebenen Nachbarschaft berechnet. (vgl. ArcGIS) Um das Geländemodell von Rauschen zu befreien, wird in einem 5x5-Rechteck-Raster der Mittelwert berechnet.

4.9.1 Schummerung

Die erste Visualisierung ist die Schummerung. Mittels ArcGIS wurde das Tool *Hillshade* verwendet, das aus einer Rasterdatei – in dieser Forschungsarbeit sind die Ausgangsdaten stets die entsprechenden DGMs – ein schattiertes Reliefbild erzeugt.

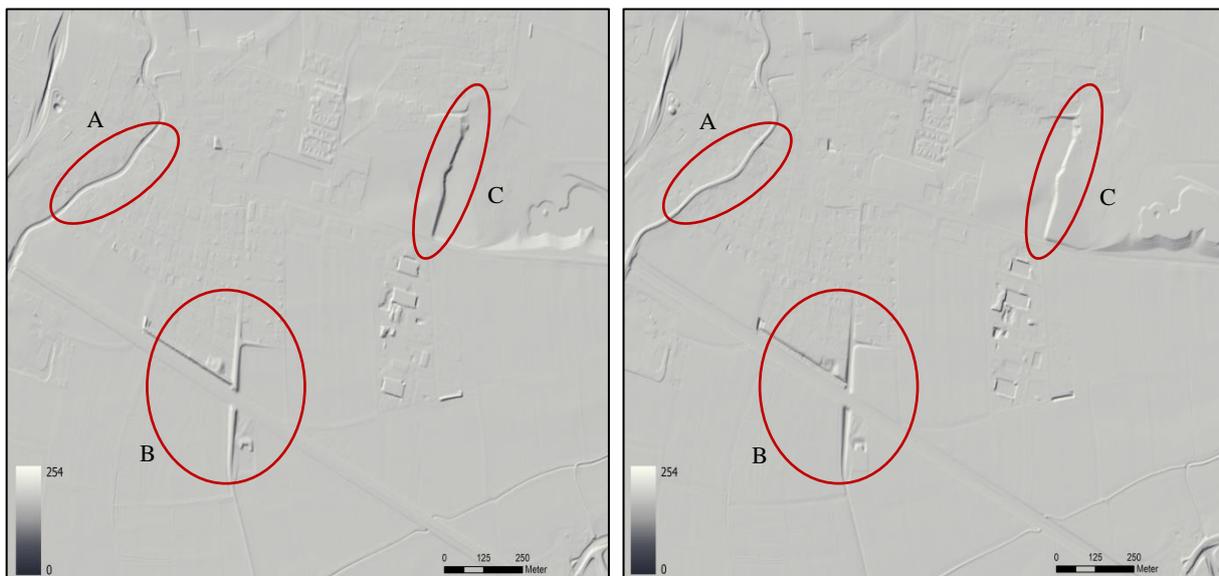


Abbildung 41, schattiertes Reliefbild aus dem Untersuchungsgebiet in Asten, Österreich. Links: Azimut 315 Grad, Rechts: Azimut 135 Grad. A: Graben eines Baches, B: Straßendamm, C: Böschung. Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 41 zeigt, dass die Schummerung stark von der Richtung der Beleuchtung abhängt. Bei südlicher Beleuchtung kann es zu optischen Täuschungen, sogenannten Reliefumkehrungen kommen (vgl. Hesse 2016: 113). Rein visuell lassen sich die gesuchten Kleinformen recht deutlich erkennen, dies liegt aber teilweise auch daran, dass dieses Gebiet ein recht flaches Siedlungsgebiet darstellt und sich deshalb die Formen stärker vom sonst flachen Terrain unterscheiden lassen. Die Schummerung ist ein rein visuelles Tool, welches noch keine Rückschlüsse darauf gibt, wie steil das Gelände ist beziehungsweise wie sich das Relief allgemein verhält, denn sie zeigen das Gelände rein in Bezug auf die Beleuchtung. Parameter, die Böschungen, Dämme und Gräben beschreiben, können aus der Schummerung nicht abgeleitet werden.

4.9.2 Neigung

Die Neigung wird in ArcGIS mit dem Tool *Slope* berechnet. Sie misst die Veränderung der Höhe aus dem digitalen Geländemodell in Richtung des steilsten Abstiegs und wird durch die erste Ableitung berechnet (vgl. Gallant und Wilson 2000: 53).



Abbildung 42, Neigung aus dem Untersuchungsgebiet in Asten, Oberösterreich. A: Graben eines Baches, B: Straßendamm, C: Böschung. Quelle: eigene Darstellung

Auch hier sind, wie bereits bei der Schummerung, die Formen deutlich erkennbar. Je dunkler, desto steiler. Jeder Pixel erhält dabei einen Wert der Neigung im Vergleich zu seinen Nachbarn (genauere Beschreibung Kapitel 3.2.2). Im Vergleich zur Schummerung hat die Neigung eine deutlich größere Bedeutung für die Forschungsarbeit und wird nicht rein visuell verwendet. Aus den Parametern aus Kapitel 4.6 geht hervor, dass die gesuchten Formen eine Neigung zwischen $12,5$ und 60° aufweisen sollen. Des Weiteren sollen sie eine gewisse Anzahl an flachen Nachbarzellen ($< 7,5^\circ$) aufweisen, da Böschungen, Dämme und Gräben eine mehr oder weniger flache angrenzende Fläche haben sollen und in steileren Gebieten nur in Ausnahmefällen detektiert werden sollen. Diese Information steckt in dieser Form der Visualisierung und ist somit fundamental für eine effiziente Detektion.

4.9.3 Krümmung

Die Neigung allein kann noch nichts über die Geländeformen aussagen, da bloß das Gefälle bzw. die Steigung angegeben wird, nicht jedoch die Richtung beziehungsweise Ober- und Unterkanten. Des Weiteren wird bei der Neigung ein Grenzwert von zum Beispiel $12,5^\circ$

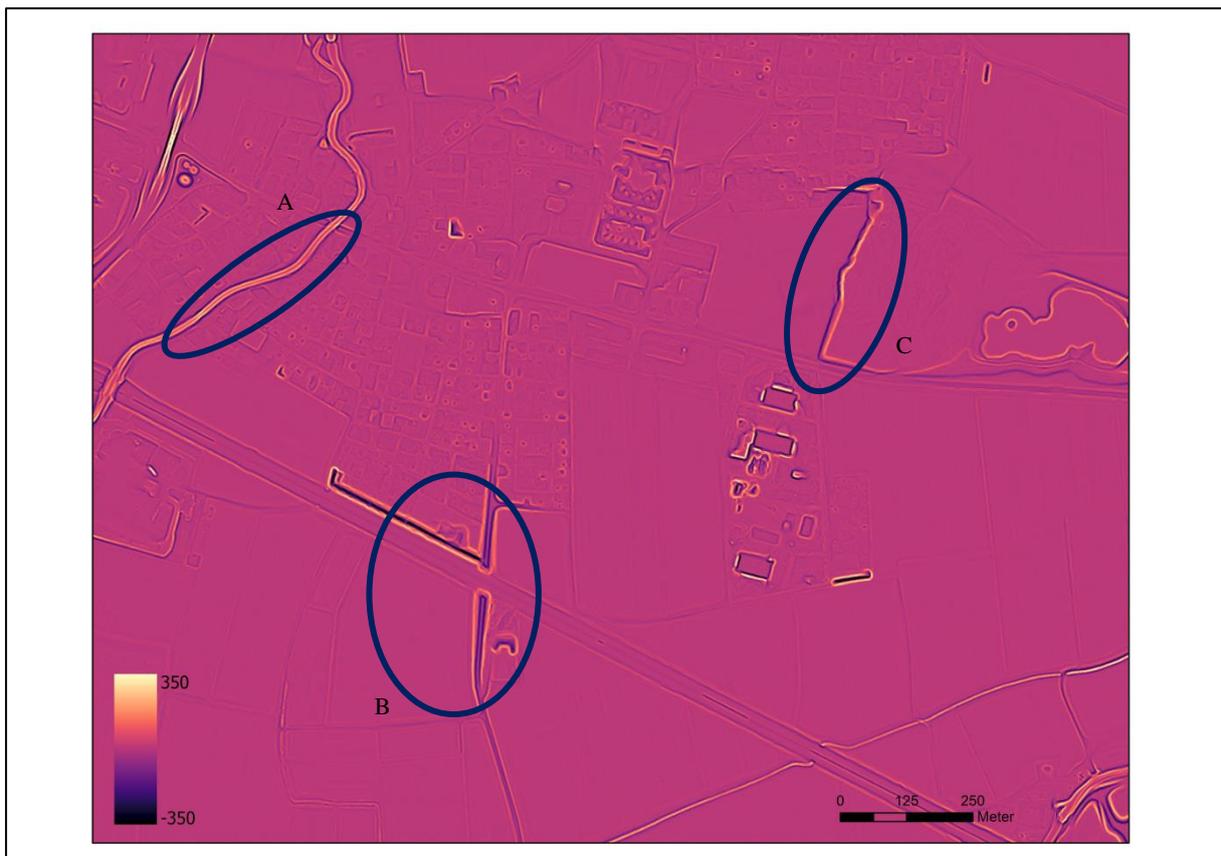


Abbildung 43, Profilkrümmung aus dem Untersuchungsgebiet in Asten, Oberösterreich. A: Graben eines Baches, B: Straßendamm, C: Böschung. Helle Werte bedeuten eine konkave Form, gleichbedeutend mit der Unterkante. Dunkle Werte bedeuten konvex, gleichbedeutend mit der Oberkante. Violette Gebiete deuten auf eine lineare Oberfläche hin. Quelle: eigene Darstellung

gesetzt. Dies würde bedeuten, dass bei einem Berg, der zum Beispiel einen langen Anstieg von 10° aufweist und dann langsam und kontinuierlich etwas steiler wird, ab dem Moment wo die Neigung $12,5^\circ$ aufweist, diese Zellen als Böschung klassifiziert werden würde. Da die gesuchten Formen allerdings klare Kanten aufweisen müssen, ist die Krümmung, die in ArcGIS mit dem Tool *Curvature* \rightarrow *Profil Curvature* berechnet wird, ein ideales Werkzeug. Zum einen sind die Kanten allgemein ein Indiz für eine Geländekleinform, zum anderen können damit auch die Höhen der Formen berechnet werden, indem die Differenz der durchschnittlichen Höhen von Ober- und Unterkante kalkuliert werden.

In Abbildung 44 wird der Unterschied von Neigung und Krümmung anhand eines Beispiels einer höhergelegenen Region im Untersuchungsgebiet veranschaulicht. Ohne die Krümmung würde der Berg durch die Neigung vollständig als Böschung klassifiziert werden. Die Krümmung hingegen erkennt bloß Änderungen in der Neigung. Je stärker diese sind, desto eher weist dies auf Geländekleinformen wie Böschungen, Dämme oder Gräben hin, da eine starke Änderung der Neigung starke Kanten bedeutet. Ist die Neigung zwar stark, aber gleichbleibend, so wird ein Pixel in der Krümmung einen Wert um Null aufweisen.

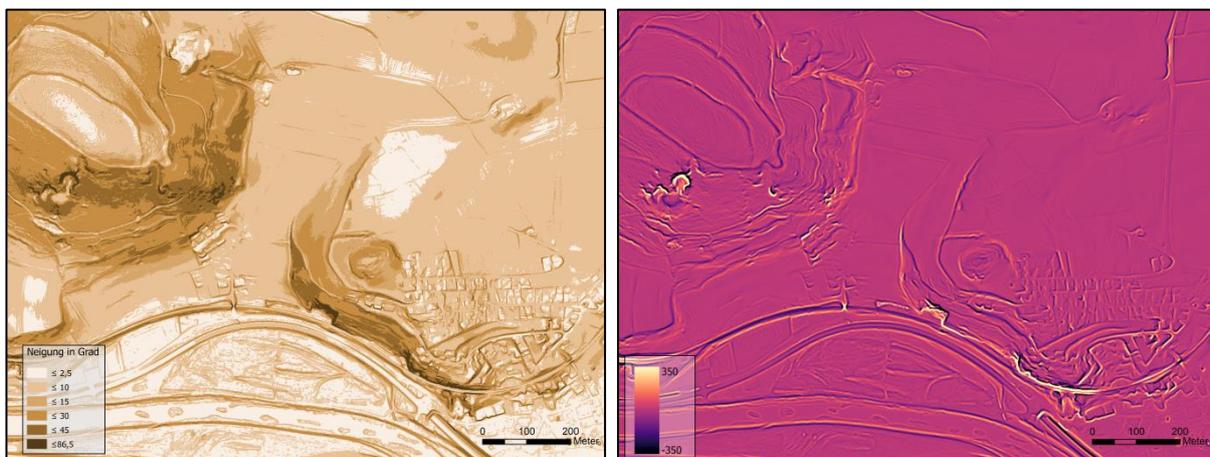


Abbildung 44, Neigung (links) und Profilkrümmung (rechts) im Untersuchungsgebiet im Mühlviertel, Oberösterreich. Anhand der Neigung erkennt man eine plastische Wiedergabe des Geländes ähnlich zu einer Schummerung, der Höhenunterschied ist deutlich erkennbar. Bei der Profilkrümmung werden nur konkave und konvexe Formen, also Änderungen in der Neigung dargestellt. Steile, aber gleichbleibende Neigung wird in der Profilkrümmung violett dargestellt, was bedeutet, dass die Form dieser Zelle im Vergleich zu den Nachbarzellen linear ist. Quelle: eigene Darstellung

4.9.4 Standardabweichung

Aus der Tabelle aus Kapitel 4.6 geht hervor, dass die gesuchten Kleinformen eine gewisse Anzahl an flacher Nachbarzellen aufweisen müssen. Setzt man diese Parameter um, so

erkennt man, dass einige Grabenstrukturen in hügeligeren Regionen nicht detektiert werden können, da die bestimmte Anzahl (Threshold) an flachen Nachbarzellen nicht erreicht wird.

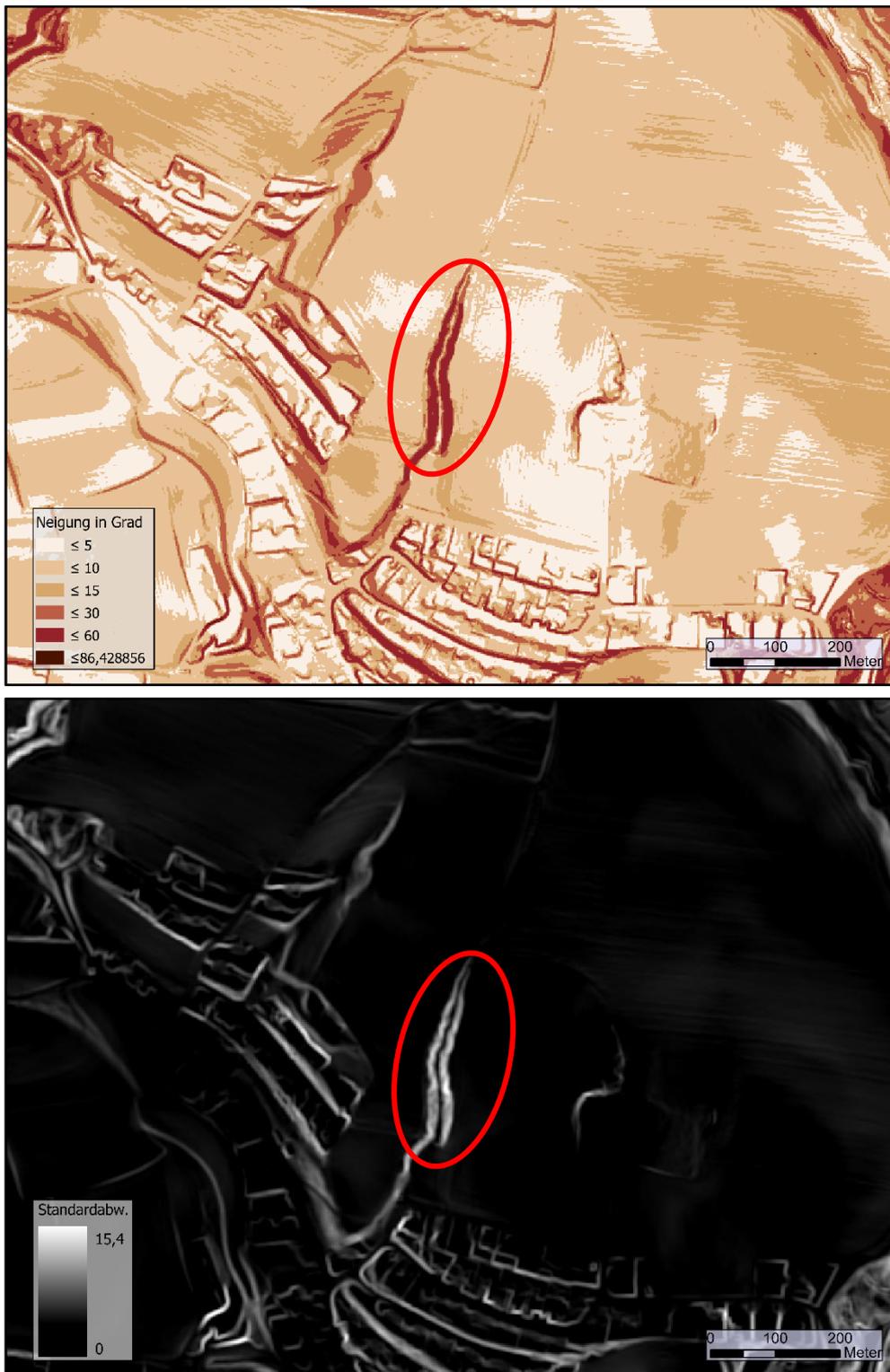


Abbildung 45, Neigung (oben) und Standardabweichung (5x5 Window, unten) in einer steileren Region im Untersuchungsgebiet. Quelle: eigene Darstellung

Hier hilft die Standardabweichung des Geländemodells, da dadurch starke Höhenveränderungen in einem bestimmten Nachbarschaftsverhältnis untersucht werden. Abbildung 45 zeigt ein Beispiel, wie die Standardabweichung dabei helfen kann, Geländekleinformen in steileren Regionen zu finden. Die deutlich erkennbare Grabenstruktur im Zentrum von Abbildung 45 liegt in einer Region, die die Regel der flachen Nachbarzellen nicht erfüllt. Die Standardabweichung hingegen ist beim Graben deutlich stärker ausgeprägt und kann dadurch durch eine geeignete Grenzwert-Setzung detektiert werden. Wie bereits in Kapitel 4.6 erwähnt, helfen sogenannte Moving Windows dabei, die Daten von Rauschen zu befreien sowie Nachbarschaftsbeziehungen zu untersuchen. Bei der Standardabweichung wurde ein 5x5 Moving Window (Filter) angewandt. Standardabweichung und Neigung haben grundsätzlich einen ähnlichen Effekt, aus der Standardabweichung kann man aber besser Grenzwerte setzen.

Die Standardabweichung sagt etwas über den Kontrastumfang aus. Der Kontrastumfang ist in einem digitalen Geländemodell besonders dort hoch, wo sich die Höhenwerte verändern. In einer 5x5 Nachbarschaftsanalyse haben Strukturen wie der vorgestellte Graben eine höhere Standardabweichung als die Umgebung, da sich Höhenwerte schnell verändern. Dadurch haben diese Bereiche im Bild einen höheren Kontrast und sind leichter zu erkennen. Viele Graustufen in einem Bild bedeuten ganz einfach viele Höheninformationen. (vgl. Prinz 2017)

4.10 Rasterbearbeitung

Um Geländekleinformen wie Böschungen, Dämme und Gräben mit einem digitalen Geländemodell zu detektieren, braucht es eine sogenannte Rasterbearbeitung. Arten der unterschiedlichen Visualisierungen sowie Methoden, diese in Datengewinnung umzuwandeln, wurden bereits erwähnt. Nun soll eine Übersicht über den Ablauf der verwendeten Werkzeuge in ArcGIS gezeigt werden. Es soll dabei auch näher auf die Grenzwert-Setzung sowie auf geeignete Moving Windows eingegangen werden.

