

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität Darmstadt



**Entwicklung von Methoden zur Erfassung hydromorphologischer
Strukturen aus Vermessungsdaten**

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und
beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

Masterthesis

von

Annika Pflum

aus Kassel (Matrikelnummer 2277682)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 16.12.2020

Darmstadt, im Dezember 2020

Entwicklung von Methoden zur Erfassung hydromorphologischer Strukturen aus Vermessungsdaten

Development of methods for recording hydro-morphological structures from survey data

Annika Pflum

annika_pflum@web.de

Matrikelnummer: 2277682

Studiengang: M. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Masterthesis

Eingereicht am 16. Dezember 2020

Aktualisierte Fassung vom 18.03.2021

Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

Universitäre Betreuung:

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Katharina Bensing, M. Sc.

wabau@wb.tu-darmstadt.de

Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

Franziska-Braun-Straße 7

64287 Darmstadt

Fachliche Begleitung:

Dr. Dorothea Gintz: gintz@bafg.de

Svenja Wick, M. Sc.: svenja.wick@bafg.de

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Referat M3: Gewässermorphologie, Sedimentdynamik und -management

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz



Master-Arbeit für Frau Annika PFLUM (Matr.-Nr. 2277682)

Entwicklung von Methoden zur Erfassung hydro-morphologischer Strukturen aus Vermessungsdaten

Development of methods for recording hydro-morphological structures from survey data

Veranlassung und Thema

In der Hydromorphologie ist es für verschiedene Fragestellungen notwendig, Flächenumrisse und -grenzen zu detektieren und die Flächen in ihrer Ausdehnung möglichst exakt zu bestimmen. Dies ist derzeit mit Blick auf Bundeswasserstraßen eine Monitoringaufgabe der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Im Fokus stehen dabei eindeutige und reproduzierbare Grenzen zwischen Substrat bzw. Substratgemischen unterschiedlicher Körnung und hydromorphologischen Strukturen und deren Übergängen. Die Identifikation dieser Grenzen soll mittels luftgestützter Fernerkundungsdaten erfolgen – derzeit erfolgt dies händisch/manuell und zukünftig soll eine Automatisierung zu möglichst objektiven Ergebnissen führen.

Aufgabenstellung

Der Fokus der Arbeit liegt auf den hydromorphologischen Strukturen der Ufer und der Auen der Bundeswasserstraßen. Die Masterthesis wird durch die BfG begleitet.

Der Fokus wird auf ein Projektgebiet am Rhein nördlich des Naturschutzgebietes „Kühkopf-Knoblochsau“ gelegt. Eine spätere Übertragung der Ergebnisse auf ein weiteres Untersuchungsgebiet ist angedacht, falls der zeitliche Rahmen dies erlaubt.

In der Arbeit sollen Methoden entwickelt und evaluiert werden, um aus (unterschiedlichen) Fernerkundungsdaten die Fläche von hydromorphologischen Strukturen möglichst lage- und höhengenaue zu bestimmen. Die zu entwickelnden Methoden sollen die Möglichkeit bieten, in einem weiteren Schritt eine (Teil-)Automatisierung der Datenanalyse zu ermöglichen.

Zu beantworten ist die Frage, welche Parameter geeignet sind, um eindeutige und reproduzierbare Grenzen von hydromorphologischen Strukturen zu bestimmen. Ferner gilt es zu untersuchen, welche Datengrundlage sich zur Detektion welcher hydromorphologischen Strukturen eignet.

Dazu stehen seitens der BfG für das Untersuchungsgebiet sowohl Drohnenaufnahmen (orthorektifizierte RGB und multispektrale Luftbilddaten) als auch LiDAR-

Daten (Laserscan-Daten) zur Verfügung. Es gilt die Eignung der verschiedenen Datentypen für die Erfassung unterschiedlicher hydromorphologischer Strukturen zu prüfen. Anhand der definierten Parameter sollen anschließend hydromorphologische Strukturen abgegrenzt und deren räumliche Ausdehnung bestimmt werden können. Die Ergebnisse können mit bestehenden (und ggf. weiteren selbst erhobenen) Daten aus Geländevermessungen (Ground truth) gegenübergestellt werden, was eine Qualitätsbewertung der Analyseergebnisse erlaubt.

Im Rahmen der Thesis soll zunächst der Stand des Wissens dargelegt werden. Anschließend sind Schritte, geeignete Parameter und Verfahren darzustellen, die für die Entwicklung einer automatisierten Auswertung erforderlich sind. Es ist zudem zu diskutieren, inwieweit die mittels Automatismus erkannten Grenzen der Strukturen objektiv, also vom Betrachter unabhängig, auf Grundlage der vorhandenen Fernerkundungsdaten detektiert werden können.

Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- besondere Regelungen bei externen Arbeiten.

Die Kandidatin hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden.

Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen:

Referent	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik Lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Hydromechanik - Vermessungswesen - Gewässerökologie - Hydromorphologie - Auenökologie - Kartierungsverfahren
Mitbetreuer	Katharinas Bensing, M.Sc. FG Wasserbau und Hydraulik k.bensing@wb.tu-darmstadt.de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Dr. Dorothea Gintz gintz@bafg.de Svenja Wick svenja.wick@bafg.de		
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung, Leistungszeitraum 6 Monate	Arbeitsbedingungen	Heimarbeit, Ortstermine

Darmstadt, den 18.05.2020

Prof. Boris Lehmann

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch eine Zusammenarbeit des Fachgebiets Wasserbau und Hydraulik der Technischen Universität Darmstadt und der Bundesanstalt für Gewässerkunde ermöglicht.

Ich bedanke mich bei dem Referat M3 der Bundesanstalt für Gewässerkunde für die Möglichkeit, mit dieser Masterarbeit einen Beitrag für eine vielversprechende Forschungsfrage leisten zu können. Insbesondere Dr. Dorothea Gintz und Svenja Wick möchte ich für die fachliche Begleitung und den regen Austausch danken. Ich danke auch den Verantwortlichen des Projektes „mDRONES4rivers“ für die Bereitstellung der Daten für meine Untersuchungen.

Ich möchte Prof. Dr.-Ing. habil. Lehmann meinen Dank aussprechen, der die Entwicklung der vorliegenden Arbeit mit großem Interesse verfolgt und betreut hat. Der gemeinsame Austausch führte stets zu fruchtbaren Ideen. Katharina Bensing danke ich für ihr offenes Ohr und die motivierenden Gespräche.

Darüber hinaus danke ich Jessika Gappisch und Mirjam Lerch; die Gesellschaft im Homeoffice, die gemeinsamen Mittagspausen und das gegenseitige Anspornen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Thesis beigetragen. Vielen Dank an Malte Bartoschek für das sorgfältige Korrekturlesen und die hilfreichen Anregungen. Ein besonderer Dank gebührt meinen Eltern Heike und Siegfried Pflum: eure bedingungslose Unterstützung in meinem gesamten Werdegang ist ein wertvolles Geschenk. Schließlich möchte ich Andreas Kiecksee danken, für die Fürsorge und die Geduld, nicht nur in den letzten Monaten, sondern während unserer gesamten gemeinsamen Jahre.

Kurzfassung

Die flächenhafte Erfassung von Gewässerstrukturen ist für verschiedene hydromorphologische Fragestellungen von Bedeutung. Luftgestützte Fernerkundungsdaten bieten die Möglichkeit, eindeutige Strukturgrenzen anhand von messbaren Parametern zu bestimmen und somit den Aufwand zeit- und kostenintensiver Geländekartierungen zu reduzieren. In der vorliegenden Arbeit wurden die Potenziale hochaufgelöster Digitaler Geländemodelle sowie hochaufgelöster multispektraler Luftbilddaten für die Entwicklung von automatisierten Auswertungsverfahren zur objektiven und reproduzierbaren Strukturerefassung untersucht.

Anhand eines Untersuchungsgebietes am Rhein nahe dem Naturschutzgebiet „Kühkopf-Knoblochsaue“ wurden verschiedene geometrische und radiometrische Parameter geprüft. Zur geometrischen Abgrenzung von *Böschungen*, *Rinnen*, *Wällen* und *Senken* wurde auf Basis von bestehenden Verfahren zur Bruchkantenextraktion eine Methodik entwickelt, um anhand des Parameters Krümmung Strukturabgrenzungen in Form von Ober- und Unterkanten zu erstellen. Die in der Literatur nicht eindeutig definierte Böschungsoberkante des Ufers wurde auf diese Weise ebenfalls objektiv verortet und die Lage- und Höhengenaugigkeit anhand von terrestrisch vermessenen Oberkantenpunkten bestätigt. Die Uferböschung wurde in einem nachfolgenden Arbeitsschritt durch eine neigungsbasierte Methodik klassifiziert, wodurch eine Unterscheidung flacherer und steilerer Uferbereiche sowie die Detektion besonderer Uferformen, z.B. Stufenufern, möglich war. Die Erfassung von *Auengewässern*, *Totholz*, *Bänken* und *ufernahen Sohlstrukturen* kann mithilfe von Verfahren der computergestützten Bildanalyse und -klassifikation erfolgen, deren Potenziale in der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden.

Insgesamt kommen die Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die Entwicklung einer weitgehend automatisierten Gewässerstrukturkartierung möglich ist, Fachexpertise bei der fachgerechten Anwendung ist jedoch unabdingbar.

Abstract

The areal registration of water structures is important for various hydromorphological questions. Airborne remote sensing data provide the possibility to determine unambiguous structure boundaries based on measurable parameters and thus the possibility to reduce the effort of time-consuming and cost-intensive terrain mapping. In this thesis, the potential of high-resolution digital terrain models as well as high-resolution multispectral aerial image data for the development of automated procedures for objective and reproducible structure detection were investigated.

Based on an investigation area at the river Rhine, near the nature reserve "Kühkopf-Knoblochsaue", different geometric and radiometric parameters were examined. For the geometric delineation of *slopes*, *channels*, *embankments* and *depressions*, a methodology was developed based on existing procedures for break line extraction in order to create structure delineations in the form of upper and lower edges using the parameter curvature. The top of bank slope, which is not clearly defined in the literature, was objectively located this way, and the location and height accuracy was confirmed using terrestrially surveyed top of bank points. In a subsequent step, the bank slope was classified by a slope-based methodology, which allows the differentiation of moderate and steep bank slopes as well as the detection of special bank forms, e.g. stepped banks. The detection of *floodplain waters*, *woody debris*, *sediment bars* and *near-shore bed structures* can be performed using computer-aided image analysis and classification techniques, the potentials of which are presented in this paper.

Altogether, the investigations conclude that the development of a largely automated hydromorphological structure mapping is possible, but expert knowledge in the professional application is indispensable.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
Formelzeichenverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Hydromorphologie	4
2.1 Kartierung hydromorphologischer Strukturen	5
2.2 Skalen hydromorphologischer Systeme	7
2.2.1 Größenordnungen hydromorphologischer Strukturen	8
2.2.2 Räumliche Auflösung von Daten zur Erfassung von Gewässerstrukturen	11
2.3 Klassifikationsansätze	15
2.3.1 Ansätze zur Reliefklassifikation.....	15
2.3.2 Ansätze zur Bildklassifikation.....	17
2.3.3 Klassifizierung der Ufer- und Auenstrukturen.....	18
3 Parameter zur Detektion von Ufer- und Auenstrukturen.....	22
3.1 Geometrische Parameter	22
3.1.1 Höhe.....	24
3.1.2 Neigung.....	24
3.1.3 Exposition.....	26
3.1.4 Krümmung.....	28
3.1.5 Sky-View Factor	30
3.2 Radiometrische Parameter	31
3.2.1 Grauwert	34
3.2.2 Spektrale Indizes.....	36
3.2.3 Textur.....	37
4 Untersuchungsgebiet.....	38
4.1 Modellprojekt Kühkopf-Knoblochsau	38
4.2 Erfolgskontrolle	41
5 Datengrundlage	43
5.1 Digitale Orthofotos und multispektrale Luftbilder	43
5.1.1 Luftbildfotografie	43
5.1.2 Verwendete Luftbilddatensätze	44

5.2	LiDAR-Höhendaten	46
5.2.1	Luftgestütztes Laserscanning (ALS)	46
5.2.2	Digitales Geländemodell aus ALS-Höhendaten	48
5.3	Geländepunkte aus GNSS-Vermessung	49
6	GIS-Software	50
6.1	ArcGIS Desktop	50
6.2	GRASS GIS	51
7	Reliefanalyse	52
7.1	Extraktion von Geländekanten aus dem Digitalen Geländemodell	52
7.1.1	Stand des Wissens	53
7.1.2	Extraktion der Geländekanten im Untersuchungsgebiet	56
7.2	Interpretation der Kanten – Strukturidentifikation	61
7.3	Fokus: Uferböschung	65
7.3.1	Abgrenzung der Uferböschung	65
7.3.2	Qualitätskontrolle der extrahierten Böschungsoberkante	67
7.3.3	Klassifikation der Uferböschung anhand ihrer Neigung	69
8	Bildanalyse	74
8.1	Klassifizierung von Wasser- und Landflächen	74
8.2	Ansätze zur Strukturerefassung aus Luftbilddaten	78
9	Ausblick	83
10	Fazit	86
	Literaturverzeichnis	88
	Anhang	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Hydromorphologische Formenvielfalt (beispielhaft).....	4
Abbildung 2-2:	Größenordnungstypen von geomorphologischen Reliefeinheiten.....	9
Abbildung 2-3:	Raum-Zeit-Modell der morphologischen Gewässerentwicklung	11
Abbildung 2-4:	Beispiel für ein 3 x 3 Zellen großes Berechnungsfenster	12
Abbildung 2-5:	Visualisierung der Skaleneffekte: Karte der Neigungen	13
Abbildung 2-6:	Strukturklassen Teil 1 (geometrisch geprägt)	21
Abbildung 2-7:	Strukturklassen Teil 2 (radiometrisch geprägt)	21
Abbildung 3-1:	Visualisierung der Berechnung der geometrischen Parameter	23
Abbildung 3-2:	Veranschaulichung eines Digitalen Geländemodells als geordnetes Höhenraster	24
Abbildung 3-3:	Beispiel für ein 3 x 3 Zellen großes Berechnungsfenster	25
Abbildung 3-4:	Definition der Exposition in ArcGIS (links) und GRASS GIS (rechts)	27
Abbildung 3-5:	Bedeutung der Profilkurvatur	28
Abbildung 3-6:	Bedeutung der Plankurvatur	28
Abbildung 3-7:	Prinzip des Sky-View Factors	30
Abbildung 3-8:	Darstellung eines beispielhaften dreidimensionalen Merkmalraums	33
Abbildung 3-9:	Spektrale Signaturen von Wasser (1), Vegetation (2) und Boden (3)	35
Abbildung 3-10:	Schwellenwertbildung anhand des NIR-Reflexionshistogramms	35
Abbildung 4-1:	Geografische Einordnung des Untersuchungsgebietes „Kühkopf- Knoblochsaue“.....	38
Abbildung 4-2:	Steinschüttung zur Ufersicherung nördlich des Untersuchungsgebietes	40
Abbildung 4-3:	Links: Steile Uferböschung mit Nistlöchern (Rhein-km 474,7), rechts: Beginn der Ufererosion (Rhein-km 474,9, Blick nach Süden).....	40
Abbildung 4-4:	Erste Entwicklungen der Uferböschung bei Rhein-km 476,0	41
Abbildung 5-1:	Wellenlängenbereiche der Multispektralkamera MicaSense RedEdge M	46
Abbildung 5-2:	Unterschiedliche Prinzipien der Signalerfassung des ALS	47
Abbildung 6-1:	Benutzeroberfläche der ArcGIS-Anwendung ArcMap	50
Abbildung 6-2:	Benutzeroberfläche der Software GRASS GIS	51
Abbildung 7-1:	Prinzip der Kantendetektion durch ebene Flächenpaare nach Briese (2004)....	55
Abbildung 7-2:	Tangens hyperbolicus Funktion zur Annäherung von Geländekanten	55
Abbildung 7-3:	Profilkrümmung, berechnet auf Basis des Original-DGM.....	57
Abbildung 7-4:	Profilkrümmung, berechnet auf Basis des aggregierten DGM.....	57
Abbildung 7-5:	Abhängigkeit der Ergebnisse der Kantenextraktion vom Krümmungsschwellenwert	59
Abbildung 7-6:	Abhängigkeit der Ergebnisse der Kantenextraktion von der Dangle-Länge.....	59
Abbildung 7-7:	Verfahrensschritte bei der Extraktion der Oberkanten	60

Abbildung 7-8:	Geometrische Strukturklassen als Zusammenschluss von Ober- (rot) und Unterkanten (blau)	61
Abbildung 7-9:	Abgrenzung einer Böschung durch die extrahierten Geländekanten	62
Abbildung 7-10:	Abgrenzung einer Rinne durch die extrahierten Geländekanten	63
Abbildung 7-11:	Abgrenzung eines Walls durch die extrahierten Geländekanten	64
Abbildung 7-12:	Abgrenzung einer Senke durch die extrahierten Geländekanten	65
Abbildung 7-13:	Abgrenzung der Uferböschung nach WBWF und LUBW	66
Abbildung 7-14:	Beispiel eines Uferschnitts zur Qualitätskontrolle der extrahierten Böschungsoberkante	68
Abbildung 7-15:	Höhenprofil einer stufenförmigen Uferböschung	70
Abbildung 7-16:	Klassifikation der Uferböschung anhand ihrer Neigung	72
Abbildung 7-17:	Differenz zwischen maximaler und mittlerer Böschungsneigung	73
Abbildung 8-1:	Schwellenwertverfahren zur Abgrenzung von Wasser- und Landflächen	75
Abbildung 8-2:	Spektrale Signaturen von Seewasser, Bebauung und Vegetation	77
Abbildung 8-3:	Eine geringe LiDAR-Intensität weist auf Wasserflächen hin	78
Abbildung 8-4:	Radiometrische Strukturklassen	78
Abbildung 8-5:	Extraktion von Wasserflächen mittels NDWI-Schwellenwert	79
Abbildung 8-6:	Visualisierung des Glättungseffektes an zwei Totholzstämmen	80
Abbildung 8-7:	Karte des NDVI für einen Bereich mit mehreren Totholzstämmen	81
Abbildung 9-1:	Manuell editierte Strukturpolygone	84
Abbildung 9-2:	Unterteilung des Stufenufers durch extrahierte Unterkantensegmente	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Siebenstufige Gewässerstrukturklassen.....	6
Tabelle 5-1:	Technische Informationen: RGB-Luftbilddaten vom 15.10.2019	45
Tabelle 5-2:	Technische Informationen: RGB-Luftbilddaten vom 07.07.2020	45
Tabelle 5-3:	Technische Informationen: multispektrales Luftbild vom 15.10.2019	45
Tabelle 5-4:	Technische Informationen: DGM aus LiDAR-Daten vom 12.05.2020	49
Tabelle 7-1:	Abweichungen zwischen extrahierter und vermessener BOK.....	68
Tabelle 7-2:	Klassifikationsschema der Böschungsneigung	71

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laserscanning
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BOK	Böschungsoberkante
DEM	Digital elevation model
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DTM	Digital terrain model
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
ETRS	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem
GIS	Geografisches Informationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
HSL	Hue, saturation, lightness
HQ _x	Hochwasserdurchfluss mit einer Wiederkehrzeit von x Jahren
hpnG	Heutiger potenziell natürlicher Gewässerzustand
IMU	Inertial Measurement Unit
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LGB-RLP	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
LiDAR	Light Detection and Ranging
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
MDNWI	Modified Normalized Difference Water Index
MHW	Mittleres Hochwasser
MIR	Mittleres Infrarot
MW	Mittelwasser, statistische Größe
MUNLV NRW	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NHN	Normalhöhennull
NIR	Nahes Infrarot

NW	Niedrigwasser, statistische Größe
OBIA	Object-Based Image Analysis
PROFC	Profile curvature, Profilkrümmung
RE	Red Edge
RGB	Rot-Grün-Blau
SVF	Sky-View Factor
TIFF	Tagged Image File Format
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UTM	Universal Transverse Mercator
WBWF	Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH
WG	Wassergesetz des Landes Baden-Württemberg
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
x, y	Koordinatenrichtungen der Ebene	m
z	Höhe	m
A	Fläche	m ²
L	Breite der Rasterzellen	m
n	Anzahl	–
r	Kugelradius	m
γ	Höhenwinkel	°
θ	Exposition	°
Ω	Raumwinkel	–

1 Einleitung

Natürliche Fließgewässer und ihre Auen gehören zu den struktur- und artenreichsten Lebensräumen Deutschlands (Patt 2016, S. 12). Die ökologische Funktionsfähigkeit eines Gewässers und die Lebensbedingungen für Flora und Fauna werden durch das Zusammenspiel von Abflussdynamik, Wasserbeschaffenheit und morphologischer Formenausstattung bestimmt (LAWA 2019, S. 11). Ein morphologischer Formenreichtum sorgt für diverse Strömungsmuster, was eine artenreiche Besiedlung begünstigt (Patt 2016, S.18). Auenlandschaften mit natürlichen Mulden und Altgewässern haben eine große Bedeutung für den Hochwasserrückhalt (Patt 2016, S. 6-9) und stellen zudem durch die dynamische Überflutungscharakteristik einzigartige Lebensräume für angepasste Arten dar (Patt 2016, S. 62). Heutzutage sind viele Fließgewässer aufgrund von verschiedenen Nutzungsanforderungen stark verbaut und verändert, wodurch Habitate zerstört und das natürliche Gleichgewicht der hydraulischen und morphologischen Prozesse im Gewässer gestört werden (LAWA 2019, 5). Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) fordert daher die Wiederherstellung bzw. Sicherung eines guten ökologischen Zustands aller europäischer Gewässer, was auch deren morphologische Bedingungen einschließt.

Zur Dokumentation des morphologischen Zustands von Fließgewässern, zur Bewertung von geplanten Maßnahmen für die Gewässerunterhaltung und -entwicklung sowie zur Wirksamkeitskontrolle von ausgeführten Maßnahmen werden Verfahren der Gewässerstrukturkartierung eingesetzt (LAWA 2019, 5). Viele Methoden des hydromorphologischen Monitorings beruhen auf der Datenerhebung durch Feldstudien (Bizzi et al. 2016, 58). Diese Art der Datenerhebung ist jedoch sehr zeit- und ressourcenaufwendig, weshalb eine flächendeckende Erhebung größerer Gebiete auf diese Weise nicht möglich bzw. nicht wirtschaftlich ist (Bizzi et al. 2016, 58; Knehtl et al. 2018, 2). Insbesondere für die flächendeckende Untersuchung größerer Gewässerabschnitte spielt daher die Verwendung von Fernerkundungsdaten – z.B. hochaufgelöster, multispektraler Luftbilddaten, Laserscan-Daten oder hochaufgelöster Digitaler Geländemodelle (DGM) – eine große Rolle (Knehtl et al. 2018, 7). Während Geländeerhebungen stark von der Expertise des Kartierers abhängig sind, bietet die Verwendung von Fernerkundungsdaten das Potenzial, objektive und reproduzierbare Erfassungs- und Bewertungsmethoden für hydromorphologische Fragestellungen zu entwickeln (Bizzi et al. 2016, 58, 67). Eine automatisierte computergestützte Strukturkartierung kann für ein hohes Maß an Objektivität sorgen und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherstellen; darüber hinaus lässt sich auf diese Weise der Aufwand für Geländekartierungen reduzieren.

Durch die steigende Auflösung und Verfügbarkeit der Fernerkundungsdaten steigen auch die Anwendungsmöglichkeiten für kleinskalige Fragestellungen des hydromorphologischen Monitorings. Verschiedene Gewässercharakteristiken, die für das hydromorphologische Monitoring üblicherweise erfasst werden, wurden in wissenschaftlichen Detailstudien bereits aus hochaufgelösten Fernerkundungsdaten abgeleitet, z.B. Gerinneabmessungen, Wassertiefe, Ufervegetation, Totholz, Sohl- und Ufersedimente sowie besondere Sohlstrukturen (eine Übersicht über europäische Studien liefern Bizzi et al. (2016, 61–62).

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie eine (teil-)automatisierte Erfassung hydromorphologischer Strukturen der Ufer und der Auen auf Basis von luftgestützten Fernerkundungsdaten umgesetzt werden kann. Dafür wird die Eignung verschiedener Parameter für eine möglichst eindeutige und reproduzierbare flächenhafte Abgrenzung von Ufer- und Auenstrukturen geprüft. Darauf aufbauend werden anschließend mithilfe Geografischer Informationssysteme (GIS) praktische Ansätze für eine Erfassungsmethodik entwickelt; dafür wurde die Software ArcGIS und GRASS GIS verwendet (siehe Kapitel 6). Als Untersuchungsgebiet für die Analysen der vorliegenden Arbeit wurde ein 2,5 km langer Uferabschnitt des nördlichen Oberrheins nahe dem hessischen Naturschutzgebiet „Kühkopf-Knoblochsaue“ ausgewählt, in welchem von Ende 2019 bis Anfang 2020 im Zuge eines Renaturierungsprojektes die ehemalige Ufersicherung entfernt wurde; durch regelmäßiges Monitoring sollen dort die zukünftigen Entwicklungen des Uferbereichs erfasst werden (siehe Kapitel 4).

Als Datengrundlage für die Untersuchungen dienen ein hochaufgelöstes DGM sowie hochaufgelöste multispektrale Luftbilddaten (siehe Kapitel 5), welche jeweils unterschiedliche Möglichkeiten der Analyse hydromorphologischer Strukturen bieten. Auf Basis des DGM können Methoden der Reliefanalyse durchgeführt werden, die der Erkennung verschiedener geometrischer Formausprägungen des Geländes dient. Durch Verfahren der Bildanalyse und -klassifikation können insbesondere Strukturen mit unterschiedlichen Material- und folglich auch Reflexionseigenschaften identifiziert werden. Aus diesem Grund werden in Kapitel 3 sowohl geometrische als auch radiometrische Parameter untersucht.

Zur systematischen Erfassung verschiedener Ufer- und Auenstrukturen mittels teilautomatisierter, computergestützter Methoden ist eine Klassifikation der Strukturen nach eindeutigen, messbaren Merkmalen nötig; die Definition der Strukturklassen für die Untersuchungen dieser Arbeit wird in Kapitel 2 vorgestellt und berücksichtigt ebenfalls die Unterscheidung geometrischer und radiometrischer Charakteristiken. Als grundlegende Rahmenbedingung bei hydromorphologischen Untersuchungen wird in Kapitel 2 ebenfalls der Frage nach einer geeigneten Untersuchungsskala nachgegangen.

Der Schwerpunkt der methodischen Anwendung der untersuchten Parameter wird in der vorliegenden Arbeit auf die Reliefanalyse zur Erfassung von *Böschungen*, *Rinnen*, *Wällen* und *Senken* gelegt. Aufbauend auf bestehenden Ansätzen zur Bruchkantenextraktion wird in Kapitel 7 eine Methodik entwickelt, um Geländekanten auf Basis des Parameters Profilkrümmung aus dem DGM zu generieren. Durch Interpretation der Anordnung von Ober- und Unterkanten werden die zugehörigen Strukturen identifiziert. Durch die entwickelte Methodik wird ebenfalls eine eindeutige Verortung der Böschungsoberkante des Ufers durchgeführt, deren Lage- und Höhengenaugigkeit anschließend im Rahmen einer Qualitätskontrolle durch terrestrisch vermessene Oberkantenpunkte bewertet wird. Aufgrund ihrer besonderen Relevanz im untersuchten Gebiet werden für die Uferböschung weitergehende Analysen durchgeführt und es wird ein neigungsbasiertes Klassifikationsverfahren entwickelt. Dies erlaubt die Unterteilung des Ufers in regelmäßige Abschnitte, die durch ihre Neigung charakterisiert werden können. Darüber hinaus ist eine Identifikation besonderer Uferformen, wie Stufenufern, möglich.

Die hydromorphologischen Strukturklassen *Auengewässer*, *Totholz*, *Bänke* und *ufernahe Sohlstrukturen* zeichnen sich vorrangig durch ihre Reflexionseigenschaften aus. In Kapitel 8 werden verschiedene Ansätze der Bildanalyse und -klassifikation vorgestellt, deren Potentiale zur Detektion hydromorphologischer Strukturen in verschiedenen Fachpublikationen dargestellt wurden.

Abschließend werden in Kapitel 9 mögliche Ansätze vorgestellt, um die Methoden dieser Arbeit weiterzuentwickeln und einen höheren Grad der Automatisierung zu erreichen.

2 Hydromorphologie

Die wissenschaftliche Disziplin der Hydromorphologie beschäftigt sich mit der „Gestalt, Formung und Struktur des Gewässerbetts einschließlich der Vorländer“ (DWA 2018b). Sie erforscht den vom fluvialen System geformten Teil der festen Erdoberfläche. „Als Gestalter der Landformen beherrscht das fluviale System die Landoberfläche der Erde.“ (Ahnert 2015, 153). Die formgebenden Prozesse laufen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen ab, daher sind auch die resultierenden hydromorphologischen Strukturen in ihrer Form und Größe vielfältig (siehe Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Hydromorphologische Formenvielfalt (beispielhaft)

Eine Kartierung der Gewässerstrukturen (Sohl-, Ufer- und Auenstrukturen) ist für verschiedene hydromorphologische Fragestellungen von Bedeutung (z.B. zur Bewertung des Gewässerzustands oder der Erfolgskontrolle von Renaturierungsmaßnahmen). Zur Erfassung und Bewertung des hydromorphologischen Zustands von Gewässern existieren verschiedene Verfahren. Während einige Verfahren auf aufwendige Geländekartierung mithilfe von Erfassungsbögen setzen, steigt die Bedeutung der computergestützten Auswertung von Fernerkundungsdaten (z.B. Luftbilder, Satellitenaufnahmen, Digitale Geländemodelle), da diese eine Zeit- und Kostenersparnis verspricht.

Die quantitative Beschreibung und Abgrenzung von hydromorphologischen Strukturen kann der Fachdisziplin der Geomorphometrie zugeordnet werden. In der Geomorphometrie werden quantitative Verfahren zur Analyse der geometrisch-topologischen Merkmale des Georeliefs¹ (Dikau et al. 2019, 82), wie z.B. der Abmessung, Lage und Anordnung der Strukturelemente, verwendet. Zur systematischen Erfassung von Strukturen aus Fernerkundungsdaten ist eine Strukturklassifikation nach messbaren Merkmalen erforderlich. Ferner ist die Festlegung einer der Fragestellung angepassten Untersuchungsskala wichtig.

¹ Als Relief wird die „Oberflächengestalt der Erde resp. Form eines Geländes“ bezeichnet (DWA 2018a). Für die Reliefanalyse wird häufig auch der Begriff Terrainanalyse verwendet (Pike et al. 2009, 4–5).

2.1 Kartierung hydromorphologischer Strukturen

Die Bewertung der Gewässerstruktur und die dafür erforderliche Kartierung der hydromorphologischen Strukturelemente ist für verschiedene wasserwirtschaftliche Fragestellungen von Bedeutung. Die hydromorphologischen Bedingungen in einem Gewässer tragen nach Definition der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) zum Zustand eines Gewässers bei. Die WRRL dient der Schaffung eines gemeinsamen Ordnungsrahmens für die Wasserpolitik der EU und der Definition von gemeinsamen Zielen. Ein wesentliches Ziel ist die Erreichung und Sicherung eines „guten ökologischen und chemischen Zustands“ aller Gewässer (Art. 4 Abs. 1 a), WRRL). Zur Bewertung des Gewässerzustands werden in der WRRL zahlreiche Qualitätsparameter definiert. Neben verschiedenen biologischen Qualitätsparametern sind für die Bewertung des ökologischen Zustands eines Gewässers auch hydromorphologische Parameter heranzuziehen; darunter werden unter anderem morphologische Bedingungen wie die *Tiefen- und Breitenvariation*, *Struktur und Substrat des Flussbettes* sowie die *Struktur der Uferzone* verstanden (Anhang V 1.1.1, WRRL). Zur Bewertung des Gewässerzustands ist demnach eine Erfassung der vorhandenen Strukturvielfalt erforderlich. Die Verbesserung des Gewässerzustands und die eigendynamische Entwicklung eines Gewässers in Richtung einer naturnahen Gewässerlandschaft kann durch verschiedene bauliche Maßnahmen unterstützt werden. Für eine zielführende Planung von Maßnahmen ist die Kenntnis über den aktuellen Zustand des Gewässers wichtig. Darauf aufbauend können Entwicklungsziele definiert sowie Maßnahmen entworfen und priorisiert werden. Um die Wirksamkeit der Maßnahmen zu messen, wird der Zustand des Gewässerabschnittes erneut bewertet und mit der Zielsetzung verglichen. Daher ist auch für die Planung und die Erfolgskontrolle von Maßnahmen an Fließgewässern eine Erfassung des Gewässerzustands notwendig.

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl verschiedener Verfahren zur Kartierung und Bewertung der Gewässerstruktur entwickelt. Um die bundesweite Vergleichbarkeit von Gewässerstrukturbewertungen zu erhöhen, wurden von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) allgemeine Empfehlungen zur Gewässerstrukturkartierung erarbeitet (LAWA 1999, 5). Mit dem Vor-Ort-Verfahren (LAWA 1999) und dem Übersichtsverfahren (LAWA 2002) wurden zwei Vorgehensweisen veröffentlicht, die bei der Erhebung der Gewässerstruktur als Orientierung dienen können. Das Vor-Ort-Verfahren setzt auf eine unmittelbare Erhebung an den Gewässern mithilfe von standardisierten Erhebungsbögen. Das Übersichtsverfahren stützt sich auf die Auswertung von Luftbildern und Karten und wird für die Erstellung überregionaler Übersichtskarten empfohlen. Die Bewertung des hydromorphologischen Gewässerzustands erfolgt bei der LAWA-Gewässerstrukturkartierung anhand von verschiedenen festgelegten Einzelparametern, die sich auf die Gewässerbettdynamik und die Auedynamik beziehen. Mit den Parametern *Besondere Sohlenstrukturen*, *Besondere Uferstrukturen* und *Besondere Umfeldstrukturen* spielen dabei auch die hydromorphologischen Strukturelemente eine Rolle. Das Ergebnis der Strukturkartierung ist die Zuordnung des untersuchten Gewässerabschnittes zu einer von sieben Strukturklassen. Grundlage der Bewertung der Gewässerstruktur ist der Vergleich mit einem Referenzzustand. Als Referenzzustand dient der heutige potenziell natürliche Gewässerzustand (hpnG). Dies ist derjenige Zustand des Gewässers, welcher sich nach Rückbau aller Anlagen und Einstellung aller Nutzungen an diesem Gewässer einstellen würde und er fungiert als *Leitbild*. Orientierung bei der Leitbilderstellung bieten die 25 Fließgewässertypen (LAWA-Typen), die für das Gebiet

der Bundesrepublik Deutschlands beschrieben wurden (Pottgiesser und Sommerhäuser 2008; Pottgiesser 2018). Bei der Gewässerstrukturkartierung nach LAWA wird somit bewertet, wie weit sich ein Gewässerabschnitt von seinem heutigen potenziell natürlichen Zustand entfernt hat, also wie stark er verändert wurde (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Siebenstufige Gewässerstrukturklassen (verändert nach LAWA 2019, 52)

Strukturklasse	Indexspanne	Grad der Veränderung	Kartendarstellung
1	1,0 – 1,7	unverändert	dunkelblau
2	1,8 – 2,6	gering verändert	hellblau
3	2,7 – 3,5	mäßig verändert	dunkelgrün
4	3,6 – 4,4	deutlich verändert	hellgrün
5	4,5 – 5,3	stark verändert	gelb
6	5,4 – 6,2	sehr stark verändert	orange
7	6,3 – 7,0	vollständig verändert	rot

Das Übersichtsverfahren der LAWA (2001) war bereits auf der Auswertung luftgestützter Daten und Karten begründet. Mit der Überarbeitung der Verfahrensempfehlungen zur Gewässerstrukturkartierung hat die LAWA die Bedeutung von Luftbildern und weiterem Karten- und Datenmaterial für die Strukturkartierung von mittelgroßen bis großen Gewässern erneut hervorgehoben (LAWA 2019, 30). Bei mittelgroßen bis großen Fließgewässern soll die Kartierung vorrangig datenbasiert erfolgen und Geländeerhebungen untergeordnet durchgeführt werden, z.B. zu Verifizierungszwecken oder zur Erhebung noch fehlender Parameter. Als nützliche Grundlagendaten werden hier unter anderem aktuelle Luftbilder und hochaufgelöste Digitale Geländemodelle genannt (LAWA 2019, 30).

Mit dem Valmorph-Verfahren (eVALuation of MORPHology) hat die BfG ein weiteres Verfahren entwickelt, um die hydromorphologischen Bedingungen von Fließgewässern quantitativ zu erfassen und zu bewerten (Quick et al. 2017). Das Verfahren wurde auf die Anwendung an Bundeswasserstraßen ausgelegt. Bei schiffbaren Gewässern ist die Aufrechterhaltung der anthropogenen Nutzung Voraussetzung, sodass es zweckmäßig ist, die Bewertung des Gewässerzustands nicht an dem hpnG auszurichten, sondern eine an die besonderen Nutzungsanforderungen angepasste Bewertungsgrundlage zu entwickeln (Quick et al. 2017, 9). Auch das Valmorph-Verfahren setzt auf die Nutzung verschiedener Parameter, hier *Indikatoren* genannt, um den hydromorphologischen Zustand der Bundeswasserstraßen zu bewerten. Mit dem Indikator *Sohlstrukturen und Auenstrukturen* werden dabei auch die hydromorphologischen Strukturelemente berücksichtigt (Quick et al. 2017, 17). Die Erfassung des hydromorphologischen Zustands erfolgt im Rahmen des Valmorph-Verfahrens vorrangig mittels computergestützter Datenauswertung (z.B. auf Basis von Luftbilddaufnahmen,

Satellitenaufnahmen, Drohnenaufnahmen, ALS²-Daten und verschiedenen Kartenwerken) (Quick et al. 2017, 25).

Die Erfassung hydromorphologischer Strukturen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Bei der LAWA-Gewässerstrukturkartierung werden die besonderen Strukturen (Lauf-, Sohl-, Ufer- und Umfeldstrukturen) sowie Bänke in ihrer Anzahl erfasst (LAWA 1999, 12, 2019, 51). Das Valmorph-Verfahren der BfG sieht eine flächenhafte Erfassung der Sohl- und Auenstrukturen vor (Quick et al. 2017, 107). Die Strukturen sollen anhand ihres Flächeninhaltes oder ihres Umfangs in ihrer räumlichen Ausdehnung abgegrenzt werden. Als Ausnahme werden linienhafte Strukturen wie Böschungen genannt, die anhand ihrer Längen erfasst werden. Die räumliche Abgrenzung der Sohl- und Auenstrukturen erfolgt dabei durch Verortung in Geografischen Informationssystemen (GIS) und Digitalisierung (Flächenpolygone und Linien) (Quick et al. 2017, 108–109). Durch digitale Auswertung luftgestützter Daten kann der Aufwand für Geländeerhebungen bei der Strukturkartierung reduziert werden, was besonders bei großen oder schwer zugänglichen Gewässerabschnitten sinnvoll ist.

Einen immer höheren Stellenwert bei der Erfassung von Geländestrukturen nehmen auch computergestützte, (teil-)automatisierte Verfahren ein. Die quantitative, computergestützte Beschreibung und Erfassung hydromorphologischer Strukturen auf Basis digitaler Daten fällt unter die Fachdisziplin der Geomorphometrie, die von Pike et al. (2009, 4) folgendermaßen definiert wird: “Geomorphometry is the science of topographic quantification; its operational focus is the extraction of land-surface parameters and objects from digital elevation models (DEMs).” Zur Analyse Digitaler Geländemodelle (DGM) stehen verschiedene GIS und spezielle Software für Reliefanalysen zur Verfügung. Auch Verfahren der digitalen Bildanalyse werden vielfach zu Zwecken hydromorphologischer Kartierung eingesetzt. Durch den technischen Fortschritt ist heutzutage eine große Fülle an luftgestützten, hochaufgelösten Daten erhältlich (z.B. hochaufgelöste Digitale Geländemodelle, multispektrale Luftbilder). Aus diesen Daten können verschiedene Parameter berechnet werden, mit denen die abgebildete Erdoberfläche gegliedert und Methoden entwickelt werden können, um Strukturen eindeutig flächenhaft abzugrenzen. Für die Entwicklung verlässlicher, computergestützter Methoden zur Erfassung hydromorphologischer Strukturen ist neben der Wahl geeigneter Parameter (siehe Kapitel 3) und der Definition von Gliederungseinheiten (siehe Abschnitt 2.3) die Wahl einer geeigneten Untersuchungsskala (Datenauflösung und Größe des Berechnungsfensters) wichtig (Dikau et al. 2019, 79–82).

2.2 Skalen hydromorphologischer Systeme

Geomorphologische und hydromorphologische Prozesse laufen auf unterschiedlichen Größenskalen ab und haben kleinräumig und großräumig unterschiedliche Auswirkungen. Daher sind auch die hydromorphologischen Strukturen skalenabhängig. Das Georelief setzt sich aus vielfältigen Formen unterschiedlicher Größenordnungen zusammen, sodass eine Untersuchung der Form der festen Erdoberfläche je nach Betrachtungsmaßstab

² ALS = Airborne Laserscanning, luftgestütztes Laserscanning zur Erhebung von Geländehöhen (siehe Kapitel 5)

unterschiedliche Ergebnisse und Erkenntnisse liefert. Daher stellt die Wahl einer geeigneten Untersuchungsskala für die Untersuchung hydromorphologischer Formen – ausgerichtet auf die jeweilige Forschungsfrage – eine zentrale Herausforderung dar.

“The search for the optimal spatial scale for observing landforms to understand physical processes is a fundamental issue in geomorphology.” (Tarolli und Dalla Fontana 2009, 47)

Die Untersuchungsskala muss sich an der Größe der zu untersuchenden Strukturen orientieren und beeinflusst die Analyseergebnisse maßgeblich. Limitierungen für die Untersuchungsskala können sich aus den vorhandenen Datengrundlagen ergeben. Die Auflösung der Grundlagendaten gibt die Mindestgröße der Strukturen vor, die mit den Daten untersucht werden können. Bei der Analyse der Daten mithilfe von Rasterfunktionen spielt auch die Wahl der Größe des Berechnungsfensters eine große Rolle. Zu hoch aufgelöste Berechnungen messen untergeordneten Strukturen größere Bedeutung bei und übergeordnete Strukturen lassen sich schwer abgrenzen. Für plausible Analysen muss daher auch die Größe des Berechnungsfensters an die Größenordnung der zu untersuchenden Strukturen angepasst werden. ArcGIS und GRASS GIS bieten verschiedene Möglichkeiten der Skalenanpassung, welche am Ende dieses Unterkapitels vorgestellt werden.

2.2.1 Größenordnungen hydromorphologischer Strukturen

Die hohe räumliche Vielfalt der Formen der festen Erdoberfläche wird in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen betont. Während Penck (1894a, 33) ganz allgemein von einer „großen Mannigfaltigkeit der Formen der Erdoberfläche spricht“, führt Ahnert (2015, 13) beispielhaft auf, dass die „Größe der Landformen [...] vom millimetergroßen Regentropfeneindruck bis zum Kontinentalschild mit Durchmesser von Tausenden von Kilometern [reicht].“ Einzelne Strukturelemente existieren dabei in jeweils charakteristischen Größenbereichen (Rasemann 2003, 30) und schließen sich hierarchisch zusammen, um größere Formenkomplexe zu bilden (Penck 1894a, 34).

Bei der Untersuchung geomorphologischer Strukturen und Prozesse werden daher verschiedene räumliche Größenskalen unterschieden. Je nachdem, auf welche Größenordnung der Fokus einer Untersuchung gelegt wird, sind unterschiedliche geomorphologische Prozesse für die Bildung und Umformung von Strukturen entscheidend (Kern 1995, 57–58). Zur räumlichen Gliederung des Reliefs gibt es verschiedene Ansätze. Meist beziehen sich die Ansätze auf die „Basisbreite“ einer geomorphologischen Form, also eine charakteristische Längen- oder Breitenausdehnung, auf ihre Fläche oder die maximale Höhe (Dikau et al. 2019, 68). Dikau et al. (2019, 68–69) stellt eine räumliche Gliederung des Reliefs vor, die Größenordnungen des Pico- bis Megareliefs unterscheidet; dieser Ansatz ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

Raumskale	Größenhaupttyp			Größentyp			Beispiele
	B (m)	F (m ²)	T/H (m)	B (m)	F (m ²)	T/H (m)	
Megarelief	>10 ⁶	>10 ¹²		>10 ⁶	>10 ¹²		Schilde, Ebenheiten
Makrorelief	10 ⁶	10 ¹²	>10 ³	10 ⁶	10 ¹²	>10 ³	Ebenen, Kontinentale Gebirge
	10 ⁵	10 ¹⁰		10 ⁵	10 ¹⁰		Mittelgebirge, Plateaus, Tiefebene
Mesorelief	10 ⁴	10 ⁸	10 ³	10 ⁴	10 ⁸	10 ⁵	Mittelgebirge, Plateaus, Tiefebene, Täler
	10 ³	10 ⁶		10 ³	10 ⁶		Moränenhügel, Talböden, Täler
Mikrorelief	10 ²	10 ⁴	10 ¹	10 ²	10 ⁴	10 ¹	Doline, Düne, Toteisloch, Hangmulde, Rutschung
	10 ¹	10 ²		10 ¹	10 ²		Erosionsrinne, -graben, Bachbett, Steinpolygon
Nanorelief	10 ⁰	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ⁰	10 ⁻¹	Karren, Tafoni, Erosionsrinne, Thufure
Picorelief	10 ⁻²	10 ⁻⁴	<10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻⁴	<10 ⁻¹	Gletscherschrammen

B = Erstreckung (Basisbreite) F = Fläche T/H = Tiefe/Höhe

Abbildung 2-2: Größenordnungstypen von geomorphologischen Reliefeinheiten (verändert nach Dikau et al. 2019, 68)

Im Zusammenhang mit der Größenordnung einer geomorphologischen Form steht auch dessen Existenzdauer. Ahnert (2015, 13) nennt diesen Zusammenhang „Formgrößen-Existenzdauer-Regel“. Damit ist gemeint, dass größere Formen i.d.R. über einen längeren Zeitraum existieren als kleine, und kleinere Formen demgegenüber kürzere Entstehungszeiten haben und auch schneller umgeformt werden (Ahnert 2015, 13; Rasemann 2003, 31). Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei der Umformung größerer Strukturen wesentlich mehr Material bewegt werden muss, wozu mehr Arbeit nötig ist. Das hierarchische Zusammenspiel der Reliefformen resultiert somit nicht nur aus den Größenunterschieden, sondern auch aus den verschiedenen Zeitrahmen der Formexistenz. So sitzen kleinere und jüngere Geländestrukturen häufig auf größeren, älteren Formen auf und überprägen diese (Dikau et al. 2019, 69; Rasemann 2003, 31–32).

Neben den allgemeinen Skalenansätzen der Geomorphologie gibt es auch Theorien, die diese Gedanken speziell auf hydromorphologische Formen und Prozesse beziehen. Zum Verständnis von gewässermorphologischen Vorgängen verschiedener räumlicher und zeitlicher Größenordnungen hat Klaus Kern (1995) das sogenannte „Raum-Zeit-Modell“ entwickelt. In diesem „räumlich-zeitlichen Modell der morphologischen Gewässerentwicklung“ (Kern 1995, 57) definiert er insgesamt sechs abgegrenzte, hierarchisch geordnete Raumeinheiten, welche von Einzugsgebieten bis zu Mikrohabitaten reichen (siehe Abbildung 2-3). Jeder der Raumeinheiten ordnet er einen zeitlichen Rahmen zu, in welchem die morphologischen Entwicklungen ablaufen. Für jede dieser Raum-Zeit-Einheiten gibt er Orientierungswerte der

räumlichen und zeitlichen Größenordnung an. In jeder Raum-Zeit-Ebene sind unterschiedliche *äußere Einwirkungen* ausschlaggebend, welche zu unterschiedlichen morphologischen Veränderungen (von Kern als *geomorphologische Prozesse* bezeichnet) führen (Kern 1995, 57–58). Die geomorphologischen Prozesse einer Raumeinheit sind wiederum äußere Einwirkungen für die nachgeordnete Ebene (Kern 1995, 58). Dieses Zusammenspiel von Ein- und Auswirkungen beschreibt Kern für jede Raum-Zeit-Einheit. Sein Fokus liegt dabei auf der Beschreibung von Gleichgewichtsvorgängen, aber auch auf der Untersuchung von Auswirkungen größerer Eingriffen in das System, sogenannte *Katastrophen* (Kern 1995, 70–95).

Das Resultat der raum- und zeitabhängigen gewässermorphologischen Prozesse sind hydromorphologische Geländestrukturen in großer räumlicher und zeitlicher Vielfalt. Für hydromorphologische Untersuchungen stellt die Multiskaligkeit des Reliefs eine zentrale Herausforderung dar (Dikau et al. 2019, 53). Untersuchungen müssen je nach Fragestellung an den räumlichen und zeitlichen Maßstab der Strukturen angepasst werden (Ahnert 2015, 14–15). Auch die verwendeten Parameter und Methoden müssen an die räumlichen und zeitlichen Größenordnungen der zu untersuchenden Systeme ausgerichtet werden (Rasemann 2003, 33).

Die Untersuchungen dieser Arbeit zur Erfassung von Ufer- und Auenstrukturen konzentrieren sich auf den Größenordnungsbereich des Mikroreliefs nach Dikau et al. (2019); dieser Bereich ist in Abbildung 2-2 blau hinterlegt. Im Raum-Zeit-Modell nach Kern (1995) entspricht der Bereich des Mikroreliefs mit einer Größenordnung von mehreren Metern bis Zehnermetern der Raum-Zeit-Einheit „Bettstrukturen, Auenhabitate“ (ebenfalls blaue Markierung in Abbildung 2-3). Als charakteristischen Zeitrahmen, in dem Formbildungs- und Umformungsprozesse in dieser Raumeinheit stattfinden, gibt Kern (1995) eine Größenordnung von mehreren Monaten bis Jahren an. Die Raum-Zeit-Einheit „Bettstrukturen, Auenhabitate“ wird geprägt durch die vielfältigen morphologischen Lebensräume (z.B. Tief- und Flachwasserzonen, Bänke, Inseln, Buchten, Flach- und Steilufer, Altwasser und Altarme). Für die Umformung und Neubildung dieser Strukturen ist die Strömungskraft und der Feststoffeintrag mittlerer bis größerer Hochwasser hauptverantwortlich (Kern 1995, 68). Die resultierenden geomorphologischen Prozesse sind unter anderem eine kontinuierliche Auskolkung und Auflandung, Uferabbrüche, eine Verlandung von Auengewässern oder Umlagerung von Bänken (Kern 1995, 67).

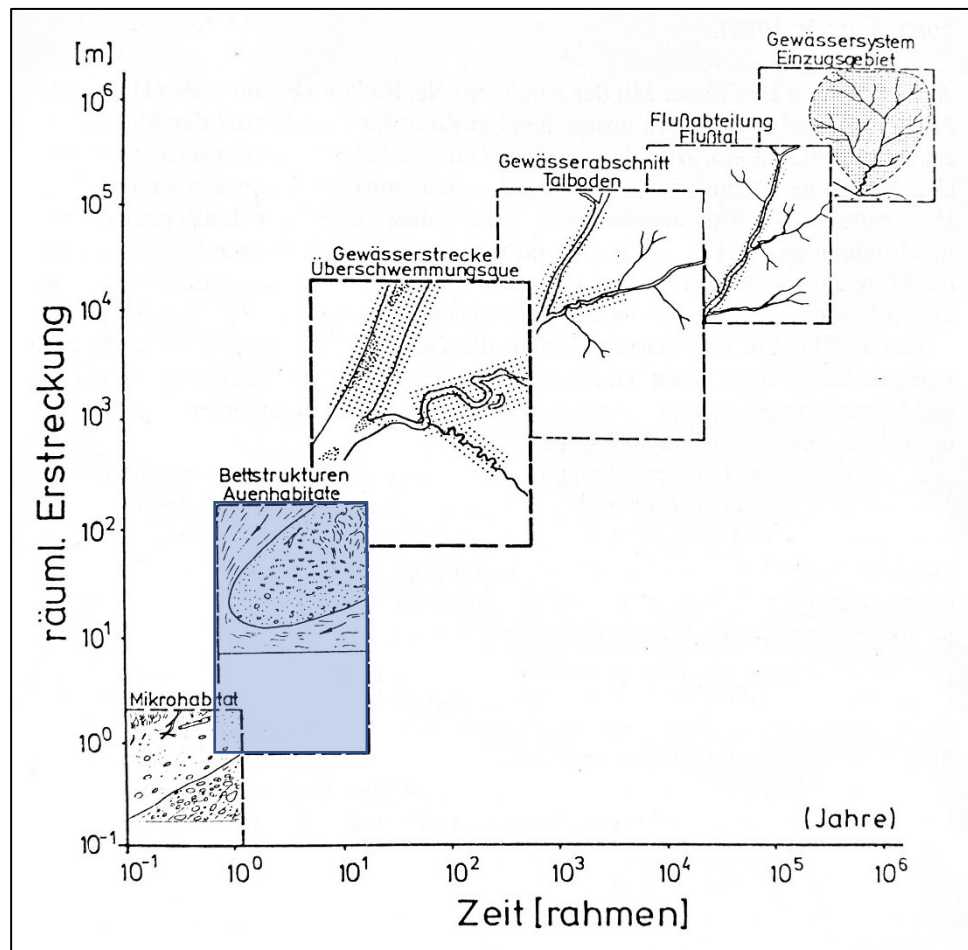


Abbildung 2-3: Raum-Zeit-Modell der morphologischen Gewässerentwicklung (Kern 1995, 5)

2.2.2 Räumliche Auflösung von Daten zur Erfassung von Gewässerstrukturen

Für die Untersuchung von hydromorphologischen Strukturen ist die Auflösung der verfügbaren Grundlagendaten wichtig. So können sich aus einer geringen Datenauflösung Limitationen dafür ergeben, welche Größenordnungen von Strukturen mit diesen Daten untersucht werden können. Eine Orientierung für die Mindestgröße der Strukturen oder geomorphologischen Merkmale, die mit einem Datensatz erfasst werden kann, stellt die *Nyquist frequency* dar. Der Begriff der *Nyquist frequency* kommt ursprünglich aus dem Bereich der Signaltheorie und wurde von Warren et al. (2004) auf die Analyse von Rasterdaten übertragen. Warren et al. (2004, S. 228) definieren die *Nyquist frequency* als die *doppelte Zellengröße* eines Rasterdatensatzes. Diese stellt die untere Grenze der Größe der Geländemerkmale dar, die durch den betreffenden Rasterdatensatz abgegrenzt werden können. Umgekehrt betrachtet muss also die Rastergröße eines Datensatzes weniger als halb so groß sein wie die kleinsten Merkmale (*geografic unions*), die untersucht werden sollen.

Im Vergleich zu den bei Bildanalysen häufig verwendeten Satellitenaufnahmen mit einer Auflösung in der Größenordnung von mehreren Metern bieten hochaufgelöste Luftbilder – gewonnen durch flugzeug- oder drohnengestützte Erfassung – wesentlich größere

Möglichkeiten, auch kleinere Strukturen zu untersuchen. Ebenso ist bei digitalen Höhendaten eine ausreichend genaue Auflösung nötig, um relevante Strukturen zu erkennen. Die Grundlagendaten dieser Arbeit sind ausnahmslos sehr hoch aufgelöst (Bildraten: 2 cm bis 4,5 cm, Höhendaten: 5 cm, vergleiche Kapitel 5). Nach Definition der *Nyquist frequency* wären auf Basis dieser Daten somit Strukturen ab einer Größenordnung von wenigen Zentimetern erkennbar. Für die Untersuchung von Ufer- und Auenstrukturen des Mikroreliefs mit einer Basisbreite von mehreren Metern bis Zehnermetern ist die Auslösung damit mehr als ausreichend.

Insbesondere bei Höhendaten ist eine zu hohe Auflösung jedoch nicht immer förderlich. Eine sehr feine Auflösung der Daten bildet selbst kleinste Unterschiede im Relief ab und misst ihnen dadurch für bestimmte Fragestellungen zu viel Bedeutung zu (*topographic noise*³) (Warren et al. 2004, 231; Rutzinger et al. 2007, 4). Größere, übergeordnete Strukturen sind dadurch schwerer oder zum Teil gar nicht erkennbar. Aus dem DGM des Untersuchungsgebiets „Kühkopf-Knoblochsaue“ wurde beispielhaft eine Karte der Neigungen mit der Originalauflösung des Datensatzes von 5 cm berechnet, diese ist in Abbildung 2-5 A dargestellt. Die Werte der Neigungen reichen von 0° (weiß) bis 85° (schwarz). Das Ergebnis ist eine sehr fein gemusterte Karte; einige stark geneigte Bereiche sind erkennbar, doch die meisten Flächen zeichnen sich durch ein kleinräumiges, unstrukturiertes Wechselspiel verschieden starker Neigungen aus. Durch die hohe Auflösung der Daten wird die Erdoberfläche in ihrer natürlichen Rauheit detailliert abgebildet. Zur Untersuchung übergeordneter Charakteristiken des Reliefs ist es nötig, das feine „Rauschen“ der Höhendaten abzuschwächen und die großräumigeren Strukturen hervorzuheben. Warren et al. (2004, 231) kommen in ihrer Studie zu der Erkenntnis, dass Neigungen, die mit stärker geglätteten Höhendaten berechnet werden, besser mit den im Gelände erhobenen Neigungen übereinstimmen.

Im Laufe einer Rasteranalyse existieren verschiedene Möglichkeiten der Skalenanpassung, um mit dieser Problematik umzugehen. Viele Funktionen zur Rasteranalyse schließen zur Berechnung einer bestimmten Kenngröße für eine Zelle deren unmittelbare Nachbarzellen mit ein: ein Berechnungsfenster definierter Größe wird dabei über jede Zelle gelegt und aus den Werten der eingeschlossenen Nachbarzellen die Kenngröße der zentralen Zelle berechnet (siehe Abbildung 2-4), anschließend wird das Fenster verschoben und der Wert der nächsten Zelle berechnet. In der englischsprachigen Literatur wird dieses „wandernde“ Berechnungsfenster *moving window* genannt.

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

Abbildung 2-4: Beispiel für ein 3 x 3 Zellen großes Berechnungsfenster

³ Als *topographic noise* bezeichnen Rutzinger et al. (2007, 4) den Einfluss von untergeordneten Reliefstrukturen sowie der Oberflächenrauheit.

Der Einfluss der Größe des *moving window* auf die Ergebnisse von Rasteranalysen wird in diversen Fachpublikationen thematisiert. Es hat sich gezeigt, dass ein zu kleines Berechnungsfenster dazu führt, dass untergeordnete Strukturen zu stark hervorgehoben werden und die Ergebnisse „noisy“ werden (Rutzinger et al. 2007, 4). Durch ein zu großes Berechnungsfenster wird das Relief jedoch stark geglättet, sodass relevante Strukturen nicht mehr erkennbar sind (Rutzinger et al. 2007, 4) und zudem die Lagegenauigkeit bei der Abgrenzung von Strukturen abnimmt (Rutzinger et al. 2012, 37). Es wird daher empfohlen, die Größe des Berechnungsfensters so zu wählen, dass sie der Größenordnung der zu untersuchenden Strukturen entspricht (Maukisch et al. 2007, 374; Rutzinger et al. 2007, 4). Die Größe des Berechnungsfensters ist also individuell an die jeweilige Fragestellung anzupassen. Bei der Untersuchung von Ufer- und Auenstrukturen ab einer Größenordnung von mehreren Metern sollte das Berechnungsfenster dementsprechend angepasst werden. Abbildung 2-5 zeigt die Ergebnisse der Neigungsberechnung für denselben Kartenausschnitt mit jeweils unterschiedlich groß gewählten Berechnungsfenstern (A: 15 x 15 cm, B: 1,5 x 1,5 m, C: 2 x 2 m, D: 4 x 4 m). Mit größerem Berechnungsfenster werden kleinräumige Höhenänderungen abgeschwächt und übergeordnete Strukturen – also in diesem Fall zusammenhängende, deutlich geneigte Flächen – werden hervorgehoben. Erwartungsgemäß ist dabei ein Glättungseffekt zu verzeichnen, da die Spanne der Neigungswerte mit größerem Berechnungsfenster abnimmt.

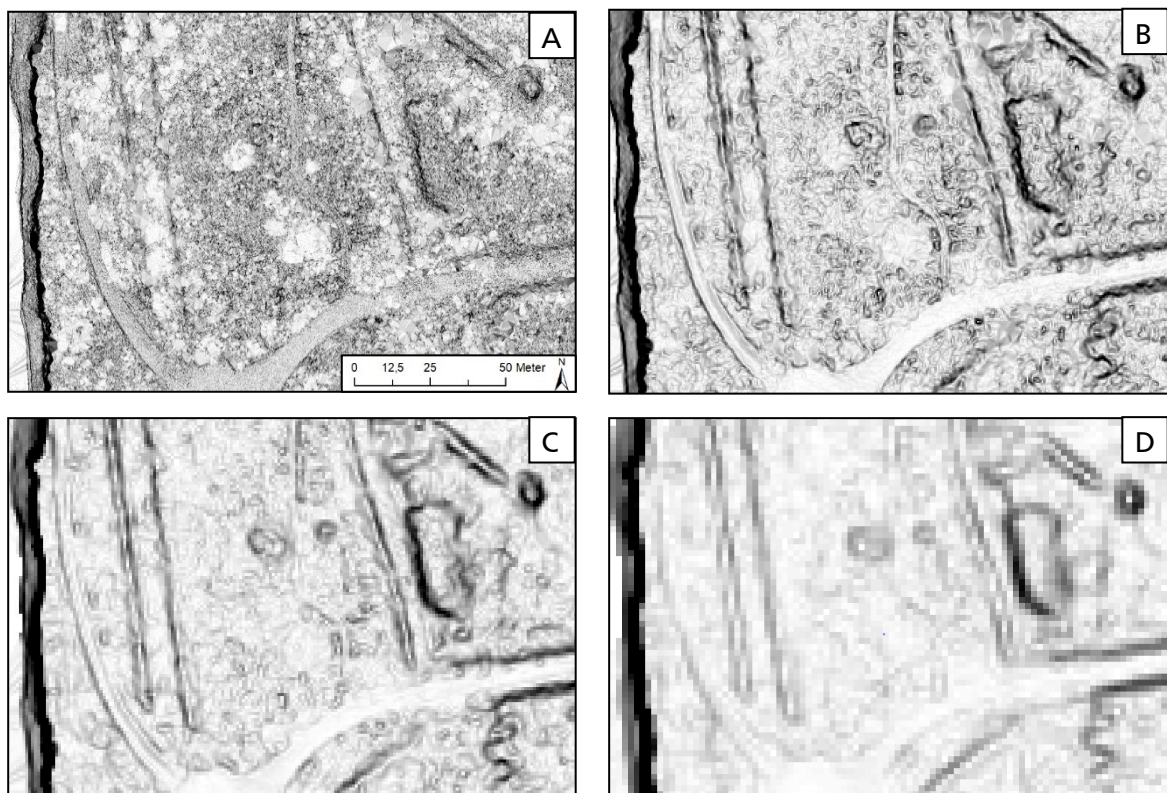


Abbildung 2-5: Visualisierung der Skaleneffekte: Karte der Neigungen für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes, berechnet mit verschiedenen Rastergrößen (A: 15 x 15 cm, B: 1,5 x 1,5 m, C: 2 x 2 m, D: 4 x 4 m)

Sowohl ArcGIS als auch GRASS GIS bieten verschiedene Möglichkeiten der Skalenanpassung während einer Analyse. Einerseits kann der Basisdatensatz in eine reduzierte Auflösung umgerechnet werden. Als Resultat wird ein neuer Rasterdatensatz mit einer geringeren räumlichen Auflösung generiert und dieser kann anschließend als Eingangsdatensatz für die Anwendung weiterer Analysefunktionen verwendet werden. In ArcGIS kann dies mit der Funktion *Aggregate* durchgeführt werden. Dabei kann die neue Auflösung durch Angabe des Faktors, der das Verhältnis der neuen Zellengröße zur Ausgangszellengröße angibt, frei gewählt werden. Außerdem kann die Art der Rasteraggregation bestimmt werden; bei der Option *Mean* erhält jede neue Zelle beispielsweise den Durchschnittswert der umschlossenen Eingabezellen. In GRASS GIS erfolgt die Änderung der Rasterauflösung über die Funktion *r.resample*. Diese Funktion passt die Rasterauflösung an die Auflösung an, die zuvor in den Regionseinstellungen *g.region* festgelegt wurde. Auch hier wird ein neuer Rasterdatensatz erstellt.

Nachteilig an dieser Methodik ist die Tatsache, dass die Ausgangsdaten grundlegend verändert werden und dass eine nachträgliche Anpassung der Untersuchungsskala nicht möglich ist. Für jede Skalenanpassung müsste ein neuer Rasterdatensatz erstellt werden. Eine gute Alternative stellen Möglichkeiten zur temporären Anpassung der Untersuchungsskala während eines Auswertungsverfahrens dar. Dazu gibt es die Option, die Auflösung für die Analysen allgemeingültig in den Umgebungseinstellungen des jeweiligen GIS-Projektes zu ändern. Darüber hinaus ist es möglich, die Änderung der Auflösung direkt in den Berechnungseinstellungen der jeweiligen Analysefunktion vorzunehmen.

Die oben bereits erwähnte Änderung der Regionseinstellungen in GRASS GIS ist auch unabhängig von der Erstellung eines neuen Rasterdatensatzes möglich. Über die Funktion *g.region* werden allgemeine Randbedingungen für die aktuelle Region⁴ verwaltet. Nach Änderung einer Randbedingung in den Regionseinstellungen gelten diese neuen Vorgaben (beispielsweise eine verringerte Auflösung) automatisch für alle folgenden Rasteranalysen, d.h. die Rechenschritte werden anschließend mit der neuen Auflösung durchgeführt. Das Ausgaberraster weist in diesem Fall ebenfalls die verringerte Auflösung auf. Auch ArcGIS bietet die Möglichkeit, die Umgebungseinstellungen anzupassen. Diese sind unter *Geoprocessing > Environment Settings* zu finden. Dort kann die Zellengröße für Rasteranalysen durch Angabe der gewünschten Auflösung (als Zellengröße in Metern) eingestellt werden. Die geänderten Umgebungseinstellungen werden anschließend ebenfalls von allen Analysewerkzeugen berücksichtigt.

Eine weitere Möglichkeit ist die Anpassung der Berechnungsskala direkt in den Einstellungen der jeweiligen Analysefunktion. In ArcGIS kann bei der Ausführung einer beliebigen Rasterfunktion über die Option „*Environments...*“ zu weiteren Einstellungsmöglichkeiten für die Ausführung dieser Rechenoption navigiert werden. Das Dialogfenster entspricht dem der allgemeingültigen *Environment Settings*, sodass auch hier die Zellengröße für Rasteranalysen beliebig eingestellt werden kann. Der Unterschied liegt darin, dass die getroffenen Einstellungen hierbei lediglich für die Ausführung der aktuellen Analysefunktion gelten. Das

⁴ Als *geografic region* wird in GRASS GIS der geografische Bereich bezeichnet, in dem die aktuellen Rasteranalysen durchgeführt werden. Dieser ist frei wählbar und kann auch nur ein Teilgebiet einer bestimmten Karte umfassen, um die Berechnungen zu beschleunigen.

Ausgaberraster der Berechnung hat bei dieser Methode ebenfalls die geänderte Auflösung. GRASS GIS bietet die Möglichkeit der Skalenanpassung nicht übergreifend bei allen Rasterfunktionen, verfügt aber über die Funktion *r.param.scale*, die eine skalenvARIABLE Berechnung diverser geomorphometrischer Parameter (z.B. Höhe, Neigung, Exposition, Profilkrümmung) erlaubt. Dort kann die Größe des Berechnungsrasters für jede Berechnung und jeden Parameter festgelegt werden, es wird also kein absoluter Wert für die gewünschte Zellenauflösung angegeben, sondern stattdessen die Größe der Zellenumgebung, die für die jeweilige Berechnung verwendet werden soll. So kann beispielsweise eingestellt werden, dass für die Berechnung der Neigung (*slope*) einer Zelle statt einem Berechnungsfenster von 3 x 3 Zellen beispielsweise 5 x 5, 9 x 9 oder 15 x 15 Zellen verwendet werden sollen⁵. Das resultierende Raster behält dabei die Auflösung, also die Zellengröße, des Ausgangsrasters bei, lediglich für die Berechnung der betreffenden Größe wurden die Daten einer größeren Zellenumgebung (*neighborhood, moving window*) verwendet.

2.3 Klassifikationsansätze

Zur Erfassung von Strukturen aus digitalen Vermessungsdaten ist es sinnvoll, zunächst eine Klassifikation der Strukturen vorzunehmen. In der Geomorphologie werden Verfahren der Reliefklassifikation verwendet, um die Landoberfläche der Erde in einzelne Basisformen zu gliedern. Dies dient der systematischen Beschreibung und Untersuchung des Georeliefs. Die Klassifikation erfolgt auf Basis von Gestalt, Ausdehnung und Anordnung der Landformen, orientiert sich also vorrangig an geometrischen und topologischen Eigenschaften. Auch Bildanalysen erfolgen in der Regel auf Basis einer Definition von Objektklassen. Die Objektklassen stellen dabei unterschiedliche Landbedeckungsarten dar, die sich in ihren spektralen Eigenschaften und der Textur unterscheiden. Die thematische Ausrichtung und der Detailgrad der Klassengliederung richtet sich stark nach der jeweiligen Fragestellung der Untersuchung.

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der Reliefklassifikation sowie der Bildung von Objektklassen zur Bildanalyse erläutert. Als Beispiel für einen Ansatz zur Gliederung der Erdoberfläche wird die Reliefklassifikation nach Penck (1894a) vorgestellt. In Unterabschnitt 2.3.3 wird anschließend die Klassifikation der Ufer- und Auenstrukturen erklärt, die für die Untersuchungen dieser Arbeit entwickelt wurde.

2.3.1 Ansätze zur Reliefklassifikation

Die Geomorphologie beschäftigt sich mit den Formen der festen Erdoberfläche. Neben der Untersuchung formbildender Prozesse und der Geomorphogenese, also der Entstehung von Reliefformen, liegt eine wesentliche Aufgabe darin, die resultierende Formenvielfalt des Georeliefs qualitativ und quantitativ zu beschreiben (Geomorphometrie). Die Basis dafür

⁵ Das Berechnungsfenster muss eine zu beiden Seiten symmetrische Ausbreitung von der zentralen Zelle haben, daher sind nur ungerade Fensterweiten möglich.

bilden Ansätze zur Reliefklassifikation. Auch für die Untersuchung hydromorphologischer Strukturen ist es sinnvoll, eine solche Klassifikation der Gewässerstrukturen durchzuführen.

Die Reliefklassifikation hat zum Ziel, das Georelief nach geometrisch-topologischen Eigenschaften systematisch in Einheiten zu untergliedern (Dikau et al. 2019, 62). Um die Dimensionsabhängigkeit geomorphologischer Formen zu berücksichtigen, werden zumeist hierarchische Klassifikationsansätze verfolgt (Dikau et al. 2019, 62; Rasemann 2003, 30). Die Verfahren beruhen dabei auf den Prinzipien der Disaggregation (Zerlegung komplexer Reliefeinheiten in kleinere Einheiten) und der Aggregation (Zusammenfassung untergeordneter Reliefeinheiten zu komplexeren Formen) (Dikau et al. 2019, 67). So wird das Georelief als „räumliche Hierarchie verschachtelter Reliefformen“ verstanden (Rasemann 2003, 33).

Besonders für Reliefstrukturen des Makroreliefs gibt es viele Klassifikationsansätze (Dikau et al. 2019, 70). Die Klassifikation beruht hierbei vorrangig auf geometrischen und topologischen Merkmalen. Messbare und eindeutige Parameter, wie z.B. die geometrischen Attribute Krümmung, Neigung und Exposition, ermöglichen eine möglichst objektive und reproduzierbare Gliederung des Reliefs sowie eine Umsetzung der Methodik in computergestützten Verfahren (Dikau et al. 2019, 67; Rasemann 2003, 39). Allgemein ist die Wahl der Parameter und Methoden immer am räumlichen Maßstab auszurichten (Rasemann 2003, 33).

Ein Ansatz zur Klassifikation des Georeliefs soll im Folgenden erläutert werden: die Reliefklassifikation nach Albrecht Penck (1894a), welche die Basis für zahlreiche hierarchisch-geomorphometrische Reliefklassifikationsverfahren des 20. Jahrhunderts bildet (Dikau et al. 2019, 67).

Penck (1894a) gliedert das Oberflächenrelief der Erde in verschiedene *Einzelformen*, die aus fundamentalen *Formelementen* gebildet werden. So beschreibt er beispielsweise ein Tal als Verknüpfung zweier „Gehänge“ mit einer Sohle (Penck 1894a, 34). Das gemeinsame Auftreten mehrerer Einzelformen bildet nach seiner Definition bestimmte *Landschaften*, z.B. Tallandschaften, und Landschaften sind wiederum Bestandteile von übergeordneten *Räumen*. Man kann bei dem Klassifikationsverfahren nach Penck (1894a) somit also von einem hierarchischen Ansatz sprechen, der auf der Disaggregation des Georeliefs in kleinste Formeinheiten beruht, welche wiederum zu Formgruppen höherer Ordnung zusammengefügt werden können. Die Abgrenzung der Formelemente nach Penck (1894a) basiert auf der Vorstellung, dass alle Formen der Erdoberfläche von *Gefällsflächen* (Penck 1894a, 33), also geneigten Flächen, begrenzt werden, die sich in *ein- oder ausspringenden* Kanten schneiden.

„Es wird die Oberfläche der Erde begrenzt von Abdachungen, die sich in mehr oder weniger scharfen ein- und ausspringenden Kanten schneiden. Ein jedes einzelne durch solche Kanten begrenzte Flächenstück meldet morphologisch eine Einheit und kann als obere Begrenzung eines Formelementes der Erdoberfläche bezeichnet werden.“ (Penck 1894a, 33)

Die aus den Formelementen zusammengesetzten Einzelformen lassen sich ebenfalls durch die Kanten der zusammenstoßenden Formelemente abgrenzen (Penck 1894a, 89). Je nachdem, wie die Flächen der Formelemente aufeinandertreffen, lassen sich demnach hohle (einspringende Kante) und erhabene Formen (ausspringende Kante) unterscheiden. Die Kanten sind in der Natur in der Regel nicht als scharfe Linien, sondern als gewölbte

Übergangsflächen ausgebildet; einspringende Kanten werden durch konkave, ausspringende Kanten durch konvexe Wölbung geformt (Penck 1894a, 89–90).

Penck zielt mit seiner Relieffklassifikation auf die Beschreibung des gesamten großräumigen Georeliefs der Erde ab. Er gibt allerdings keine eindeutige geometrische Definition der Basisformen an. Grundlegende Einzelformen, aus denen sich das Relief der Erde zusammensetzt, sind nach Penck (1894b) folgende:

- Eine *Ebene* ist eine ausgedehnte Fläche mit so geringen Höhenunterschieden, dass diese nicht wahrnehmbar sind (Penck 1894b, 2).
- Als *Tal* bezeichnet Penck (1894b, 58) einen langgezogenen, schmalen Einschnitt in der Landoberfläche, der geradlinig sowie gewunden verlaufen kann. Ein Tal besteht aus den seitlichen Talgehängen und einer Sohle, dem Talboden (Penck 1894b, 59).
- Hohle Formen, die zu allen Seiten von ansteigenden Böschungen umgeben sind, nennt (Penck 1894b, 203) *Wannen* (geschlossene Hohlformen). Er unterscheidet weiterhin *Kesselwannen* mit eher runder Form und die talähnlichen, länglichen *Thalungen* (Penck 1894b, 204).
- *Berge* (Penck 1894b, 171) sind Einzelerhebungen mit deutlichem Fuß. Kleine, ringsum abfallende Erhebungen nennt Penck (1894b) *Hügel*. Auch hier unterscheidet er zwei Arten der Hügel: langgedehnte, schmale *Wälle* und rundliche *Haufen* (Penck 1894b, 37).
- Einen *Gebirgskamm* definiert Penck (1894b, 146) als orografisch deutlich entwickelte Wasserscheide zwischen den Tälern, in Mittelgebirgen nennt er diese *Rücken*, in Hochgebirgen *Grate*. Das Gelände fällt beidseitig ab (Penck 1894b, 148).
- Als *Höhlungen* und *Höhlen* werden solche Reliefformen bezeichnet, die durch Überhänge und Einstülpungen der Erdoberfläche gebildet werden. (Penck 1894b, 447)

2.3.2 Ansätze zur Bildklassifikation

Auch in der Bildanalyse werden Strukturen klassifiziert. Die Klasseneinteilung stützt sich dabei jedoch weniger auf die Geometrie, sondern auf die spektralen Eigenschaften der Bildobjekte. Unterschiedliche Oberflächenbedeckungen unterscheiden sich aufgrund ihrer physikalischen, chemischen und morphologischen Eigenschaften (Richards und Jia 2006, 4) in ihren Reflexionseigenschaften verschiedener Wellenlängenbereiche. Neben den rein spektralen Eigenschaften können auch weitere Informationen zur Unterscheidung von Strukturen verwendet werden: charakteristisch für verschiedene Oberflächenbedeckungen ist auch die Textur, also das räumliche Muster von Grauwerten einer bestimmten Rasterumgebung (Ryherd und Woodcock 1996), sowie die Form (Mott 2005, 23). Auf die verschiedenen Parameter und Verfahren zur Bildklassifikation wird in Kapitel 3 näher eingegangen. In diesem Abschnitt wird der Fokus auf die Definition von verschiedenen Objektklassen gelegt.

Die einzelnen Klassen in der Bildanalyse sind als verschiedene Landbedeckungsarten zu verstehen, so kann beispielsweise eine grundlegende Unterscheidung in Vegetation, Wasser-

und Bodenflächen vorgenommen werden. Je nach Fragestellung werden Objektklassen unterschiedlicher thematischer Ausrichtung und unterschiedlichen Detailgrades definiert. Bei Anwendung von Verfahren der Bildklassifikation für hydromorphologische Fragestellungen finden unter anderem folgende Objektklassen / Strukturklassen Anwendung (vergleiche z.B. Marcus et al. 2003, Leckie et al. 2005, Spada et al. 2018, Demarchi et al. 2016):

- *Wasserflächen*
- *Wassertiefenklassen*
- *Besondere Sohlstrukturen* (z.B. Riffles und Pools)
- *Bänke und Inseln* (unbewachsen oder mit unterschiedlichem Grad des Bewuchses)
- *Verschiedene Substratklassen* (z.B. Sand, Kies oder Steine)
- *Ufer- oder Auenvegetation* (differenziert nach Arten oder nach Vegetationsdichte)
- *Totholz*

Im Allgemeinen ist die Aufstellung von Objektklassen in der Bildanalyse sehr anwendungsbezogen. Die Klassen werden je nach Fragestellung thematisch unterschiedlich untergliedert, universelle Klassifikationsansätze sind daher nicht sinnvoll. Nach Mott (2005, 25) ist es daher sogar ratsam, die Klassendefinition möglichst flexibel zu halten, damit sie gegebenenfalls während der Auswertung an neue Erkenntnisse angepasst werden kann, beispielsweise an neue Informationen dazu, welche Klassen sich nicht unterscheiden lassen oder welche sogar weiter untergliedert werden können.

2.3.3 Klassifizierung der Ufer- und Auenstrukturen

Wie bereits erläutert wurde, zeichnen sich Gewässerlandschaften durch eine hohe Variabilität an Strukturen aus, die unterschiedliche charakteristische Eigenschaften besitzen. Zur systematischen Untersuchung der verschiedenen Strukturen und zur Entwicklung von angepassten Erfassungsmethoden ist eine Klassifikation der Strukturen nach messbaren und objektiven Merkmalen zweckmäßig.

Das Ziel der folgenden Strukturklassifizierung ist die Definition von hydromorphologischen Grundformen und Grundstrukturen der Ufer- und Auenbereiche mit jeweils möglichst homogenen, messbaren, geometrischen oder radiometrischen Eigenschaften. Es wird die Annahme getroffen, dass für Einzelstrukturen einer Strukturklasse die gleiche Detektionsmethodik zielführend ist. Die Untersuchungen dieser Arbeit zielen sowohl auf die Erfassung von Strukturen, die sich durch ihre Form auszeichnen (geometrisch geprägt) als auch von Strukturen, die sich durch ihre Reflexionseigenschaften auszeichnen (radiometrisch geprägt), ab. Daher gelten sowohl die Grundlagen der Reliefklassifizierung als auch der Aufstellung von Objektklassen bei der Bildanalyse als hilfreiche Richtlinien zur Erstellung einer anwendungsbezogenen Strukturklassifizierung für die Analysen dieser Arbeit. Die erstellten Strukturklassen wurden daher zweigeteilt (geometrisch geprägte und radiometrisch geprägte Strukturklassen).

Die Klassifikation des ersten Teils der Strukturen basiert vorrangig auf der Form der Strukturen, die durch die Analyse von geometrischen Parametern aus digitalen Höhendaten bestimmt werden können. Der hierbei verfolgte Ansatz basiert auf der Vorstellung, die schon Penck (1894) vertreten hat, dass Formelemente durch Änderungen der Geländeneigung

ineinander übergehen und durch Kanten abgegrenzt werden können. Die Strukturklassifizierung wurde speziell für die Strukturen der Ufer- und Auenbereiche aus der Größenordnung des Mikoreliefs entwickelt, es handelt sich also um eine anwendungsbezogene Klassifikation. Die grundlegenden geometrischen Formtypen der Ufer- und Auenstrukturen⁶ wurden in dieser Arbeit wie folgt definiert:

- Eine *Böschung* ist eine langgezogene, geneigte Fläche. Sie wird durch eine Ober- und eine Unterkante, welche einen gleichgerichteten Verlauf haben, in ihrer Höhenerstreckung begrenzt. Eine spezielle Böschung ist die seitlich entlang des Gewässers verlaufende Uferböschung, und Böschungen finden sich auch in Auenbereichen; einzeln auftretend als Hänge oder Terrassenkanten oder als Teil anderer Strukturen wie Wällen oder Rinnen (s.u.).
- Ein *Wall* ist eine langgezogene, erhabene Oberflächenform mit seitlichen abfallenden Böschungen. Er wird durch zwei Unterkanten nach außen begrenzt und schließt i.d.R. eine oder mehrere Oberkanten ein. In Gewässerlandschaften treten Wälle beispielsweise als natürliche Uferrehnen oder künstliche Deiche auf. Auch Straßen oder Wege in Flussauen sind manchmal aufgeschüttet und nehmen eine wallartige Form an.
- Eine *Rinne* ist eine langgezogene, abgesenkte Struktur mit seitlichen aufragenden Böschungen. Sie wird durch zwei Oberkanten nach außen begrenzt und schließt i.d.R. eine oder mehrere Unterkanten ein. Rinnen sind in Auenbereichen z.B. in Form von ausgetrockneten alten Gewässerläufen oder künstlichen Entwässerungsgräben zu finden. Auch durch Erosion können rinnenartige Eintiefungen entstehen.
- Eine *Senke* ist ein runder bis amorpher, abgesenkter Bereich der Erdoberfläche, der zu allen Seiten ansteigt. Sie wird durch eine umlaufende Oberkante abgegrenzt, welche i.d.R. eine umlaufende Unterkante einschließt. Bei stark gerundetem Verlauf der Hohlform kann die Unterkante fehlen. Senken können beispielsweise in Form von trockenen oder periodisch wasserführenden Mulden oder ausgetrockneten Altgewässern in Auenbereichen vorkommen.

Für verschiedene andere Ufer- und Auenstrukturen sind die radiometrischen Eigenschaften⁷ charakteristisch, die Form dieser Strukturen kann sehr variabel sein. Daher wurde eine zweite Gruppe von Strukturkategorien definiert, die sich durch ihre Reflexionseigenschaften auszeichnen und durch die Analyse von Luftbilddaten erfasst werden können:

- Ein *Auengewässer* ist ein stehender oder fließender Wasserkörper der Auen. Fließende Auengewässer sind beispielsweise Auenbäche, Alt- oder Nebenarme sowie wasserführende Gräben. Typische Vertreter stehender Auengewässer sind Blänken (periodische wasserführende, flache Tümpel) und dauerhaft wasserführende Stillgewässer (z.B. Seen, Weiher, Altwasser).

⁶ Hydromorphologische Strukturen der Ufer und Auen können darüber hinaus auch andere Formen aufweisen, wie z.B. hügelartige Formen. Für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurde eine Auswahl der häufigsten Formtypen getroffen.

⁷ Reflexionseigenschaften und daraus abgeleitete Kenngrößen (vergleiche Kapitel 3)

- Als *Totholz* werden abgestorbene Bäume oder Baumteile bezeichnet (DWA 2018a). Durch Ufererosion können in Ufernähe befindliche Bäume zum Sturz gebracht werden. Ins Gewässer ragende Stämme stellen Strömungsenker oder Hindernisse dar. Kleinräumige und kurzlebige Ansammlungen von Ästen werden in dieser Arbeit nicht als Totholzstruktur definiert.
- Eine *Bank* ist eine ausgedehnte Erhebung der Gewässersohle, die durch Ablagerung von transportiertem Lockergestein des Gewässers entsteht (DWA 2018a). Sie kann aus verschiedenen Sedimenten bestehen (z.B. Sand, Kies, Schotter, Muscheln) und sich an unterschiedlicher Position im Gewässer bilden (z.B. Inselbank, Uferbank, Krümmungsbank). Bänke, die dauerhaft mit Vegetation bedeckt sind, werden Inseln genannt (DWA 2015).
- Unter *ufernen Sohlstrukturen* werden in der vorliegenden Arbeit die Bereiche der Sohle bezeichnet, die sich in unmittelbarer Ufernähe befinden und sich daher teilweise in Luftbildern abzeichnen⁸. Es handelt sich bei diesen Strukturen um erhabene sowie abgesenkte Bereiche der Gewässersohle, welche sich insbesondere durch unterschiedliche Wassertiefe auszeichnen (z.B. Flachwasserzonen, Kolke, Tiefenrinnen).

In den folgenden beiden Abbildungen sind die erstellten Strukturklassen zusammengestellt und veranschaulicht. Abbildung 2-6 beinhaltet die Strukturklassen, die sich vorrangig durch ihre Form auszeichnen, nämlich *Böschung*, *Wall*, *Rinne* und *Senke*. Neben einer skizzenhaften Darstellung des Strukturtyps ist auch eine kurze Definition angegeben. Die Strukturklassen, die vorrangig durch ihre radiometrischen Eigenschaften charakterisiert werden, sind in Abbildung 2-7 dargestellt; nämlich *Auengewässer*, *Totholz*, *Bank* und *ufernahe Sohlstrukturen*.

⁸ Hintergrund dieser Definition ist die Tatsache, dass sich in hochauflösenden Luftbildern in unmittelbarer Nähe zur Wasser-Land-Grenze unter der Wasseroberfläche der Sohlbereich noch leicht abzeichnet und klassifizieren lässt (insbesondere auf der Wassertiefe basierende Strukturen).

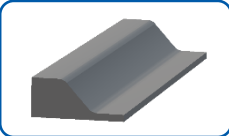
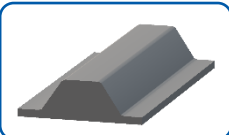
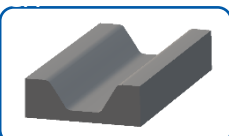
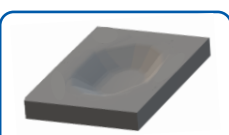
METR		Böschung	langgezogene, geneigte Fläche
		Wall	langgezogene, erhabene Oberflächenform mit seitlichen abfallenden Böschungen
		Rinne	langgezogene, abgesenkte Struktur mit seitlichen aufragenden Böschungen
		Senke	runder bis amorpher, abgesenkter Bereich der Erdoberfläche, der zu allen Seiten ansteigt

Abbildung 2-6: Strukturklassen Teil 1 (geometrisch geprägt)

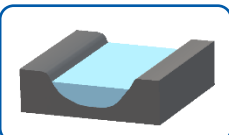

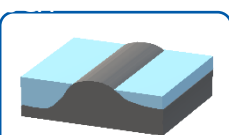
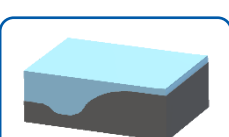
DMETR		Auen-gewässer	stehender oder fließender Wasserkörper der Auen
		Totholz	Element aus abgestorbenem Holz
		Bank	Erhebung der Gewässersohle durch Ablagerung von transportiertem Sediment
		Ufernahe Sohlstrukturen	tiefere oder flachere Bereiche des Gewässers in unmittelbarer Ufernähe

Abbildung 2-7: Strukturklassen Teil 2 (radiometrisch geprägt)

3 Parameter zur Detektion von Ufer- und Auenstrukturen

Zur Detektion hydromorphologischer Strukturen aus Fernerkundungsdaten werden in dieser Arbeit sowohl geometrische als auch radiometrische Parameter untersucht. Geometrische Parameter auf der einen Seite können zur Beschreibung der Form und Gestalt von Strukturen verwendet werden, welche aus Höhendaten – beispielsweise in Form eines DGM – erfasst werden kann (Reliefanalyse). Auf der anderen Seite zeichnen sich einige Strukturen auch durch radiometrische Parameter⁹ aus, die bei der Auswertung von Luftbilddaten genutzt werden können, um beispielsweise unterschiedliche Materialien bzw. Oberflächenbedeckungen zu erkennen (Bildanalyse). Die Untersuchung messbarer Parameter bildet die Grundlage für die Entwicklung objektiver und reproduzierbarer Analysemethoden (Dikau et al. 2019, 67). In den folgenden Abschnitten werden daher nützliche geometrische und radiometrische Kenngrößen vorgestellt und ihre Funktion sowie mögliche Anwendungen erläutert. Der Schwerpunkt dieser Arbeit wird auf die Untersuchungen der geometrischen Parameter gelegt, daher werden diese im Folgenden detaillierter ausgeführt.

3.1 Geometrische Parameter

Um die Gestalt von Reliefformen zu beschreiben, werden geometrische Parameter verwendet. So basieren bekannte Ansätze der Reliefklassifikation in der Geomorphologie auf geometrischen Parametern wie der Krümmung oder Neigung (vergleiche Kapitel 2). In den folgenden Abschnitten werden die Parameter *Höhe*, *Neigung*, *Exposition*, *Krümmung* und der *Sky-View Factor* vorgestellt. Die Ergebnisse einer beispielhaften Berechnung dieser Parameter für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes sind in Abbildung 3-1 visualisiert. Auf die Einzelabbildungen wird im Folgenden bei der Vorstellung des jeweiligen Parameters detaillierter eingegangen.

Insbesondere in der computergestützten Geomorphometrie und Hydromorphometrie spielen messbare geometrische Parameter, die aus digitalen Höhendaten wie z.B. Digitalen Geländemodellen berechnet werden können, eine große Rolle. Verschiedene GIS-Software bietet heutzutage viele Tools zur Berechnung grundlegender geometrischer Parameter sowie abgeleiteter Größen. Dabei liefert die Berechnung der Kenngrößen jeweils einen neuen Rasterdatensatz, der jeder Zelle einen Wert für den berechneten geometrischen Parameter zuordnet. Durch Interpretation und Auswertung der räumlichen Verteilung der berechneten Größen können Reliefstrukturen z.B. unter Zuhilfenahme von Schwellenwerten detektiert und abgegrenzt werden. Bei der Berechnung vieler geometrischer Parameter werden zusätzlich zu dem Höhenwert einer jeweiligen Zelle auch die Höheninformationen einer definierten Pixelumgebung genutzt. Hierbei ist die Wahl einer angepassten Untersuchungsskala wichtig (vergleiche Unterabschnitt 2.2.2).

⁹ Der Ausdruck „radiometrische Parameter“ wird in Anlehnung an Roelens et al. (2018, 13) für Kenngrößen verwendet, die aus den Reflexionsinformationen eines Luftbildes gewonnen werden, wie z.B. die Reflexionsintensitäten einzelner Spektralkanäle oder die daraus berechneten spektralen Indizes.

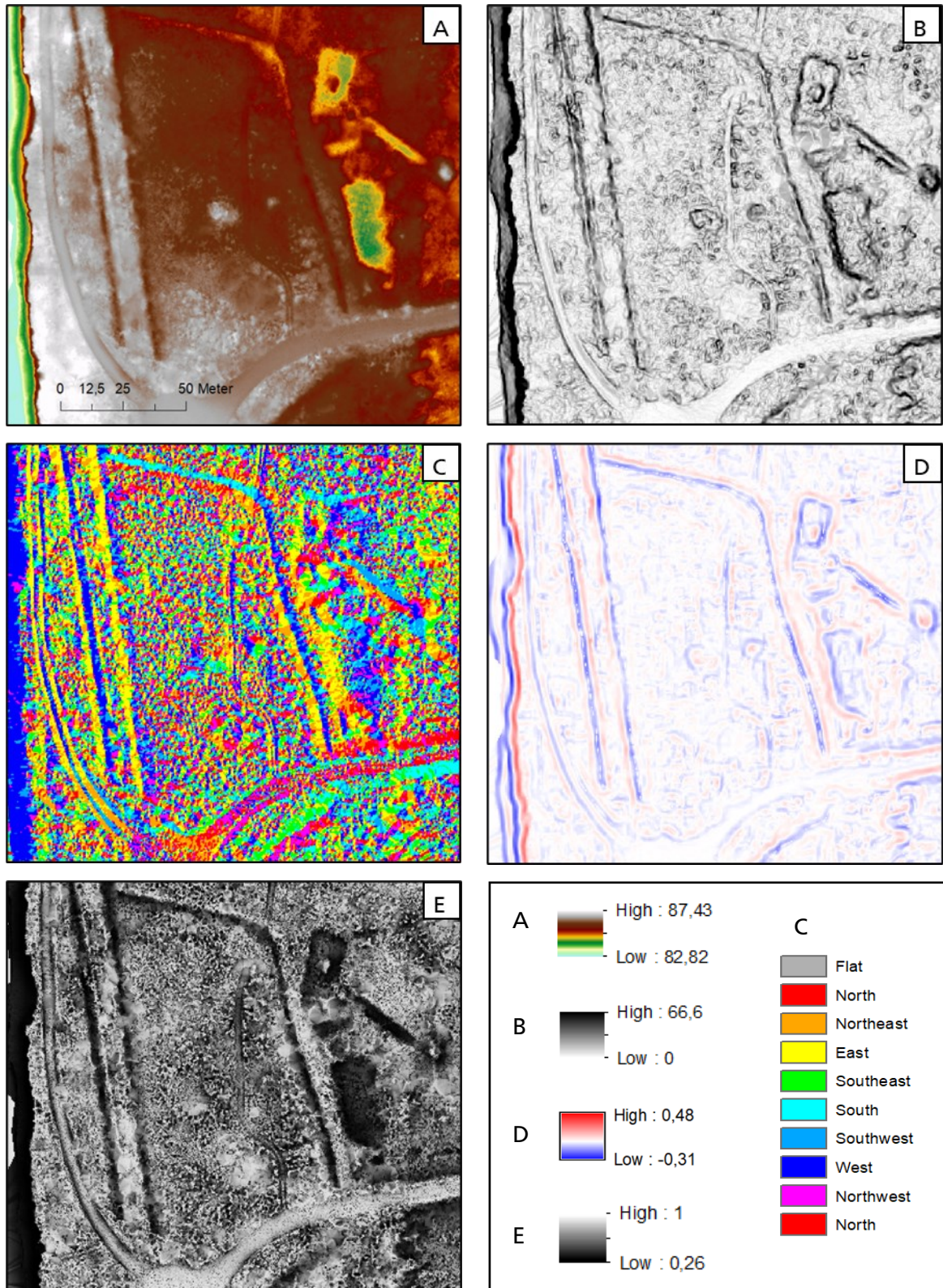


Abbildung 3-1: Visualisierung der Berechnung der geometrischen Parameter (A: DGM, B: Neigung, C: Exposition, D: Profilkrümmung, E: Sky-View Factor)

3.1.1 Höhe

Grundlage für die Berechnung geometrischer Parameter bilden Daten über die Geländehöhen (*elevation*). Diese können als einzelne Messpunkte vorliegen oder als geordnetes, regelmäßiges Höhenraster, welches aus den Punkten generiert wird. Ein Digitales Geländemodell (DGM) ist ein solches Höhenraster, welches die vegetationslose Erdoberfläche abbildet und von Wood (1996, 10) als „[...] regular gridded matrix representation of the continuous variation of relief over space“ beschrieben wird. Die Berechnung geometrischer Parameter mittels GIS-Tools basiert zumeist auf einem DGM als Eingabedatensatz und auch in den Untersuchungen dieser Arbeit wird ein DGM als Datengrundlage verwendet (vergleiche Kapitel 5). Eine umfassende Analyse über die Eignung von DGM und der daraus ermittelbaren Kenngrößen für geomorphologische Untersuchungen liefert die Arbeit von Wood (1996). Ein Beispielausschnitt aus dem DGM ist in Abbildung 3-2 dargestellt; zusätzlich zur farblichen Visualisierung der Höhenverteilung (hier von blau – tief bis rot – hoch) sind hier die absoluten Höhenwerte in m ü. NHN dargestellt.

Eine farbliche Visualisierung des Höhenrasters lässt einige Merkmale der Geländeoberfläche erkennen (siehe Abbildung 3-1 A). Stark geneigte Flächen zeichnen sich durch stark ansteigende Geländehöhen über eine kurze Distanz aus. Auch erhöhte und abgesenkte Bereiche treten durch die Farbdarstellung optisch hervor. Ein erster Überblick über die Morphologie des untersuchten Gebietes ist somit gegeben, doch für eine flächenhafte Abgrenzung von hydromorphologischen Strukturen ist eine Untersuchung weiterer aus dem DGM berechenbarer Parameter wichtig (Nyffeler 2018, 19; Rasemann 2003, 113).

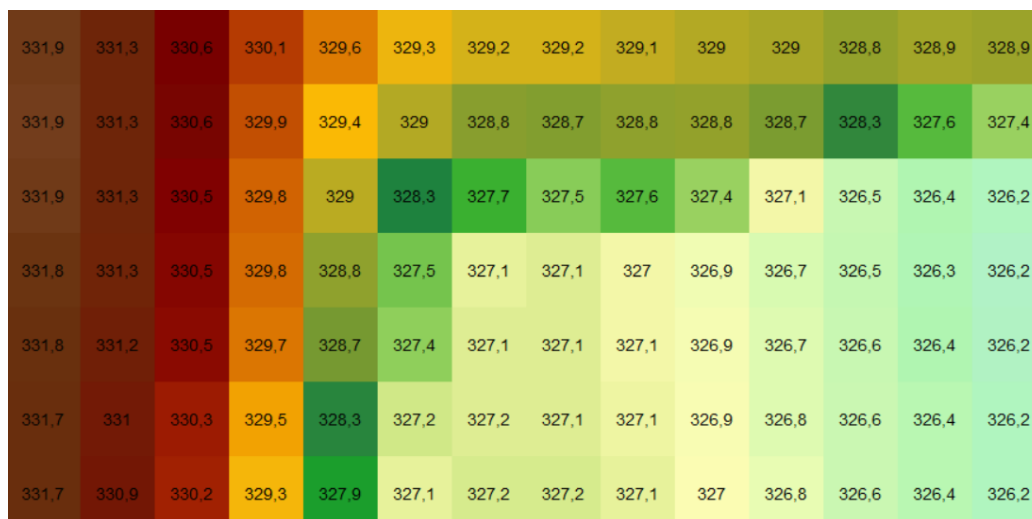


Abbildung 3-2: Veranschaulichung eines Digitalen Geländemodells als geordnetes Höhenraster

3.1.2 Neigung

Eine wichtige Grundgröße zur Beschreibung von Oberflächen ist die Neigung (*slope*). Als Maß für die Steilheit einer Fläche dient die Neigung der Unterscheidung von flacheren und steileren Geländebereichen. Die Neigung ist definiert als Höhenänderung über eine bestimmte Strecke (Zevenbergen und Thorne 1987, 50). Mathematisch betrachtet entspricht

die Neigung der ersten Ableitung der Höhe z an einem bestimmten Punkt in eine definierte Richtung. Besondere Relevanz für morphologische Analysen hat die Neigung in Richtung des stärksten Gefälles. Diese Größe kann durch verschiedene GIS-Tools berechnet werden und wird dort *slope* genannt. Die Richtung der maximalen Neigung wird als Exposition bezeichnet und kann ebenfalls zur Charakterisierung von Geländeformen genutzt werden (siehe Abschnitt 3.1.3).

Bei der Arbeit mit Digitalen Geländemodellen gehört die maximale Neigung (*slope*) zu einer häufig verwendeten Größe. Zur Berechnung dieser Neigung aus einem DGM mittels GIS-Software existieren verschiedene Verfahren. Ein gängiges Berechnungsverfahren, auf welchem sowohl die Ermittlung der Neigung in ArcGIS als auch in GRASS GIS basiert (ESRI 2016b; GRASS Development Team 2020b), ist das Verfahren nach Horn (1981). Zur Berechnung der Neigung einer Rasterzelle eines Höhenrasters wird demnach ein 3 x 3 Zellen großes Fenster verwendet, welches die unmittelbaren Nachbarzellen einer jeweiligen Zelle abdeckt (Horn 1981, 18).

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

Abbildung 3-3: Beispiel für ein 3 x 3 Zellen großes Berechnungsfenster

Das Verfahren der Neigungsberechnung nach Horn (1981) ist ein differentialgeometrisches Verfahren, welches auf der Annäherung der Geländeoberfläche – in diesem Fall der 3 x 3 Zellen großen Umgebung – durch eine bivariate¹⁰ quadratische Funktion basiert. Aus den Höhenwerten der Nachbarzellen werden nach folgenden Formeln (Horn 1981, 18; Burrough und McDonnel 1998, 190) die partiellen Ableitung in die beiden Koordinatenrichtungen x und y angenähert und daraus die Neigung der zentralen Rasterzelle (hier Zelle z_5) berechnet.

$$Slope = \sqrt{\left(\frac{\delta z}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta y}\right)^2} \quad (1)$$

$$\frac{\delta z}{\delta x} = \frac{(z_3 + 2 \cdot z_6 + z_9) - (z_1 + 2 \cdot z_4 + z_7)}{8 \cdot \Delta x} \quad (2)$$

$$\frac{\delta z}{\delta y} = \frac{(z_3 + 2 \cdot z_2 + z_1) - (z_9 + 2 \cdot z_8 + z_7)}{8 \cdot \Delta y} \quad (3)$$

mit x, y = Koordinatenrichtungen der Ebene
 z = Höhe in m
 z_i = Höhenwert der Zelle i in m
 $\Delta x, \Delta y$ = Zellenweite in x - und y - Richtung in m

¹⁰ Bivariat wird eine Funktion genannt, die von zwei Variablen abhängt.

Die Neigung kann in den Einheiten Grad (*degrees of inclination*) oder Prozent (*percent rise*) angegeben werden, die jeweilige Ausgabeoption kann bei Anwendung der GIS-Funktion eingestellt werden. Dazu wird die durch obige Formeln erhaltene dimensionslose Neigung entsprechend angepasst: die Multiplikation mit dem Faktor 100 liefert eine Neigung in Prozent, die Umrechnung in Grad erfolgt durch den Arkustangens. Auch die Verwendung der dimensionslosen Neigung ist für verschiedene Fragestellungen und weitere Berechnungen üblich (Zevenbergen und Thorne 1987, 49).

Nach Zevenbergen und Thorne (1987, 47) ist die Neigung der häufigste untersuchte Parameter bei der Analyse der Landoberfläche. In der Hydrologie und der Geologie ist sie eine wichtige Größe, da sie die Energie zum Antrieb von Prozessen wie dem Abflussverhalten und der Sedimentbewegungen bestimmt (Zevenbergen und Thorne 1987, 47). Bei der Untersuchung von Reliefformen bringt eine Untersuchung des Parameters Neigung ebenfalls wichtige Erkenntnisse. Markante Neigungsunterschiede und stark geneigte Flächen helfen bei der Detektion und Abgrenzung von Strukturen. So werden verschiedene hydromorphologische Strukturen durch eine unterschiedliche Anordnung geneigter Böschungen charakterisiert (z.B. Wälle, Rinnen). In Abbildung 3-1 B ist ein Neigungsraster – berechnet mit einem 1,5 x 1,5 m großen Berechnungsfenster - mittels inverser Graustufenskala visualisiert; Flächen mit starker Neigung treten als dunkle Bereiche optisch hervor. So ist beispielsweise im linken Kartenbereich die stark geneigte Uferböschung erkennbar und auch im Bereich der Aue sind mehrere langgezogene deutlich geneigte Flächen zu erkennen (Böschungen).