4.10.1 Filtern, Nachbarschaftsbeziehungen

Neben der Filterung des Geländemodells zu Beginn wird auch die Krümmung gefiltert, um bestmögliche Ergebnisse für die anschließende Kantendetektion zu erhalten. Es wurden verschiedene Moving Windows ausprobiert und miteinander verglichen. Wie bereits in Kapitel 4.6 erwähnt, ist die Größe des Fensters stark abhängig vom gewünschten Ergebnis. Ist das Fenster zu klein, sorgen kleinere Strukturen in den gesuchten Formen für ein Rauschen, ist das Fenster aber zu groß, werden Diskontinuitäten verallgemeinert und es bleiben nur noch Hauptstrukturen übrig (vgl. Rutzinger et al. 2007: 4). Zudem sorgen große Filter wie 10x10 auch für einen Suchradius von 10x10 Meter (aufgrund der Auflösung von 1x1 Meter), was für die gesuchten Kleinformen teilweise schon zu groß ist. Abbildung 46 zeigt, wie sich die Krümmung in vier unterschiedlichen Moving Windows (normal, 3x3, 5x5, 10x10) entlang einer Böschung verhält:

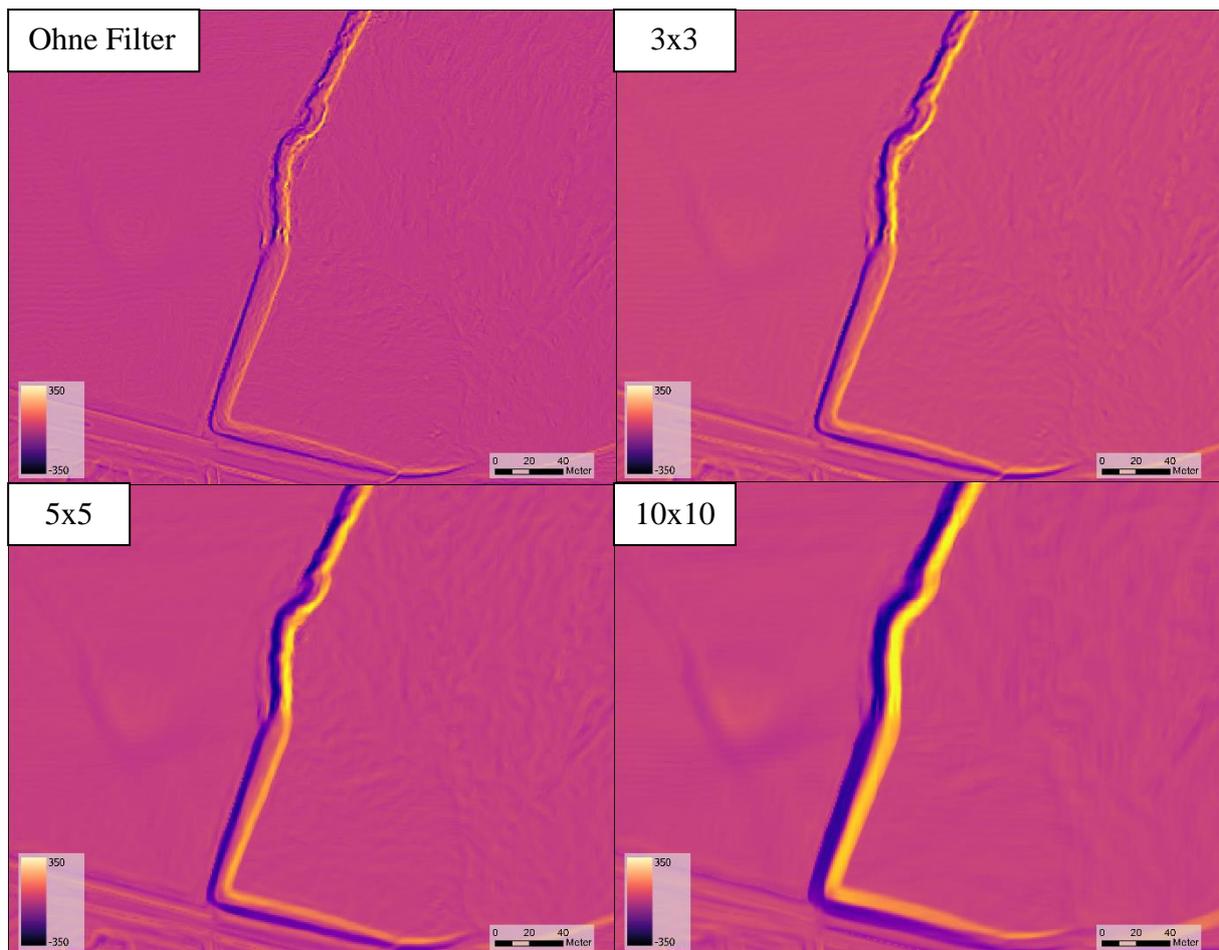


Abbildung 46, unterschiedliche Filter (Moving Window, immer Mittelwert des Fensters) der Krümmung entlang einer Böschung. Oben links: ohne; Oben rechts: 3x3; Unten links: 5x5; Unten rechts: 10x10. Quelle: eigene Darstellung

Man erkennt, dass die Krümmung ohne Filter recht körnig erscheint. Bei 10x10 Filter jedoch sind keine Nebenstrukturen mehr erkennbar. Bei den gesuchten Kleinformen ist ein Moving Window zwischen 3x3 und 5x5 am besten geeignet.

4.10.2 Reklassifizierung

Ein wesentlicher Bestandteil des Workflows besteht in der Reklassifizierung der Rasterdaten. Man versteht darunter eine Neuordnung der den Rasterzellen zugrunde liegenden Werten (vgl. ArcGIS). Beispiel Neigung: Wie bereits in Kapitel 3.2.2 erwähnt, wird bei der Neigung für jede Zelle ein eigener Wert berechnet. Dies ist wichtig und richtig, für eine Weiterverarbeitung sind diese Werte jedoch schwierig, weshalb sie in Klassen eingeteilt werden. Dies geschieht mit dem Tool „*Reclassify*“. Aus den Parametern (Kapitel 4.6) geht hervor, dass die gesuchten Kleinformen eine Neigung zwischen 12,5 und 60 Grad aufweisen müssen. Die Werte 0 bis 12,5 Grad sowie 60 bis 90 Grad werden als „*NODATA*“ klassifiziert, der Rest bekommt den Wert „1“. Somit ist die erste Regel bereits erstellt.

Auch für die weiteren Regeln wird die Reklassifizierung benötigt. Bei der Regel der flachen Nachbarzellen wurde der Grenzwert so gesetzt, dass jede Zelle in einer Nachbarschaft von 50x50 Zellen zumindest 500 (also 500 aus 2500) flache Nachbarzellen aufweisen muss, da vor allem Böschungen und Dämme in den meisten Fällen an eine flache Fläche angrenzen. Flach wurde in diesem Zusammenhang mit unter 7,5 Grad festgelegt. Die Hauptaufgabe dieses Schrittes ist die Unterscheidung von Bergregionen und flachen Gebieten, wo die gesuchten Geländekleinformen häufiger vorkommen. Nur unter bestimmten Voraussetzungen, die im weiteren Verlauf noch genauer beschrieben werden, sollen in Bergregionen die gesuchten Geländekleinformen detektiert werden. Die Zahl 500 wurde wiederum, ähnlich wie bei der Filterung, durch einige Tests festgelegt. Aus dem Neigungs raster werden die Werte 7,5 bis 90 Grad mit dem Wert „0“ versehen, alle zwischen 0 und 7,5 Grad mit „1“. Danach wird mit diesem neu gewonnenen Raster das Tool „*Focal Statistics*“ verwendet, um die Nachbarschaftsanalyse durchzuführen. Als „*Statistic Typ*“ wird „*Sum*“ verwendet. Als Ergebnis erhält man also für jede Zelle die Anzahl der flachen Nachbarzellen im gewählten Umkreis. Danach wird wieder ein „*Reclassify*“ eingesetzt, um alle Werte zwischen 0 und 500 als „0“ zu klassifizieren sowie alle Werte zwischen 500 und 2500 mit „1“. Zellen mit einer 0

sind demnach in bergigen Regionen und Zellen mit einer 1 in flachen Regionen. Abbildung 47 zeigt die flachen (grün) und bergigen (rot) Gebiete im Untersuchungsgebiet:



Abbildung 47. Einteilung des Untersuchungsgebietes in flache (grün) und bergige (rot) Regionen. Eine grüne Zelle hat in einer Nachbarschaft von 50x50 Zellen zumindest 500 Nachbarzellen, die eine Neigung unter $7,5^\circ$ aufweisen, rote nicht. Quelle: eigene Darstellung

In Kapitel 4.9.4 wurde bereits von Gräben in steileren Gebieten gesprochen, die die Regeln der flachen Nachbarzellen nicht erfüllen. Dies wird abermals mit einem „Reclassify“ der Standardabweichung umgesetzt. Dafür wird der Raster der flachen Nachbarzellen reklassifiziert. Es werden die Gebiete benötigt, die die Regel nicht bestanden haben, also jene Gebiete mit dem Wert „0“. Der Rest wird als „NODATA“ bezeichnet. Die Standardabweichung wird ebenfalls neu klassifiziert, in diesem Fall mit dem Grenzwert bei 0,65. Die gesetzten Grenzwerte wurden nach vielen Tests und Überlegungen gesetzt. Es wurden nach der Visualisierung Verdachtsfälle mit Profilen untersucht, ob diese Formen wirklich Gräben darstellen und ab welchen Schwellenwerten diese nicht mehr eindeutig erkennbar sind. All jene Zellen, die eine Standardabweichung von über 0,65 aufweisen und sich in nicht flachen Gebieten befinden, werden demnach ebenso mit dem Wert „1“ versehen.

Nun entsteht bei der Standardabweichung das Problem, dass entlang von Hängen oder Bergen die Abweichung ebenso oftmals über dem Schwellenwert liegt und somit fälschlicherweise als Geländekleinform detektiert wird. Diese Formen werden bereinigt, indem nur diese neu gewonnenen positiven Zellen aus nicht-flachen Gebieten in Polygone umgewandelt („*Raster to Polygon*“) und auf ihre Fläche überprüft werden. Da es sich in diesem Fall hauptsächlich um Kleinformen wie Gräben handelt, ist davon auszugehen, dass die Fläche nicht allzu groß sein kann. Wiederum wurde visuell mit Hilfe der KM50 getestet, welche Formen definitiv als Gräben zu detektieren sind und welche nicht und wie groß die Flächen jeweils sind. Der Grenzwert wurde anschließend auf 3000 m² gesetzt. Alle detektieren Fälle, die mehr als 3000 m² haben, sollten durch die Höhenlinien erkannt werden können und sind somit keine Geländekleinformen. Die Polygone wurden anschließend wieder mit der gleichen Zellgröße in Raster umgewandelt („*Polygon to Raster*“).

4.10.3 Raster verbinden

Nach der Reklassifizierung gibt es insgesamt drei Raster, die alle entweder den Wert „NODATA“ bzw. „0“ oder „1“ aufweisen. Die Geländekleinformen Böschung, Damm oder Graben sollen dann als solches detektiert werden, wenn durch das Tool „*Cell Statistics*“ mit der Einstellung „*SUM*“ ein Pixel den Wert „2“ aufweist. Dies bedeutet, dass die Pixel entweder in flachen Gebieten (mehr als 500 flache (< 7,5 Grad) Nachbarzellen in einem

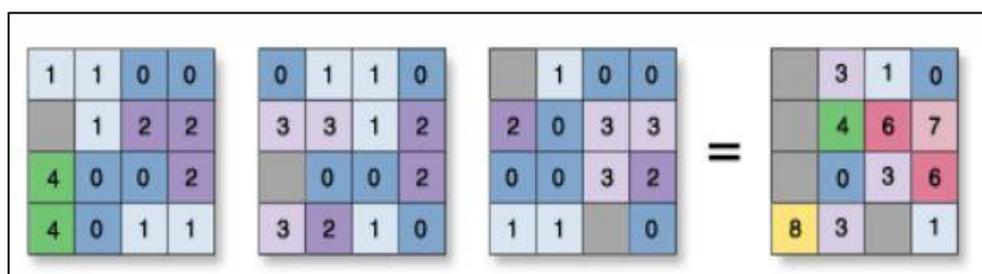


Abbildung 48, Zellenstatistik von verschiedenen Rastern mit der Statistik SUM. Quelle: ArcGIS

Umkreis von 2500 Zellen) eine ausreichende Neigung (zwischen 12,5 und 60 Grad) aufweisen oder dass die Pixel in steileren Gebieten (weniger als 500 flache (> 7,5 Grad) Nachbarzellen in einem Umkreis von 2500 Zellen) eine ausreichende Neigung (zwischen 12,5 und 60 Grad) sowie eine deutlich erhöhte Standardabweichung aufweisen (über 0,65 in einem 5x5 Moving Window) und unter 3000 m² Fläche besitzen. Das Ergebnis kennzeichnet die Flächen, die in der weiteren Verarbeitung (Kantendetektion, Höhenberechnung, direkte

Nachbarschaftszellen) als die gesuchten Geländekleinformen detektiert werden können. Abbildung 48 zeigt die Funktionsweise des Tools „Cell Statistics“ in ArcGIS, Abbildung 49 den Ablauf der Verbindung der Zellen im Untersuchungsgebiet, Abbildung 50 auf der nächsten Seite den Ablauf der Rasterbearbeitung.

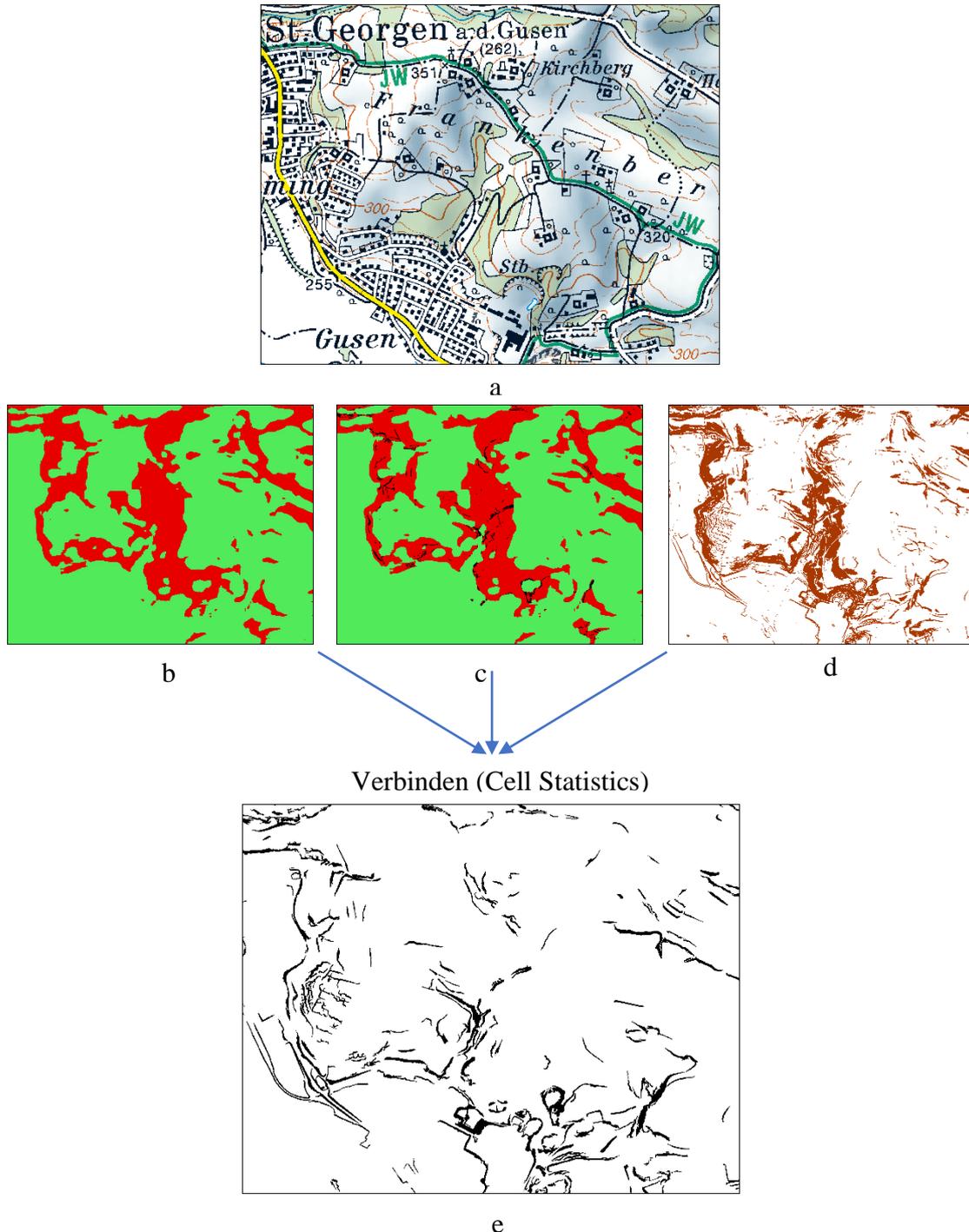


Abbildung 49, Verbindung der Rasterbearbeitung, Beispiel aus dem UG. a: Lage in der ÖK50; b: flache Nachbarzellen (grün = mehr als 500 Nachbarzellen in 50x50 Nachbarschaft unter 7,5 Grad; rot = unter 500); c: flache Nachbarzellen aus b + Gebiete (schwarz) mit hoher Standardabweichung und unter 3000 m² Fläche; d: Neigung zwischen 12,5 und 60 Grad (braun); e: Gebiete, die den Wert „2“ aufweisen, also eine ausreichende Neigung haben und entweder ausreichend flache Nachbarzellen oder eine sehr hohe Standardabweichung (schwarz). Kleine Flächen (unter 300m² und unter 100 Meter Länge) wurden gelöscht. Quelle: eigene Darstellung

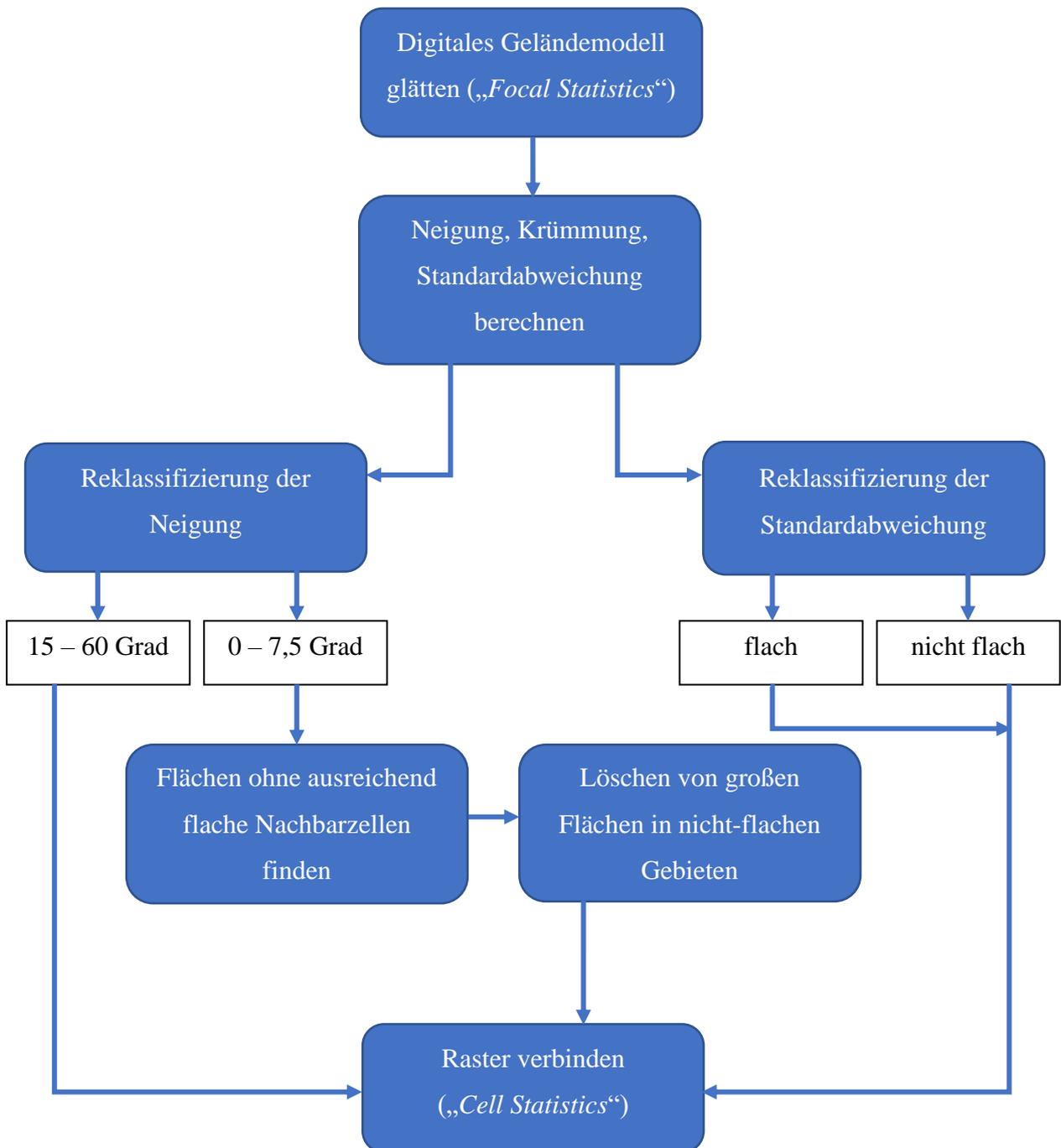


Abbildung 50, Ablauf der Rasterbearbeitung. Quelle: eigene Darstellung

4.10.4 Einteilung von fließenden Gewässern, Verkehr und Rest

Anschließend wird der gewonnene Rasterdatensatz aus den vier Grundregeln in drei verschiedene Teile aufgeteilt, die danach wieder zusammengeführt werden sollen. Dies hat den Hintergrund, dass Bäche oftmals unter einer Straße verlaufen, die einen Damm führt, wodurch sich diese beiden Formen miteinander vermischen. Um dies zu verhindern, werden zuerst aus dem DLM die Datensätze der fließenden Gewässer sowie des Verkehrs herausgefiltert und auf das Untersuchungsgebiet mit dem Tool „*Clip*“ ausgeschnitten. Danach werden mit „*Select*“ die wichtigsten Straßentypen gefiltert. Dazu zählen Autobahnen, Schnellstraßen, Bundesstraßen, Landesstraßen und Normalspurbahn. Auch bei den fließenden Gewässern werden besonders breite Flüsse (über 20 Meter) herausgefiltert, da diese zu große Unterschiede in der Breite aufweisen und nicht homogen behandelt werden können. Anschließend wird mit dem Tool „*Buffer*“ ein Buffer von 100 Meter um die Autobahnen und Schnellstraßen gelegt, bei den Landesstraßen und Bundesstraßen sind es 70 Meter, bei den Normalspurbahnen 50 Meter und bei den Bächen 25 Meter. Die Buffer wurden aufgrund von Digitalisierungsfehlern bzw. -ungenauigkeiten aus dem DLM etwas breiter gesetzt. Alle Formen, die innerhalb dieses Buffers liegen, sind entweder Verkehrsdämme oder Gräben eines Baches beziehungsweise Hochwasserdämme. Um Regionen auszuschließen, die Verschneidungen dieser Formen aufweisen (wie zum Beispiel Unterführungen), werden mit dem Tool „*Erase*“ diese Flächen gelöscht. Mit „*Extract by Mask*“ können anschließend drei Raster berechnet werden, die die Ausdehnung der Buffer haben. Eines mit den fließenden Gewässern, eines mit dem Verkehr und eines, das als „Rest“ bezeichnet werden kann. Danach werden mit „*Cell Statistics*“ die drei Raster wieder zusammengefügt, da es vorkommen kann, dass durch den gesetzten Buffer Teile von Böschungen abgeschnitten werden, die dann für die folgende Kantendetektion fehlen. Abbildung 51 zeigt einen Fall, wo Vermischungen durch die vorgestellte Methode verhindert werden können.