Nach Nyffeler (2018, 36) hebt diese Ansicht insbesondere prägnante Strukturen und scharfe Kanten deutlich hervor. Schwach ausgeprägte Strukturen lassen sich laut Nyffeler (2018, 36) auf diese Weise nicht gut erkennen. Je nach Ausprägung der Gewässerstrukturen sollte man daher unbedingt noch weitere Parameter heranziehen.

Durch das berechnete Neigungsraster erhält man darüber hinaus lediglich Informationen über die konkrete Größe der Neigung in Grad oder Prozent. Sie enthält keine Informationen darüber, in welche Richtung die Neigung ausgerichtet ist (Exposition) und ob die Neigung positiv oder negativ ist. Für die weitere Interpretation sind daher zusätzliche Informationen nötig (z.B. Überlagerung mit Höhenmodell, Schummerungsbild o.ä.). Dies ist beispielsweise zur Unterscheidung von Wall und Rinne wichtig.

3.1.3 Exposition

Als Exposition (*aspect*) wird die Ausrichtung einer Zelle bezeichnet, d.h. die Richtung, in die das stärkste Gefälle (*slope*) verläuft (fallende Richtung) (Zevenbergen und Thorne 1987, 50). Die Exposition wird dabei als Winkel in der Horizontalebene gemessen und in Grad von 0° bis 360° angegeben, je nach verwendeter Definition im oder gegen den Uhrzeigersinn.

Als Richtung der maximalen Neigung ergibt sich die Formel zur Berechnung der Exposition aus einer Extremwertanalyse der Formel zur Berechnung der Neigung; die Herleitung ist in der Publikation von Zevenbergen und Thorne (1987) aufgeführt. Daraus resultiert zur Ermittlung der Exposition die untenstehende Formel (4). Die Exposition einer Zelle kann ebenfalls mit dem Verfahren nach Horn (1981) durch ein bewegliches Berechnungsfenster

aus den Höhenwerten der Nachbarzellen berechnet werden. Dabei werden die partiellen Ableitungen der Geländehöhe in die beiden Koordinatenrichtungen ($\delta z/\delta x$ und $\delta z/\delta y$) nach Formel (2) und Formel (3) aus den Höhenwerten der Nachbarzellen angenähert.

$$\tan \theta = - \left(\frac{\delta z / \delta y}{\delta z / \delta x} \right) \quad (4)$$

mit θ = Exposition einer Zelle in Grad (°)

Die Angabe der Exposition unterscheidet sich in den für die vorliegende Arbeit verwendeten GIS-Softwares. In ArcGIS (Funktion *aspect*) wird die Exposition im Uhrzeigersinn, ausgehend von Norden, gemessen. So erhalten die Haupthimmelsrichtungen folgende Expositionswerte: Osten 90°, Süden 180°, Westen 270° und Norden 360°. Liefert die Funktion das Ergebnis „-1“, bedeutet das, dass es sich um eine flache Fläche ohne Neigung und demnach ohne Exposition handelt. In GRASS GIS (Funktion *r.slope.aspect*) wird die Exposition gegen den Uhrzeigersinn, ausgehend von Osten, angegeben. Demnach steht eine Exposition von 90° für Norden, 180° für Westen, 270° für Süden und 360° für Osten. Ebene Zellen ohne Neigung erhalten den Wert „0“

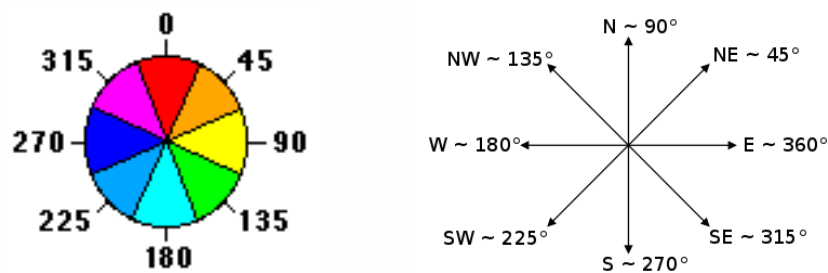


Abbildung 3-4: Definition der Exposition in ArcGIS (links) und GRASS GIS (rechts) (ESRI 2016a; GRASS Development Team 2020b)

Auch die Exposition spielt in den Geowissenschaften eine bedeutende Rolle. Als Richtung der maximalen Neigung wird mit der Exposition auch die Richtung des Abflusses und der Materialbewegungen bestimmt (Zevenbergen und Thorne 1987, 47). Insbesondere in hanggeprägten Gebieten, wie Gebirgen, prägt die Exposition wesentliche Einflussgrößen (z.B. Sonneneinstrahlung, Temperatur, Niederschläge) für Verwitterungsprozesse, die die Formen der Erdoberfläche verändern (Dikau et al. 2019, 38, 295, 464). So kann die Exposition ebenfalls zur Charakterisierung und Abgrenzung von Geländestrukturen verwendet werden (Rasemann 2003, 33; Dikau et al. 2019, 77). In der computergestützten Reliefanalyse ist die Exposition ein grundlegender Parameter, dessen Berechnung in gängigen GIS-Softwares möglich ist.

In Abbildung 3-1 C ist ein Kartenausschnitt der berechneten Exposition (Berechnungsfenster von 1,5 x 1,5 m Größe) dargestellt. Es wird deutlich, dass die langgezogenen Strukturen in der linken Bildhälfte aus zwei entgegengesetzt geneigten Böschungen bestehen (West- und Ostausrichtung), daher handelt es sich hier abgesenkte rinnenartige Strukturen.

3.1.4 Krümmung

Die Krümmung oder auch Krümmung (*curvature*) einer Oberfläche ist ein Maß für die Abweichung der Oberflächenform von einer Ebenen Fläche „als Folge des Ausmaßes der Neigungs- und Expositionsänderung“ (Dikau et al. 2019, 70). Mathematisch betrachtet ist die Krümmung die zweite Ableitung der Höhe in eine bestimmte Richtung (Zevenbergen und Thorne 1987, 47). Für die beiden in der Geomorphometrie bedeutendsten Richtungen wurden folgende Krümmungsgrößen definiert: die Profilkrümmung (profile curvature) bezeichnet die Krümmung in Richtung der stärksten Neigung, sie wird auch Vertikalkrümmung genannt. Die Profilkrümmung gibt also die Änderung der Neigung an. Demgegenüber steht die Plankrümmung (plan curvature) – auch Horizontalkrümmung genannt –, welche sich auf die Richtung parallel zur Höhenlinie und somit senkrecht zur Profilkrümmung bezieht. Daher kann die Plankrümmung als Änderung der Exposition verstanden werden.

Die Einheit der Krümmung ist m^{-1} . Ein Krümmungswert von $0,05 m^{-1}$ bedeutet, dass der Krümmungsradius 20 m beträgt. Die Vorzeichenkonvention für die Krümmung ist zwischen den verschiedenen GIS-Softwares nicht einheitlich; Blaga (2012) hat hierzu verschiedene gängige Softwares zur Reliefanalyse gegenübergestellt. Während in GRASS GIS generell positive Werte der Krümmung (sowohl Profil- als auch Plankrümmung) auf konvexe Formen hinweisen, unterscheidet ArcGIS zwischen der Plankrümmung, bei der wie in GRASS GIS positiv konvex und negativ konkav bedeutet, und der Profilkrümmung, für die die Vorzeichen entgegengesetzt verwendet werden (positiv – konkav, negativ – konvex). Dies muss bei der Arbeit mit dem Parameter Krümmung und der Interpretation von Krümmungswerten (auch bei Ergebnissen anderer Studien) beachtet werden. In dieser Arbeit wird die Krümmung mit der Software GRASS GIS berechnet und daher die dort übliche Vorzeichenverwendung übernommen. Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 veranschaulichen die Bedeutung der Profil- und der Plankurvatur anhand von Skizzen für die verschiedenen Ausprägungen.

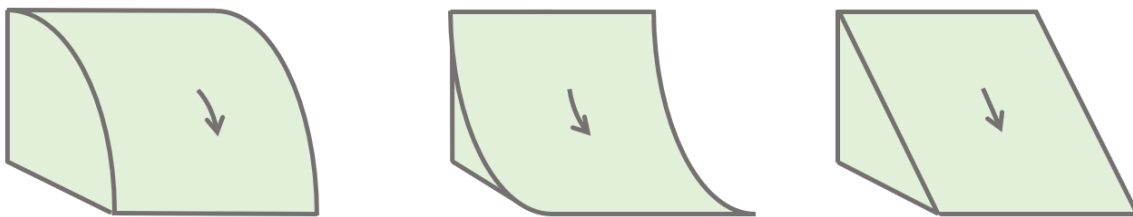


Abbildung 3-5: Bedeutung der Profilkurvatur – links positive Werte (konvex), Mitte negative Werte (konkav), rechts ohne Krümmung (gestreckt) (angelehnt an ESRI 2020)

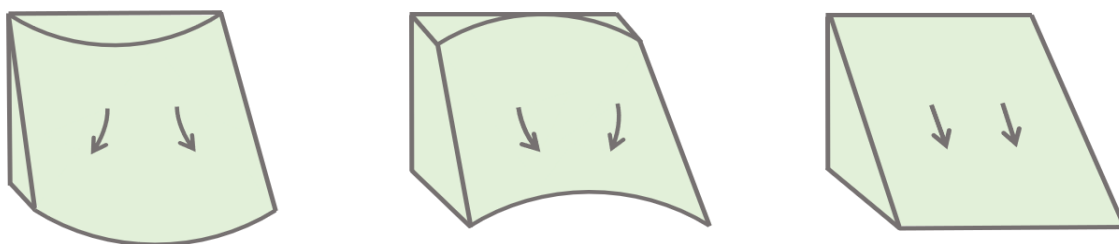


Abbildung 3-6: Bedeutung der Plankurvatur – links positive Werte (konvex), Mitte negative Werte (konkav), rechts ohne Krümmung (gestreckt) (angelehnt an ESRI 2020)

Auch zur Berechnung der Krümmung werden differentialgeometrische Verfahren eingesetzt, die auf der Annäherung der Geländeoberfläche um einen jeweiligen Punkt durch mathematisch eindeutig beschreibbare Polynomfunktionen basieren. Zevenbergen und Thorne (1987) nähern beispielsweise die 3 x 3 Zellen große Nachbarschaft um einen Punkt durch ein bivariates Polynom vierten Grades an.

$$z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (5)$$

Durch die neun Koeffizienten (A bis I) können mit dieser Funktion alle neun Höhenwerte der Zenumgebung exakt abgebildet werden (Zevenbergen und Thorne 1987, 49). Andere Verfahren nutzen quadratische Polynome, die die Zenumgebung annähern, jedoch durch entsprechend weniger Terme nicht alle Höhenwerte des Berechnungsfensters genau abbilden (Wood 1996, 21). Gemeinsam haben die Verfahren, dass die verschiedenen Krümmungsgrößen anschließend aus arithmetischer Verknüpfung der verschiedenen Koeffizienten der Annäherungsfunktion berechnet werden. Die Koeffizienten werden dabei aus den Höhenwerten der neun Zellen des Berechnungsfensters (siehe Abbildung 3-3) ermittelt. So berechnet sich die Profilkrümmung (*PROFC*) nach Zevenbergen und Thorne (1987, 49–50) beispielsweise wie folgt:

$$PROFC = -2(DG^2 + EH^2 + FGH)/(G^2 + H^2) \quad (6)$$

mit

$$\begin{aligned} D &= [(z_4 + z_6)/2 - z_5]/L^2 \\ E &= [(z_2 + z_8)/2 - z_5]/L^2 \\ F &= (-z_1 + z_3 + z_7 - z_9)/4L^2 \\ G &= (-z_4 + z_6)/2L \\ H &= (z_2 - z_8)/2L \\ L &= \text{Breite der Rasterzellen in m} \end{aligned}$$

In den Geowissenschaften spielt die Krümmung des Reliefs eine wichtige Rolle, da sie Transportvorgänge von Wasser und Feststoffen steuert. Die Profilkrümmung als Änderung der Neigung beeinflusst die Beschleunigung und Abbremsung von Transportvorgängen und durch die Plankurvatur wird bestimmt, wo Abfluss und Materialtransport konvergiert und sich konzentriert und wo er divergiert (Zevenbergen und Thorne 1987, 47). Dadurch werden die Prozesse der Erosion und Sedimentation gelenkt, die das Relief formen.

Auch im Bereich der Reliefanalyse ist die Krümmung ein häufig verwendeter Parameter zur Beschreibung von Geländeformen. Insbesondere in der computergestützten Reliefanalyse wird die Krümmung als einer der zentralen Parameter zur eindeutigen Abgrenzung von Geländeformen genutzt (Dikau et al. 2019, 77). Mithilfe gängiger Software zur Reliefanalyse sind unter anderem die Profil- und die Plankrümmung berechenbar. Generell zeichnen sich aufgewölbte Strukturen durch konvexe Krümmung und eingetiefte Strukturen durch konkave Krümmung aus. In den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wird die Profilkrümmung als Parameter zur geometrischen Abgrenzung von Gewässerstrukturen verwendet. Die Profilkrümmung kann genutzt werden, um Diskontinuitäten der Geländeneigung festzustellen, wie z.B. Senken oder Kuppen, aber auch die Übergänge geneigter Flächen zur Ebene. Anhand hoher positiver und hoher negativer Profilkrümmungswerte können Bereiche starker Neigungsänderungen detektiert und daraus Kanten zur Abgrenzung

verschiedener Geländestrukturen definiert werden. Dabei zeichnen sich Oberkanten durch hohe positive, Unterkanten durch hohe negative Werte aus (vergleiche Abbildung 3-1 D).

3.1.5 Sky-View Factor

Der Sky-View Factor (SVF) ist eine weitere berechenbare Kenngröße zur Visualisierung und Interpretation von Höhenrastern und ist ein Maß für den sichtbaren Anteil des Himmels an einem jeden Geländepunkt. Das Prinzip des SVF basiert auf der Vorstellung einer diffusen Illumination des Reliefs (Zakšek et al. 2011, 398): eine fiktive Hemisphäre wird über jede Rasterzelle gespannt und dient als Lichtquelle zur Beleuchtung der Geländeoberfläche. Die Beleuchtung eines jeden Punktes des Reliefs wird in diesem Fall bestimmt durch den sichtbaren Anteil der Hemisphäre. Durch das umliegende und höherliegende Relief wird dieser Anteil begrenzt, sodass exponierte Geländepunkte einen hohen Wert für den SVF erhalten, da der Anteil des sichtbaren Himmels groß ist. Abgesenkt liegende Punkte haben einen geringen SVF, da das umliegende Relief einen größeren Teil der Hemisphäre verdeckt.

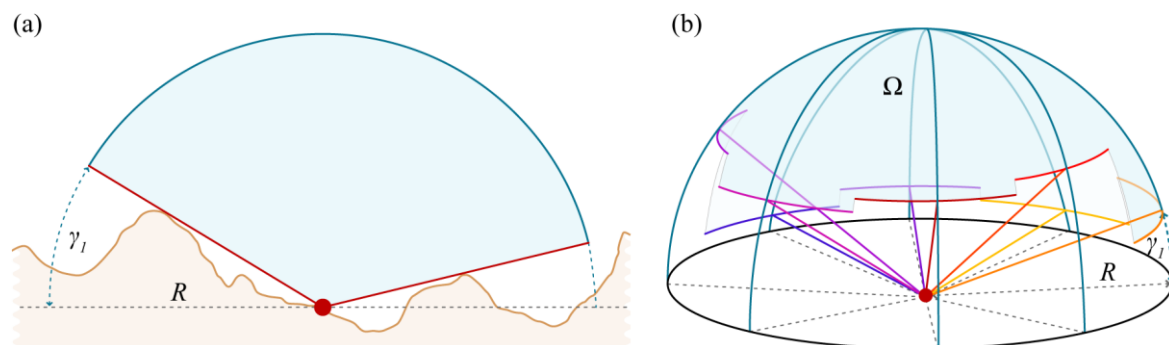


Abbildung 3-7: Prinzip des Sky-View Factors: Veranschaulichung des Höhenwinkels γ (a) und des Raumwinkels Ω (b) (Zakšek et al. 2011; Kokalj et al. 2011)

Die Berechnung des SVF ist beispielsweise mit dem GRASS GIS Add-On „r.skyview“ möglich. Die Funktion basiert auf dem von Zakšek et al. (2011) vorgestellten Verfahren zur Berechnung des Sky-View Factors. Für die Beschreibung des Anteils des sichtbaren Himmels wird der Raumwinkel Ω (*solid angle*) verwendet. Dieser ist definiert als die Fläche A , die durch die Projektion eines Objektes O auf eine Kugeloberfläche entsteht, geteilt durch den Kugelradius im Quadrat.

$$\Omega_o = \frac{A_o}{r^2} \quad (7)$$

mit

- Ω_o = Raumwinkel von O
- A_o = projizierte Fläche von O auf der Kugeloberfläche
- r = Radius der Kugel

Eine Halbkugel hat eine Oberfläche von $A = 2\pi r^2$, und somit nach Formel (7) einen Raumwinkel von $\Omega = 2\pi$. Durch das umliegende Relief wird der Anteil der von einem Geländepunkt aus sichtbaren Hemisphäre begrenzt. Die limitierende Wirkung dieser Hindernisse kann durch den jeweiligen Winkel zwischen Geländeoberkante und der Ebene ausgedrückt werden, den Höhenwinkel γ (*vertical elevation angle*) (Kokalj et al. 2011, 267). Zur Berechnung des verbleibenden Anteils der freien Hemisphäre wird der durch die Hindernisse im

Höhenwinkel γ (siehe Abbildung 3-7) bedeckte Bereich abgezogen. Wenn die Lage des Horizonts sich in verschiedene Richtungen unterscheidet (wie im natürlichen Relief üblich), kann der Raumwinkel angenähert werden, indem γ in eine bestimmte Anzahl an Richtungen i berechnet wird (Zakšek et al. 2011, 402). Die Bestimmung des Raumwinkels erfolgt anschließend mit folgender Formel:

$$\Omega = 2\pi \cdot \left(\frac{1 - \sum_{i=1}^n \sin \gamma_i}{n} \right) \quad (8)$$

mit γ_i = Höhenwinkel in Richtung i
 n = Anzahl der Richtungen

Dividiert man die obige Gleichung durch den Faktor 2π , was dem Raumwinkel einer vollen Halbkugel entspricht, erhält man den Sky-View Factor als normalisierten Anteil der sichtbaren Hemisphäre (Zakšek et al. 2011, 402).

$$SVF = \frac{1 - \sum_{i=1}^n \sin \gamma_i}{n} \quad (9)$$

Der SVF nimmt Werte von 0 bis 1 an, wobei ein Wert von 0 für eine vollständige Verdeckung des Himmels (stark abgesenkte Punkte) und ein Wert von 1 für die Sichtbarkeit der kompletten Hemisphäre (Punkte in ebenen oder erhabenen Flächen) steht. Eine Visualisierung des SVF mittels Graustufenskala lässt erhabene Punkte mit hohem SVF hell und abgesenkte Punkt mit niedrigem SVF dunkel erscheinen (siehe Abbildung 3-1 E).

Der SVF ist eine Technik, um Reliefcharakteristiken zu visualisieren. Kokalj et al. (2011) zeigen die Anwendbarkeit des Sky-View Factors in der Archäologie, um Strukturen wie z.B. Grabhügel oder Gräben und Furchen zu erkennen. Der Fokus wird hier auf die visuelle Erfassung gelegt. Auch für die optische Hervorhebung hydromorphologischer Strukturen aus digitalen Höhenrastern ist der SVF geeignet. Insbesondere zur Erkennung abgesenkter Strukturen ist der SVF ein wirksames Mittel. In Abbildung 3-1 E treten insbesondere abgesenkte Strukturen wie Senken oder Rinnen als dunkle Flächen hervor. Die Detektion erhabener Strukturen (wie z.B. Wälle) ist mithilfe des SVF nicht möglich, da diese nicht von ebenen Flächen unterschieden werden. Sowohl für Punkte auf erhabenen Strukturen als auch für Punkte in Ebenen wird ein SVF von annähernd 1 ausgegeben, da in beiden Fällen nahezu die komplette Hemisphäre sichtbar ist. Dass von Punkten auf Wällen oder Kuppen auch von der Horizontalen abwärts zusätzlicher Anteil des Himmels sichtbar ist, wird bei der Berechnung des SVF nicht einbezogen, da allein die obere Hemisphäre über dem jeweiligen Punkt als Referenz gilt.

3.2 Radiometrische Parameter

Verschiedene Verfahren der Bildanalyse werden eingesetzt, um Bilder zu interpretieren und unterschiedliche Objekte und Landbedeckungen möglichst eindeutig auf Basis von digitalen Luftbilddaten abzugrenzen. Die dafür verwendeten Kenngrößen bzw. Merkmale werden in der vorliegenden Arbeit als radiometrische Parameter bezeichnet. Darunter werden hier in Anlehnung an Roelens et al. (2018, 13) messbare Kenngrößen verstanden, die sich aus den Reflexionseigenschaften eines Objektes ergeben und aus den im Luftbild gespeicherten

Informationen berechnen lassen. In diesem Abschnitt werden einige für Bildanalysen relevante radiometrische Parameter vorgestellt (Grauwerte, spektrale Indizes, Texturparameter). Um die Anwendbarkeit dieser Parameter zu verdeutlichen, werden zuvor grundlegende Verfahren der Analyse und Klassifikation von Luftbilddaten vorgestellt. Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf die geometrischen Untersuchungen der digitalen Höhendaten gelegt wurde, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Grundlagen. Für tiefergehende Informationen zur digitalen Analyse von Fernerkundungsdaten sei auf die einschlägige Fachliteratur, wie z.B. Richards und Jia (2006), verwiesen.

Ein gängiges und häufig verwendetes Verfahren der Luftbildanalyse ist die visuelle Bildinterpretation. Die Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen ermöglicht nach Mott (2005, 11) qualitativ hochwertige Interpretationen, indem Muster, Farbverläufe und Texturen gedeutet und daraus Aussagen über die Bildobjekte getroffen werden können. Der Aufwand für die visuelle Analyse größerer Datenmengen ist jedoch sehr hoch (Mott 2005, 11). Außerdem sind visuelle Verfahren der Bildinterpretation von der Erfahrung und Expertise des Interpreten abhängig und daher nicht vollständig objektiv und reproduzierbar (Mott 2005, 11). Durch computergestützte, automatisierte Analyseverfahren können große Datenmengen anhand messbarer Merkmale analysiert werden. Dafür stehen verschiedene Verfahren zu Verfügung.

Bei bildpunkt-basierten Verfahren wird jedes einzelne Pixel als kleinste Informationseinheit eines Bildes unabhängig voneinander klassifiziert (Andresen 2004, 19). Als Grundlage für die Klassifikation dienen die spektralen Eigenschaften eines Bildpunktes, die durch die Grauwerte der verschiedenen Spektralkanäle abgebildet werden. Neben den Grauwerten können auch weitere Merkmale zur Klassifikation genutzt werden, wie z.B. spektrale Indizes oder Texturparameter. Sämtliche für die Klassifikation verwendeten Merkmale spannen einen sogenannten Merkmalsraum auf, indem jeder Bildpunkt eindeutig positioniert werden kann (Mott 2005, 12; Andresen 2004, 17). Die Dimension des Merkmalsraums wird durch die Anzahl der verschiedenen Merkmale bestimmt, Abbildung 3-8 zeigt das Prinzip eines Merkmalsraums, der von drei Merkmalen (z.B. drei verschiedenen Spektralkanälen) aufgespannt wird. Das Ziel der Klassifikation ist es, die verschiedenen Pixel zu Klassen mit ähnlicher spektraler Wertekombination zusammenzufassen. Punkte einer Klasse bilden dabei eine Punktwolke.

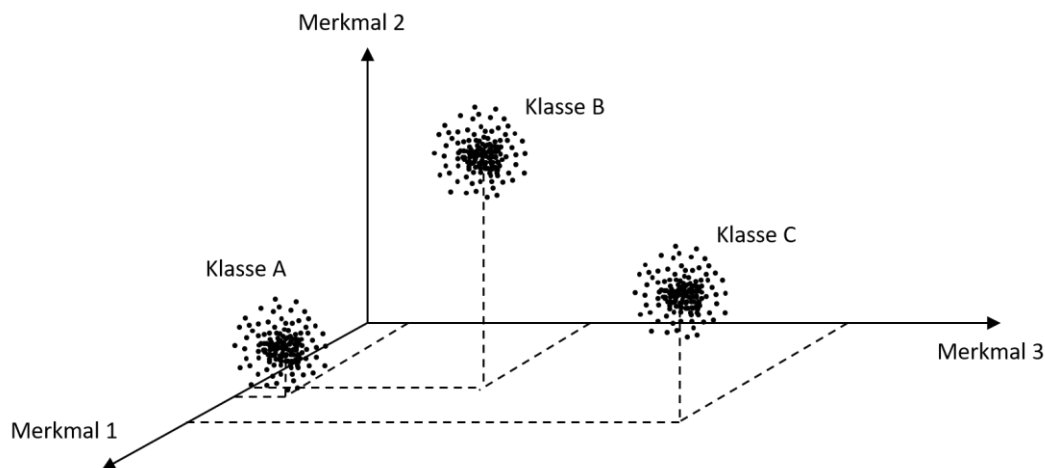


Abbildung 3-8: Darstellung eines beispielhaften dreidimensionalen Merkmalraums (verändert nach Albertz 1991, 141)

Bei den bildpunkt-basierten Klassifikationsverfahren lassen sich zwei Methoden unterscheiden, die unüberwachte Klassifikation (*unsupervised classification*) und die überwachte Klassifikation (*supervised classification*). Bei der unüberwachten Klassifikation werden die Bildpunkte mithilfe verschiedener Algorithmen (Klassifikatoren) automatisch nach größter spektraler Ähnlichkeit geclustert. Dabei wird keine Vorkenntnis der vorhandenen Klassen benötigt. Allerdings muss nach Abschluss der Klassifikation eine thematische Interpretation der Klassen durch den Anwender erfolgen (Andresen 2004, 19). Bei der überwachten Klassifikation wird ein gewisses Vorwissen in das Klassifikationsverfahren einbezogen. Im Vorfeld der Klassifikation werden vom Anwender sogenannte Trainingsgebiete für jede gesuchte Klasse definiert. Die Trainingsgebiete sind Bildbereiche, deren Klassenzuordnung bekannt ist bzw. zuvor manuell durchgeführt wurde (z.B. auf Basis von Geländekartierungen oder weiteren Informationsquellen) (Andresen 2004, 21). Vor der Klassifikation müssen also die Anzahl und die Identität der Klassen festgelegt werden (Mott 2005, 14). Aus den Grauwerten der Trainingsgebiete wird die spektralen Signaturen¹¹ der Musterklassen ermittelt. Bei der anschließenden Klassifikation werden durch den gewählten Klassifikationsalgorithmus die spektralen Merkmale jedes Pixels mit denen der Musterklassen verglichen und die Pixel der Klasse mit der größten Ähnlichkeit zugeordnet (Mott 2005, 14). Die Qualität der Ergebnisse hängt dabei in entscheidendem Maß von der Wahl der Trainingsgebiete ab (Mott 2005, 14).

Bei sehr hoch aufgelösten Daten wird es nach Andresen (2004, 24–25) immer wichtiger, die Bildanalysen nicht allein auf den Informationen eines einzelnen Pixels zu begründen, sondern auch das Pixelumfeld einzubeziehen. Mit steigender Auflösung der Daten steigt die spektrale Varianz der Bildpunkte innerhalb einer Klasse (Mott 2005, 16). Einzelne Landbedeckungsklassen werden durch mehr einzelne Pixel abgebildet, deren Grauwerte eine natürliche Varianz aufweisen. Dadurch kommt es auch vor, dass sich gestreute Klassen im Merkmalsraum überlappen und nicht mehr eindeutig anhand der Merkmale abgrenzen

¹¹ Als spektrale Signatur einer Oberfläche wird die charakteristische Abhängigkeit der Reflexion von der Wellenlänge bezeichnet.

lassen (Mott 2005, 16; Andresen 2004, 18). Dies führt unter anderem dazu, dass als Ergebnis einer pixelbasierten Klassifikation sehr unzusammenhängende Objekte entstehen können. Objektbasierte Klassifikationsverfahren (*OBI*: *object-based image classification*) beziehen auch kontextuelle Informationen in die Klassifikation ein. Sie berücksichtigen die Tatsache, dass benachbarte Pixel eine hohe Wahrscheinlichkeit haben, derselben Klasse anzugehören (Mott 2005, 22). In einem ersten Schritt, der Segmentierung, werden benachbarte Pixel basierend auf verschiedenen Homogenitätskriterien zusammengefasst. Ähnlich wie bei der unüberwachten Klassifikation werden die Pixel so in homogene Bereiche geclustert, bei der objektbasierten Klassifikation werden jedoch neben den spektralen Eigenschaften auch räumliche Informationen (z.B. Nachbarschaftsbeziehungen, Form) einbezogen (Mott 2005, 28; Lange 2020, 496). Durch verschiedene Klassifikationsalgorithmen werden die Segmente dann den zuvor definierten Klassen zugeordnet. Vorwissen und Erfahrungen werden dabei durch Regelwerke einbezogen, die die Zugehörigkeit von Bildobjekten zu einer Klasse anhand ihrer Eigenschaften beschreiben (Mott 2005, 32; Andresen 2004, 52–53).

Die Basis für alle Klassifikationsverfahren bilden die radiometrischen Kenngrößen, die in diesem Zusammenhang als Merkmale bezeichnet werden. Zusätzlich zu spektralen Merkmalen können die schon erwähnten spektralen Indizes sowie Texturparameter verwendet werden, aber auch eine Verwendung von Höhenmodellen, Kartenwerken oder anderen Informationen sind bei der Luftbildklassifikation möglich (Mott 2005, 13).

3.2.1 Grauwert

In einem Luftbild werden die Reflexionseigenschaften des von einem Pixel abgedeckten Gebietes in Form von Grauwerten gespeichert. Der Grauwert ist ein Zahlenwert, der angibt, wie hoch Strahlung eines bestimmten Wellenlängenbereiches von diesem Bereich der Erdoberfläche reflektiert wird (Mott 2005, 12). Hohe Grauwerte stehen dabei für eine hohe, niedrige Grauwerte für eine niedrige Reflexionsintensität. Bei digitalen Luftbiltaufnahmen werden die empfangenen Signale der verschiedenen Wellenlängenbereiche in separaten Kanälen gespeichert. So wird für jeden Spektralkanal ein eigener Datensatz mit den zugehörigen Grauwerten der Pixel erstellt.

Die Grauwerte der verschiedenen Kanäle können in der Bildanalyse genutzt werden, um verschiedene Landbedeckungen zu unterscheiden. Je nach Art und Beschaffenheit der Landbedeckung wird Strahlung verschiedener Wellenlängen stärker oder schwächer reflektiert, was durch die jeweiligen Grauwerte widerspiegelt wird. So weisen die drei dominanten Landbedeckungsarten der Erdoberfläche (Wasser, Vegetation und Boden) sehr unterschiedliche spektrale Signaturen auf (siehe Abbildung 3-9). Darüber hinaus beeinflussen auch weitere Eigenschaften wie die Pigmentierung, der Feuchtigkeitsgehalt und die Zellstruktur der Vegetation, der Mineral- und Feuchtigkeitsgehalt der Böden und der Sedimentgehalt des Wassers die Intensität der Reflexion unterschiedlicher Wellenlängenbereiche (Richards und Jia 2006, 4).

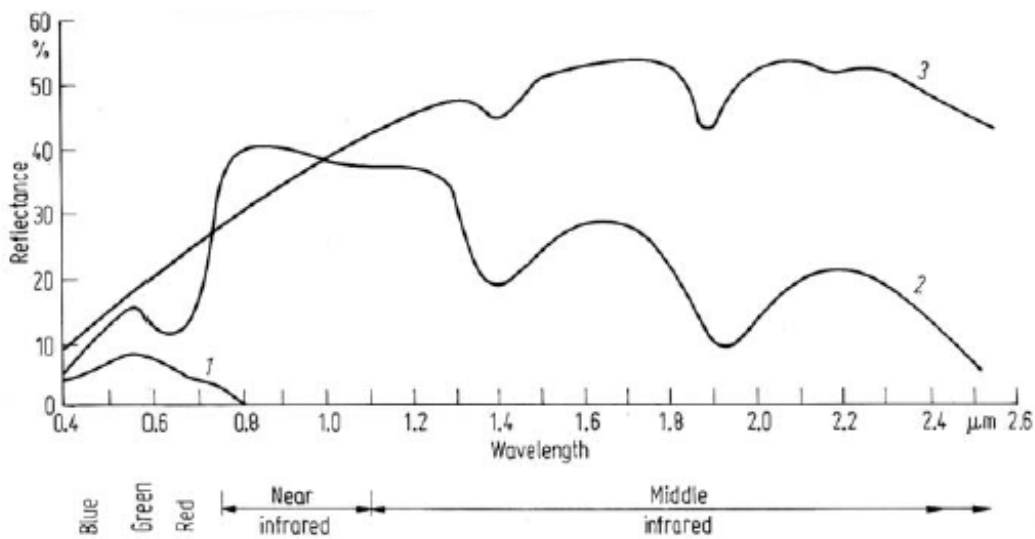


Abbildung 3-9: Spektrale Signaturen von Wasser (1), Vegetation (2) und Boden (3) (verändert nach Richards und Jia 2006, 5)

Zur Analyse der Landbedeckungen können die Grauwerte einzelner Kanäle untersucht oder die Informationen mehrerer Kanäle arithmetisch verknüpft werden. Die Analyse einzelner Kanäle ist möglich, wenn sich das Reflexionsvermögen von Oberflächenarten in einem bestimmten Spektralbereich signifikant unterscheidet. So nutzen Work und Gilmer (1976) und McFeeters (1996) den Wellenlängenbereich des Nahen Infrarots, um Wasserflächen von Landflächen (Vegetation und Boden) zu unterscheiden. Durch eine Analyse des Histogramms der NIR-Reflexionsintensitäten definieren sie einen Schwellenwert, anhand dessen die Bildpunkte in Wasser- und Nicht-Wasser-Pixel unterteilt werden können (Schwellenwertverfahren, siehe Abbildung 3-10). Die Herausforderung dieser Methodik stellt die Wahl des optimalen Schwellenwertes dar, da die Reflexionseigenschaften auch innerhalb einer Landbedeckungskategorie eine natürliche Varianz aufweisen.

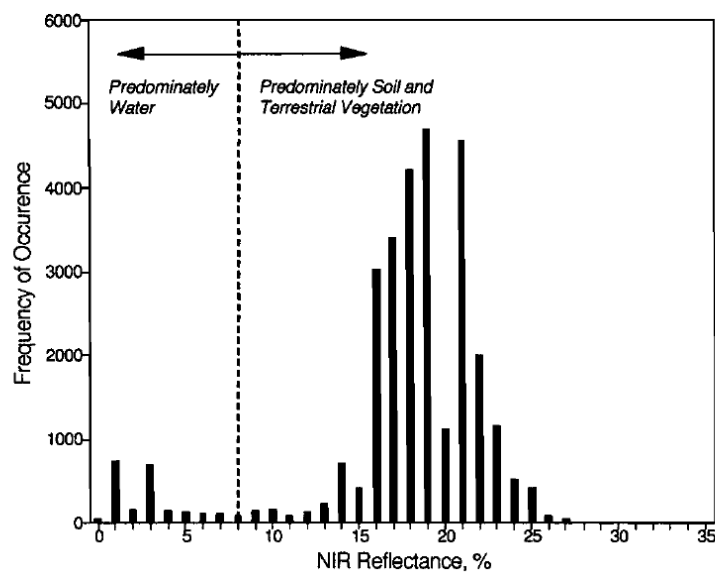


Abbildung 3-10: Schwellenwertbildung anhand des NIR-Reflexionshistogramms (McFeeters 1996, 1427)

Durch die Nutzung mehrerer Spektralkanäle kann der Informationsgehalt gesteigert und eine eindeutigere Abgrenzung der verschiedenen Landbedeckungen durchgeführt werden (Zillmann 1999, 105). Eine einfache Verknüpfung zweier Kanäle kann durch Ratiobildung hergestellt werden. Dabei werden die Grauwerte zweier Spektralkanäle durch Division der entsprechenden Grauwerte jedes Pixels ins Verhältnis gesetzt. Dies hebt die Unterschiede der Reflexionseigenschaften verschiedener Landbedeckungen stärker hervor und erlaubt eine genauere Unterscheidung (McFeeters 1996, 1427). Durch komplexere arithmetische Verknüpfungen mehrerer Spektralkanäle können sogenannte spektrale Indizes erzeugt werden; diesen wird nachfolgend ein eigener Unterabschnitt gewidmet. Computergestützte automatische Klassifikationsverfahren nutzen ebenfalls die Informationen der verschiedenen Spektralkanäle sowie ggf. zusätzlich spektrale Indizes und Texturparameter (s.u.).

3.2.2 Spektrale Indizes

Spektrale Indizes sind komplexere arithmetische Kombinationen zweier oder mehrerer Spektralkanäle. Sie können die Unterscheidung der Landbedeckungen optimieren, indem die Unterschiede in der spektralen Charakteristik weiter betont werden (Lange 2020, 474–475). Spektrale Indizes können ebenfalls durch eine Schwellenwertmethode ausgewertet werden oder als Klassifikationsmerkmal in einem automatischen Klassifikationsverfahren dienen. Ein prominentes Beispiel für einen spektralen Index ist der *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, der auf die Erkennung von Vegetation aus multispektralen Luftbildern ausgerichtet ist:

$$NDVI = (NIR - Rot) / (NIR + Rot) \quad (10)$$

mit NIR = Grauwert bzw. Reflexionsintensität des nahen Infrarots
 Rot = Grauwert bzw. Reflexionsintensität des roten Kanals

Basierend auf den spektralen Besonderheiten von Vegetationsflächen werden beim NDVI der rote Kanal sowie der Kanal des nahen Infrarots so verrechnet, dass Vegetationsflächen positive Werte erhalten und hervorgehoben werden. Da Vegetation Strahlung des nahen Infrarots besonders stark und rotes sichtbares Licht sehr schwach reflektiert (vergleiche Abbildung 3-9), lassen sich bewachsene Flächen an einem hohen positiven NDVI erkennen. Bodenflächen liefern i.d.R. einen geringen positiven NDVI und Wasserflächen einen negativen NDVI.

Ein gängiger Index zur Detektion von Wasserflächen ist der *Normalized Difference Water Index (NDWI)*. Der von McFeeters (1996) entwickelte NDWI basiert auf der Idee des NDVI, jedoch mit dem Ziel, Wasserflächen hervorzuheben und andere Flächen (Vegetation und Boden) zu unterdrücken. Dazu wird beim NDWI der grüne Kanal anstelle des roten Kanals verwendet und die Position der Variablen getauscht. Der Ansatz nutzt damit die Eigenschaft von Wasser, Strahlung des nahen Infrarots fast vollständig zu absorbieren, während andere Landbedeckungen Strahlung dieses Spektrums stark reflektieren. Die Formel zur Berechnung des NDWI lautet:

$$NDWI = (Grün - NIR) / (Grün + NIR) \quad (11)$$

mit NIR = Grauwert bzw. Reflexionsintensität des nahen Infrarots
 $Grün$ = Grauwert bzw. Reflexionsintensität des grünen Kanals

Wasserflächen werden hier durch positive Werte ausgezeichnet, da sie Strahlung des grünen Spektrums stärker als die des nahen Infrarots reflektieren. Boden- und Vegetationsflächen erhalten negative Werte.

3.2.3 Textur

Gemeinhin wird unter dem Begriff Textur die Struktur und Beschaffenheit von Oberflächen verstanden. Im Bereich der digitalen Bildanalyse kann Textur als räumliches Muster der Grauwerte in einem Bild(-bereich) verstanden werden (Haralick et al. 1973, 611; Ryherd und Woodcock 1996, 182), sie ist also ein Mittel zur Beschreibung der Grauwertvariationen innerhalb eines Kanals (Haralick et al. 1973, 611). Die Textur kann auf verschiedene Weise in der Bildklassifikation einbezogen werden, um neben den reinen spektralen Eigenschaften auch Informationen über das Pixel-Umfeld zu berücksichtigen. Eine Methode ist die Berechnung künstlicher Texturkanäle. Über ein bewegliches Fenster, welches eine definierte Pixel-Umgebung abdeckt, wird die Verteilung der Grauwerte innerhalb des betreffenden Bereichs untersucht (Ryherd 182) (Ryherd und Woodcock 1996, 182). Ryherd und Woodcock (1996) erstellen Texturbilder, in denen jedes Pixel den Wert der lokalen Varianz der Grauwerte innerhalb eines 3 x 3 Zellen großen beweglichen Berechnungsfensters erhält. Weitere Methoden zur Berechnung verschiedener Texturparameter werden z.B. von Haralick et al. (1973) vorgestellt. Die berechneten Texturparameter werden jeweils als künstlicher Texturkanal zum Merkmalsraum der Klassifikation hinzugefügt. Die kontextuellen Informationen der Textur-Parameter sind dabei abhängig von der Größe des Berechnungsfensters (Haralick et al. 1973, 611).

4 Untersuchungsgebiet

Die entwickelten Ansätze dieser Arbeit werden an einem Untersuchungsgebiet am Rhein, nördlich des Naturschutzgebietes „Kühkopf-Knoblochsau“, getestet. Der 2,5 km lange Bereich des rechten Rheinufer zwischen Rhein-km 474,0 und 467,5 wurde im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“ ausgewählt, um dort ein Modellprojekt umzusetzen: die ehemalige Steinsicherung der Ufer wurde entfernt, um die Vernetzung von Gewässer, Ufer und Aue zu unterstützen und damit die eigendynamische Entwicklung einer naturnahen strukturreichen Uferzone zu ermöglichen. Durch regelmäßiges Monitoring sollen die Entwicklungen in dem Gebiet erfasst und die Wirksamkeit der Maßnahmen bewertet werden. Darüber hinaus werden in dem Gebiet im Rahmen des Forschungsprojektes mDRONES4rivers die Potentiale von Drohnen zum Einsatz für Gewässerkartierungen untersucht.

4.1 Modellprojekt Kühkopf-Knoblochsau

In dieser Arbeit wird ein 2,5 km langer Uferabschnitt am hessischen Oberrhein untersucht, welcher zwischen Rhein-km 474,0 und Rhein-km 476,5 auf der rechten Gewässerseite liegt (siehe Abbildung 4-1). Im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band“ wurde dieser Uferabschnitt als Modellprojekt ausgewiesen, um hier die Möglichkeiten von Renaturierungsmaßnahmen an deutschen Bundeswasserstraßen zu untersuchen. Das Modellprojekt „Kühkopf-Knoblochsau“ liegt innerhalb des gleichnamigen hessischen Natur- und Auenschutzgebietes.

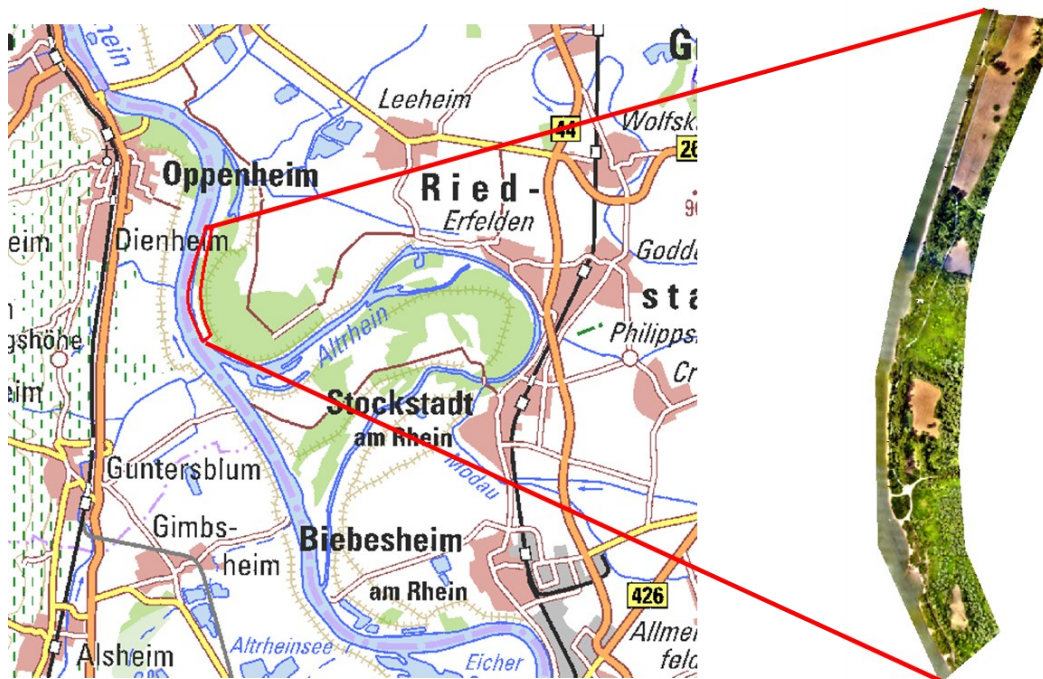


Abbildung 4-1: Geografische Einordnung des Untersuchungsgebietes „Kühkopf-Knoblochsau“ (GeoBasis-DE 2020)

An den Bundeswasserstraßen wird durch die Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen vielerorts die eigendynamische Entwicklung der Gewässer – insbesondere der Vernetzung von Fließgewässer, Ufer und Aue – eingeschränkt. Als Reaktion auf diese Problematik haben das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) das Bundesprogramm „Blaues Band Deutschland“ ausgearbeitet, welches am 01. Februar 2017 von der Bundesregierung beschlossen wurde (BMVI und BMU 2018). Das Programm zielt darauf ab, die deutschen Wasserstraßen durch intensivierete Förderung von Renaturierungsmaßnahmen bei einer naturnäheren Entwicklung zu unterstützen und somit Lebensräume für Tier- und Pflanzenarten aufzuwerten und zu vernetzen – durch ein „bundesweit verbindendes ‚Blaues Band‘“ (BMVI und BMU 2018, 7). Auch soll durch wiederhergestellte Anbindung der Auenbereiche deren Funktion des Hochwasserrückhaltes reaktiviert werden. Die Maßnahmen werden auf Flusslauf, Ufer und Auen gleichermaßen ausgelegt und sollen die gesamte Gewässerlandschaft ökologisch aufwerten.

Im Vorfeld der Umsetzung des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“ wurden Modellprojekte entwickelt, um die Umsetzungsmöglichkeiten der geplanten Renaturierungsmaßnahmen zu untersuchen. Aktuell gibt fünf Modellprojekte für Renaturierungsmaßnahmen im Kernnetz („ökologische Trittsteine“) (BMVI und BMU 2018, 26–30). Die Umsetzung der Modellprojekte wird fachlich begleitet von der Bundesanstalt für Gewässerkunde und der Bundesanstalt für Wasserbau. Zur Erfassung des Grades der Zielerreichung werden in jedem der fünf Modellprojekte Erfolgskontrollen durchgeführt. Einem dieser Projekte – dem Modellprojekt „Kühkopf-Knoblochsaue“ – widmen sich die Untersuchungen dieser Arbeit.

Der Oberrhein am Projektgebiet ist dem LAWA-Fließgewässertyp 10 *Kiesgeprägte Ströme* zuzuordnen (umweltbüro essen 2016). Im natürlichen Zustand wird dieser Fließgewässertyp durch einen gewundenen bis mäandrierenden Verlauf und durch weite Überschwemmungsaunen in breiten Tälern charakterisiert; in dem typischerweise flachen Profil treten häufig Furten, Inseln und Stromspaltungen auf und es finden sich viele größere Totholzstämme (Pottgiesser 2018, Typ 10). Als erheblich verändertes Gewässer weicht der Rhein jedoch stark von diesem Zustand ab (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2017, 17).

Der Uferbereich des Projektgebietes „Kühkopf-Knoblochsaue“ war ehemals fast vollständig mit einer Schüttsteinschicht gesichert (siehe Abbildung 4-2), die Gewässerlauf, Ufer und Aue voneinander trennte. Ende 2019 bis Anfang 2020 wurde im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band“ die Ufersicherung innerhalb des Projektgebietes zurückgebaut, um so die eigendynamische Entwicklung des Gewässerabschnittes und eine Vernetzung des Gewässers mit seinen Ufer- und Auenbereichen zu unterstützen (BMVI und BMU 2018, 30).



Abbildung 4-2: Steinschüttung zur Ufersicherung nördlich des Untersuchungsgebietes (ab Rhein-km 476,5) als Vergleich für vorherigen Zustand vieler Uferbereich im Untersuchungsgebiet¹²

Das 2,5 km lange Untersuchungsgebiet lässt sich in drei morphologisch unterschiedliche Teilbereiche untergliedern. Von Rhein-km 474,000 bis 474,700 befindet sich ein 700 m langer naturnaher Abschnitt mit flachen Ufern und langen, sandigen Buchten. Der Uferabschnitt befindet sich im Bereich eines Gleithangs und es finden sich bereits einige naturnahe Strukturen wie Kiesbänke, Sandbereiche, Weichholzaueninitiale, Flachwasserzonen und Totholzansammlungen (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2019, 39). Dieser Bereich wurde in seinem derzeitigen Zustand belassen.

Nördlich an den naturnahen Uferabschnitt schließt sich ein sehr heterogener Bereich von Rhein-km 474,700 bis Rhein-km 475,550 an. Etwa bei Rhein-km 474,800 befanden sich ehemals zwei massive Ersatzübergangsstellen zur militärischen Verwendung, welche im Sommer 2012 zurückgebaut wurden (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2017, 12). Während der Baumaßnahmen wurde in den Bereichen der Rampen zusätzlich die Ufersicherung entfernt, sodass sandige Uferbuchten entstanden. Die steilen Böschungen dieser Buchten werden bereits von verschiedenen Insekten besiedelt, deren Nistlöcher erkennbar sind (siehe Abbildung 4-3 links). Im Rahmen der Renaturierungsmaßnahmen des Modellprojektes wurden die Uferbereiche zwischen den Buchten ebenfalls enteint und es wird eine Erosion der sandigen Steilufer erwartet. Anfänge der Erosion durch Wellenschlag sind bereits erkennbar (siehe Abbildung 4-3 rechts).



Abbildung 4-3: Links: Steile Uferböschung mit Nistlöchern (Rhein-km 474,7), rechts: Beginn der Ufererosion (Rhein-km 474,9, Blick nach Süden)

¹² Alle ungekennzeichneten Fotos sind eigene Aufnahmen der Verfasserin dieser Arbeit vom 08.07.2020.

Den dritten Bereich bildet der geradlinige Uferabschnitt zwischen Rhein-km 475,550 und Rhein-km 476,500. Dieser ehemals vollständig mit Schüttsteinen gesicherte Uferbereich wurde im Rahmen der Renaturierungsmaßnahmen entsteint, lediglich Reste der Fußsicherung wurden im Uferbereich belassen. Auch an diesen sandigen Ufern ist eine Erosion und die Bildung von flacheren Uferbereichen – ähnlich denen im südlichen Abschnitt des Untersuchungsgebietes – zu erwarten. Einige Monate nach Entfernung der Uferbefestigung kann bereits eine Entwicklung der Bereiche und eine Abflachung der unteren Uferböschung erkannt werden (vergleiche Abbildung 4-4 links und rechts).



Abbildung 4-4: Erste Entwicklungen der Uferböschung bei Rhein-km 476,0: ein Vergleich des Zustands kurz nach der Baumaßnahme (links, BfG 12.05.2020) und zwei Monate später (rechts, eigene Aufnahme 08.07.2020), Blick nach Norden

In diesen dritten Teilbereich wurden einige größere Bäume gefällt. Diese wurden entastet und als verbleibende Totholzstämme oberhalb der Böschungsoberkante fixiert und im Gebiet belassen. Einige weitere Bäume stehen noch nahe der Böschungsoberkante. Da damit gerechnet wird, dass die Böschung im Laufe der Zeit weiter erodiert wird, wurden die Bäume „geköpft“ und sollen im Falle des Sturzes ebenfalls im Uferbereich fixiert und belassen werden.

Der nördlich an das Untersuchungsgebiet angrenzende Uferabschnitt ist vollständig mit einer Steinschüttung befestigt. Diese muss bestehen bleiben, um das Ufer in diesem Bereich des Prallhangs zu sichern und somit eine sichere Schifffahrt zu gewährleisten. Die Fahrrinne verläuft in diesem Bereich nahe dem rechten Flussufer. Der Übergangsbereich des renaturierten Uferabschnittes zum angrenzenden befestigten Ufer wurde mittels technisch-biologischer Ufersicherung gestaltet. Durch eine begrünte Steinschüttung mit anschließender Ufersicherung mittels Weidenspreitlagen wurde ein Übergang geschaffen.

4.2 Erfolgskontrolle

Wie alle Modellprojekte, die im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“ durchgeführt werden, wird auch die Uferrenaturierung „Kühkopf-Knoblochsau“ von Untersuchungen zur Erfolgskontrolle begleitet (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2017, 10). Wichtig ist dabei die Erhebung relevanter Parameter sowohl vor als auch nach der Maßnahmenumsetzung. Zusätzlich wird eine unveränderte Vergleichsstrecke untersucht, um abzuschätzen, wie sich das Ufer im Untersuchungsgebiet ohne die Renaturierungsmaßnahmen entwickelt hätte (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2017, 23). Für die Erfolgskontrolle des

Modellprojektes „Kühkopf-Knoblochsau“ hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde eine Methodik entwickelt und Indikatoren zur Zustandserfassung und -bewertung formuliert. Als Bewertungsziele wurden aus den Projektzielen für den Bereich Hydromorphologie beispielsweise folgende abgeleitet (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2017, 20–21):

- Z1: „Entwicklung und Förderung von gewässertypspezifischen Sohlausprägungen im ufernahen Bereich des Rheins (Kies- und Sandbänke, Flachwasserzonen etc.)“
- Z2: „Entwicklung und Förderung von gewässertypspezifischen Uferausprägungen entlang des Rheins (Sand- und Kiesufer, Abbruchkanten, Böschungen, Uferliniengestalt etc.) u.a. durch verbesserte Ausuferungsfähigkeit und -dynamik“

Diese beiden Zieldefinitionen legen den Fokus auf die Entwicklung einer hydromorphologischen Strukturvielfalt sowohl der Sohle als auch des Uferbereichs. Um den Grad der Zielerreichung zu bestimmen ist folglich eine Erfassung der Sohlstrukturen und der Uferstrukturen erforderlich. Diese beiden Parameter (Sohlstrukturen und Uferstrukturen) wurden daher von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in ihrem „Bewertungsrahmen für die Erfolgskontrolle im Modellprojekt ‚Kühkopf-Knoblochsau‘“ (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2017, 20) als zwei der insgesamt zwölf Indikatoren festgelegt. Zur Wirksamkeitskontrolle der Maßnahmen und für ein kontinuierliches Monitoring der Entwicklungen wurden und werden weiterhin in regelmäßigen zeitlichen Abständen Luftbilddaten für dieses Gebiet erhoben (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2019, 18).

Darüber hinaus wurde das Gebiet des Modellprojektes ausgewählt, um im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten Forschungsprojektes „mDRONES4rivers – Moderne Sensorik und luftgestützte Fernerkundung für vegetationskundliche und hydromorphologische Anwendung an Wasserstraßen“ werden unter der Leitung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, Kontakt: mdrones4rivers@bafg.de) die Einsatzmöglichkeiten von Drohnen bei vegetationskundlichen und hydromorphologischen Kartierungen untersuchen (BMVI 2020). Zur Erfassung des Zustandes von Gewässern inklusive ihrer Ufer und Auen waren bisher aufwändige Kartierungen und Vermessungen im Gelände notwendig. Eine Unterstützung dieser Arbeiten durch die Auswertung von Fernerkundungsdaten verspricht eine Zeit- und Kostenersparnis. Mit hochauflösenden Multispektralkameras ausgestattet können Drohnen die detailreiche Oberfläche von Gewässerlandschaften erfassen, auch in schwer zugänglichen Gebieten. Darüber hinaus sollen (teil-)automatisierte Auswertungsverfahren entwickelt werden (BMVI 2020). In der vorliegenden Arbeit werden wichtige Vorüberlegungen getroffen und Auswertungsparameter untersucht, die dem übergeordneten Ziel der automatisierten Auswertung hochauflösender Drohnen- sowie digitaler Höhendaten dienen.

5 Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Untersuchungen dieser Arbeit konnten verschiedene Rasterdatensätze verwendet werden, die im Rahmen des Projektes „mDRONES4rivers – Moderne Sensorik und luftgestützte Fernerkundung für vegetationskundliche und hydromorphologische Anwendung an Wasserstraßen“ (siehe Abschnitt 4.2) erhoben wurden: hochaufgelöste, digitale Orthofotos (RGB und multispektral), ein hochaufgelöstes Digitales Geländemodell, welches auf Basis eines ALS-Datensatzes (luftgestütztes Laserscanning) erstellt wurde, sowie ein *Ground Truth* Datensatz aus vermessenen Geländepunkten. Eine nähere Beschreibung der verwendeten Daten sowie detailliertere technische Informationen werden in den folgenden Abschnitten angegeben. Im Vorfeld werden jeweils die Grundprinzipien der zugrundeliegenden Fernerkundungstechnik erklärt.

5.1 Digitale Orthofotos und multispektrale Luftbilder

5.1.1 Luftbildfotografie

Die Erhebung von Luftbilddaten basiert auf der Erfassung elektromagnetischer Strahlung verschiedener Wellenlängen und der anschließenden Speicherung dieser Informationen in Form von Bilddaten. Neben der Erfassung von Wellenlängenbereichen des sichtbaren Lichts ist mit multispektralen Kameras auch eine Erfassung von Wellenlängenbereichen des Infrarots möglich.

Bei der Luftbilderhebung werden sogenannte *passive Sensoren*¹³ verwendet, die den Anteil der von der Erdoberfläche reflektierten Sonnenstrahlung messen. Dazu werden die Sensoren auf einer Trägerplattform, beispielsweise auf Drohnen oder Flugzeugen, installiert. Bei der Datenerhebung wird die Erdoberfläche des abzubildenden Gebietes streifenweise abgetastet. Der Sensor der Kamera nimmt die einfallende Strahlung an jeder Position auf und zeichnet auf, welcher Anteil der Strahlung verschiedener Wellenlängenbereiche von dem jeweiligen Punkt der Erdoberfläche reflektiert wird. Die Informationen über die Reflexionsintensität der einzelnen Spektralbereiche werden in verschiedenen Kanälen rasterartig gespeichert. Jede Zelle des Rasters erhält einen Zahlenwert – den Grauwert – der angibt, wie hoch die Intensität der reflektierten Strahlung im jeweiligen Wellenlängenbereich an dieser Stelle ist (Mott 2005, 12). Die radiometrische Auflösung eines Sensors gibt an, wie differenziert die Reflexionsintensität unterschieden werden kann; eine radiometrische Auflösung von 8 Bit ermöglicht beispielsweise die Unterscheidung von 256 verschiedenen Grauwerten (Werte von 0 bis 255)¹⁴. Als weitere wichtige Eigenschaften von Bilddaten gibt die räumliche Auflösung die Pixelgröße des Rasters an und die spektrale Auflösung die Anzahl der verschiedenen Spektralkanäle (Richards und Jia 2006, 3).

¹³ Im Gegensatz dazu senden *aktive Sensoren* selbst Strahlung aus (z.B. Mikrowellen- oder Laserstrahlung), deren Reflexion anschließend erfasst wird.

¹⁴ Hohe Grauwerte stehen für eine hohe Reflexionsintensität, niedrige Grauwerte für eine geringe Reflexionsintensität.

Gängige Produkte der fotografischen Fernerkundung sind orthorektifizierte RGB-Luftbilder (digitale Orthofotos) und multispektrale Luftbilddaten. Um diese Bildprodukte zu erzeugen, werden die Daten der streifenhaften Befliegung zusammengefügt und geometrische Verzerrungen mittels spezieller Verfahren entfernt. Durch ein integriertes Positionierungssystem in der Kamera oder nachträglich anhand von *Ground Control Points* (Passpunkte im Gelände, deren Lage bekannt ist) werden die Daten georeferenziert.

Bei der Auswertung von Luftbilddaten werden die Informationen über die Reflexionseigenschaften verschiedener Wellenlängenbereiche verwendet, um auf den Inhalt des Bildes zu schließen. Die Basis für die Bildanalysen bildet die Tatsache, dass verschiedene Materialien auch unterschiedlich mit elektromagnetischer Strahlung interagieren (Mott 2005, 10). So unterscheiden sich beispielsweise die drei dominanten Bedeckungen der Erdoberfläche – Wasser, Vegetation und Boden – deutlich in ihrer spektralen Charakteristik (vergleiche Abschnitt 3.2). Ein natürliches Farbfoto erhält man durch Kombination der Informationen der Spektralkanäle Rot, Grün und Blau in einem RGB-Komposit¹⁵ (Echtfarbenbilder). Für verschiedene Analysen kann es auch hilfreich sein, den Farben andere Spektralkanäle zuzuordnen und auch infrarote Wellenlängenbereiche darzustellen (Falschfarbenbilder). Eine gängige Methodik der Luftbildanalyse ist die computergestützte Bildklassifikation. Es gibt verschiedene Klassifikationsverfahren, deren Basis die spektralen Eigenschaften der Bildpunkte bilden, teilweise ergänzt durch kontextuelle Informationen. Die Grundlagen der verschiedenen Klassifikationsstrategien werden in Abschnitt 3.2 erklärt.

5.1.2 Verwendete Luftbilddatensätze

Die in dieser Arbeit verwendeten hochaufgelösten Luftbilddatensätze wurden von der Firma Geocoptix aus Trier für das Forschungsprojekt „mDRONES4rivers“ erhoben. In der vorliegenden Arbeit wurden Luftbilddaten vom 15. Oktober 2019 (vor Maßnahmenumsetzung) und vom 07. Juli 2020 (nach Maßnahmenumsetzung) verwendet. Bei diesen beiden Erhebungen wurden jeweils hochaufgelöste RBG-Orthofotos erstellt, im Oktober 2019 wurden parallel dazu ebenfalls hochaufgelöste Multispektralbilder aufgenommen.

Der Datensatz der RBG-Luftbilder vom 15. Oktober 2019 wurde mittels einer unbemannten Drohne (*UAV: unmanned aerial vehicle*) des Modells *Sirius Pro* der Firma Intel und einer Kamera der Firma Fujifilm (Modell *X-M1*) erhoben (Fricke et al. 2019). Die Bilddaten liegen im *Tagged Image File Format* (TIFF) vor und weisen die nachfolgend aufgeführten technischen Eigenschaften auf (siehe Tabelle 5-1).

¹⁵ Ein Farbkomposit vereinigt drei Graustufenbilder zu einem Farbbild. Bei dem natürlichen RGB-Foto wird der rote Wellenlängenbereich dem roten Farbkanal, der grüne Wellenlängenbereich dem grünen Farbkanal und der blaue Wellenlängenbereich dem blauen Farbkanal zugeordnet.

Tabelle 5-1: Technische Informationen: RGB-Luftbilddaten vom 15.10.2019

Räumliche Auflösung	2 cm/Pixel
Radiometrische Auflösung	8 Bit (256 Grauwerte)
Spektrale Auflösung	3 Kanäle (1: Rot, 2: Grün und 3: Blau)
Lagereferenzsystem	ETRS89 / UTM Zone 32N
Urheber	GEOCOPTIX GmbH

Zur Erhebung der RGB-Orthofotos vom 07. Juli 2020 wurde eine Drohne (UAV) vom Typ *Phantom 4* der Firma DJI und das integrierte Kamerasystem *FC330* verwendet (Geocoptix GmbH 2020). Die mittlere Flughöhe betrug 81,7 m (Geocoptix GmbH 2020). Die technischen Informationen der Bilddaten (ebenfalls TIFF) sind Tabelle 5-2 zu entnehmen.

Tabelle 5-2: Technische Informationen: RGB-Luftbilddaten vom 07.07.2020

Räumliche Auflösung	3 cm/Pixel
Radiometrische Auflösung	8 Bit (256 Grauwerte)
Spektrale Auflösung	3 Kanäle (1: Rot, 2: Grün und 3: Blau)
Lagereferenzsystem	ETRS89 / UTM Zone 32N
Urheber	GEOCOPTIX GmbH

Die multispektralen Luftbilddaten vom 15. Oktober 2019 wurden mit einem System aus einer *Phantom 4 Pro* Drohne (UAV) der Firma DJI und dem Kameramodell *RedEdge M* der Firma MicaSense aus einer Flughöhe von 70,4 m aufgenommen (Fricke et al. 2019; Geocoptix GmbH 2019). Die Multispektralkamera ermöglicht die Erfassung zweier Kanäle des nahen Infrarots (RE: Red Edge, NIR: nahes Infrarot), sodass Informationen von insgesamt 5 Farbkanälen gespeichert werden (siehe Abbildung 5-1). Anstatt der Speicherung des ganzzahligen Grauwertes von i.d.R. 0 bis 255 (8 Bit) werden hier die Reflexionsintensitäten je Kanal für jedes Pixel als Gleitkommazahl zwischen 0 und 1 angegeben. Die technischen Eigenschaften des multispektralen Datensatzes (ebenfalls TIFF) sind in Tabelle 5-3 zusammengestellt.

Tabelle 5-3: Technische Informationen: multispektrales Luftbild vom 15.10.2019

Räumliche Auflösung	4,5 cm/Pixel
Radiometrische Auflösung	64 Bit (Gleitkommazahl zwischen 0 und 1)
Spektrale Auflösung	5 Kanäle (1: Blau, 2: Grün, 3: Rot, 4: RE, 5: NIR)
Lagereferenzsystem	ETRS89 / UTM Zone 32N
Urheber	GEOCOPTIX GmbH

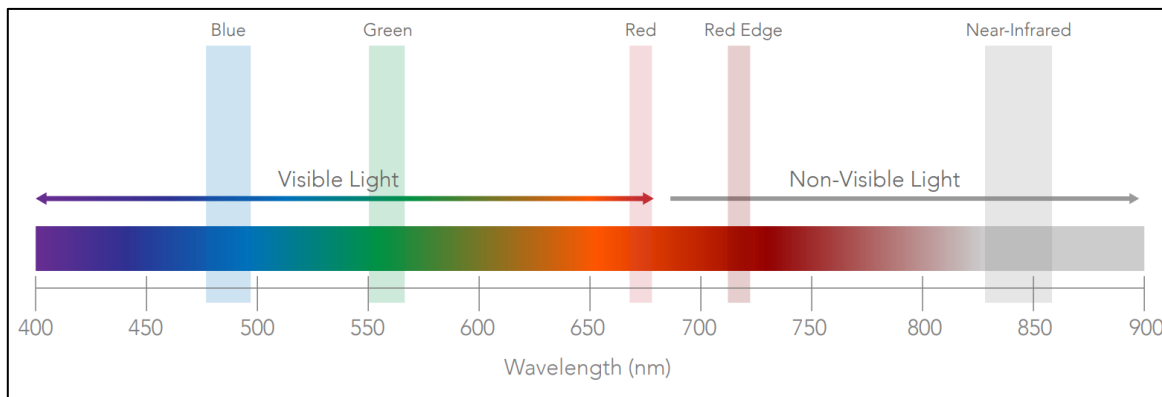


Abbildung 5-1: Wellenlängenbereiche der Multispektralkamera MicaSense RedEdge M (MicaSense Inc. 2018)

5.2 LiDAR-Höhendaten

5.2.1 Luftgestütztes Laserscanning (ALS)

LiDAR (Light Detection and Ranging) ist eine Methode zur laserbasierten Abstandsmessung. In der Fernerkundung werden LiDAR-Messungen häufig mittels luftgestützter Trägerplattformen (z.B. Kleinflugzeuge, Helikopter oder Drohnen) durchgeführt; die Methodik wird als *Airborne Laserscanning (ALS)* bezeichnet¹⁶. Dabei wird die Erdoberfläche mittels Laserstrahlung abgescannt und deren Reflexion erfasst. Aus der Laufzeit des Signals können anschließend Distanzen ermittelt werden.

Ein flugzeuggestütztes Laser Scanning System setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Die Scannereinheit umfasst einen Sender, der fortlaufend sehr kurze Laserimpulse aussendet, und einen Empfänger, der die reflektierten Signale erfasst. Eine Satelliten-Navigationseinheit (GNSS: Global Navigation Satellite System) bestimmt die Position und die inertielle Messeinheit (IMU: Inertial Measurement Unit) die den Drehwinkel des Laserscanners. Für eine gleichzeitige Aufnahme von Bilddaten kann das System auch mit einer Digital- oder Videokamera kombiniert werden.

Die Befliegung des zu erfassenden Gebietes erfolgt streifenweise, wobei jeder Geländestreifen zeilenweise mit dem Laserstrahl abgetastet wird. Dazu wird die Laserstrahlung von einem beweglichen Spiegel abgelenkt. Die Breite der erfassten Streifen ergibt sich aus dem Öffnungswinkel des Scanners und der Flughöhe der Plattform. Die Flugroute wird dabei in der Regel so geplant, dass die Streifen sich seitlich überlappen, um Datenlücken zu vermeiden (Nyffeler 2018, 13).

Der Laserscanner sendet dabei fortlaufend sehr kurze Laserimpulse aus; die Impulsraten liegen bei modernen Scannern bei etwa 100 bis 300 kHz (Mandlbürger et al. 2009, 90; Nyffeler 2018, 13). Die Laserimpulse werden anschließend von der Erdoberfläche und den darauf befindlichen Objekten reflektiert. Durch die Strahldivergenz umfasst der

¹⁶ In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe LiDAR-Daten und ALS-Daten synonym verwendet.

ausgesendete Laserstrahl beim Auftreffen auf der Erdoberfläche einen größeren Bereich, den sogenannten Footprint, der je nach Flughöhe einen unterschiedlich großen Durchmesser aufweist, nach Pfeifer et al. (2016, 433) von unter 1 cm bis über 1 m. Dadurch wird ein einzelner Laserimpuls oft mehrfach auf unterschiedlichen Höhen reflektiert; ein erstes Echo wird beispielsweise von Hausdächern oder Vegetation zurückgeworfen, weitere Anteile des Lasersignals dringen weiter nach unten, bis letzte Teile der Strahlung den Boden erreichen (*last echo*). Der Empfänger des Laserscanners empfängt somit mehrere zurückgeworfene Signale über die Zeit, die je nach Sensortyp unterschiedlich verarbeitet werden. Die zwei gängigsten Systeme sind die Aufzeichnung der Signale als *discrete echo* oder als *full waveform* (siehe Abbildung 5-2). Bei *discrete echo* Systemen registriert der Sensor einzelne Signale, sobald deren Intensität einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Um einzelne Echos zu unterscheiden ist dabei jedoch eine vertikale Mindestdistanz der reflektierenden Objekte nötig. Meist werden das erste und das letzte Echo erfasst (Mandlbürger et al. 2009, 91). *Full waveform* Systeme zeichnen die gesamte Wellenform des reflektierten Laserimpulses auf. Aus der Amplitude und der Echoweite können Informationen über die räumliche Struktur des reflektierenden Objektes gewonnen werden, was für eine Klassifikation der ALS-Punkte hilfreich ist (Mandlbürger et al. 2009, 91; Nyffeler 2018, 15).

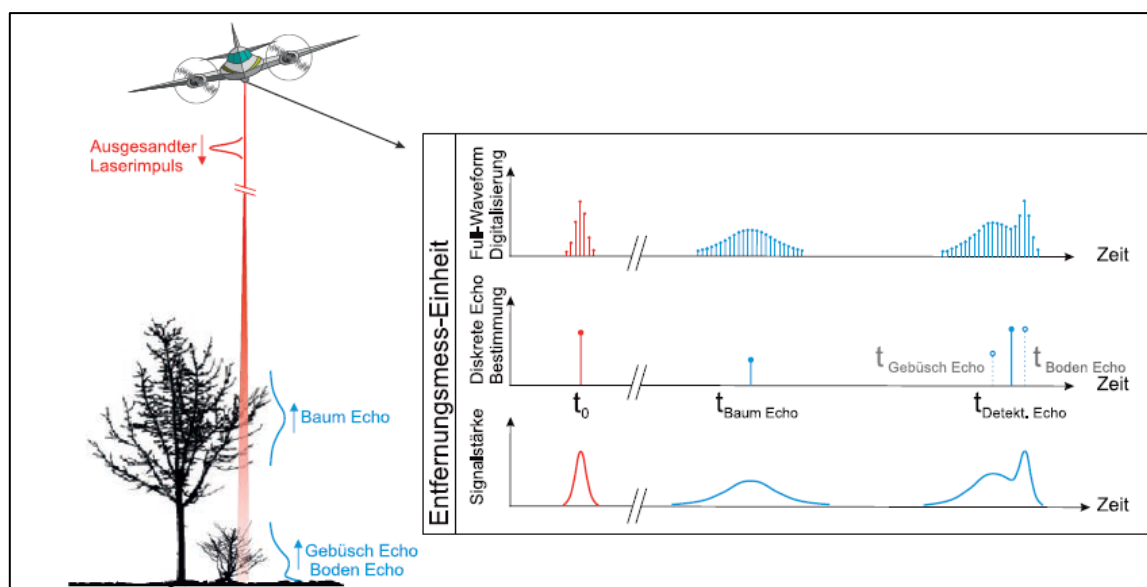


Abbildung 5-2: Unterschiedliche Prinzipien der Signalerfassung des ALS (Mandlbürger 2009, S. 90)

Der Reflexionsgrad einer Oberfläche ist unter anderem abhängig von der Wellenlänge der Laserstrahlung. Für die Anwendung des ALS auf Landflächen werden in der Regel Sensoren mit Laserstrahlung im nahen Infrarotbereich eingesetzt ($\lambda \approx 800 - 1550 \text{ nm}$) (Nyffeler 2018, 13; Mandlbürger et al. 2009, 90).

Anhand der Laufzeit des Laserimpulses kann die Distanz zwischen Laserscanner und angestrahlttem Objekt ermittelt werden (Geschwindigkeit der Laserstrahlung = Lichtgeschwindigkeit). Aus der Position des Scanners, die mittels GNSS und IMU genau bestimmt werden kann, und den Distanzinformationen können die genauen Koordinaten der gescannten Objekte berechnet werden.

Das Ergebnis des Laserscannens ist eine detaillierte dreidimensionale Abbildung der Erdoberfläche und der darauf befindlichen Objekte in Form einer Punktwolke (eine unstrukturierte Menge aus 3D-Messpunkten). Die LiDAR-Punktwolken können anschließend zu weiteren Produkten verarbeitet werden, z.B. zu einem digitalen Oberflächenmodell (DOM, Erdoberfläche inkl. aller Objekte wie Vegetation oder Gebäude) oder einem Digitalen Geländemodell (DGM, reine Erdoberfläche ohne darauf befindliche Objekte). Für geomorphometrische Untersuchungen ist vor allem das DGM von großer Bedeutung. Für die Erstellung eines DGM aus der LiDAR-Punktwolke ist zunächst eine Klassifikation der Punkte in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte (Vegetation, Gebäude, etc.) erforderlich. Dazu werden nur die letzten Echos verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass vorangegangene Echos nicht am Boden liegen können (Pfeifer et al. 2016, 476). Die letzten Echos werden dann durch verschiedene Algorithmen klassifiziert. Aus den Höhenwerten der Bodenpunkte kann anschließend ein geordnetes Höhenraster interpoliert werden: das DGM.

5.2.2 Digitales Geländemodell aus ALS-Höhendaten

Das Digitale Geländemodell (DGM), welches für die Untersuchungen dieser Arbeit verwendet wurde, basiert auf LiDAR-Daten einer ALS-Befliegung, die für das Projekt „mDRO-NES4rivers“ durchgeführt wurde. Von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde eine genaue Erfassung der Geländehöhen für ausgewählte Projektgebiete am Rhein mittels luftgestütztem Laserscanning (ALS) in Auftrag gegeben; unter anderem für das Gebiet des Modellprojektes „Kühkopf-Knoblochsau“. Die ALS-Befliegung erfolgte am 12. Mai 2020. Der Wasserstand des Rheins lag zu diesem Zeitpunkt leicht unter Mittelwasser (WSA Oberrhein 2020).

Die Datenerfassung wurde mittels eines Laserscanners der Firma Rieggl (Modell *VQ-780 II*) durchgeführt, welcher mit einer Taktrate von bis zu 2000 kHz arbeitet (Energie Burgenland Dienstleistung und Technik GmbH 2020). Als Trägerplattform diente ein Helikopter. Der 2,5 km lange Uferabschnitt des Untersuchungsgebietes „Kühkopf-Knoblochsau“ wurde in einer Höhe von ca. 300 m über dem Grund in 3 Streifen beflogen. Die gescannten Geländestreifen haben eine Breite von ca. 340 m (Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$) und wurden mit einer Punktdichte von mind. 280 Punkten/m² zeilenhaft gescannt, was nach Zusammenfügen der Streifen zu einer Gesamtpunktdichte von mind. 450 Punkten/m² führt. Der verwendete Laserscanner verfügt über einen *Full Waveform* Sensor, d.h. der komplette Verlauf der rückgestrahlten Signale wird registriert. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Georeferenzierung wurden mehrere Passpunkte und Passflächen terrestrisch vermessen. Parallel zur Laservermessung wurden mittels einer Kamera der Firma PhaseOne (Modell *iXA 180*) Luftbilddaten aufgenommen. Die RGB-Orthofotos haben eine Auflösung von 5 cm und können genutzt werden, um die örtlichen Gegebenheiten zum Zeitpunkt der Laserscan-Befliegung nachzuvollziehen. (Energie Burgenland Dienstleistung und Technik GmbH 2020)

Auf diese Weise wurde eine detaillierte dreidimensionale Abbildung der Geländeoberfläche in Form einer LiDAR-Punktwolke ermittelt. Zur weiteren Arbeit mit den Höhendaten wurden diese weiterverarbeitet und weitere Produkte (z.B. das für diese Arbeit verwendete Digitale Geländemodell) erstellt. Für die Erstellung eines DGM werden die LiDAR-Punkte zunächst in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte klassifiziert und aus den

Höheninformationen der Bodenpunkte ein geordnetes Höhenraster interpoliert. Durch die hohe Punktdichte des ALS konnte eine ebenfalls sehr hohe Auflösung des DGM erreicht werden; die technischen Informationen über die Höhen- und Lageauflösung des Datensatzes sowie die verwendeten Referenzsysteme sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 5-4: Technische Informationen: DGM aus LiDAR-Daten vom 12.05.2020

Auflösung (Lage)	5 cm/Pixel
Genauigkeit (Höhe)	1 cm
Lagereferenzsystem	ETRS89 / UTM Zone 32N
Höhenreferenzsystem	DHHN 2016
Urheber	Bundesanstalt für Gewässerkunde

5.3 Geländepunkte aus GNSS-Vermessung

Parallel zur Erhebung der Befliegungsdaten im Rahmen des Projektes „mDRONES4rivers“ wurden einige markante Punkte terrestrisch im Gelände vermessen. Die Vermessung wurde mithilfe eines mobilen GNSS-Empfängers der Firma Trimble am 12. Mai 2020 durchgeführt. Anhand der empfangenen Signale mehrerer Navigationssatelliten kann der GNSS-Empfänger die genaue Position eines Messpunktes bestimmen. So können Geländepunkte in ihrer dreidimensionalen Position gespeichert werden, um sie anschließend digital zu nutzen, z.B. in einem GIS. Es wurden vorrangig Punkte im Uferbereich vermessen, um die in großen Teilen des Untersuchungsgebietes vorhandene steile Abbruchkante der Uferböschung zu erfassen. Dabei wurde an insgesamt acht Positionen jeweils ein Punkt direkt an der Oberkante des Abbruchs aufgenommen. An einigen dieser Standorte wurden weitere Punkte entlang von Transekten vermessen, um weitere markante Punkte oder sogar ein gesamtes Uferprofil zu erfassen. In diesem Fall wurde jeweils ein weiterer Geländepunkt direkt auf die Unterkante des Uferabbruchs gelegt. Eine Übersicht über die vermessenen Geländepunkte ist in Anlage 1 dargestellt.

Im Gelände vermessene Punkte werden in der Fernerkundung häufig als sogenannte *Ground Truth* Daten verwendet, um digitale Informationen zu validieren. Allgemein werden als Ground Truth solche Informationen bezeichnet, die direkt vor Ort erhoben werden (z.B. Fotos, Bodenproben oder – wie hier – Geländepunkte). Diese Daten können bei der Analyse von Fernerkundungsdaten hilfreich sein. Bei der Bildklassifizierung werden Ground Truth Daten häufig verwendet, um die Genauigkeit der Klassifizierungsergebnisse zu bewerten. Vor Ort werden Punkte klassifiziert und mit den digitalen Ergebnissen verglichen. In dieser Arbeit werden die im Gelände vermessenen Ground Truth Punkte genutzt, um die Qualität der teilautomatisierten Kantenextraktion am Beispiel der Oberkante der Uferböschung zu untersuchen (siehe Unterabschnitt 7.3.2).

6 GIS-Software

Für die Untersuchung der verschiedenen geometrischen und radiometrischen Parameter und die Entwicklung von Methoden zur Erfassung hydromorphologischer Strukturen aus den vorliegenden Vermessungsdaten wurden zwei verschiedene GIS-Softwares verwendet: ArcGIS Desktop der Firma ESRI und die Open Source Software GRASS GIS.

6.1 ArcGIS Desktop

Unter dem Namen *ArcGIS* fasst das Unternehmen ESRI verschiedene eigens veröffentlichte, kommerzielle GIS-Softwareprodukte zusammen. Die Produktfamilie *ArcGIS Desktop* umfasst verschiedene Desktop-Anwendungen zum Verwalten von Geodaten, zur Durchführung von räumlichen Analysen und zum Erstellen von Karten. In dieser Arbeit wird die Anwendung *ArcMap* der ArcGIS Desktop Version 10.7.1 (ESRI 2019) verwendet.

Die Anwendung *ArcMap* arbeitet mit der Darstellung geografischer Informationen als Sammlung verschiedener Layer in einer Kartenansicht und bietet verschiedene Möglichkeiten der Visualisierung von GIS-Datensätzen sowie des Exports von Karten. Die Geodaten-sätze können darüber hinaus bearbeitet werden und neue Geoobjekte und Datensätze erstellt werden. Zusätzlich bietet *ArcMap* umfangreiche Möglichkeiten der Analyse raumbezogener Daten. In der vorliegenden Arbeit wurden unter anderem die Erweiterungen *ArcGIS Spatial Analyst* und *ArcGIS 3D Analyst* verwendet, welche zahlreiche Werkzeuge zur räumlichen Analyse von Rasterdaten und Vektordaten enthalten. Besonders nützlich für die Analysen dieser Arbeit waren Funktionen zur Reliefanalyse von digitalen Höhenrastern (DGM), die die Berechnung zahlreicher geometrischer Parameter erlauben (z.B. Neigung, Exposition, Krümmung).

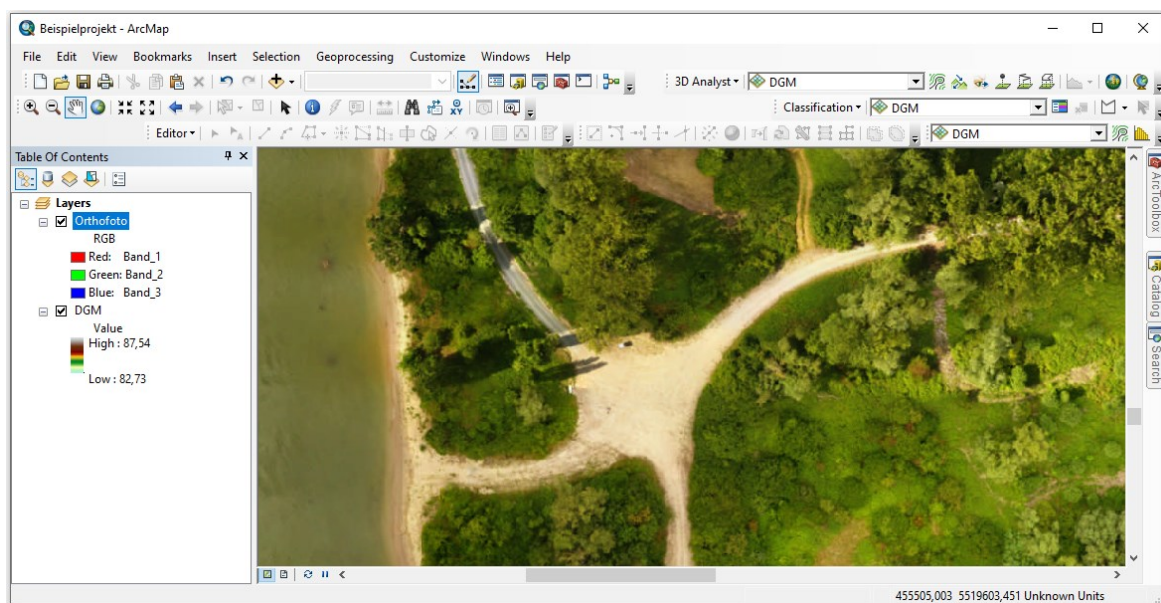


Abbildung 6-1: Benutzeroberfläche der ArcGIS-Anwendung ArcMap

6.2 GRASS GIS

GRASS GIS ist eine Open-Source-GIS-Software, der Name der Software ist ein Akronym für *Geographic Resources Analysis Support System*. In der vorliegenden Arbeit wird die Software GRASS GIS in der Version 7.8.3 (GRASS Development Team 2020a) verwendet.

GRASS GIS arbeitet mit einer grafischen Benutzeroberfläche sowie einer Befehlszeile, in der die Funktionen durch Eingabe des entsprechenden Befehls direkt aufgerufen werden können. Auch in GRASS GIS werden die Geodaten in einer Layer-Struktur verwaltet und können so auf unterschiedliche Weise dargestellt und bearbeitet werden. Speziell auf die Analyse raumbezogener Daten ausgerichtet bietet GRASS GIS zahlreiche Funktionen zur Rasteranalyse, inkl. umfangreicher Bildanalysemöglichkeiten, und zur Analyse von Vektordaten. Unter den Rasterwerkzeugen findet sich ein Funktionspaket zur Terrainanalyse, welches für die Untersuchungen dieser Arbeit nützliche Möglichkeiten der Berechnung geometrischer Parameter bietet. Auch eine skalenvARIABLE Berechnung von Neigung, Krümmung und anderer Größen ist hiermit möglich (Funktion *r.param.scale*). Zusätzlich stehen verschiedene Add-ons zur Verfügung; in der vorliegenden Arbeit wurde beispielsweise die Funktion *r.skyview* zur Berechnung des Sky-View Factors verwendet, welche zunächst als Erweiterung in GRASS GIS integriert werden muss.

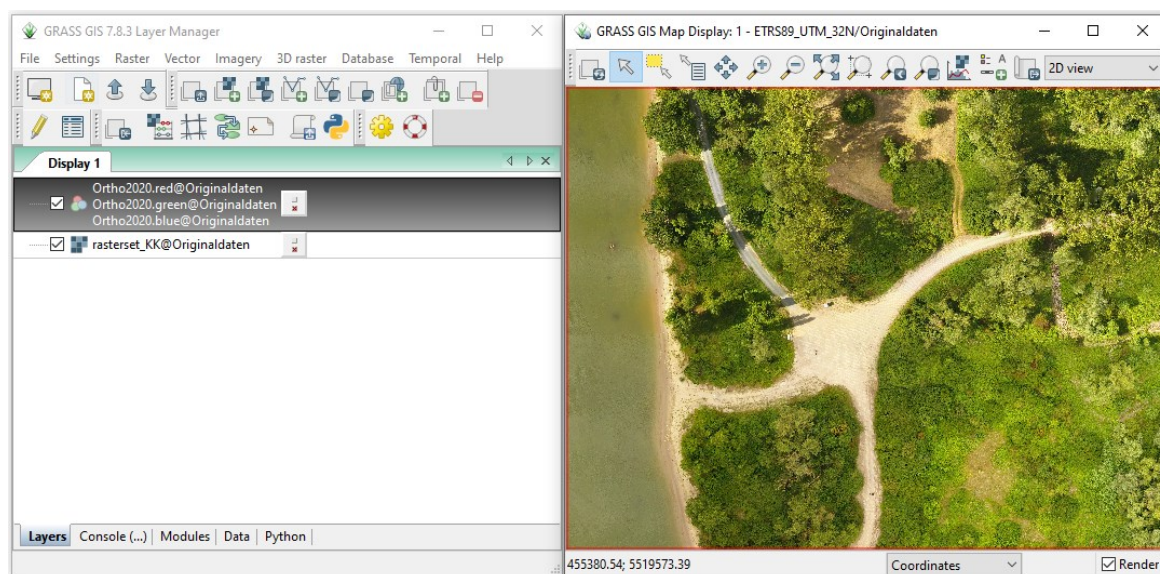


Abbildung 6-2: Benutzeroberfläche der Software GRASS GIS

7 Reliefanalyse

Durch die Reliefanalyse sollen Strukturen detektiert und abgegrenzt werden, die sich vorrangig durch ihre geometrischen Eigenschaften auszeichnen; in der vorliegenden Arbeit sind dies die Strukturklassen *Böschung*, *Rinne*, *Wall* und *Senke*. Diese Strukturen werden aus unterschiedlich geneigten Flächen gebildet und heben sich damit vom umgebenden Relief ab. Zur räumlichen Abgrenzung der Strukturen muss der Übergang zwischen zwei unterschiedlich geneigten Flächen (z.B. geneigte Fläche und Ebene) eindeutig abgegrenzt werden. Dies erfolgt durch die Erstellung von Kanten. In der Vergangenheit wurden viele Verfahren für eine (teil-)automatische Extraktion von Geländekanten aus digitalen Höhendaten entwickelt. Einer dieser Ansätze wird in diesem Kapitel auf das Untersuchungsgebiet angewendet; auf Basis der Profilkrümmung werden aus den gewölbten Geländebereichen Kanten extrahiert, die die Grundlage zur Abgrenzung von Ufer- und Auenstrukturen bilden. Zur Identifikation verschiedener Strukturen werden anschließend die topologischen Eigenschaften der Kanten untersucht.

Einen besonderen Fokus legen die Untersuchungen auf die Uferböschung, da diese zukünftig voraussichtlich den stärksten morphologischen Veränderungen unterliegt. Eine detaillierte Erfassung der Uferform ermöglicht es, die Veränderungen über die Zeit zu registrieren. Zunächst wird die Uferböschung definiert und abgegrenzt. Die Böschungsoberkante (BOK) wird aus den extrahierten Oberkantensegmenten erstellt. Mithilfe von terrestrisch vermessenen Oberkantenpunkten kann eine Qualitätskontrolle für die erstellte Böschungsoberkante durchgeführt werden. Anschließend wird eine Methodik für die Klassifizierung der Uferböschung anhand ihrer Neigung entwickelt. Diese Klassifikation erlaubt eine weitere Interpretation der Uferböschungen; es lassen sich Rückschlüsse auf ihre Ausprägung (Flachufer, Steilufer) sowie auf besondere Uferformen (Stufenufer) ziehen.

7.1 Extraktion von Geländekanten aus dem Digitalen Geländemodell

Geländekanten werden in verschiedenen wissenschaftlichen Publikationen als Unstetigkeiten der Geländeneigung definiert (Mandlbürger 2009, S. 91, Briese Mandlbürger 2009, S. 236, Höfle 2013, S. 5858)¹⁷. Solche lokalen, starken Neigungsänderungen können genutzt werden, um geomorphologische und hydromorphologische Strukturen abzugrenzen. Rutzinger et al. (2012, 33) formulieren dies wie folgt: „The borders of geomorphological units are represented by discontinuities of the terrain surface.“ Eine Erfassung dieser Kanten

¹⁷ Der Begriff *Geländekanten* wird in der vorliegenden Arbeit als Sammelbegriff für morphologisch bedeutsame, linienhafte Geländestrukturen verwendet, die aus Neigungsänderungen resultieren. Darunter werden hier nicht nur ausgeprägte Knicke, sondern auch weniger stark ausgeprägte Kanten verstanden. In der Literatur finden sich verschiedene Bezeichnungen für solche linienhaften Strukturen: mit teilweise leicht unterschiedlicher Ausrichtung wird in deutschsprachigen Fachpublikationen neben dem Begriff *Geländekanten* (Mandlbürger et al. 2009) z.B. der Begriff *Strukturlinien* (Brzank 2008a; Mandlbürger et al. 2016) verwendet, in englischsprachigen Fachpublikationen finden sich vorrangig die Begriffe *breaklines* (Briese 2004; Rutzinger et al. 2012), *structure lines* (Brzank et al. 2008b) oder *lineaments* (Maukisch et al. 2007; Rutzinger et al. 2007).

ermöglicht somit eine Abgrenzung der hydromorphologischen Strukturen in ihrer Lage und Ausdehnung. Mandlbürger et al. (2009, S. 91) betonen die Bedeutung von Geländekanten zur Abgrenzung von „hydraulisch relevanten Objekten“ wie Dämmen, Deichen und Gräben. Von den in Unterabschnitt 2.3.3 definierten Strukturklassen zeichnen sich die *Böschungen*, *Rinnen*, *Senken* und *Wälle* durch ihre Form aus. Diese Strukturen setzen sich aus Flächen unterschiedlicher Neigung zusammen und können durch ihre Ober- und Unterkanten abgegrenzt werden. Geländekanten können unter anderem terrestrisch vermessen werden. Darüber hinaus gibt es verschiedene Ansätze, um Geländekanten aus digitalen Höhendaten (DGM oder ALS-Punktwolke) zu extrahieren. Im folgenden Abschnitt werden einige Methoden der computergestützten, (teil-)automatischen Kantenextraktion vorgestellt.

Abrupte Geländeknicke treten vereinzelt beispielweise bei steilen Uferabbrüchen auf, in den meisten Fällen finden sich in natürlichen Gewässer- und Auenlandschaften allerdings vorwiegend kontinuierlichere Neigungsänderungen, genauer gesagt konvexe oder konkave Krümmungen. So zeichnen sich beispielsweise Unterkanten von Wällen durch konkaven Übergang von geneigter Böschung zu ebener Fläche aus. Bei Rinnen ist in umgekehrter Weise die Oberkante durch den Übergang von geneigter Böschung zu ebener Fläche in konvexer Krümmung zu erkennen. In diesem Kapitel wird eine Methodik vorgestellt, um Geländekanten anhand des Parameters Profilkrümmung zu extrahieren. Die Methodik basiert auf dem von Rutzinger et al. (2007) vorgestellten Vorgehen zur Kantenextraktion aus einem digitalen Höhenraster und wird in der vorliegenden Arbeit für die Anwendung auf Ufer- und Auenstrukturen angepasst. Mithilfe von Schwellenwerten werden Zellen mit starker konvexer oder konkaver Krümmung selektiert und in Liniensegmente umgewandelt. Die auf diese Weise erstellten Geländekanten bilden die Grundlage für die Abgrenzung hydromorphologischer Strukturen. Die weitere Klassifikation und Identifikation der jeweiligen Strukturen erfolgt in nachgeschalteten Schritten. Dafür werden die topologischen Eigenschaften der Kanten untersucht, also ihre Anordnung und Lagebeziehung. So deuten verschiedene Anordnungen von Kanten auf unterschiedliche Strukturen hin. Ein Gefüge von einer Ober- und einer Unterkante kann als Abgrenzung einer Böschung interpretiert werden. Mehrere Böschungen können gemeinsam weitere hydromorphologische Strukturen charakterisieren.

7.1.1 Stand des Wissens

Zur Extraktion von Bruchkanten aus digitalen Höhendaten existieren in der Literatur zahlreiche verschiedene Ansätze. Dabei werden teilweise die ALS-Punktwolken selbst (z.B. Briese 2004, Briese et al. 2009,), teilweise die daraus interpolierten Digitalen Geländemodelle (z.B. Rutzinger et al. 2007; Rutzinger et al. 2012; Höfle et al. 2013) als Datengrundlage verwendet. Aus der umfangreichen Fachliteratur werden im Folgenden einige grundlegende Ansätze vorgestellt.

Von Gomes Pereira und Wicherson (1999) wird ein rasterbasiertes Verfahren zur Detektion von Bruchkanten anhand des Parameters Neigung verwendet. Durch einen Neigungsschwellenwert werden die Rasterzellen klassifiziert und in ebene und geneigte Zellen unterteilt. Der Schwellenwert muss vom Anwender an das jeweilige Untersuchungsziel angepasst werden (Gomes Pereira und Wicherson 1999, 111). Mithilfe eines sogenannten *edge detection*-Algorithmus – ursprünglich aus dem Bereich der Bildverarbeitung bekannt – werden

anschließend Kantenpunkte (*break points*) identifiziert; als Kantenpunkte werden solche Punkte ausgezeichnet, in deren Rasterumgebung (3 x 3 Zellen) mindestens eine geneigte sowie ein ebene Rasterzelle vorkommt (Gomes Pereira und Wicherson 1999, 111–112). Kanten werden somit als Übergangsstellen von ebenen zu geneigten Flächen verstanden.

Viele Verfahren ermitteln Bruchkanten anhand der Krümmung der Oberfläche. Die Krümmung, oder auch Krümmung genannt, ist die zweite Ableitung der Geländehöhen an einem jeweiligen Punkt in eine bestimmte Richtung (vergleiche Unterabschnitt 3.1.4). Bereiche mit stark ausgeprägter Krümmung stellen Bereiche mit starker Änderung der Geländeneigung, also Knicke, Kanten oder Sprünge, dar.

Rutzinger et al. (2007; 2012) verwenden ein Verfahren, welches auf der Identifikation von Rasterbereichen eines DGM mit besonders starker positiver oder negativer Krümmung basiert. Mithilfe eines angepassten Krümmungsschwellenwertes werden diese Bereiche extrahiert. Anschließend werden die selektierten Rasterzellen ausgedünnt und in dreidimensionale Vektorlinien – die resultierenden Geländekanten – umgewandelt. Rutzinger et al. (2007) haben für ihre Analysen ein Untersuchungsfenster von 15 x 15 m und einen Krümmungsschwellenwert von $\pm 0,05 \text{ m}^{-1}$ als optimal bestimmt. Die Untersuchungen bezogen sich auf ein alpines Gebiet in Tirol und großräumigere Gebirgsstrukturen.

Höfle et al. (2013) verwenden das von Rutzinger et al. (2012) entwickelte Verfahren, um Erosionsgullys abzugrenzen. Erosionsgullys sind tiefe Erosionsrinnen¹⁸, die durch Bodenerosion – angetrieben durch Wasserströmung – entstanden sind. Höfle et al. (2013) definieren einen Erosionsgully als eine Vertiefung (*depression*) im Relief und nutzen die detektierten Oberkanten als deren flächenhafte Abgrenzung: „The outline of the gully polygon shall correspond to a certain upper boundary of the gully channel” (Höfle 2013, S. 5858). Durch einen Schwellenwert werden Rasterelemente mit einer starken Krümmung selektiert und aus diesen anschließend 3D-Bruchkanten erzeugt. Höfle et al. (2013, 5862) bestimmen für ihr Untersuchungsgebiet und den erfassten Erosionsgully ein optimales Untersuchungsfenster von 4,5 x 4,5 m und einen Krümmungsschwellenwert von $0,2 \text{ m}^{-1}$.

Kantenextraktionsverfahren, die mit den ungeordneten ALS-Punktwolken arbeiten, beruhen meist auf der Rekonstruktion der Geländeoberfläche der Kantenumgebung. Das Vorgehen nach Briese (2004) basiert auf einer Methodik, die er als *breakline growing* bezeichnet. Ausgehend von zuvor definierten Startsegmenten werden die ALS-Punkte links und rechts von potenziellen Bruchkantenpunkten durch ebene, sich schneidende Flächenpaare (*patches*) angenähert (Abbildung 7-1). Aus den Schnittpunkten dieser Flächenpaare wird die exakte Lage der Bruchkante bestimmt. „A breakline is the intersection of two smooth surfaces, each surface interpolating the points on either side.” (Briese 2004, 25).

¹⁸ Nach DWA (2018a, 37) werden als Erosionsgullys solche rinnenartigen Erosionsformen bezeichnet, die eine Tiefe von über 40 cm aufweisen. Bei den Untersuchungen von Höfle et al. (2013) handelt es sich um Erosionsgullys in den Anden mit einer Tiefe von mehreren Metern und einer Breite von mehreren Zehnermetern.

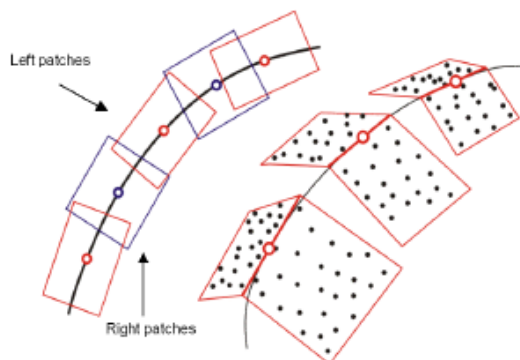


Abbildung 7-1: Prinzip der Kantendetektion durch ebene Flächenpaare nach Briese (2004)

Das Vorgehen wird schrittweise sowohl in die Vor- als auch Rückrichtung der Kanten fortgeführt, bis ein Abbruchkriterium (z.B. ein definierter Schwellenwert für den Winkel zwischen den Flächen) erreicht wird (Briese 2004, 42–43). Erfolgte die Erfassung der Startsegmente bei Briese (2004) noch in einem manuellen Bearbeitungsschritt (Briese 2004, 42), kann durch eine Weiterentwicklung der Methodik die Detektion der Startsegmente automatisiert erfolgen. Mandlbürger et al. (2009, 91) nähern jeden Punkt der ALS-Punktwolke durch die Anpassung einer Fläche zweiter Ordnung an die nächsten Nachbarnpunkte an; auf Basis dieser Annäherung kann die Krümmung jedes Punktes bestimmt und durch Schwellenwerte potenzielle Kantenpunkte als Startsegmente ermittelt werden. Auch Rutzinger et al. (2007, 7) schlagen ihre rasterbasierte Methodik vor, um Startsegmente für eine anschließende Anwendung des Verfahrens nach Briese (2004) zu erhalten.

Als Weiterentwicklung des Verfahrens von Briese (2004) nutzt Brzank (2008a) in seiner – insbesondere für die Untersuchung von Wattlandschaften entwickelten – Methodik ein anderes Oberflächenmodell zur Flächenrekonstruktion. „Die Methode geht von der Annahme aus, dass Strukturlinien in den Watten immer paarweise vorkommen. So treten an Prielen, Vorlandgräben und Dünen je Seite jeweils eine Böschungsober- und eine Böschungsunterkante auf.“ (Brzank 2008a, 47–48) Er verwendet zunächst *edge detection*-Verfahren (s.o.), um eine 2D-Annäherung an die ungefähre Lage der Bruchkanten aus dem Eingaberaster (interpoliertes Höhenraster aus LiDAR-Punkten) zu erhalten. Anschließend wird ein definiertes Oberflächenmodell an die selektierten Punkte angepasst: eine zweidimensionale Version der *Tangens hyperbolicus*-Kurve (siehe Abbildung 7-2). Aus diesem Modell kann anschließend die Lage der beiden zusammengehörigen Bruchkanten bestimmt werden; bei gerundeten Kanten wird die Position der Bruchkantenpunkte aus den Punkten mit maximaler Krümmung ermittelt.

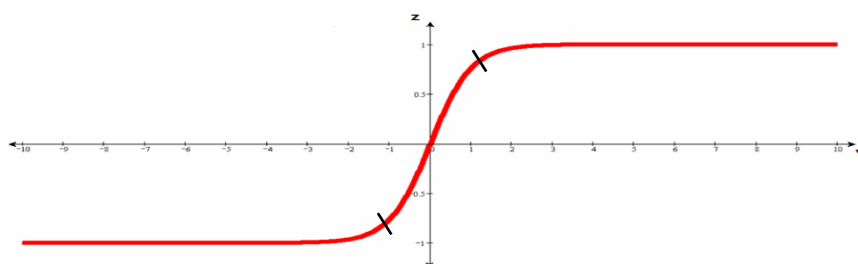


Abbildung 7-2: Tangens hyperbolicus Funktion zur Annäherung von Geländekanten (verändert nach Brzank 2008a)

7.1.2 Extraktion der Geländekanten im Untersuchungsgebiet

Das in dieser Arbeit angewendete Verfahren für die Bestimmung der Geländekanten im Untersuchungsgebiet „Kühkopf-Knoblochsau“ zur Abgrenzung hydromorphologischer Strukturen orientiert sich an der rasterbasierten Methodik von Rutzinger et al. (2007; 2012). Geländekanten zeichnen sich durch die starke konvexe (Oberkanten) oder konkave (Unterkanten) Wölbung und somit durch hohe positive bzw. negative Werte der Profilkrümmung aus (vergleiche Unterabschnitt 3.1.4). Somit wird als Grundlage für die Extraktion der Ober- und Unterkanten auf Basis des vorliegenden DGM ein Rasterdatensatz der Profilkrümmungen berechnet, wofür die Software GRASS GIS¹⁹ verwendet wird. GRASS GIS erlaubt mit der Funktion *r.param.scale* die Anpassung der Größe des Berechnungsfensters für die Krümmungsberechnung; statt einem Fenster von 3 x 3 Zellen können auch größere Zellenbereiche für die Berechnung herangezogen werden.