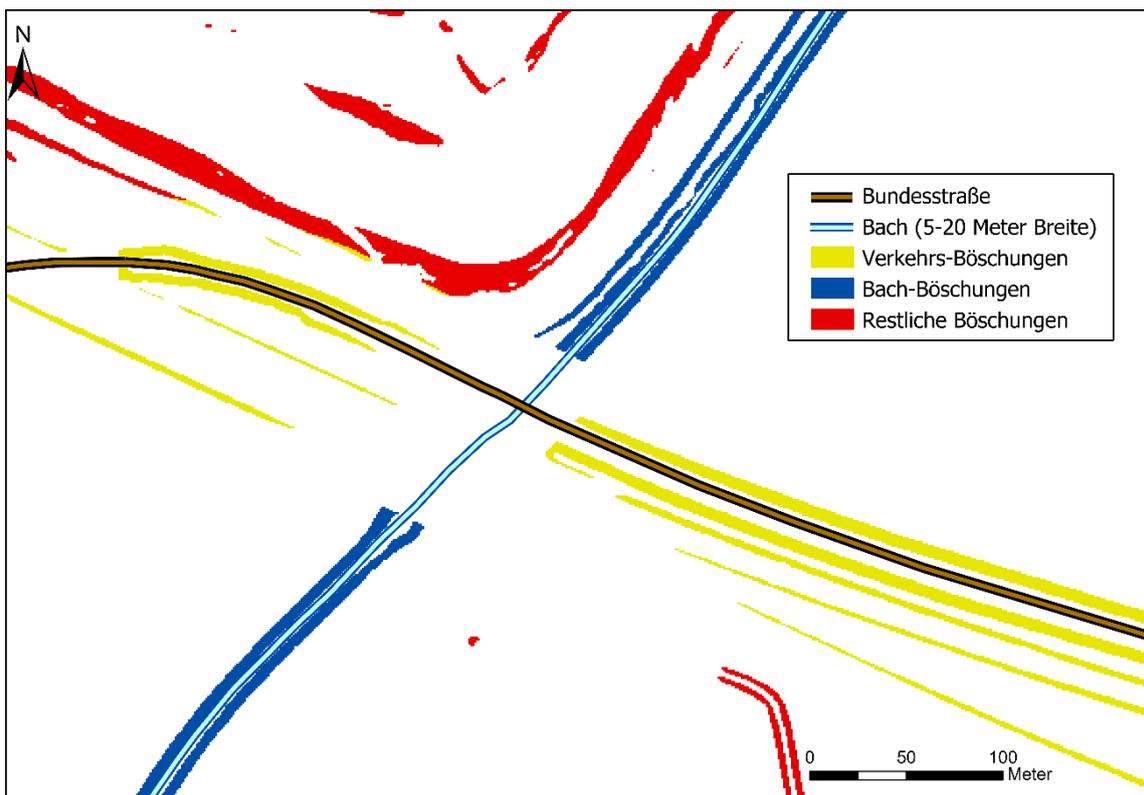
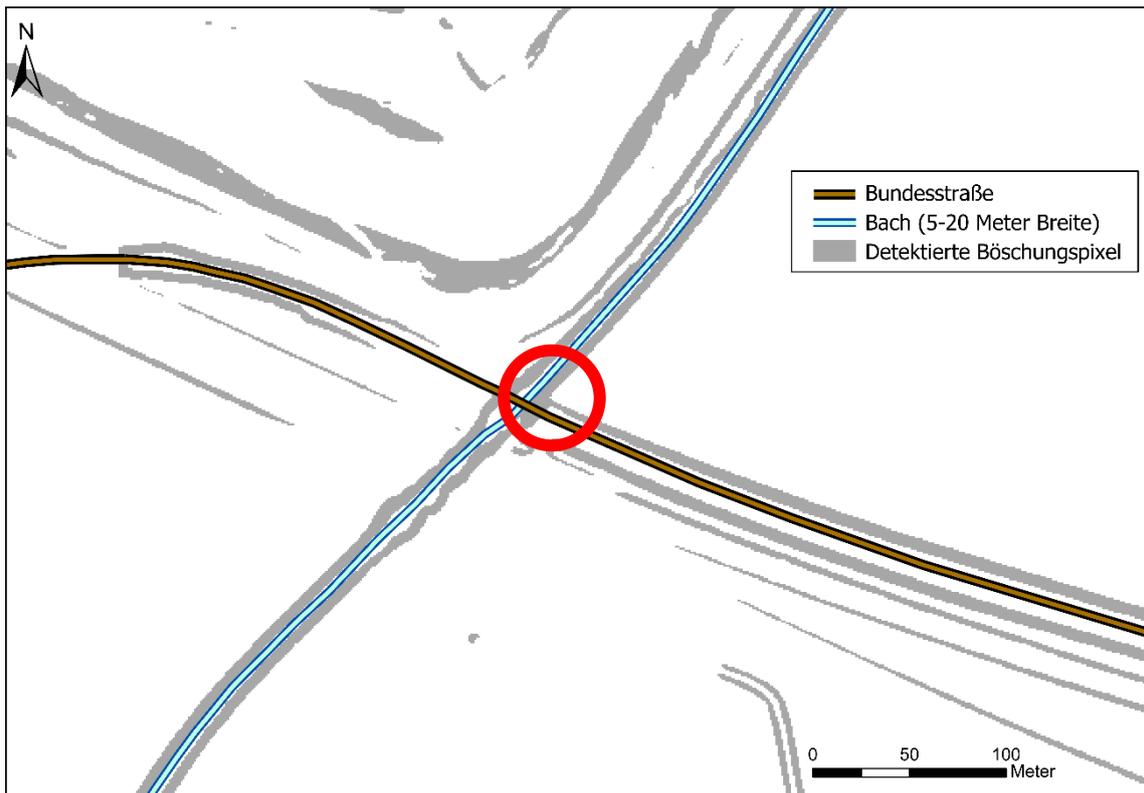


Abbildung 51, Situation bei einer Kreuzung eines Bachs und einer Straße (Überführung). Oben, roter Kreis: Vermischung einer Verkehrs-Böschung mit einer Bach-Böschung. Unten: Aufteilen der unterschiedlichen Böschungen sowie "Erase" (Löschen) der Kreuzungsgebiete. Quelle: eigene Darstellung

4.11 Kantendetektion

Nachdem mögliche Böschungen durch die zuvor vorgestellten Regeln detektiert wurden und darauf geachtet wurde, dass sich Verkehrspixel, Bachpixel sowie die restlichen Pixel nicht miteinander vermischen, sollen nun Ober- und Unterkanten detektiert werden. Die Detektion dieser hat zwei entscheidende Bedeutungen. Auf der einen Seite sind klare Kanten ein Kriterium aller drei Geländekleinformen. Haben die detektierten Pixel aus den Grundregeln keine klaren Kanten, so werden sie nicht als Geländekleinformen weiterbehandelt. Auf der anderen Seite sind Ober- und Unterkanten am besten geeignet, um den relativen Höhenunterschied zum angrenzenden Gelände zu berechnen. So wird versucht, die beiden Kanten zu extrahieren und den Unterschied der durchschnittlichen Höhen abzuleiten.

Die Kantendetektion vermischt Elemente der Rasterbearbeitung und Vektorbearbeitung. Die genaue Methode wurde bereits in Kapitel 3.5.3 vorgestellt und wird nun umgesetzt. In den nachfolgenden Unterkapitel werden die einzelnen Schritte zur Detektion von Ober- und Unterkanten gezeigt. Abbildung 52 auf Seite 97 visualisiert den Ablauf in einer Bildabfolge.

4.11.1 Vektorisierung (Polygone)

Um die detektierten Pixel bearbeiten zu können, müssen sie in Vektordaten umgewandelt werden. Die Begriffe Raster und Vektor wurden bereits oft verwendet, aber noch nicht definiert:

- Rasterdaten sind laut dem Lexikon der Geographie „ein Datenmodell, in dem Bildinhalte (z.B. Fotos) oder räumliche Objekte als (quadratische) Rasterzellen in einer zweidimensionalen Datenmatrix abgebildet werden. [...] Enthalten die Rasterzellen Bildinformationen, spricht man auch von Pixel.“ (Lexikon der Geographie)
- Vektordaten sind laut dem Lexikon der Geographie „ein Datenmodell, das räumliche Objekte (z.B. Messpunkte, Straßen, Landnutzungseinheiten) als Punkte, Linien und Flächen abbildet. Form und Position dieser Objekte (Geometriedaten) werden durch Koordinaten eines räumlichen Bezugssystems definiert.“ (Lexikon der Geographie)

Mit dem Tool „*Raster to Polygon*“ können die detektierten Pixel in Vektordaten umgewandelt werden.

4.11.2 Löcher schließen

Die Raster werden deshalb in Vektordaten umgewandelt, um etwaige Löcher zu füllen. In Abbildung 51 sind bereits einige Löcher in den Böschungen erkennbar, diese sollen gefüllt werden. Dies ist der erste Schritt der Generalisierung. Das Schließen der Löcher, die aufgrund von kurzen Unterschreitungen der gesetzten Schwellenwerte auftreten, ist ein wichtiger Schritt, um die detektierten Fälle als Ganzes zu betrachten. Löcher in Vektordaten können in ArcGIS mit dem Tool „*Eliminate Polygon Part*“ gefüllt werden. Dadurch entsteht ein neuer Vektordatensatz mit ganzen Polygonen. Als Wert wurden nach verschiedenen Tests 7,5 % der Fläche angegeben. Somit werden kleine Löcher geschlossen, größere hingegen, für die Beschreibung der Geländekleinformen wichtige Löcher (zum Beispiel ein sich umschließender Graben bzw. Damm, wo die nicht geneigte Fläche im Zentrum ein Loch ist) bleiben erhalten.

4.11.3 Nach Länge und Fläche selektieren

Hier geschieht der zweite Schritt der Generalisierung. Es sollen vor allem kleine Flächen gelöscht werden. In den österreichischen Karten im Maßstab 1:50.000 besitzen Keilschraffen eine Breite von 25 Meter und es kommen immer zumindest zwei Keile vor. Als Mindestlänge wird daher 100 Meter angegeben, da es sich um Flächen handelt und nicht um Linien und dadurch davon ausgegangen werden kann, dass die Längen mindestens doppelt so lang sind. Als Mindestfläche werden 300 m² angegeben. Dies soll weitere kleine Flächen löschen. Mit dem Tool „*Select*“ lassen sich die Polygone auf die angegebenen Werte überprüfen.

4.11.4 Maske der Krümmung

Die Krümmung – die zweite Ableitung des Geländemodells bzw. die erste Ableitung der Neigung – erkennt, wie in Abbildung 46 sichtbar und bereits mehrmals in dieser Arbeit erläutert, Ober- und Unterkanten im Gelände. Um dem zuvor erstellten Vektordatensatz die Krümmung zuzuweisen, wird in ArcGIS mit dem Tool „*Extract by Mask*“ eine Maske erstellt. Der Eingabedatensatz ist die Krümmung, die zuvor durch das Tool „*Curvature*“ aus dem Geländemodell erstellt wurde. Die Maske ist der zuvor erstellte Vektordatensatz. Die Krümmung wurde vorab noch mit einem 5x5 Moving Window gefiltert bzw. generalisiert. Es wurden unterschiedliche Filtergrößen verwendet und visuell untersucht, welche am

geeignetsten ist. Je größer der Filter, desto größer die Glättung und desto ungenauer wird im weiteren Verlauf auch die Kantenposition. Kein Filter hingegen würde eine Vielzahl an körnigen und stark unterbrochenen Kanten hervorrufen (vgl. Rutzinger et al. 2012: 37). Um die Genauigkeit der Kanten weiterhin zu gewährleisten, die Strukturen jedoch ausreichend zu glätten, wurde ein Moving Window von 5x5 gewählt, das in Abbildung 45 ersichtlich ist. Nachdem die Maske die Krümmung aus dem ursprünglichen Raster ausgeschnitten hat, wird wieder ein Threshold, eine Grenzwert-Setzung angewandt. All jene Pixel, die einen Wert größer als 8 aufweisen, werden als Unterkante definiert, alle Pixel mit einem Wert unter 8 werden als Oberkante definiert. Auch diese Werte wurden durch verschiedene Tests untersucht. Es wurden Böschungen, die dem Autor aus der realen Welt bekannt sind, auf ihre Werte untersucht, um so allgemein auf Grenzwerte rückschließen zu können, ab welchen Werten Geländekanten ausreichend ausgeprägt sind, um als Böschungen bezeichnet werden zu können. Die Grenzwert-Setzung wurde wieder mit dem Werkzeug „*Reclassify*“ durchgeführt und in Ober- und Unterkante aufgesplittet.

4.11.5 Ausdünnen

Ober- und Unterkante werden nun wie schon in anderen Arbeiten, die diese Methode verwendet haben (Brügelmann 2000; Rutzinger, Höfle und Kringer 2012, Lundgren 2016; Cracknell 2013) ausgedünnt. Das Werkzeug „*Thin*“ in ArcGIS ermöglicht die Ausdünnung gerasteter, linearer Features, indem die Anzahl der Zellen auf die Breite von einem Pixel reduziert wird (vgl. ArcGIS).

4.11.6 Vektorisierung (Linien)

Abschließend werden die Rasterlinien zu Vektorlinien umgewandelt. Das funktioniert mit dem Werkzeug „*Raster to Polyline*“ in ArcGIS. Die extrahierten Kanten können dann im weiteren Verlauf zur Höhenberechnung verwendet werden. Abbildung 52 zeigt zusammengefasst den Workflow der Kantendetektion in einer Bildabfolge. Allgemein lässt sich noch ergänzen, dass diese Art der Kantendetektion nur eine 2D-Näherungslösung und keine 100 % exakten Linien darstellen. Als Beispiel sei eine Kante erwähnt, die vor dem Ausdünnen aus zum Beispiel zwei oder vier breiten Zellen besteht. Das Werkzeug dünnt die Linien zu einer Breite von einem Pixel aus und muss sich folgerichtig für eine „Seite“ entscheiden.

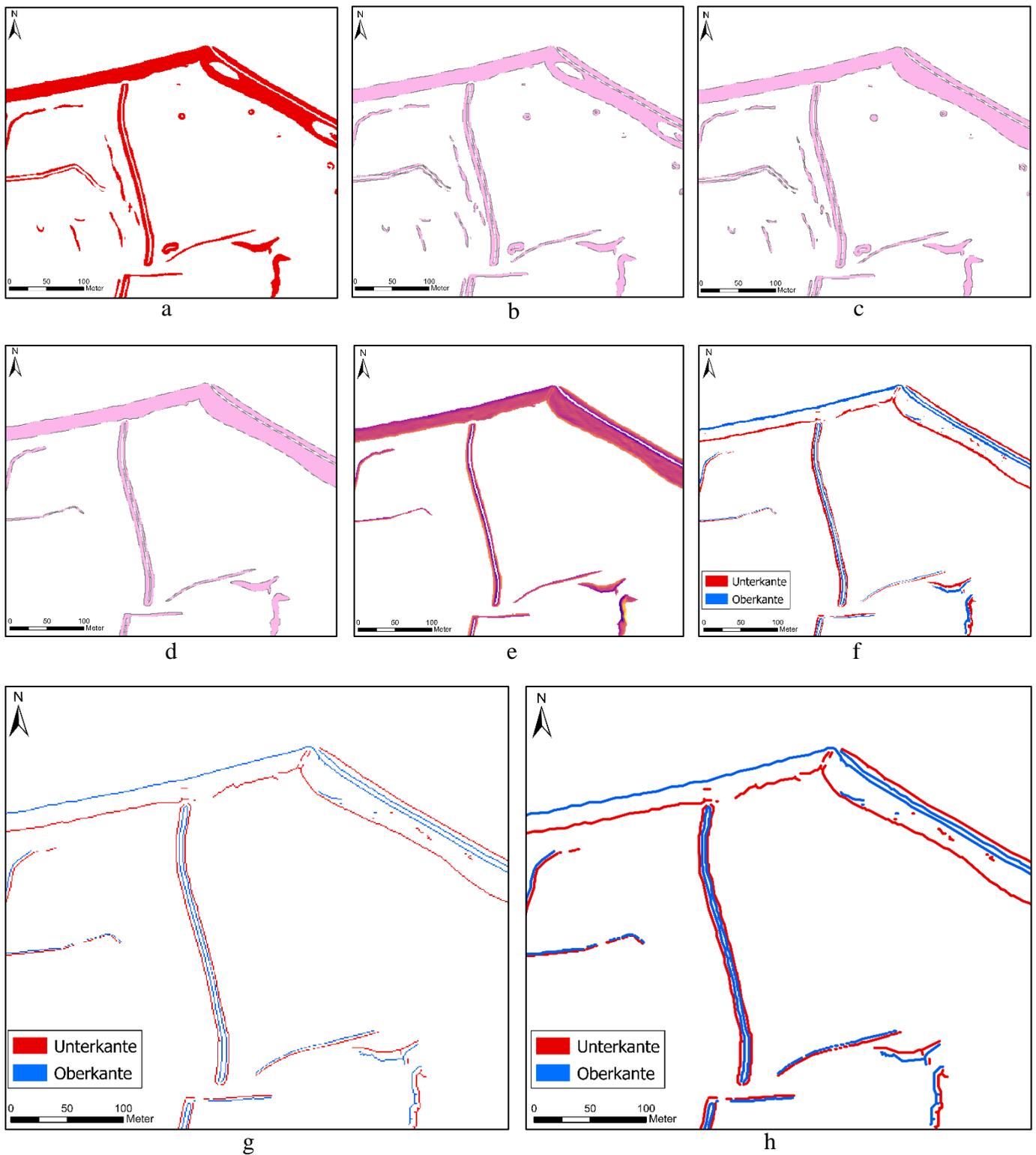


Abbildung 52, Kantendetektion. a: Bösungen der Kategorie REST (weder an Bächen noch an Straßen); b: Vektorerzeugung (Polygon) aus Raster; c: Löcher schließen (erkennbar rechts oben); d: Löschen von kleineren Flächen (Minimum 100 m Länge und 300 m² Fläche; e: Krümmungs-Maske aus d; f: Klassifizierung von Ober- und Unterkante aus der Krümmung; g: Ausdünnen der Kanten auf eine Breite von einer Zelle; h: Vektorerzeugung (Linie) aus g. Quelle: eigene Darstellung

4.12 Vektorbearbeitung

Nachdem in den letzten beiden Schritten zuerst Verdachtsfälle im Raster durch Regeln detektiert wurden und anschließend Ober- und Unterkanten aus der Krümmung extrahiert wurden, sollen nun in der Vektorbearbeitung die Höhe berechnet werden, Generalisierung vorgenommen sowie Ansätze gezeigt werden, wie die detektierten Fälle als Keilschraffen in die digitalen österreichischen Karten aufgenommen werden können.

4.12.1 Detektierte Böschungen auf Kantenbereiche reduzieren

Ein Problem, das während der Detektion entsteht, ist, dass Teile einer detektierten Böschung gar keine eindeutigen Kanten mehr aufweisen und dadurch die Genauigkeit der Detektion der Formen allgemein sowie der anschließenden Höhenberechnung verringert wird. Um dem entgegenzuwirken, sollen die detektierten Böschungen auf den Bereich der Geländekanten reduziert werden. Zuerst werden die zuvor einzeln detektierten Kanten mit der ID des Polygons räumlich verbunden („*Spatial Join*“). Anschließend wird je ein Buffer (Tool „*Buffer*“) von zehn Meter um die Kanten gelegt und danach werden die Buffer mit „*Merge*“ in eine gemeinsame Feature Klasse verbunden. Mit „*Dissolve*“ werden die zusammengehörigen IDs aus den Polygonen zu einzelnen Buffer-Polygonen verbunden. Das Tool „*Clip*“ schneidet die Buffer auf die Ausgangspolygone zu. Dort, wo sie sich überschneiden, bleibt eine Fläche übrig. Dadurch entstehen manchmal Situationen, wo sich mehrere Böschungen, die eng aneinander liegen, überschneiden. Um dies zu verhindern und wieder eindeutige IDs für die neu detektierten Polygone zu erhalten, werden die Polygone zuerst in Raster und anschließend wieder zurück in Polygone umgewandelt. Dadurch besitzen alle Formen wieder eine eindeutige ID. Abschließend werden die Löcher mit „*Eliminate Polygon Part*“ gelöscht und kleine Flächen, die unter 300 m² und 100 Meter Länge besitzen, herausgefiltert. Abbildung 53 zeigt eine Situation, in der unnötige Teile einer Böschung mit der vorgestellten Methode gelöscht werden können.

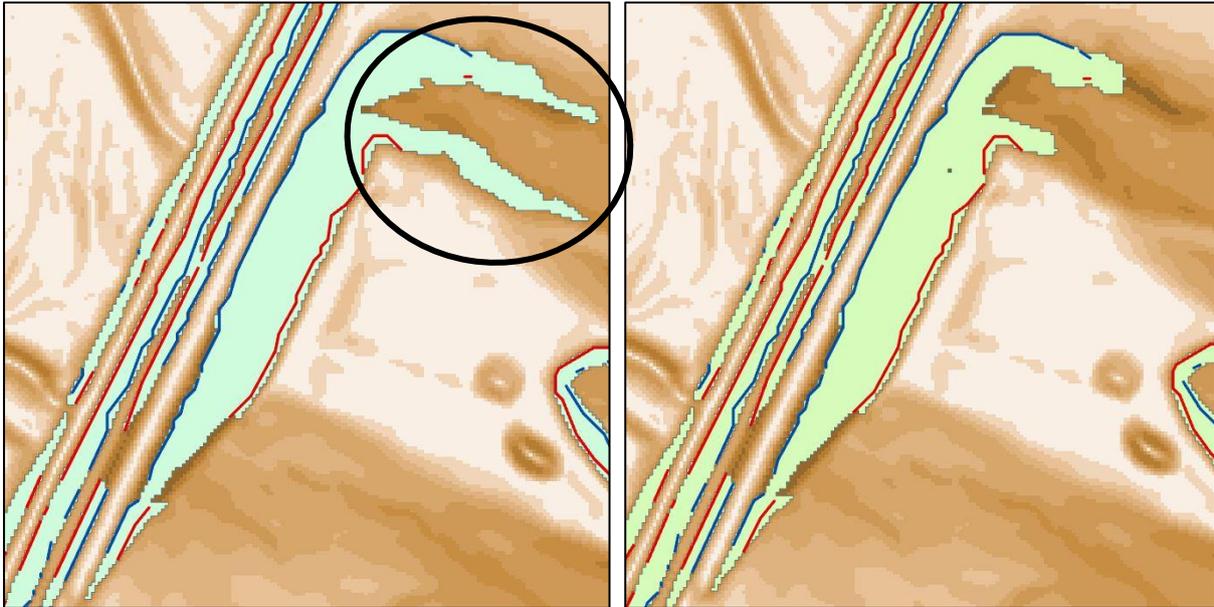


Abbildung 53, Situation einer Böschung mit Teilen ohne Kanten. Links: Böschung mit Teilen; Rechts: Böschung ohne Teile, durch Buffer-Methode gelöscht. Blaue Linien: Oberkante, Rote Linie: Unterkante, Hintergrund: Neigung. Quelle: eigene Darstellung

4.12.2 Räumlich verbinden

Um nun aus den in Abbildung 52 erkennbaren Ober- und Unterkanten die Höhen zu berechnen, müssen sie „zueinander“ gehören. Stand jetzt sind Ober- und Unterkante nicht durch eine gemeinsame ID verbunden. Zuerst müssen die beiden Linien-Datensätze verbunden werden, da beim Werkzeug „Thin“ Ober- und Unterkante getrennt betrachtet wurden. Durch eine Trennung der positiven und negativen Krümmungswerte kann die Dichte der Zellen reduziert werden, wodurch der Ausdünnungsprozess effektiver wird (vgl. Lundgren 2016: 15). Mit dem Werkzeug „Merge“ werden die beiden Linien-Datensätze zusammengefügt. Zuvor wird mit dem Tool „Calculate Field“ jeder Unterkante unter „grid_code“ der Wert 2 und jeder Oberkante der Wert 1 gegeben. Das ist wichtig, damit die beiden weiterhin getrennt voneinander betrachtet werden können. Im nächsten Schritt wird ein sogenannter „Spatial Join“, also eine räumliche Verbindung durchgeführt. Bei diesem Werkzeug werden den Linien Spalten aus den Polygonen der Grundregeln basierend auf ihren relativen räumlichen Positionen zugeordnet (vgl. ArcGIS). In diesem Fall wird die ID der Polygone mitgenommen. Dadurch erhalten Ober- und Unterkanten, die zusammengehören, die entsprechende gemeinsame ID.

4.12.3 Zusammenführen und Höheninformation berechnen

Die Kanten haben jetzt zwar eine eindeutige ID, allerdings bestehen viele Ober- und Unterkanten der gleichen ID noch aus vielen Einzelteilen. Um das zu verhindern, wird das Werkzeug „*Dissolve*“ – Zusammenführen – verwendet. Dieses fasst Features auf der Grundlage von gewissen Attributen zusammen. In Bezug auf diese Forschungsfrage sollen alle Ober- und Unterkanten mit der gleichen ID zusammengeführt werden, somit werden die Attribute „ID“ und „grid_code“ als Felder angegeben. Als nächstes werden der neu erstellten Datei die Längen der Polygone zugewiesen. Diese Information ist bereits beim „*Spatial Join*“ mitgenommen worden, jedoch beim „*Dissolve*“ wieder verloren gegangen. Durch das Werkzeug „*Join Field*“ wird die Information wieder übertragen. Danach wird die Länge der Kanten durch die Länge der Ausgangspolygone dividiert. Ist dieser Wert unter 0,15, also ein Fünftel der gesamten Länge des Polygons, so ist diese Kante zu undeutlich und wird deshalb gelöscht. Diese Schritte werden mit den Werkzeugen „*Add Field*“, „*Calculate Field*“ und „*Select*“ durchgeführt.

Nun wird den Linien die notwendige Höheninformation zugewiesen. In ArcGIS ist das mit „*Add Surface Information*“ relativ einfach, wenn man ein Geländemodell mit Höheninformationen besitzt. Den Linien wird der Mittelwert der Höhen pro Zelle als Höhenwert zugewiesen. Mit einem weiteren „*Dissolve*“ und „*Statistic Field = Range Z_Mean*“, also der Höhenunterschied von Linien mit gleicher ID, kann die Höhe berechnet werden. Mit „*Select*“ können anschließend jene Kanten ausgewählt werden, die einen Höhenunterschied von mehr als 1,75 Metern und weniger als 9,25 Metern aufweisen. Es wurde eine Toleranz von 0,75 Metern gesetzt, da es durch die gewählte Methode nicht möglich ist, dass die Kanten durch das Ausdünnen exakt an den niedrigsten bzw. höchsten Punkten liegen und generell nur der Durchschnitt berechnet wird. Da aber ein Spielraum von insgesamt sieben Meter vorhanden ist (aus den Parametern in Kapitel 4.6), ist diese Methode mehr als ausreichend.

Die Mindesthöhe von 2,5 Metern wurde deshalb gesetzt, weil es visuell erkennbar ist, dass viele Dämme nicht ganz an die Höhe von 3 Metern, die damals die Vorgabe der Topographen war, herankommen. Die Topographen waren aber auch angehalten, dass dort, wo in der Karte ausreichend Platz ist und Geländekleinformen für die Orientierung wichtig sind, die Formen

auch unter drei Meter in die Karte einzuzeichnen sind. Das kommt vor allem in flachem Gelände entlang von zum Beispiel Feldern vor. Da es für eine automatisierte Detektion nicht möglich ist, jeden Fall individuell zu betrachten, wurde die Mindesthöhe im flachen Gebiet auf 2,5 Meter runtergesetzt. Für Gebiete ohne ausreichend flacher Nachbarzellen wurde ein Mindesthöhenunterschied von 4 Metern gewählt, da Formen dieser Art in diesen Regionen öfter vorkommen können und teilweise, wie in den Profilen in Kapitel 4.8 ersichtlich, nicht deutlich ausgeprägt sind. Auch hier wird eine Toleranz von 0,75 Meter gewählt, also zwischen 3,25 und 9,25 Meter. Um diese Gebiete voneinander zu unterscheiden, wird zuerst ein Polygon aus den Flächen der nicht-flachen Nachbarzellen erstellt. Danach wird ein neues Feld angelegt, das „nichtflach“ heißt und den Wert 1 für jedes Polygon aufweist. Mit einer räumlichen Verbindung („*Spatial Join*“) werden die Werte 1 jenen Linien zugeordnet, die sich in nicht-flachen Gebieten befinden. Dadurch entsteht die Situation, dass in ArcGIS alle Linien, die in flachen Gebieten vorkommen, in dieser Spalte keinen Wert aufweisen. Da dies im späteren Verlauf zu Problemen führen kann, werden mit dem „*Field Calculator*“ alle Werte mit „Null“ mit einem if-Statement zu der Zahl 0 geändert.

Danach können zwei „*Select*“ durchgeführt werden. Bei den flachen Kanten muss das Attribut „nichtflach“ 0 sein sowie die Höhendifferenz zwischen 1,75 und 9,25 liegen. Bei den nicht-flachen Kanten muss das Attribut „nichtflach“ 1 sein sowie die Höhendifferenz zwischen 3,25 und 9,25 Meter liegen.

4.12.4 Durchschnittliche Neigung der direkten Umgebung

Nun folgt die letzte Regel. Nach Betrachtung der zwischenzeitlichen Ergebnisse ist erkennbar, dass weiterhin kleine Strukturen vor allem in Bergregionen als Böschung klassifiziert werden, die jedoch nicht den Kriterien dieser entsprechen, also eine deutlich ausgeprägte Ober- und Unterkante und dadurch eine flache angrenzende Fläche aufweisen. Das kann vorkommen, da sich die Neigung in Bergregionen oft ändert und dadurch eine entsprechende Krümmung aufweist, jedoch nicht als klassische Böschung, Graben oder Damm bezeichnet werden kann. Die Methode der Krümmung stößt hierbei auf ihre Grenzen, weshalb ein weiterer Parameter festgelegt wurde, um dem entgegenzuwirken: die durchschnittliche Neigung der direkten Umgebung. Ist diese höher als 10 Grad, werden die Böschungen gelöscht, es sei denn der Unterschied der durchschnittlichen Neigung der angrenzenden Flächen ist im Vergleich zur

durchschnittlichen Neigung der detektierten Form höher als 20 Grad. Das betrifft vor allem starke Grabeneinschnitte durch Tiefenerosion in Bergregionen, welche eine markante Form darstellen. Umgesetzt wird die Regeln, indem zuerst die Ober- und Unterkanten, die am Beginn der Kantenextraktion einzeln zur Verfügung standen, mit einem „*Spatial Join*“ der übrig gebliebenen „aktualisiert“ werden, wodurch nur noch Ober- und Unterkanten bleiben, die die Höhenberechnung bestanden haben und auch gleich die neue ID weitergegeben wird. Die Berechnung findet für Ober- und Unterkanten getrennt statt, da es sein könnte, dass eine Böschung eine ausgeprägte Unterkante hat, jedoch keine ausreichend starke Oberkante und umgekehrt. Beide Kanten müssen sich deutlich von der Umgebung abgrenzen. Es wird wieder ein „*Buffer*“ (5 Meter) um die Kanten gelegt, „*Dissolved*“, also nach ID zusammengefügt und anschließend werden die Flächen vom Polygon abgezogen, damit nur noch die Flächen oberhalb und unterhalb der Polygone übrigbleiben. Mit „*Zonal Statistics*“ werden die durchschnittlichen Neigungen („*Slope*“ als Eingabe-Raster) von den Polygonen und den beiden Buffern berechnet. Mit „*Alter Field*“ können die Spalten umbenannt werden, da alle drei durchschnittlichen Neigungen in ArcGIS „MEAN“ genannt werden und das beim anschließenden „*Join Field*“, wo die durchschnittlichen Neigungen der Buffer mit den Böschungen verknüpft werden, für Probleme sorgen würde. Die Spalten werden „Average_Slope_Polygone“, „Average_Slope_OK“ und „Average_Slope_UK“ benannt. Danach werden zwei neue Felder angelegt und berechnet: Der Unterschied der Oberkanten-Neigung zur Neigung der Polygone sowie der Unterschied der Unterkanten-Neigung zur Neigung der Polygone (2x „*Add Field*“ und 2x „*Calculate Field*“). Einfache „*Select*“-Abfragen können nun die Regeln untersuchen. Beide angrenzenden Flächen müssen unter 10° liegen, ist dies nicht der Fall, so wird noch überprüft, ob der Unterschied bei beiden Neigungen im Vergleich zum Polygon mehr als 15° beträgt.

4.12.5 Mittellinien-Berechnung und Entfernen der Siedlungsbereiche

Erwähnt sei im Zusammenhang mit der Kantendetektion sowie Vektorbearbeitung auch noch eine weitere Methode, die getestet wurde. Hierbei handelt es sich um eine Berechnung der Mittellinie der Polygone. Die Mittellinie schneidet dann anschließend das Polygon in zwei Teile, wodurch ebenfalls Ober- und Unterkanten detektiert werden können und im weiteren Verlauf die Höhe berechnet wird. Die Mittellinie wurde dabei in ArcGIS mit dem Werkzeug „*Centerline to Polygon*“ erzeugt, der weitere Vorgang wurde mit FME umgesetzt (siehe

Anhang). Diese Methode wurde auch vom deutschen Bundesland Niedersachsen erprobt. Im Vergleich zur Methode der Ausdünnung der Krümmung weist diese Methode allerdings einige Schwächen auf:

- Die Krümmung wird nicht miteinbezogen. Des Öfteren weisen Böschungspixel nur eine Ober-, aber keine Unterkante auf oder umgekehrt. Da diese Methode lediglich die detektierten Pixel untersucht, kann man nicht zu 100 % davon ausgehen, dass dort auch wirklich Kanten vorkommen.
- Die Mittellinie kann nicht immer ideal berechnet werden, da manche Böschungen eigenwillige Formen annehmen und in verschiedene Richtungen abzweigen, wodurch des Öfteren nicht zwei, sondern drei oder mehr Teile entstehen.

Die Mittellinie wurde jedoch am Ende des Algorithmus noch verwendet, um etwaige große Längenunterschiede der Kanten im Vergleich zur detektierten Böschung ausfindig zu machen, die nicht bereits durch den Längenvergleich aus Kapitel 4.12.3 erkannt wurden. Einige Polygone weisen statt der typischen länglichen Form runde, dickere Formen auf, wodurch die Längen dieser nicht ideal als Parameter für einen genauen Längenvergleich hergenommen werden können. Die Mittellinie soll dabei helfen. Die Kanten müssen zumindest 50 % der Länge der Mittellinie aufweisen, um als Böschung klassifiziert zu werden und über 50 Meter lang sein. Zudem sollen Böschungen, deren Kanten länger als die Mittellinie sind, in der späteren Nachbearbeitung untersucht werden. Bei diesen Fällen kann es vorkommen, dass aufgrund von Unebenheiten in der Böschung mehrere Kanten detektiert werden, was zu Ungenauigkeiten in der Höhenberechnung führen kann. Abschließend werden noch Böschungen, die im direkten Wohngebiet oder direkt in der Umgebung von Häusern vorkommen, gelöscht. Diese haben auf der einen Seite in der Karte keinen Platz, auf der anderen Seite können Aufschüttungen von Erde fälschlicherweise als Böschungen bezeichnet werden. Die Häuser werden aus dem DLM extrahiert und die Böschungen mit „Erase“ ausgeschnitten.

Mit diesen Schritten endet die Detektion der Geländekleinformen Böschung, Damm und Graben. Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen die Ergebnisse interpretiert werden, im Ausblick (Kapitel 6) soll angeführt werden, wie die Daten weiterverarbeitet werden. Abbildung 54 auf der nächsten Seite zeigt den Ablauf der Vektorbearbeitung zusammengefasst.

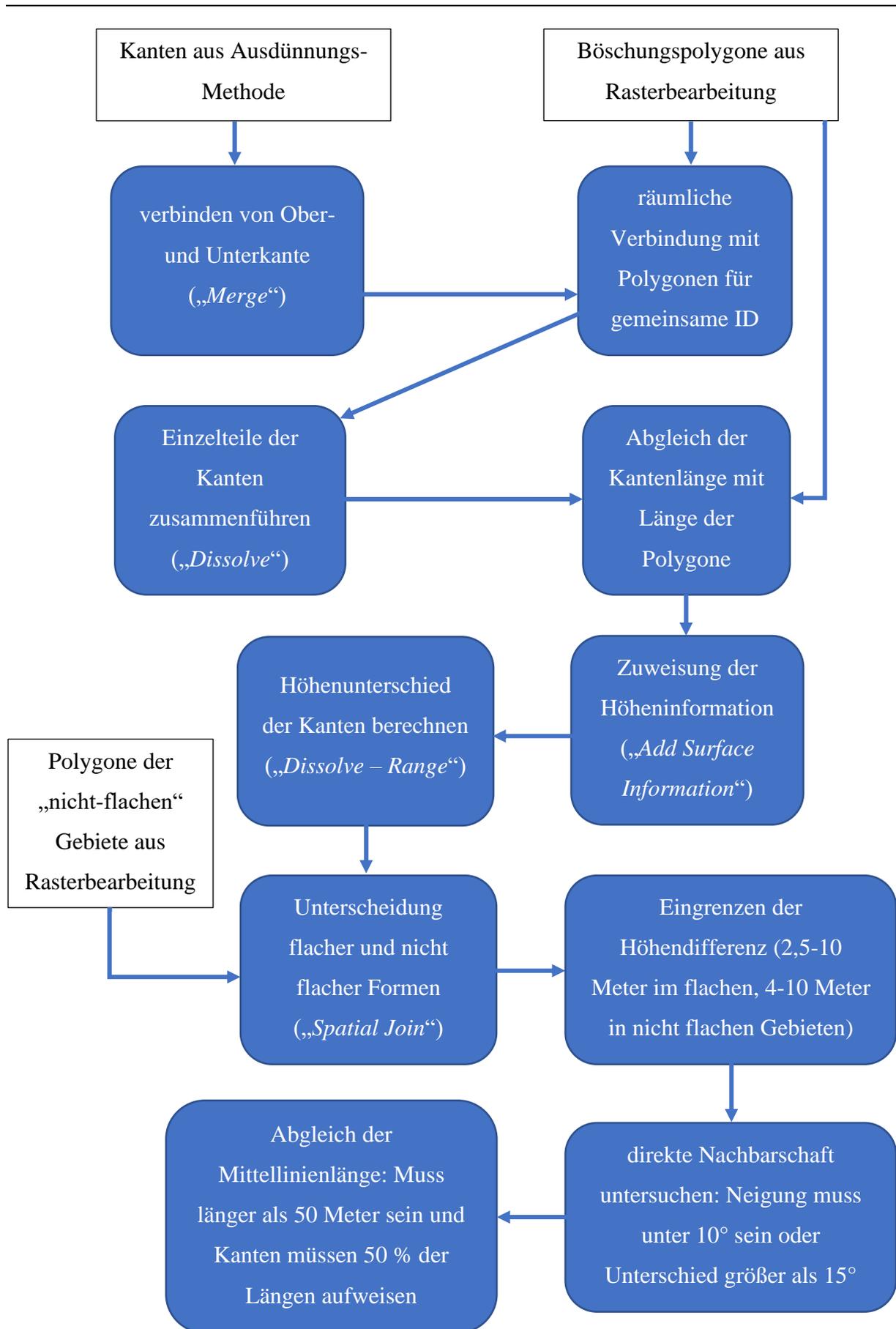


Abbildung 54, Ablauf der Vektorbearbeitung. Quelle: eigene Darstellung

4.13 Interpretation der Detektion

Um die vorgestellten Schritte in automatisierter Form für ganz Österreich umzusetzen, wurde mit dem Model-Builder in ArcGIS eine Prozesskette erstellt. Das Model kann im Anhang betrachtet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem in flachen Gebieten die Geländekleinformen besonders gut detektiert werden können, sofern sie nicht untereinander vermischt werden. Probleme entstehen vor allem in Bergregionen, wenn Böschungen aufgrund von Unebenheiten mehrere Kanten aufweisen und dadurch die Höhenberechnung nicht mehr genau ist. Eine manuelle Nachbearbeitung ist daher auf alle Fälle notwendig, vor allem dort, wo die Kantenlänge besonders hoch im Vergleich zur Mittellinie ist, eine hohe Anzahl an Kanten pro Fläche generell vorkommt oder die Fläche der Geländekleinformen sehr hoch ist, was auf Vermischungen vieler kleiner Fälle hindeutet. Insgesamt wurden mit der vorgestellten Methode 883 Flächen im 100 km² großen Untersuchungsgebiet gefunden, die den Anforderungen entsprechen, wobei angemerkt werden soll, dass in diesem Gebiet das Siedlungsgebiet aus dem DLM noch nicht fertig ist und daher der letzte Schritt noch nicht durchgeführt werden konnte. Einige Böschungen entstehen bei hügeligeren Siedlungen, welche dann durch den letzten Schritt entfernt werden. Die Zahl würde sich demnach noch verringern. Es sei zudem erwähnt, dass Dämme und Gräben aus jeweils zwei einzelnen Böschungen bestehen, diese aber jeweils einzeln als Fläche detektiert werden. Allgemein können die Flächen als Verdachtsfälle bezeichnet werden, besonders dann, wenn mehr als eine Kante vorkommt. Eine endgültige Aufnahme in die Kartenwerke sowie in das digitale Landschaftsmodell können erst nach einer intensiven manuellen Nachbearbeitung von erfahrenen Endanwendern erfolgen. Im nachfolgenden sollen einige Beispiele vorgestellt werden, wo die Detektion gut funktioniert hat und wo sie an ihre Grenzen kommt und deshalb nachbearbeitet werden muss.