Die Wahl der geeigneten Untersuchungsskala ist auch hierbei maßgebend, um zweckdienliche Bruchkanten zu erhalten. Mit einem zu kleinen Berechnungsfenster werden auch sehr kleinräumige Kanten in der Geländeoberfläche erkannt; ein zu großes Untersuchungs raster liefert nur Informationen zu großskaligen Geländeformen und lokale Strukturen bleiben verborgen (Rutzinger et al. 2012). Insgesamt empfiehlt Rutzinger et al. (2012, S. 41) jedoch die Verwendung von größeren Untersuchungs fenstern: „In general a larger moving window might be able to detect an edge better than a small one, which is more influenced by noise in the DTM.“ Wie in Abschnitt 2.2.2 aus der Fachliteratur herausgearbeitet wurde, sollte die Größe des Berechnungsfensters in etwa der Größenordnung der zu erfassenden Gelände merkmale entsprechen. Mit der hier beschriebenen Methodik in GRASS GIS sollen sowohl Kanten der Uferböschung als auch Kanten von Rinnen, Wällen und Senken des Mikroreliefs erkannt werden. Die Größenordnung der Strukturen, die die Methodik zu erfassen beabsichtigt, wurden der Raum-Zeit-Einheit „Bettstrukturen, Auenhabitats“ nach (Kern 1995) zugeordnet und umfasst damit eine Größenordnung von mehreren Metern bis Zehnermetern (vergleiche Abschnitt 2.2). Daher wurde für die Berechnung der Profilkurvatur eine Größe des Berechnungsfensters von 5 x 5 m gewählt. Dies entspricht einer Zellenumgebung von 101 x 101 Rasterzellen im Original-DGM mit einer Auflösung von 5 cm (siehe Abbildung 7-3). Für diesen Anwendungsfall ist es zweckmäßig, zunächst die Auflösung des hochaufgelösten DGM zu verringern und anschließend die Funktion „*r.param.scale*“ zur Berechnung der Profilkurvatur auf Basis des gröberen DGM anzuwenden. Hier wurde die Auflösung auf 1 m geändert und dann mittels eines 5 x 5 Zellen weiten Berechnungsfensters die Krümmungsberechnung durchgeführt (siehe Abbildung 7-4). Dieser Schritt verkürzt die Rechenzeit und führt – aufgrund der Größe des Berechnungsfensters und der weiteren Auswertungsschritte, in denen mit Ausdünnungen und Glättungen gearbeitet wird – zu keinem

¹⁹ Für die Analyse der Krümmung hat sich die Verwendung von GRASS GIS als geeigneter erwiesen als ArcGIS. Die ausgegebenen Krümmungswerte von GRASS GIS können als Kehrwert des Krümmungsradius verstanden werden, ein Wert von $0,05 \text{ m}^{-1}$ entspricht demnach einem Krümmungsradius von 20 m. Die Krümmungswerte, die ArcGIS ausgibt, liegen in völlig anderen Größenordnungen (bis zu mehreren Zehntausend) und es konnten auf den Informationsseiten von ESRI keine Auskünfte darüber gefunden werden, wie die Werte zu interpretieren sind.

bedeutenden Informationsverlust gegenüber der Berechnung aus dem feinaufgelösten DGM, was aus den beiden Abbildungen ersichtlich ist.

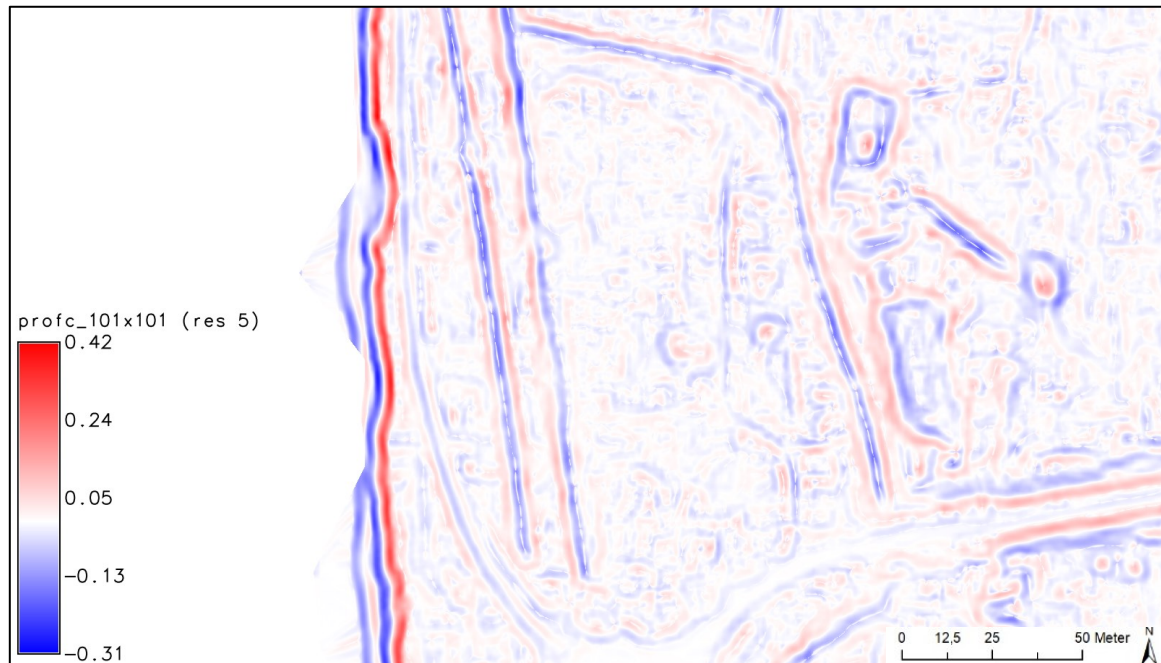


Abbildung 7-3: Profilkrümmung, berechnet auf Basis des Original-DGM mit einer Auflösung von 5 cm und einem Berechnungsfenster mit einer Größe von 101 x 101 Zellen

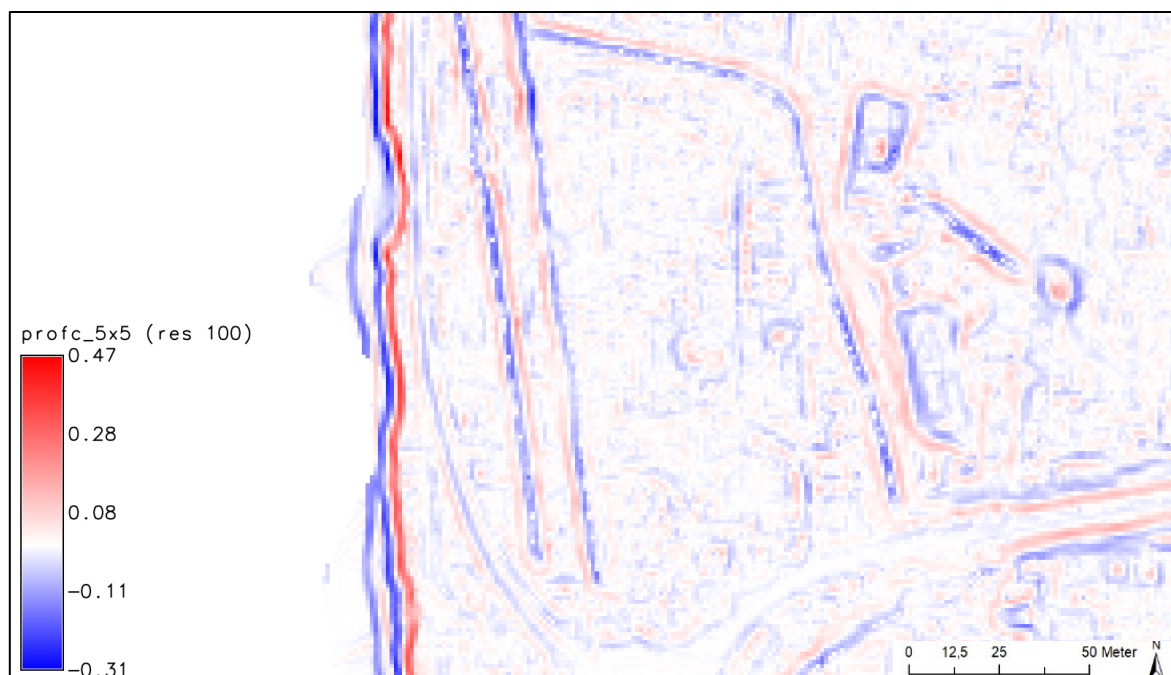


Abbildung 7-4: Profilkrümmung, berechnet auf Basis des aggregierten DGM mit einer Auflösung von 1 m und einem Berechnungsfenster mit einer Größe von 5 x 5 Zellen

In GRASS GIS wird die Anpassung der Auflösung über die Regionseinstellungen („g.region“) durchgeführt (vergleiche Unterabschnitt 2.2.2). Bei der Anwendung weiterer Berechnungsschritte wird automatisch die unter g.region eingestellte Rasterweite übernommen. Zu beachten ist, dass bei der Einstellung der Größe des Berechnungsfensters für die Funktion „r.param.scale“ ebenfalls die neue Rasterweite gilt. Eine Berechnungsumgebung von 5 x 5 Pixeln entspricht bei einer eingestellten Rasterauflösung von 1 m nicht mehr den ursprünglichen 25 x 25 cm, sondern nun 5 x 5 m.

Durch Wahl einer geeigneten Farbdarstellung (hier Farbtabelle mit Namen „differences“) treten die prägnanten Geländekanten optisch hervor. Rote Pixel stehen für eine positive bzw. konvexe Krümmung (Oberkanten), blaue Pixel für eine negative bzw. konkave Krümmung (Unterkanten). Die auf diese Weise erhaltenen Werte für die Profilkurvatur schwanken zwischen $-0,31 \text{ m}^{-1}$ und $0,47 \text{ m}^{-1}$.

Mit einem geeigneten Schwellenwert sollen nun die Pixel mit besonders starker Krümmung selektiert werden; dies kann mithilfe des *Raster Map Calculators* durchgeführt werden. Allgemeingültige Krümmungsschwellenwerte können nicht definiert werden, auch in der fachspezifischen Literatur zur Kantenextraktion anhand des Parameters Krümmung wird betont, dass der Schwellenwert an das Untersuchungsgebiet und die Fragestellungen der Untersuchungen angepasst werden muss (Rutzinger et al. 2007, 6–7; Höfle et al. 2013, 5862). So finden auch Höfle et al. (2013) sowie Rutzinger et al. (2007) die geeignete Kombination von Krümmungsgrenzwert und Größe des Berechnungsfensters durch Testen verschiedener Kombinationen.

Für die Erfassung der Geländekanten im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit hat sich ein unterer Krümmungsgrenzwert von $0,025 \text{ m}^{-1}$ als geeignet erwiesen, um relevante Oberkanten zu erfassen (siehe Abbildung 7-5 rechts). Analog dazu eignet sich ein oberer Grenzwert von $-0,025$ für die Detektion von Unterkanten. Zum Vergleich sind in Abbildung 7-5 links die Ergebnisse der Kantenerstellung mit einem alternativen Krümmungsschwellenwert von $0,05 \text{ m}^{-1}$ bzw. $-0,05 \text{ m}^{-1}$ dargestellt; in diesem Fall werden jedoch einige relevante Kanten nicht oder nur teilweise erfasst. Die Wahl eines geringeren Schwellenwertes ($\pm 0,025 \text{ m}^{-1}$) führt zwar zu wesentlich mehr kurzen Kantensegmenten, durch eine höhere eingestellte Mindestlänge bei der späteren Bereinigung der Linien kann dies jedoch behoben werden. Als Resultat werden mehr relevante Kanten signifikanter Länge erfasst. Mithilfe des Grenzwertes werden für die Extraktion der Oberkanten alle Rasterzellen selektiert, die eine größere Krümmung haben als der festgelegte Schwellenwert. Für die Unterkanten werden analog dazu Rasterzellen mit einem geringen Wert als dem Schwellenwert ausgewählt. Die selektierten Zellen müssen vor der Umwandlung in Vektorlinien mithilfe eines GIS-Werkzeugs ausgedünnt werden, sodass linienartige Rasterstrukturen mit einer Breite von nur einem Pixel entstehen. Anschließend können die ausgedünnten Rasterzellen in Vektorlinien konvertiert werden.

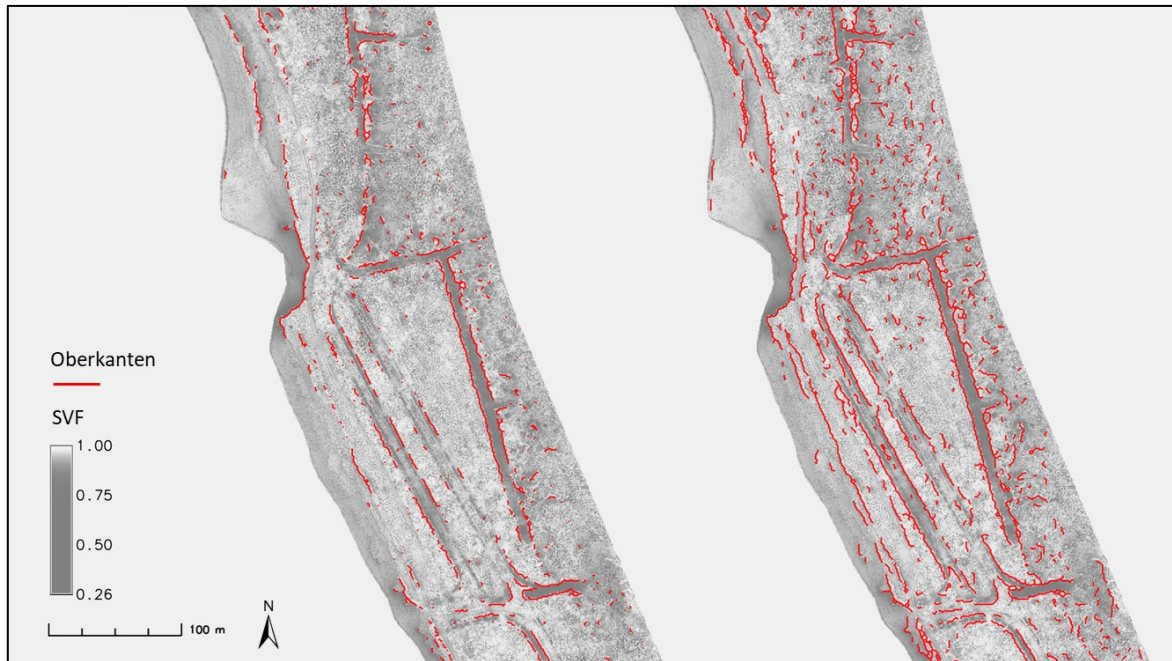


Abbildung 7-5: Abhängigkeit der Ergebnisse der Kantenextraktion vom Krümmungsschwellenwert (extrahierte Oberkanten mit einem Krümmungsschwellenwert von links $0,05 \text{ m}^{-1}$ und rechts $0,025 \text{ m}^{-1}$, jeweils mit einer Dangle-Länge von 3 m)

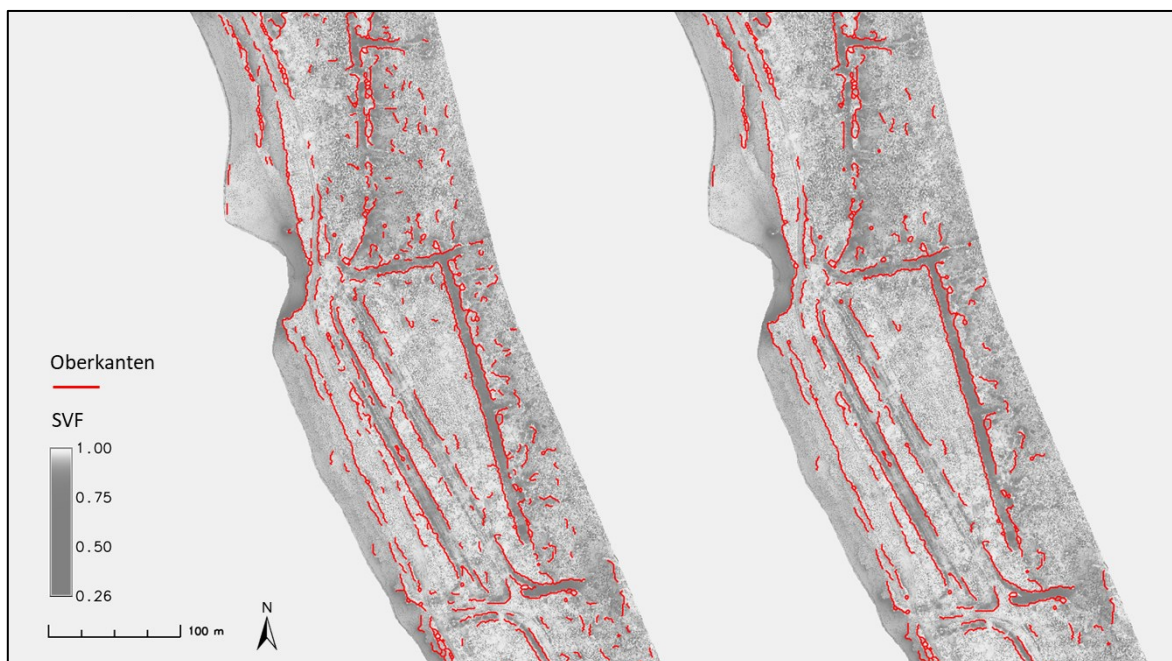


Abbildung 7-6: Abhängigkeit der Ergebnisse der Kantenextraktion von der Dangle-Länge (extrahierte Oberkanten mit einer Dangle-Länge von links 5 m und rechts 10 m, jeweils mit einem Krümmungsschwellenwert von $0,025 \text{ m}^{-1}$)

Besonders kurze Liniensegmente sowie überstehende Enden (sogenannte *dangles*) lassen sich mit verschiedenen Bereinigungs-Tools entfernen. Durch die Wahl der minimalen Liniensegmentlänge wird festgelegt, dass nur längere Liniensegmente als der angegebene Wert erhalten bleiben. Werte hierfür sind ebenfalls an das Untersuchungsziel anzupassen. Die

Durchführung einer Bereinigung dieser Art ist ratsam, da sie kurze Linienfragmente entfernt, die durch kleine Unebenheiten im Relief entstehen, welche nicht als eigenständige Strukturen definiert werden (Rutzinger et al. 2007, 6–7). Die Wahl einer geeigneten Dangle-Länge bei der Bereinigung kann zur Anpassung der Ergebnisse genutzt werden, um ausschließlich längere zusammenhängende Kantenstücke zu erfassen. Zur Veranschaulichung dieses Effekts sind in Abbildung 7-5 rechts die extrahierten Kanten (Schwellenwert 0,025 bzw. -0,025) mit einer Dangle-Länge von 3 m, in Abbildung 7-6 links mit einer Dangle-Länge von 5 m und rechts mit einer Dangle-Länge von 10 m dargestellt. Für die folgenden Untersuchungen wurden die Kanten verwendet, die mit einer Dangle-Länge von 10 m bereinigt wurden. Die Liniensegmente können anschließend noch geglättet werden, sodass sie eine natürlichere Form annehmen. Dadurch, dass sie aus Rasterzellen erzeugt wurden, haben die Linien nach der Konvertierung vom Raster- ins Vektor-Format einen eckigen Verlauf. Für die Glättung stehen ebenfalls spezielle Funktionen in GRASS GIS und ArcGIS zur Verfügung; dabei ist ein geeigneter Algorithmus zu wählen. Zur finalen Erstellung von 3D-Linien werden die Höheninformationen aus dem DGM auf die Linien interpoliert.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Überblick über die nötigen Verfahrensschritte zur Extraktion von Geländekanten. Eine Gesamtübersicht der Ergebnisse des der beschriebenen Kantenextraktion für das Untersuchungsgebiet ist in Anlage 3 dargestellt. Dabei stehen rote Linien für Oberkanten und blaue Linien für Unterkanten, als Hintergrund dient der SVF.

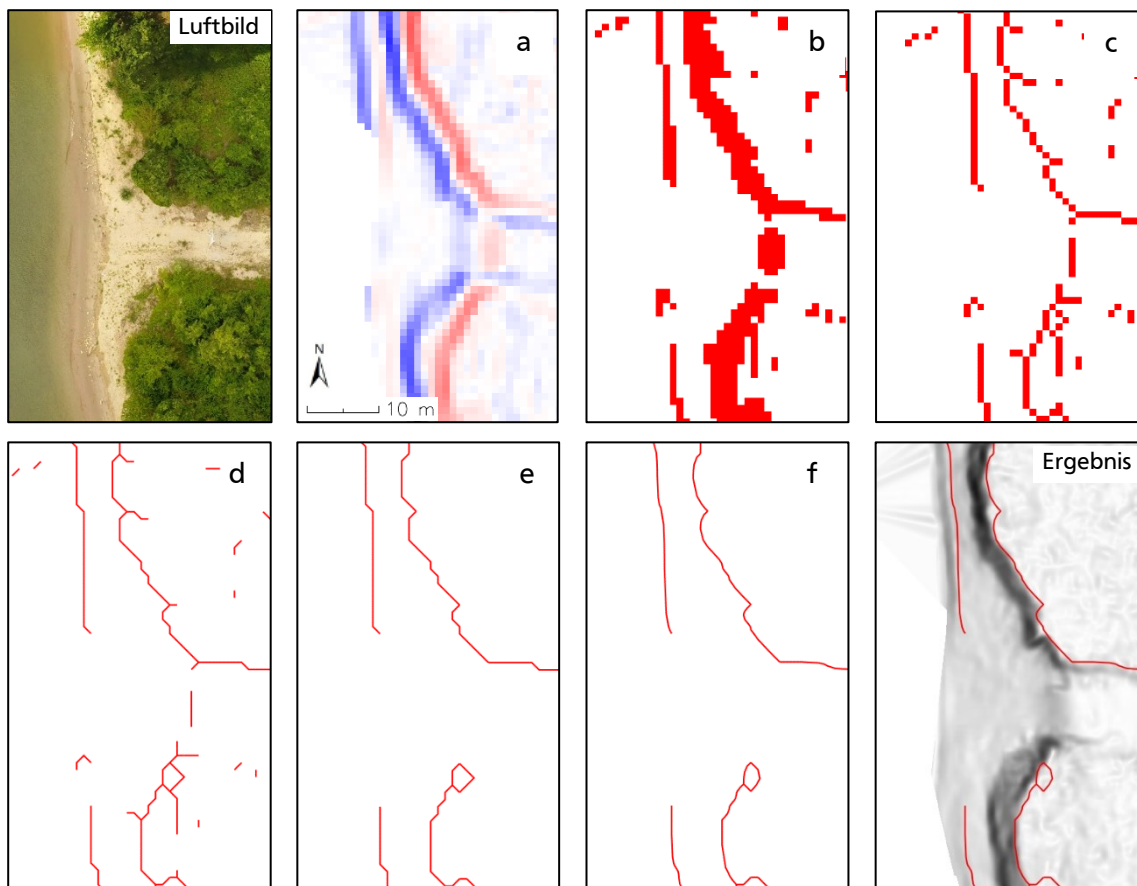


Abbildung 7-7: Verfahrensschritte bei der Extraktion der Oberkanten (a: Profilkrümmung, b: Selektion mit Schwellenwert, c: Ausdünnen, d: Konvertierung in Vektorlinien, e: Bereinigen, f: Glätten)

7.2 Interpretation der Kanten – Strukturidentifikation

Die extrahierten Kanten bilden die Grundlage für Abgrenzung von Strukturen; in diesem Fall von den geometrisch geprägten Strukturklassen *Böschung*, *Wall*, *Rinne* und *Senke* (siehe Abbildung 7-8). Die weitere Klassifikation der Kanten und die Zuordnung zu den Strukturklassen erfolgt in nachgeschalteten Interpretationsschritten. Ausgangspunkt für die weiteren Analysen sind zunächst die topologischen Eigenschaften der Kanten, also ihre Anordnung und Lagebeziehung. So zeichnen sich die verschiedenen Strukturen durch eine unterschiedliche Anordnung geneigter Flächen und die damit einhergehende unterschiedliche Anordnung von Unterkanten und Oberkanten aus.

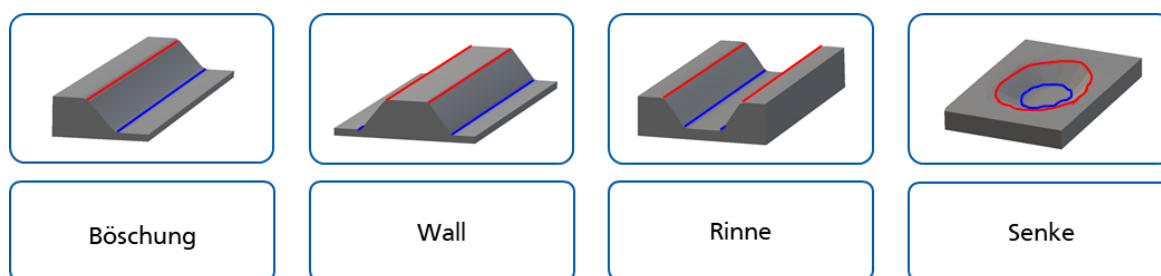


Abbildung 7-8: Geometrische Strukturklassen als Zusammenschluss von Ober- (rot) und Unterkanten (blau)

Böschungen sind grundlegende geomorphologische Formelemente, die nach DWA (2018a) als „natürlicher oder künstlicher Geländeknick oder -sprung“ definiert werden. Sie entstehen durch geomorphologische Vorgänge wie Erosion, Sedimentation oder Bodenhebung (DWA 2018a). In Fließgewässerlandschaften sind Böschungen in vielfältiger Ausprägung vorzufinden: die Uferböschung begrenzt seitlich den Gewässerlauf, als Terrassenkanten oder Hänge überwinden Böschungen Höhenunterschiede im Gelände und auch Rinnen, Senken und Wälle werden durch seitliche Böschungen charakterisiert. Die Böschungen von Rinnen und Wällen werden gesondert betrachtet, hier werden zunächst einzelne Böschungen in der Aue und die Uferböschung behandelt.

Die charakteristischen Eigenschaften einer Böschung beruhen vorwiegend auf ihrer Form. Böschungen können stark bewachsen, aber auch annähernd frei von Vegetation sein. Diese hohe Variabilität der Oberflächenbedeckung macht eine radiometrische Abgrenzung von Böschungen schwierig. Ausschlaggebend für die automatisierte Erfassung von Böschungen sind daher deren geometrische Eigenschaften.

Zur geomorphometrischen Untersuchung einer Böschung kann diese als Zusammenschluss einer geneigten Fläche mit je einer Ober- und Unterkante verstanden werden (vergleiche Abschnitt 2.3). Eine Böschung zeichnet sich durch den gleichgerichteten, annähernd parallelen Verlauf einer Ober- und einer Unterkante aus. In der untenstehenden Abbildung 7-9 sind mehrere Böschungen zu erkennen: eine in Ost-West-Richtung und eine in Nord-Süd-Richtung verlaufende Böschung. Im linken Teil des Bildausschnitts schließen sich diese Böschungen zusammen und bilden eine rinnenartige Struktur, dann verlaufen sie in nördliche Richtung aus dem Bild heraus.

Nach der Verortung der Böschungsstrukturen können diese je nach Untersuchungsziel linien- oder flächenhaft erfasst werden (linienhaft z.B. durch Mittellinie, flächenhaft durch 3D-Fläche zwischen Ober- und Unterkante).

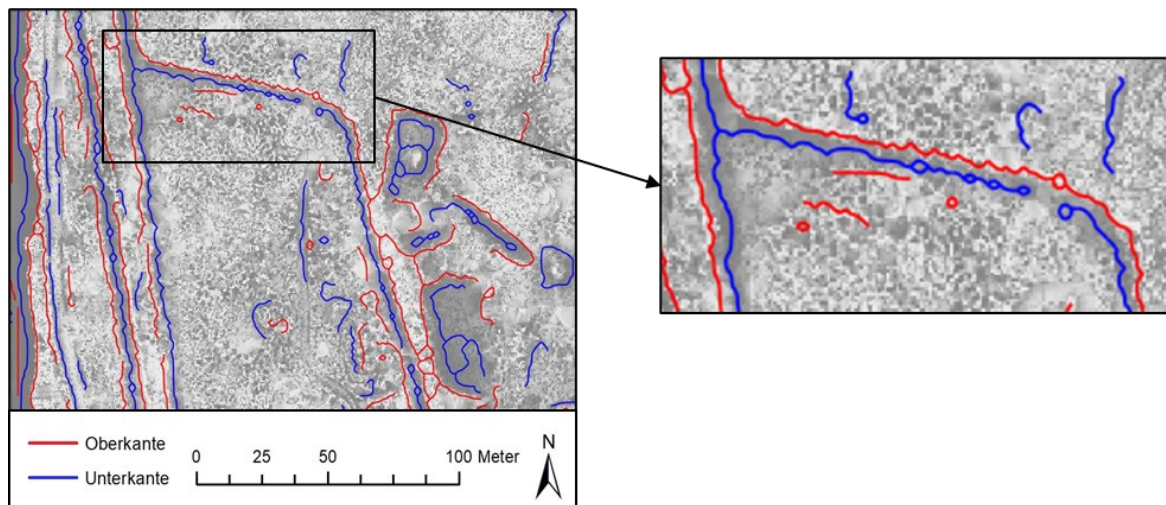


Abbildung 7-9: Abgrenzung einer Böschung durch die extrahierten Geländekanten

Rinnen sind typische Strukturen des Auenreliefs. Mäandrierende Gewässer, deren Lauf sich in der Vergangenheit oft mehrfach verlagert hat, prägen nachhaltig die Gewässerlandschaft. So finden sich in Auen häufig noch Altgewässer wie Altarme (noch mit dem Fließgewässer verbunden) und Altwasser (vom Fließgewässer abgetrennt) sowie verlandete oder trocken-gefallene ehemalige Gewässerläufe. Auenrinnen unterstützen bei ausufernden Hochwasserereignissen als Flutrinnen die Ab- und Umleitung von Hochwasser (DWA 2018a). In aktuell oder ehemals landwirtschaftlich genutzten Auenbereichen sind Entwässerungsgräben – Rinnen meist anthropogenen Ursprungs – verbreitet.

Bei der Detektion aus den Fernerkundungsdaten weisen wasserführende Rinnen bedeutend andere Eigenschaften auf als trockene Rinnen, weshalb sie durch andere Parameter beschrieben werden müssen. Charakteristisch für wasserführende Rinnen sind die spektralen Eigenschaften des Wassers, daher werden diese der radiometrischen Strukturklasse *Auengewässer* zugeordnet und gesondert untersucht. Trockene Rinnen können sowohl bewachsen als auch unbewachsen sein; die Oberflächenbedeckung von Rinnen ist sehr variabel. Dadurch ist eine radiometrische Abgrenzung schwierig. Bei stärkerem Bewuchs sowie der Überdeckung durch Baumkronen verstärkt sich diese Problematik. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Untersuchungen dieser Arbeit auf die geometrischen Eigenschaften dieser Strukturklasse.

Geometrisch beschrieben ist eine Rinne eine längliche Eintiefung in der Geländeoberfläche, welche seitlich von zwei ansteigenden, geneigten Böschungen umschlossen wird. Ein weiteres prägnantes Merkmal ist, dass die beiden Böschungen annähernd parallel verlaufen. Durch die beiden Oberkanten der Böschungen lassen sich Rinnen flächenhaft vom umliegenden Gelände abgrenzen. Je nachdem wie die Böschungen unten zusammenlaufen, können von den Oberkanten eine oder mehrere Unterkanten eingeschlossen werden; bei stark gerundeter Rinnensohle kann keine Unterkante detektiert werden. So zeichnen sich Rinnen

i.d.R. durch die Anordnung Oberkante – Unterkante/n – Oberkante aus (siehe Abbildung 7-10).

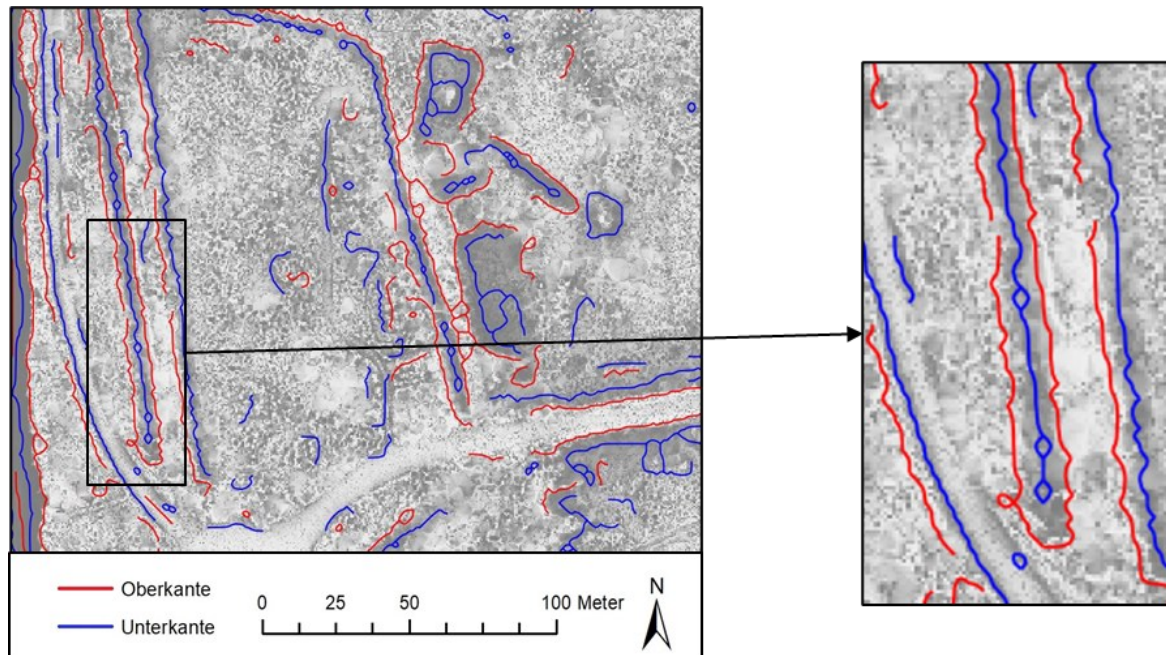


Abbildung 7-10: Abgrenzung einer Rinne durch die extrahierten Geländekanten

Wälle kommen in Gewässerlandschaften beispielsweise in Form von natürlichen Uferreihen vor. Rehen sind „[i]nsbesondere in sandigen Auen auftretende gewässernahe Verwallungen, die durch Hochwasserablagerungen entstehen [...]“. (MUNLV NRW 2010, 103) Auch als künstliche Rehen oder Deiche können wallartige Strukturen gewässerbegleitend auftreten. Mancherorts sind auch Straßen oder Wege in Flussauen erhöht angelegt und nehmen wallartige Formen an. Wie auch bei Rinnen ist die Oberflächenbedeckung von Wällen sehr variabel, radiometrisch sind diese daher schwer zu erfassen. Die folgenden Untersuchungen basieren daher auf den charakteristischen geometrischen Eigenschaften der Wälle.

Die Untersuchung der Rinnen liefert auch für Wälle wertvolle Ergebnisse, da sich beide Strukturklassen geometrisch ähneln. Auch Wälle sind längliche Strukturen mit seitlichen Böschungen, lediglich die Wölbungsrichtung ist umgekehrt: eine Rinne ist im Gelände eingetieft, ein Wall ragt als erhabene Form empor. Ein Wall lässt sich also geomorphometrisch als längliche, erhabene Form beschreiben, die von seitlich abfallenden, geneigten Böschungen gebildet wird. Somit wird ein Wall i.d.R. durch die Abfolge Unterkante – Oberkante/n – Unterkante charakterisiert (siehe Abbildung 7-11). Bei stark gerundetem Verlauf ist es möglich, dass keine Oberkante detektiert werden kann. Eine flächenhafte Abgrenzung von Wällen kann mithilfe der Unterkanten erfolgen, welche durch den konkav gewölbten Übergang zum umliegenden Gelände gebildet werden.

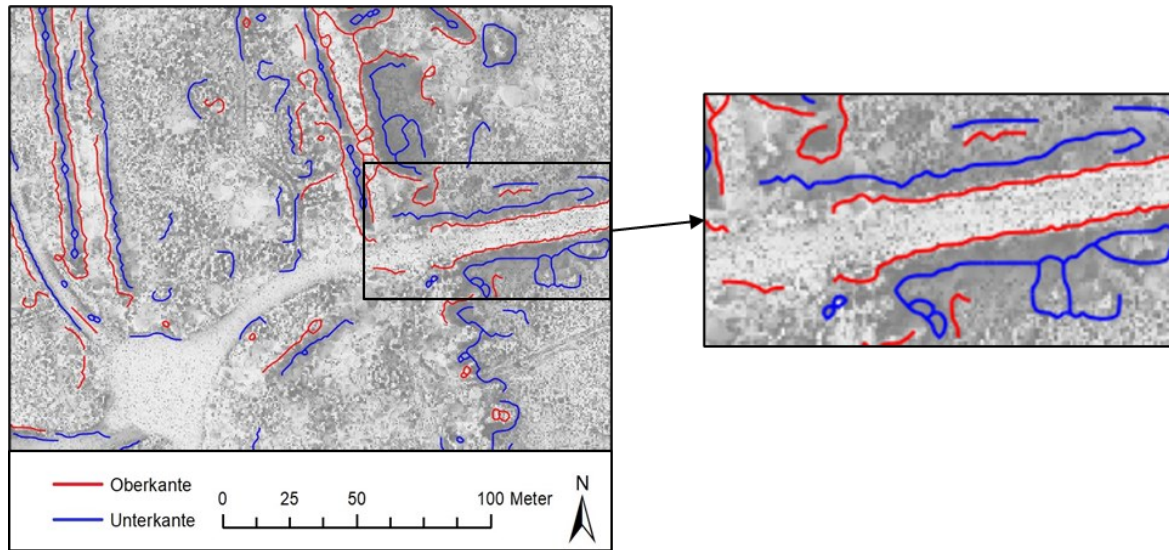


Abbildung 7-11: Abgrenzung eines Walls durch die extrahierten Geländekanten

In Auen treten *Senken* häufig als periodisch wasserführende Strukturen auf, beispielsweise in Form von Blänken. Letztere sind „flache natürliche Wasseransammlungen (Tümpel) mit periodisch wechselndem Wasserstand, die im Sommer austrocknen können und nur in den tiefsten Stellen noch Wasser zurückhalten.“ (DWA 2018a) Auch Flutmulden führen i.d.R. nur bei Hochwasser Wasser (DWA 2018a).

Wie auch bei Rinnen weisen trockene und wasserführende Senken für die Detektion aus luftgestützten Daten sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Trockene Rinnen zeichnen sich vorrangig durch ihre Form und Lage im Relief aus. Wasserführende Rinnen lassen sich insbesondere anhand der spektralen Eigenschaften des Wassers mittels radiometrischer Analyse erkennen, weshalb diese in der vorliegenden Arbeit der Strukturklasse *Auengewässer* zugeordnet werden.

Für die geomorphometrische Untersuchung der Senken werden diese als Eintiefung im Gelände mit – im Gegensatz zu den länglichen Rinnen – rundem bis formlosen Grundriss definiert. Flächenhaft abzugrenzen ist eine Senke durch eine geschlossene, umlaufende Oberkante, die den konvex gekrümmten Übergang der geneigten Böschungen zum ebenen Umland lokalisiert. Bei starker Ausprägung der Böschung und deutlichem Übergang zur Sohle der Senke schließt die Oberkante eine ebenso umlaufende Unterkante ein. Abbildung 7-12 zeigt ein Beispiel für eine auf diese Weise abgrenzbare Senke.

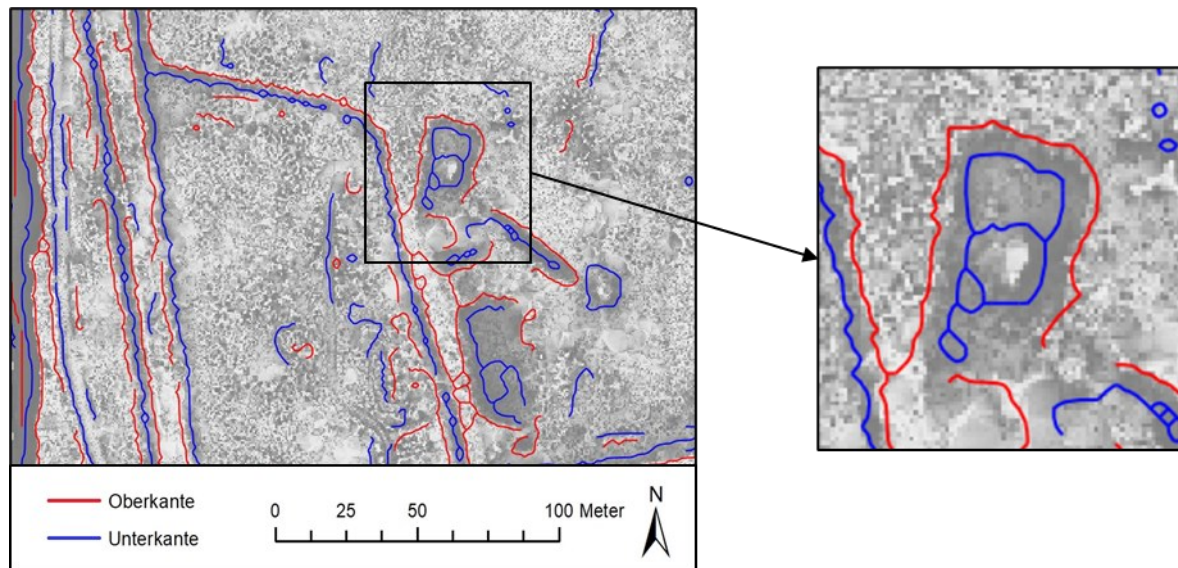


Abbildung 7-12: Abgrenzung einer Senke durch die extrahierten Geländekanten

7.3 Fokus: Uferböschung

Für die Analysen des Untersuchungsgebietes der vorliegenden Arbeit ist die Uferböschung – als besondere Art der Böschung – von besonderer Relevanz. Durch die Entfernung der Ufersicherung im Rahmen des Modellprojektes „Uferrenaturierung Kühkopf-Knoblochsaue“ unterliegt der Uferbereich wieder natürlichen Umformungsprozessen. Insbesondere im ufernahen Bereich sind zukünftig starke morphologische Veränderungen zu erwarten. Durch eine regelmäßige Untersuchung der Uferböschung kann deren Entwicklung über die Zeit nachvollzogen werden. Daher wird die Uferböschung im Folgenden genauer untersucht und klassifiziert.

Zunächst ist eine möglichst eindeutige Definition und Abgrenzung der Uferböschung (untere Abgrenzung zum Gewässer sowie Böschungsoberkante) erforderlich. Dazu werden rechtliche und technische Regelungen gesichtet. Basierend auf der Kantenextraktion kann eine geeignete Böschungsoberkante zur Abgrenzung der Uferböschung erstellt werden. Mithilfe von terrestrisch vermessenen *Ground truth*-Geländepunkten kann eine Qualitätskontrolle der erstellten Böschungsoberkante durchgeführt werden. Zur weiteren Analyse der Uferböschung wird anschließend eine Methodik vorgestellt, die die Böschung abschnittsweise anhand ihrer Neigung klassifiziert. Ein Vergleich von maximaler und mittlerer Neigung ermöglicht weitere Rückschlüsse auf die Form des Ufers (z.B. Stufenform).

7.3.1 Abgrenzung der Uferböschung

Das deutsche Wasserhaushaltsgesetz macht zur Abgrenzung der Uferböschung keine Angaben. Es definiert lediglich den sogenannten *Gewässerrandstreifen* als landseitigen Bereich eines Gewässers, der an die Mittelwasserlinie oder die Böschungsoberkante – falls diese ausgeprägt ist – angrenzt (§ 38 Abs. 2, WHG). Nähere Bestimmungen zur Abgrenzung von Uferstreifen und Gewässerrandstreifen können von den Bundesländern formuliert werden

(DWA 2018b, 33). Im baden-württembergischen Wassergesetz wird das Ufer eines Gewässers als der Bereich zwischen der Mittelwasserlinie und der Böschungsoberkante (BOK) definiert (§ 7 Abs. 3, WG). Zur *Böschungsoberkante* findet sich im baden-württembergischen Leitfaden zu Gewässerrandstreifen (WBWF und LUBW 2015, 52) folgende Ausführung:

„Im Querschnitt eines Gewässers markiert die Böschungsoberkante einen deutlichen Knick zwischen der mehr oder weniger steilen Uferböschung und der merklich flacheren angrenzenden Landschaft.“

Ist die Oberkante der Uferböschung also deutlich ausgeprägt (Abbildung 7-13 links), wird diese als BOK festgelegt und als obere Abgrenzung der Uferböschung definiert. Geht der Uferbereich eines Gewässers allerdings fließend und ohne erkennbare Trennung in die Aue über, wird als obere Abgrenzung des Ufers der mittlere Hochwasserstand (MHW) genutzt (Abbildung 7-13 rechts).

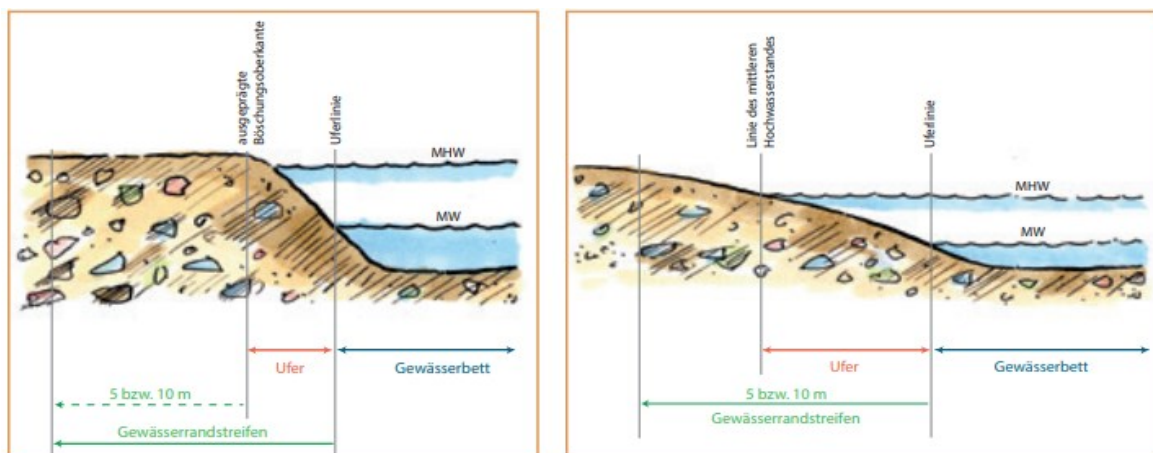


Abbildung 7-13: Abgrenzung der Uferböschung nach WBWF und LUBW (2015, 10)

Im Merkblatt *M 600 Begriffe aus Gewässerunterhaltung und Gewässerentwicklung* der DWA (2018a) wird eine morphologische Definition des Ufers als „[s]eitliche Begrenzung eines [Gewässerbetts] zwischen Mittelwasserstand und Ausuferungswasserstand“ vorgeschlagen. Jedoch wird der Ausuferungswasserstand nicht weiter definiert. Ob dieser durch einen bestimmten Abfluss (z.B. MHQ oder HQ_x) festgelegt wird oder ob lokal abgewogen werden muss, ab wann von einem „Ausufern“ des Gewässers gesprochen werden kann, bleibt offen.

Bei der unteren Abgrenzung eines Ufers wird also übereinstimmend die Mittelwasserlinie verwendet. Für die obere Abgrenzung der Uferböschung sind die Definitionen uneindeutig. Der Ausuferungswasserstand wird nicht weiter definiert und selbst bei deutlich ausgeprägter Böschungsoberkante wird nicht spezifiziert, wo genau diese zu verorten ist.

Das in Unterabschnitt 7.1.2 vorgestellte Verfahren zur Extraktion von Geländekanten aus dem DGM ermöglicht eine eindeutige Verortung der Böschungsoberkante bei Uferböschungen mit signifikanter Krümmung. Dadurch können nicht nur als Knick ausgebildete Oberkanten abgegrenzt werden, sondern je nach gewähltem Krümmungsschwellenwert auch solche Böschungen, deren Neigung in Richtung Aue kontinuierlich abnimmt. Mit dem Krümmungsschwellenwert von 0,025 m⁻¹ können Böschungsoberkanten bis zu einem Krümmungsradius von 40 m lokalisiert werden.

Die Erstellung einer BOK als Linien-Feature kann mithilfe der folgenden Bearbeitungsschritte erfolgen; Ausgangspunkt ist der Datensatz der extrahierten Oberkantensegmente (siehe Unterabschnitt 7.1.2). Mithilfe einer Pufferfunktion können diejenigen Kantenelemente herausgefiltert werden, die nahe dem Gewässer verortet sind. Um eine eindeutige BOK als durchgehende Linie zu erhalten, müssen die selektierten Kantenelemente anschließend geprüft und interpretiert werden (z.B. unter Zuhilfenahme des DGM [Höhenlinie] oder der Karte der Neigungen). Überzählige Kantenelemente, die nicht Teil der BOK sind, sondern beispielsweise kleinere Erosionskanten oder Kanten von Wegen, werden entfernt. Die resultierenden Kantensegmente der Uferoberkante werden anschließend manuell editiert und verbunden.

7.3.2 Qualitätskontrolle der extrahierten Böschungsoberkante

Methoden der Qualitätskontrolle werden in der Verarbeitung digitaler Daten eingesetzt, um Auswertungsverfahren zu bewerten und die Aussagekraft der Ergebnisse festzustellen. Für eine Qualitätskontrolle von Analyseergebnissen ist das Hinzuziehen von Vergleichsdaten üblich. In der Theorie ermöglicht ein Vergleich der Analyseergebnisse mit der „Wahrheit“ eine Messung des Anteils an korrekt und an falsch klassifizierten Punkten (*true positive, false positive, false negative*). Aus diesen Größen lassen sich daraufhin konkrete Werte für die Vollständigkeit (*Completeness*) und die Korrektheit (*Correctness*) der Ergebnisse bestimmen. Dies setzt allerdings das Vorhandensein eines vollständigen Vergleichsdatensatzes sowie die Kenntnis der korrekten Ergebnisse voraus. Bei der Analyse von Fernerkundungsdaten werden als Vergleichsdaten sogenannte *Ground Truth* Daten verwendet, also solche Daten, die unmittelbar im Gelände erhoben wurden.

Für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit liegt kein Vergleichsdatensatz der vollständigen Geländekanten vor, jedoch wurden vor Ort mittels mobilem GNSS-Empfänger mehrere Geländepunkte im Bereich der Uferböschungen vermessen (vergleiche Abschnitt 5.3). Diese Geländepunkte werden im Folgenden als *Ground Truth* verwendet, um eine Qualitätskontrolle der teilautomatisierten Kantenextraktion am Beispiel der Oberkante der Uferböschung durchzuführen. Die Position der Oberkante der Uferböschung wurde vor Ort an acht verschiedenen Standorten als 3D-Punkt erfasst (siehe Anlage 1). An jedem dieser Standorte wird die Position der extrahierten Böschungsoberkante ermittelt und mit dem terrestrisch vermessenen Oberkantenpunkt verglichen; dabei werden sowohl die Abweichung in der Lage als auch die Abweichung in der Höhe bestimmt (siehe Tabelle 7-1). Zur qualitativen, visuellen Bewertung der Ergebnisse wird an jedem untersuchten Standort zudem ein Höhenprofil der Uferböschung (graue Linie) aus dem DGM erstellt und die Position der vermessenen (grüner Punkt) und der extrahierten Oberkante (roter Punkt) hinzugefügt. Die acht Uferschnitte, die auf diese Weise erstellt wurden, sind in Anlage 2 einzusehen; als Beispiel ist an dieser Stelle der untenstehende Uferschnitt 4 dargestellt (Abbildung 7-14).