Das erste Beispiel zeigt einen Damm (Abbildung 55), der sehr gut detektiert werden konnte. Das zweite Beispiel (Abbildung 56) zeigt eine Böschung, deren Krümmung bereits in Kapitel 4.10.1 gezeigt wurde. Dem Autor ist diese Böschung bekannt, da sich diese im Heimatort (Asten) des Autors befindet und definitiv als klassische Böschung bezeichnet werden kann. Ober- und Unterkanten sind deutlich ausgeprägt, die Höhe beträgt im Durchschnitt rund 4,5 Meter. Abbildung 55 und 56 zeigt die Darstellung des Dammes und der Böschung in der ÖK 50 sowie als Polygon durch die vorgestellte automatisierte Methode:

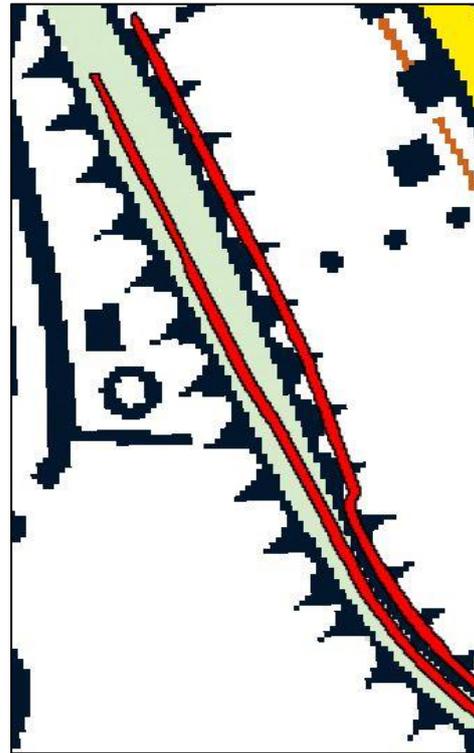
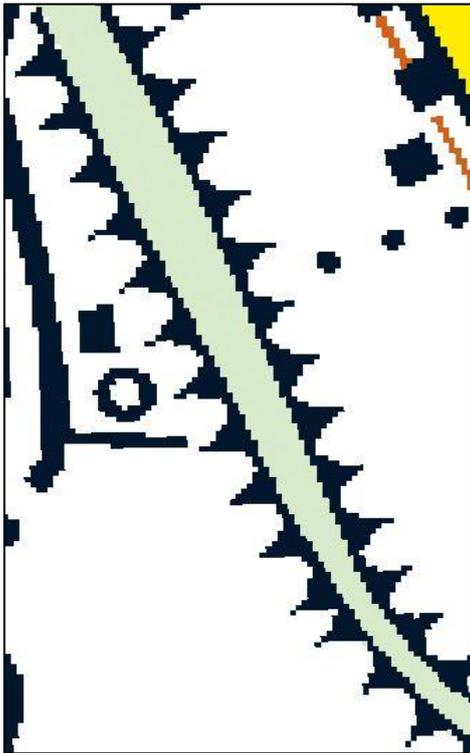


Abbildung 55, Damm im Untersuchungsgebiet. Links: Keilschraffen in der ÖK50. Rechts: automatisierte Detektion. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung.

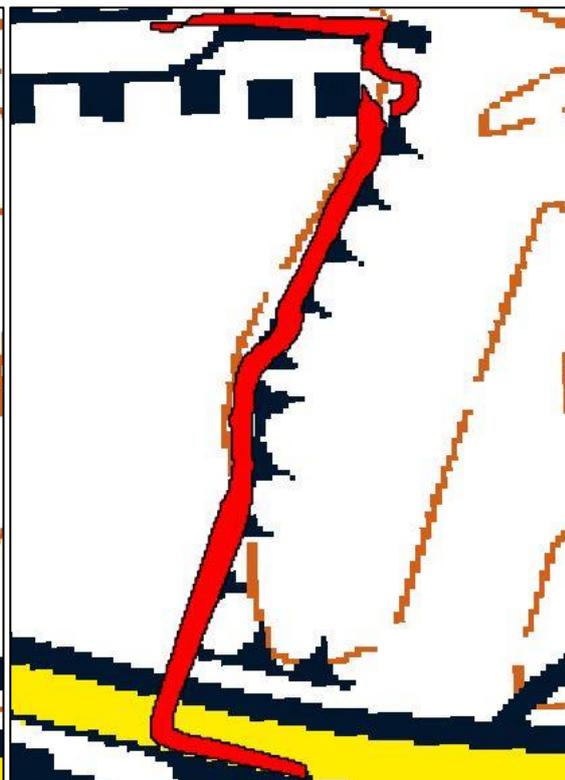
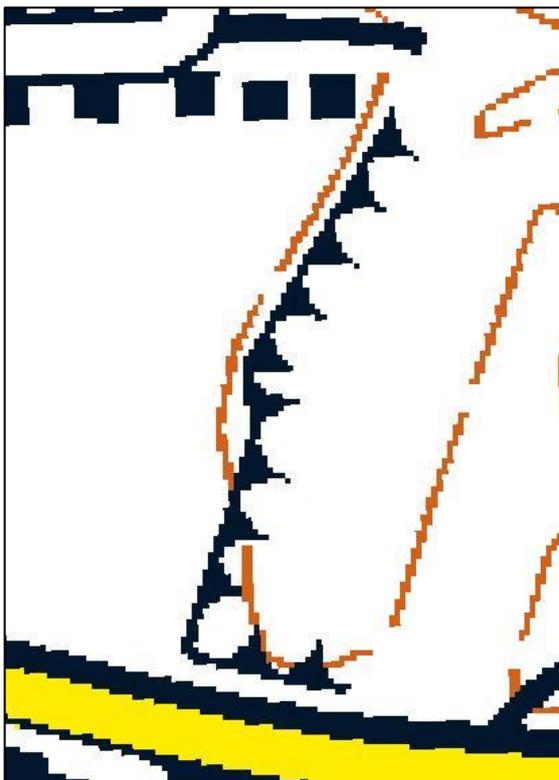


Abbildung 56, Böschung im Untersuchungsgebiet. Links: Keilschraffe in der ÖK50. Rechts: automatisierte Detektion. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung.

Beispiele wie diese sind in einer Vielzahl vorhanden. Andererseits gibt es auch Orte, an denen in der ÖK 50 Formen eingezeichnet wurden, die aber rein vom Gelände den Anforderungen her nicht entsprechen. Dies hat damit zu tun, dass Topographen früher, wie bereits in Kapitel 4.6 beschrieben, einen gewissen Spielraum bei der Kartierung hatten. Dort, wo Platz in der Karte vorhanden war, wurden Formen auch eingezeichnet, die deutlich unter drei Meter Durchschnittshöhe waren. Abbildung 57 zeigt einen Damm, der in der ÖK 50 eingezeichnet ist, sowie das Geländeprofil dazu, das deutlich zeugt, dass der Damm nur eine Höhe von etwas mehr als zwei Meter erreicht und dadurch nicht detektiert wird:

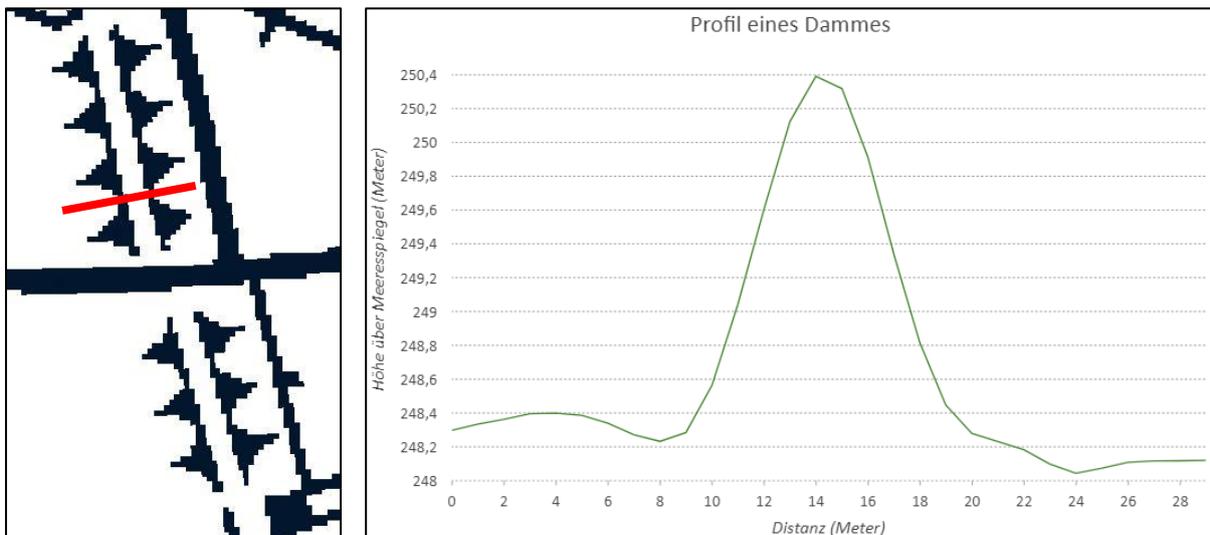


Abbildung 57, Damm im Untersuchungsgebiet, der die Höhenanforderung nicht erfüllt. Links: Damm in der ÖK50 dennoch eingezeichnet, Rechts: Profil des Damms. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung.

Auf der anderen Seite gibt es aber auch eine große Anzahl an Beispielen, wo die Regeln erfüllt werden, die Formen jedoch nicht in der ÖK50 eingezeichnet wurden. Abbildung 58 zeigt ein derartiges Beispiel:

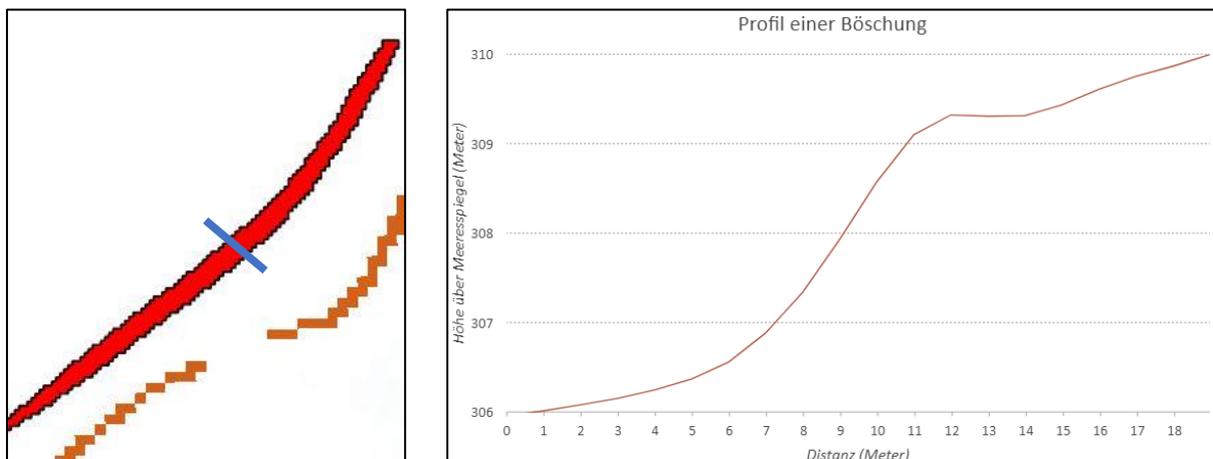


Abbildung 58, Böschung im Untersuchungsgebiet, die alle Anforderungen erfüllt, jedoch nicht in der ÖK50 eingezeichnet ist. Links: automatisierte Detektion der Böschung. Rechts: Profil der Böschung. Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und eigene Darstellung.

Im Untersuchungsgebiet kommen einige dieser Beispiele vor. Es zeigt sich, dass früher die Topographen im Feld intuitiver und individueller auf die Geländekleinformen eingegangen sind. Dort, wo es zur Orientierung notwendig ist oder auch dort, wo schlichtweg noch Platz in der Karte herrschte, wurden auch Formen unter drei Meter aufgenommen. Interessant ist jedoch, dass es auch eine große Anzahl an Böschungen gibt, die die Anforderungen erfüllen und wo auch genügend Platz in der Karte vorhanden wäre. Die Böschung aus Abbildung 58 ist rund 150 Meter lang und der Höhenunterschied der deutlich ausgeprägten Kanten beträgt mehr als drei Meter. Eine automatisierte Detektion kann nicht individuell auf sämtliche Fälle eingehen, sondern betrachtet zuerst die Oberfläche je nach Regeln gleich und danach können vereinzelt manuelle Nachbearbeitungen erfolgen (mehr dazu in Kapitel 6 Ausblick).

Die Geländedetektion von Geländekleinformen sorgt dort für Probleme, wo sich mehrere Böschungen zu einer großen Fläche vermischen oder wo viele Unebenheiten die Grenzwerte der Krümmung erreichen und dadurch mehrere Kanten im Polygon zu falschen Höhenberechnungen führen. Bei der Höhenberechnung wird der Durchschnitt aller Ober- und Unterkanten ermittelt. Abbildung 59 zeigt ein Beispiel, bei dem viele Kanten die Höhenberechnung verfälschen.

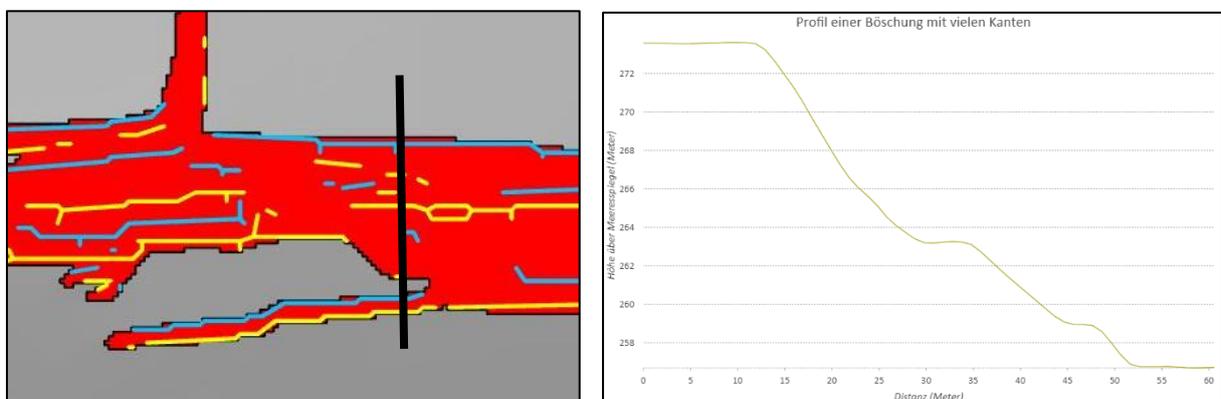


Abbildung 59, Problemfall einer Böschungssituation mit vielen Unebenheiten und nicht nur einer Ober- und Unterkante. Links: automatisierte Detektion der Böschung. Türkis: Oberkanten, Gelb: Unterkanten, Schwarz: Profillinie. Rechts: Profil. Quelle: eigene Darstellung

Der Algorithmus berechnet eine Durchschnittshöhe von rund sechs Metern, aus dem Geländemodell geht aber ein Höhenunterschied von rund 14 Metern hervor. Bei der nachträglichen manuellen Nachbearbeitung würde ein solcher Fall gelöscht werden, weil Böschungen maximal zehn Meter hoch sein dürfen. Hinweise darauf, warum eine händische Nachbearbeitung überhaupt notwendig ist, gibt die Kantenzahl.

Abbildung 60 zeigt eine Situation, in der insgesamt drei Böschungen zu einem Polygon verschmelzen. Die Auflösung beträgt bekanntlich 1x1 Meter, wodurch bei niedrigeren Abständen in der Natur die automatisierte Detektion mit einem Geländemodell an ihre Grenzen stößt. Auch hier ist eine manuelle Nachbearbeitung notwendig. Die dargestellte große Form soll in drei einzelne Böschungen aufgeteilt werden:

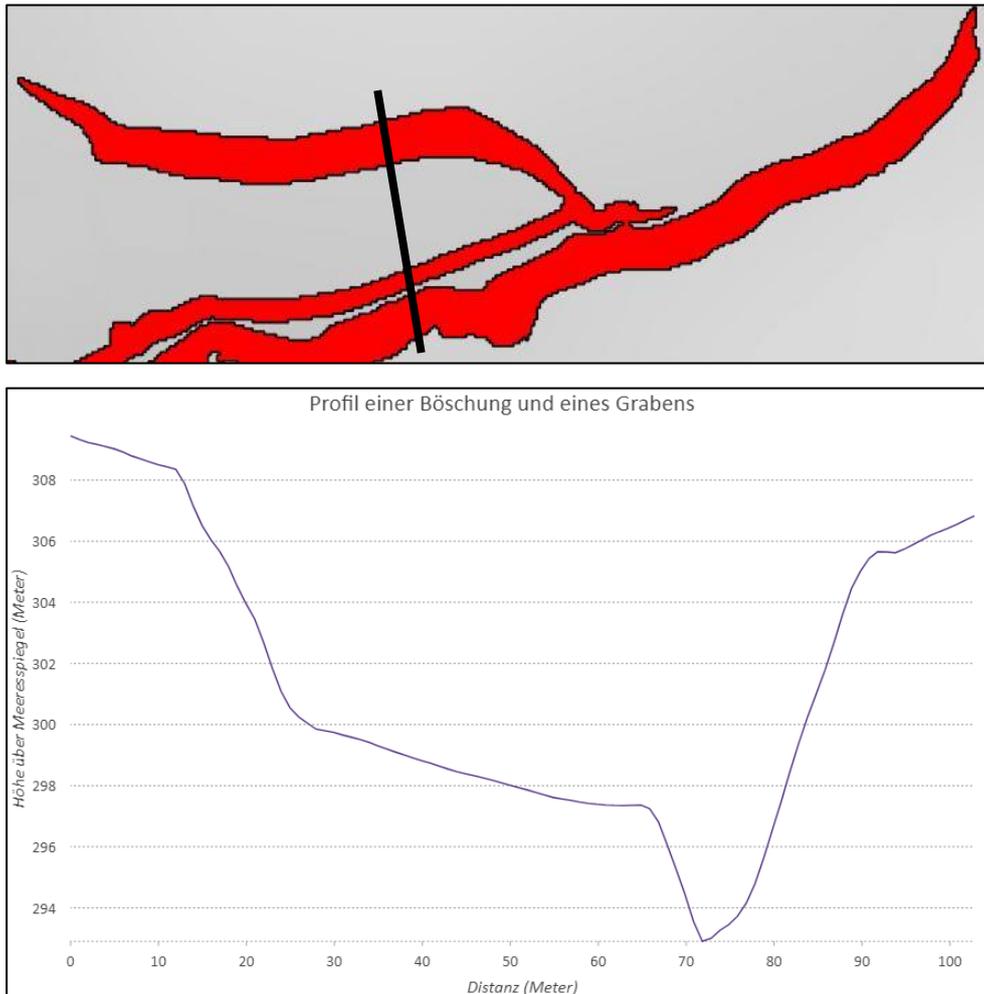


Abbildung 60, Problemfall einer Böschungssituation mit Vermischungen mehrerer Fälle. Oben: automatisierte Detektion der Böschungen. Schwarz: Profilinie; Unten: Profil. Quelle: eigene Darstellung

Nichtsdestotrotz sei gesagt, dass die meisten detektierten Geländekleinformen keine dieser Probleme aufweisen. Sofern Ober- und Unterkanten nicht in einer Vielzahl vorkommen, ist die Methode der Höhenberechnung durchaus genau beziehungsweise werden gewisse Abweichungen bei einer Spannweite von 7,5 Metern toleriert. Es zeigt sich jedoch, dass eine automatisierte Detektion der Geländekleinformen Böschung, Damm und Graben nicht gänzlich ohne manuelle Nachbearbeitung auskommt. Allgemein lässt sich sagen, dass die

detektierten Fälle bei mehreren Kanten oder auch bei großen Flächen lediglich als Verdachtsfälle und Hilfestellung dienen, die genaue Erfassung erfolgt anschließend individuell durch den Endanwender, weshalb diese Art der Detektion eher als halbautomatisch angesehen werden muss. In Kapitel 4.2 wurde ein Vergleich mit einigen Bundesländern in Deutschland sowie der Schweiz gegeben und auch hier zeigten sich ähnliche Problemstellungen. Einige Länder versuchen sich gerade an einer automatisierten Detektion, andere detektieren die Böschungen manuell, die Schweiz findet sogar, dass Geländekleinformen ein kartographisches Element darstellen und nicht in einem digitalen Landschaftsmodell geführt werden sollen.

Eine exakte Abschätzung, wie gut die Detektion im Vergleich zu einer vollständig manuellen Bildinterpretation bzw. traditioneller Erfassung funktioniert, lässt sich schwer sagen. Nach visueller Abgleichung der Ergebnisse und der ÖK50 lässt sich erkennen, dass der Algorithmus insgesamt deutlich mehr Formen erkennt als die Topographen früher eingezeichnet haben, vor allem in Bergregionen. Einige Kleinformen, die in der ÖK50 enthalten sind, werden jedoch nicht angezeigt, weil sie den benötigten Höhenunterschied nicht erreichen oder die Werte der Krümmung zu niedrig sind. Fälle wie diese müssen nachträglich inspiziert und wenn notwendig manuell eingetragen werden. Insgesamt kann man aber von einer ungefähren Erfolgsquote von rund 90 % ausgehen. Man sollte zudem die Tatsache berücksichtigen, dass neue Formen entdeckt wurden und somit der Detailgrad der Geländekleinformen in den österreichischen Karten in Zukunft erweitert werden kann.