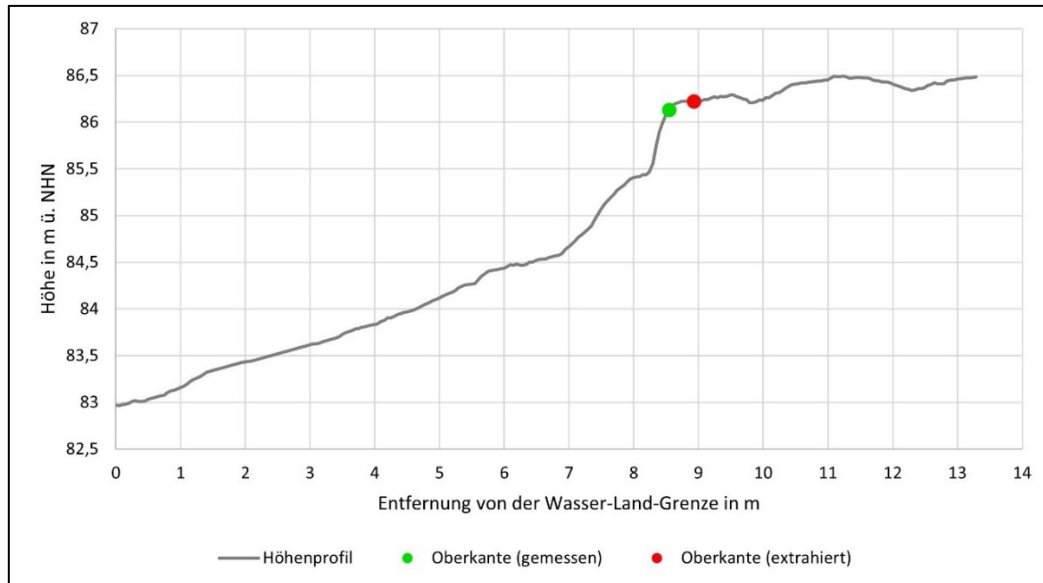


Abbildung 7-14: Beispiel eines Uferschnitts zur Qualitätskontrolle der extrahierten Böschungsoberkante (Uferschnitt 4, Rhein-km 476,25)

Nachfolgend sind in Tabelle 7-1 die Abweichungen der extrahierten BOK von den im Gelände vermessenen Oberkantenpunkten aufgeführt; es wurde sowohl die Abweichung der Punkte in der Höhe als auch in der Lage (kürzeste horizontale Entfernung) ermittelt.

Tabelle 7-1: Abweichungen zwischen extrahierter und vermessener BOK

Uferschnitt Nr.	Abweichung Lage in m	Abweichung Höhe in m
U1	0,03	0,03
U2	1,04	0,13
U3	1,16	0,26
U4	0,38	0,09
U5	1,80	0,35
U6	1,44	0,21
U7	0,95	0,20
U8	0,17	0,00
Durchschnitt	0,87	0,16
Spannweite	0,03 - 1,80	0,00 - 0,35

Die Ergebnisse der Kantenextraktion weichen im Schnitt 87 cm in ihrer Lage von den terrestrisch vermessenen Oberkantenpunkten ab. Die Höhendifferenz beträgt im Mittel 16 cm.

Wie in Unterabschnitt 7.3.1 untersucht wurde, liefern rechtliche und technische Regelwerke keine eindeutige Definition für die Böschungsoberkante. Die genaue Positionierung der Oberkante bei terrestrischen Vermessungen obliegt somit der vermessenden Person. Daher ist auch hier mit Abweichungen zu rechnen, wenn verschiedene Personen, z.B. zu verschiedenen Zeitpunkten, die Position der Kante vermessen. Die Abweichung von unter einem

Meter in der Lage und wenigen Zentimetern in der Höhe werden somit als tolerierbare Abweichungen eingeschätzt. Für das Monitoring von Veränderungen und Entwicklungen ist darüber hinaus besonders wichtig, dass die Strukturen (hier die Uferböschung) stets mit der gleichen Methodik und anhand von möglichst objektiven Kriterien abgegrenzt werden. Dies ist mithilfe des computergestützten Ansatzes, die Oberkante stets an der Stelle mit maximaler Krümmung zu verorten, möglich.

Dennoch können aus verschiedenen Schritten im Kantenextraktionsprozess Ungenauigkeiten resultieren, da die Methodik mit Mittelungen, Bereinigungen und Glättungen arbeitet:

- Zur Verkürzung der Rechenzeit wurde die Auflösung des Höhenrasters verringert und mit einem gröberen DGM (1 m Rasterweite) gearbeitet, wonach auch Analyseergebnisse nur mit einer Genauigkeit von bis zu einem Meter bestimmt werden können.
- Durch die Wahl eines größeren Berechnungsfensters für die Profilkrümmung (hier 5 m x 5 m) können zwar Kanten besser erkannt werden (Rutzinger 2012, S. 41), die Genauigkeit der Position dieser Kanten nimmt jedoch ab (Rutzinger 2012, S. 37).
- Beim Ausdünnen der selektierten Zellen mit hoher Krümmung bleibt nur das innere Skelett der Zellenbereiche als 1-Pixel-breite Linienstruktur erhalten. Bei asymmetrischer Verteilung der Krümmungsmaxima könnte so die Zelle mit lokal maximaler Krümmung entfernt werden und die Kante an einer abweichenden Position verortet werden.
- Auch durch das Glätten der resultierenden Linien kann es zu einer Abweichung kommen. Andererseits kann die Glättung auch zu einer Verbesserung des Kantenverlaufs führen, da sie den zickzackförmigen Verlauf der Linie, der durch die quadratische Form der Pixel entsteht (Brügelmann 2000, 113), ausgleicht und damit einem realistischen Verlauf annähert.

7.3.3 Klassifikation der Uferböschung anhand ihrer Neigung

Uferböschungen zeichnen sich insbesondere durch ihre Neigung aus, die von sehr flach bis sehr steil variieren kann. Extremformen bilden annähernd senkrechte Steilufer und überhängende Uferböschungen. Die Form eines Ufers wird durch dessen Lage im Gewässerlauf und die damit einhergehenden hydraulischen Beanspruchungen bestimmt. So bilden sich auf der Innenseite von Flusskurven flache Gleitufer aus, da sich die Strömung dort verlangsamt und Sediment abgelagert wird. In Außenkurven hingegen entstehen häufig steilere Prallufer, die durch Erosion aufgrund von stärkerem Strömungsangriff gebildet werden. Sehr starke Ufererosion kann zu einer solchen Destabilisierung der Uferböschung führen, dass es zu einem Uferabbruch bzw. einer Rutschung kommt.

Für eine erste Klassifizierung der Uferböschungen ist daher die Untersuchung des Parameters Neigung geeignet. Ausgehend von der in Unterabschnitt 7.3.1 erarbeiteten Uferdefinition wird das Ufer bzw. die Uferböschung in den folgenden Untersuchungen durch die Mittelwasserlinie (MW-Linie) und die extrahierte Böschungsoberkante (BOK) abgegrenzt. Das Ufer wird in regelmäßige Abschnitte unterteilt, für welche die Neigung ermittelt und

anschließend in definierte Neigungsklassen eingeteilt wird. Die Abschnitte werden durch senkrecht zur MW-Linie verlaufende Uferschnittlinien definiert, welche die MW-Linie mit der BOK verbinden. Auf diesen Transekten werden in regelmäßigen Abständen Stützpunkte erzeugt, für die aus dem DGM Höheninformationen abgegriffen und daraus die Neigungswerte berechnet werden.

Die Berechnung der mittleren Neigung erlaubt eine erste Interpretation der Uferabschnitte. In einigen Teilen des Untersuchungsgebietes sind jedoch stufenartige Ausformungen der Uferböschung zu erkennen, wie das untenstehende Höhenprofil einer Uferschnittlinie bei ca. Rhein-km 474,8 veranschaulicht (Abbildung 7-15). Vor Ort konnten an einigen der sehr stark geneigten Böschungsbereiche Spuren einer Baggerschaufel entdeckt werden, daher ist es möglich, dass Teile dieser steilen Hänge beim Rückbau der Ufersicherung entstanden sind. Wie bereits in Abschnitt 4.1 ausgeführt wurde, ist anzunehmen, dass die sandigen Hänge im Laufe der Zeit erodiert und umgeformt werden. Um diese Entwicklung nachvollziehen zu können, ist es relevant, auch den stufenartigen Charakter des Ufers zu erfassen. Daher wird neben der mittleren Neigung der Uferböschung auch die maximale und minimale Neigung berechnet. Weichen die maximale und minimale Neigung stark von der mittleren Böschungsneigung ab, ist dies ein Indiz für eine stufenartige Uferform.

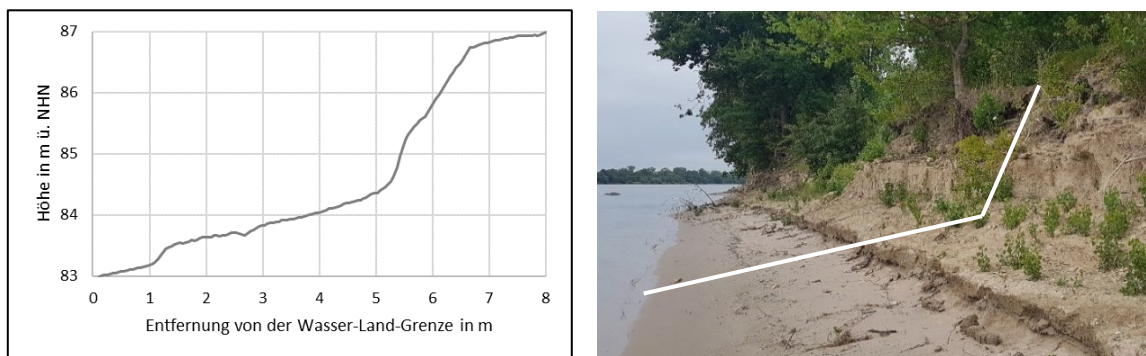


Abbildung 7-15: Höhenprofil einer stufenförmigen Uferböschung (ca. bei Rhein-km 474,8)

Zunächst ist dafür eine Definition von Neigungsklassen erforderlich, in die die Uferabschnitte bei der Analyse eingeteilt werden. Es existieren verschiedene Vorschläge für die Unterteilung von Böschungs- bzw. Hangneigungen. In Rheinland-Pfalz wurde vom Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation eine Neigungsklassifikation mit besonderem Hinblick auf Weinberge erstellt (LGB-RLP). Für Hänge mit Neigungen von über 70 % werden dort jedoch keine weiteren Unterscheidungen mehr gemacht. Bei Uferböschungen können durch Erosion oder Rutschungen jedoch auch Steilhänge mit bis zu senkrechter Neigung oder sogar Überhänge entstehen. Daher wurde zusätzlich die Neigungsklassifikation nach Tang (2000) als Orientierung verwendet, die dieser für hochalpine Gebiete entwickelt hat. In Anlehnung an die vorgestellten Hangklassifikationen wurde folgende Neigungseinteilung erstellt:

Tabelle 7-2: Klassifikationsschema der Böschungsneigung (angelehnt an Tang 2000 und LGB-RLP)

Neigungsklasse	Neigung in %	Neigung in °	Farbe
nicht bis kaum geneigt	< 5	< 2,9	gelb
schwach geneigt	5 - 10	2,9 - 5,7	gelblich-orange
mittel geneigt	10 - 20	5,7 - 11,3	orange
stark geneigt	20 - 30	11,3 - 16,7	rot-orange
sehr stark geneigt	30 - 60	16,7 - 31	rot
steil	60 - 100	31 - 45	rosa
sehr steil	100 - 370	45 - 75	lila
klippenhaft	370 - 760	75 - 82,5	blau-lila
überhängend	> 760	> 82,5	blau

Die nachfolgend beschriebene Methodik zur Untersuchung der Uferböschungen wurde in ArcMap durchgeführt. Das Programm ist durch spezielle Tools und die vielfältigen Editiermöglichkeiten zur Lösung dieser Fragestellung gut geeignet.

Als Grundlage für die Auswertung der Uferböschungen dienen die Linien-Shapes der Mittelwasserlinie²⁰ sowie der Böschungsoberkante. Die Erstellung der Transekte erfolgt mithilfe der ArcGIS-Plug-In-Toolbox *Transect2.0* (Ferreira 2014), welche eine Funktion enthält, die in frei wählbaren Abständen Linien senkrecht zu einem benutzerdefiniertem Eingabe-Linie-Shape erzeugt. Hier wurden Abstände von 10 m gewählt, um senkrecht zur MW-Linie verlaufende Uferschnittlinien zu erzeugen. Die Länge der Transekte wurde so gewählt, dass sie auch bei den längsten Uferböschungen die Böschungsoberkante schneidet. Um die überstehenden Enden der Linien zu kürzen, müssen das ausgegebene Transekt-Shape und die Shapes der MW-Linie sowie der BOK zunächst vereinigt werden. Anschließend werden mithilfe des Befehls *Trim Line* alle überstehenden Abschnitte der Linien (*dangles*) eliminiert. Eine Prüfung des Ergebnisses und gegebenenfalls die Korrektur von entstandenen Fehlern ist hierbei wichtig.

Die erzeugten Uferschnittlinien besitzen hier noch keine Höheninformationen. Mit der Funktion *Interpolate Shape* werden für eine bestimmte Anzahl an Stützpunkten eines benutzerdefinierten Abstandes auf den Linien Höheninformationen aus dem DGM interpoliert. Der gewählte Abstand zwischen den Stützpunkten bestimmt die Schrittweite, für die anschließend jeweils die Neigung berechnet wird. Da das zu erfassende Geländemerkmale des Steilhangs in der Größenordnung von ca. 1 bis 2 m liegt (vgl. Abbildung 7-15), wurde gemäß der *Nyquist frequency* (vgl. Unterabschnitt 2.2.2) die Schrittweite auf 0,5 m festgelegt.

²⁰ Das Linien-Shape der Mittelwasserlinie wurde von der BfG für zur Verfügung gestellt. Dieses wurde bereits vor den Renaturierungsmaßnahmen erstellt, daher spiegelt es den vorherigen Zustand wider. Für eine Abgrenzung der aktuellen, renaturierten Uferböschung ist die Erstellung einer aktualisierten Mittelwasserlinie erforderlich.

Die Höheninformationen können anschließend mit dem Rechenwerkzeug *Add Z Information* ausgewertet werden. Es lassen sich hiermit die minimale, mittlere und maximale Neigung für die Schrittweite von 0,5 m berechnen.

Anhand von Tabelle 7-2 kann anschließend eine Klassifizierung der Uferabschnitte durchgeführt werden, sowohl für die mittlere als auch für die maximale Böschungsneigung. Eine geeignete farbliche Darstellung erlaubt die erste Interpretation der Uferabschnitte anhand der mittleren Neigung sowie eine Identifizierung weiterer Ufercharakteristiken beim Vergleich mit der maximalen Neigung (siehe Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17). Die Ergebnisse der Uferklassifikation für das ganze Untersuchungsgebiet sind in Anlage 4 (mittlere Neigung) und Anlage 5 (maximale Neigung) dargestellt.

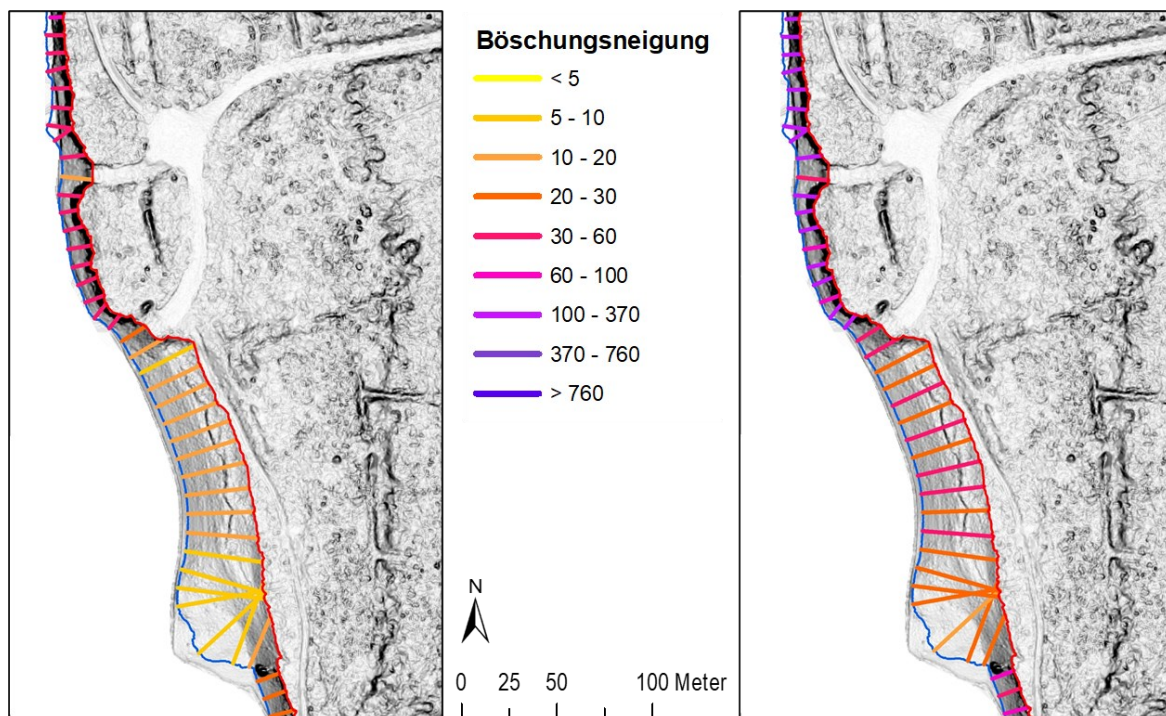


Abbildung 7-16: Klassifikation der Uferböschung anhand ihrer Neigung (links mittlere, rechts maximale Neigung, Hintergrund: Gesamtkarte der Neigungen mit 50 cm Auflösung)

In Abbildung 7-16 ist ein Ausschnitt der Uferklassifikation anhand der mittleren (links) sowie der maximalen Neigung (rechts) dargestellt. Die mittlere Neigung der Uferbereiche lässt erkennen, dass es sich im nördlichen Teil des Kartenausschnittes um eine vorwiegend sehr stark geneigte Uferböschung (30 bis 60 % Neigung) handelt. Südlich schließt sich ein flacheres, buchtartiges Ufer an (schwach bis mittel geneigt, 5 bis 20 % Neigung). Die maximale Böschungsneigung weist insbesondere im nördlicheren, steileren Uferbereich wesentlich größere Werte auf (ca. 100 bis 370 % Neigung). Dies wird bei einem Blick auf Abbildung 7-17 noch deutlicher. In dieser Abbildung ist die Differenz zwischen mittlerer und maximaler Neigung visualisiert. Im nördlichen Uferabschnitt divergieren die Werte von mittlerer und maximaler Neigung stark. Es handelt sich somit um eine uneinheitlich geneigte Uferböschung, das Vorliegen einer Stufenform ist wahrscheinlich.

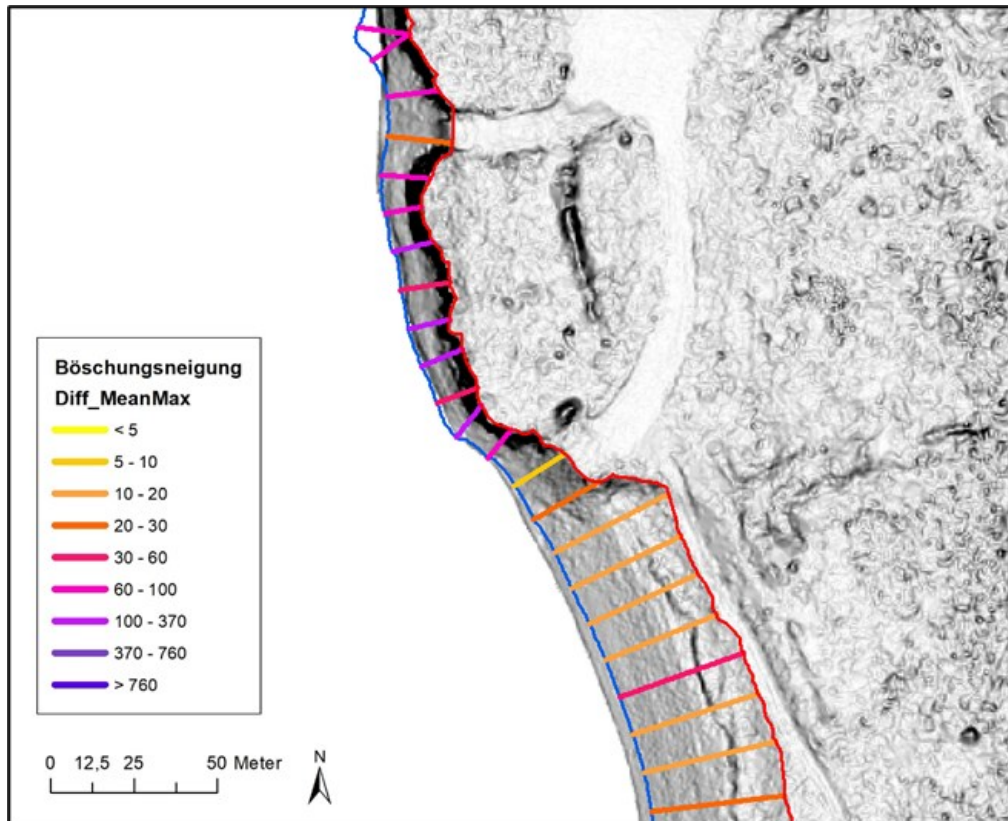


Abbildung 7-17: Differenz zwischen maximaler und mittlerer Böschungsneigung

Ausgehend von der Klassifikation der Uferböschungen anhand ihrer Neigungen kann in einem nächsten Interpretationsschritt die Charakteristik der Uferabschnitte weitergehend untersucht werden. Zur detaillierteren Klassifizierung können weitere Daten herangezogen werden. Anhand der Lage im Gewässerlauf können Prallufer und Gleitufer identifiziert werden. Bei sehr starker Uferneigung kann eine Prüfung der betreffenden Bereiche vor Ort sinnvoll sein, um Uferabbrüche oder Nisthöhlen zu erkennen.

8 Bildanalyse

Im Abschnitt 3.2 wurden einige Möglichkeiten der Bildanalyse und -klassifikation vorgestellt. Verschiedene Merkmale können zur Detektion unterschiedlicher Landbedeckungsarten und Strukturen verwendet werden, z.B. die Reflexionsintensität einzelner Spektralkanäle, spektrale Indizes oder Textur-Eigenschaften. Diese Informationen können mithilfe von Schwellenwertmethoden ausgewertet werden oder als Eingangsdaten für automatische Bildklassifikationsverfahren dienen (vergleiche Abschnitt 3.2).

In diesem Kapitel werden Ansätze vorgestellt, um durch Methoden der Bildanalyse die in Unterabschnitt 2.3.3 definierten radiometrischen Strukturklassen *Auengewässer*, *Totholz*, *Bank* und *ufernahe Sohlstrukturen* zu erfassen (siehe Abbildung 8-4). Dafür werden die multispektralen Luftbilddaten vom 15.10.2019 verwendet.

Im Folgenden werden zunächst verschiedene Methoden zur Abgrenzung von Wasser- und Landflächen vorgestellt. Der Schwerpunkt dabei wird auf rasterbasierte Schwellenwertverfahren gelegt, welche mit verschiedenen radiometrischen Parametern arbeiten. Darüber hinaus wird ein LiDAR-basierter Ansatz der Klassifikation von Wasser- und Landflächen vorgestellt. Diese Ansätze können zur Identifikation von Auengewässern sowie der Bestimmung der Wasser-Land-Grenze zum Zeitpunkt der Datenerhebung genutzt werden. Für die weiteren radiometrischen Strukturklassen werden Ansätze aufgeführt, welche in verschiedenen Fachpublikationen zur Detektion dieser Strukturen verwendet wurden. Diesen Ansätzen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht detaillierter nachgegangen. Verfahren der automatischen Bildklassifikation (vergleiche Abschnitt 3.2), die ebenfalls radiometrische Parameter als Eingangsdaten verwenden werden nicht weiter beschrieben. Für weitere Informationen zu dem umfangreichen Themengebiet der Bildklassifikation sei auf einschlägige Fachliteratur, z.B. Richards und Jia (2006) oder Freedon und Rummel (2016) verwiesen.

8.1 Klassifizierung von Wasser- und Landflächen

Die charakteristischen Reflexionseigenschaften von Wasserflächen ermöglichen eine Klassifizierung der Landbedeckung in Wasser- und Nicht-Wasserflächen. Insbesondere bei Strahlung im nahen Infrarotbereich unterscheiden sich die Reflexionseigenschaften zwischen Wasser- und Land- bzw. Vegetationsflächen stark (vergleiche Abschnitt 3.2 und Abbildung 3-9). Vegetation absorbiert einen Großteil des sichtbaren Lichtes, während sie Strahlung des Infrarotbereiches sehr stark reflektiert. Auch vegetationsloser Boden reflektiert Infrarotstrahlung stärker als Licht aus den sichtbaren Wellenlängenbereichen. Wasser absorbiert Strahlung sämtlicher Wellenlängenbereiche sehr stark und hat nur geringe Reflexionswirkung. Anders als andere Bodenbedeckungen reflektiert Wasser auch Strahlung des Infrarotbereichs wenig bis gar nicht. Deshalb ist dieser Spektralbereich für die Unterscheidung zwischen Wasserflächen und anderen Bodenbedeckungen von wesentlicher Bedeutung.

Zur Abgrenzung von Wasserflächen anhand dessen spektraler Charakteristik gibt es verschiedene rasterbasierte Ansätze. Bei *single-band*-Methoden wird nur ein einzelner Spektralkanal ausgewertet. Zur Unterscheidung von Wasserflächen und anderer Landbedeckung

liefert insbesondere der Spektralbereich des nahen Infrarots wichtige Informationen (s.o.). Dadurch dass Wasserflächen Strahlung im Bereich des NIR fast vollständig absorbieren, während andere Bodenarten – insbesondere vegetationsbedeckte Flächen – dieses Strahlungsspektrum stark reflektieren, kann die Unterscheidung dieser Landbedeckungsarten durch einen geeigneten Schwellenwert für die Intensität des rückgestrahlten NIR-Signals erfolgen. Anhand dessen wird jedes Pixel computergestützt entweder als Wasserfläche (NIR < Schwellenwert) oder als Nicht-Wasserfläche (NIR > Schwellenwert) klassifiziert.

Work und Gilmer (1976) sowie McFeeters (1996) nutzen das Histogramm der NIR-Reflexion zur Bestimmung eines geeigneten Schwellenwertes, um Wasserflächen von Landflächen zu unterscheiden (siehe Abbildung 8-1). Aus dem Histogramm wird ersichtlich, dass sich die Reflexionsintensitäten des NIR von Wasser- und Bodenflächen wesentlich unterscheiden, man erkennt zwei getrennte Peaks in der Häufigkeitsverteilung. Work und Gilmer (1976) stellen fest, dass Flachwasserbereiche mit ihrem Reflexionsverhalten häufig im Bereich zwischen den beiden Peaks liegen. Um diese ebenfalls den Wasserflächen zuzuordnen, wurde der Schwellenwert etwas höher gewählt, also näher am Peak des Bodens (hier etwa 9 bis 9,5 %). McFeeters (1996) nutzt einen Schwellenwert von 8 % NIR-Reflexion für die Abgrenzung von Wasserflächen (vergleiche Abbildung 3-10). Entsprechend stellt die Definition eines geeigneten Schwellenwertes eine große Herausforderung dar. Auch innerhalb einer Landbedeckungsart herrscht eine natürliche Varianz der spektralen Eigenschaften und so lassen sich Wasser- und Landflächen ausschließlich anhand der Informationen über die NIR-Reflexion nicht eindeutig voneinander abgrenzen.

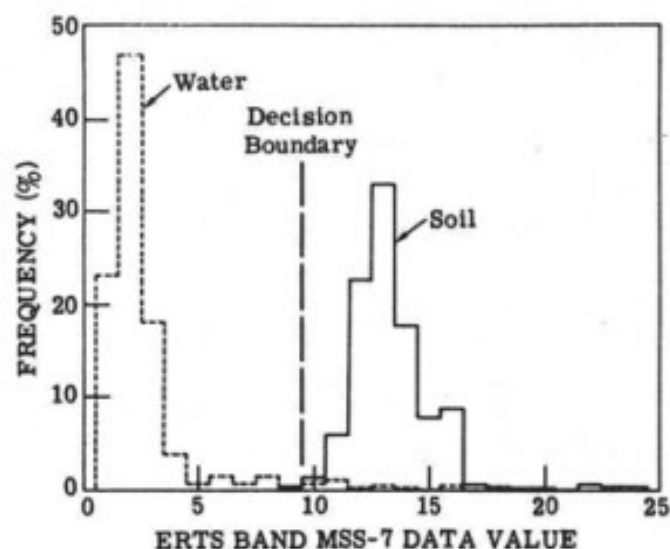


Abbildung 8-1: Schwellenwertverfahren zur Abgrenzung von Wasser- und Landflächen (Work und Gilmer 1976, 688)

Bei den *multi-band*-Methoden werden zur Klassifizierung der Bodenarten die Reflexionswerte zweier oder mehrerer Kanäle verwendet und diese mittels mathematischer Operationen verrechnet. Eine einfache Verknüpfung zweier Kanäle wird durch die *band-ratio*-Methode hergestellt. Dabei wird ein Kanal des sichtbaren Lichtes (z.B. Grün oder Rot) ins Verhältnis zum Kanal des nahen Infrarots gesetzt (McFeeters 1996). Dies hebt die Unterschiede

der Reflexionseigenschaften stärker hervor und erlaubt eine genauere Unterscheidung verschiedener Bodenbedeckungen (McFeeters 1996).

Komplexere Kombinationen zweier oder mehrerer Spektralkanäle, die *spektralen Indizes* (vergleiche Unterabschnitt 3.2.2) können die Unterscheidung der Landbedeckungen weiter optimieren, indem die Unterschiede in der spektralen Charakteristik noch stärker betont und dadurch bestimmte Oberflächenarten mit eindeutigen Reflexionseigenschaften hervorgehoben werden. Zur Abgrenzung von Wasserflächen wurden verschiedene spektrale Wasserindizes entwickelt.

Der grundlegende Wasserindex wurde von McFeeters (1996) entwickelt: der *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (vergleiche Unterabschnitt 3.2.2). Basierend auf den spektralen Besonderheiten von Wasserflächen werden beim NDWI der grüne Kanal und das nahe Infrarot gemäß Formel (12) verrechnet. Wasserflächen werden dabei durch positive NDWI-Werte ausgezeichnet, da sie Strahlung des grünen Spektrums stärker als die des nahen Infrarots reflektieren. Boden- und Vegetationsflächen erhalten negative Werte. Als Schwellenwert für die Abgrenzung von Wasser- und Nicht-Wasser-Flächen wird von McFeeters (1996) daher ein Wert von 0 angesetzt. Die Normalisierung ermöglicht eine Vergleichbarkeit bei der Anwendung dieses Indizes in verschiedenen Gebieten.

$$NDWI = (Grün - NIR) / (Grün + NIR) \quad (12)$$

Aufbauend auf dem NDWI von McFeeters (1996) wurden weitere Modifikationen dieses Ansatzes sowie weitere Wasser-Indizes entwickelt – zur Verbesserung der Klassifikation, zum besseren Umgang mit Störfaktoren wie Schatten oder zur Anpassung an bestimmte Einsatzgebiete (Acharya 2018, S. 2). Einige bebaute Flächen können ähnliche spektrale Eigenschaften haben wie Wasserflächen, da auch hier Strahlung des grünen Spektrums stärker reflektiert wird als nahes Infrarot (siehe Abbildung 8-2). Dies kann, z.B. bei Anwendung des NDWI, zu Verwechslungen und Fehlklassifizierungen führen, wodurch der Anteil der Wasserflächen überschätzt wird. Im Bereich des mittleren Infrarots (MIR) (Spektralkanal/Band 5 in Abbildung 8-2) unterscheidet sich das Reflexionsverhalten von Bebauung und Wasserflächen deutlich. Basierend auf diesen Eigenschaften entwickelte Xu (2006) den *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), bei welchem er statt dem nahen Infrarot das mittlere Infrarot (MIR) verwendet (siehe Formel (13)). Bebauung reflektiert Strahlung des mittleren Infrarots stärker als grünes Licht, sodass sie – ebenso wie Vegetation – negative MNDWI-Werte erhält und somit Fehlklassifikationen verringert werden.

$$MNDWI = (Grün - MIR) / (Grün + MIR) \quad (13)$$

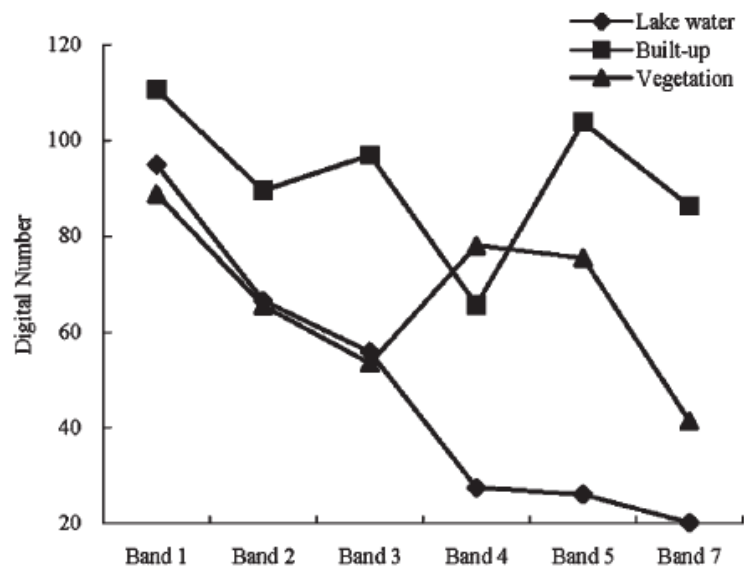


Abbildung 8-2: Spektrale Signaturen von Seewasser, Bebauung und Vegetation (Band 1: blau, Band 2: grün, Band 3: rot, Band 4: nahes Infrarot, Band 5: mittleres Infrarot, Band 7: kurzwelliges Infrarot) (Xu 2006, 3026)

Auch Xu (2006) setzt zunächst den Schwellenwert auf 0 fest, erkennt jedoch, dass eine Anpassung dieses Wertes die Genauigkeit der Klassifikation erhöhen kann. Für Flusswasser bestimmt er einen optimalen Schwellenwert für den MNDWI von 0,09; alle Zellen mit MNDWI-Werten über 0,09 werden als Wasserflächen klassifiziert. Auch den NDWI wendet Xu (2006) auf die gleichen Untersuchungsgebiete an. Er kommt zu der Erkenntnis, dass ein individuell an das Untersuchungsgebiet angepasster Schwellenwert bessere Ergebnisse liefert als der von McFeeters (1996) vorgeschlagene Standard-Schwellenwert von 0; in seinem Fall beträgt der optimale NDWI-Schwellenwert für die Detektion von Flusswasser 0,19.

NDWI und NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, siehe Abschnitt 3.2) können auch in Kombination verwendet werden, wie Spada et al. (2018) zeigen: sie identifizieren potenzielle Wasserflächen, indem sie Zellen mit hohem NDWI (oberste 10 % der Werte) und niedrigem NDVI (unterste 10 % der Werte) selektieren.

Eine weitere Möglichkeit, Wasserflächen zu erkennen, bieten LiDAR-Daten. Die ausgesendete Laser-Strahlung des LiDAR-Systems, welche bei den meisten Systemen im Bereich des nahen Infrarots (zwischen 800 nm und 1550 nm) liegt, wird von Wasserflächen entweder komplett absorbiert oder mit einer wesentlich geringeren Intensität zurückgestrahlt, sodass wesentlich weniger rückgestrahlte Signale empfangen werden (Legleiter 2012, 500; Höfle et al. 2009, 1637). Wasserflächen zeichnen sich somit durch eine geringe Signalstärke des zurückgestrahlten Lasers bzw. durch eine niedrige Punktdichte aus. Mittels eines Intensitätsschwellenwertes können die Punkte in Wasser-Pixel und Nicht-Wasser-Pixel unterteilt werden. Dafür muss ein geeigneter Schwellenwert bestimmt werden, beispielsweise mithilfe des Histogramms der Signalintensitäten (d'Andrimont et al. 2017, 12). Darüber hinaus existieren auch Ansätze zur Detektion von Wasserflächen, die Techniken der Bildanalyse mit der Untersuchung der LiDAR-Intensität kombinieren (siehe z.B. d'Andrimont et al. 2017).

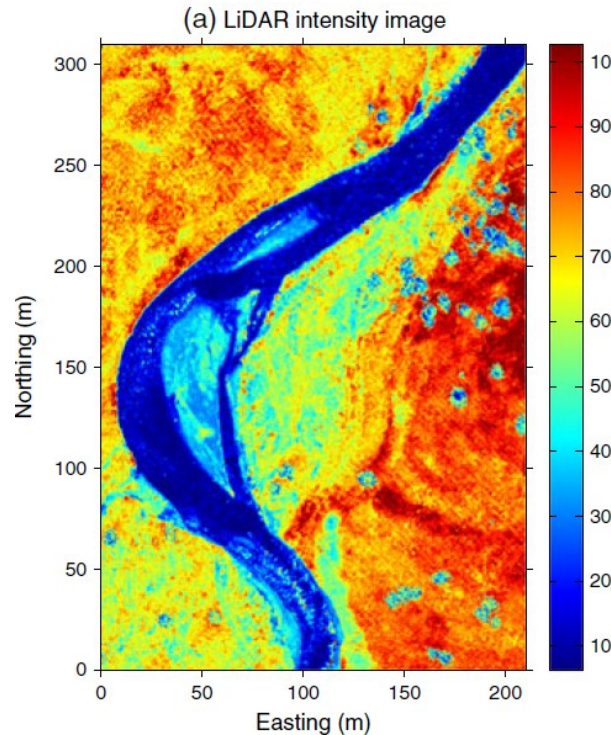


Abbildung 8-3: Eine geringe LiDAR-Intensität weist auf Wasserflächen hin (Legleiter 2012, 506)

8.2 Ansätze zur Strukturerefassung aus Luftbilddaten

Im Folgenden werden Ansätze vorgestellt, um die radiometrischen Strukturklassen (*Auengewässer*, *Totholz*, *Bank* und *ufernahe Sohlstrukturen*, siehe Abbildung 8-4) anhand von Luftbilddaten zu detektieren. Dabei dienen die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Grundlagen zu radiometrischen Parametern, Verfahren der Bildanalyse und Ansätzen der Bildklassifikation als Orientierung und es wird untersucht, welche Ansätze in Fachpublikationen zur Erfassung hydromorphologischer Strukturen bereits verwendet wurden.

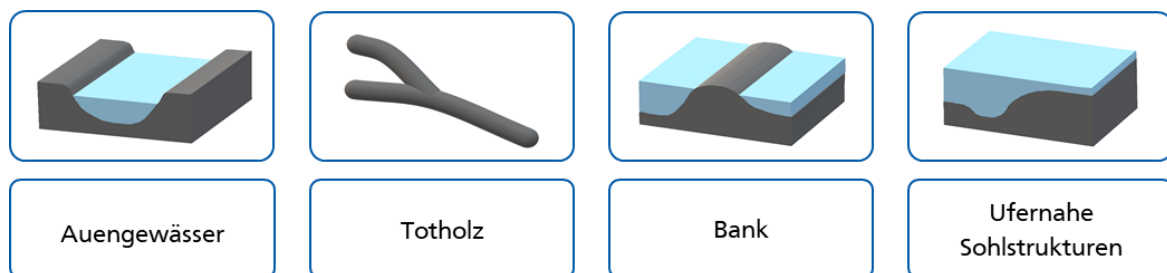


Abbildung 8-4: Radiometrische Strukturklassen

Als *Auengewässer* werden in dieser Arbeit Rinnen und Mulden verstanden, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung wasserführend sind. Dabei kann es sich um temporäre Wasserflächen, wie Blänken oder Flutmulden handeln oder um dauerhaft wasserführende Auenbäche, Seen oder Altgewässer (angebundene Altarme oder abgetrennte Altwasser).

Charakteristisch für Auengewässer ist die Wasserführung, daher sind die Eigenschaften des Wassers für deren Detektion maßgeblich. Die Form der Auengewässer ist vielfältig und daher zur Identifikation von Auengewässern nicht geeignet. In Abschnitt 8.1 wurden bereits verschiedene rasterbasierte Verfahren vorgestellt, die die spektrale Charakteristik von Wasserflächen verwenden, um Wasser- und Landflächen voneinander zu unterscheiden. Insbesondere im Bereich des Nahen Infrarots unterscheiden sich Wasserflächen aufgrund der einzigartig geringen Reflexion dieses Wellenlängenbereichs deutlich von anderen Landbedeckungen. Anhand von Schwellenwerten für verschiedene Kenngrößen werden alle Rasterzellen in Wasser- oder Nicht-Wasser-Pixel unterteilt.

Für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit wurde beispielhaft der NDWI berechnet; mittels eines NDWI-Schwellenwertes von 0,1 werden Wasser- und Landflächen voneinander unterschieden. Das Ergebnis ist in Abbildung 8-5 dargestellt. Der Gewässerlauf des Rheins wird zuverlässig als Wasserfläche klassifiziert, in der Aue sind keine weiteren Gewässer erkennbar. Eine kleine „Wasserfläche“ abseits des Fließgewässers wird zwar detektiert, aus dem Luftbild wird jedoch deutlich, dass es sich dabei nicht um eine Wasserfläche, sondern um ein Auto handelt. Wie Xu (2006) bereits untersucht hat, gibt es einige Oberflächenbedeckungen, die ähnliche spektrale Eigenschaften der für den NDWI verwendeten Wellenlängenbereiche (Grün und NIR) haben (siehe Abschnitt 8.1). Offensichtlich fällt auch das Auto in (Abbildung 8-5) unter diese Kategorie. Mit dem modifizierten Wasserindex (MNDWI) wäre dieses Problem möglicherweise zu lösen. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch keine Informationen über den Wellenlängenbereich des MIR vorliegen, kann diese Vermutung nicht geprüft werden.

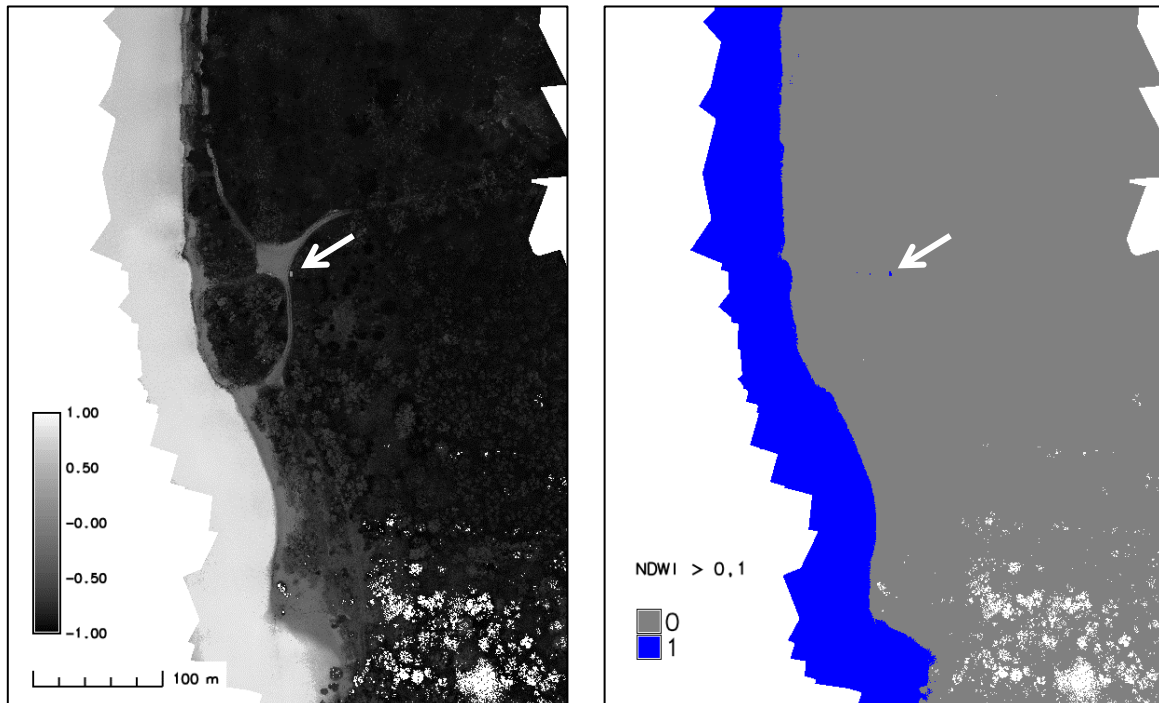


Abbildung 8-5: Extraktion von Wasserflächen mittels NDWI-Schwellenwert (links NDVI, rechts 1: Wasserflächen und 0: Landflächen, auf Basis des multispektralen Luftbildes vom Oktober 2019)

Der Begriff *Totholz* „[w]ird als Sammelbegriff für abgestorbene Bäume oder Baumteile verwendet. Totholz hat eine hohe ökologische Wertigkeit als Lebensraum zahlreicher Insekten- und Vogelarten.“ (DWA 2018a) Je nach Größe und Position von Totholzstämmen tragen diese durch ablenkende und aufstauende Wirkung zum Strömungsbild im Gewässer bei.

In hochaufgelösten digitalen Höhendaten müssten Totholzstämmen durch die erhabene Lage auf der Geländeoberfläche gut erkennbar sein. Bei der Generierung von Digitalen Geländemodellen aus ALS-Punktwolken werden jedoch auf der Geländeoberfläche befindliche Objekte, wie Vegetation oder Gebäude, durch spezielle Filter entfernt. Dies kann auch zur Entfernung von liegenden Totholzstämmen führen. In Abbildung 8-6 ist dieser Effekt an dem verwendeten DGM des Untersuchungsgebietes ebenfalls zu erkennen: einer der abgebildeten Totholzstämmen wurde vollständig, einer teilweise herausgefiltert und „geglättet“.



Abbildung 8-6: Visualisierung des Glättungseffektes an zwei Totholzstämmen bei Rhein-km 476,1 (links: Luftbild, rechts: hochaufgelöste Neigungskarte, berechnet aus dem DGM mit einem 15 x 15cm großen Berechnungsfenster)

In der Literatur werden meist Verfahren der Bildanalyse verwendet, um Totholz (*woody debris*) zu erkennen (z.B. Marcus et al. 2003, Leckie et al. 2005). Totholzstämmen unterscheiden sich in ihren Reflexionseigenschaften von vitaler Vegetation, wie Blättern und Gräsern. Dies lässt sich beispielsweise mithilfe des NDVI visualisieren (siehe Abbildung 8-7). Für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes, in dem einige Totholzstämmen zu finden sind, wurde auf Basis des multispektralen Luftbildes vom 15.10.2019 der NDVI berechnet. Es wird aus dieser Darstellung jedoch ersichtlich, dass Totholz ähnliche Reflexionseigenschaften wie unbewachsener Boden aufweist: der NDVI dieser Landbedeckungen liegt in einem ähnlichen Wertebereich. Zur eindeutigen Unterscheidung müssen daher weitere Merkmale herangezogen werden. So wenden beispielsweise Marcus et al. (2003) Verfahren der überwachten Bildklassifikation auf Basis von hyperspektralen Luftbilddaten mit 128 Spektralkanälen an. Für die Klassifikation verwenden sie ausschließlich spektrale Informationen (Marcus et al. 2003, 368). Marcus et al. (2003, 376) kommen zu dem Ergebnis, dass Totholz mit dieser Methodik mit einer hohen Genauigkeit erkannt und abgegrenzt werden kann.

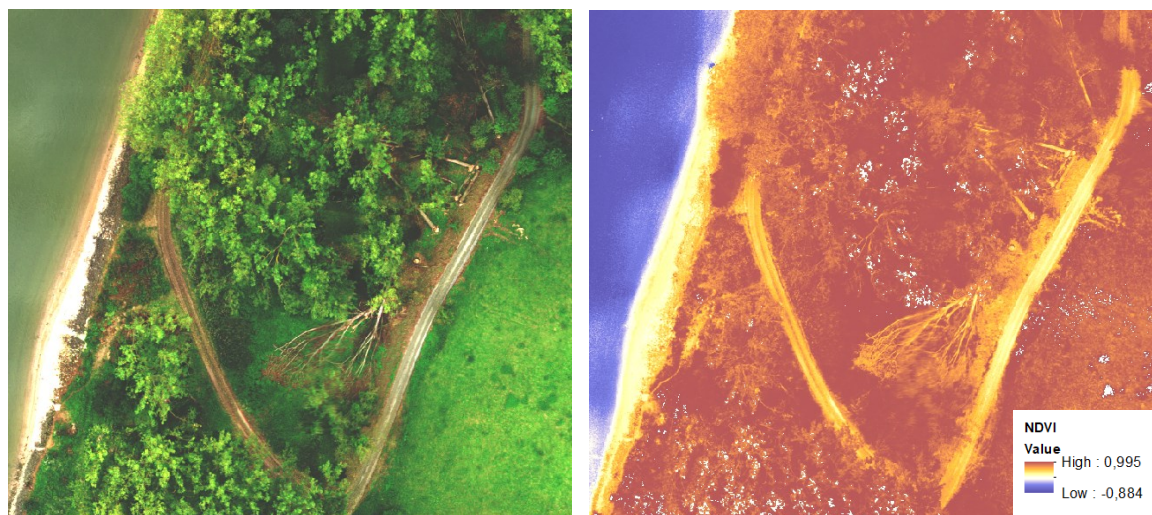


Abbildung 8-7: Karte des NDVI für einen Bereich mit mehreren Totholzstämmen

Als *Bank* wird nach DWA (2018a) eine „[a]usgedehnte aus Lockergestein bestehende Erhebung der Gewässersohle, die bei Mittelwasser (MW) und Niedrigwasser (NW) sichtbar ist [...]“ verstanden. Dabei kann eine Bank aus verschiedenen Sedimenten (z.B. Sand, Kies, Schotter, Muscheln) bestehen. Insbesondere unbewachsene Bänke lassen sich daher anhand der Art des Substrates charakterisieren.

Spada et al. (2018) führen eine Klassifikation verschiedener albanischer Flüsse durch und unterscheiden dabei die Klassen Wasser, Vegetation und Kies. Zur Detektion ihrer Sedimentklasse (*gravel class*) wenden sie zunächst eine Transformation der verwendeten RGB-Luftbilder in den HSL-Farbraum (*hue, saturation, lightness* = Farbton, Farbsättigung, Helligkeit) an. Unbewachsene kiesige Flächen klassifizieren sie mithilfe eines Schwellenwertverfahrens, indem sie die Pixel selektieren, die die oberen 5 % der Helligkeit und die unteren 5 % der Farbsättigung bilden.

Leckie et al. (2005) unterscheiden verschiedene Substratklassen zwischen feinem Sand und großen Felsblöcken (*sand, gravel, cobble, rock*). Zunächst versuchten sie, eine noch feinere Unterteilung der Substratklassen zu erreichen, doch dabei kam es zu vielen Fehlklassifikationen zwischen den Substratklassen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die oben genannten vier Substratklassen zuverlässig unterschieden werden können (Leckie et al. 2005, 151). Die von ihnen verwendete Methodik basiert auf dem Verfahren der überwachten Klassifikation anhand der spektralen Merkmale der verwendeten multispektralen Luftbilddaten (8 Spektralkanäle).

Als *ufernahe Sohlstrukturen* werden in der vorliegenden Arbeit diejenigen Strukturen der Gewässersohle bezeichnet, welche sich in den hochaufgelösten Luftbildern unter der Wasseroberfläche noch abzeichnen. In Ufernähe, wo das Wasser flach genug ist, sind die Ausformungen der Sohle, vorrangig charakterisiert durch erhabene und abgesenkte Bereiche (z.B. Flachwasserzonen, Kolke, Tiefenrinnen), teilweise im Luftbild erkennbar. Generell absorbieren Wasserflächen einen Großteil der Strahlung des gesamten elektromagnetischen Spektrums, die Reflexionen sind sehr gering. Bei flachen Wasserkörpern mit klarem Wasser kann ein Teil der Sonnenstrahlung jedoch bis zur Sohle durchdringen und von dort aus

reflektiert werden (Richards und Jia 2006, 5). So kann die durch Luftbildfotografie erfasste reflektierte Strahlung genutzt werden, um die Sohlformungen zu klassifizieren.

Leckie et al. (2005) führen eine überwachte Klassifikation auf Basis von multispektralen Luftbilddaten mit 8 Spektralkanälen durch, um drei verschiedene Wassertiefenklassen zu unterscheiden: flach < 35 cm, mittel 0,35 bis 1,0 m und tief > 1,0 m. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die drei Wassertiefenklassen mit hoher Genauigkeit erkannt und korrekt zugeordnet werden können (Leckie et al. 2005, 151). Andere Studien unterscheiden verschiedene besondere Sohlstrukturen und Gewässerhabitate (*in-stream habitats*) mit Methoden der Bildanalyse. Beispielsweise nutzen Marcus et al. (2003) eine überwachte Bildklassifikation auf Basis von hyperspektralen Luftbilddaten mit 128 Spektralkanälen, um die Klassen *riffles*, *pools*, *glides* und *eddy drop zones*²¹ zu detektieren.