5 Zusammenfassung

Der vorgestellte Weg einer automatisierten Detektion von den Geländekleinformen Böschung, Damm und Graben für das DLM Österreich sowie die in Zukunft automatisiert abgeleiteten Karten soll nun kompakt zusammengefasst werden. Dazu werden die in der Einleitung gestellten Forschungsfragen beantwortet. Im Zuge dieser Ausarbeitungen sollen Schlussfolgerungen gezogen sowie Probleme aufgezeigt werden, die durch diese automatisierte Detektion entstehen. Allgemein lässt sich anhand dieser Forschungsarbeit bestätigen, dass die Geoinformationen und die Fernerkundung, in früheren Jahren noch zwei weitestgehend getrennte Bereiche, immer mehr ineinander wachsen. Dieser Prozess wird durch die verstärkten Möglichkeiten der Fernerkundung in einem Desktop-GIS wie ArcGIS zusätzlich beschleunigt. (vgl. Blaschke 2000: 161)

In dieser Forschungsarbeit wurde ein interaktiver Ansatz der Geländeanalyse verwendet. Aus der Basis Airborne Laserscanning wurde ein digitales Geländemodell abgeleitet, das als Ausgangsdatensatz für verschiedene Methoden fungiert. Die gesuchten Formen müssen dabei – wie bei einem Entscheidungsbaum – den Kriterien, die vom Anwender vorgegeben werden, entsprechen. Jeder Pixel wird nur dann als Böschung, Damm oder Graben definiert, wenn er alle Kriterien erfüllt.

5.1 Fragestellungen

Die Fragestellungen dieser Forschungsarbeit wurden in der Einleitung (Kapitel 1) auf Seite 4 erläutert. Sie setzen sich aus einer Hauptfragestellung sowie mehreren Arbeitsfragen auseinander. Die **Hauptfragestellung** lautete:

Lässt sich eine automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben mit den aktuellen Airborne Laserscanning Daten entsprechend den DLM-Qualitätsanforderungen umsetzen?

Diese Frage lässt sich nicht zu 100 % objektiv mit einem „Ja“ beantworten, geht aber definitiv in diese Richtung. Kapitel 4.13 zeigt positive als auch negative Ergebnisse auf. Es konnten mehrere Erkenntnisse in Bezug auf die automatisierte Detektion von Geländeformen gezogen werden:

- In flachen Gebieten, wie zum Beispiel entlang von Feldern oder in Siedlungsgebieten, sind die gesuchten Kleinformen sehr gut detektierbar und stimmen auch in den meisten Fällen mit denen der analogen österreichischen Karten überein bzw. wurden sogar neue Formen gefunden, die den Kriterien entsprechen (Kapitel 4.13 Interpretation der Detektion). Auch entlang von Bächen und Straßen, wo oft Gräben bzw. Dämme vorkommen, sind diese gut vom restlichen Terrain abzugrenzen und können ausreichend detektiert werden.
- Der Vorteil einer automatisierten Detektion im Vergleich zur manuellen Digitalisierung liegt in der massiven Zeitersparnis. Die manuelle Digitalisierung, vor allem wenn es um die Detektion von Geländekleinformen geht, ist nicht in einer ähnlichen Zeit durchführbar. Zudem können auch Fehler vom Bearbeiter entstehen. (vgl. Meyer 2015: 2) Das Bundesland Schleswig-Holstein in Deutschland arbeitet mittlerweile seit fünf Jahren an einer manuellen photogrammetrischen Auswertung dieser Formen (vgl. Carstensen 2020).
- Vor allem dort, wo mehrere Kanten aufgrund von Unebenheiten vorkommen und dort, wo sich Böschungen aufgrund des geringen Abstandes vermischen, entstehen Probleme bei der Detektion. Eine Vielzahl an Kanten bedeuten eine Verfälschung der Höhenberechnung, die aus den durchschnittlichen Höhen aller Ober- und Unterkanten berechnet wird. Auch bei Vermischungen kommen folglich mehrere Kanten vor, wodurch auch die Höhenberechnung ungenau wird und allgemein die Fälle aufgesplittet gehören. Eine andere Methode der Höhenberechnung wäre eine Differenzberechnung des niedrigsten und des höchsten Punktes, was zwar in flachen Gebieten funktioniert, allerdings kann das Problem entstehen, dass eine Böschung zum Beispiel entlang einer Straße verläuft, die stetig in der Höhe ansteigt. Dadurch entsteht eine große Differenz des niedrigsten und höchsten Punktes, obwohl die Böschung einen relativen Höhenunterschied von nur z.B. fünf Meter besitzt, wodurch diese Methode relativ früh in der Forschungsarbeit verworfen wurde. Die Profile in Kapitel 4.8 sowie die Ergebnisse in Kapitel 4.13 zeigen derartige Problemfälle, die in

jedem Fall eine manuelle Nachbearbeitung benötigen. Die richtigen Höhen der Formen können durch Abgleich des Geländemodells an der höchsten und niedrigsten Stelle der Geländekleinform ermittelt werden.

- Neben einer exakten Höhenberechnung ist eine weitere Problematik, die sich durch die gesamte Arbeit zieht, die Subjektivität. Während eine gewisse Subjektivität bei Geländekleinformen auch schon bei Topographen gang und gäbe war – Heriszt meinte dazu, dass die Unterscheidung der verschiedenen Geländekleinformen „nicht immer einfach“ ist und in der Natur „der Übergang von einigermaßen scharfen zu stumpfen, abgerundeten Kronenkanten vielfach fließend und nicht immer eindeutig festzulegen ist“ (Heriszt 2001: 436) – spielt in dieser Arbeit vor allem die Grenzwert-Setzung (Thresholding) eine zentrale Rolle. Es ist nicht immer einfach, geeignete Grenzwerte zu finden und oftmals muss man sich nach langen Testphasen mit einigen Kompromissen zufriedengeben, da nicht alle gesetzten Werte die Bedürfnisse erfüllen können. Allerdings können die gesetzten Grenzwerte auch jederzeit überarbeitet werden. Dieses „Spielen mit den Werten“ zieht sich durch die gesamte praktische Herangehensweise und ist deshalb besonders wichtig. Grenzwert-Setzungen wurden so gesetzt, dass Geländekleinformen, die dem Autor aus der Natur bekannt waren, definitiv detektiert werden und somit auch all jene Formen, die diesen ähneln, miteinbezogen werden.

Zusammengefasst: Eine automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben ist mit der durchgeführten Methode zum Großteil möglich. Vor allem in flachen Gebieten – entlang von Feldern, Hauptstraßen oder Flüssen – funktioniert die Methode sehr gut. Nachbearbeitungen sind vor allem dort notwendig, wo sich die Kleinformen aufgrund geringer Abstände vermischen oder wo aufgrund von starken Unebenheiten in der Form viele Ober- und Unterkanten eine exakte Höhenberechnung erschweren.

Nun sollen die **Arbeitsfragen** beantwortet werden beziehungsweise darauf hingewiesen werden, in welchem Kapitel diese beantwortet wurden:

Wie werden Airborne Laserscanning Daten generiert? Wo und wie werden sie verwendet?

Die Beantwortung dieser Frage wurde durch eine Literaturrecherche bewältigt und ist im gesamten Kapitel 2 zu finden. Kurz gesagt erfassen Airborne und terrestrische Laserscanner die Geometrie sowie teilweise die Textur der sichtbaren Erdoberfläche. Diese Systeme arbeiten kontaktlos durch Laserstrahlen und erstellen quantitative 3D-Punktwolken von einer bestimmten Oberfläche mit einer geringen Messunsicherheit. (vgl. Beraldin et al. 2010: 1) Die Anwendungsgebiete können in Kapitel 2.4 betrachtet werden.

Was sind die konkreten Anforderungen seitens DLM hinsichtlich der Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben?

Die Parameter für die Detektion wurden in Kapitel 4.6 aufgelistet. Diese wurden zum einen aus den Vorgaben der Topographen abgeleitet, zum anderen wurden Gespräche mit den zuständigen Mitarbeitern des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen geführt. Einige Entscheidungen entstanden aus Eigeninitiative im Sinne einer bestmöglichen Detektion.

Welche Methoden der automatisierten Detektion existieren und wie unterscheiden sich diese? Welche davon kann in Bezug auf die automatisierte Detektion von Böschungen, Dämmen und Gräben als effizienteste bezeichnet werden?

Die Methoden zur automatisierten Detektion wurden in Kapitel 3 durch eine Literaturrecherche sowie durch Vergleichen bestehender Forschungsarbeiten beschrieben. Es gibt keine einzelne Art der Detektion, die die Anforderungen allein erfüllen kann. Die Detektion wurde durch Verbindung von Visualisierung, Kantendetektion sowie Bildanalyse durchgeführt und kann allgemein als digitale Geländeanalyse bezeichnet werden. Sämtliche Methoden waren für den Erfolg der Detektion wichtig. Eine automatisierte Detektion durch Machine Learning wurde im Anfangsstadium verworfen, da diese Methode zum einen in diesem Bereich noch zu wenig erforscht ist, zum anderen spezifische Software wie eCognition aufgrund von Lizenzgründen nicht verfügbar war.

6 Ausblick

Abschließend soll ein Ausblick für die digitalen Geländekleinformen Böschung, Damm und Graben in Österreich gegeben werden. Da es sich bei dieser Arbeit „nur“ um den ersten Schritt handelt, nämlich einer Detektion der gesuchten Formen unter Berücksichtigung einiger Parameter, sind noch weitere Bearbeitungen zu erledigen, bevor die Kleinformen zum einen ins DLM und zum anderen in die kartographischen Werke einfließen können. Da für diese Forschungsarbeit ein Untersuchungsgebiet getestet wurde, wird dieser Algorithmus nun Schritt für Schritt für ganz Österreich ausgeweitet. Wie bereits mehrmals in dieser Arbeit erwähnt, lässt sich eine manuelle Nachbearbeitung beziehungsweise Kontrolle nicht ganz vermeiden. Im Zuge dieser Nachbearbeitung werden die Fälle auch generalisiert, um den Anforderungen der Kartenwerke zu entsprechen.

6.1 Keilschraffen-Erzeugung und manuelle Nachbearbeitung

Nach der erfolgreichen Detektion sollen die Ober- und Unterkanten der Polygone anschließend ebenfalls automatisiert Keilschraffen erzeugen. Dieser Schritt steht momentan noch in der Entwicklung. Es gibt einige Ansätze, die im Folgenden kurz Erwähnung finden sollen.

Es wird wiederum die Krümmung der Polygone berechnet, aber dieses Mal mit einer Variante, die die Ober- und Unterkanten manipuliert und dadurch verstärkt wiedergibt. Dazu wird das Geländemodell zuerst geglättet („*Focal Statistics*“, 5x5 Moving Window) und anschließend wird mit dem Werkzeug „*Extract to Mask*“ ein neues Geländemodell erstellt, welches nur die Polygone beinhaltet. Danach wird die Krümmung dieses neuen DGMs berechnet, wodurch an den Rändern aufgrund der besonders hohen Veränderung deutlichere Werte auftreten. Die Polygone wurden bereits auf die wahren Krümmungswerte überprüft, wodurch dieser Schritt bloß als Hilfestellung funktioniert, um „schönere“ Kanten generieren zu können. Anschließend werden wieder die Methoden der Kantendetektion verwendet („*Reclassify*“), nun jedoch nicht mit dem Werkzeug „*Thin*“, sondern es werden zuerst aus den Flächen Polygone erstellt, dann mit „*Smooth*“ die Flächen der Ober- und Unterkante vereinfacht und daraus mit „*Centerline to Polygon*“ die Mittellinien berechnet. Nun stehen separate, generalisierte Ober- und Unterkanten Datensätze der Polygone zur Verfügung. Diese

werden nun als Input für das Tool „*Generate Hachures for Defined Slopes*“ verwendet, ein Tool, das für die Erstellung von Keilschraffen genutzt wird. Bevor die Keilschraffen jedoch erzeugt werden können, muss sichergestellt werden, dass pro Geländekleinform exakt eine Ober- und eine Unterkante vorkommen, ansonsten kann das Werkzeug die Formen nicht zusammenführen. Dieser Schritt kann als manuelle Nachbearbeitung angesehen werden. All jene Fälle, die mehr als eine Ober- oder Unterkante aufweisen, müssen bearbeitet werden. Das kann zum Beispiel dann entstehen, wenn kleine Unterbrechungen vorkommen, wenn mehrere Kanten generell vorkommen oder wenn das Werkzeug zur Erzeugung der Mittellinien kleine „Äste“ bei Abzweigungen verursacht.

Abbildung 61 veranschaulicht die Erzeugung von Keilschraffen anhand einer Böschung, eines Dammes und eines Grabens im Untersuchungsgebiet. Am Ende sollen alle detektierten Formen so aussehen, dies ist aber erst möglich, nachdem die Verdachtsfälle durch eine manuelle Nachbearbeitung verbessert wurden.

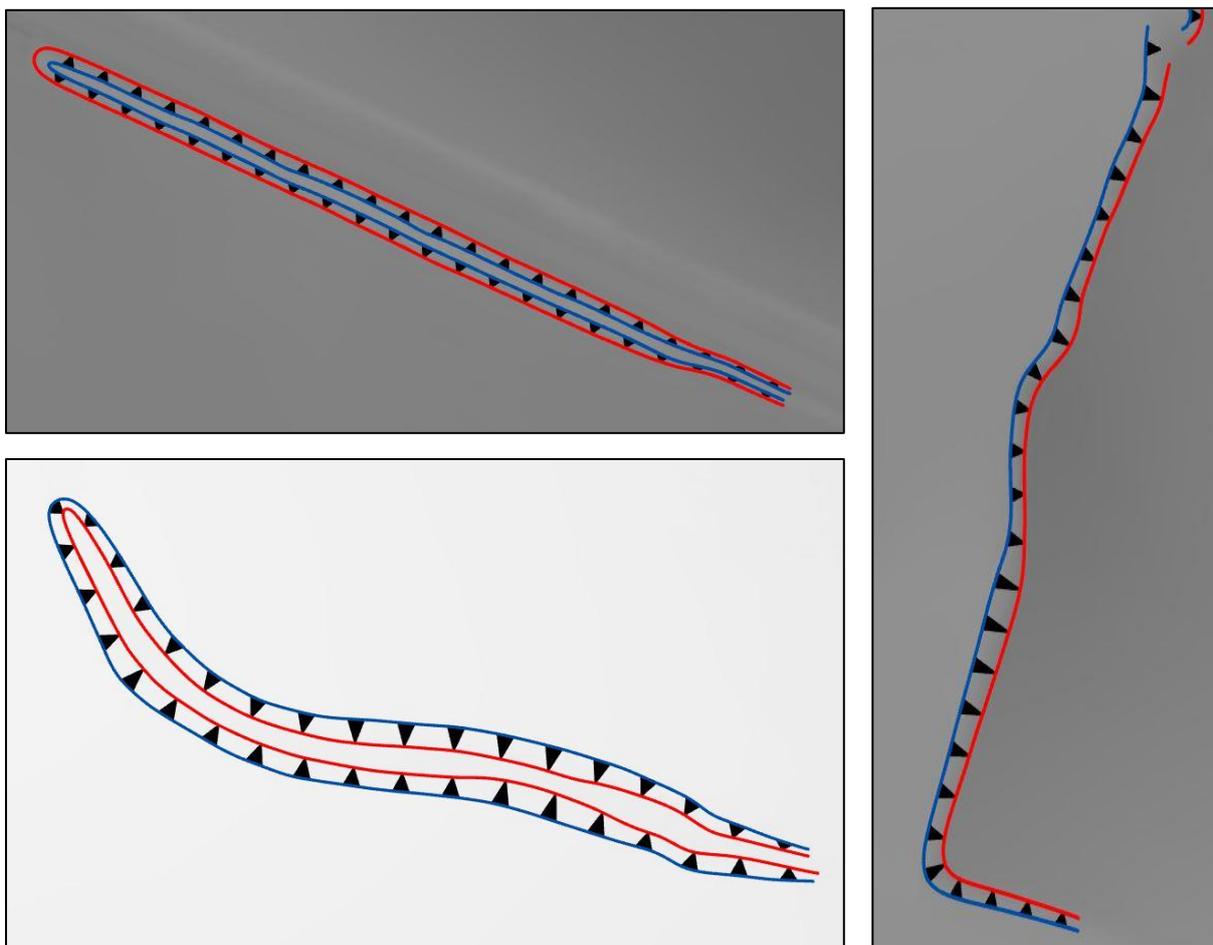


Abbildung 61, Keilschraffen-Erzeugung. Oben links: Damm. Unten links: Graben. Rechts: Böschung. Quelle: eigene Darstellung

Literatur

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (ADV) (2018): Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens. ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM. Deutschland.

BERALDIN J., BLAIS F., LOHR U. (2010): Laser Scanning Technology. – In: VOSSELMAN G., MAAS H. (2010): Airborne and Terrestrial Laser Scanning. – Whittles, Caithness, UK, 1-44.

BERNHARSDEN T. (2002): Geographic Information Systems: An Introduction. – John Wiley and Sons, New York.

BLASCKE T. (2000): Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer. – In: 5. Symposium „Computergestützte Raumplanung“ – CORP2000, 153-162.

BÖHNER J., SELIGE T., RINGELER A. (2006): Image segmentation using representativeness analysis and region growing. – In: BÖHNER J., STROBL J. (Hrsg.): SAGA – Analysis and Modelling Applications. Göttinger Geographische Abhandlungen Vol. 115, 29-38.

BRIESE C. (2004): Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data. – Dissertation, Technische Universität Wien, Wien.

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.

BRIESE C. (2010): Extraction of Digital Terrain Models. – In: VOSSELMAN G., MAAS H. (2010): Airborne and Terrestrial Laser Scanning. – Whittles, Caithness, UK, 135-168.

BRIESE C., MANDLBURGER G., RESSL C., BROCKMANN H. (2009): Automatic Break Line Determination for the generation of a DTM along the River Main. – In: ISPRS Workshop, Laserscanning 2009, Paris, 236-241.

BRÜGELMANN R. (2000): Automatic Breakline Detection from Airbrone Laser Range Data. –

In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 109-116.

BRUZZONE L., PRIETO D. (2000): Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. – In: *IEEE T Geosci Remote* 38 (3), S.1171-1182.

CARSTENSEN N. (2020): E-Mail-Verkehr zur Detektion von Böschungen in Schleswig-Holstein. Mitarbeiter des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein, 19.06.2020

CHAUBEY A. (2016): Comparison of The Local and Global Thresholding Methods in Image Segmentation. – In: *World Journal of Research and Review (WJRR)*, Volume-2, Issue-1, January, 1-4.

DRÄGUŢ L., BLASCHKE T. (2006): Automated classification of landform elements using object-based image analysis. – In: *Geomorphology* 81, Amsterdam, 330-344.

FELFERNIG G. (2020): E-Mail-Verkehr zur Detektion von Böschungen, Dämme und Gräben. Stv. Leiter der Abteilung Kartographie im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, 21.01.2020

GALLANT J., WILSON J. (2000): Primary Topographic Attributes. – In: WILSON J., GALLANT J. (Hrsg.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*, Chapter 2, Wiley, New York, 51-85.

GERTLOFF, K. (2011): Detektion von Bodendenkmälern im Wald mit einem hochauflösenden Geländemodell aus Laserscannerdaten. – In: *zfv Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 2/2011, 136, Augsburg, 86-92.

HARDING D. (2018): Pulsed Laser Altimeter Ranging Techniques and Implications. – In: SHAN J., TOTH C. (2018): *Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing*. – Boca Raton, USA, 201-220.

HERISZT W. (2001): *Kartenkunde. Truppendienst Taschenbuch*. – Wien.

HESSE R. (2016): Visualisierung hochauflösender Digitaler Geländemodelle mit LiVT. – In: LIEBERWIRTH U., HERZOG I. (Hrsg.). *3D-Anwendungen in der Archäologie*, 34, Berlin, 109-128.

HOFER N. (2019): Terrain Analysis and Visualization of Airborne Laser Scanning Data for Identifying and Mapping Archaeological Topography – Case Study Phnom Kulen, Cambodia. – Masterarbeit, Universität Wien, Wien.

HUTCHINSON M., GALLANT J. (2000): Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape. – In: WILSON J., GALLANT J. (Hrsg.): Terrain Analysis: Principles and Applications, Chapter 2, Wiley, New York, 29-50.

IMHOF E., STEWARD H. (2015): Cartographic Relief Presentation. – Berlin, Boston.

JASIEWICZ J., STEPINSKI T.F. (2013): Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. – In: Geomorphology, Volume 182, 147-156.

JORDAN G. (2007): Digital Terrain Analysis in a GIS Environment. Concepts and Development. – In: PECKHAM R.J., JORDAN G. (Hrsg.): Digital Terrain Modelling. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. – Berlin, Heidelberg.

KAREL W., BRIESE C., PFEIFER N. (2006): DTM quality assessment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVI, 2. – Wien.

KELLENBERGER T. (2020): E-Mail-Verkehr zur Detektion von Böschungen in der Schweiz. Leiter Prozess Innovation und NPOC für Satellitenbilder, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 24.06.2020

KOKALJ Ž., ZAKŠEK K., OŠTIR K. (2013): Visualization of LiDAR-derived relief models for detection of archaeological features. – In: OPITZ R., COWLEY C. (Hrsg.): Interpreting Archaeological Topography. Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation. – Frankfurt. 100-114.

KRAUS K. (2002): Laser-Scanning – ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 10, 620-624.

KRAUS K. (2005): Laserscanning und Photogrammetrie im Dienste der Geoinformation. – In: STROBL, J., T. BLASCHKE, G. GRIESEBNER (Hrsg.): AGIT Symposium 2005 – Angewandte Geoinformatik, 6–8 Juli 2005. Beiträge zum 17. Salzburg, Wichmann, 286-396.

LAGGNER A. (2016): Das ATKIS-Basis-DLM in der Emissionsberichterstattung. – In: zfv

Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 3/2016, 141, Augsburg, 178-183.

LILLESAND T., KIEFER R. (2000): Remote sensing and image interpretation. New York.

LILLESAND T., KIEFER R., CHIPMAN J. (2015): Remote sensing and image interpretation. 7th Edition. Hoboken, NJ: Wiley, 720.

LUNDGREN A. (2016): Development of a method for mapping the highest coastline in Sweden using breaklines extracted from high resolution digital elevation models. – Masterarbeit, Universität Lund, Lund.

MANDLBURGER G., HÖFLE B., BRIESE C., RESSL C., OTEPKA J., HOLLAUS M., PFEIFER N. (2009): Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft. – In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 61, 89-97.

MANDLBURGER G., STROBELBERGER G. (2007): Digitale Geländemodelle zur Simulation von Überschwemmungsszenarien. – In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 3/2007. Wien, S. 206-218.

MEYER F. (2015): Die automatische Suche nach Bodendenkmälern im Laserscan. – In: Archäologie in Westfalen-Lippe 2015, 250-254.

MEYER F. (2016): Möglichkeiten der objektorientierten Klassifikation für die automatisierte Auswertung von LiDAR-Daten in der Luftbildarchäologie. – Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

MEYER F., PFEFFER I., JÜRGENS C. (2019): Automated Detection of Field Monuments in Digital Terrain Models of Westphalia Using OBIA. – In: Geosciences 2019, 9, 109.

MITTERMAIER R. (2019): Terrestrische Datenerfassung. Digitales Landschaftsmodell. – Universität Wien.

MOTT C. (2005): Objektorientierte Klassifikationsstrategien zur Erfassung der Landnutzung aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten. – Dissertation, Technische Universität München, München.

NEUBERT M. (2005): Bewertung, Verarbeitung und segmentbasierte Auswertung sehr hoch auflösender Satellitenbilddaten vor dem Hintergrund landschaftsplanerischer und landschaftsökologischer Anwendungen. – Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden.

PAUL G. (1997): Aufbau eines Digitalen Landschaftsmodells von Österreich. – In: VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 85 (4), 260-266.

PETRIE G., TOTH C. (2018): Introduction to Laser Ranging, Profiling and Scanning. – In: SHAN J., TOTH C. (2018): Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing. – Boca Raton, USA, 1-28.

PETRIE G., TOTH C. (2018): Airborne and Spaceborne Laser Profilers and Scanners. – In: SHAN J., TOTH C. (2018): Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing. – Boca Raton, USA, 89-158.

PFEIFER N., BRIESE C. (2001): Airborne laser scanning and derivation of digital terrain models. – In: Fifth Conference on Optical 3-D Measurement Techniques. – Wien.

RUTZINGER M., MAUKISCH M., PETRINI-MONTEFERRI F., STÖTTER J. (2007): Development of Algorithms for the Extraction of Linear Patterns (Lineaments) from Airborne Laser Scanning Data. – In: KELLERER-PIRKLBAUER, A., KEILER, M., EMBLETON-HAMANN, C. AND STÖTTER, J. (Hrsg.): Geomorphology for the Future – Conference Proceedings. Innsbruck University Press, Innsbruck. 161–168.

RUTZINGER M., HÖFLE B., KRINGER K. (2012): Accuracy of automatically extracted geomorphological breaklines from airborne lidar curvature images. – In: Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 94:1, 33-42.

SABLATNIG R., ZAMBANINI S. (2013): Local Operations – Edge Filtering. – In: Einführung in Visual Computing, Kapitel 13, TU Wien.

SCHOTT M. (2018): Semi-automatische Detektion potentieller hügelartiger archäologischer Strukturen auf Basis Digitaler Geländemodelle am Fallbeispiel des weststeirischen Laßnitztals. – Masterarbeit, Technische Universität Graz, Graz.

SCHULZ H. (2003): Böschungen und Geländesprünge. Skript des Lehrstuhls für Grundbau,

Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München. – München.

SMITH M., CLARK C. (2005): Methods for the visualization of digital elevation models for landform map-ping. – In: *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 885-900

STRIEGLER W., WERNER D. (1969): *Dammbau in Theorie und Praxis*. – Berlin.

TYRALLOVA, L. (2013): *Automatisierte Objektidentifikation und Visualisierung terrestrischer Oberflächen-formen*. – Dissertation, Universität Potsdam, Potsdam.

WAGNER W., ULRICH A., BRIESE C. (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. – In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 91/4, S. 223-235.

WALCZAK S, CERPA N. (2003): Artificial Neural Networks. – In: MEYERS R. A. (Hrsg.): *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, 631-645.

WEGENER R. (2020): E-Mail-Verkehr zur Detektion von Böschungen in Niedersachsen. Mitarbeiter des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen, 19.06.2020

WEHR A., LOHR U. (1999): Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54/2-3, S. 68-82.

WIMMER M., PFEIFER N., HOLLAUS M. (2019): Automatic Detection of Potential Dam Locations in Digital Terrain Models. – In: *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019, 8, 197.

ZHOU Q., LIU X. (2008): Assessing Uncertainties in Derived Slope and Aspect from DEM. – In: ZHOU Q., LEES B., TANG G. (Hrsg.): *Advances in Digital Terrain Analysis*. – Berlin. 279-306.

Online Literatur

ArcGIS (o.J.): Ausdünnen. – Online unter:

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/thin.htm> (18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): Faltung. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.7/manage-data/raster-and-images/convolution-function.htm> (18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): Focal Statistics. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/focal-statistics.htm>
(28.10.2020)

ArcGIS (o.J.): Krümmung. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm> (18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): Neigung. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>
(18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): Reklassifizieren. – Online unter:

<https://pro.arcgis.com/de/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/reclassify.htm> (18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): Räumlich Verbinden. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/spatial-join.htm>
(18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): Schummerung. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/hillshade-function.htm> (18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): TIN. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
(18.12.2020)

ArcGIS (o.J.): Zellenstatistik. – Online unter:

<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-cell-statistics-works.htm> (18.12.2020)

BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN (BEV) (o.J.): APOS – Austrian Positioning System. Online unter:

https://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1571538&_dad=portal&_schema=PORTAL
(11.11.2020)

BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN (BEV) (o.J.): Blattschnitte. Online unter:

www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2830765&_dad=portal&_schema=PORTAL
(15.10.2020)

BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN (BEV) (o.J.): Kartographisches Modell 1:50.000 Raster. Online unter:

www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1570442&_dad=portal&_schema=PORTAL
(15.10.2020)

BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN (BEV) (o.J.): Koordinatensysteme. Online unter:

www.bev.gv.at/pls/portal/docs/PAGE/BEV_PORTAL_CONTENT_ALLGEMEIN/0200_PRODUKTE/PDF/KOORD-SYS.PDF (15.10.2020)

DE KOK R., BAATZ M., SCHNEIDER T., AMMER U. (1999): Object Based Image Analysis of High Resolution Data in the Alpine Forest Area. – Online unter:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.40.9240&rep=rep1&type=pdf>

EPOSA (o.J.): Echtzeit Positionierung Österreich. – Online unter: <https://www.eposa.at/>
(15.12.2020)

ESRI (o.J.): GIS Dictionary. – Online unter: <https://support.esri.com/en/other-resources/gis->

dictionary (3.11.2020)

GEODZ (2010): GeoDataZone – Das Lexikon der Erde: Online Lexikon. – Online unter: <http://www.geodz.com> (30.06.2020)

ÖSTERREICHISCHER TOURISTENKLUB (ÖTK) (2018): Topographie Österreichs. Online unter: www.oetk.at/wege/topographie/ (15.10.2020)

PRINZ T. (2017): Digitale Fernerkundungsmethodik in den Geowissenschaften. Kapitel 3.2 Bildstatistik. – Online unter: https://ivvgeo.uni-muenster.de/vorlesung/FE_Script/3_2.html (28.10.2020)

SPEKTRUM (Hrsg.) (o.J.): Lexikon der Geographie: Rasterdaten. – Online unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/rasterdaten/6416> (17.12.2020)

SPEKTRUM (Hrsg.) (o.J.): Lexikon der Geographie: Vektordaten. – Online unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/vektordaten/8542> (17.12.2020)

SPEKTRUM (Hrsg.) (o.J.): Lexikon der Geowissenschaft: Graben. – Online unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/graben/6189> (26.5.2020)

TYDAC.CH (o.J.): FME – Datenmodellierung und -transformation. – Online unter: www.tydac.ch/de/prod_fme (16.10.2020)

WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (WKO) (2019): Fläche und Benützungsarten 2019 – Online unter: wko.at/statistik/bundesland/Fl%C3%A4cheBen.pdf (15.10.2020)

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laserscanning
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
DTA	Digital Terrain Analysis
DEM	Digital Elevation Model
DHM	Digitales Höhenmodell
GIS	Geoinformationssystem
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial measurement unit
KM	Kartographisches Modell
LiDAR	Light detection and ranging
ÖK	Österreichische Karte

Anhang

Model:

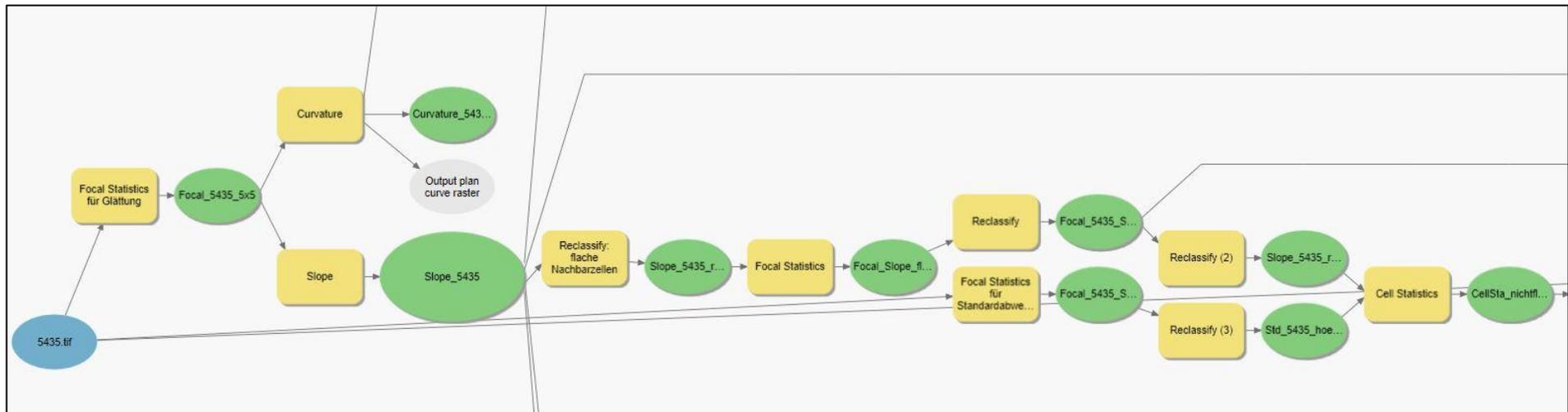


Abbildung 62, Schritt 1: Grundregeln erstellen und Raster zusammenführen. Glättung des DGMs, Neigung, Standardabweichung, Reklassifizierung.

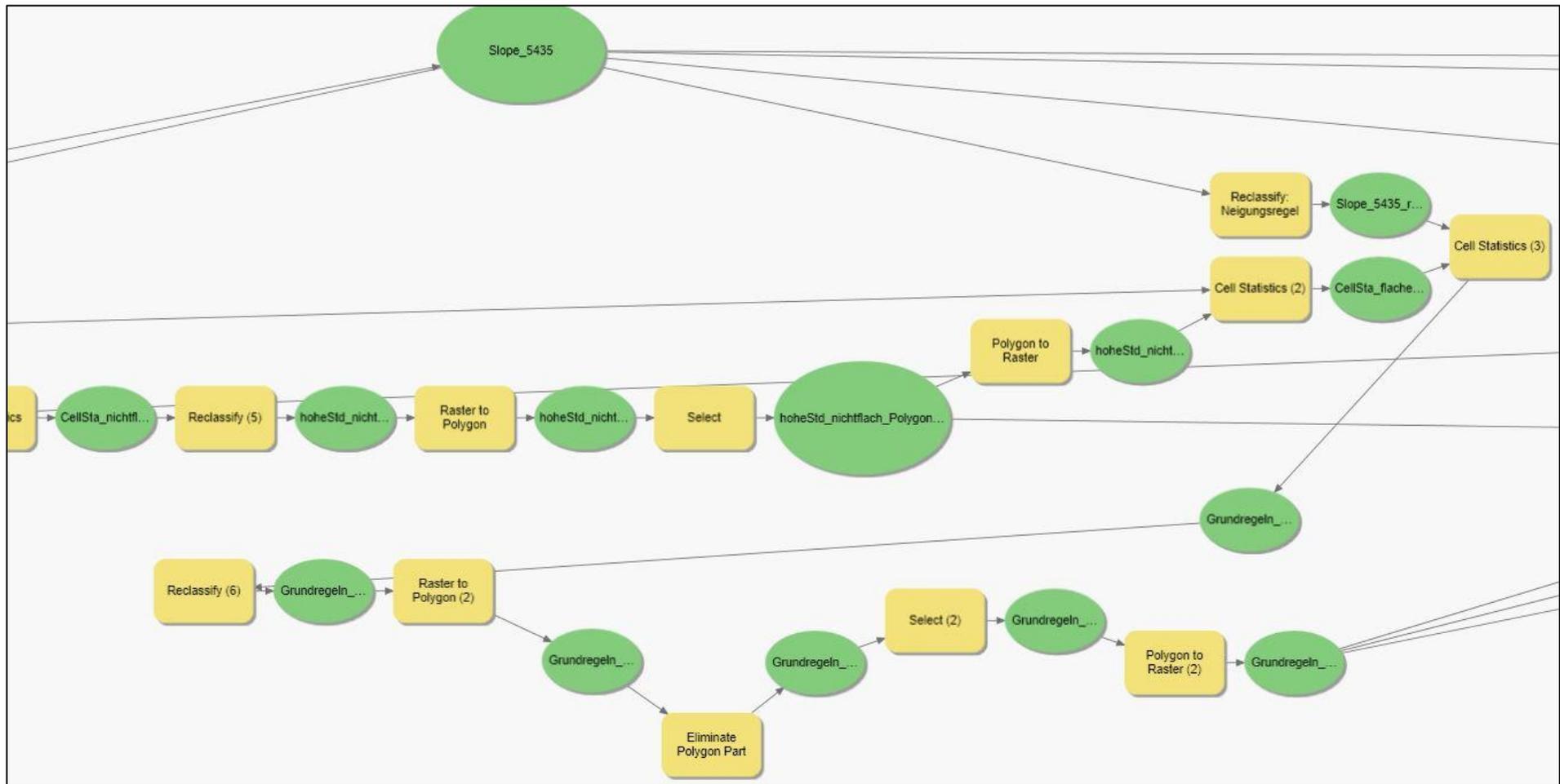


Abbildung 63, Fortsetzung Schritt 1: Grundregeln erstellen

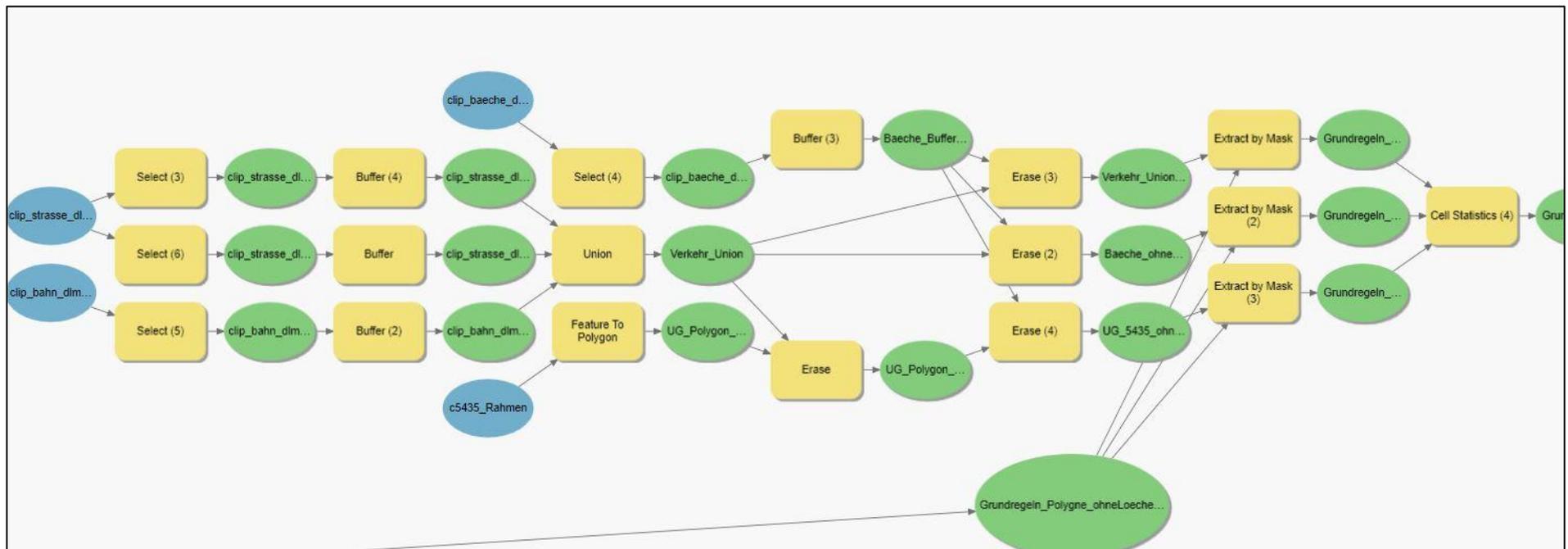


Abbildung 64, Schritt 2: Vermischungen vermeiden. Blaue Inputs (Verkehr, Bäche und Rahmen des Gebiets) wurden aus dem DLM des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen entnommen.

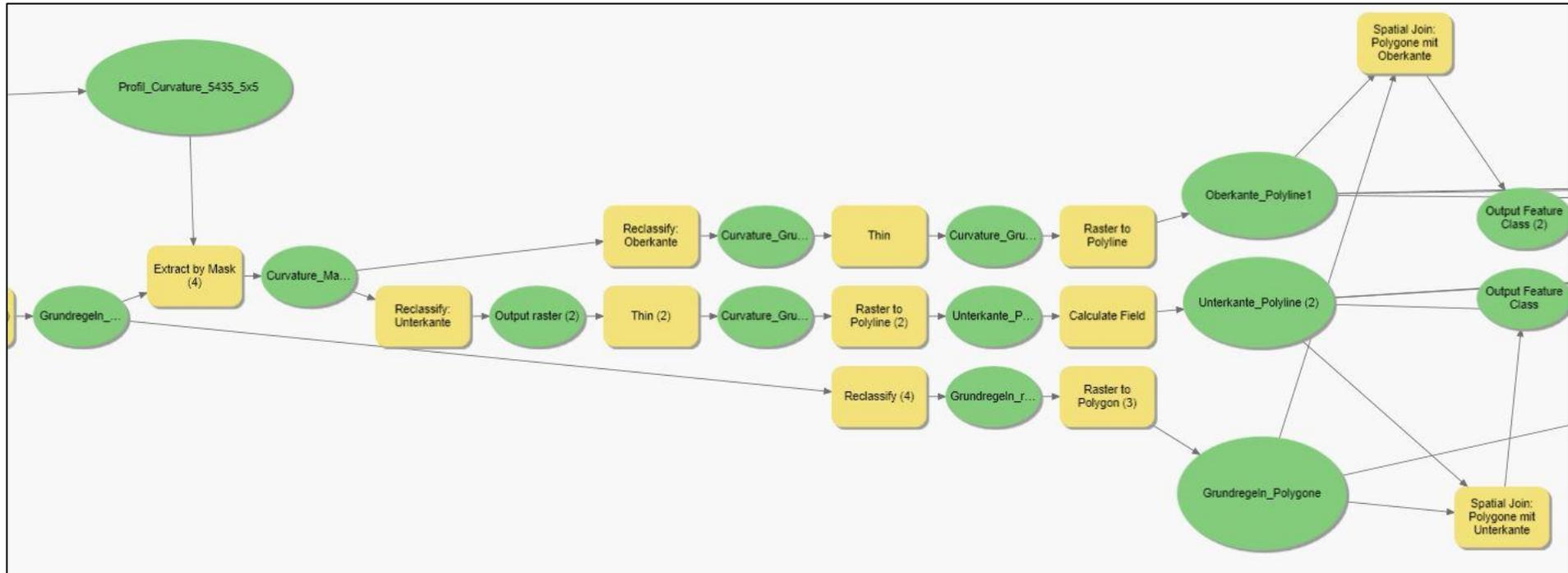


Abbildung 65, Schritt 3: Kantenberechnung durch Krümmung, Reklassifizierung und Ausdünnung.