Darüber hinaus können auch Verfahren der luftgestützten Laser-Bathymetrie zur Erfassung von Sohlstrukturen angewendet werden. Üblicherweise verwenden ALS-Systeme Laserstrahlung mit Wellenlängen im nahen Infrarotbereich (Mandlbürger et al. 2009, 93), welche Wasserflächen nicht durchdringen können und fast vollständig absorbiert werden. Bei der Laser-Bathymetrie wird dagegen Laserstrahlung des grün-blauen Wellenlängenbereichs ($\lambda = 532 \text{ nm}$) eingesetzt, welche Wasser durchdringen kann und an der Gewässersohle reflektiert wird (Doneus et al. 2015, 100; Mandlbürger et al. 2009, 93). Limitierungen entstehen dabei bei Gewässern mit hoher Trübung (Mandlbürger et al. 2009, 93).

²¹ Diese Klassen werden von Marcus (2002, 116) folgendermaßen definiert: *riffles* als schneller, turbulenter Abfluss mit unruhiger Wasseroberfläche, *pools* als tiefe Bereiche mit ruhiger Wasseroberfläche und geringer Fließgeschwindigkeit, *glides* als Bereiche mit schnellem Abfluss und *eddy drop zones* als stehendes Wasser oder Kehrwasser mit ruhiger Wasseroberfläche.

9 Ausblick

In den vergangenen Kapiteln wurden verschiedene Ansätze der Analyse luftgestützter Fernerkundungsdaten vorgestellt und erfolgreich zur Erfassung der hydromorphologischen Strukturen des Untersuchungsgebietes eingesetzt. In diesem Kapitel werden Ideen vorgestellt, um die verwendeten methodischen Ansätze weiterzuentwickeln und einen höheren Grad der Automatisierung zu erreichen. Nach wie vor bleibt Expertenwissen für die Analysen wichtig, um die Methoden zielführend einzusetzen; sei es bei der Ermittlung der passenden Untersuchungsskala, der Wahl der geeigneten Schwellenwerte oder der fachkundigen Prüfung der Analyseergebnisse. Ein höherer Grad an Automatisierung ist jedoch sowohl für die Objektivität als auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse förderlich, wie auch für die Reduzierung von aufwendigen Geländeeinsätzen.

a) Verbinden von Liniensegmenten

Eine wesentliche Aufgabe zur Weiterentwicklung der vorgestellten Methodik für die Extraktion der Geländekanten besteht in der Erstellung zusammenhängender Linien. Die in dieser Arbeit vorgestellte rasterbasierte Kantenextraktion (Unterabschnitt 7.1.2) erzeugt einzelne Liniensegmente für Bereiche mit stark gekrümmten Geländekanten. Da hydromorphologische Strukturen der Ufer- und Auenbereiche häufig nicht deutlich ausgeprägt sind, weisen die Kanten an schwach gekrümmten Stellen Lücken auf und müssen zur vollständigen flächenhaften Abgrenzung der Strukturen verbunden werden. Die Verbindung der Linien wurde bisher manuell durchgeführt und anhand des DGM und der Karte der Neigungen der optimale Weg gesucht. Dieser Schritt hängt von den Erfahrungen und dem Ermessen des Bearbeiters ab.

Einen Ansatz zur automatisierten und objektiven Verbindung der Endpunkte zweier benachbarter Kantensegmente können sogenannte *Pathfinding*-Methoden liefern, wie sie auch Baruch und Filin (2008) für extrahierte Küstenlinien verwenden. Diese Methoden verwenden spezielle Algorithmen, um die „kostengünstigste“ Verbindung zwischen zwei Punkten zu suchen. Als Kosten werden zuvor bestimmte Kenngrößen definiert, z.B. die Neigung oder Krümmung, die beim Durchqueren des Bereichs überwunden wird. Eine andere Möglichkeit, ausgehend von den extrahierten Kantensegmenten durchgehende Linien zu erzeugen, bietet die Methode des „Linienwachstums“ (*breakline growing*) von Briese (2004), welche in Unterabschnitt 7.1.1 bereits vorgestellt wurde. Die detektierten Kantensegmente werden als Startsegmente für die von ihm entwickelte Methodik verwendet, welche die Kantenumgebung durch sich schneidende Ebenenpaare annähert und die Kanten in Vor- und Rückrichtung extrapoliert, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird (z.B. ein Grenzwert für den Schnittwinkel der Ebenen). Ob einer dieser Ansätze zur Verknüpfung der Kantensegmente für die Verwendung in natürlichen Ufer- und Auenbereichen mit vielen schwach ausgeprägten Strukturen geeignet ist, bleibt zu untersuchen.

b) Topologische Interpretation automatisieren

Zur Interpretation der extrahierten Geländekanten und zur Identifikation der verschiedenen Strukturklassen ist bisher ebenfalls ein manueller Bearbeitungsschritt erforderlich. Um diesen Vorgang zu automatisieren, könnten die Kanten anhand ihrer Lage ausgewertet und nah

beieinanderliegende Kanten selektiert werden. Da Geländekanten i.d.R. mindestens paarweise auftreten – je eine Unter- und Oberkante für eine Böschung und der Zusammenschluss mehrerer Böschungen für Wälle und Rinnen – können auf diese Weise automatisch diejenigen Kanten ausgewählt werden, welche potenzielle Grenzen von Strukturen darstellen. Anhand der Anordnung der verschiedenartigen Kanten (Ober- und Unterkanten) kann anschließend die zugehörige Strukturklasse identifiziert werden. Eine Herausforderung bei der Entwicklung eines automatisierten Vorgehens stellt die Definition von Grenzwerten für die „Nähe“ der Liniensegmente dar.

Auf diese Weise werden eindeutige Grenzen definiert, um die hydromorphologischen Strukturen flächenhaft abzugrenzen. Um diese auch als Fläche zu erfassen, muss ein Verfahren entwickelt werden, um aus den Strukturgrenzen flächenhafte Polygone zu erstellen. In Einzelfällen ist dies mittels manueller Editierwerkzeuge im GIS möglich: die Kanten zur Abgrenzung einer Struktur werden verbunden und in einem weiteren Schritt in ein Polygon-Feature umgewandelt (siehe Abbildung 9-1). Um dies flächendeckend durchzuführen, sollten auch für diesen Bearbeitungsschritt Versuche unternommen werden, um einen höheren Grad der Automatisierung zu erreichen. Dabei ist zu beachten, dass für die Umwandlung der Strukturgrenzen in Polygone geschlossene Polylinien erfordert werden; es muss also eine Möglichkeit entwickelt werden, die Kantensegmente zu verbinden und Lücken zu schließen (s.o.).

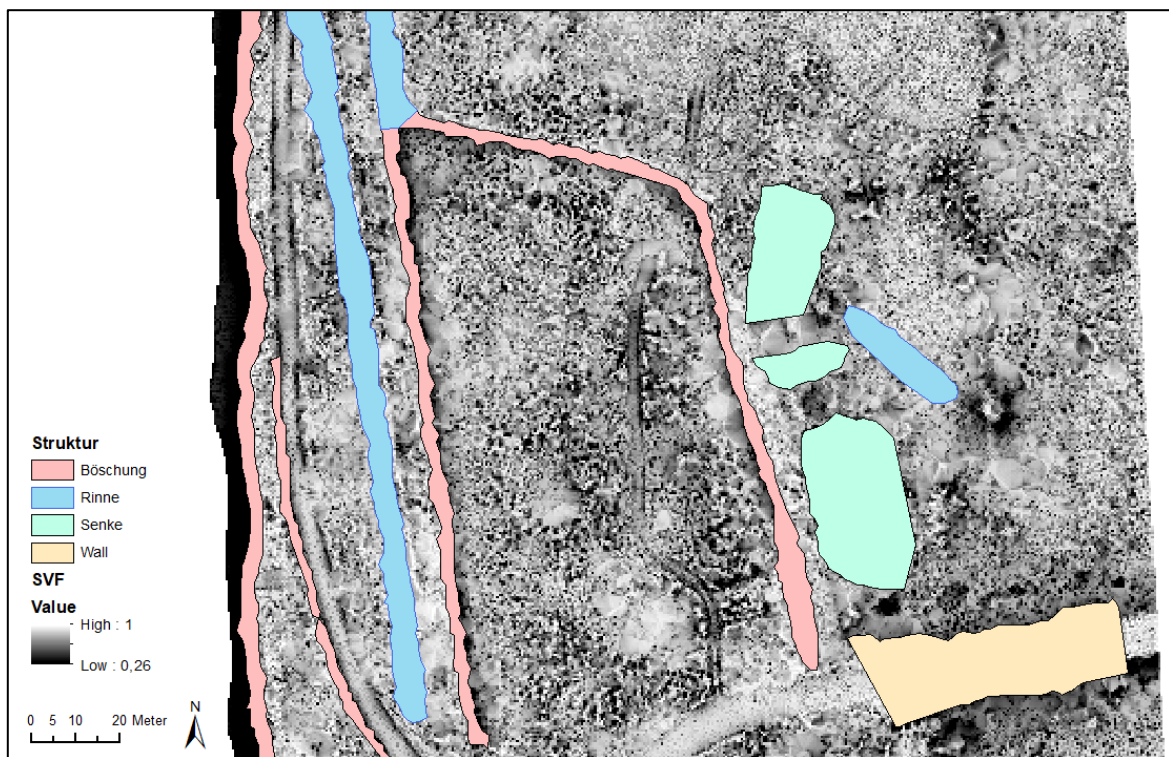


Abbildung 9-1: Manuell editierte Strukturpolygone

c) Genauigkeit der Kantenextraktion erhöhen

Des Weiteren ist zu prüfen, ob die Genauigkeit der Kantenextraktion verbessert werden kann. Zur Bewertung sind beispielhafte Geländekanten terrestrisch zu vermessen und mit den Analyseergebnissen zu vergleichen. Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse der Kantenextraktion ist die Wahl der optimalen Untersuchungsskala durch die eingestellte Größe des Berechnungsfensters sowie die Wahl des optimalen Schwellenwertes für die Profilkrümmung. So empfehlen verschiedene wissenschaftliche Publikationen die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Skalen und Schwellenwerte, um eine detailliertere Klassifikation der Kantenpixel zu erhalten (z.B. Rutzinger et al. 2007). Baruch und Filin (2008) stellen einen multiskaligen Ansatz vor, bei welchem der Krümmungsschwellenwert mittels statistischer Tests an jeden einzelnen Punkt und die jeweilige optimale Untersuchungsskala angepasst wird.

d) Detailliertere Uferklassifikation

Um die Form der Uferböschung noch detaillierter zu erfassen, könnten zusätzlich die mithilfe des in Unterabschnitt 7.1.2 vorgestellten Verfahrens extrahierten Unterkanten im Uferbereich verwendet werden. Diese markieren deutliche Änderungen der Uferneigung, wie beispielsweise die Unterkanten der stark geneigten Uferböschungen in Bereichen mit stufenförmigem Ufer. Der Steilhang des Stufenufers ist dadurch klar abgrenzbar und kann flächenhaft in seiner Ausdehnung erfasst werden.

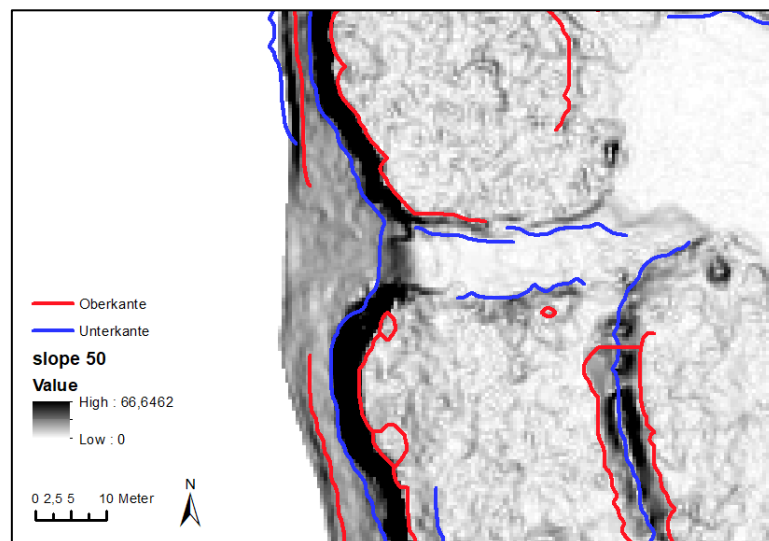


Abbildung 9-2: Unterteilung des Stufenufers durch extrahierte Unterkantensegmente

10 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, welche Potentiale hochaufgelöste Digitale Geländemodelle sowie hochaufgelöste multispektrale Luftbilddaten für die objektive und reproduzierbare Abgrenzung hydromorphologischer Strukturen bieten und welche Schritte zur Entwicklung einer automatisierten Strukturkartierung erforderlich sind. Dazu galt es zu prüfen, welche Parameter zur eindeutigen flächenhaften Abgrenzung von Ufer- und Auenstrukturen geeignet sind, sowie methodische Ansätze zu erarbeiten.

Für eine automatisierte Strukturerrfassung ist eine Klassifizierung der hydromorphologischen Strukturen nach messbaren Merkmalen erforderlich. Orientiert an bestehenden Ansätzen der Reliefklassifikation und der Bildklassifikation wurde für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit eine zweigeteilte Klassifikation durchgeführt: als vorrangig geometrisch charakterisierte Strukturklassen wurden *Böschungen*, *Wälle*, *Rinnen* und *Senken* definiert, während sich die Klassen *Auengewässer*, *Totholz*, *Bänke* und *ufernahe Sohlstrukturen* vor allem durch radiometrische Eigenschaften auszeichnen.

Um diese Strukturklassen eindeutig zu beschreiben und aus luftgestützten Fernerkundungsdaten zu erfassen, wurde die Eignung verschiedener geometrischer und radiometrischer Parameter untersucht. Hochaufgelöste multispektrale Luftbilder und hochaufgelöste DGM beinhalten vielfältige Informationen, die für die Erfassung und Abgrenzung von Gewässerstrukturen nützlich sind. Mithilfe von GIS-Tools können diverse Reliefparameter sowie radiometrische Kenngrößen berechnet und ausgewertet werden. Den Schwerpunkt legte die vorliegende Arbeit auf die geomorphometrische Erfassung hydromorphologischer Strukturen auf Basis des DGM.

Zur Visualisierung des Reliefs von Ufer- und Auenlandschaften hat sich der *Sky-View Factor* als geeignet erwiesen, welcher insbesondere abgesenkte Reliefformen wie Rinnen und Senken hervorhebt. Eine eindeutige flächenhafte Abgrenzung von Böschungen, Rinnen, Wällen und Senken ist mithilfe des Parameters *Profilkrümmung* möglich. Es wurde in Anlehnung an bestehende Verfahren zur Bruchkantenextraktion eine rasterbasierte Methodik entwickelt, welche anhand eines angepassten Schwellenwertes an stark gekrümmten Geländebereichen linienhafte Geländekanten erzeugt. Auf diese Weise können Oberkanten (konvexe Krümmung) und Unterkanten (konkave Krümmung) bestimmt werden, welche die Strukturen eindeutig in ihrer flächenhaften Ausdehnung abgrenzen. Durch Interpretation der Anordnung der verschiedenartigen Kanten werden die zugehörigen Strukturklassen identifiziert. Zukünftige Forschung könnte die Methodik der Kantenextraktion und der Identifikation der Strukturklassen weiterentwickeln und einen höheren Grad der Automatisierung erreichen. Eine Aufgabe bei der Weiterentwicklung der Methodik stellt die automatisierte Verbindung der Kantensegmente zu durchgehenden Strukturumgrenzungen dar.

Eine weitergehende Interpretation und detailliertere Klassifikation der Strukturklassen ist mithilfe zusätzlicher Informationen möglich. Der Schwerpunkt der vertiefenden Untersuchungen wurde in der vorliegenden Arbeit auf die Uferböschung gelegt, da für diese im Untersuchungsgebiet künftig starke morphologische Veränderungen erwartet werden. Für die Position der Böschungsoberkante des Ufers wird in der Literatur keine eindeutige Definition angegeben. Mithilfe der krümmungsbasierten Extraktion der Geländekanten konnte

eine objektive Verortung der Böschungsoberkante durchgeführt und durch eine Gegenüberstellung mit terrestrisch vermessenen Oberkantenpunkten in ihrer Positionierung bewertet werden. Mit einer Abweichung von im Mittel 87 cm in der Lage und 16 cm in der Höhe haben sich die Ergebnisse als plausibel erwiesen. Anschließend wurde eine Methodik entwickelt, welche die Uferböschung in regelmäßigen Abschnitten anhand ihrer mittleren *Neigung* klassifiziert. Durch die Untersuchung der Differenz zwischen mittlerer und maximaler Neigung wurden Uferbereiche mit besonderer Form, z.B. Stufenform, identifiziert. Auch hierbei kann künftige Forschung an weiterer Automatisierung arbeiten.

Auch hochaufgelöste Luftbilder bieten viele Möglichkeiten für die Kartierung hydromorphologischer Strukturen. Insbesondere multispektrale Luftbilder sind durch die Informationen über die Reflexionsintensitäten des nahen Infrarots zur Unterscheidung von Wasserflächen sowie anderen Oberflächenbedeckungen nützlich. In wissenschaftlichen Publikationen werden vorrangig Verfahren der automatischen, überwachten Bildklassifikation zur Detektion hydromorphologischer Strukturen eingesetzt, deren Anwendbarkeit für eine automatisierte Gewässerstrukturkartierung weitergehend zu prüfen ist.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass hochaufgelöste Digitale Geländemodelle und hochaufgelöste multispektrale Luftbilddaten vielversprechende Möglichkeiten bieten, um eine automatisierte Methodik zur Strukturkartierung zu entwickeln. Die Informationen, die diese Fernerkundungsdaten bereitstellen, können zur Bestimmung verschiedener Parameter genutzt werden, anhand derer Strukturen in ihrer flächenhaften Ausdehnung eindeutig abgegrenzt werden können. Eine automatisierte Strukturkartierung kann für die Erfassung des Gewässerzustandes und die Wirksamkeitskontrolle von Maßnahmen zur Gewässerentwicklung eine große Unterstützung bieten. Die Komplexität der Thematik macht jedoch umfangreiche weitere Forschung erforderlich.

Fachexpertise ist auch bei automatisierten Verfahren wichtig, insbesondere für eine fachgerechte Ausführung der Methoden sowie die Prüfung und Interpretation der Auswertungsergebnisse. Ausschlaggebend für die Erzeugung aussagekräftiger Ergebnisse ist die Anpassung der Untersuchungsskala und die Wahl geeigneter Schwellenwerte. Die Untersuchungsskala wird maßgeblich durch die Einstellung der Größe des Berechnungsfensters bei der Ermittlung geometrischer Parameter im GIS angepasst und sollte in etwa der Größe der zu erfassenden Strukturen entsprechen. Auch Schwellenwerte – etwa für die Profilkrümmung – sind an das Untersuchungsgebiet und an die Zielstrukturen anzupassen, die Formulierung allgemeingültiger Schwellenwerte ist nicht möglich.

Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. (2015): Einführung in die Geomorphologie. 5. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Albertz, J. (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, Eine Einführung in die Fernerkundung. Darmstadt: Wiss. Buchges.
- Andresen, T. (2004): Strategien zur wissensbasierten Bildanalyse hochauflösender Fernerkundungsdatensätze für das Monitoring gewässernaher Feuchtgebiete. Dissertation. Technische Universität München.
- Baruch, A.; Filin, S. (2008): Detection of subtle ridgelines from laser scanning data. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives) 37-B3a, S. 111–118.
- Bizzi, S.; Demarchi, L.; Grabowski, R. C.; Weissteiner, C. J.; van de Bund, W. (2016): The use of remote sensing to characterise hydromorphological properties of European rivers. In: Aquatic Sciences 78 (1), S. 57–70. DOI: 10.1007/s00027-015-0430-7.
- Bлага, L. (2012): Aspects regarding the significance of the curvature types and values in the studies of geomorphometry assisted by GIS. In: Analele Universității din Oradea, Seria Geografie 22 (2), S. 327–337.
- Briese, C. (2004): Breakline modelling from airborne laser scanner data. Dissertation. Technische Universität Wien.
- Briese, C.; Mandlburger, G.; Ressler, C.; Brockmann, H. (2009): Automatic break line determination for the generation of a DTM along the river Main. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives) 38 (3/W8), S. 236–241.
- Brügelmann, R. (2000): Automatic breakline detection from airborne laser range data. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives) 33 (B3).
- Brzank, A. (2008a): Bestimmung Digitaler Geländemodelle in Wattgebieten aus Laserscannerdaten. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Brzank, A.; Heipke, C.; Goepfert, J.; Soergel, U. (2008b): Aspects of generating precise digital terrain models in the Wadden Sea from lidar–water classification and structure line extraction. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63 (5), S. 510–528. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.02.002.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1999): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland, Verfahren für kleine und mittelgroße Flüsse.

- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2002): Gewässerstrukturkartierung in der Bundesrepublik Deutschland, Übersichtsverfahren.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2019): LAWA-Verfahrensempfehlung zur Gewässerstrukturkartierung, Verfahren für mittelgroße bis große Gewässer. 2. Aufl. Erfurt.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.) (2017): Konzept zur Durchführung von Erfolgskontrollen im Modellprojekt "Uferrenaturierung Kühkopf-Knoblochsau" im Rahmen der Umsetzung des Bundesprogramms "Blaues Band Deutschland". Koblenz (BfG-Bericht, 1916).
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.) (2019): Durchführung der Erfolgskontrolle und Erfassung des Istzustandes „Hydromorphologie“ im Modellprojekt „Uferrenaturierung Kühkopf-Knoblochsau“ im Rahmen der Umsetzung des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“. Koblenz (BfG-Bericht). unveröffentlicht.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG): Fotodokumentation Kühkopf-Knoblochsau 12.05.2020. Gintz, Wick.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2020): Drohneneinsatz an Wasserstraßen zur Analyse von Gewässern und Vegetation - mDRONES4rivers. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfundprojekte/mdrone4rivers.html>, zuletzt geprüft am 30.11.2020.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hg.) (2018): Bundesprogramm Blaues Band Deutschland, Eine Zukunftsperspektive für die Wasserstraßen - beschlossen vom Bundeskabinett am 1. Februar 2017.
- Burrough, P. A.; McDonnel, R. A. (1998): Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press.
- d’Andrimont, R.; Marlier, C.; Defourny, P. (2017): Hyperspatial and multi-source water body mapping: A framework to handle heterogeneities from observations and targets over large areas. In: Remote Sensing 9 (3). DOI: 10.3390/rs9030211.
- Demarchi, L.; Bizzi, S.; Piégay, H. (2016): Hierarchical object-based mapping of riverscape units and in-stream mesohabitats using LiDAR and VHR Imagery. In: Remote Sensing 8 (2), S. 97. DOI: 10.3390/rs8020097.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2015): Grundlagen morphodynamischer Phänomene in Fließgewässern. August 2015. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA-Merkblatt, M 526).

- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2018a): Begriffe aus der Gewässerunterhaltung und Gewässerentwicklung. Juni 2018. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA-Regelwerk, M 600).
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2018b): Begriffe aus Gewässermorphodynamik und Flussbau. August 2018. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA-Regelwerk, M 570).
- Dikau, R.; Eibisch, K.; Eichel, J.; Meßenzehl, K.; Schlummer-Held, M. (2019): Geomorphologie. Berlin: Springer Spektrum.
- Doneus, M.; Miholjek, I.; Mandlbürger, G.; Doneus, N.; Verhoeven, G.; Briese, C.; Pregesbauer, M. (2015): Airborne laser bathymetry for documentation of submerged archaeological sites in shallow water. In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W5, S. 99–107. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-99-2015.
- Energie Burgenland Dienstleistung und Technik GmbH (2020): Technischer Bericht, Projekt: ALS-Befliegung mDRONES4rivers. unveröffentlicht.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2016a): Funktionsweise des Werkzeugs "Ausrichtung". Online verfügbar unter <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>, zuletzt geprüft am 09.12.2020.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2016b): Funktionsweise des Werkzeugs "Neigung". Online verfügbar unter <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>, zuletzt geprüft am 09.12.2020.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2019): ArcGIS Desktop. Version 10.7.1. Redlands, Canada. Online verfügbar unter <https://desktop.arcgis.com/de/>.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2020): Curvature. Online verfügbar unter <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>, zuletzt geprüft am 30.11.2020.
- Ferreira, M. (2014): Transect2.0 Toolbox. Online verfügbar unter <https://web.archive.org/web/20161229230139/http://gis4ge>.
- Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH (WBWF); Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hg.) (2015): Gewässerrandstreifen in Baden-Württemberg, Anforderungen und praktische Umsetzung. Karlsruhe.

- Freedden, Willi; Rummel, Reiner (Hg.) (2016): Photogrammetrie und Fernerkundung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Handbuch der Geodäsie).
- Fricke, K.; Baschek, B.; Asgari, M.; Bongartz, J.; Burkart, A.; Dzunic, F.; Heuner, M.; Jenal, A.; Kneer, C.; Mölter, T.; Näthe, P.; Quick, I.; Rock, G.; Rommel, E.; Schröder, U.; Weber, I.; Wick, S. (2019): Modern sensors and airborne remote sensing for the mapping of vegetation and hydromorphology along Federal waterways in Germany. AGU Fall Meeting. San Francisco, 2019.
- Geocoptix GmbH (2019): Processing Report - 20191015 Kühkopf-Knoblochsau. unveröffentlicht.
- Geocoptix GmbH (2020): Processing Report - 20200707_KK (PH). unveröffentlicht.
- WHG vom 31.07.2009: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz). Fundstelle: BGBl. I S. 2585.
- Gomes Pereira, L. M.; Wicherson, R. J. (1999): Suitability of laser data for deriving geographical information, A case study in the context of management of fluvial zones. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (2-3), S. 105–114.
- GRASS Development Team (2020a): Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Version 7.8.3: Open Source Geospatial Foundation. Online verfügbar unter <http://grass.osgeo.org>.
- GRASS Development Team (2020b): r.slope.aspect. GRASS GIS 7.8.5dev Reference Manual. Online verfügbar unter <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.slope.aspect.html>, zuletzt geprüft am 08.12.2020.
- Haralick, R. M.; Shanmugam, K.; Dinstein, I. (1973): Textural features for image classification. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-3 (6), S. 610–621.
- Höfle, B.; Griesbaum, L.; Forbriger, M. (2013): GIS-Based detection of gullies in terrestrial LiDAR data of the Cerro Llamoca Peatland (Peru). In: Remote Sensing 5 (11), S. 5851–5870. DOI: 10.3390/rs5115851.
- Höfle, B.; Vetter, M.; Pfeifer, N.; Mandlbürger, G.; Stötter, J. (2009): Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. In: Earth Surface Processes and Landforms 34 (12), S. 1635–1649. DOI: 10.1002/esp.1853.
- Horn, B. K. P. (1981): Hill shading and the reflectance map. In: Proceedings of the IEEE 69 (1), S. 14–47.
- Kern, K. (1995): Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung, Geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern. Nachdruck. Berlin: Springer.

- Knehtl, M.; Petkovska, V.; Urbanič, G. (2018): Is it time to eliminate field surveys from hydromorphological assessments of rivers? - Comparison between a field survey and a remote sensing approach. In: *Ecohydrology* 11 (2), e1924. DOI: 10.1002/eco.1924.
- Kokalj, Ž.; Zakšek, K.; Oštir, K. (2011): Application of sky-view factor for the visualisation of historic landscape features in lidar-derived relief models. In: *Antiquity* 85 (327), S. 263–273. DOI: 10.1017/S0003598X00067594.
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) (Hg.): Hangneigung. Online verfügbar unter https://www.lgb-rlp.de/fileadmin/service/lgb_downloads/boden/bfd5w_methodenbeschriebe/bfd5w_neigung.pdf, zuletzt geprüft am 07.12.2020.
- Lange, N. de (2020): *Geoinformatik in Theorie und Praxis, Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung*. 4. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Leckie, D. G.; Cloney, E.; Jay, C.; Paradine, D. (2005): Automated mapping of stream features with high-resolution multispectral imagery: An example of capabilities. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71 (2), S. 145–155.
- Legleiter, C. J. (2012): Remote measurement of river morphology via fusion of LiDAR topography and spectrally based bathymetry. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 37 (5), S. 499–518. DOI: 10.1002/esp.2262.
- Mandlbürger, G.; Höfle, B.; Briese, C.; Ressler, C.; Otepka, J.; Hollaus, M.; Pfeifer, N. (2009): Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 61 (7-8), S. 89–97. DOI: 10.1007/s00506-009-0095-3.
- Mandlbürger, G.; Otepka, J.; Briese, C.; Mücke, W.; Summer, G.; Pfeifer, N.; Baltrusch, S.; Dorn, C.; Brockmann, H. (2016): Automatische Ableitung von Strukturlinien aus 3D-Punktwolken. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.* 25, S. 131–142.
- Marcus, W. A. (2002): Mapping of stream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. In: *Journal of Geographical Systems* 4, S. 113–126.
- Marcus, W. A.; Legleiter, C. J.; Aspinall, R. J.; Boardman, J. W.; Crabtree, R. L. (2003): High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams. In: *Geomorphology* 55 (1), S. 363–380. DOI: 10.1016/S0169-555X(03)00150-8.
- Maukisch, M.; Stötter, J.; Petrini-Monteferrri, F.; Rutzinger, M. (2007): Algorithms for the extraction of lineaments from airborne laser scanning data. Hg. v. Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung.

- McFeeters, S. K. (1996): The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. In: *International Journal of Remote Sensing* 17 (7), S. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
- MicaSense Inc. (2018): The RedEdge-MX Sensor, Data Sheet. Online verfügbar unter <https://micasense.com/rededge-mx/>.
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) (Hg.) (2010): Blaue Richtlinie, Richtlinie für die Entwicklung naturnaher Fließgewässer in Nordrhein-Westfalen. Ausbau und Unterhaltung. Düsseldorf.
- Mott, C. (2005): Objektorientierte Klassifikationsstrategien zur Erfassung der Landnutzung aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten. Dissertation. Technische Universität München.
- Nyffeler, J. (2018): Kulturlandschaft in neuem Licht, Eine Einführung zu LiDAR in der Archäologie. Hg. v. Institut für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften. Otto-Friedrich-Universität Bamberg.
- Penck, A. (1894a): *Morphologie der Erdoberfläche, Erster Teil*. Stuttgart: Engelhorn.
- Penck, A. (1894b): *Morphologie der Erdoberfläche, Zweiter Teil*. Stuttgart: Engelhorn.
- Pfeifer, N.; Mandlbürger, G.; Glira, P. (2016): Laserscanning. In: Willi Freeden und Reiner Rummel (Hg.): *Handbuch der Geodäsie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 431–481.
- Pike, R. J.; Evans, I. S.; Hengl, T. (2009): Geomorphometry: A Brief Guide. In: *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*, Bd. 33: Elsevier (Developments in Soil Science), S. 3–30.
- Pottgiesser, T. (2018): Die deutsche Fließgewässertypologie, Zweite Überarbeitung der Steckbriefe der Fließgewässertypen. Begleittext. Hg. v. Umweltbundesamt.
- Pottgiesser, T.; Sommerhäuser, M. (2008): Aktualisierung der Steckbriefe der bundesdeutschen Fließgewässertypen (Teil A) und Ergänzung der Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen um typspezifische Referenzbedingungen und Bewertungsverfahren aller Qualitätselemente (Teil B), Begleittext. Hg. v. Umweltbundesamt.
- Quick, I.; König, F.; Baulig, Y.; Borgsmüller, C.; Schriever, S. (2017): Das hydromorphologische Erfassungs- und Bewertungsverfahren Valmorph 2 für schiffbare Oberflächen-gewässer. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz (BfG-Bericht, Nr. 1910).
- Rasemann, S. (2003): Geomorphometrische Struktur eines mesoskaligen alpinen Geosystems. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.

- Richards, J. A.; Jia, X. (2006): Remote sensing digital image analysis, An introduction. Berlin: Springer.
- WRRL vom 23.10.2000: Richtlinie 2000/60/EG des europäischen und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie). Fundstelle: ABl. L 327.
- Roelens, J.; Höfle, B.; Dondeyne, S.; van Orshoven, J.; Diels, J. (2018): Drainage ditch extraction from airborne LiDAR point clouds. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 146, S. 409–420. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.10.014.
- 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, S. 33–42. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2012.00453.x.
- Rutzinger, M.; Maukisch, M.; Petrini-Monteferrri, F.; Stötter, J. (2007): Development of algorithms for the extraction of linear patterns (lineaments) from airborne laser scanning data. In: Proceedings of the Conference "Geomorphology for the Future". Obergurgl.
- Ryherd, S.; Woodcock, C. (1996): Combining spectral and texture data in the segmentation of remotely sensed images. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62 (2), S. 181–194.
- Spada, D.; Molinari, P.; Bertoldi, W.; Vitti, A.; Zolezzi, G. (2018): Multi-temporal image analysis for fluvial morphological characterization with application to Albanian rivers. In: ISPRS International Journal of Geo-Information 7 (8), S. 314. DOI: 10.3390/ijgi7080314.
- Tang, T. (2000): Slope profile analysis and classification on limestone residual hills in Guilin, China. In: Middle States Geographer 33, S. 40–53.
- Tarolli, P.; Dalla Fontana, G. (2009): Hillslope-to-valley transition morphology: New opportunities from high resolution DTMs. In: Geomorphology 113 (1-2), S. 47–56. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.02.006.
- umweltbüro essen (2016): Gewässertypen Deutschlands, Karte der LAWA-Fließgewässertypen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Warren, S. D.; Hohmann, M. G.; Auerswald, K.; Mitasova, H. (2004): An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. In: CATENA 58 (3), S. 215–233. DOI: 10.1016/j.catena.2004.05.001.
- WG vom 03.12.2013: Wassergesetz für Baden-Württemberg. Fundstelle: GBl. 2013, 389.
- Wood, J. (1996): The geomorphological characterisation of digital elevation models. Dissertation. University of Leicester.

- Work, E. A.; Gilmer, D. S. (1976): Utilization of satellite data for inventorying prairie ponds and lakes. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 42 (5), S. 685–694.
- WSA Oberrhein (2020): Stammdaten Pegel Niestein-Oppenheim, Pegelonline. Online verfügbar unter <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=23900600>, zuletzt geprüft am 12.05.2020.
- Xu, H. (2006): Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. In: *International Journal of Remote Sensing* 27 (14), S. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
- Zakšek, K.; Oštir, K.; Kokalj, Ž. (2011): Sky-view factor as a relief visualization technique. In: *Remote Sensing* 3 (2), S. 398–415. DOI: 10.3390/rs3020398.
- Zevenbergen, L. W.; Thorne, C. R. (1987): Quantitative analysis of land surface topography. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 12, S. 47–56.
- Zillmann, E. (1999): Versuch der Lokalisierung und Interpretation von Feldheterogenitäten anhand von optischen Satellitenaufnahmen. Diplomarbeit. Technische Universität Berlin.

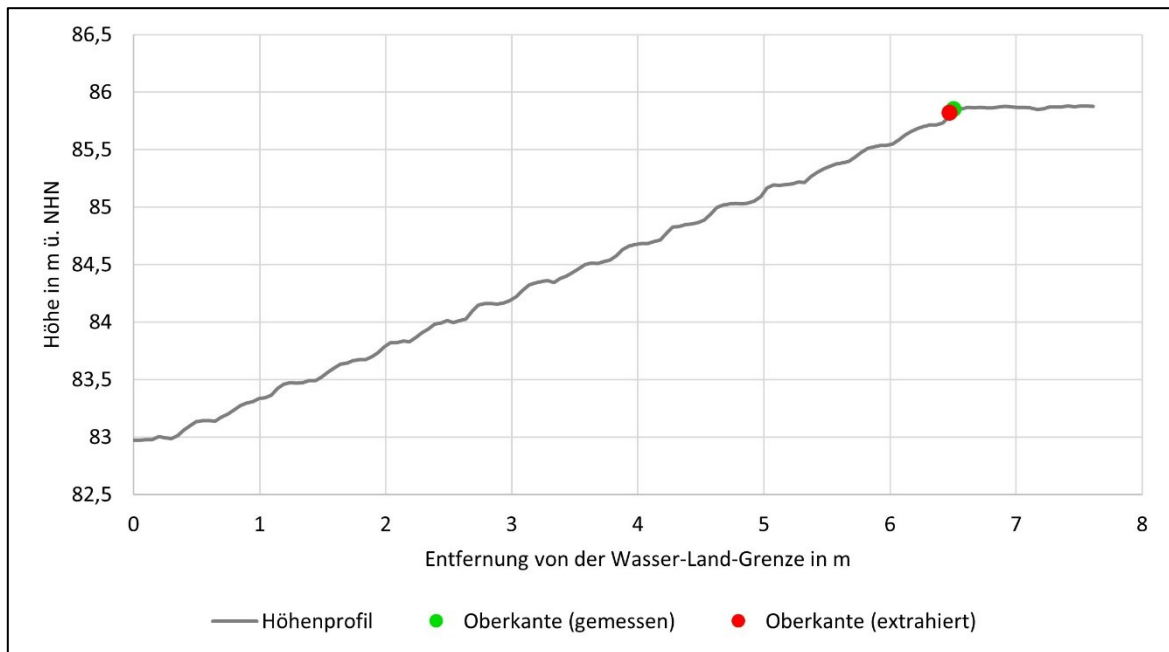
Anhang

Anlage 1:	Standorte der Geländevermessung	97
Anlage 2:	Uferschnitte zur Qualitätskontrolle der extrahierten Böschungsoberkante	98
Anlage 3:	Ergebnisse der Extraktion der Geländekanten	102
Anlage 4:	Klassifikation der Uferböschung nach mittlerer Neigung	108
Anlage 5:	Klassifikation der Uferböschung nach maximaler Neigung	112

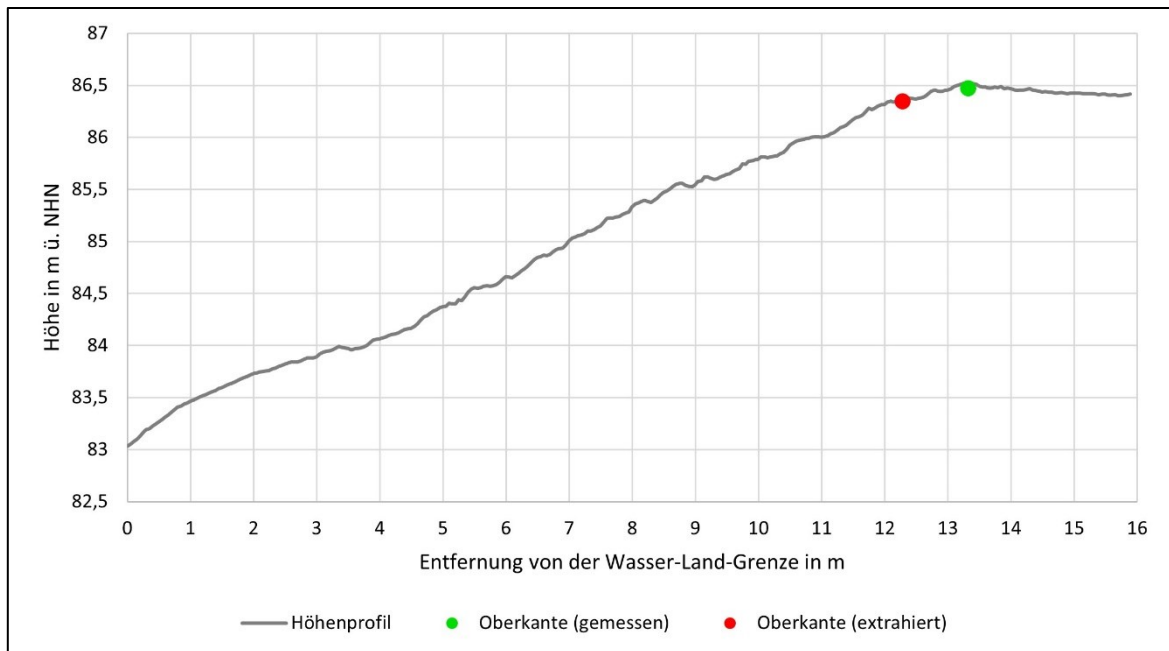
Anlage 1: Standorte der Geländevermessung



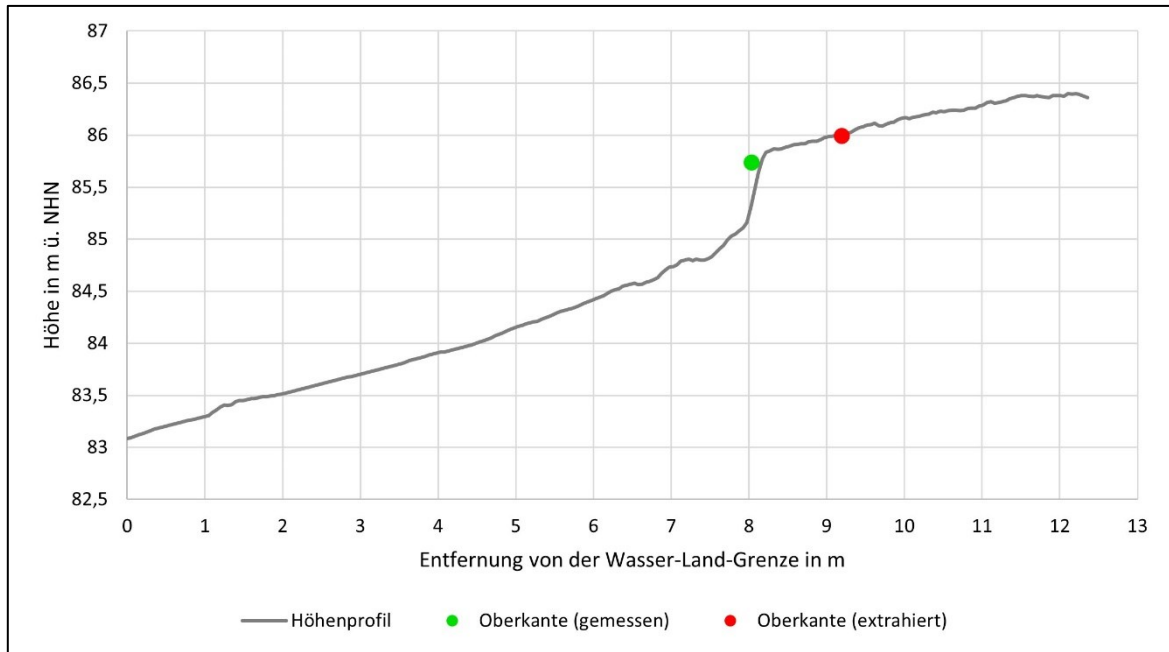
Anlage 2: Uferschnitte zur Qualitätskontrolle der extrahierten Böschungsoberkante



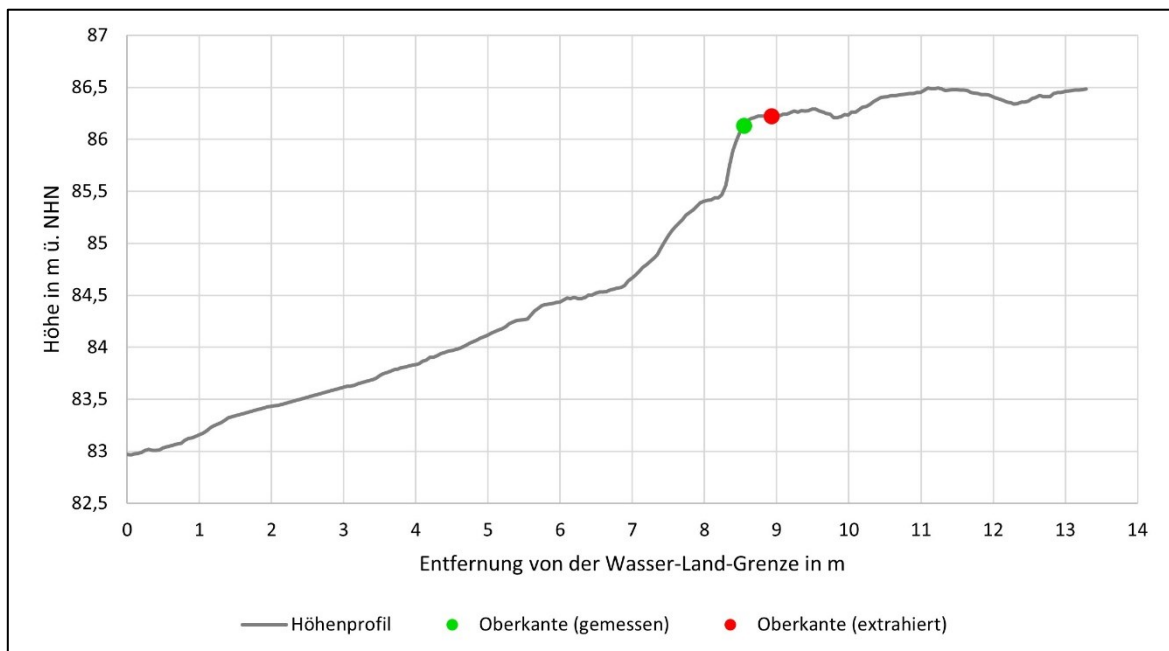
Anlage 3-1: Uferschnitt 1, Rhein-km 476,4



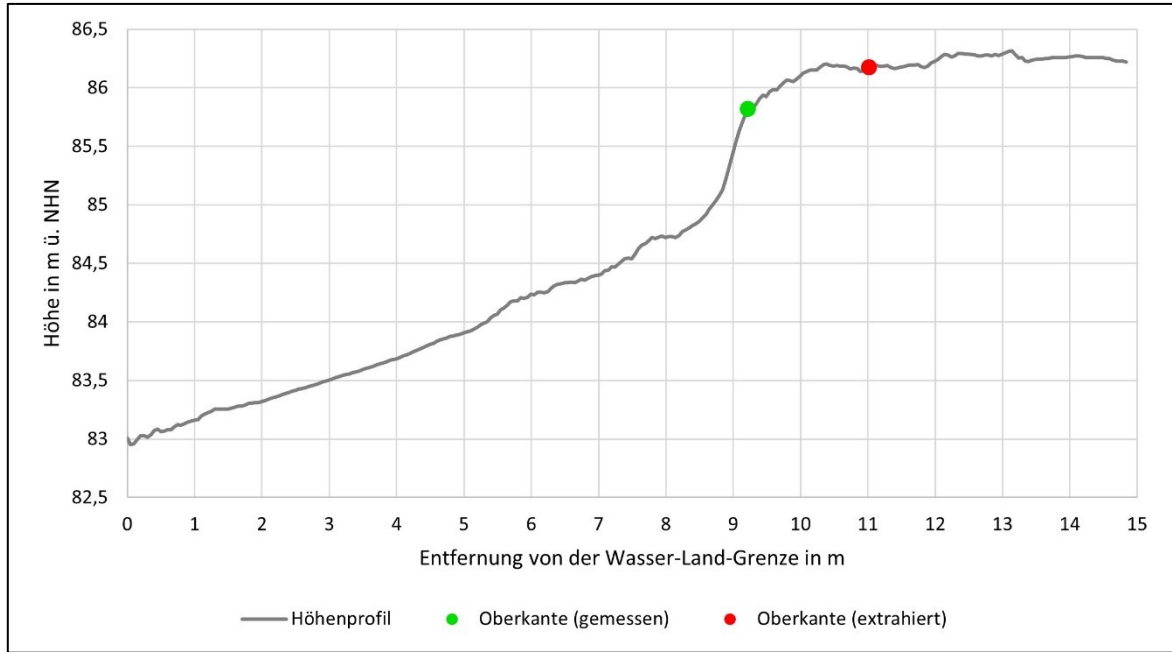
Anlage 3-2: Uferschnitt 2, Rhein-km 476,3



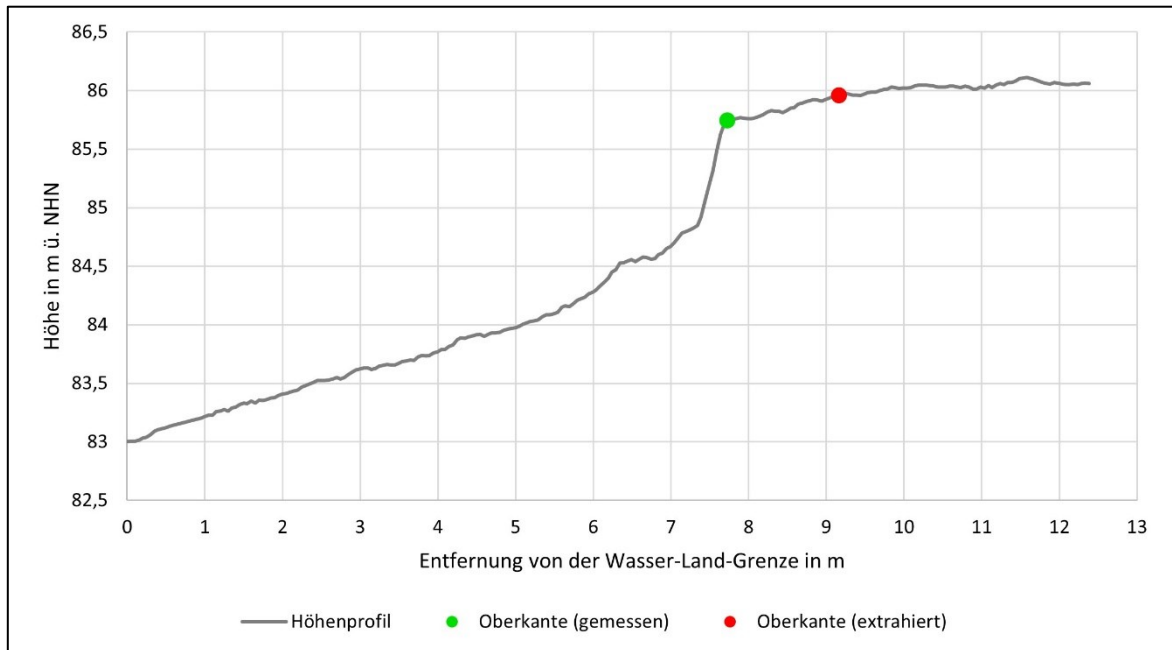
Anlage 3-3: Uferschnitt 3, Rhein-km 476,25



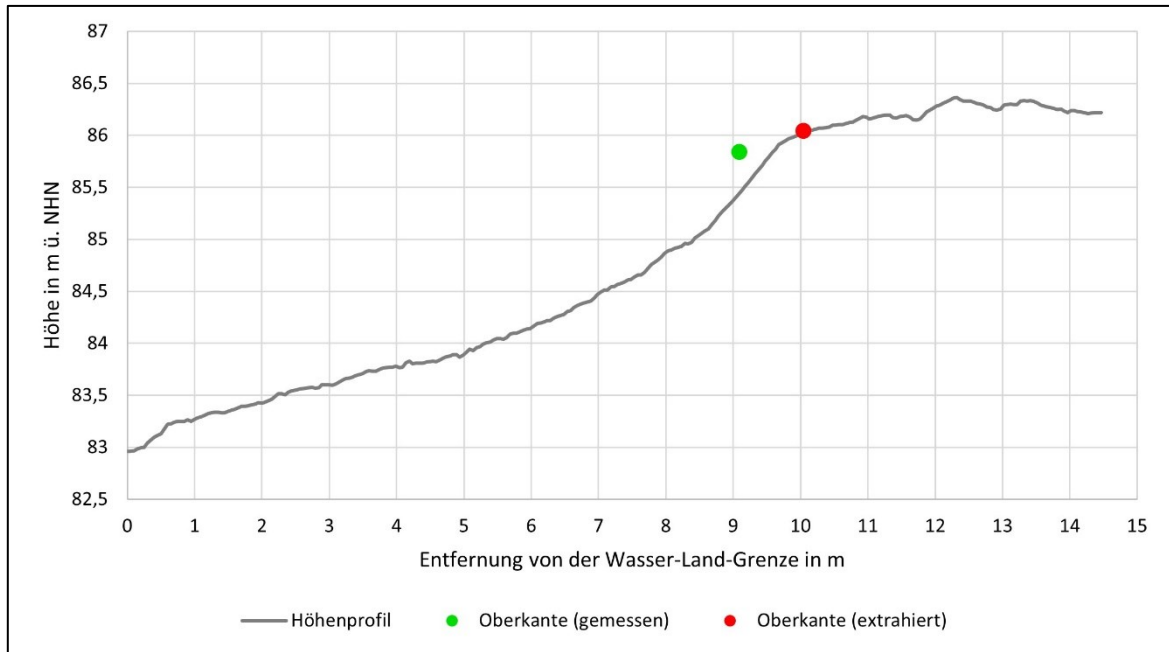
Anlage 3-4: Uferschnitt 4, Rhein-km 476,25



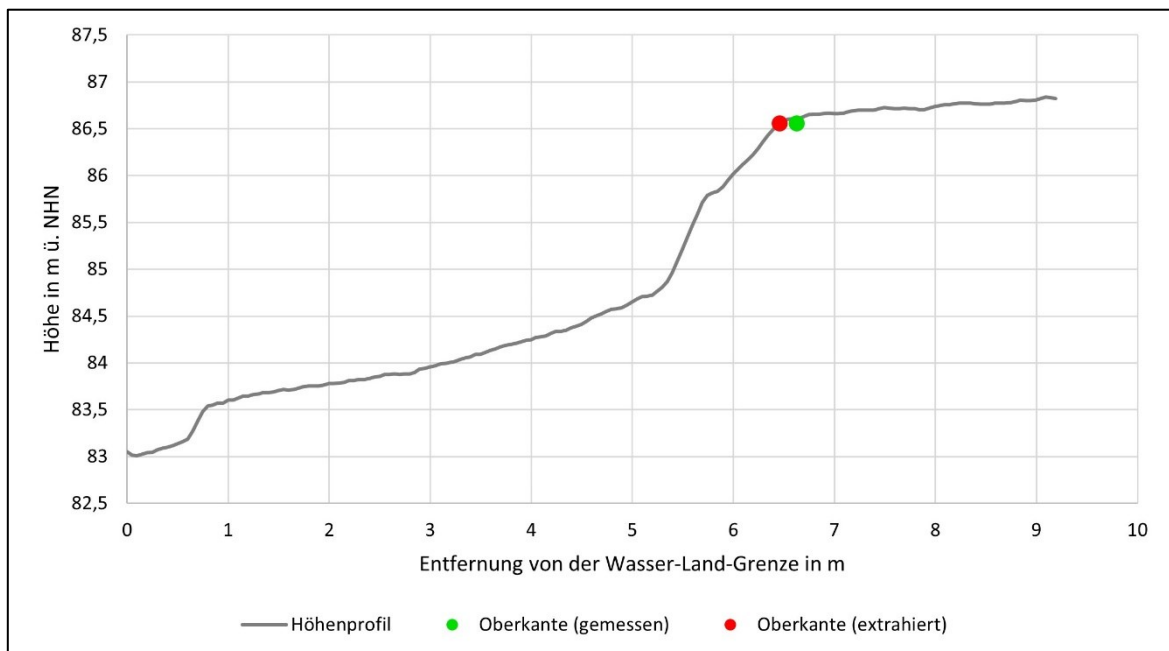
Anlage 3-5: Uferschnitt 5, Rhein-km 476,2



Anlage 3-6: Uferschnitt 6, Rhein-km 476,1

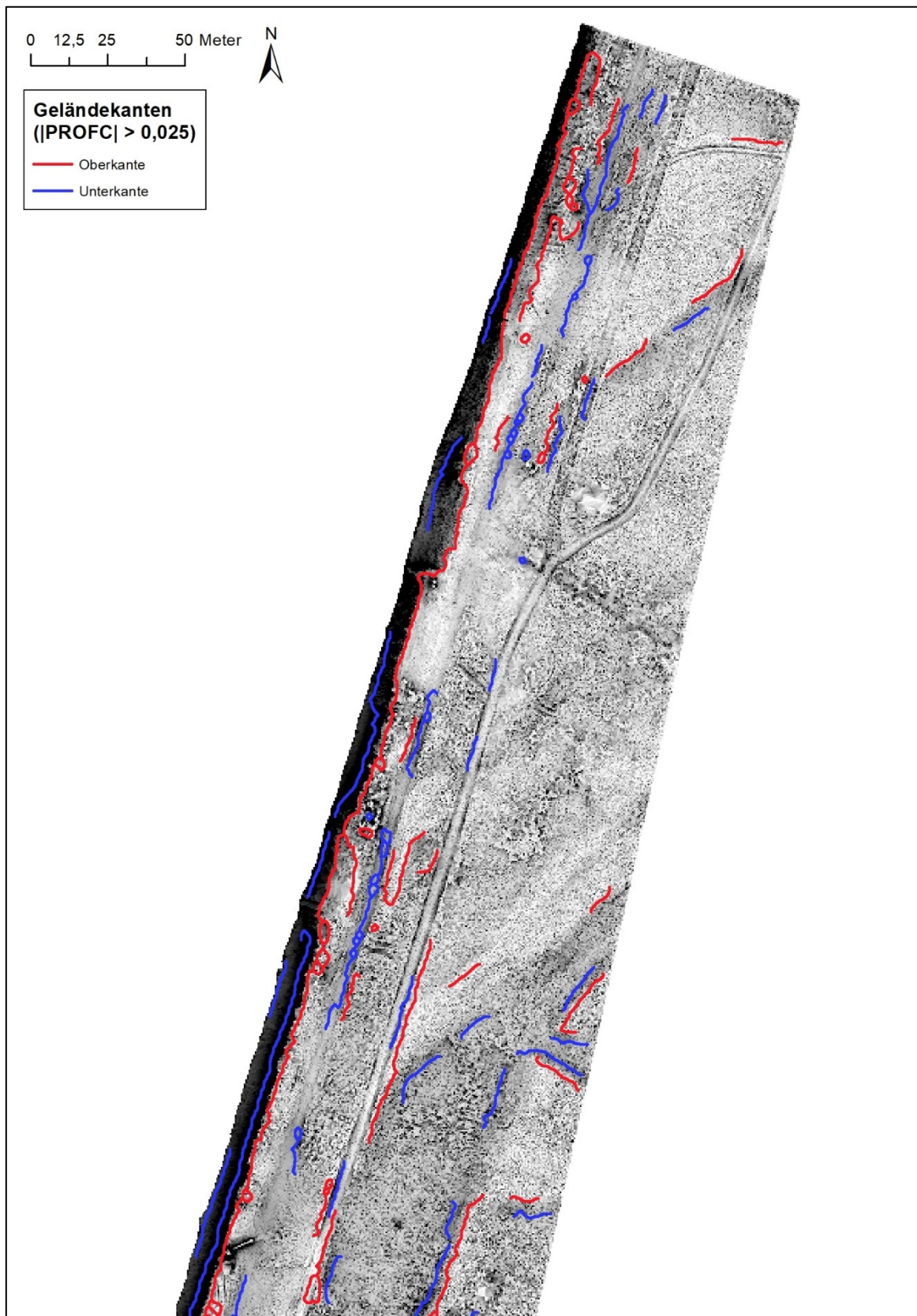


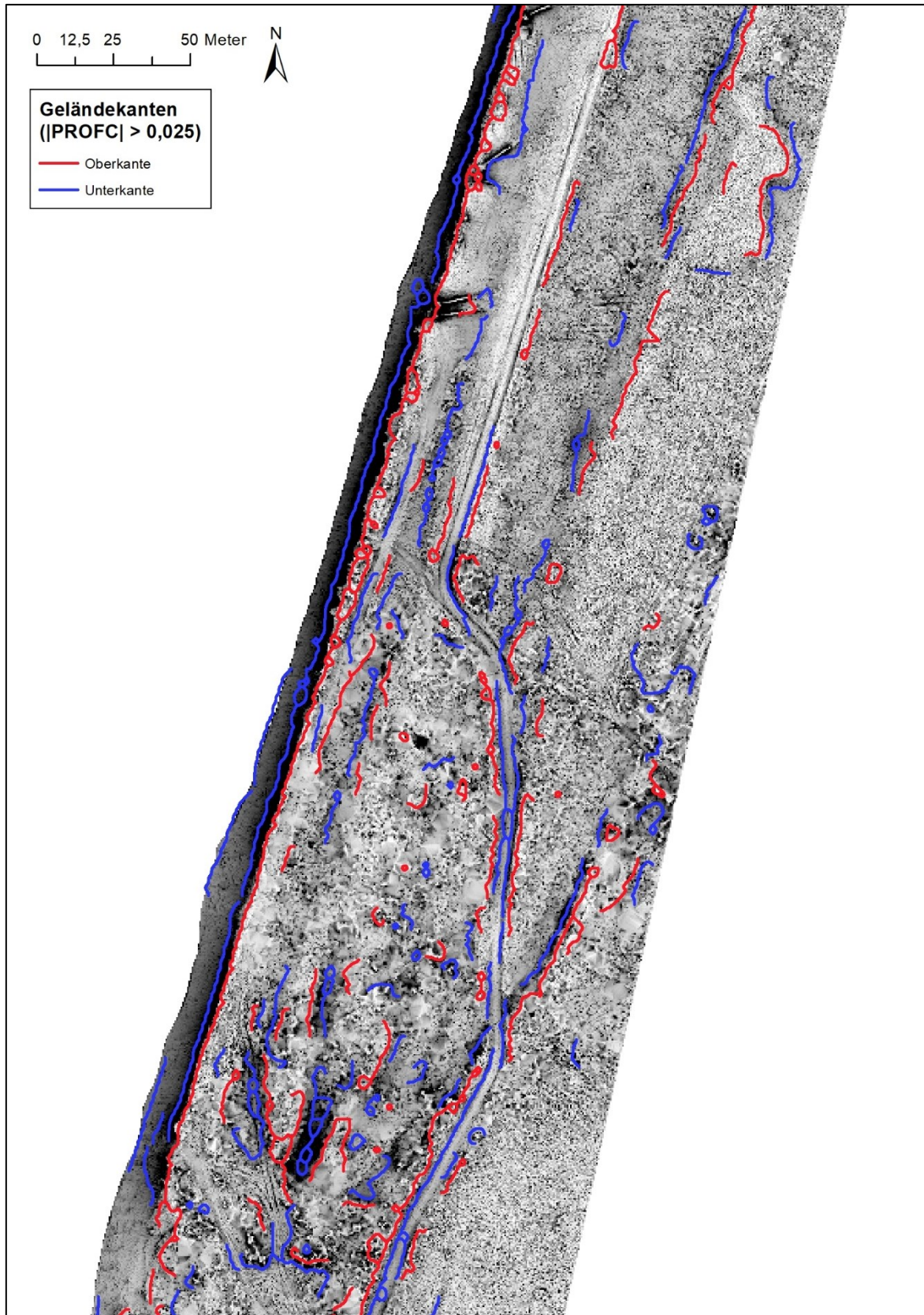
Anlage 3-7: Uferschnitt 7, Rhein-km 475,95

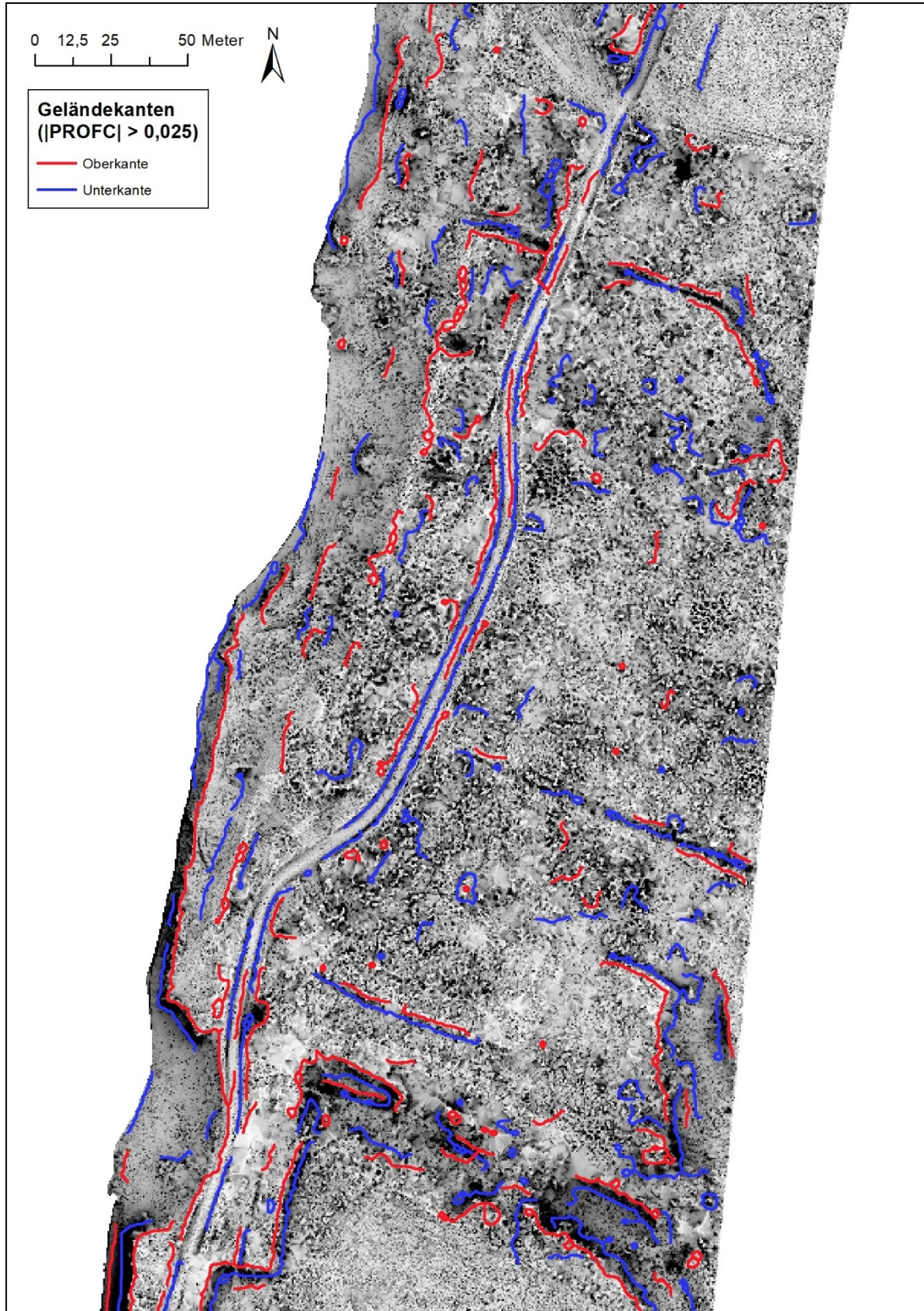


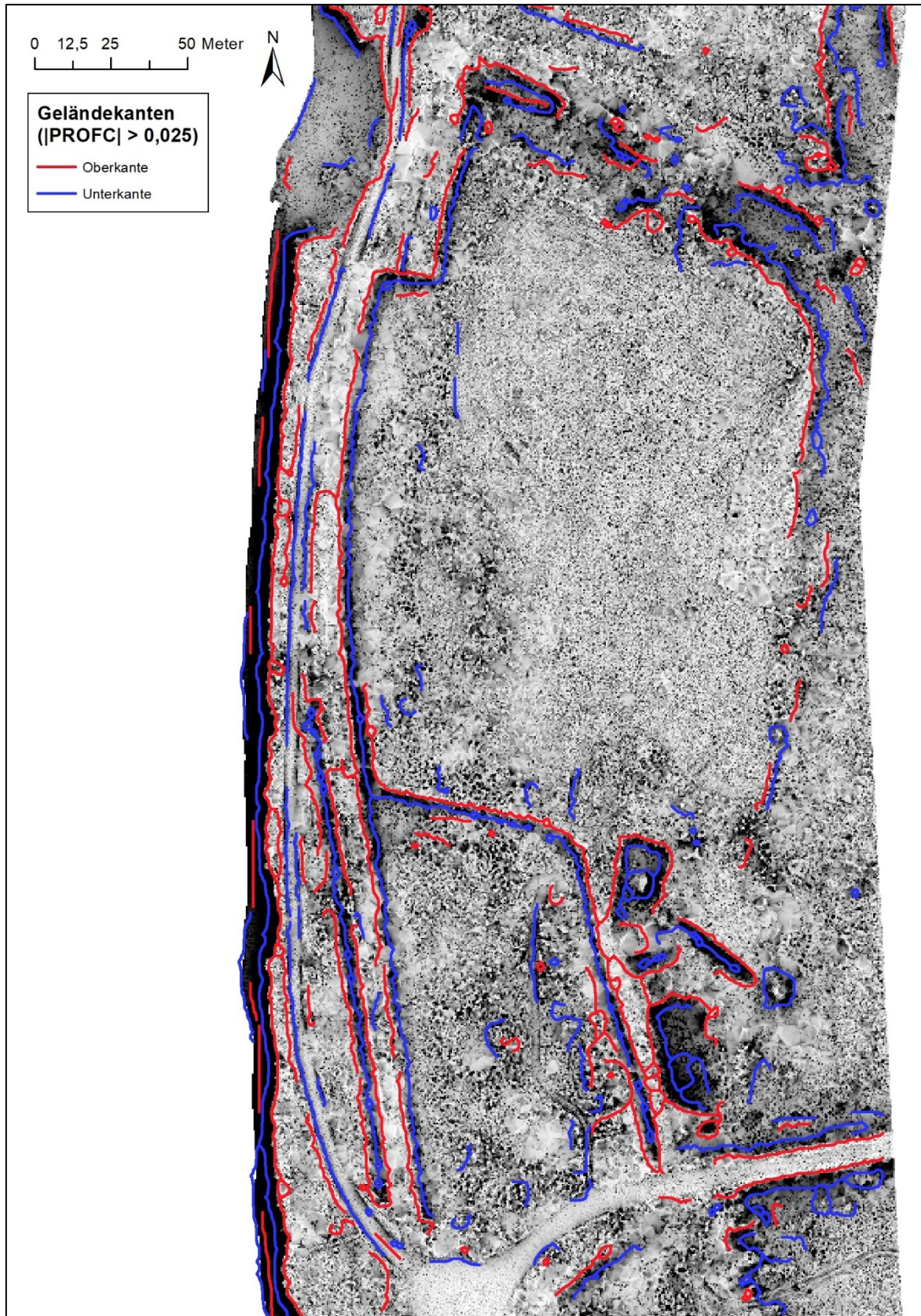
Anlage 3-8: Uferschnitt 8, Rhein-km 475,0

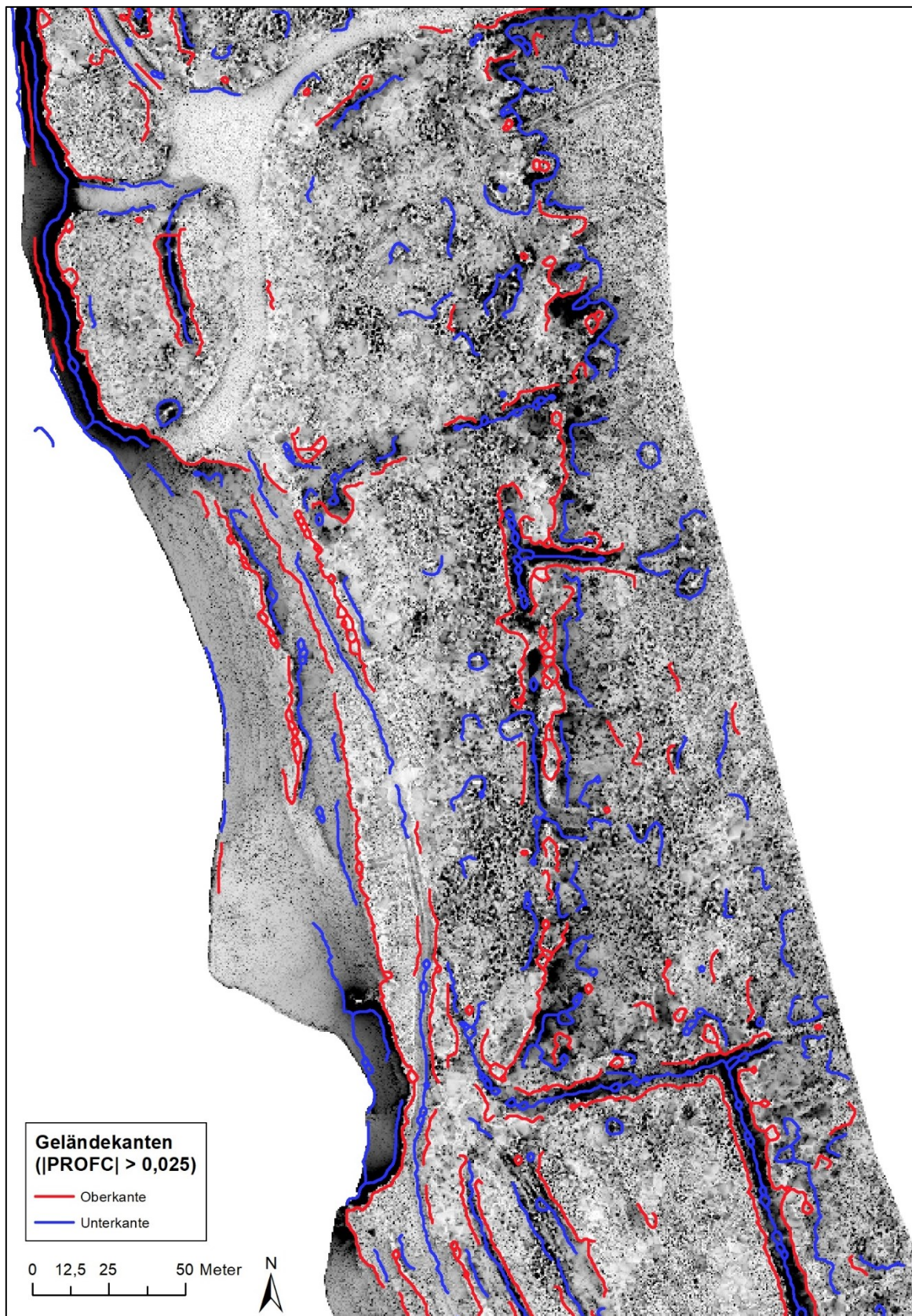
Anlage 3: Ergebnisse der Extraktion der Geländekanten

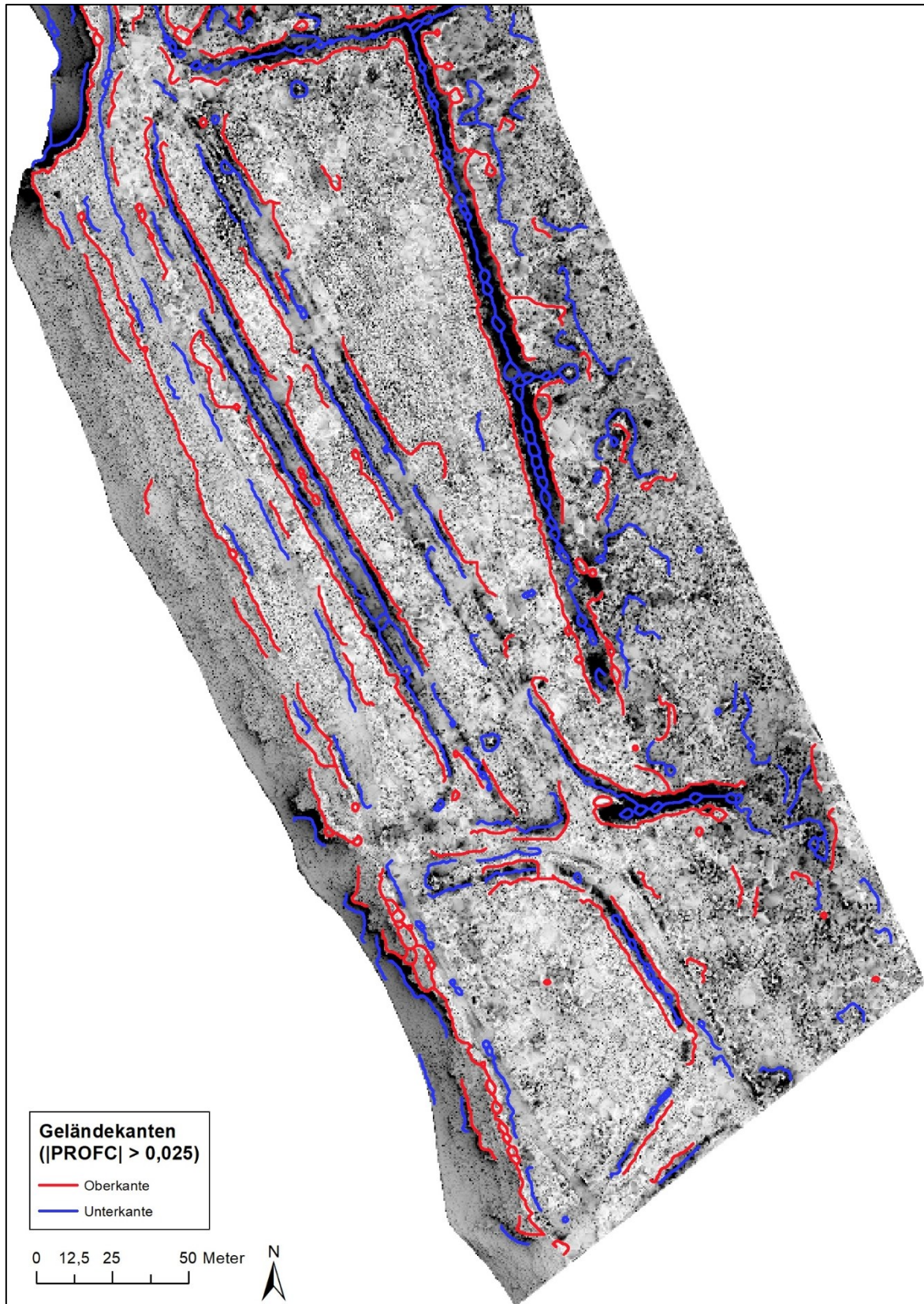




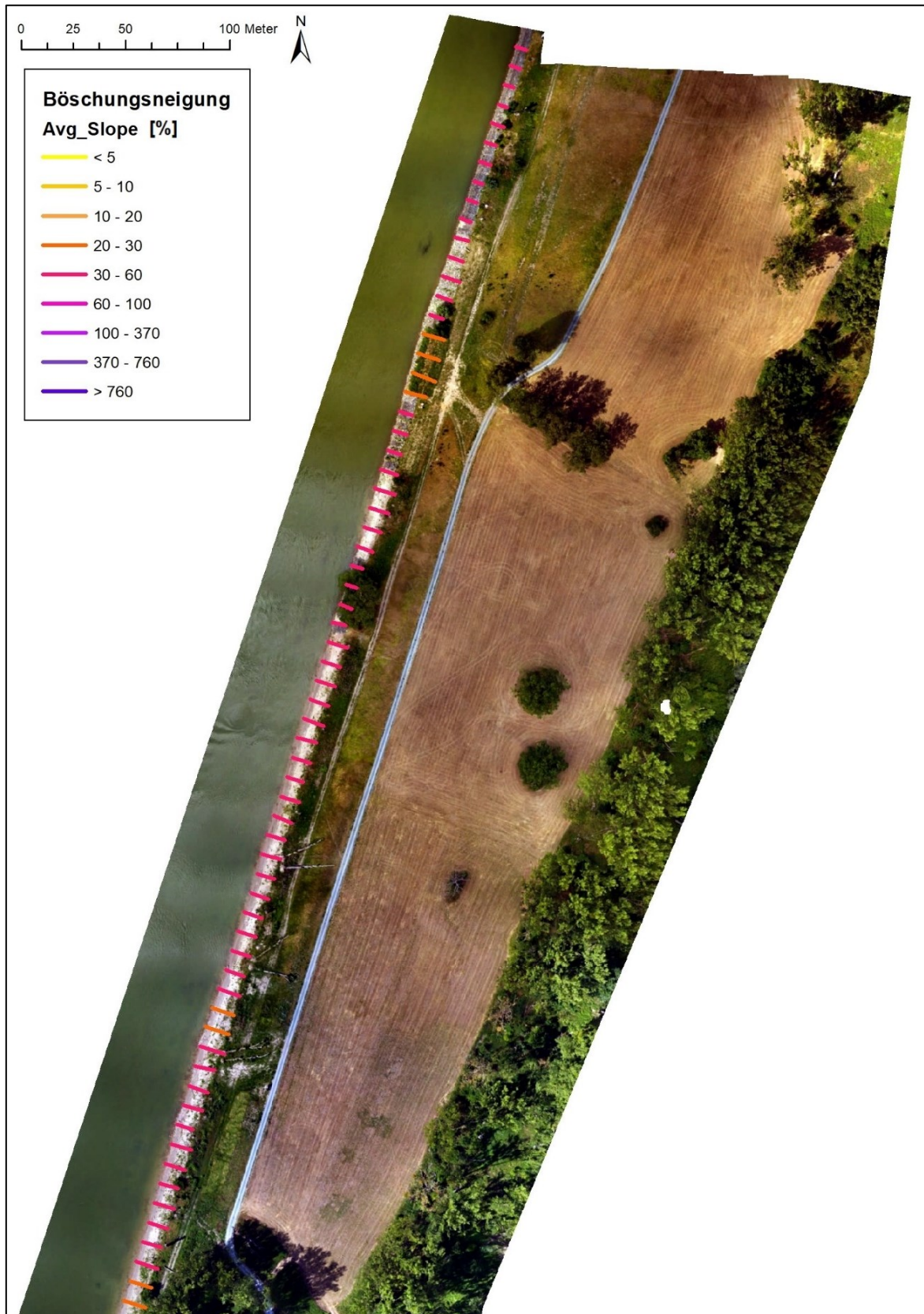


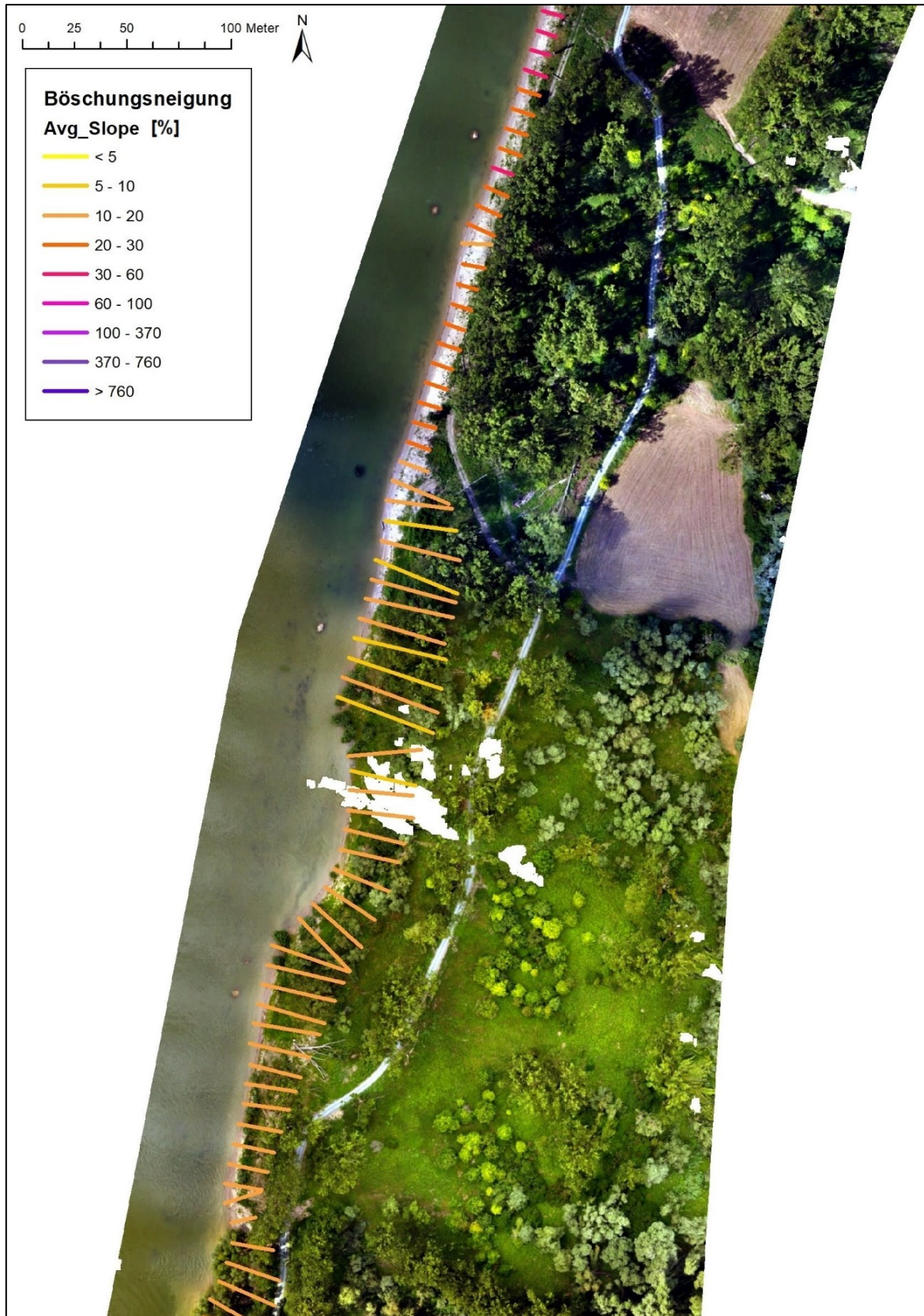


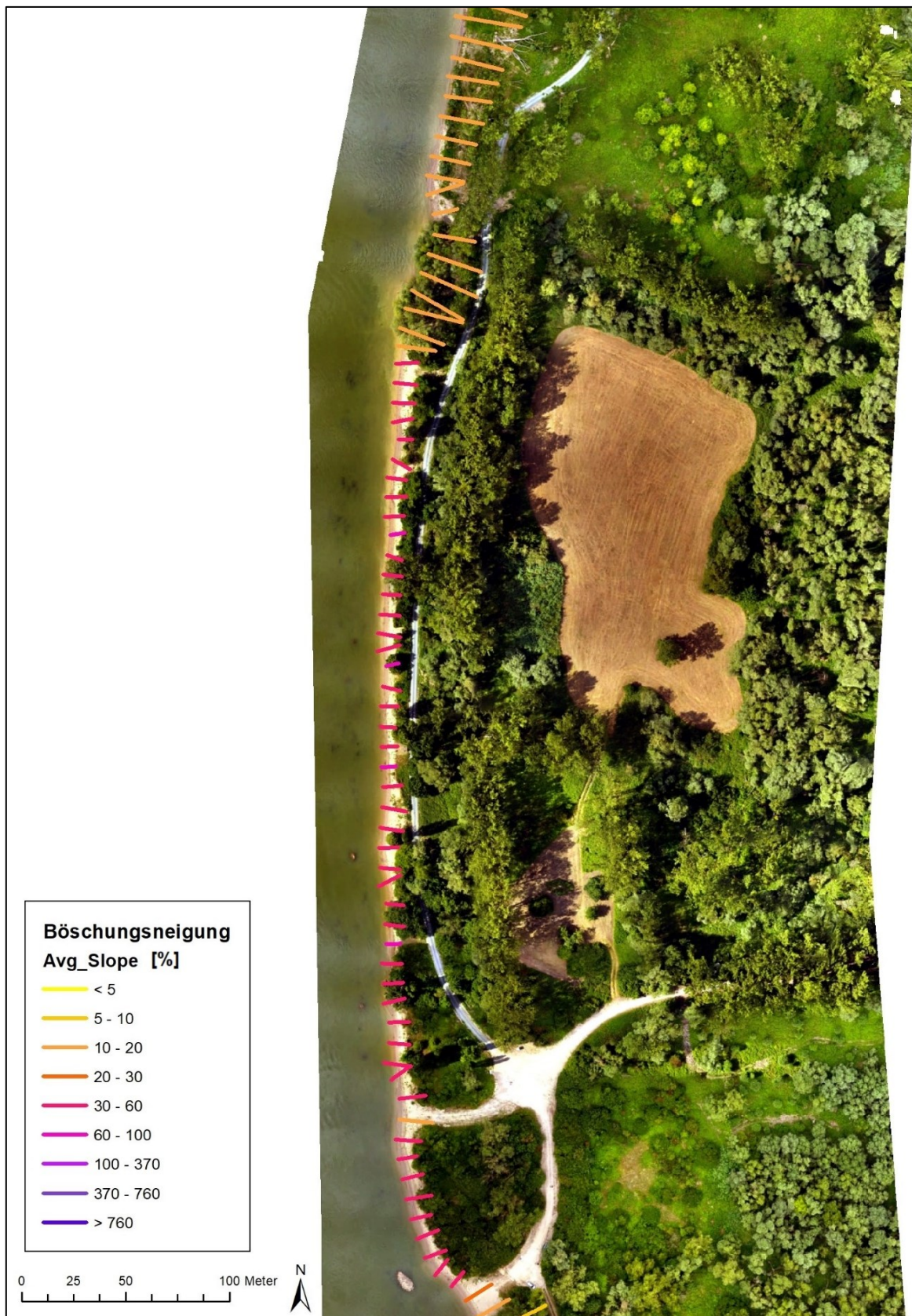




Anlage 4: Klassifikation der Uferböschung nach mittlerer Neigung

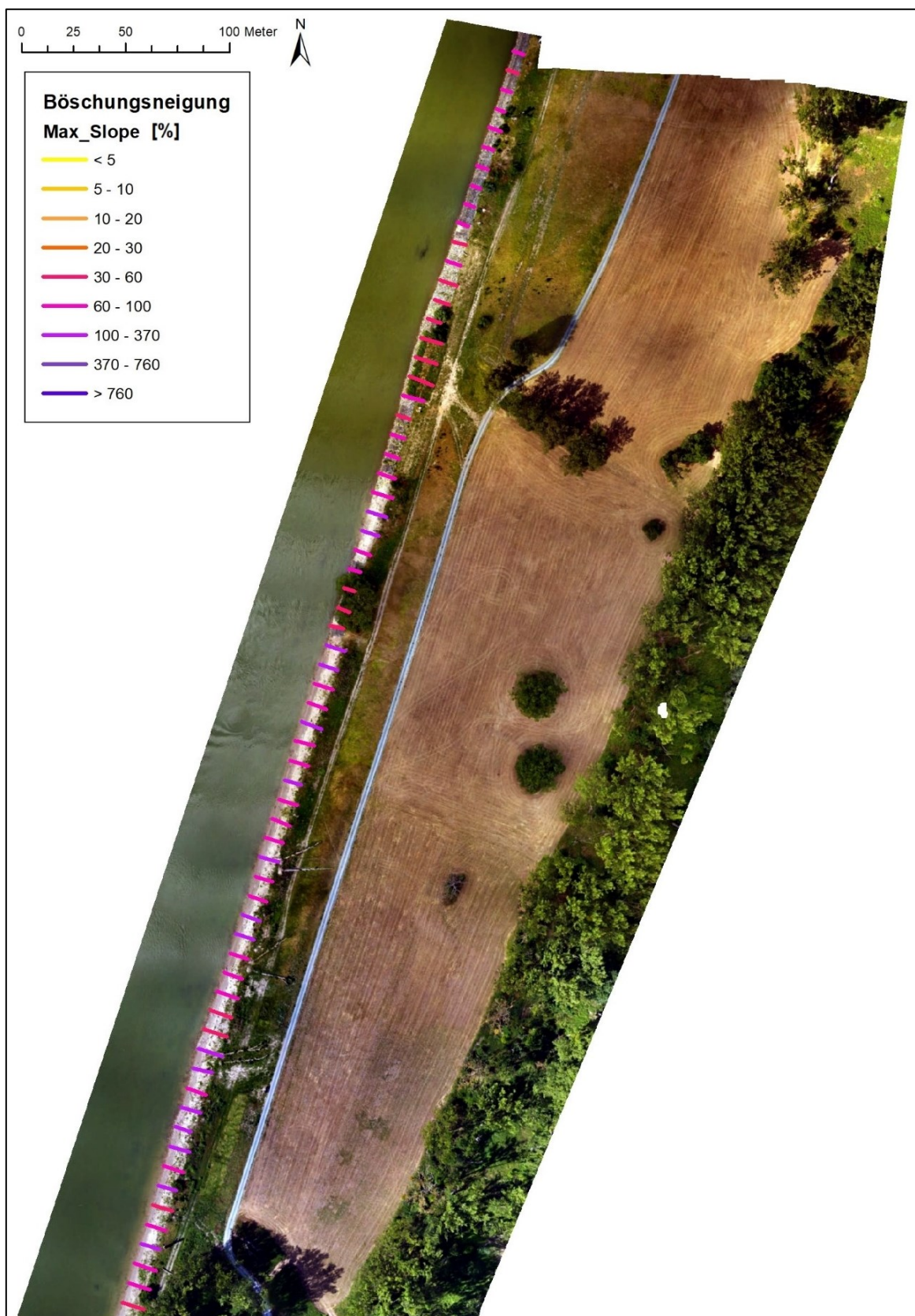


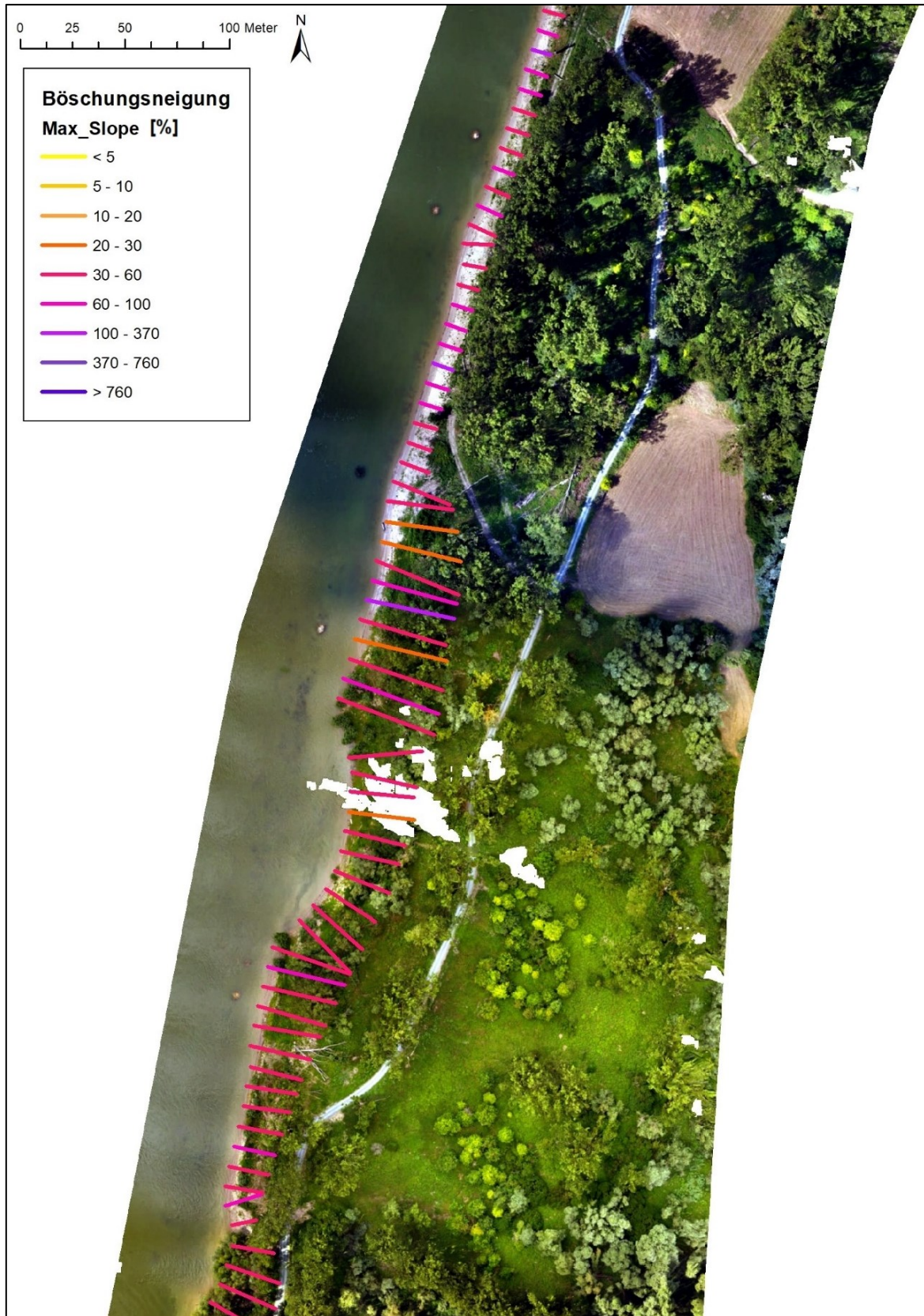


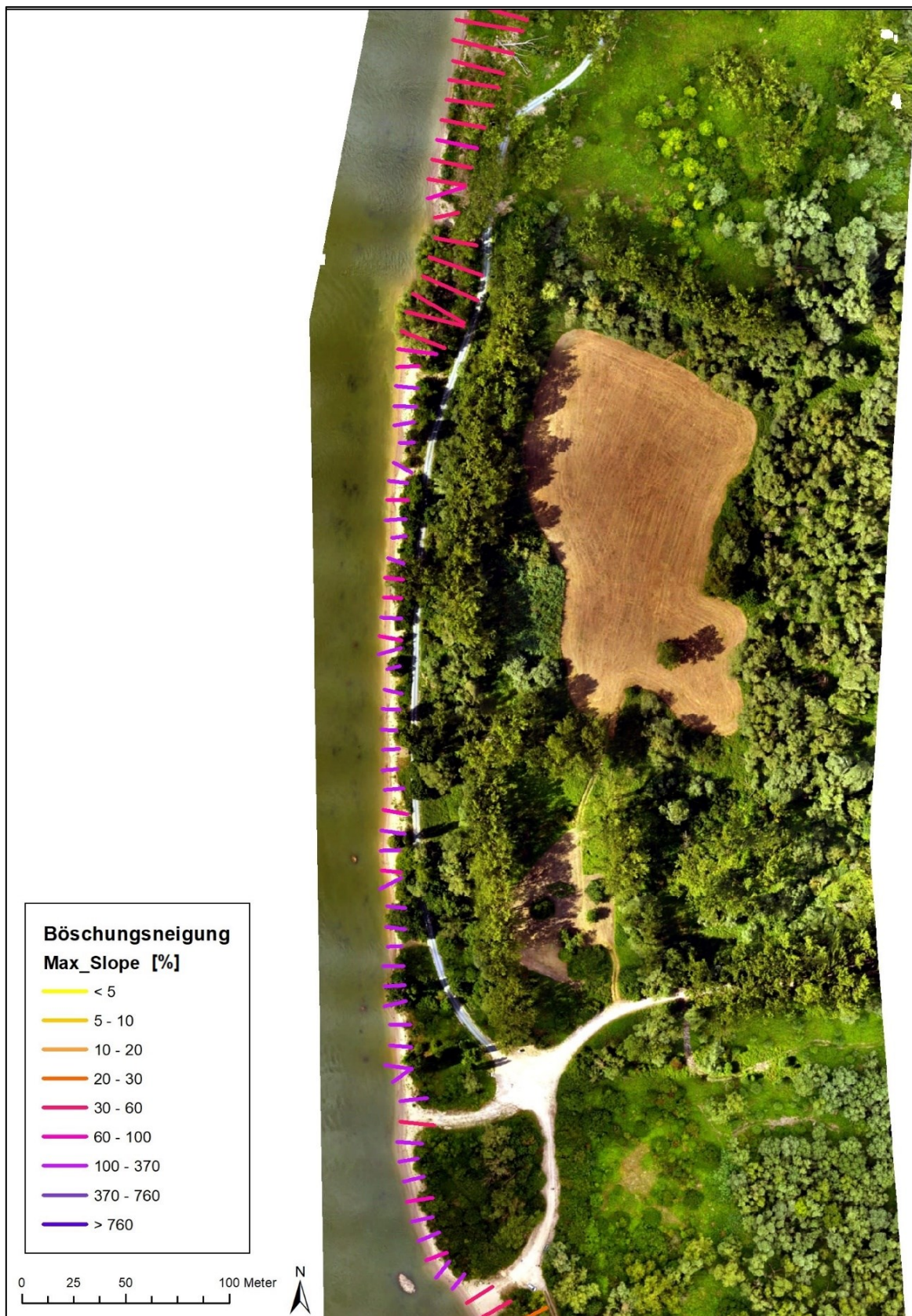


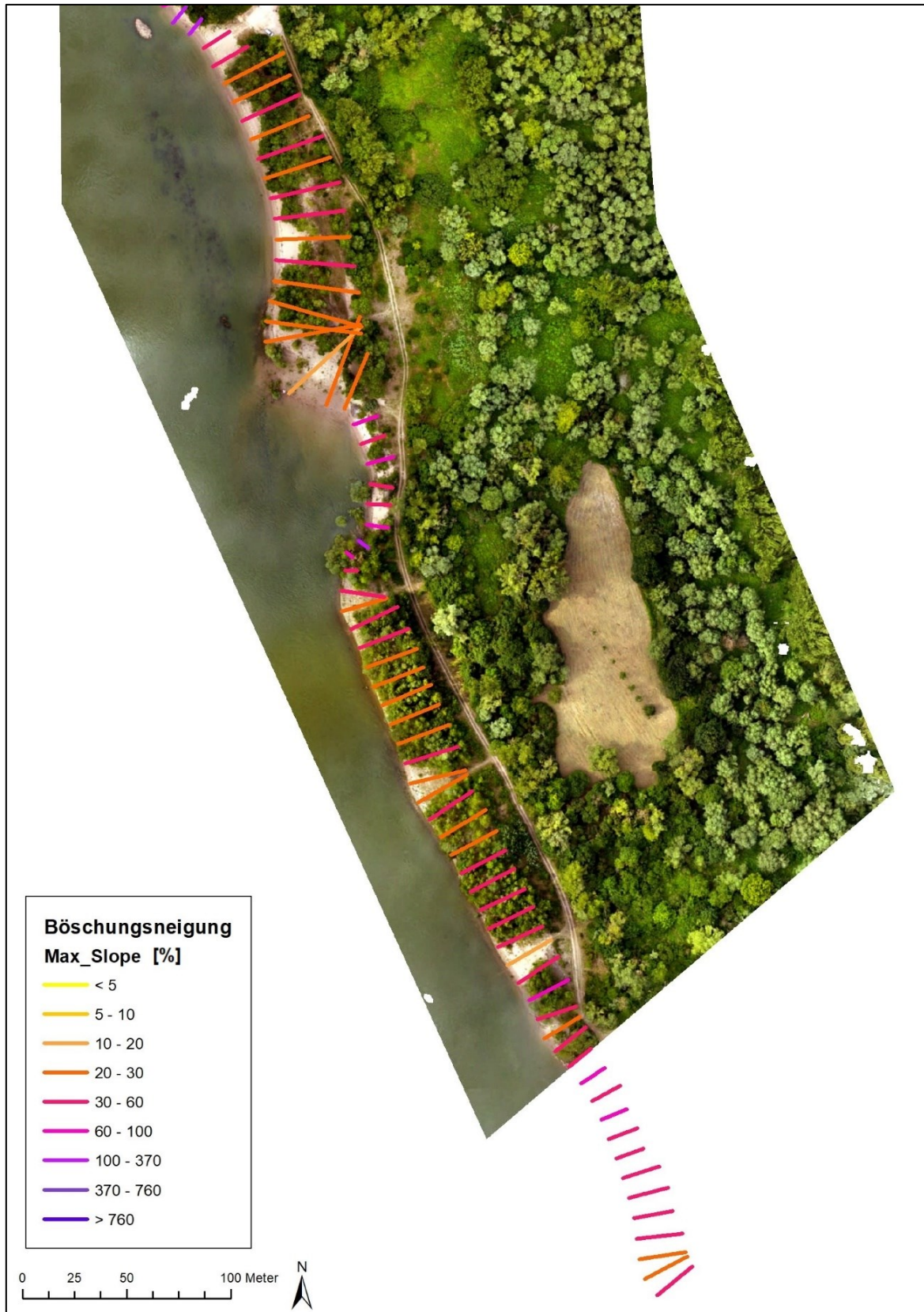


Anlage 5: Klassifikation der Uferböschung nach maximaler Neigung









Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Annika Pflum, die vorliegende Master-Thesis / Bachelor-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei einer Thesis des Fachbereichs Architektur entspricht die eingereichte elektronische Fassung dem vorgestellten Modell und den vorgelegten Plänen.

English translation for information purposes only:

Thesis Statement pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I, Annika Pflum, have written the submitted thesis independently pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

I am aware, that in case of an attempt at deception based on plagiarism (§38 Abs. 2 APB), the thesis would be graded with 5,0 and counted as one failed examination attempt. The thesis may only be repeated once.

For a thesis of the Department of Architecture, the submitted electronic version corresponds to the presented model and the submitted architectural plans.

Datum / Date:

16.12.2020

Unterschrift/Signature:

A. Pflum