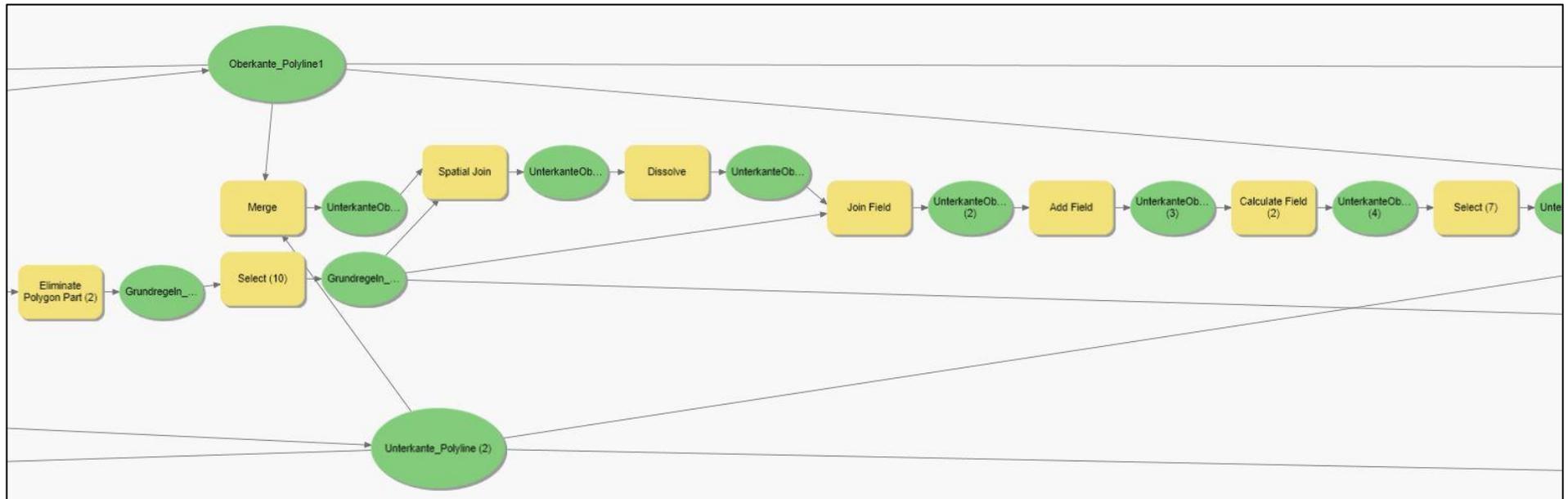
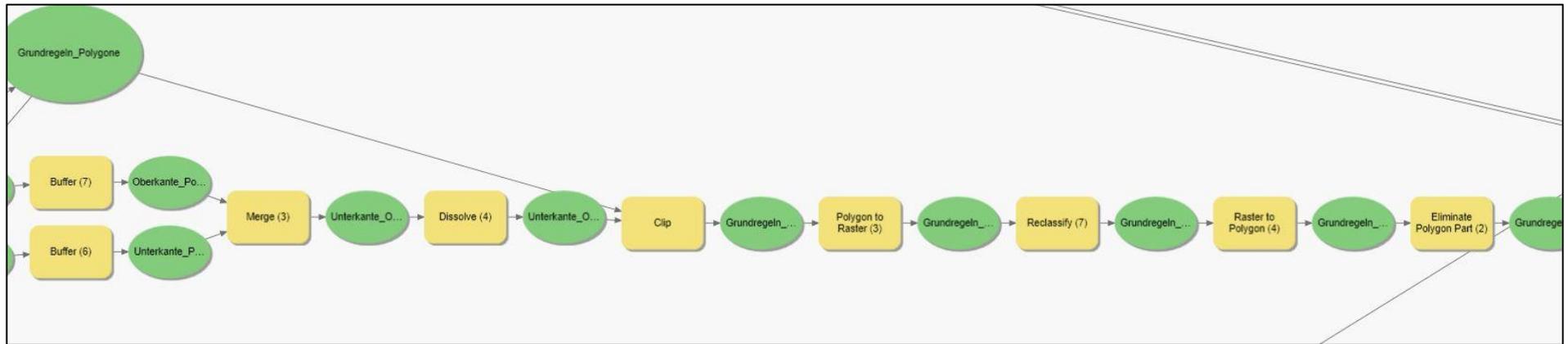


Abbildung 66, Oben: Schritt 4: Grundflächen auf Kantenbereiche reduzieren. Flächen ohne Kanten sollen gelöscht werden. Unten: Schritt 5: Abgleich der Längen der Kanten mit den Flächen.

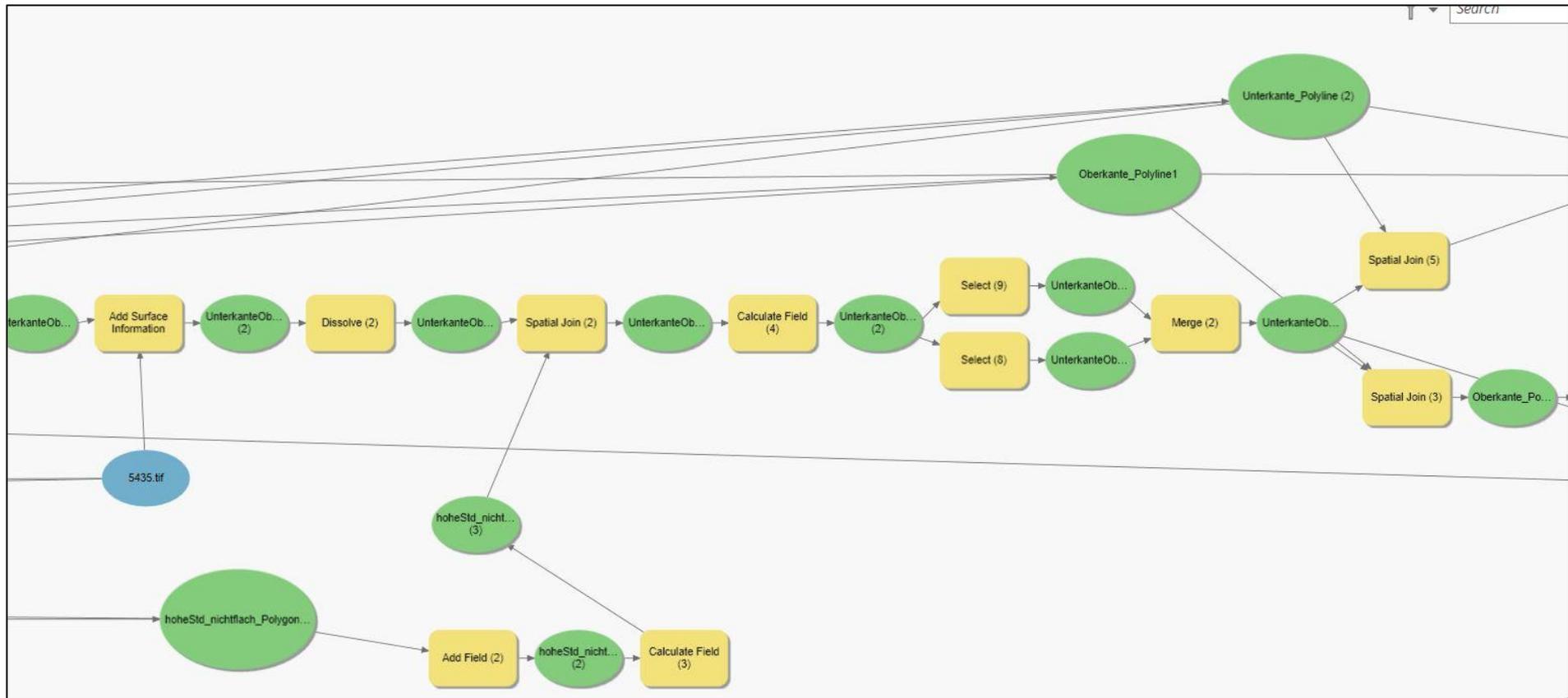


Abbildung 67, Schritt 6 und 7: Höhenberechnung durch Differenzberechnung der Kanten sowie Unterscheidung von flachen und nichtflachen Gebieten.

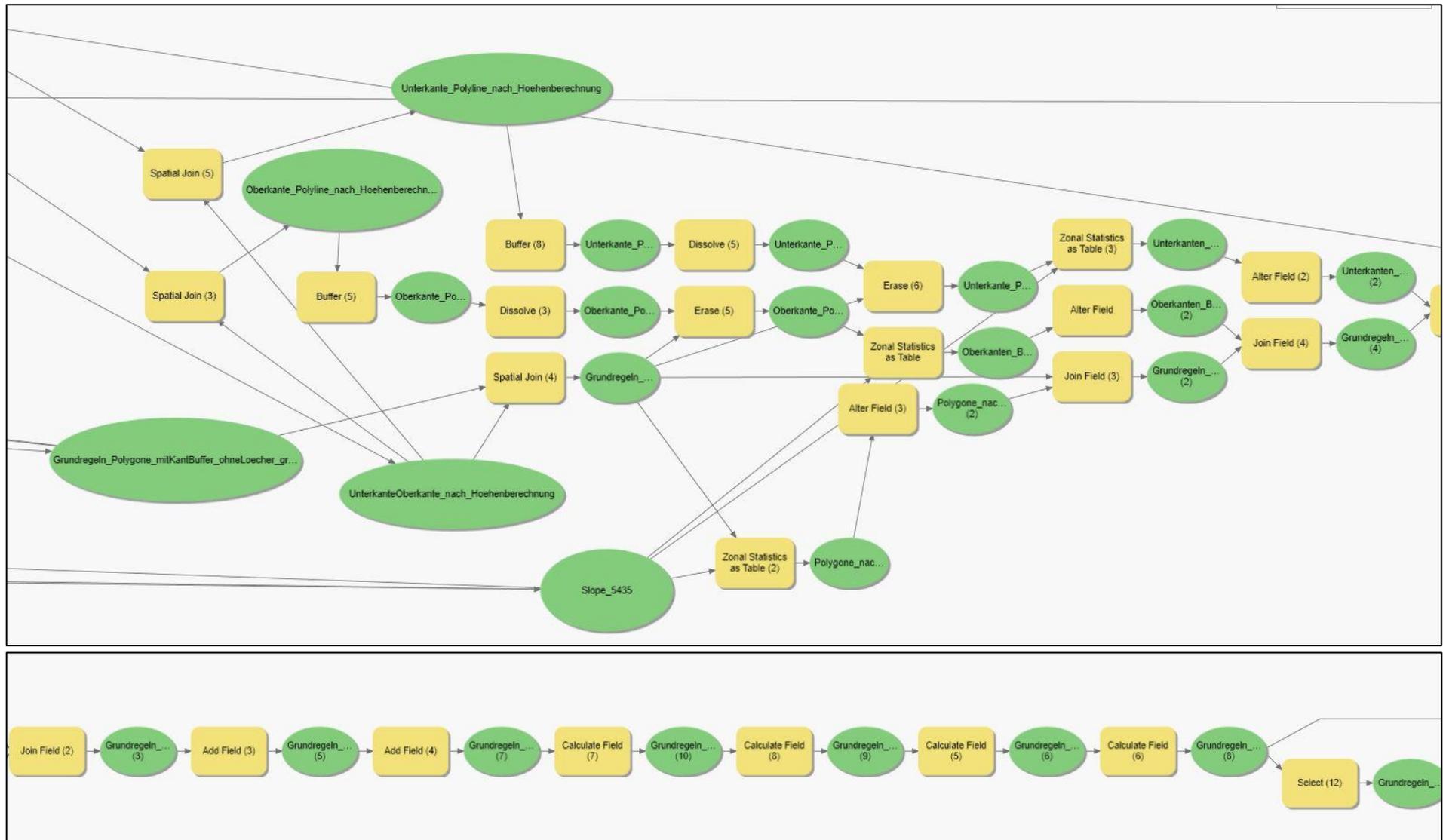


Abbildung 68, Oben: Schritt 8: Neigung der Umgebungszellen berechnen. Unten: Schritt 9: Tabelle mit Attributen erweitern und Kleinformen entfernen, wo die Neigung der Nachbarzellen zu hoch ist

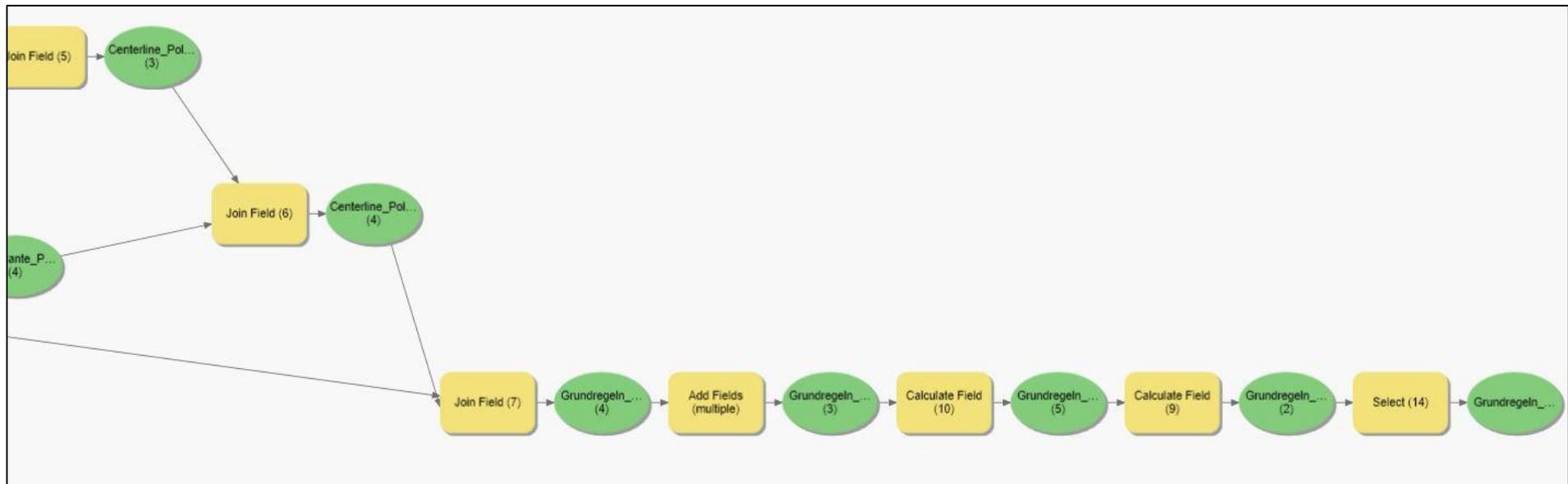
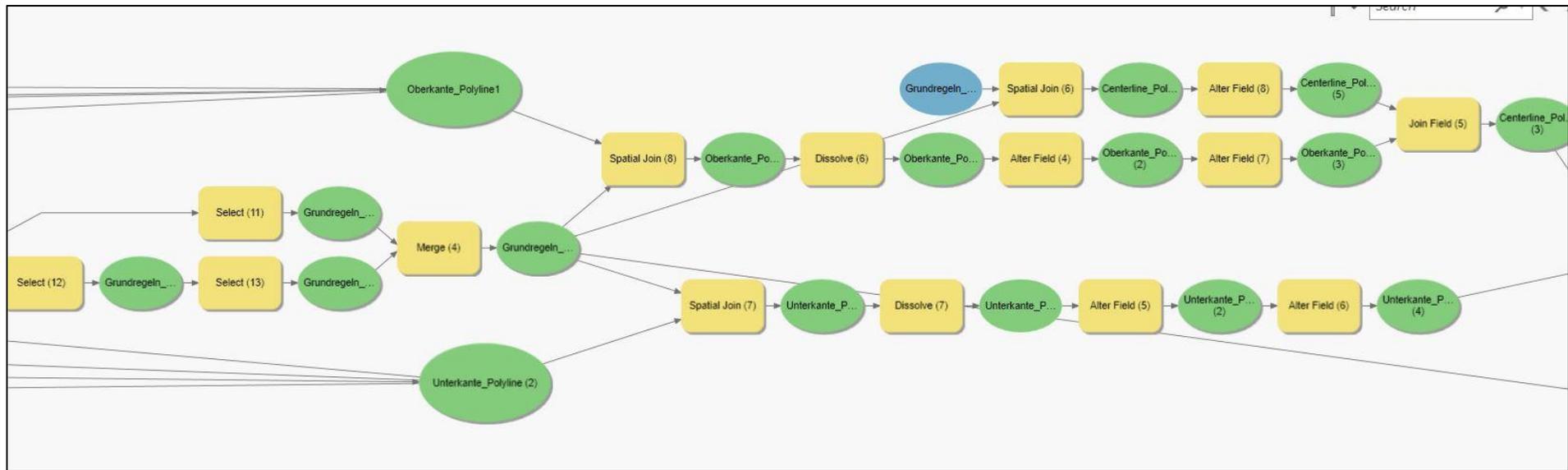


Abbildung 69, Oben: Schritt 10: Einfügen der Mittellinien-Länge. Diese wurde aus Lizenzgründen in ArcMap erstellt. Unten: Schritt 11: Abgleich der Mittellinien-Länge mit Ober- und Unterkanten

FME:

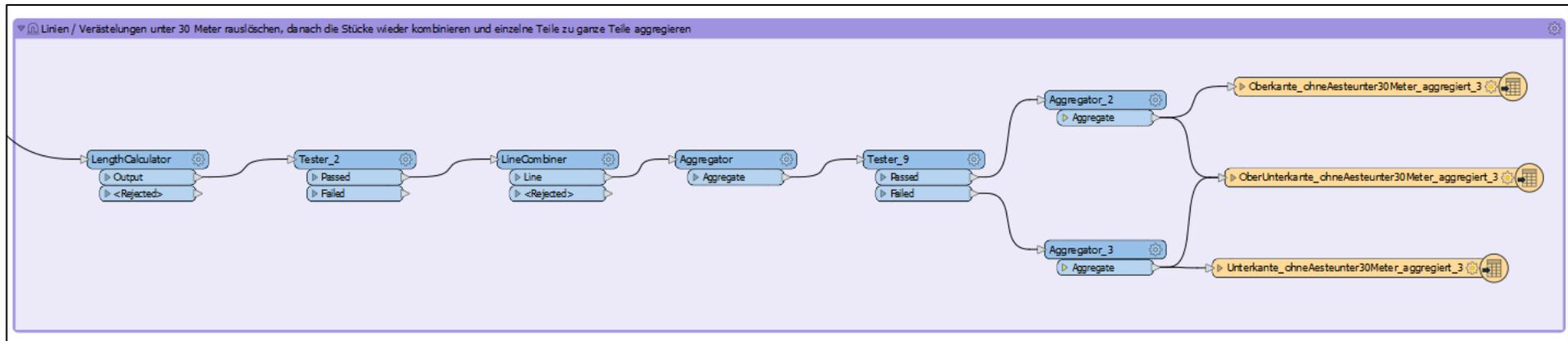
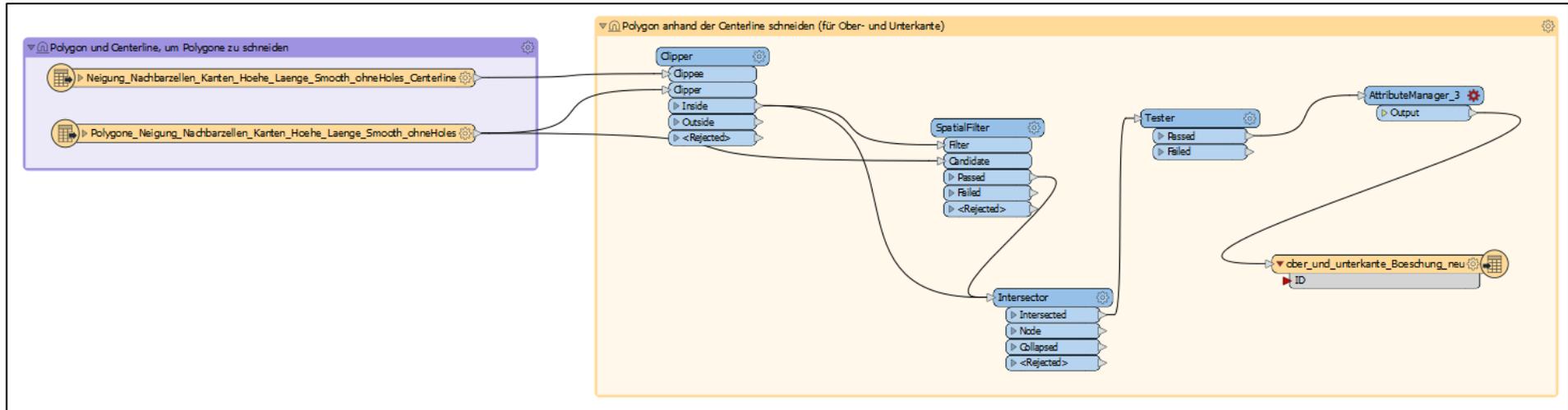


Abbildung 70, Oben: Ober- und Unterkanten Berechnung durch Teilen der Polygone entlang der Mittellinie in FME, Unten: Weg, um Verästelungen von Linien zu löschen (Generalisierung) in FME.

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG:

Ich versichere:

- dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Publikationen entnommen sind, als solche kenntlich gemacht sind.
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift