

Phillipp Jende

Automatisierte hydrologische Korrektur von Oberflächenmodellen aus IRS P5 Stereodaten

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

Masterstudium Geo-Spatial-Technologies



Technische Universität Graz

Graz, Oktober 2013

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. Mathias Schardt , Technische Universität Graz

Dr. Sebastian Carl, GAF AG München

Einleitung	5
Hintergrund	5
Aufgabenstellung und Motivation	5
Zielsetzung und Methodenauswahl	6
Kapitelübersicht	6
1. Daten und Definitionen	7
1.1 Allgemeine Definitionen	7
1.1.1 Geodaten	7
1.1.2 Rasterdaten	7
1.1.3 Georeferenz	8
1.1.4 Aufnahmemethodik	8
1.1.5 Satellitensystem	10
1.1.6 Höhenmodelle	11
1.1.7 Digitale Photogrammetrie	12
1.2 Daten	14
1.2.1 IRS P5 - Cartosat-1	14
1.2.2 Landsat	18
2.2.3 PlanetObserver DEM	19
2. Hydrologische Korrektur von Höhenmodellen	20
2.1 Begriffserklärung	20
2.2 Anwendungsgebiete	21
2.3 Konventionelle Ansätze	21
2.3.1 Fließrichtung	21
2.3.2 Hydro-Conditioning und Hydro-Enforcement Verfahren	23
2.3.3 Hydrologische Analysen	26

2.3.4	Verfügbare Software für die hydrologische Korrektur von DEMs	27
2.3.5	Beispiele für ähnliche Untersuchungen und Datenprodukte	28
2.4	Limitationen und technische Herausforderungen	29
2.4.1	Oberflächenmodell	29
2.4.2	Algorithmik und Verfahren	31
2.5	Zusammenfassung und Ausblick	32
3.	Wassermaskenerstellung	34
3.1	Einleitung	34
3.2	Verfahren	34
3.3	Probleme	35
3.4	Aktueller Stand	35
4.	Wassermaskenschärfung	36
4.1	Entwicklung der Idee	36
4.2	Limitationen	37
4.3	Verbesserung des Verfahrens und Funktionsweise	37
4.4	Zusammenfassung	40
5.	Hydrologische Korrektur des Oberflächenmodells	41
5.1	Höhenidentifikation und -extraktion	41
5.1.1	Höhendetektion	41
5.1.2	Höhenklassifikation	43
5.1.3	Übertragung der Höhen auf die Centerline	47
5.2	Höhenverarbeitung	52
5.2.1	Höhenverarbeitung auf Basis von Centerlinesegmenten	52
5.2.2	Abflusskriterium	56
5.3	Editierung des Oberflächenmodells	58

5.3.1 Region Growing für die Höhenintegration	59
5.3.2 Verfahren	59
5.3.3 Ausgabe	59
6. Anwendung auf Testgebiete und Validierung des Verfahrens	60
6.1 Testgebiete	60
6.1.1 Testgebiet Bozen	60
6.1.2 Testgebiet Etschtal	61
6.1.3 Testgebiet Drau	62
6.2 Datenaufbereitung und Prozessierung	63
6.2.1 Erstellen von Subsets	63
6.2.2 Wassermaskenableitung	63
6.2.3 Wassermaskenschärfung	64
6.2.4 Hydrologische Korrektur	65
6.3 Übersicht zur Ergebnisbesprechung	66
6.3.1 Testgebiet Bozen	67
6.3.2 Etschtal	87
6.3.3 Drau	104
7. Fazit und Ausblick	116
Bibliografie	119
Abbildungsverzeichnis	121
Abkürzungsverzeichnis	127

Einleitung

Hintergrund

Mit den wachsenden Herausforderungen vor dem Hintergrund des Klimawandels, dem Umweltschutz und im Allgemeinen dem steigenden Bedarf von Geoinformation geht die stetige Verbesserung von Satellitensystemen hinsichtlich der Agilität, Auflösung und dem Ausbau möglicher Applikationen einher.

Oberflächenmodelle als Produkt satellitengestützter Erfassung und photogrammetrischer Verarbeitung sind ein präzises und kosteneffizientes Mittel, Höheninformation der Erdoberfläche zu gewinnen. Als Grundlage für die Orthorektifizierung oder in ihrer traditionellen Bedeutung als Quelle für Höheninformation ist die Nutzung von Oberflächenmodellen ebenso in Anwendungsgebieten wie der Hydrologie und Hydraulik denkbar. Hierbei dient das Höhenmodell zur Ableitung hydrologischer Informationen und als Grundlage für hydrologische Analysen, welche für die bessere Beschreibung der Geomorphologie und der hydrologischen Modellierung im Generellen sowie dem Küsten- und Umweltschutz, dem Wasserbau und der Infrastrukturplanung im Speziellen notwendig sind.

Mit dem IRS P5 Satelliten unterhält die indische Raumfahrtbehörde (ISRO) ein Instrument zur schnellen und kostengünstigen Generierung von Höheninformation. In einer Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der GAF AG und der Firma Euromap werden auf Basis von IRS P5 Stereodaten hochauflösende Oberflächenmodelle erstellt, welche für diese Arbeit die Datengrundlage darstellen.

Aufgabenstellung und Motivation

Die etablierte Methode, aus optischen Stereodaten dreidimensionale Informationen zu gewinnen, führt zu dem Umstand, dass Gewässerbereiche aufgrund der Reflexions- und Oberflächeneigenschaften von Wasser eine tendenziell fehlerhafte Höhenrepräsentation besitzen. Der Grund hierfür liegt bei der Oberflächenmodellgenerierung selbst, welche auf Basis homologer Bildpunkte in beiden Bildern und anhand deren Disparität eine dreidimensionale Rekonstruktion durchführt und dadurch den entsprechenden Höhenwert ermittelt. Die Bildpunktsuche basiert auf Matchingverfahren, welche infolge der irregulären Eigenschaften und damit Erscheinung von Wasserflächen im Vergleich zu statischen Objekten in beiden Stereobildern die Suche erschwert oder verhindert.

Oberflächenmodelle beschreiben zusätzlich zur Erdoberfläche deren Bebauung und Vegetation und stellen demzufolge im Unterschied zu Geländemodellen nicht ausschließlich die Geländemorphologie dar.

Zur Verwendung von Oberflächenmodellen als Datengrundlage für hydrologische Zwecke muss eine Korrektur durchgeführt werden. Dies bezieht sich auf die Manipulation der Höhenwerte innerhalb von Gewässerbereichen entsprechend der tatsächlichen Abflussrichtung des Gewässers.

Zielsetzung und Methodenauswahl

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines automatischen Verfahrens zur hydrologischen Korrektur von IRS P5 Oberflächenmodellen. Hierzu werden Gewässerbereiche mit Hilfe von Landsat-Daten klassifiziert und auf Basis eines Schärfungsverfahrens auf die Bearbeitungsaufösung überführt. Anhand der bekannten Wasserbereiche werden geeignete, repräsentative Höhen als Stützpunkte definiert und gemäß der ermittelten Fließrichtung korrigiert, so dass ein stetiger Abfluss eingehalten werden kann. Abschließend werden die betreffenden Bereiche bezüglich der Höhe im Oberflächenmodell editiert.

Das resultierende Oberflächenmodell enthält in identifizierten Gewässerbereichen korrigierte Höhenwerte hinsichtlich der Hydrologie und kann als Grundlage für hydrologische Anwendungen dienen.

Kapitelübersicht

Im ersten Kapitel wird auf grundlegende Definitionen Bezug genommen und die verwendeten Daten hinsichtlich ihrer allgemeinen und technischen Eigenschaften und Spezifikationen beschrieben. Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit der hydrologischen Korrektur von Höhenmodellen im Allgemeinen und erläutert den Verwendungszweck sowie konventionelle Ansätze und versucht im Anschluss die Grenzen der hydrologischen Korrektur von Oberflächenmodellen aufzuzeigen. Die nächsten beiden Kapitel erläutern die Klassifikation von Landsat-Daten in Bezug auf Gewässerbereiche und deren anschließende Schärfung auf Basis der Orthobilder. Das fünfte Kapitel widmet sich der hydrologischen Korrektur selbst und gliedert sich in die Abschnitte der Höhenidentifikation und -extraktion, der Höhenverarbeitung und der Editierung des Oberflächenmodells. Abschließendes Kapitel ist die Anwendung des Verfahrens auf drei Testgebiete mit nachfolgender Ergebnisanalyse und -validierung.

1. Daten und Definitionen

In diesem Kapitel wird auf die in dieser Arbeit verwendeten Daten Bezug genommen. Angefangen bei Definitionen bis hin zu Datenspezifikationen bildet dieser Abschnitt die Basis für die weitere Arbeit.

1.1 Allgemeine Definitionen

1.1.1 Geodaten

Geodaten sind digitale Daten, die eine Georeferenz besitzen und die Erdoberfläche beschreiben. Qualitativ lassen sich Geodaten nach Aspekten der Vollständigkeit, Positionsgenauigkeit, Konsistenz sowie nach zeitlicher und thematischer Genauigkeit unterteilen.

Die Speicherung von Geodaten kann vektoriell oder gerastert erfolgen. Vektordaten beschreiben Objekte im Raum als Punkte, Linien oder Flächen, wobei zumeist Geometrie, Attributierung und Metainformationen getrennt voneinander gespeichert sind.

In dieser Arbeit sind Vektordaten von geringerem Interesse, da sie in der Bildverarbeitung im Allgemeinen und für die Aufgabenstellung im Speziellen nur eine untergeordnete Rolle spielen.

1.1.2 Rasterdaten

Als Datenmodell zur Speicherung von Geometrie- und Sachdaten besitzen Rasterdaten an dieser Stelle besondere Relevanz. Die Zellen, auch Pixel genannt, werden durch Spalten und Reihen in einer Matrix aufgespannt und sind in Abhängigkeit von der Bildauflösung unterschiedlich groß, bezüglich ihrer Ausdehnung jedoch homogen.

Jede einzelne Zelle enthält einen Wert, dessen qualitative Aussage über Graustufen visualisiert erfolgt. Über die Zelle als Geoobjekt kann ein räumlich-semantischer Bezug hergestellt und Phänomene wie Höhe, Temperatur oder Strahlung in Form von Reflexion beschrieben werden. Je höher die Auflösung beziehungsweise kleiner die Rastergröße eines Datensatzes, desto detaillierter erscheint ein Objekt.

Rasterdaten beschreiben auf diese Weise die Objektgeometrie durch digitale Bilder in Form von Luft- und Satellitenaufnahmen. [1]

1.1.3 Georeferenz

Für die Verwendung dieser Bilddaten in der Geoinformation ist ein Raumbezug nötig. Unterschieden wird zwischen einem indirekten und direkten Raumbezug, wobei sich die indirekte Referenz dadurch charakterisiert, dass sie nicht koordinativ beschrieben werden kann, sondern semantisch. Beispiele hierfür können politische Bezirke, Postleitzahlen und Landmarks sein. Direkter Raumbezug hingegen wird durch zwei- oder dreidimensionale Koordinaten hergestellt.

Voraussetzung hierfür ist eine geometrische Rektifizierung, bei der zum einen jede Rasterzelle einer Koordinate mithilfe eines geodätischen Bezugssystem zugeordnet wird und zum anderen geometrische Verzerrungen beseitigt werden. Dieser Vorgang basiert auf einer geometrischen Transformation. Zwei Verfahren können hierbei grundsätzlich Anwendung finden. Beim ersten Verfahren handelt es sich um Interpolationsmethoden, welche auf Basis von bekannten, bereits referenzierten *Ground Control Points* (GCPs) die Transformation durchführen. Das zweite Verfahren ist parametrisch und modelliert die Abbildungsgeometrie auf Basis der Orientierung und Lage des Sensors und eines digitalen Geländemodells.

Mit Hilfe der erhaltenen Transformationsgleichung können die Bilddaten des Eingaberasters umstrukturiert werden, so dass jeder Bildpunkt eine Koordinate besitzt.

Im Falle von IRS P5 wird der Datensatz mit Hilfe von *rational polynomial functions* (RPCs) und Sekundärdaten wie ETM+ und SRTM referenziert. Unter Zuhilfenahme von Bündelblockausgleichen erhöht sich signifikant die Genauigkeit des Datensatzes und eine Mehrfachabdeckung verringert Ausreißer. Auf das Datenprodukt wird in Kapitel 1.2.1 detaillierter eingegangen. [2]

1.1.4 Aufnahmemethodik

Die verwendeten Daten in dieser Arbeit sind in erster Linie Satellitenaufnahmen. Im weiteren Sinne versteht man unter diesem Begriff Bilder der Erdoberfläche von Space Shuttles und Satelliten (z.B. IKONOS). Unterschieden werden Satellitenbilder nach der spektralen und geometrischen Auflösung, nach dem Aufnahmezeitpunkt und der Größe des erfassten Ausschnitts.

Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist die Erfassungsmethodik. Aktive Systeme wie beispielsweise Radar und LiDAR benutzen von ihnen ausgesendete und empfangene Strahlung als Informationsquelle, wohingegen passive Systeme, wie optische Sensoren, reflektierte, natürliche Strahleninformation registrieren.

Aktive Systeme

Radar und *LiDAR* funktionieren nach dem Prinzip der Laufzeit- und Intensitätsmessung, welchem die Ermittlung der Zeit bis das ausgesendete Signal reflektiert und mit welcher Signalintensität wieder empfangen wird zugrunde liegt. Über die Kenntnis der Geschwindigkeit des Signals kann auf die Entfernung rückgeschlossen werden, so dass bei Kenntnis über die Höhe und Lage der Aufnahmeplattform eine Höheninformation entsteht. Im Gegensatz zu passiven Systemen besteht zumeist eine Wetterunabhängigkeit, keine Abhängigkeit von natürlichen Bestrahlungsverhältnissen und die Möglichkeit, Wellenbereiche zu nutzen, die in der Solarstrahlung nur geringe Intensitäten aufweisen.

Passive Systeme

Passive Systeme empfangen reflektierte, elektromagnetische Strahlung natürlichen Ursprungs. Die empfangenen Signale können dann in verschiedene Messgrößen konvertiert werden, beispielsweise Vegetationsindizes, Temperatur oder auch Höheninformation durch photogrammetrische Algorithmen.

Stereoskopische Satellitenaufnahmen

Auf dieses Aufnahmeverfahren soll insbesondere eingegangen werden, da es den verwendeten Höhenmodellen in dieser Arbeit zugrunde liegt. Ein stereoskopisches Satellitensystem besitzt die technische Eigenschaft, ein Aufnahmegebiet aus mindestens zwei unterschiedlichen Perspektiven zu erfassen. SPOT war 1986 der erste zivile Satellit mit Stereofunktionalität und ermöglichte erstmals eine schnelle und großflächige Höhenmodellgenerierung der Erdoberfläche. Bewerkstelligt wird eine Stereoaufnahme durch Kamerasysteme mit mindestens einer schwenkbaren oder zwei festinstallierten Aufnahmeeinheiten [3].

Im ersten Fall wird das *in-track* Aufnahmeverfahren verwendet (siehe Abb. 1), bei welchem die erste Aufnahme durch einen Kameraschwenk nach vorne und die zweite Aufnahme nach dem Überflug des Gebiets durch einen Schwenk nach hinten erfolgt. Dieses Verfahren findet vor allem bei *VHR*-Satelliten der neuen Generation Anwendung (Worldview-I und II, Geoeye-I).

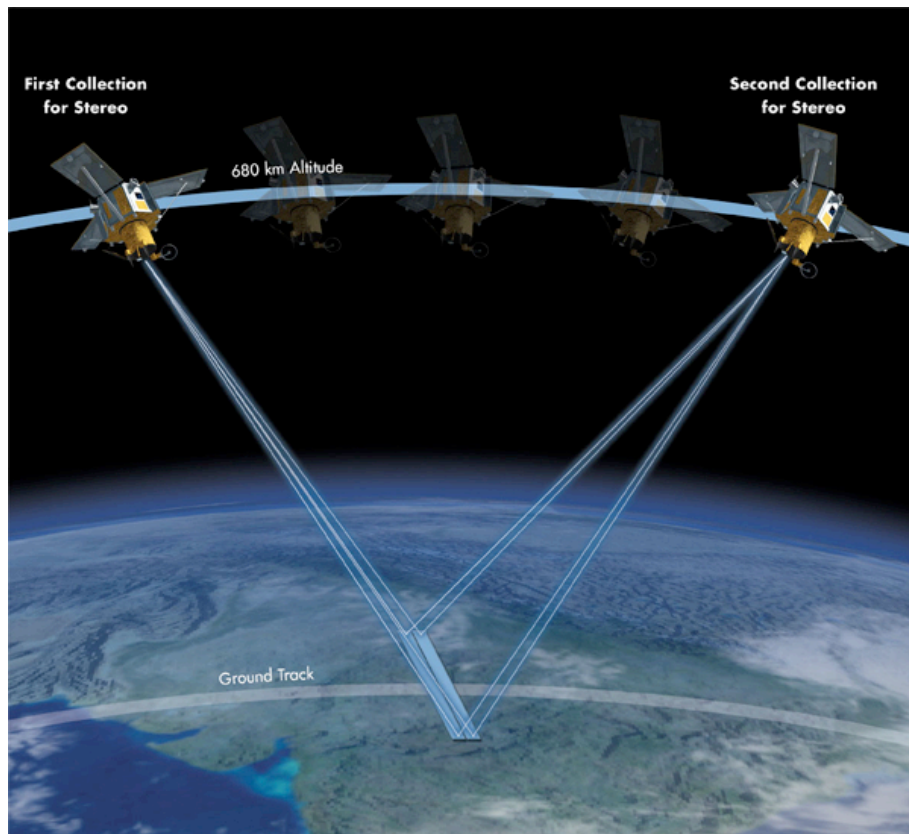


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Stereoaufnahme durch IKONOS, © GeoEye

Besitzt das Satellitensystem die Möglichkeit eines Seitwärtsschwenks, dann ist eine Stereoaufnahme bei Überflug des benachbarten Orbits möglich.

Die andere Möglichkeit ist eine Aufnahme mit zwei (IRS P5) oder drei Kameras (ALOS Prism). Hierbei müssen die Kameras nicht geschwenkt werden, sondern nehmen beim Überflug des gewünschten Gebiets jeweils ein *Forward*- und ein *Afterbild* (IRS P5) bzw. ein *Forward*-, ein *After*- und ein *Nadirbild* (ALOS Prism) auf. Diese Methodik erlaubt ebenfalls eine dreidimensionale Rekonstruktion der Erdoberfläche durch unterschiedliche Aufnahmewinkel.

In einem weiteren Abschnitt wird auf das Verfahren der digitalen Photogrammetrie und der Tiefenrekonstruktion Bezug genommen.

1.1.5 Satellitensystem

Für die Erfassung von Satellitenaufnahmen sind Satellitensysteme notwendig. Wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt wurde, können Aufnahmen von bemannten und unbemannten Systemen stammen. Letztere haben eine größere Bedeutung, wohingegen

die bemannte Raumfahrtmission *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) eine Sonderrolle einnimmt. Auf SRTM und dessen Daten wird in einem späteren Abschnitt noch detaillierter Bezug genommen.

Die Aufnahmegeometrie, die temporale Auflösung und weitere Charakteristika von Satellitenaufnahmen sind stark von dem Orbit der Aufnahmeplattform abhängig.

Für die Fernerkundung sind sonnensynchrone Umlaufbahnen (*Sun-Synchronous Orbit*, SSO) von besonderer Bedeutung, um einen Punkt auf der Erdoberfläche immer zur gleichen Ortszeit zu besuchen, vergleichbare Reflexionseigenschaften der Oberfläche vorzufinden und den Erdschatten nicht zu passieren, um eine stetige Energieversorgung über die Solarzellen zu garantieren.

Dieser Orbit befindet sich bei einer Inklination¹ von 98° bis 99° zwischen 650 km und 900 km Höhe (LEO) und stellt einen geeigneten Kompromiss bezüglich des Abstands zur Erdoberfläche und den atmosphärischen Störungen dar. [4]

Umlaufbahnen wie der *Medium Earth Orbit* (MEO) mit einer Flughöhe von 20.000 km ermöglichen eine globale Abdeckung, welche für die Funktionsfähigkeit von Navigationssatelliten unabdingbar ist. Zusätzlich befindet sich bei einer Höhe von 35.786 km der *geostationäre Orbit* (GEO), welcher mit einer Bahnneigung von 0° zum Äquator und der Geschwindigkeit von einer Erdumrundung am Tag über einem Punkt der Erdoberfläche verweilt, so dass hohe temporale Auflösungen erreicht werden können, was für Wettersatelliten von Relevanz ist. Zudem wird der *geostationäre Orbit* aufgrund der fixierten Position für Kommunikationssatelliten verwendet.

1.1.6 Höhenmodelle

Grundsätzliches

Ein digitales Gelände- (DGM) oder Oberflächenmodell (DOM), allgemein digitales Höhenmodell (DHM bzw. engl. DEM), ist eine digitale Repräsentation der Erdoberfläche bestehend aus einer geordneten Struktur aus Datum, Höhe und einer geographischen Koordinatenreferenz. Höhenmodelle können in den unterschiedlichsten Bereichen, wie der topographischen Kartierung, des Ressourcenmanagements, der Infrastrukturplanung, der Geländeanalyse, der Funknetzplanung, der militärischen Planung und der Orthobildgenerierung, Anwendung finden. [5]

Der Unterschied zwischen einem Oberflächen- und einem Geländemodell ergibt sich aus dem Informationsgehalt. Geländemodelle enthalten ausschließlich Elemente der Geländemorphologie, Oberflächenmodelle hingegen zusätzlich alle vorhandenen Objekte

¹ Winkel des Satellits zwischen Bahnebene und Referenzebene

auf der Erdoberfläche, unter anderem Vegetation und Bebauung. Für die Generierung eines Gelände- beziehungsweise eines Oberflächenmodells wird eine Datenquelle benötigt, welche Informationen zur Höhe enthält. Es gibt verschiedene Wege, Höheninformation zu erfassen. Zum einen terrestrische Erfassungsmethoden, mit welchen sich die Vermessungskunde beschäftigt, und zum anderen fernerkundliche Methoden, wie die flugzeug- oder satellitengestützte Erhebung. Bei letzterer unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Systemen, auf welche im vorherigen Abschnitt bereits eingegangen wurde.

Datenformate von Gelände- und Oberflächenmodellen

Analog zu anderen Speicherverfahren in der Geoinformation können Gelände- und Oberflächenmodelle vektorieell oder gerastert gespeichert werden.

Geodätisch eingemessene oder durch LiDAR erfasste Höhenpunkte mit Strukturinformation können als primäre Höhenmodelle vektorieell gespeichert werden. Hierbei bilden die unregelmäßig verteilten Höhenpunkte Stützknotten für eine Dreiecksvermaschung (TIN). Der hierdurch aufgespannte Bereich innerhalb des Dreiecks kann interpoliert werden.

Höheninformation in Rasterform bedeutet hingegen, dass eine Rasterzelle eine Höhe repräsentiert. Eine Konvertierung eines TINs in das Rasterformat ist möglich. Hierzu wird die Geländeinformation über ein Raster gelegt und jedem Pixel ein Höhenwert nach der Definition eines Interpolationsverfahrens zugewiesen (zum Beispiel *Nearest Neighbour*). Um Höhenmodelle aus Stereobildern zu generieren, findet ein anderes Verfahren Anwendung, auf welches im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

1.1.7 Digitale Photogrammetrie

Stereoskopie allgemein

Der Ableitung von Gelände- und Oberflächenmodellen aus stereoskopischen Satellitenbildern liegt die Tatsache zugrunde, dass eine reale Szene aus zwei unterschiedlichen Aufnahmeperspektiven mit bekannter Orientierung und Kalibrierung der Kameras raumtreu abgebildet werden kann.

Dieser Umstand ist für die Fernerkundung relevant, um aus Stereobildpaaren ein dreidimensionales Abbild der Natur zu erstellen, indem von den jeweiligen Bildern auf eine Tiefeninformation geschlossen wird, welche sich in der dritten Dimension als Höheninformation darstellt. So nehmen Stereokameras zwei Bilder aus unterschiedlichen

Perspektiven auf, wodurch die Realität in beiden Bildern leicht zueinander verschoben abgebildet wird (*Disparität* - siehe Abb. 2).

Um nun die korrekte Disparität der Bildpunkte zu ermitteln, sucht man korrespondierende Bildpunkte in beiden Stereobildern, welche jeweils den identischen Objektpunkt im Gelände abbilden (*Stereo-Korrespondenzproblem*) [6].

Der nächste Schritt ist die Rekonstruktion der dreidimensionalen Koordinaten des Objektpunktes, um eine Höheninformation zu erhalten.

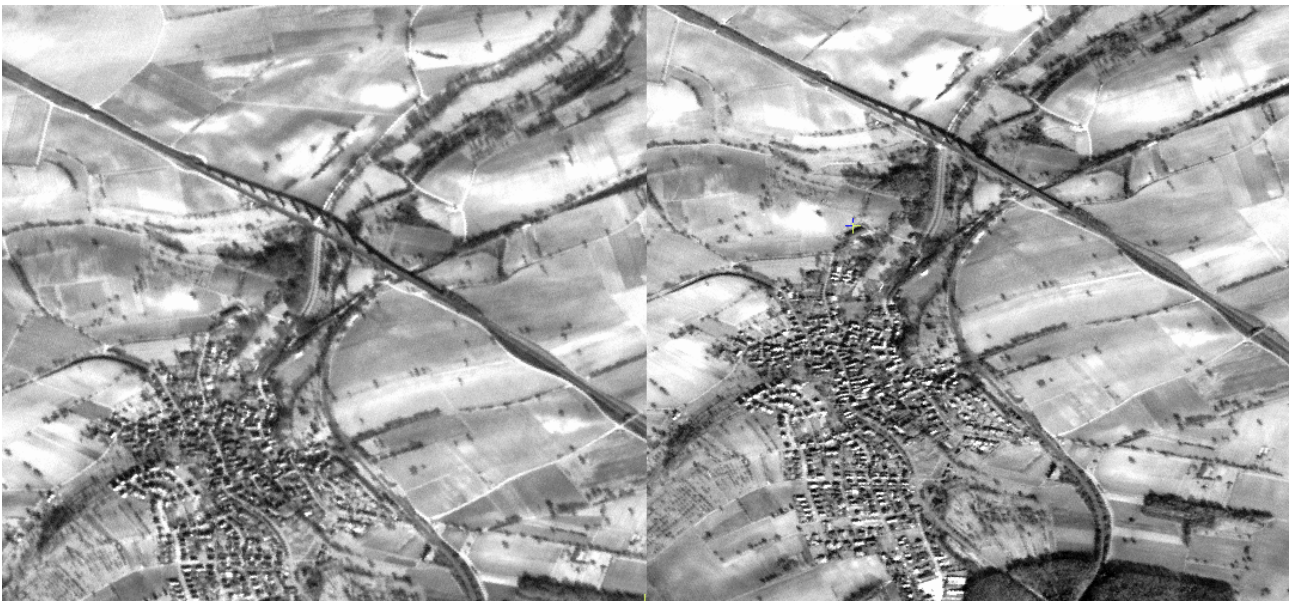


Abb. 2: IRS P5 Stereobildpaar

Stereomatching

Zur Lösung des Korrespondenzproblems werden Punktmatchingverfahren verwendet, welche homologe Bildpunkte im Stereobildpaar identifizieren. Hierbei wird zwischen intensitätsbasierten und merkmalsbasierten Matchingverfahren unterschieden. Zur Verkleinerung des Suchraums werden die Rohbilder rektifiziert, so dass die Bildzeilen parallel zu den Epipolarlinien liegen. Auf diese Weise wird die Suche nach korrespondierenden Bildpunkten auf eine horizontale Ebene reduziert.

Intensitätsbasiertes Matching untersucht die Intensitätsprofile beider Bilder entlang der gleichen horizontalen Bildzeile, so dass die Disparität anhand der lokalen Verschiebung der Intensitätsprofile erkennbar wird. Merkmalsbasiertes Matching basiert auf der Korrespondenzanalyse von Geometrieobjekten wie Ränder, Ecken, Linien- oder Kurvensegmenten in beiden Bildern.

Aus dieser Korrespondenzinformation und den Orientierungs- und Kalibrierungsparametern lässt sich auf die Tiefeninformation rückschließen.

Die in dieser Arbeit verwendeten Höhenmodelle wurden mithilfe von *Semiglobal Matching* (SGM) abgeleitet, welcher die Korrespondenzanalyse durch den Vergleich der Entropie² beider Bilder bewerkstelligt. Ursprünglich wurde der Algorithmus für die Echtzeitobjekterkennung in der Robotik verwendet und am DLR für die Generierung von Oberflächenmodellen aus stereoskopischen Satellitenaufnahmen modifiziert. Aufgrund der Historie zeichnet sich SGM durch schnelle Prozessierung bei robuster Matchingleistung aus [7]. Vergleichende Untersuchungen mit anderen Stereoalgorithmen auf der *Middlebury Stereopage* [8] bestätigen diese These. Für eine detaillierte Dokumentation des Algorithmus sei auf die Arbeit von Heiko Hirschmüller verwiesen [9].

1.2 Daten

1.2.1 IRS P5 - Cartosat-1

Allgemein

Die in dieser Arbeit verwendeten Höhenmodelle wurden aus Bilddaten des IRS P5 Satelliten abgeleitet. IRS P5, oder auch Cartosat-1 genannt, ist ein Satellitensystem, welches panchromatisch-stereoskopische Daten erfassen kann. Der Satellit wird seit dem Jahre 2005 operationell von der indischen Raumfahrtbehörde *Indian Space Research Organisation* mit Hauptsitz in Bangalore betrieben. Mit dem Start des IRS-1A 1988 wurde der Beginn des indischen Fernerkundungsprogramms (IRS) eingeläutet. Aktuell umfasst das indische Raumfahrtprogramm elf Satelliten im operationellen Betrieb und ist somit das größte zivile Programm dieser Art.

IRS P5 wurde mit einer Masse von 1560 kg und einer Größe von 2,4 m auf 2,7 m von der PSLV (3) Trägerrakete am 05.05.2005 in einen polaren, sonnensynchronen Orbit von 618 km Höhe transportiert.

Mit zwei panchromatischen Stereokameras ist IRS P5 der erste IRS-Satellit mit Stereofunktionalität und wurde speziell für den kartographischen Einsatz konzipiert. Ursprünglich wurde der operationelle Betrieb auf fünf Jahre limitiert, doch es kann davon ausgegangen werden, dass der Satellit noch mehrere Jahre in Benutzung bleiben wird. [10]

² Entropie bezeichnet den Informationsgehalt

Spezifikationen

Bei einer Inklination von $97,87^\circ$ und einer Umlaufzeit von 97,12 Minuten überfliegt der Satellit 14-mal täglich gegen 10:30 Ortszeit den Äquator. Die *Forward*- und *After*kamera sind standardmäßig $+26^\circ$ beziehungsweise -5° ausgerichtet und haben eine Streifenbreite von 27 km respektive 30 km. Der Satellit ist ebenso steuerbar, um die Erdrotation zu kompensieren und gegebenenfalls die Kameras im Stereomodus korrekt auszurichten. Diese Agilität erlaubt das Überfliegen des gleichen Gebiets in Abhängigkeit des Breitengrades innerhalb von fünf Tagen, ein identischer Orbit wird nach 126 Tagen erreicht.

Zwei Kameras mit jeweils 2,5 m Auflösung ermöglichen die Generierung von Oberflächenmodellen, orthorektifizierten Bildern und weiteren Produkten für den Einsatz in geographischen Informationssystemen mit einem maximalen Kartiermaßstab von 1:5.000 respektive 1:12.500 bei Oberflächenmodellen durch die aus der Prozessierung resultierende geringere Auflösung. Der Sensor besitzt ein Spektrum von 0,5 – 0,85 Mikrometer, eine radiometrischen Auflösung von 10 Bit (1024 Graustufen) und eine Pixelgröße von 7×7 Mikrometer. Beide Kameras nehmen nach dem *Pushbroom*-Verfahren auf, bei welchem die Bildinformation zeilenweise erfasst wird. Als temporärer Zwischenspeicher dient ein Solid State Recorder mit einer Aufnahmekapazität für neun Minuten Bildmaterial, welches dann bei einem Überflug einer Bodenstation in einer JPEG-ähnlichen, aber verlustfreien Kompression gesendet wird. [11]

Datenprodukt

Die aus dem IRS P5 Stereodatensatz abgeleiteten Produkte sind neben dem Oberflächenmodell zwei Qualitylayer und das orthorektifizierte Afterbild.

Der Ableitung dieser Datenprodukte liegt ein automatisierter Workflow zugrunde, welcher unter ständiger Weiterentwicklung bereits operationell bei der Euromap GmbH betrieben wird. Aufgrund der hohen Aufnahmefrequenz und der langen Lebenszeit des Satelliten liegen für viele Bereiche Europas Mehrfachabdeckungen vor, welche vom Prozess genutzt werden, um die Höhen des Oberflächenmodells zuverlässiger abzuleiten. [12]

Oberflächenmodell

Das abgeleitete Oberflächenmodell (siehe Abb. 3) besitzt mit einer Auflösung von 5 m eine vertikale (LE90) wie horizontale (CE90) Genauigkeit von unter 10 m. Die Höhenwerte liegen als Fließkommazahl vor.

Durch die Vorzüge des SGM und der Mehrfachabdeckung werden Ausreißer minimiert und Strukturen, speziell im urbanen Raum, gut sichtbar. Im Bereich der Wasserflächen treten jedoch viele Fehler auf.

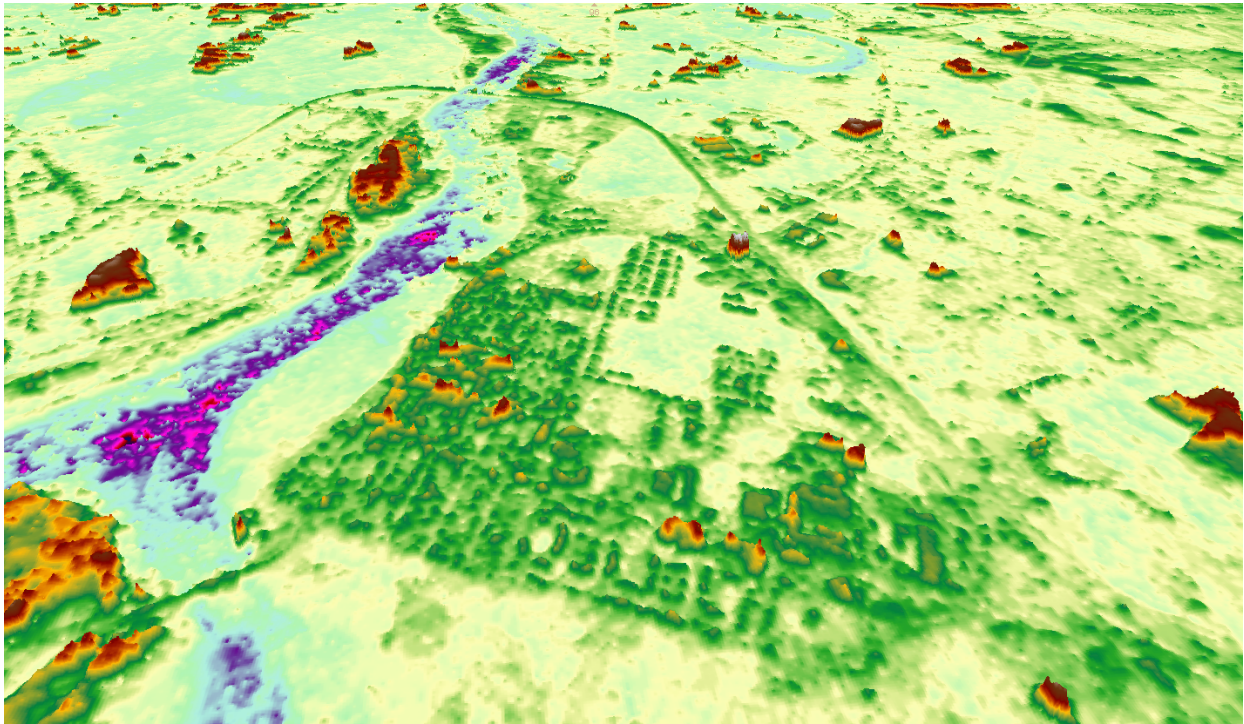


Abb. 3: IRS P5 Oberflächenmodell (ungefüllt), gute Darstellung von Bebauung (Mitte des Bildes), fehlerhafte Darstellung von Wasserflächen (violette Färbung)

Die Mehrfachabdeckung bietet die Grundlage für ein Höhenauswahlverfahren über den Median der Höhenwerte vorhandener Oberflächenmodelle. Liegen nur zwei oder allgemein eine gerade Anzahl an Werten an der Stelle vor, wird auf den tieferen Wert zurückgegriffen. Dieses Verfahren soll die Wahrscheinlichkeit erhöhen, den besten Höhenwert für einen Punkt zu identifizieren.

Das Oberflächenmodell gibt es in einer gefüllten, beziehungsweise interpolierten und in einer unbearbeiteten Variante, welche *Voids*³ enthält. Sofern vorhanden, wird das gefüllte Oberflächenmodell im Rahmen des Verfahrens verwendet, da es weniger Fehler enthält. Zur Füllung von *Voids* wird auf andere Oberflächen- und Geländemodelle zurückgegriffen.

Qualitylayer

Die aktuelle Version des Workflows umfasst, wie im Abschnitt Georeferenz (Kap. 1.1.3) erwähnt wurde, den Bündelblockausgleich sowie eine Mehrfachabdeckung.

³ Voids bezeichnet fehlerhafte Bereiche im Höhenmodell, die keinen Höhenwert besitzen.

Durch die Verfügbarkeit mehrerer, benachbarter Einzelszenen und der Verarbeitung als zusammenhängendes Gebiet lässt sich die Gewässertopologie im Rahmen hydrologischer Analysen besser verstehen und abbilden. Zudem bilden diese Neuentwicklungen, im Speziellen die Mehrfachabdeckung, die Grundlage für die Erstellung von Qualitylayers. Der erste Qualitylayer (*Stdlayer*, siehe Abb. 4) enthält die Standardabweichung der abgeleiteten Höhenwerte zueinander, wohingegen der zweite Qualitylayer (*Numlayer*, siehe Abb.5) die Anzahl der zur Ermittlung des Höhenpunktes verwendeten Bilder angibt. Auf Basis dieser Qualitylayer kann eine Qualitätsaussage über den Höhenwert getroffen werden. Auf die Verwendung dieser Qualitylayer wird im Kapitel zur Erläuterung der hydrologischen Korrektur (Kap. 5) Bezug genommen.

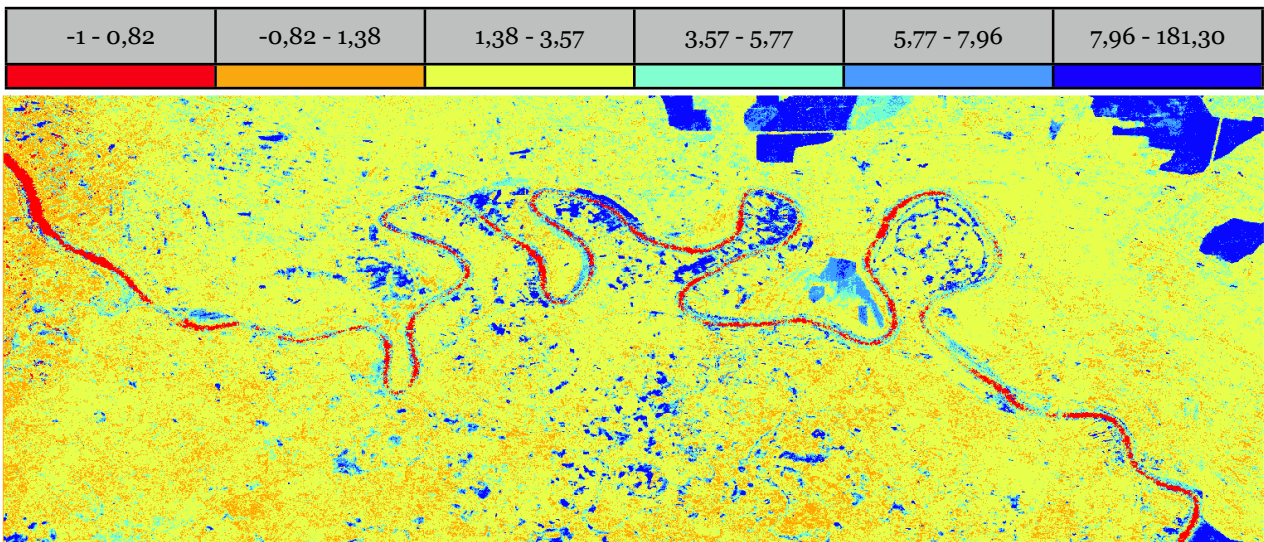


Abb. 4: IRS P5 Qualitylayer über Standardabweichung der Höhen aus den verfügbaren Layern (Stdlayer)

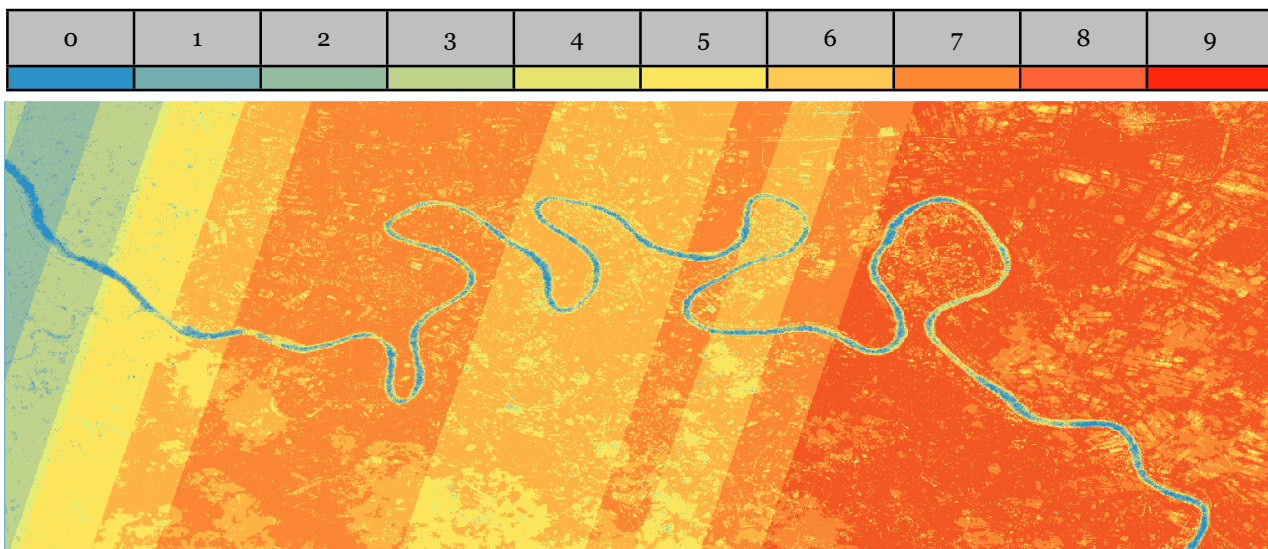


Abb. 5: IRS P5 Qualitylayer mit der Anzahl der verwendeten Layer (Numlayer)

Orthobild

Die Orthobildgenerierung findet auf Basis der Oberflächenmodelle statt. Hierzu wird das Afterbild der IRS P5-Stereoaufnahme (siehe Abb. 6) verwendet, da die Verzerrungen und Okklusionen⁴ aufgrund des nadirnäheren Aufnahmewinkels von 5° geringer sind.



Abb. 6: IRS P5 Orthorektifizierte Aufnahme der Afterkamera überlagert das Oberflächenmodell

Das Orthobild ist ein wichtiger Bestandteil des Datenprodukts und ist in der Regel⁵ mit 2,5 m aufgelöst.

1.2.2 Landsat

Die für die hydrologische Korrektur obligatorischen Wassermasken wurden auf Basis von Daten aus dem Global Land Survey (GLS) erstellt. [13]

Landsat ist ein ziviles Erdbeobachtungsprogramm und liefert seit 1972 kontinuierlich Fernerkundungsdaten. Insgesamt gab es bis dato acht Landsatsatelliten, welche stetig verbessert und modifiziert wurden, aber nur noch zwei (5 und 7) werden operationell betrieben. Landsat-8 wurde im Februar 2013 ins All befördert, besitzt für diese Arbeit jedoch keine Bedeutung, da erst im Mai 2013 der operationelle Betrieb begann.

⁴ Okklusionen sind durch die Aufnahmegeometrie verursachte Abschattungsgebiete

⁵ Es existieren Versionen mit 5 und 7,5 m Auflösung, Standard ist jedoch 2,5 m.

Landsat-5 trägt den Sensor *Thematic Mapper* (TM), Landsat-7 die Weiterentwicklung *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) an Bord. Beide Sensoren besitzen drei Kanäle im sichtbaren und vier im Infrarotbereich mit einer Auflösung von 30 m beziehungsweise 120 m (TM) und 60 m (ETM+) für den Thermalkanal. Zusätzlich bietet ETM+ einen panchromatischen Kanal mit 15 m Auflösung. Für die technischen Details und weitere Bandspezifikationen der einzelnen Satelliten und Sensoren sei auf den *Landsat Technical Guide* [14] verwiesen.

Auf Basis dieser Daten arbeiten der U.S. Geological Survey (USGS) und die National Aeronautics and Space Administration (NASA) am Projekt GLS. Es wird angestrebt, möglichst wolkenfreie Landsat-7 Bilder zur Zeit der jeweiligen Vegetationsperiode zu akquirieren. Landsat-7 Bilder haben ab dem Jahre 2003 sensorbedingte Aufnahmefehler, welche sich durch streifenförmige Artefakte ausdrücken, so dass ein *gap-filling*⁶ mit Landsat-5 nötig ist, um eine komplette Abdeckung zu gewährleisten. Die Orthorektifizierung findet mit Hilfe von SRTM-Daten statt, auf welche im nächsten Kapitel Bezug genommen wird.

Die für die Wassermaskengenerierung verwendeten Daten entstammen aus dem Datensatz GLS 2000.

2.2.3 PlanetObserver DEM

Für die Prozessierung der Wassermasken sind ebenfalls, wenn auch niedrigaufgelöste Höhenmodelle als ergänzender Datensatz nötig, um im Speziellen tatsächliche Wasserflächen von Hangschatten diskriminieren zu können.

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) war eine im Jahre 2000 von der NASA durchgeführte Shuttlemission zur radargestützten Erfassung der Erdoberfläche zwischen dem 60° Breitengrad Nord und dem 58° Breitengrad Süd. Nordamerika ist mit einer Bodenauflösung von 30 m auf 30 m, der Rest der Welt mit 90 m auf 90 m, verfügbar.

Die erfassten Daten sind kostenfrei, aber nicht immer fehlerfrei verfügbar, weshalb auf den *PlanetObserver*-Datensatz zurückgegriffen wurde.

Das PlanetObserver DEM, auch Planet DEM 90, stammt von der französischen Firma PlanetObserver, welche auf Basis von SRTM-Daten globale Höhenmodelle anbietet, die partiell korrigiert, gefüllt und um andere Datensätze wie *Global Digital Elevation Model* (GDEM) ergänzt wurden. Der Datensatz wurde für entsprechende Zwecke von der GAF AG und Euromap lizenziert.

Die Besonderheit liegt an einer globalen Verfügbarkeit sowie einer für diesen Zweck brauchbaren Auflösung. [15]

⁶ Fehlerhafte Bereiche im Landsat-7 Bild werden mit Landsat-5 Daten aufgefüllt

2. Hydrologische Korrektur von Höhenmodellen

2.1 Begriffserklärung

Unbearbeitete Höhenmodelle sind unabhängig von ihrer Datenherkunft, Prozessierungshistorie und Auflösung nur bedingt für hydrologische Analysen einsetzbar. Unerwünschte Senken, Depressionen (engl. *sinks, pits*) und Erhebungen (engl. *peaks*), anthropogene Strukturen wie Brücken oder Dämme und flache Bereiche behindern das natürliche Abflussverhalten von Wasser im Rahmen von Simulationen. Diese Phänomene können Eigenschaften, aber auch Fehler des Höhenmodells sein⁷.

Um dem entgegenzuwirken, muss ein Höhenmodell hydrologisch korrigiert werden. Hierbei wird zwischen drei Bearbeitungsstufen unterschieden. *Hydro-Conditioning* bezeichnet das Eliminieren von unechten Senken und Gruben über das gesamte Höhenmodell, um ein kontinuierliches Fließkommazahlen von Wasser zu ermöglichen. Nur natürliche Senken bleiben, je nach Anwendung, erhalten. *Hydro-Conditioning* ist relevant für alle Flächen eines Höhenmodells und beschränkt sich nicht nur auf Wasserflächen, so dass größere zusammenhängende Bereiche beispielsweise bei der Analyse von Einzugsgebiete in Verbindung gebracht werden können.

Hydro-Enforcement hingegen erweitert dieses Verfahren um das Einbringen eines kontinuierlichen Abflusskriteriums von Fließgewässern. Zusätzlich werden Strukturen (zum Beispiel Brücken) durchbrochen, um ein korrektes Abfließen zu ermöglichen.

Hydro-Flattening bezeichnet den Vorgang, Stillgewässern konstante Höhen und Fließgewässern und größeren Wasserbecken entsprechend ihrer Länge abgestufte Höhen in Harmonie mit der Umgebungstopographie zuzuweisen. Im Vordergrund steht die kartographische Ästhetik des Datensatzes, nicht die hydrologische oder hydraulische Verwendbarkeit für Analysen. [16]

Das erste und zweite Verfahren resultieren in einem natürlicheren beziehungsweise im Idealfall natürlichen, simulierbaren Fließverhalten.

Wichtig zu unterscheiden ist dennoch, dass die Höhen nicht im Sinne der natürlichen Morphologie korrigiert werden, sondern lediglich zur Abbildung korrekter Hydrologie dienen, so dass eine korrekte Ableitung der Fließrichtung möglich ist. Im Abschnitt 2.3.2 wird auf die Verfahren des *Hydro-Conditionings* und *Hydro-Enforcements* detaillierter Bezug genommen.

⁷ Es wird zwischen echten (natürliche Senken) und unechten (durch die Prozessierung verursachte Senken) unterschieden.

2.2 Anwendungsgebiete

Hydrologisch korrigierte Höhenmodelle dienen als Grundlage für weitergehende hydrologische oder hydraulische Analysen wie Ermittlung der Gewässertopologie, Detektion von Flussmündungen, Erfassung der Abflussmenge oder der Bestimmung von Einzugsgebieten.

Analysen dieser Art werden für eine Vielzahl von Anwendungen benötigt. Hierzu gehören beispielsweise der Küstenschutz, das Wasserressourcenmanagement, Biotopkartierungen, Katastrophenmanagement im Hochwasser- oder Überschwemmungsfall oder auch die Bauplanung.

Das hydrologisch korrigierte Höhenmodell sollte an den jeweiligen Nutzungszweck angepasst werden. Beispielsweise kann es bei einer Kartierung nach einer Hochwasserkatastrophe von Relevanz sein die Tiefen entsprechender Depressionen zu kennen, um abschätzen zu können, wie viel Zeit verstreicht, bis bei bekanntem Niederschlag die Depression überläuft. Auf der anderen Seite sind Unregelmäßigkeiten im Abflussbecken bei der Analyse von Einzugsgebieten von Nachteil.

2.3 Konventionelle Ansätze

Es existieren mehrere Ansätze, unerwünschte Depressionen und zum Teil auch Erhebungen zu erkennen und zu eliminieren. Zu nennen sind die Verfahren von M.F. Hutchinson [17], dessen Ansatz im Rahmen von ANUDEM [18] eingesetzt wurde und die Methodik von L. Martz und J. Garbrecht [19], welche in der Software TOPAZ [20] Verwendung fand. Auch semi-automatische, interaktive Prozeduren wie von A. Hasan und P. Pilesjö [21] wurden beschrieben, welche auf natürliche Artefakte, anthropogene Elemente und Fehler in den Daten, verursacht durch Interpolation oder Generalisierung, geeigneter reagieren können. Im Falle von *Hydro-Enforcement* werden zumeist *Breaklines*⁸ oder vorhandene Gewässerdaten eingesetzt, um Wasser- von Landfläche zu trennen und das Abflusskriterium einzubringen.

2.3.1 Fließrichtung

Die Simulation natürlichen Abflussverhaltens von Wasser war in der Fernerkundung und Bildverarbeitung schon häufiger Gegenstand von Untersuchungen. Das Abflussverhalten wird mit Hilfe von Fließrichtungsrastern beschrieben, welche auf Basis von

⁸ Breaklines dienen zur Identifikation von Unterbrechungen in der Neigung eines Geländes.

Höhenmodellen erstellt werden können. Die Fließrichtung stellt die Grundlage vieler hydrologischer Analysen dar.

Als Beispiel zur Ableitung von Fließrichtungen sind der *D8* [22] und der *Multiflow*-Algorithmus [23] für Rasterdaten zu nennen. *D8* ermittelt die Fließrichtung für jeden Höhenwert in Zusammenhang mit den Nachbarschaften. Die korrekte Fließrichtung wird auf Basis des Höhenmodells anhand der acht möglichen Richtungen über den niedrigsten benachbarten Höhenwert identifiziert. *Multiflow* erweitert dieses Verfahren um mehrere mögliche Abflussrichtungen.

Jeder Bildpunkt wird über die Fließrichtung mit seinen Nachbarn in Zusammenhang gebracht. Im Falle von *D8* erhält jeder Bildpunkt einen richtungsangehenden Wert entsprechend einer Konvention (hier ESRI, siehe Abb. 7).

32	64	128
16		1
8	4	2

Abb. 7: Schematische Darstellung der Bildpunktnachbarschaft bezüglich der Namenskonvention zur Abbildung der Fließrichtung

Limitierend bei diesem Verfahren sind Mulden, flache Bereiche und Erhebungen, welche den Vorgang verhindern oder das Ergebnis verfälschen können. Aus diesem Grund werden Verfahren wie *Hydro-Enforcement*, *Hydro-Conditioning* etc. vorgeschaltet, um diese Phänomene zu verhindern.

2.3.2 Hydro-Conditioning und Hydro-Enforcement Verfahren

Hydro-Conditioning

Hydro-Conditioning ist ein Vorprozessierungsschritt zur Generierung eines depressionslosen Höhenmodells. Die Aufgabe besteht darin, Mulden und Erhebungen im Höhenmodell zu identifizieren (siehe Abb. 8) und diese an die Umgebung anzugleichen, um infolgedessen eine korrekte Ableitung der Fließrichtung zu ermöglichen.

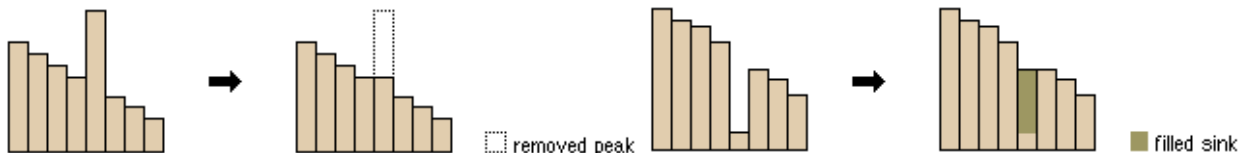


Abb. 8: Linke Abbildung zeigt die Entfernung einer unerwünschten Erhebung (Peak), Rechte Abbildung die Überbrückung einer unerwünschten Mulde (Sink); © ESRI

Der Prozess kann auf einzelne Mulden und Erhebungen, aber auch auf größere Flächen angewendet werden (siehe Abb. 9). Ausschlaggebend ist ein definierter Schwellenwert, der das Maximum des Höhenunterschieds begrenzt und der Ausschluss des Bildrandes im Rahmen des Verfahrens.



Abb. 9: Darstellung der Entfernung einer Mulde auf Pixelebene; © ESRI

Im Falle eines Einzelpunktes, der niedriger ist als alle Nachbarn, wird dieser auf den Wert des zweitniedrigsten Nachbarn gesetzt. Zur Identifikation größerer Mulden wird ein iteratives Verfahren verwendet, welches eine erweiterte Nachbarschaft überprüft. Das Resultat ist ein Höhenmodell, das für jeden Bildpunkt eine mögliche Fließrichtung herstellen kann. Infolgedessen wird es als hydrologisch korrekt bezeichnet. [24]

Hydro-Enforcement

Hydro-Conditioning modifiziert nicht zwangsläufig Gewässerhöhen in Fließgewässern und kann ein korrektes Abfließen nicht garantieren, sondern beschränkt sich auf die Entfernung von Senken und Erhebungen. Das Verfahren kann daher um ein *Stream Burning* erweitert werden, bei welchem hydrologische und topographische Informationen verwendet werden, um Fließgewässer in ein Höhenmodell einzukerben. *Stream Burning* ist eine neben vielen Methoden zur Generierung eines „*hydro-enforced*“ Höhenmodells, welches an dieser Stelle erläutert wird, um die grundsätzlichen Techniken zu beschreiben. Voraussetzung für dieses Verfahrens sind Daten zum Gewässernetzwerk. Damit diese für den *Stream Burning* Prozess verwendbar sind, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein (nach Saunders [25]):

1. Seen, allgemein Stehgewässer und Küstenlinien dürfen nicht im Datensatz enthalten sein.
2. Für jeden Flusslauf muss eine Mittellinie (*Centerline*) vorliegen.
3. Stehgewässer, die von einem Fließgewässer durchflossen werden, sollen ebenfalls mit einer *Centerline* repräsentiert werden.
4. Für verzweigte Gewässer stellt eine *Centerline* den Hauptfluss dar, wobei Nebenarme ebenfalls vorkommen dürfen, vom Hauptarm aber getrennt vorliegen sollen.
5. Der Hauptarm einer Szene soll den Szenenrand überschreiten und kann in diesem Fall ins Meer münden.
6. Vereinzelte Teile der *Centerline* dürfen nicht vorkommen.

Diese Vorverarbeitung zur Generierung eines dendritischen⁹ Gewässerdatensatzes erfordert einen hohen manuellen Aufwand, da genannte Bedingungen schwer automatisierbar sind. Für das anschließende *Stream Burning* Verfahren sind grundsätzlich vier Schritte erforderlich:

1. Rasterung des vektoriell vorliegenden hydrologischen Datensatzes
2. Extraktion der Gewässerhöhen entlang des Flussnetzwerks
3. Manipulation der Höhen zur Sicherstellung einer Abflussrichtung zum Auslass
4. Definierter vertikaler Höhenunterschied zwischen Land- und Wasserbereich

Im Speziellen sollen zwei *Stream Burning* Verfahren erläutert werden.

Der Algorithmus *AGREE* [26] umfasst neben dem eigentlichen Einkerbigen des Flusses in das Höhenmodell eine Modifikation der Uferbereichshöhen (*Buffer*), welche entsprechend eines gesetzten Parameters linear zur Centerline abnehmen. Auf diese Weise entsteht im Querschnitt ein Kerbtal, welches die Ermittlung der Fließrichtung im Nachhinein erleichtert. Zusätzlich werden die Höhen entlang der Centerline entsprechend eines weiteren Parameters (*smoothdrop*) und der Hangneigung innerhalb der Bufferzone abgestuft.

Ein weiteres *Stream Burning* Verfahren *Expocurv* nach Saunders [25] legt eine Exponentialfunktion zwischen dem niedrigsten und höchsten Wert innerhalb der Centerline an und passt die Höhen dieser Kurve an. Zusätzlich wird die Maximalbeziehungsweise Minimalhöhe an den Anfang respektive das Ende der Centerline gesetzt. Zur Integration in das Höhenmodell wird ein vertikaler Offset über das Minima einer lokalen Nachbarschaft berechnet.

Im Anschluss an das *Stream Burning* Verfahren müssen mit Hilfe eines *Hydro-Conditionings* Senken gefüllt werden. Das Höhenmodell ist daraufhin „*hydro-enforced*“ und garantiert ein simulierbares Abfließen von Wasser in den anfangs definierten Gewässern, wobei Brücken, Dämme und ähnliche Objekte in der Regel bei diesem Verfahren durchbrochen werden. Diese Tatsache kann je nach Anwendungsbereich eine gewünschte Eigenschaft sein.

⁹ bezeichnet ein baumartig verzweigtes Gewässernetz

2.3.3 Hydrologische Analysen

Aufbauend auf den korrigierten Höhenmodellen können hydrologische Analysen durchgeführt werden. Nach der bereits erwähnten Ableitung der Fließrichtung kann die Flussakkumulation berechnet oder das Einzugsgebiet ermittelt werden.

Diese beiden Verfahren werden exemplarisch kurz erläutert.

Flussakkumulation

Die Flussakkumulation bestimmt für jeden Bildpunkt, der Teil des Fließrichtungsrasters ist, die Menge inkorporierter Zellengewichte bezüglich der Fließrichtung. Versinnbildlicht wird auf diese Weise eine virtuelle¹⁰ und keine tatsächliche Abflussmenge in Kubikmetern ermittelt. Die für jede Zelle initial mit 1 bemessene Gewichtung des Abflusses akkumuliert sich entsprechend der ermittelten Fließrichtung flussabwärts in den Zellen. Die Abbildung 10 zeigt links ein Fließrichtungsraster mit den D8-spezifischen Fließrichtungen, so dass die Zelle 2,4 im rechten Flussakkumulationsraster die Gewichtung 20 enthält, da die zwei Zellen 1,4 und 1,3 des linken Fließrichtungsrasters entsprechend ihrer Fließrichtung in Zelle 2,4 münden. Der Auslass enthält somit die Gewichte aller Zellen entgegen der Fließrichtung.

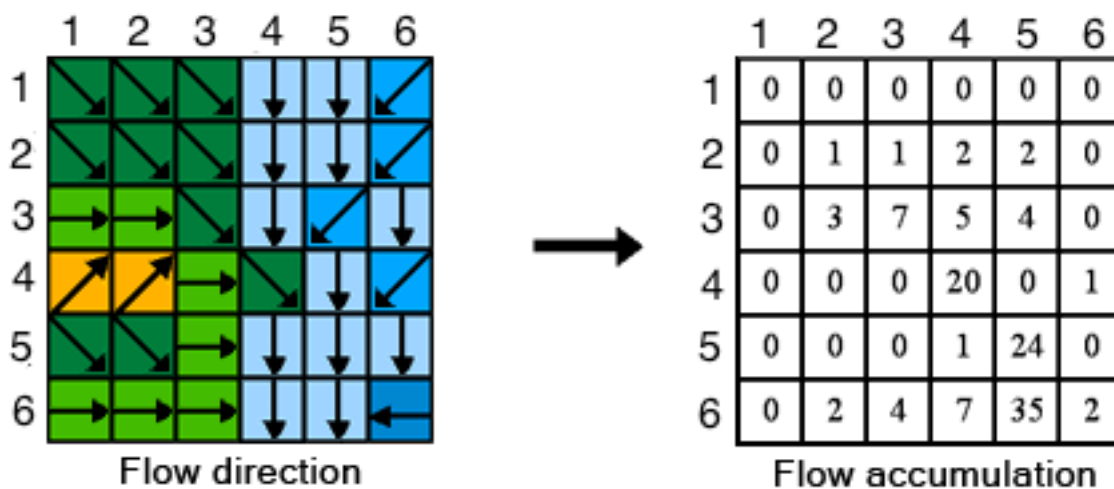


Abb. 10: Abgeleitete Fließrichtung (links), ermittelte Flussakkumulation (rechts); © ESRI

Über die Abflussmenge lassen sich bei fehlender Kenntnis des Gewässernetzes Kanten im Gelände als auch Flussläufe identifizieren.

¹⁰ virtuelle Abflussmenge bezeichnet eine unechte, simulierte Akkumulation von Wasser, die aufgrund fehlender Parameter (z.B. Wassertiefe) keine tatsächliche Abflussmenge darstellen kann, jedoch für weitere Analysen nutzbar ist.

Einzugsgebiet

Als Einzugsgebiet (siehe Abb. 11) bezeichnet man die Fläche, aus der ein Gewässersystem seinen Abfluss bezieht. Die Grenze eines Einzugsgebiets ist die Wasserscheide, wobei der Auslass zumeist die Mündung ins Meer darstellt.

Auf Basis des Fließrichtungsrasters kann das Einzugsgebiet ermittelt werden, wenn der Auslass bekannt ist. Entgegen der Abflussrichtung werden alle Wasserläufe summiert, die im Auslass münden und so die Grenzen des Einzugsgebiets festlegen. Es hängt von der Platzierung des Auslasses ab, welche Dimension und damit Nutzungszweck für die Bestimmung des Einzugsgebiets vorgesehen ist.

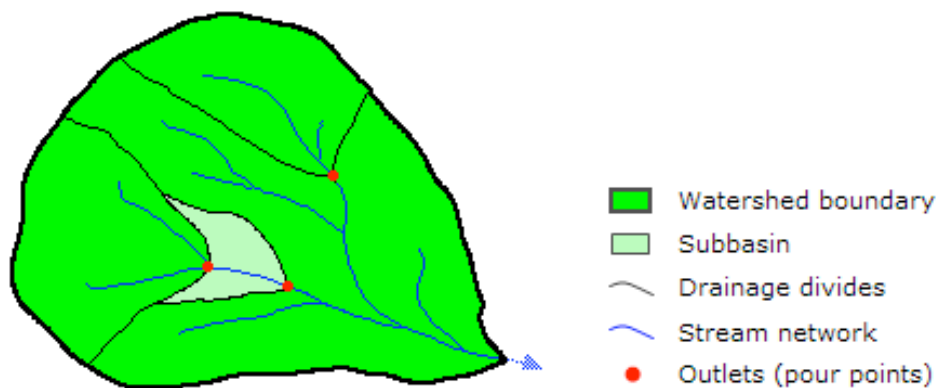


Abb. 11: Beschreibung eines Einzugsgebietes; © ESRI

2.3.4 Verfügbare Software für die hydrologische Korrektur von DEMs

Im vorherigen Abschnitt wurden bereits zwei Ansätze, ANUDEM und TOPAZ, genannt, welche DEMs hydrologisch korrigieren können. Weitere Softwarepakete, die eine ähnliche Funktionalität besitzen, sind TecDEM [27], TAUDEM [24] und besonders hervorzuheben ArcHydro [28]. Letzteres hat sich ähnlich wie ArcGIS im Bereich der Geoinformationssysteme (GIS) zum De-facto-Standard entwickelt, wobei die Funktionalität weit über die hydrologische Korrektur hinaus geht und zusätzliche Schwerpunkte setzt.

Die unterschiedlichen Softwarepakete unterscheiden sich beim eigentlichen Vorgang des *Hydro-Conditionings* nicht in nennenswerter Art und Weise, da allen ein Füllen der Senken zu Grunde liegt und die Ergebnisse zum Teil identisch sind (siehe Abschnitt Limitationen). Bezüglich des *Hydro-Enforcements* von Höhenmodellen gibt es starke methodische und qualitative Unterschiede zwischen den Softwarepaketen, eine Verarbeitung von Oberflächenmodellen ist jedoch mit keiner Software vorgesehen.

2.3.5 Beispiele für ähnliche Untersuchungen und Datenprodukte

Da die hydrologische Korrektur von Höhenmodellen stark abhängig von der Aufgabenstellung sein kann, gibt es viele Beispiele, die individueller Natur sind. Zu bemerken ist dennoch, dass eine Vielzahl der Untersuchungen auf Basis von LiDAR-Daten ([29],[30]) durchgeführt wurden und über Stereodaten abgeleitete Oberflächenmodelle, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, noch nicht als Datengrundlage dokumentiert wurden.

LiDAR

LiDAR ist aufgrund seiner Aufnahmemethodik dazu geeignet, Geländemodelle abzuleiten. Einige hydrologische Fragestellungen konnten mit diesen Daten bearbeitet werden. Sean Vaughn [31] dokumentiert die Ableitung von Einzugsgebieten mit Hilfe von hydrologisch korrigierten LiDAR-Geländemodellen im Rahmen eines bundesstaatlichen Projekts in Minnesota, USA. Die Schwierigkeiten, die durch die hochauflösenden LiDAR-Daten auftreten, sind zugleich auch ein enormer Vorteil bei der Modellierung kleinräumiger Phänomene. Geringe Unregelmäßigkeiten im Höhenmodell wirken sich bei der notwendigen sensiblen Parametrisierung stärker aus, so dass einige Verfahren scheitern können (siehe Abb. 12). Andererseits erlaubt die Auflösung die Detektion feingliedriger Strukturen im Höhenmodell.

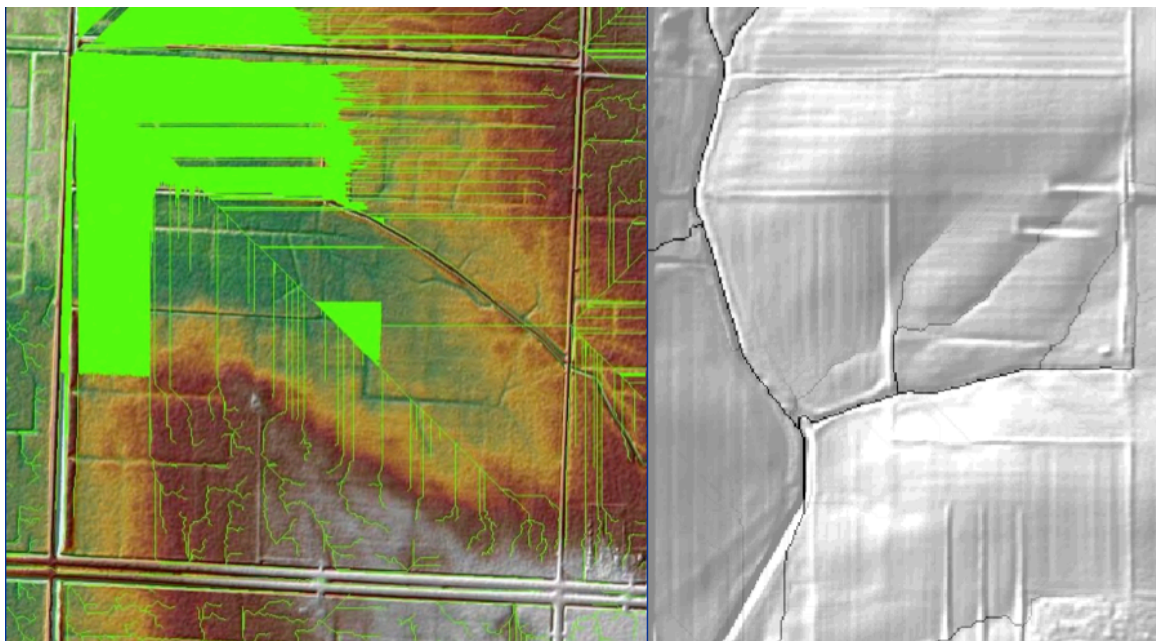


Abb. 12: Links: gescheiterte Ableitung der Hydrologie, rechts: gelungene Extraktion der Gewässer; (Sean Vaughn, 2010)

LiDAR hat sich zu einer beliebten Datenquelle in der hydrologischen Modellierung entwickelt. So werden LiDAR-Daten auch in nationalen Monitoringprojekten zum Küstenschutz in Australien verwendet [32], bei welchem vor dem Hintergrund des Klimawandels Hochwasserszenarien simuliert werden können.

SRTM

Auf der anderen Seite steht das Höhenmodell SRTM, welches für einen Großteil der Erde zur Verfügung steht. Hydrologisch korrigierte, zum Teil global vorhandene Datensätze wie HydroSHEDS [33] basieren auf SRTM-Daten, so wie der von der *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) editierte Datensatz *SRTM Water Body Data* (SWBD).

SWBD besitzt definierte Editierregeln, die eine weltweite Datenkonsistenz garantieren sollen. Darüber hinaus ermöglicht die Identifikation von Wasser über orthorektifizierte Landsat-Mosaik die Editierung von Ozeanen, Fließgewässern und Seen.

Hierbei wurden Seen auf einen konstanten, von den Uferhöhen abhängigen Wert gestuft und Ozeane auf null gesetzt. Flüsse wurden entsprechend ihrer Fließrichtung monoton abgestuft. Ebenso wurden Küstenlinien extrahiert.

Ursprünglich war SWBD ein Nebenprodukt zur Fertigstellung des *Data Level 2* (DTED 2) SRTM-Datensatzes, dient dieser Arbeit aber als Vorbild, da nur Flächen editiert werden, die als Wasser identifiziert wurden. SWBD stellt hiermit einen Unterschied zu den Ansätzen des *Hydro-Enforcements* oder *Hydro-Conditionings* dar, welche grundsätzlich Gesamtscenen als Datengrundlage verwenden.[34]

2.4 Limitationen und technische Herausforderungen

Die vorgestellten Verfahren, Untersuchungen und Softwarepakete sind nicht in geeignetem Maße in der Lage, IRS P5 Oberflächenmodelle hydrologisch zu korrigieren. Dieses Kapitel fasst die Einschränkungen und die damit einhergehenden technischen Herausforderungen zusammen, Oberflächenmodelle hydrologisch verarbeiten zu können.

2.4.1 Oberflächenmodell

Matching

IRS P5 Oberflächenmodelle, welche mit dem Semiglobal Matching Algorithmus erstellt wurden, zeichnen sich durch eine gute Repräsentation der Objekte in urbanen Gegenden aus, sind im Bereich von Wasserflächen aber oft fehlerhaft.

Unabhängig von der gegebenen Mehrfachabdeckung, die ein potentiell besseres Matchingergebnis verspricht, bestehen aufgrund der Reflexions- und Textureigenschaften von Wasseroberflächen erschwerte Verhältnisse im Rahmen des Matchingverfahrens. Identifizierte Matchingpartner sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Fehler und drücken sich infolgedessen als falsche Höhenwerte aus. Auch das als *Voidfilling* bezeichnete Ersetzen von *Voids* durch valide Höheninformation kann nicht garantieren, dass Gewässerhöhen korrekt sind. Es muss davon ausgegangen werden, dass vorhandene Gewässerhöhen (siehe Abb. 13) unzuverlässig sind und nicht als Grundlage für eine hydrologische Korrektur verwendet werden können.

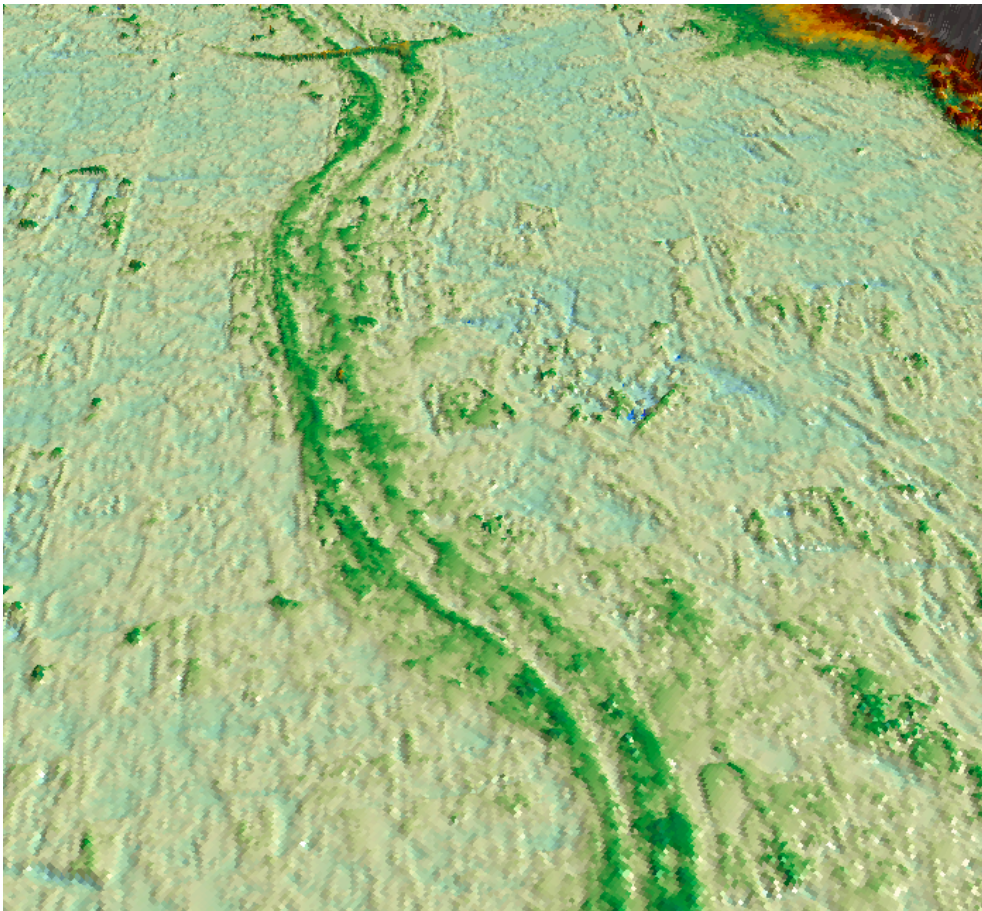


Abb. 13: Dreidimensionale Darstellung eines unbearbeiteten, gefüllten Oberflächenmodells. Flussverlauf in der Mitte des Bildes kann Gewässerhöhen nicht korrekt abbilden.

Auflösung

Das Stereobildpaar liegt in einer Auflösung von 2,5 m vor, das resultierende Oberflächenmodell besitzt eine Auflösung von 5 m. Analog zu LiDAR-Höhenmodellen bringt diese Tatsache Vor- und Nachteile mit sich. Neben der größeren Fehleranfälligkeit

und der Möglichkeit einen größeren Detailgrad abzubilden, stehen diesen Aspekten die höhere Prozessierungszeit und Abhängigkeit von Sekundärdaten gegenüber, die für die hydrologische Korrektur von IRS P5 Oberflächenmodellen unerlässlich sind.

Abbildung der Morphologie

Die größte Einschränkung für die Verarbeitung von Oberflächenmodellen im hydrologischen Sinne ist ihr Charakteristikum selbst. Die Höhendarstellung von Objekten, die nicht Teil der Morphologie sind, erschwert die hydrologische Verwendbarkeit enorm. Infolgedessen kann im Zusammenhang mit den unzuverlässigen Höhen in Wasserflächen und den hydromorphologisch irrelevanten Höhen keine direkte Aussage über das Abflusskriterium getroffen werden.

2.4.2 Algorithmik und Verfahren

Hydro-Conditioning und Hydro-Enforcement

Die Grundlage für weiterführende hydrologische Analysen ist eine Korrektur des Höhenmodells. *Hydro-Conditioning* basiert auf einem Identifikations- und Füllverfahren für Depressionen im Höhenmodell. Dabei ist es entscheidend, dass es sich um morphologische Höhen handelt, welche nicht ohne Vorverarbeitung von den Objekthöhen im IRS P5 Oberflächenmodell unterscheidbar sind. Aufgrund dessen ist *Hydro-Conditioning* als globales Korrekturverfahren für Oberflächenmodelle per Definition ungeeignet.

Hydro-Enforcement erfordert für die Einbringung des Abflusskriteriums Sekundärdaten zum Gewässersystem. Der generische *Stream Burning* Prozess bedient sich vorhandener Gewässershöhen, die im Falle von IRS P5 unzuverlässig und damit unbrauchbar sind. Somit stellt *Hydro-Enforcement* bei vorhandenen Gewässerdaten und reliablen Höhen grundsätzlich eine Möglichkeit dar, Oberflächenmodelle zu verarbeiten.

Hydrologische Analysen

Hydrologischen Analysen wie die Ableitung der Fließrichtung oder die Flussakkumulation liegt das gesamte Höhenmodell zu Grunde, um hydrologische Zusammenhänge sichtbar zu machen. Ausschließlich Geländemodelle ermöglichen die uneingeschränkte Funktionalität dieser Verfahren, da selbst ein hydrologisch korrektes Oberflächenmodell, welches in detektierten Wasserbereichen editiert wurde, störende Elemente enthalten kann und somit nur partielles Analysepotential besitzt. Hydrologische Analysen auf Oberflächenmodellen

müssen dementsprechend modifiziert werden, so dass beispielsweise die Fließrichtungskarten nicht über Verfahren wie *D8*, sondern anhand der entwickelten Abflusskriterien abgeleitet werden (siehe Kapitel 5).

Analysen bezüglich des Einzugsgebietes oder der Flussakkumulation sind aufgrund des grundsätzlichen globalen Ansatzes ebenfalls nur bedingt durchführbar. Das Einzugsgebiet kann teilweise mit einer Wassermaske beschrieben werden, wobei dessen Definition insofern darüber hinausgeht, dass auch Bereiche, welche normalerweise kein Wasser führen und auf diese Weise nicht in der Wassermaske erscheinen, Teil des Einzugsgebietes sein können. Analog verhält es sich bei der Flussakkumulation, bei welcher nur detektierte Wasserbereiche für die Berechnung herangezogen werden können.

Somit begründet sich die Limitation bei Oberflächenmodellen hinsichtlich ihrem hydrologischen Analysepotential bei jenen Verfahren in der ausschließlichen Behandlung detektierter Wasserbereiche.

Automatisierung

Die aufgezeigten Methoden und Verfahren sind zum Teil mit manuellem Aufwand verbunden. Der zur Generierung der IRS P5 Oberflächenmodelle zugrunde liegende Workflow ist weitestgehend automatisiert. Zwar handelt es sich bei der hydrologischen Korrektur um ein *Postprocessing*-Verfahren, dennoch wird eine Minimierung der manuellen Arbeit als Vorteil betrachtet. Zudem wird angestrebt, große Datensätze zu prozessieren und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen.

2.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Verfahren und Programme sind nur bedingt in der Lage, IRS P5 Daten hydrologisch zu korrigieren. Somit erfordert dies eine Modifikation vorhandener Techniken, um eine ideale Anpassung an den Datensatz wie auch an die Fragestellung zu erreichen.

In den folgenden Kapiteln wird auf die drei essentiellen Schritte eingegangen, die zur Ableitung eines nach hydrologischen Kriterien korrigierten IRS P5 Oberflächenmodells notwendig sind.

Im ersten Schritt wird aus Landsat-5 und Landsat-7 Daten unter Zuhilfenahme von SRTM-Daten eine Wassermaske erstellt. Um der Auflösung von 5 m des Oberflächenmodells gerecht zu werden, wird die Wassermaske im zweiten Schritt mit Hilfe eines segmentierten IRS P5 Orthobildes und auf Basis eines *Region Growing*-Algorithmus geschärft. Im dritten Schritt wird denjenigen Uferhöhen, die den Qualitätskriterien aus den Qualitylayern oder der Texturanalyse des Orthobildes entsprechen, ein Abflusskriterium

zugeteilt und auf die nächstgelegene Stelle der Flussmitte gesetzt, von welcher aus in einem weiteren *Region Growing*-Verfahren die abgeleiteten Höhen in den gesamten Bereich der geschärften Wassermaske übertragen werden. Die modifizierten Höhen werden zum Schluss ins Oberflächenmodell geschrieben.

Die Ermittlung der Gewässerflächen mit Hilfe von Landsat-Aufnahmen und der Wassermaskenschärfungsprozess sind bereits im operationellen und teiloperationellen Stadium und wurden nicht im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, werden im Sinne der Vollständigkeit dennoch erläutert.

3. Wassermaskenerstellung

3.1 Einleitung

Im letzten Abschnitt wurden die SRTM Water Body Data Files als Beispiel für einen hydrologisch korrigierten Datensatz genannt. Zur Identifikation der Wasserflächen und der Uferlinien wurden Landsat-5 Orthobilder verwendet. Zusätzlich werden SRTM-Daten verwendet, um Hang- und Wolkenschatten von Wasserflächen zu unterscheiden. Voraussetzung hierfür war, dass die Bilder einen ähnlichen Aufnahmezeitpunkt haben wie die SRTM-Daten, damit eine gute Übereinstimmung der Wasserflächen mit dem Höhenmodell möglich ist. Anhand der Landsat-5 Bilder konnten Wassermasken abgeleitet werden, welche als Grundlage für die hydrologische Modellierung dienen. Neben der Identifikation der Wasserflächen haben Wassermasken zudem den Vorteil, über Szenengrenzen hinweg die Modellierung von Gewässernetzwerken zu ermöglichen, was im Rahmen einer Weiterentwicklung des Verfahrens von Vorteil sein kann. Auf Basis der Idee zur Generierung der SRTM Water Body Datensatzes zuerst Wasserflächen zu identifizieren und dann zu verarbeiten werden auch die IRS P5 Oberflächenmodelle verarbeitet.

3.2 Verfahren

Die Datengrundlage zur Wassermaskenableitung setzt sich aus Landsat-5 und Landsat-7 des GLS-Projekts sowie dem PlanetObserver DEM zusammen.

Für die Ableitung der Wassermaske wurden TM (Landsat-5) und ETM+ (Landsat-7) Orthobilder der Bänder 1 (Blau), 4 (NIR¹¹), 5 (MIR¹²) und 7 (MIR) verwendet. Zur großflächigen Prozessierung werden die Bilder ohne Histogrammanpassung und *Seamlines*¹³ mosaikiert. Das Einzelbandmosaik und die entsprechende SRTM-Kachel werden im Anschluss auf die betreffenden *Area of Interest* (AOI) zugeschnitten.

Zur Extraktion der Wasserinformation wird der *Normalized Differenced Water Index* (NDWI) mit der Gleichung

$$NDWI = \frac{4(NIR) - 5(MIR)}{4(NIR) + 5(MIR)}$$

¹¹ NIR - nahes Infrarot bezeichnet Wellenlängenbereich von 780 nm bis 3 μ m

¹² MIR - mittleres Infrarot bzw. IR-B ab 1,4 μ m; dient zur Abgrenzung der Wasserabsorption

¹³ Definierte Szenengrenze zur Mosaikierung von Bildern - wird so gewählt, dass Mosaikierung möglichst unsichtbar und natürlich wirkt

und ein zusätzlicher Schwellenwert für Band 7 (MIR) angewendet. Die Schwellenwerte wurden empirisch festgelegt und werden bei Bedarf an das Gebiet angepasst.

Die SRTM-Höhendaten werden mithilfe einer Hangneigungsklassifikation in die Gewässerdetektion miteinbezogen. Hierbei werden nur Bereiche als Wasser klassifiziert, welche Hangneigungen unter 10° und über 70° aufweisen. Der Grund hierfür ist die sonst unvermeidliche Fehldetektion von Hangschatten und Küstenlinien. Küstenbereiche erhalten in SRTM sehr starke Hangneigungen, da für große Gewässerflächen keine Höheninformation vorhanden ist. Zudem können bei Landsat-Bildern in Hangbereichen Schatten auftreten, welche durch das radargestützte Verfahren nicht berücksichtigt werden und so aufgrund ihrer Lage ausgeschlossen werden können.

Das Resultat ist eine binäre Wassermaske mit einer Auflösung von 30 m.

3.3 Probleme

Die Klassifikation basiert auf Ratio- und Schwellenwertbildung. Als Vorteil ist die hohe Prozessierungsgeschwindigkeit bei großen Datensätzen und die einfache Implementierung in jegliche Art von Workflow zu betrachten. Die Einbeziehung eines Hangneigungskriteriums und dem damit verbundenen Abfangen von Fehlklassifikationen in Bereichen von Hangschatten und Küstenbereichen ist vorteilhaft.

Andererseits wird kein dynamisches Klassifikationsmodell verwendet, welches in Abhängigkeit des Gebiets optimale Klassifikationsparameter ermittelt, so dass bei diesem Verfahren Fehlklassifikationen auftreten können.

Aufgrund dessen wird im Prozess zur Schärfung der Wassermaske eine Fehlerminimierung angestrebt, indem weitere Klassifikationsmechanismen unter Ausnutzung der höheren Bearbeitungsauflösung verwendet werden.

3.4 Aktueller Stand

Inzwischen wurde die Wassermaske für große Teile Europas, den Nahen Osten und Nordafrika bei der GAF AG prozessiert. Dies geschah nicht nur in Hinblick auf die zukünftige Generierung einer geschärften Wassermaske, sondern ebenso um weitere Produkte aus diesen Daten abzuleiten. Aus Gründen der Qualitätssicherung wurden die Wassermasken zum Teil manuell nachbearbeitet.

4. Wassermaskenschärfung

Die abgeleiteten Wassermasken besitzen die ursprüngliche Landsat-5 beziehungsweise Landsat-7 Auflösung von 30 m. Im Falle des SWBD-Datensatzes wird diese Auflösung SRTM gerecht, muss aber im Falle von IRS P5 Daten verbessert werden.

4.1 Entwicklung der Idee

IRS P5 Stereobilder besitzen eine Auflösung von 2,5 m, das daraus abgeleitete Oberflächenmodell 5 m. Die binäre Information über das Vorkommen von Wasser muss entsprechend dieser Auflösung ebenfalls 2,5 m oder 5 m betragen.

Ein einfaches *Resampling* der Wassermaske auf 2,5 m erzielt keinen Informationsgewinn, so dass ein Verfahren angewendet werden muss, bei welchem die Wassermaskeninformation und die bessere Auflösung berücksichtigt werden.

Die ursprüngliche Idee umfasste eine Segmentierung¹⁴ des IRS P5-Afterorthobildes mit anschließender Betrachtung des Überlappungsgrades einzelner Segmente mit der Landsat-Wassermaske.

Im segmentierten Orthobild ist der Unterschied zwischen Land- und Wasserfläche im Idealfall gut erkennbar. Auf diese Weise besitzen die Bildsegmente eine eindeutige Zugehörigkeit als Wasser- bzw. Landsegmente. Eine Überlagerung des segmentierten Orthobildes mit der Landsat-Wassermaske erlaubt die Ermittlung eines Überlappungsgrades der als Wasser klassifizierten Bereiche mit den Bildsegmenten des Orthobildes. Anhand eines definierten Überlappungsgrades konnten entsprechende Segmente als Wassersegmente klassifiziert werden. Hierdurch kann die Genauigkeitsaussage zu Wasserinformation analog zur Auflösungsverbesserung erhöht werden.

Für die Segmentierung wurden unterschiedliche Segmentierungsalgorithmen untersucht und getestet, wobei die besten Ergebnisse mit dem *Region Growing*¹⁵ Verfahren erzielt wurden.

Die erste lauffähige Version dieses Verfahrens wurde im *ERDAS Model Maker* in der *Spatial Modeller Language* (SML) umgesetzt.

¹⁴ Unter Segmentierung versteht man die Unterteilung eines Bildes in homologe Bereiche

¹⁵ Region Growing ist ein Segmentierungsverfahren, welches von initial definierten Bildpunkten (Seeds) ausgehend die Nachbarschaft nach Homogenitätskriterien untersucht. Bei Übereinstimmung wird iterativ ein Regionenwachstum eingeleitet bis alle Bildbereiche besucht wurden.

4.2 Limitationen

Problematisch bei diesem Verfahren sind unter anderem Fehldetektionen in der Landsat-Wassermaske, ein Lageversatz zwischen den beiden Datensätzen und die Qualität der Segmentierung.

Die Landsat-Wassermaske wird mit Hilfe von Ratios und Schwellenwerten in einem automatischen, teilmoderierten Prozess abgeleitet und nicht mit fehlerresistenteren Verfahren wie *überwachter Klassifikation* oder *objektorientierten* Ansätzen, was auf der einen Seite zu einem Geschwindigkeitsvorteil führt, aber auch Fehldetektionen erhöhen kann. Derartige Fehldetektionen können sich bei der Wassermaskenschärfung fortsetzen.

Ein weiteres Problem ist der Lageversatz zwischen den Datensätzen. Resultierend aus unterschiedlichen Georeferenzierungsverfahren und abhängig von der Position auf der Erde¹⁶ [35] führt der Lageversatz zu Schwierigkeiten, den korrekten Überlappungsgrad zu bestimmen und die entsprechenden Segmente zu klassifizieren.

Neben diesen Faktoren ist die Qualität der Segmentierung ausschlaggebend, um eine gute Repräsentation der Wasserflächen im IRS P5 Bild zu erreichen. Waren die Segmente zu groß, war der Überlappungsgrad zu gering. Umgekehrt hatten kleinere Segmente einen ausreichend hohen Überlappungsgrad, waren aber nicht Teil der Wasserfläche, wurden sie fälschlicherweise Teil der neuen Wassermaske.

Zur Kompensation dieser Problemquellen muss das Verfahren adaptiver gestaltet werden.

4.3 Verbesserung des Verfahrens und Funktionsweise

Die Ausgangssituation zeigt das Orthobild und die überlagernde Landsat-Wassermaske (in Abb. in blauer Farbe) mit Fehlklassifikationen sowie einem leichten Lageversatz (siehe Abb. 14). Zur Kompensation dieser Störungen wird die Segmentierung an den Datensatz dahingehend angepasst, indem die Landsat-Wassermaske als *Seedmaske* fungiert. Zudem wird zur Verbesserung des Segmentierungsergebnisses das Orthobild mit einem Tiefpassfilter geglättet.

¹⁶ Der Datensatz GLS 2000 variiert in Abhängigkeit vom Aufnahmegebiet in der Lagegenauigkeit



Abb. 14: Die Landsat-Wassermaske überlagert das IRS P5 Orthobild

Die für das Region Growing notwendigen Seeds werden initial nur innerhalb der Wassermaske platziert. Zum einen werden hierbei zugunsten der Geschwindigkeit lediglich relevante Bildbereiche segmentiert, zum anderen können infolgedessen die obligatorischen Wachstums- und Homogenitätsbedingungen während des Region Growings dynamisch an das entsprechende Gebiet - im Idealfall Wasserflächen - angepasst werden.

Hierzu wird eine dynamische Regionsstatistik gebildet, welche anfangs aus den in der Seedmaske platzierten Seeds und den dazugehörigen Grauwerten gebildet wird. Die Regionsstatistik wird durch den Mittelwert und die Standardabweichung der Grauwerte für jede Region beschrieben. Mit Hilfe dieser Statistik und statischer Schwellenwerte, die vor dem Prozess definiert werden können, wird die Ähnlichkeit neuer Bildpunkte zu einer Region festgestellt und um solche bei gegebener Eignung vergrößert. Mit jedem hinzugewonnenem Bildpunkt ändert sich die Regionsstatistik und kann auf individuelle Bildcharakteristika reagieren. Das Regionenwachstum ist beendet, wenn keiner der benachbarten Bildpunkte den Homogenitätskriterien entspricht oder die definierte Maximalgröße einer Region erreicht ist. Im Anschluss an die Segmentierung wird überprüft, ob Regionen, die kleiner als ein definierter Schwellenwert sind und von einer anderen Region umgeben sind, in diese aufgenommen werden.



Abb. 15: Segmente/Regionen (jedes Segment besitzt eigene Farbe) aus der Orthobildsegmentierung

Abbildung 15 zeigt die abgeschlossene Segmentierung eines Orthobildes des ausgewählten Ausschnitts. An diesem Beispiel wird erkennbar, dass neben der guten Abgrenzung des Gewässers zum Uferbereich ausgehend von fehlklassifizierten Bereichen in der Landsat-Wassermaske ebenso Regionen gewachsen sind.



Abb. 16: Segmente/Regionen und Landsat-Wassermaske überlagern Orthobild

Anhand der Abbildung 16, bei welcher zusätzlich die Landsat-Wassermaske dargestellt ist, wird deutlich, wie das Ausschlussverfahren über den Überlappungsgrad zwischen Segmentierungsergebnis und Wassermaske zum Tragen kommt. Nur Segmente mit einem gewissen Überlappungsgrad mit der Landsat-Wassermaske werden beibehalten und bilden die geschärfte Wassermaske. Das Endergebnis (siehe Abb. 17) stellt nun bei richtig eingestelltem Minimalüberlappungsgrad ausschließlich die relevanten Segmente dar, welche das Gewässer abbilden.



Abb. 17: Fertig geschärfte Wassermaske auf Orthobild

4.4 Zusammenfassung

Dieses dynamische Verfahren bietet einerseits die Möglichkeit hochauflösende Wassermasken zu generieren, welches Klassifizierungsfehler aus der Landsat-Wassermaske kompensieren kann, erlaubt jedoch andererseits keine vollständige Automatisierung, da die Schwellenwerte der Segmentierung und der Überlappungsgrad szenenabhängig manuell bestimmt werden müssen. Das Verfahren arbeitet zuverlässig und schnell, dennoch steht das Ergebnis in starker Abhängigkeit zum Datensatz, so dass unter Umständen eine manuelle Nachbearbeitung unvermeidbar ist.

Die Wassermaskenschärfung ist ein wichtiger Vorverarbeitungsschritt des Verfahrens zur hydrologischen Korrektur von Oberflächenmodellen und ist inzwischen Bestandteil der Applikation *GAFmap* der GAF AG [36]. Im Kapitel zur Ergebnisbesprechung wird die Wassermaskenschärfung praktisch angewendet.

5. Hydrologische Korrektur des Oberflächenmodells

Im allgemeinen Kapitel zur hydrologischen Korrektur wurde auf die Begriffs- und Bedeutungsunterschiede von *Hydro-Conditioning*, *Hydro-Flattening* und *Hydro-Enforcement* eingegangen. Gegenstand dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Verfahrens zur hydrologischen Korrektur eines IRS P5 Oberflächenmodells, welches in MATLAB umgesetzt wurde.

Analog zum Verfahren zur Korrektur der SRTM-Daten (siehe SWBD, Kap. 2.3.5) werden nur die Flächen modifiziert, die als Wasser identifiziert wurden. Einschränkend bei diesem Prozess ist die ausschließliche Behandlung der Fließgewässer. Weitere Gewässertypen sind Gegenstand zukünftiger Entwicklungen.

Der Korrekturprozess gliedert sich in drei Bearbeitungsschritte. Am Anfang steht die Identifikation und Auswahl geeigneter Höhen, welche in Anlehnung an das *Hydro-Enforcement* Verfahren im zweiten Schritt entsprechend der Fließrichtung ein Abflusskriterium zugewiesen bekommen. Zuletzt werden die betroffenen Flächen im Oberflächenmodell editiert.

5.1 Höhenidentifikation und -extraktion

Für den Korrekturprozess müssen Höhen aus dem Oberflächenmodell ausgewählt werden, da im Gegensatz zu Geländemodellen nicht jeder Höhenwert im Rahmen der Hydrologie eines Geländes repräsentativ und damit verwendbar ist. Diese Höhen werden als Stützpunkte verwendet und können entweder in Wasserbereichen selbst oder in der Nähe definiert werden. Im nächsten Schritt werden diese Stützpunkthöhen entsprechend des Abflusskriteriums verarbeitet.

5.1.1 Höhendetektion

Höhen in Gewässerbereichen

Aufgrund der Reflexions- und Oberflächeneigenschaften von Wasser erscheinen Wasserflächen in beiden Bildern des Stereobildpaares in unterschiedlicher Art und Weise. Das zugrundeliegende stereoskopische Verfahren zur Ermittlung des Höhenwertes, welches geeignete Matchingpartner in beiden Stereobildern identifiziert, wird hierdurch maßgeblich erschwert. Daraus resultiert zumeist die Ableitung falscher Bildkorrespondenzen und damit Disparitäten, was sich in fehlerhaften Höhen ausdrückt. Es treten ebenso vermehrt Voidbereiche auf.

Die Kombination von fehlerhaften Höhen und Voidbereichen lässt sich auch durch Interpolations- oder Füllvorgänge nicht korrigieren, da wie in Kapitel 2.4.1 bereits erläutert wurde nicht davon ausgegangen werden kann, dass vorhandene Gewässerhöhen korrekt sind.

Im unbearbeiteten Oberflächenmodell wird sichtbar, wie gering die Anzahl von Höhen in Gewässerbereichen im Vergleich zur Landfläche ist. (siehe Abb. 18).

Eine Verwendung dieser Höhen als Grundlage für eine hydrologische Korrektur, wie es im Rahmen der konventionellen Ansätze üblich ist, gilt es auszuschließen.

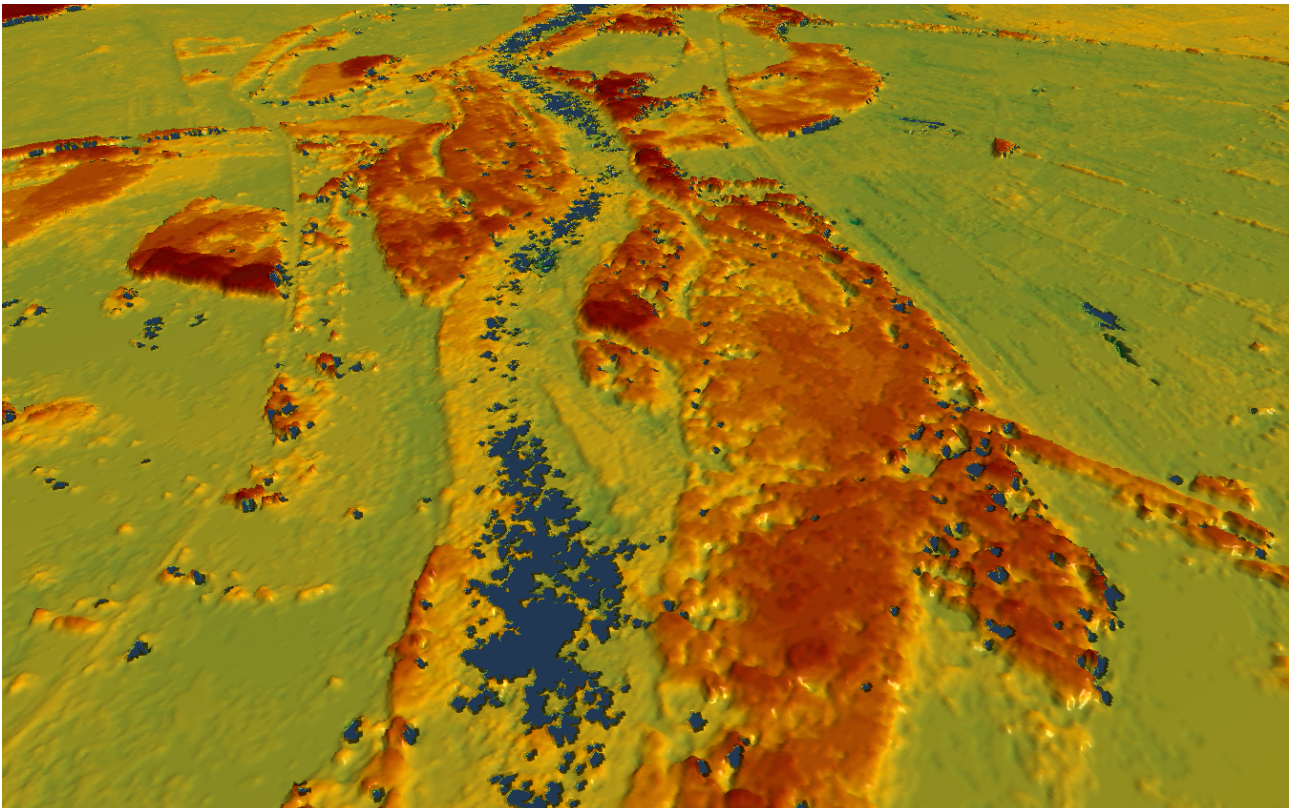


Abb. 18: Dreidimensionale Oberflächenmodelldarstellung eines Ausschnitts der Szene ‚Drau‘. Das Oberflächenmodell weist einige Voidbereiche im Gewässerbereich auf.

Höhen in Uferbereichen

Anhand der geschärften Wassermaske lassen sich Uferbereiche identifizieren. Höhen im Uferbereich sind im Falle von Oberflächenmodellen in der Regel zuverlässiger als Höhen in Gewässerbereichen, bilden aber nur indirekt die Höhe des Gewässers ab. Steilufer, Bebauung, Brücken, Vegetation und andere Artefakte in Ufernähe repräsentieren nicht zwangsläufig die Gewässerhöhe und erschweren die Höhenidentifikation. Eine Klassifikation geeigneter Höhen zur Bildung von Höhenstützpunkten und eine

anschließende Korrektur sind unerlässlich. Zusätzlich müssen die entsprechenden Höhen in Zusammenhang mit dem Gewässerbereich gebracht werden.

Die Verwendung von Uferhöhen für die hydrologische Korrektur ist jedoch grundsätzlich möglich.

5.1.2 Höhenklassifikation

Die Stützpunkthöhen, die im Uferbereich liegen müssen, sind aufgrund der Charakteristika eines Oberflächenmodells nicht unklassifiziert, das heißt ohne Auswahl geeigneter und zuverlässiger Höhen, verwendbar. Auf Basis von Qualitylayern, eines Orthobildes und des Oberflächenmodells können reliable Höhen identifiziert werden. Es ist in der Praxis dem Benutzer überlassen, welches Klassifikationsverfahren verwendet wird, da eine Kombination der Klassifikationsergebnisse nicht stattfindet.

Höhenklassifikation über Qualitylayer

Datengrundlage

In vielen Bereichen Europas, unter anderem bei den in dieser Arbeit verwendeten Testgebieten, ist eine Mehrfachabdeckung der IRS P5 Daten gegeben, welche die Grundlage für die Qualitylayer bildet. Die Mehrfachabdeckung ermöglicht im Rahmen der Oberflächenmodellgenerierung die Auswahl von potentiell geeigneten Höhenwerten. Es wird der Höhenwert für einen Punkt im finalen Höhenmodell verwendet, welcher dem Median der Menge verfügbarer Höhenwerte der Oberflächenmodelle entspricht.

Der *Numlayer* enthält für jeden Bildpunkt die Anzahl der verwendeten Szenen, die zur Ableitung des verwendeten Höhenwertes verwendet wurden.

Je höher die Anzahl der zur Verfügung stehenden Szenen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der ausgewählte Höhenwert zuverlässig ist.

Der *Stdlayer* enthält die Standardabweichung der Höhenwerte innerhalb der Menge vorhandener Höhenwerte. Ist die Standardabweichung gering, ist der ausgewählte Höhenwert potentiell zuverlässiger, da die anderen Höhenwerte in der Gruppe eine geringe Differenz, also eine größere Ähnlichkeit zueinander, besitzen.

Klassifikationsmethodik

Mit Hilfe eines Schwellenwertverfahrens können Höhenwerte des Oberflächenmodells über die Qualitylayer erfasst werden, da die Bildpunkte aller drei Datensätze aufgrund der gleichen Auflösung, Ausdehnung und Kartenprojektion korrespondieren. Die

Schwellenwerte bestimmen welche Mehrfachabdeckung mindestens benötigt wird (über *Numlayer*¹⁷) und wie groß die Standardabweichung jener ermittelten Höhenwerte maximal sein darf (über *Stdlayer*), um einen Höhenwert als verlässlich zu klassifizieren. Dennoch können die Qualitylayer keine qualitative Auskunft über die Herkunft des Höhenwerts treffen. Gebäude- oder Vegetationshöhen beispielsweise können innerhalb der Qualitylayer gleiche Charakteristika wie topographische Höhen besitzen (siehe Abb. 19). Dieses Faktum schränkt die Aussagekraft der Qualitylayer ein. Im Rahmen dieses Verfahrens werden die Qualitylayer als Klassifikationsgrundlage zur Identifikation der Höhen als Option geführt. Die Schwellenwerte hierfür wurden empirisch bestimmt, können aber vor der Prozessierung verändert werden.

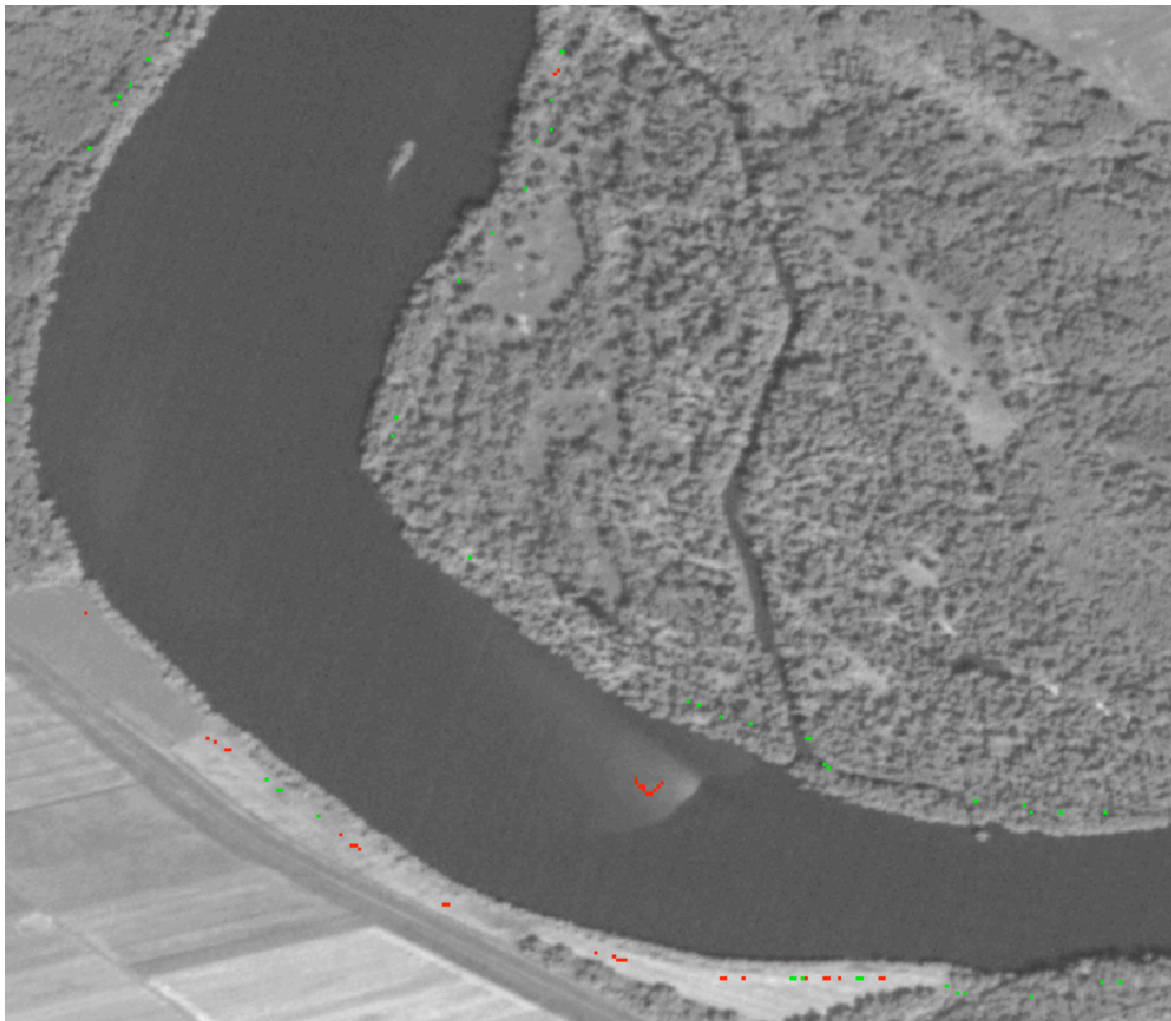


Abb. 19: Ausschnitt des Orthobildes der Szene ‚Drau‘. Grüne Bereiche sind klassifizierte Uferhöhen auf Basis der Qualitylayer. Rote Bereiche stellen Höhen aus der Orthobild- und Oberflächenmodellklassifikation dar. Höhen der Qualitylayerklassifikation liegen ebenso in Bereichen mit starker Ufervegetation.

¹⁷ vgl. Eigenschaften der Qualitylayer im Kapitel 1.2.1

Höhenklassifikation über Orthobild und Oberflächenmodell

Datengrundlage

Als Bestandteil des Datenproduktes liegt neben dem Oberflächenmodell und der Wassermaske ein panchromatisches Orthobild in der Auflösung von 2,5 m vor. Zur weiteren Verarbeitung wird es auf die Auflösung des Oberflächenmodells konvertiert.

Eine Landbeckungsklassifikation könnte unterstützend für die qualitative Unterscheidung der Höhen im Uferbereich eingesetzt werden. Nur bodennahe Höhen würden verwendet und anthropogene Strukturen und hochwachsende Vegetation blieben ignoriert.

Konventionelle Klassifikationsansätze wie die überwachte oder die objektorientierte Klassifikation lassen sich im Rahmen einer automatischen Lösung nur bedingt umsetzen. Hinzu kommen die erschwerten Klassifikationsbedingungen durch den panchromatischen Datensatz.

Verarbeitung und Klassifikationsmethodik

Um dennoch qualitative Unterschiede im Bild feststellen zu können, wird auf Texturfilter zurückgegriffen. Hierbei dienlich ist der Umstand, dass sich Waldgebiete texturell stark von Agrarflächen oder auch betonierten Flächen unterscheiden, welche als bodennahe Ufergebiete häufig in Frage kommen. Zur Analyse der Textur wird ein lokaler *Rangefilter* eingesetzt, welcher den Maximalwert mit dem Minimalwert innerhalb einer 3x3-Nachbarschaft in Zusammenhang setzt. Je größer der Unterschied der Extrema, desto größer ist der texturelle Unterschied der Nachbarschaft. Tendenziell ist der lokale Grauwertunterschied in Waldgebieten beispielsweise größer als bei den in Frage kommenden bodennahen Uferflächen (siehe Abb. 20).

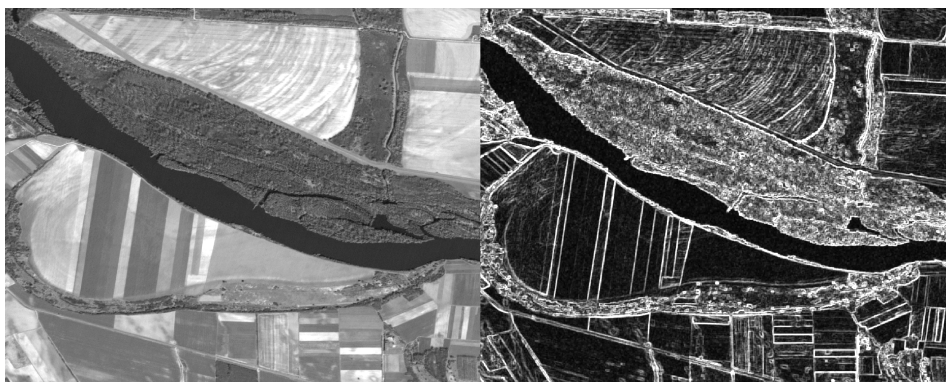


Abb. 20: Links: Orthobild der Szene ‚Drau‘, rechts: ermittelter Unterschied zwischen Minimal- und Maximalwert durch Rangefilter. Erkennbar sind die Unterschiede zwischen Wald- und Wiesenflächen, die sich diese Höhenklassifikation nutzbar macht.

Um die Klassifikation noch zu verbessern, wird der gleiche Filter ebenso auf das Oberflächenmodell angewendet. Das Resultat hierbei ist der lokale Höhenunterschied, welcher in flachen Uferbereichen geringer ausfällt als beispielsweise in Waldbereichen.

Die Kombination beider Filterergebnisse kann als Eignungskarte für verwendbare Höhenwerte dienen. Im Gegensatz zu der in Bezug auf die Landbedeckung qualitativ geringen Aussage der Qualitylayer besteht bei diesem Ansatz die Möglichkeit, morphologische Höhen von Objekthöhen zu trennen (vgl. Abb. 21). Die Aussagekraft ist somit theoretisch erhöht, eine entsprechende Verarbeitung und Qualitätssicherung der Höhen ist dennoch unentbehrlich.

Wie auch bei den Qualitylayern wird ein Schwellenwertverfahren mit empirisch ermittelten Werten angewendet, um die korrespondierenden Höhenwerte zu identifizieren.



Abb. 21: Rote Bereiche sind klassifizierte Höhenstützpunkte auf Basis der Rangefilterklassifikation. Es werden vor allem flache Bereiche am südlichen Ufer klassifiziert. Vgl. ebenso Abb. 19

5.1.3 Übertragung der Höhen auf die Centerline

Als *Centerline* wird die Linie bezeichnet, die die Flussmitte abbildet. Dies ist notwendig, um unabhängig von der Flussbreite und -form Höhen verarbeiten zu können. Dabei werden die ausgewählten Uferhöhen (Stützpunkthöhen) auf die Flussmitte übertragen, damit sie in zweidimensionaler Form leichter entsprechend eines Abflusskriteriums modifizierbar sind. Die Centerline ist zudem in diesem Prozess maßgeblich für den Grad der Fragmentierung der Höhen verantwortlich, da für jedes Flussegment ein eigenes Abflusskriterium gebildet wird.

Ableitung der Centerline

Die Centerlineableitung basiert auf der geschärften Wassermaske, welche hierzu in die Bearbeitungsaufösung von 5 m konvertiert wird. Ein anschließender Filter schließt Lücken und reduziert Unregelmäßigkeiten in der Wassermaske (siehe Abb. 22).

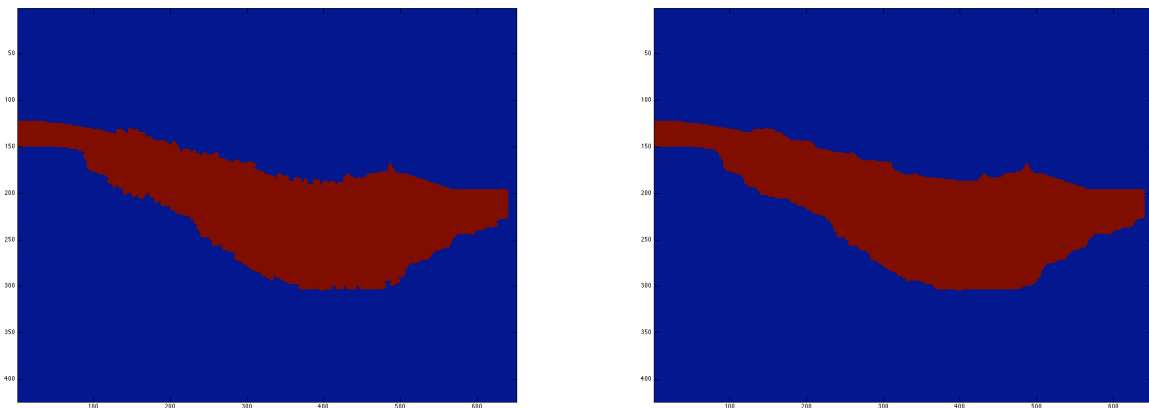


Abb. 22: links: unbearbeitete, geschärfte Wassermaske mit starken Unregelmäßigkeiten im Uferbereich; rechts: ein Filter schließt Lücken und glättet den Uferbereich zur besseren Ableitung der Centerline

Die Centerline wird mit dem Skeletierungsverfahren von Alexandru Telea [37] und der Umsetzung von Nicholas R. Howe [38] berechnet. Das Verfahren basiert auf der Überlegung, dass Punkte auf der Centerline Mittelpunkte von Kreisen bilden, die in mehreren Punkten den Rand der Wassermaske berühren. Über die kürzesten Distanzen zwischen zwei Punkten entlang des Randes der Wassermaske wird eine Intensitätskarte gebildet (siehe Abb. 23).

Auf diese Weise beeinflussen Unregelmäßigkeiten der Wassermaske die Centerline in geringerem Maße. Eine weitere Funktion reduziert die Intensitätskarte auf einen

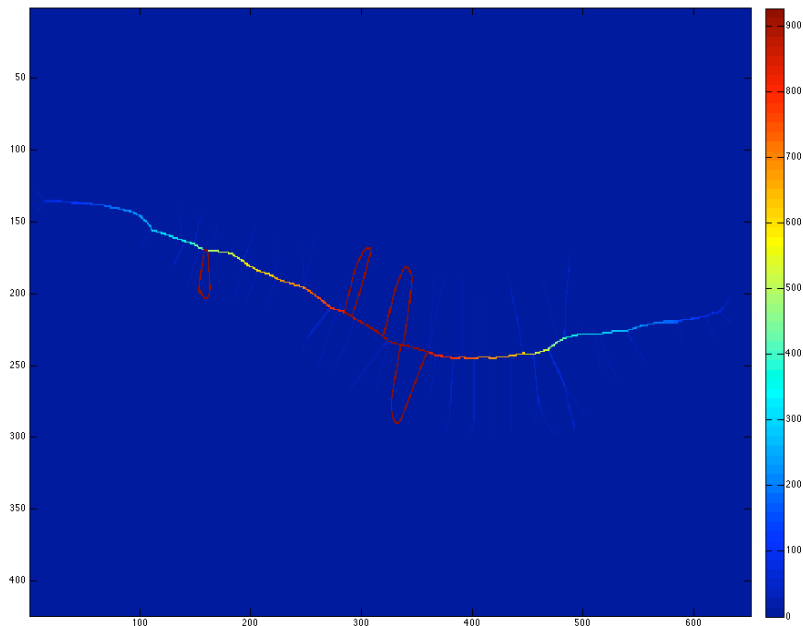


Abb. 23: Intensitätskarte stellt das Skelett der Wassermaske dar. Die schleifenartigen Objekte ober- und unterhalb weisen hohe Intensitäten (rot) auf und bilden für sich genommen ebenfalls Mittellinien ab, können jedoch mit einer weiteren Funktion ausgeschlossen werden, so dass nur die gewünschte Centerline übrig bleibt.

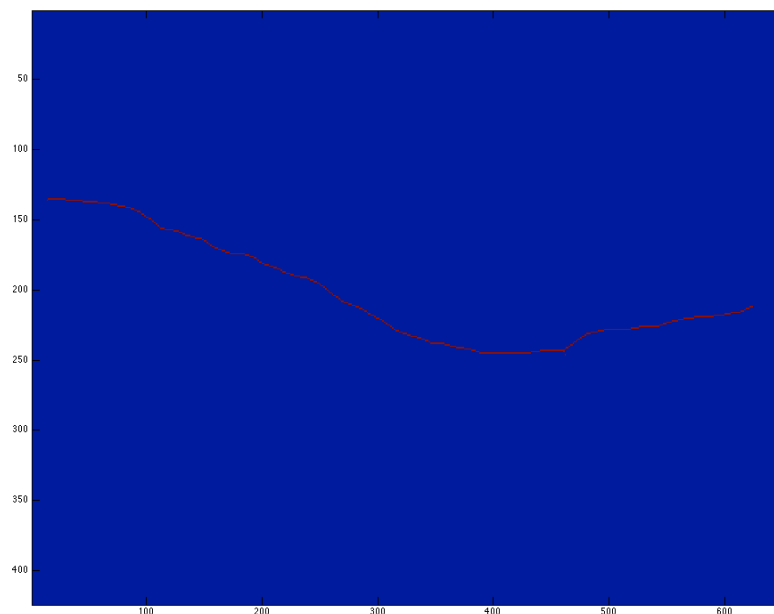


Abb. 24: Die fertige Centerline, die mit Hilfe eines Schwellenwertes aus der Intensitätskarte gelöst wurde und durch eine weitere Skeletierungsfunktion von den „Schleifen“ befreit wurde.

durchgehenden Strang¹⁸. Ein gesetzter Schwellenwert isoliert die Centerline aus der Intensitätskarte (siehe Abb. 24).

¹⁸ Die MATLAB-Skeletierungsfunktion *bwmorph* wird für diesen Zweck verwendet, nicht aber für die eigentliche Generierung der Centerline, da Howes Algorithmus deutlich bessere Ergebnisse erzielt, aber langsamer ist.

Eigenschaften der Centerline

Die Centerline liegt als Linie in einem binären Raster mit einer Breite von einem Pixel vor, wobei aufgrund der Berücksichtigung einer 8er-Nachbarschaft¹⁹ Verbindungen in alle Richtungen möglich sind. Infolge einer Centerlinebreite von einem Pixel ist eine Vektorisierung zu einer *Polylinie*²⁰ problemlos durchführbar, da die Mitte der einzelnen Pixel die Stützpunkte des Vektors darstellen können.

Zu- und Abflüsse, sowie Flussinseln werden in der Centerline ebenfalls berücksichtigt (siehe Abbildungsreihe 25). Die Centerline ist qualitativ von der geschärften Wassermaske abhängig. Ist die Wassermaske beispielsweise aufgrund einer Brücke unterbrochen, hängt es vom gesetzten Schwellenwert bei der Centerlineableitung und der Länge der Unterbrechung ab, ob die Centerline kontinuierlich ist oder aussetzt (vgl. Abb 25a). Die Centerline wird als durchgängige Linie verstanden, die ein Gewässer repräsentiert, kann aber aus einzelnen Fragmenten bestehen, so genannten *Centerlinesegmenten*²¹.

Für die weitere Prozessierung ist dieses Faktum relevant, da jedes Centerlinesegment individuell verarbeitet wird.

¹⁹ vgl. 8er-Nachbarschaft im Bereich der Fließrichtung, Kapitel 2.3.1

²⁰ Polylinien sind Linien im Vektorformat

²¹ Nicht zu verwechseln mit Segmenten aus der Wassermaskenschärfung; Centerlinesegmente sind Linien- und keine Flächensegmente.

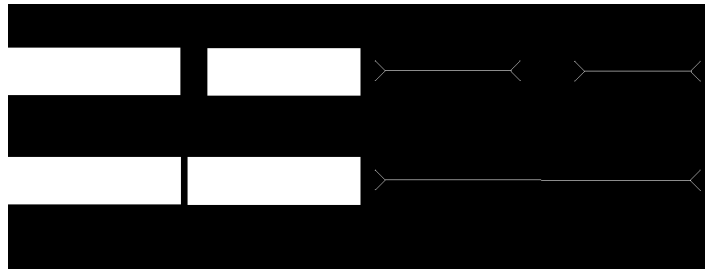


Abb. 25a: Schematische Centerlineableitung. Links: Wassermaske, rechts: ermittelte Centerline. Wird die Wassermaske unterbrochen (durch eine Brücke etc.), hängt es vom Schwellenwert ab, ob die Centerline kohärent ist.

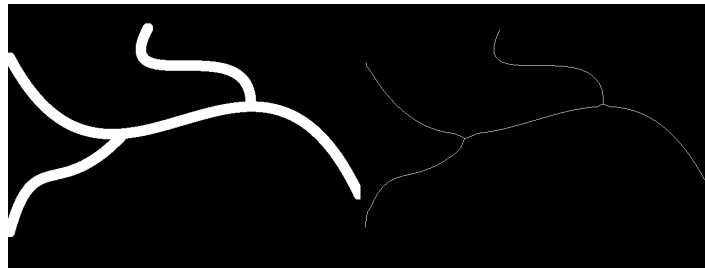


Abb. 25b: Zu- und Abflüsse werden bei der Centerlineableitung ebenso berücksichtigt.

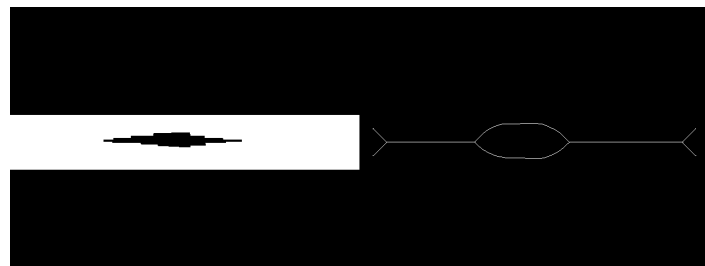


Abb. 25c: Flussinseln können berücksichtigt werden, so dass die Centerline getrennt wird und anschließend wieder zusammenläuft.

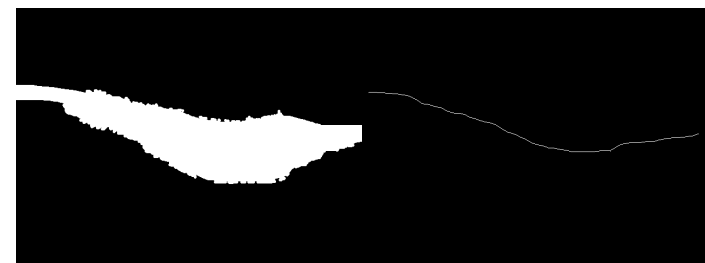


Abb. 25d: Unabhängig von der Breite der Maske wird nur eine Centerline gebildet. Die Beschaffenheit des Ufers ist bis zu einem gewissen Grad unerheblich, so dass die Centerline nicht ausbricht.

Zusammenfassen der Höhen

Die Verfahren zur Klassifikation von Uferhöhen (Qualitylayer oder Orthobild/Oberflächenmodell-Kombination) liegen der Weiterverarbeitung der Höhen zu Grunde. Abhängig vom gewählten Klassifikationsverfahren werden die klassifizierten Uferhöhen als Stützpunkte über ein *Nearest Neighbour*-Verfahren auf die nächstgelegenen Punkte der Centerline übertragen.

Bei diesem Vorgang inhärent ist die Verschmelzung der Höhen unterschiedlicher Herkunft und Position. Das heißt, dass abhängig vom Klassifikationsergebnis sowohl morphologische (Objekt- und Bodenhöhen) als auch qualitative (z.B. Baum- und Gebäudehöhen) Unterschiede in der Höhenherkunft neben der eigentlichen Höhenposition, die grundsätzlich links- beziehungsweise rechtsseitig des Ufers sein kann, auftreten können. Hiermit bildet die Reduzierung räumlicher, qualitativer Information zu einer linienhaften Darstellung die Grundlage für die Höhenverarbeitung, auf welche im nächsten Abschnitt detaillierter eingegangen wird.

Durch das *Nearest Neighbour*-Verfahren erhält jeder Höhenwert eine Position auf der Centerline, wobei Dubletten²² ausgeschlossen werden, so dass für einen Punkt auf der Centerline maximal ein Höhenwert existiert. Umgekehrt erhält nicht jeder Punkt der Centerline einen Höhenwert.

Wie erwähnt kann die Centerline aus mehreren Teilen bestehen, somit sind die übertragenen Höhenwerte entsprechend ihrer Position auf der Centerline Teil eines Centerlinesegments und werden nur innerhalb dessen bezüglich des Abflusskriteriums verarbeitet.

Vektorielle Speicherung der Höhenwerte

Die Centerlinesegmente werden innerhalb des Prozesses in ein strukturiertes Array gespeichert, so dass die Höhenwerte als Vektor vorliegen. Um die ursprüngliche Position der Höhe für die spätere Oberflächenmodellierung zu erhalten, werden die Koordinaten der Höhenwerte auf der Centerline ebenfalls gespeichert. Aufgrund des *Nearest Neighbour*-Verfahrens können die Höhen innerhalb des Arrays in falscher Reihenfolge vorliegen, so dass die anschließende Höhenverarbeitung zwar funktioniert, die Höhen aber im Rahmen der Editierung falsch prozessiert werden und dadurch die Einhaltung des Abflusskriteriums gefährdet ist. Um diesem Problem zu begegnen, werden die Höhenstützpunkte innerhalb des Arrays entsprechend ihrer Entfernung vom ersten Höhenstützpunkt jedes Centerlinesegments sortiert. Die Entfernung wird über die Strecke

²² Dubletten bezeichnen doppelte Einträge in der Datenreihe - eine Höhe darf nur einmal vorkommen.

zwischen zwei Stützpunkten auf der Centerline bestimmt, so dass etwaige Mäander oder Strukturen, die zwei Höhenstützpunkte räumlich näher erscheinen lassen, aufgrund der Topologie der Centerline unberücksichtigt bleiben. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass die Höhen entlang der Fließrichtung koordinativ aufeinander folgen.

5.2 Höhenverarbeitung

Die Anpassung an das natürliche Abflusskriterium ist essentieller Bestandteil der hydrologischen Korrektur von Höhenmodellen. Da weder die ursprünglichen Uferhöhen noch die Gewässerhöhen einen korrekten Abfluss darstellen, müssen die Höhen korrigiert werden. Zusätzlich können selbst zuverlässige Höhen eines Oberflächenmodells unnötige morphologische Informationen zur Gewässerrhöhe enthalten, auch wenn für die Auswahl Qualitylayer und gefilterte Oberflächenmodelle und Orthobilder verwendet wurden.

5.2.1 Höhenverarbeitung auf Basis von Centerlinesegmenten

Die Höhen werden innerhalb von Gruppen verarbeitet, die Resultat der Unterteilung der Centerline sind. Diese segmentbasierte Verarbeitung ermöglicht die Differenzierung der Herkunft der Höhen und verhindert somit die Einbeziehung von Höhen anderer Segmente und Herkunft, die ein Ableiten der Fließrichtung erschweren. Die Höhen eines Centerlinesegments liegen vektoruell vor und lassen sich entsprechend ihrer Abfolge auftragen. Dieser Zusammenhang lässt sich graphisch als Kurve abbilden.

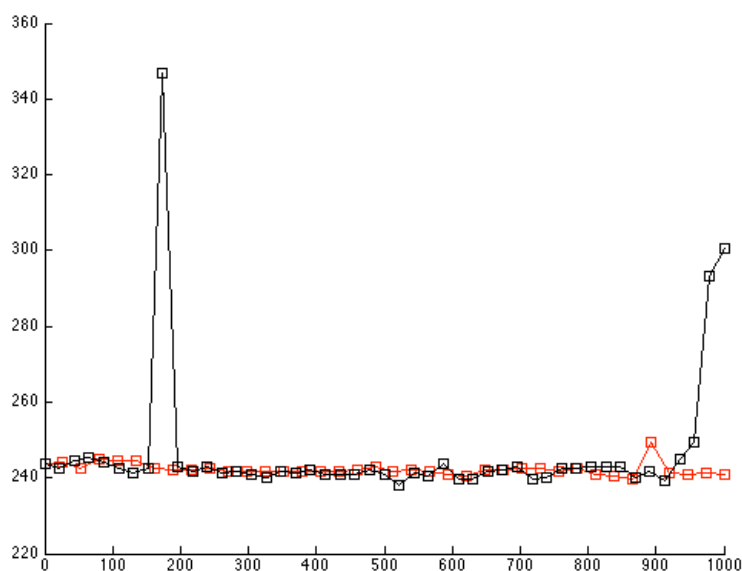


Abb. 26a: Unbearbeitete Höhenverläufe beider Klassifikationsmethoden (schwarz = Qualitylayer, rot = Orthobild u. Oberflächenmodell) eines Centerlinesegments der Szene ‚Bozen‘.

Die Abbildung 26a zeigt zwei Kurven eines Centerlinesegments mit einer Länge von ca. 5,5 km der Szene Bozen in Südtirol, welche später im Rahmen der Ergebnisbesprechung als Testgebiet dient. Die schwarze Kurve zeigt die über Qualitylayer klassifizierten Höhenstützpunkte, die rote Kurve hingegen die Höhenstützpunkte, denen eine Klassifikation von Orthobild und Oberflächenmodell zugrunde liegt. Erstere besitzt mit 47 Stützpunkten etwas mehr als die zweite Kurve mit 38 Stützpunkten. Es gilt zu beachten, dass die Lage der Punkte im Diagramm nicht der Position in der Realität entspricht, da die identifizierten Höhen nach der Übertragung auf die Centerlinesegmente und der anschließenden Speicherung eindimensional vorliegen. Zudem entsprechen auch Punkte aus beiden Kurven mit gleicher x-Position nicht zwingend der gleichen geographischen Position. Es werden in allen Abbildungen der Abbildungsreihe 26 die gleichen Centerlinesegmente²³ dargestellt.

Ausreißerentfernung

Die Höhenkurve muss für die weitere Verarbeitung von Ausreißern befreit werden, da ansonsten eine Fließrichtungsableitung erschwert würde.

Ausreißer können mittels statistischer Verfahren detektiert und entfernt werden.

Es muss ein Verfahren gewählt werden, dass nur extreme Ausreißer entfernt, um die Charakteristika der Kurve zu erhalten. Einfache Verfahren wie der Interquartilsabstand lassen sich über den Median implementieren. Auf diese Weise wird das erste und letzte Quartil der Werte entfernt. Gegen dieses Verfahren spricht, dass der Vorgang weniger dynamisch ist als lokale Ausreißerdetektionen. Auf der anderen Seite eignet sich dieser Ansatz für Datensätze geringer Komplexität (wie die in dieser Arbeit verwendeten) bei gleichzeitiger einfacher Umsetzbarkeit.

²³ schwarze Kurve für das Centerlinesegment der Qualitylayerklassifikation und rote Kurve für das Centerlinesegment der Orthobild- und Oberflächenmodellklassifikation, sofern nicht anders angegeben.

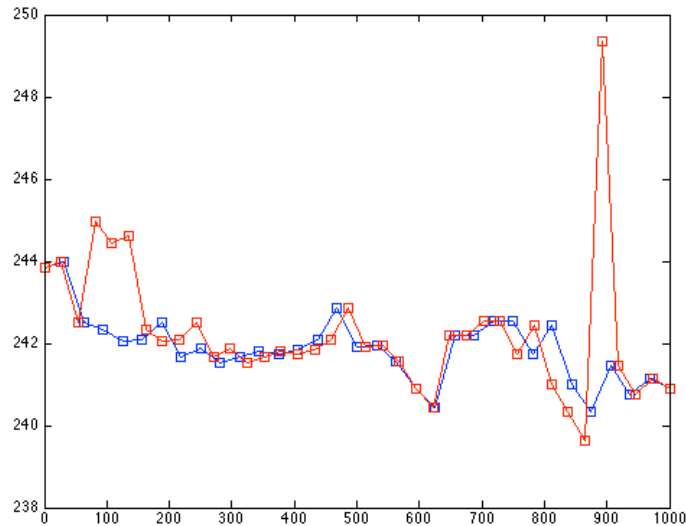


Abb. 26b: Höhenverlauf der Orthoklassifikation vor (rot) und nach (blau) Ausreißerentfernung durch Ausschluss des oberen und unteren Quartils.

Die Abbildung 26b zeigt die Kurve der Höhen, die über das Orthobild und das Oberflächenmodell klassifiziert wurden vor (rot) und nach (blau) der Ausreißerentfernung. Entsprechend der entfernten Punkte ist die blaue Kurve in x-Richtung verschoben. Erkennbar ist die Entfernung der extremen Ausreißer am Anfang und Ende der Kurve, welche bis zu 9 m vom vorherigen Höhenwert abweichen.

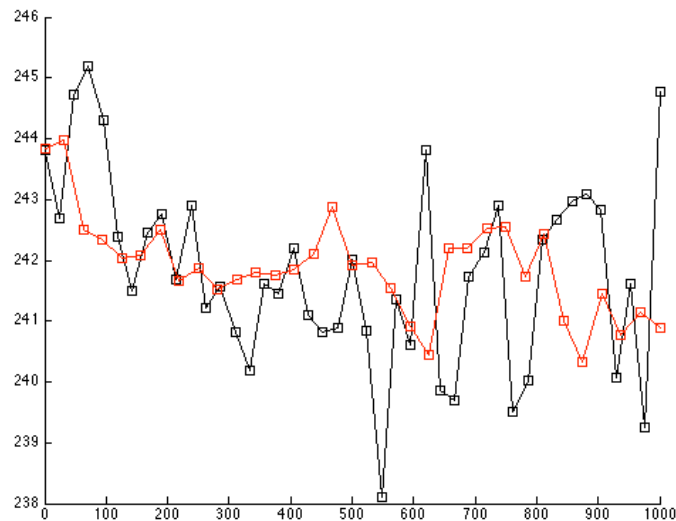


Abb. 26c: Höhenverlauf beider Klassifikationsmethoden nach Ausreißerentfernung über Ausschluss des oberen und unteren Quartils. (Farbgebung siehe Abb. 26a)

Abbildung 26c zeigt die Kurven beider Klassifikationsoptionen nach der Ausreißerentfernung. Die extremen Abweichungen der unbearbeiteten Höhenkurve wurden entfernt, so dass sich die Höhen zwischen 240 m und 245 m einpendeln²⁴.

Glättung der Höhenwerte

Zu einer Ableitung der Fließrichtung ist eine weitere Optimierung der Höhen erforderlich. Um repräsentative Höhen zu erhalten, wird ein gleitendes Mittel mit variabler Fenstergröße zur Glättung der Höhenwerte eingesetzt. Abhängig von der Beschaffenheit des Ufers, der Klassifikationsmethodik und der Länge eines Centerlinesegments variiert die Anzahl der Höhenwerte. Mit Rücksicht darauf wird eine variable Fenstergröße für das gleitende Mittel verwendet, die sich aus der Anzahl der Höhenwerte und dem Divisor 3 zusammensetzt, so dass bei exemplarischen 90 Höhenwerten die Fenstergröße 30 beträgt.

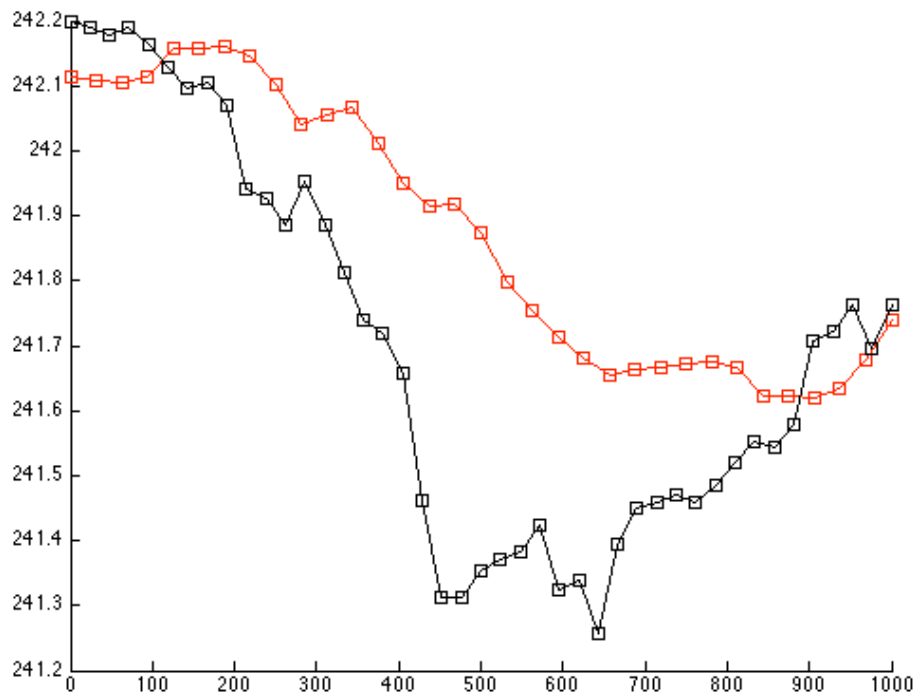


Abb. 26d: Höhenverlauf beider Klassifikationsmethoden nach der Anwendung eines gleitenden Mittelwertes. (Farbgebung siehe Abb. 26a)

Durch die Glättung der Kurven wird der Wertebereich erneut reduziert und ein Abnehmen der Werte in x-Richtung wird in der Abbildung 26d erkennbar.

²⁴ Der Darstellungsunterschied der Höhenkurve der Orthoklassifikation zwischen Abbildung 19b und 19c lässt sich auf die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zurückführen.

5.2.2 Abflusskriterium

Im Falle von IRS P5 Oberflächenmodellen sind Vorprozessierungen wie *Hydro-Conditioning*, wie öfters erwähnt, mit einigen Problemen verbunden. Ein natürlicher Abfluss ist aus den Höhenwerten unabhängig von deren Ableitungsverfahren nur stark bedingt modellierbar, weswegen ein künstliches Abflusskriterium eingeführt werden muss, damit infolgedessen eine weitere Verarbeitung möglich ist.

Das Abflusskriterium kann als Bedingung verstanden werden, die besagt, dass Wasser nur in eine Richtung fließen kann. Anhand der gezeigten Kurven ist ersichtlich, dass die Uferhöhen mit fortschreitender Abfolge tendenziell abnehmen. Nicht immer ist die Fließrichtung erkennbar und muss dementsprechend bestimmt werden.

Bestimmung der Fließrichtung

Die Angabe der Fließrichtung kann bezüglich der Höhenkurve zwei Ausprägungen annehmen. Entweder die Höhen nehmen in x-Richtung zu oder ab.

Nach der Ausreißerentfernung und Glättung der Höhen wird die Fließrichtung über den Vergleich der Mittelwerte des ersten und letzten Viertels der Höhenwerte eines Centerlinesegments bestimmt. Dieser Vorgang stellt eine Bestimmung der Fließrichtung unabhängig der Umgebungstopographie sicher, so dass lokale Uferartefakte wie Steilufer oder Böschungen unberücksichtigt bleiben. Die Robustheit des Verfahrens nimmt mit der Anzahl verfügbarer Höhenwerte natürlicherweise zu.

Im Unterschied zur Ermittlung der Fließrichtung bei *D8* wird die eigentliche Fließrichtung im geographischen Sinne durch die Centerline beziehungsweise die Wassermaske definiert.

Einbringen des Abflusskriteriums

Entsprechend der ermittelten Fließrichtung werden die Höhen modifiziert, so dass in jedem Punkt die korrekte Fließrichtung eingehalten wird. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Verfahren entwickelt.

Lineare Regression

Das erste Verfahren bestimmt für die Höhen eines Centerlinesegments eine Regressionsgerade, deren Steigung mit der Fließrichtung übereinstimmt.

Auf diese Weise kann für jeden Punkt der entsprechende Wert auf der Geraden identifiziert werden, der infolgedessen den neuen Höhenwert bildet. Hierbei ist die

Steigung in jedem Punkt der Kurve gleich und lokale Phänomene bleiben in der Kurve unberücksichtigt (siehe Abb. 26e). Abhängig von der Position der Höhenwerte auf der Centerline variiert die lokale Steigung nach erfolgter Integration der Höhen in das Oberflächenmodell.

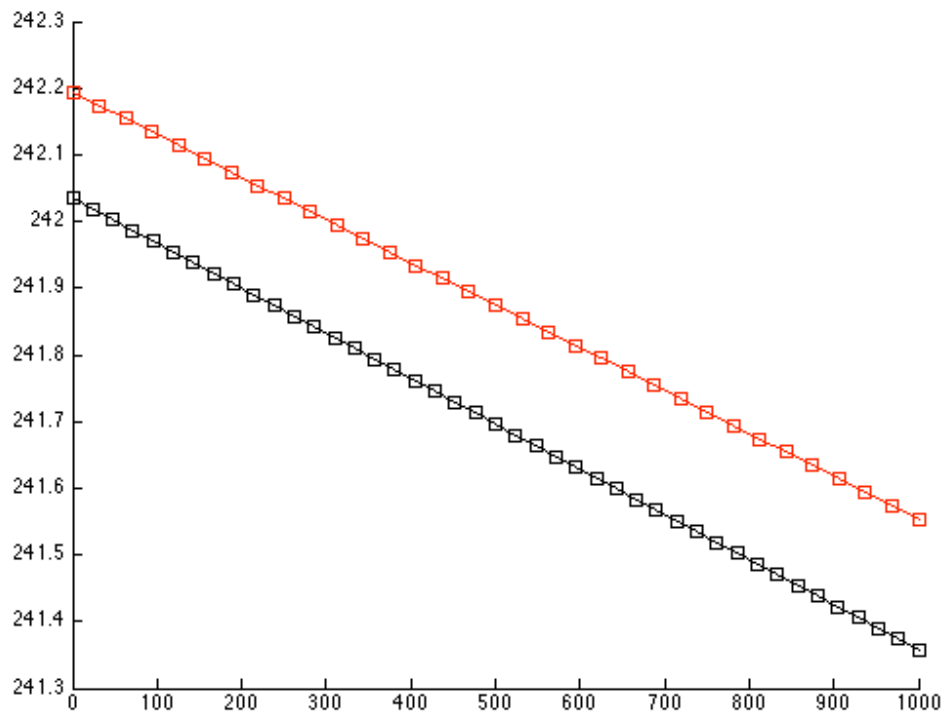


Abb. 26e: Höhenverlauf beider Klassifikationsmethoden nach Einbringung des linearen Abflusskriteriums. (Farbgebung siehe Abb. 26a)

Anpassung an Kurve

Beim zweiten Verfahren wird die Kurve als Resultat des gleitenden Mittels unter Berücksichtigung der Fließrichtung an jenen Punkten verändert, wo der entsprechend der absteigenden Höhenfolge nächste Wert den vorhergehenden übersteigt und somit den Abfluss verhindert (siehe Abb. 26f). Dieses Verfahren erhält den Charakter der Kurve und entspricht im Idealfall der lokalen Ufermorphologie. Ähnlich dem vorhergehenden Verfahren lassen sich flache Bereiche ohne jegliche Steigung nicht vermeiden.

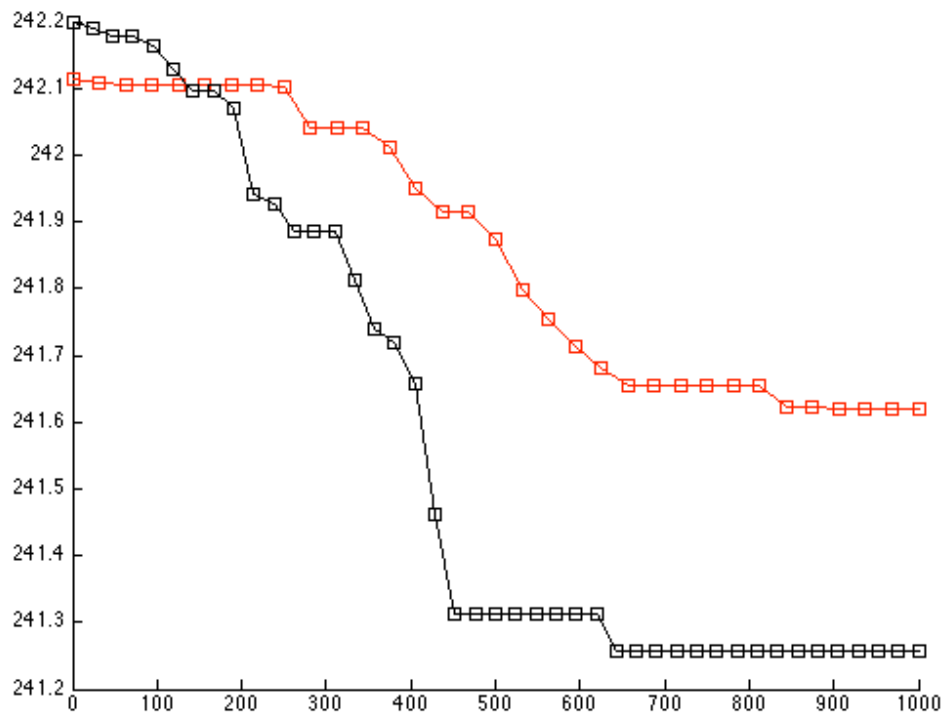


Abb. 26f: Höhenverlauf beider Klassifikationsmethoden nach Einbringung des adaptiven Abflusskriteriums. (Farbgebung siehe Abb. 26a)

5.3 Editierung/Integration der Höhen in das Oberflächenmodell

Abschließendes Verfahren ist das Einbringen der hydrologisch korrigierten Höhen in das anfängliche Oberflächenmodell. Die Höhen des Oberflächenmodells wurden nur in Gewässerbereichen verändert, die mit Hilfe der geschärften Wassermaske identifiziert wurden. Demnach dürfen die veränderten Höhen nur in Gewässerbereichen zum Tragen kommen.

Die geschärfte Wassermaske, das Oberflächenmodell und die modifizierten Höhen bieten für diesen Vorgang die Datengrundlage.

5.3.1 Region Growing für die Höhenintegration

Region Growing kann neben der Segmentierung von Bilddaten auch der gewichteten Aufteilung von Flächen dienen. Wenn die Startpunkte (Seeds) gegeben sind, findet ein Wachstum in alle Richtungen so lange statt bis das Bild oder die gewünschte Fläche entsprechend der Regionen der Startpunkte aufgeteilt ist. Der Vorteil gegenüber geometrischen Verfahren wie beispielsweise Voronoi-Diagrammen besteht darin, dass keine Limitierung durch die Komplexität der zu füllenden Flächen entsteht. Nachteilig ist der hohe Rechenaufwand durch die dem Verfahren zugrundeliegenden Iterationen.

5.3.2 Verfahren

Im Falle der Oberflächenmodellierung liegen die veränderten Höhenwerte in unregelmäßigen Abständen auf der Centerline und bilden die für das Region Growing notwendigen Startpunkte. Die geschärfte Wassermaske dient als Flächenlimit. Auf Basis dieses Vorgangs, der für jedes Centerlinesegment parallel abläuft, wird die Höhe als Punktinformation in die Fläche übertragen, wobei die resultierenden Regionengrößen von der ursprünglichen Lage der Startpunkte abhängen.

Das bedeutet, dass die Häufigkeit von Höhenveränderungen durch die Abstände der Höhenstützpunkte auf der Centerline bedingt sind. Bereiche zwischen den Höhenstützpunkten auf der Centerline erhalten somit den Höhenwert des nächstgelegenen Höhenstützpunktes und besitzen nur in Übergangsbereichen einen Höhenunterschied und damit eine Steigung. Die hierbei geschaffenen flachen Gebiete stellen durch die bereits vorhandene Kenntnis der Fließrichtung keinen Konflikt dar. Bei konventionellen Ansätzen erschweren flache Bereiche die Ableitung der Fließrichtung erheblich.

5.3.3 Ausgabe

Das Ergebnis ist ein Höhenraster mit der Ausdehnung der geschärfen Wassermaske, welches anstatt den ursprünglichen Gewässerhöhen in das Oberflächenmodell eingesetzt wird. Zusätzlich verhindert ein geringer vertikaler Offset, dass die Gewässerhöhen über der Uferhöhe liegen.

Das Oberflächenmodell mit den hydrologisch korrigierten Höhen wird zusammen mit der Centerline ausgegeben.

6. Anwendung auf Testgebiete und Validierung des Verfahrens

Die Entwicklung eines Verfahrens zur hydrologischen Korrektur von Oberflächenmodellen setzte die Verwendung von Testdatensätzen voraus. Die Testdatensätze stammen ausschließlich von IRS P5 Bilddaten, welche im Bündelblock verarbeitet wurden. Die verwendeten Oberflächenmodelle wurden über den Semiglobal Matching Algorithmus abgeleitet. Ziel dieses Kapitels ist eine Veranschaulichung des Prozesses anhand der Datensätze und die Diskussion und Validierung der Ergebnisse.

6.1 Testgebiete

Für diese Arbeit wurden drei charakteristische Testgebiete ausgewählt, an denen sich eine hydrologische Korrektur in geeignetem Maße demonstrieren lässt. Es wurde versucht Testgebiete auszuwählen, die sich in Ausdehnung, Landbeckung, Höhencharakteristik und vor allem in der Art ihrer Gewässer unterscheiden. Da Küstengebiete, Meere und Seen noch kein Bestandteil dieses Verfahrens sind, wurden Testgebiete gewählt, die kanalisierte und gerade, aber auch natürliche und mäandrierende Gewässer mit Seitenarmen besitzen, um das Verfahren möglichst repräsentativ vorzustellen.

Das erste Testgebiet umfasst das Mündungsgebiet der Talfer und Eisack in die Etsch, was dem Stadtgebiet von Bozen, Südtirol entspricht. Als zweites Testgebiet wurde das Etschtal zwischen den Städten Meran und Bozen ausgewählt. Das dritte Testgebiet erstreckt sich über ein ca. 30 km langes Teilstück der Drau an der Grenze von Ungarn zu Kroatien westlich der Ortschaft Donji Miholjac, Gespanschaft Osijek-Baranja.

6.1.1 Testgebiet Bozen

Das Testgebiet (siehe Abb. 27) ist nahezu quadratisch mit einer Kantenlänge von ca. 8,5 km, in dessen Zentrum sich die Stadt Bozen befindet. Aus nordwestlicher Richtung kommend, streift der Fluss Etsch am Zusammenfluss mit der Eisack die südlichen Ausläufer der Stadt und verlässt das Gebiet Richtung Süden. Die Eisack fließt von östlicher Richtung und trennt die Stadt in eine Nord- und Südhälfte, wo im Zentrum der Stadt die von Norden kommende Talfer in die Eisack mündet. Insgesamt spannen die beiden Hauptflüsse Eisack und Etsch ein flaches Tal auf, welches innerhalb des Gebiets von Bergen bis zu 1 400 m Höhe umsäumt wird. Der Höhenunterschied innerhalb des Gebiets beträgt ca. 1 200 m.

Die Herausforderung dieses Testgebietes ist die korrekte Modellierung des städtischen Gebiets, so wie die Mündungsbereiche der Flüsse.



Abb. 27: Orthobild des Testgebietes ‚Bozen‘

6.1.2 Testgebiet Etschtal

Das Testgebiet (siehe Abb. 28 im Panoroama und Abb. 29 als Orthobild) besitzt eine West-Ost-Ausdehnung von ca. 13,5 km und eine Nord-Süd-Ausdehnung von ca. 15,5 km und bildet das Etschtal südlich von Meran bis nördlich von Bozen ab. Die Etsch durchfließt aus nordwestlicher Richtung kommend das bis zu 3 km breite Tal, welches mit einer Höhe von 250 - 260 m der das Tal säumenden Berglandschaft von bis zu 1 800 m gegenübersteht. Die Etsch ist selten breiter als 50 m, wird aber häufig von Ufervegetation überragt. Die Schwierigkeit bei diesem Gebiet ist der geringe Höhenunterschied entlang des Tals und die erschwerte Gewässerdetektion durch den Uferbewuchs.



Abb. 28: Panoramabild des Etschtals, von links nach rechts entspricht von Nord nach Süd, CC

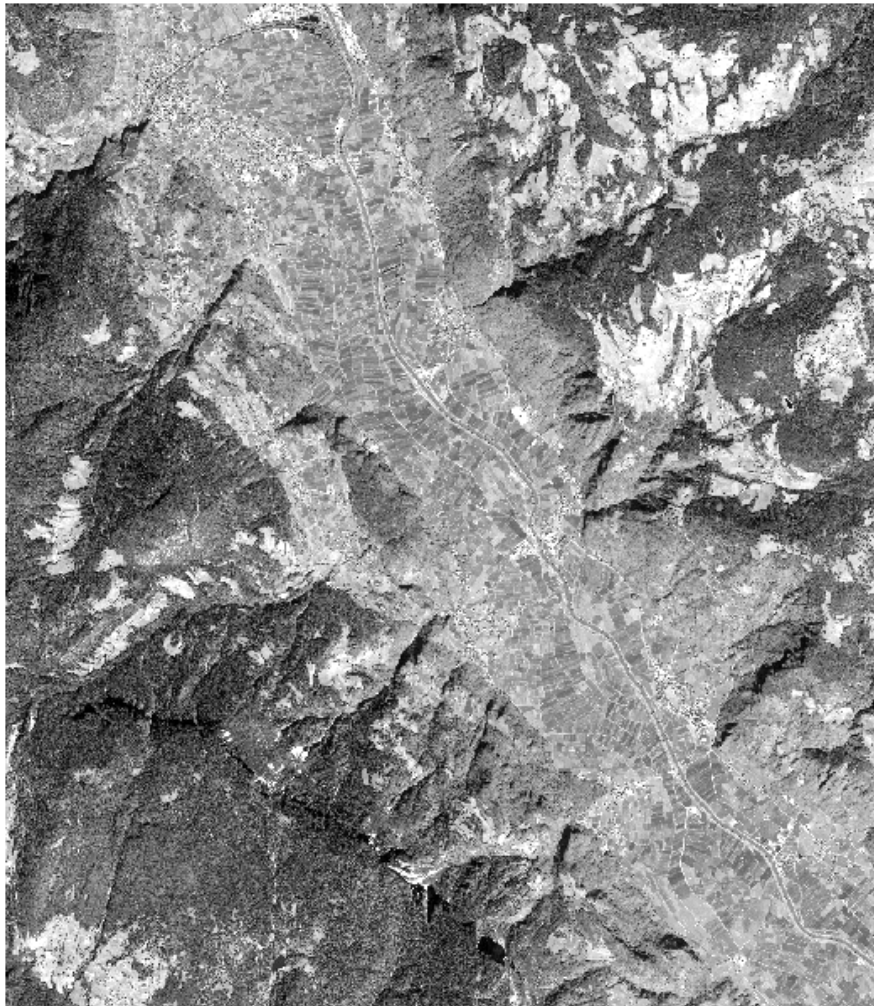


Abb. 29: Orthobild des Testgebiets ‚Etschtal‘

6.1.3 Testgebiet Drau

Das Gebiet erstreckt sich ca. 35 km von West nach Ost und ca. 15 km von Nord nach Süd und ist damit das größte Testgebiet. Entlang der von Westen kommenden Drau befindet sich die Grenze von Ungarn und Kroatien. Die Mäander der Drau und die

landwirtschaftliche Nutzung des Gebiets steht im prägenden Wechsel zu Waldbereichen in Ufernähe. Diese Eigenschaften stellen für eine hydrologische Korrektur Hindernisse dar.

6.2 Datenaufbereitung und Prozessierung

Für alle drei Testgebiete liegt ein IRS P5 Orthobild, ein entsprechendes Oberflächenmodell, Qualitylayer sowie eine Landsat-Wassermaske vor.

6.2.1 Erstellen von Subsets

Um den Prozessierungsaufwand zu reduzieren und die Analyse auf die wesentlichen Bereiche zu beschränken, sind die Testgebiete Subsets und Bestandteil größerer, mosaikierter Datensätze. Die Datensätze in Südtirol stammen ursprünglich aus einer Szene mit einer Ausdehnung von 100 km x 80 km. Das Testgebiet der Drau wurde aus einem Datensatz mit einer Ausdehnung von 230 km x 180 km entnommen. Die Datensätze in Südtirol liegen in UTM 32, das Testgebiet Drau in geographischen Koordinaten vor. Damit ergibt sich folgende Übersicht (Tab. 2):

Datensatz	Größe	Auflösung	Raumbezug
Etschtal	13,66 km x 15,6 km	5 m, außer Orthobild 2,5 m	WGS 84 UTM N32
Bozen	8,685 km x 8,725 km	5 m, außer Orthobild 2,5 m	WGS 84 UTM N32
Drau	35,76 km x 14,30 km	5 m, außer Orthobild 2,5 m	Geographisch

Tabelle 2: Übersicht zu den verwendeten Testgebieten

6.2.2 Wassermaskenableitung

Die Landsat-Wassermaske liegt bereits für große Teile Europas und Nordafrikas vor und wurde für diese Untersuchung nicht erneut prozessiert, sondern auf die Untersuchungsgebiete zugeschnitten.

Die Wassermaske wird aus Indizes der Landsat-Bänder unter Einbeziehung eines SRTM-Höhenmodells erstellt. Die Qualität der Wassermaske variiert und wird sukzessive manuell

korrigiert. Die in dieser Arbeit verwendeten Wassermasken sind unbearbeitet und können demzufolge Fehler enthalten. Im Kapitel 3 wurde auf diesen Vorgang genauer eingegangen.

6.2.3 Wassermaskenschärfung

Die Schärfung der Wassermaske ist ein Vorgang, der eine Anpassung an das jeweilige Gebiet erfordert und am Anfang der Prozessierung jeder Einzelszene steht. Die Einstellungen müssen bei jeder Szene individuell bestimmt werden, wobei die Vorschaufunktion dabei hilfreich sein kann, um nicht das komplette Bild verarbeiten zu müssen und mehrere Einstellungen zu testen. Exemplarisch für die Szene Bozen wurden folgende Einstellungen verwendet (siehe Abb. 30).

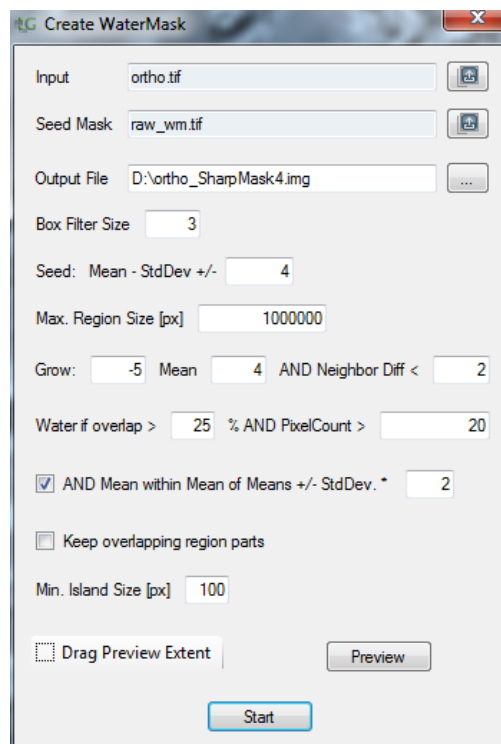


Abb. 30: Screenshot des Wassermaskenschärfungswerkzeugs mit den verwendeten Einstellungen für das Testgebiet Bozen

Als Inputdatensatz wurde das Orthobild als Subset verwendet, sowie die Landsat-Wassermaske als Seedmaske. Das Resultat hängt zum einen von den gesetzten Einstellungen ab, zum anderen ist die Landsat-Wassermaske ausschlaggebend für die Qualität der geschärften Wassermaske.

6.2.4 Hydrologische Korrektur

Im Anschluss an die Wassermaskenschärfung folgt die hydrologische Korrektur des Oberflächenmodells. Als Grundlage hierfür dienen das Oberflächenmodell selbst, die geschärfte Wassermaske und abhängig von der gewählten Einstellung die beiden Qualitylayer mit der Anzahl der vorhandenen Oberflächenmodelle und deren Standardabweichung oder das Orthobild. Zudem bietet die grafische Oberfläche der Anwendung mehrere Einstellungsmöglichkeiten (siehe Abb. 31).

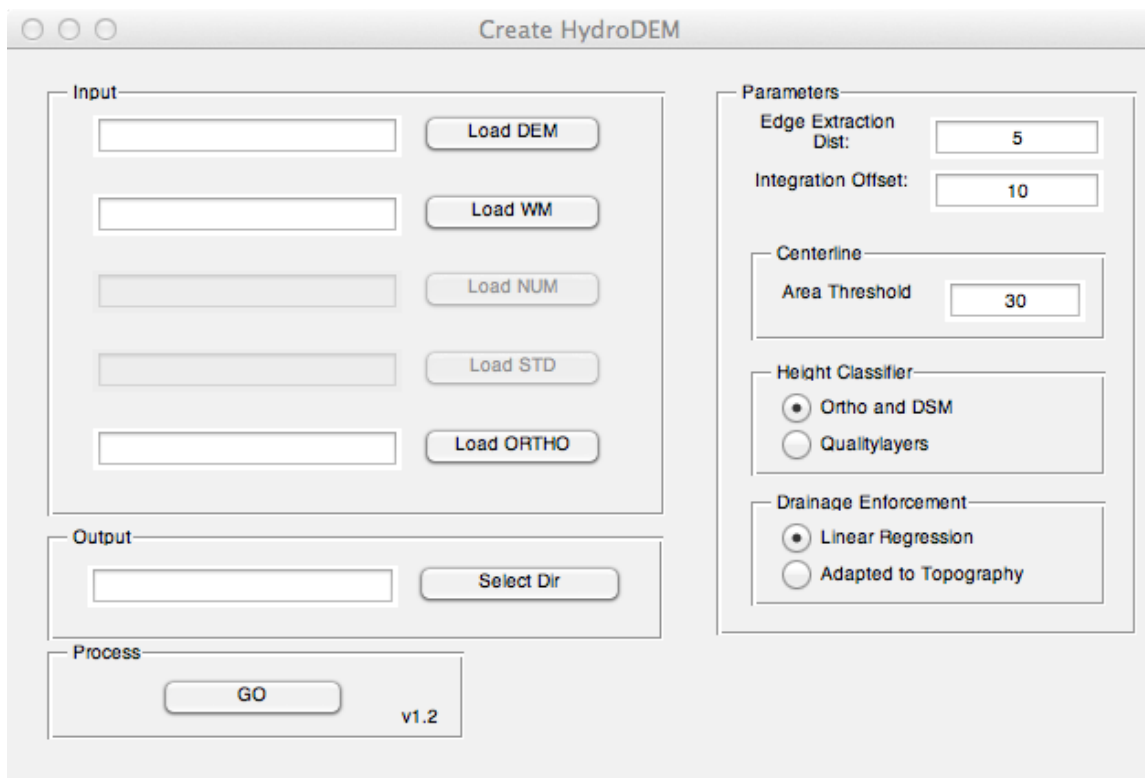


Abb. 31: Screenshot der Benutzeroberfläche des entwickelten Tools zur Durchführung der hydrologischen Korrektur

Hierzu gehören die Wahl der Klassifikationsmethodik und die Auswahl zwischen den beiden Möglichkeiten zur Einbringung des Abflusskriteriums. Die Entfernung der zu verwendenden Stützpunkthöhen zur Uferlinie oder der vertikale Lageversatz für das finale Einbetten der Höhen in das Oberflächenmodell sowie die Minimalgröße der Centerlinesegmente sind ebenso einstellbare Parameter, aber für die Prozessierung von untergeordneter Priorität.

Um alle relevanten Optionen zu berücksichtigen und vergleichen zu können, werden für alle Testgebiete allgemeine Charakteristika der Höhenkorrektur beschrieben und jeweils die Klassifikationsmethodik den Abflusskriterien gegenübergestellt (siehe Tab.3).

	Bozen	Etschtal	Drau
Höhenklassifikation	Orthobild/ Qualitylayer	Orthobild/ Qualitylayer	Orthobild/ Qualitylayer
Abflusskriterium	Lineare Regression/ Adaptiv	Lineare Regression/ Adaptiv	Lineare Regression/ Adaptiv

Tabelle 3: Verwendete Einstellungen bei der Prozessierung der Testgebiete

6.3 Übersicht zur Ergebnisbesprechung

Die Beobachtungen für den „allgemeinen Teil“ der Ergebnisbesprechung jedes Testgebiets beziehen sich auf hydrologisch korrigierte Oberflächenmodelle auf Basis der Klassifikation über Orthobild und Oberflächenmodell sowie die adaptive Variante des Abflusskriteriums. Auf die unterschiedlichen Ausprägungen bezüglich der verschiedenen Auswahloptionen wird im Abschnitt „Vergleich der Prozessierungsmethodik“ jedes Testgebiets Bezug genommen.

Im den folgenden Abschnitten werden einige allgemeine Charakteristika der Höhenkorrektur aufgezeigt. Es wird auf die Wassermaskenqualität der jeweiligen Szene Bezug genommen und beispielhafte Detailausschnitte beschrieben. Wichtig hierbei ist die gute Repräsentation der Wasserflächen bei gleichzeitiger Vermeidung von Fehlklassifikationen. Zusätzlich wird die abgeleitete Centerline einer Bewertung unterzogen, welche ebenfalls exemplarisch im Detail erfolgt.

Im Anschluss wird das eigentliche Höhenmodell analysiert. Der Bedeckungsgrad setzt die geschärfte Wassermaske mit den editierten Wasserflächen im Oberflächenmodell in Beziehung. Indirekt dient diese Aussage als Erfolgsindikator bezüglich der Editierung. Ein hoher Bedeckungsgrad weist sowohl auf eine gut abgeleitete Wassermaske und damit repräsentative Centerline als auch im Zuge dessen auf eine gelungene Editierung hin. Limitierend sind Fehldetektionen in der Landsat-Wassermaske, die sich in der geschärfte Wassermaske fortsetzen und somit berücksichtigt werden. Zusätzlich wird der allgemeine Höhenunterschied zwischen dem höchsten und niedrigsten Höhenwert im Gewässernetzwerk der Szene angegeben. Die Aussage kann auch getroffen werden, wenn Gewässer nicht zusammenhängend sein sollten. Die Angabe zum Höhenunterschied eines Gewässers dient zusätzlich der Veranschaulichung des Gebiets und der Unterschiedlichkeit

der Testgebiete zueinander wie auch zur Verdeutlichung der möglichen Adaptivität des Verfahrens.

Eine weitere Untersuchung stellt anhand von Diagrammen dar, ob die abgeleiteten Höhenwerte konsistent und kohärent sind. Hierzu werden die Höhen entlang der Centerline erfasst, welche im Gegensatz zu den Diagrammen im Abschnitt zur Höhenverarbeitung maßstabsgetreu sind (siehe Abbildungsreihe 26), da die bereits integrierten Höhen in der Fläche und nicht ausschließlich Stützpunkthöhen betrachtet werden. Die Centerline kann Unterbrechungen in der Wassermaske überbrücken und fehlerhafte oder nicht editierte Bereiche des Oberflächenmodells erfassen. Auf diese Weise erscheinen auch fremde und fehlerhafte Höhen im Diagramm, welche manuell entfernt wurden, so dass nur integrierte Höhen vorhanden sind. Zum Zwecke der Vollständigkeit werden fehlerhafte Höhen im Diagramm ebenfalls abgebildet. Sollten die editierten Gewässerbereiche nicht zusammenhängen, werden die größten Segmente einzeln betrachtet. Zum Schluss des allgemeinen Teils wird auf Problemgebiete eingegangen und Lösungsvorschläge werden gesammelt.

Nach der Beschreibung der allgemeinen Charakteristika des Testgebiets werden die unterschiedlichen Prozessierungsmethodiken verglichen. Entsprechend der Tabelle 3 werden alle wählbaren Optionen miteinander verglichen. Hierbei wird weniger auf die Fehler und Probleme der Prozessierung als auf die eigentliche Höheneditierung eingegangen, so dass sichtbar wird, inwiefern die verschiedenen Optionen Einfluss auf die Editierung haben. Es wird der allgemeine Höhenunterschied verglichen sowie die Höhenprofile gegenübergestellt. Zum besseren Vergleich mit der vorhergehenden allgemeinen Beschreibung werden die gleichen Segmente verwendet, die unabhängig von der gewählten Methode unverändert bleiben. Es werden nicht alle Centerlinesegmente der Testgebiete analysiert. Für die Testgebiete Etschtal und Bozen wurde jeweils ein repräsentatives Centerlinesegment ausgewählt. Im Falle des Testgebiets Drau wurden sechs zusammenhängende Centerlinesegmente selektiert, da diese für sich genommen zu kurz und weniger repräsentativ wären.

6.3.1 Testgebiet Bozen

6.3.1.1 Allgemein

Wassermaskenqualität

In einem vorherigen Abschnitt wurde die Wassermaskenschärfung für das Gebiet Bozen exemplarisch durchgeführt. Die Einstellungen mussten verändert werden, um den Eigenschaften des Gebiets gerecht zu werden. Gewässerbereiche sind in dieser Szene sehr

schmal und werden speziell im Stadtgebiet oft unterbrochen. Die Landsat-Wassermaske weist zudem viele Fehldetektionen auf (siehe Abb. 32).

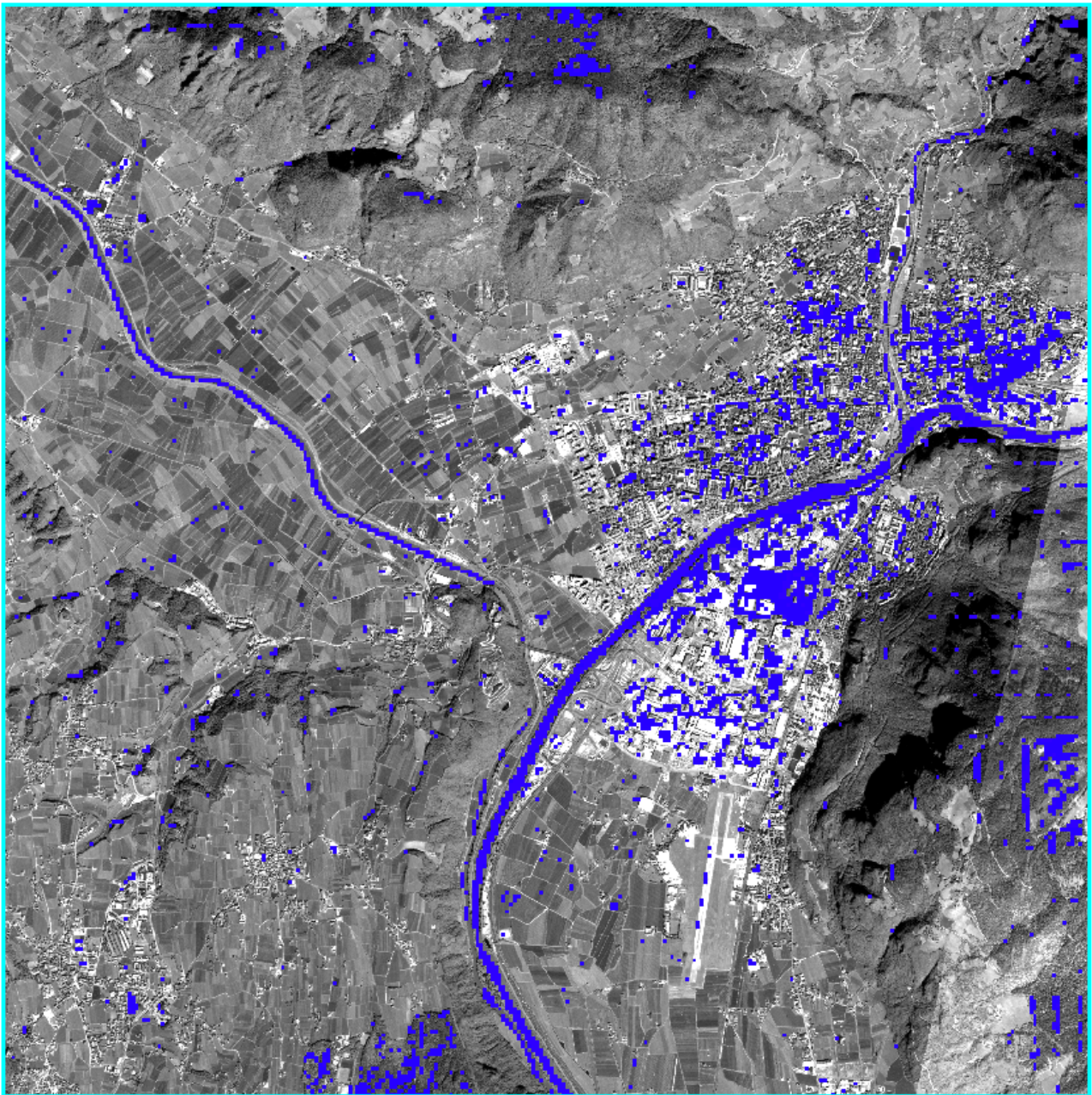


Abb. 32: Orthobild Bozen mit überlagter Landsat-Wassermaske

Aufgrund dessen erhielten die Parameter zur Einhaltung der Homogenitätskriterien des Region Growings hohe Schwellenwerte, um das Regionenwachstum zu reduzieren, da bei schmalen Gewässerbereichen keine Uferbereiche in die Gewässersegmente aufgenommen werden sollten. Zudem wurde der für die Bildung der geschärften Wassermaske notwendige Überlappungsgrad mit 25% als relativ niedrig angesetzt, um den leichten

Lageversatz der Landsat-Wassermaske zum Orthobild auszugleichen. Das Resultat zeigt die geschärfte Wassermaske, welche die Gewässerbereiche repräsentativ abbildet (siehe

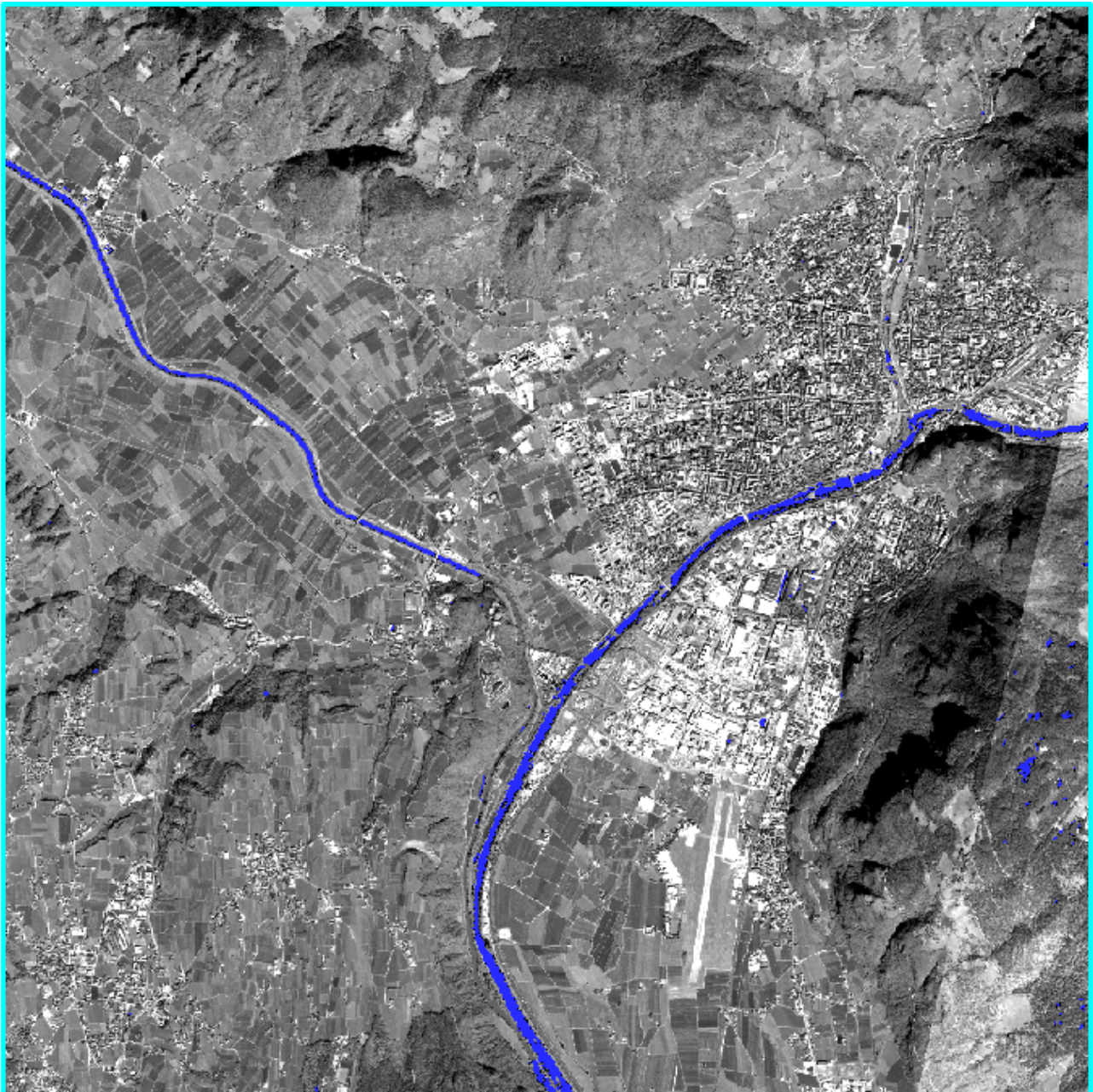


Abb. 33: Orthobild Bozen mit überlagerter geschärfte Wassermaske

Abb. 33). Die Etsch wird bis zum Zusammenfluss mit der Eisack gut abgebildet, speziell am linken Rand der Szene. Die an dieser Stelle etwas breitere Eisack ist ebenfalls korrekt geschärft worden und wird erwartungsgemäß im Bereich von Brücken unterbrochen. Die Talfer unterschreitet die Darstellungsgrenze der Landsat-Wassermaske und erfolgreiche Klassifikationen sind tendenziell zufälliger Natur.

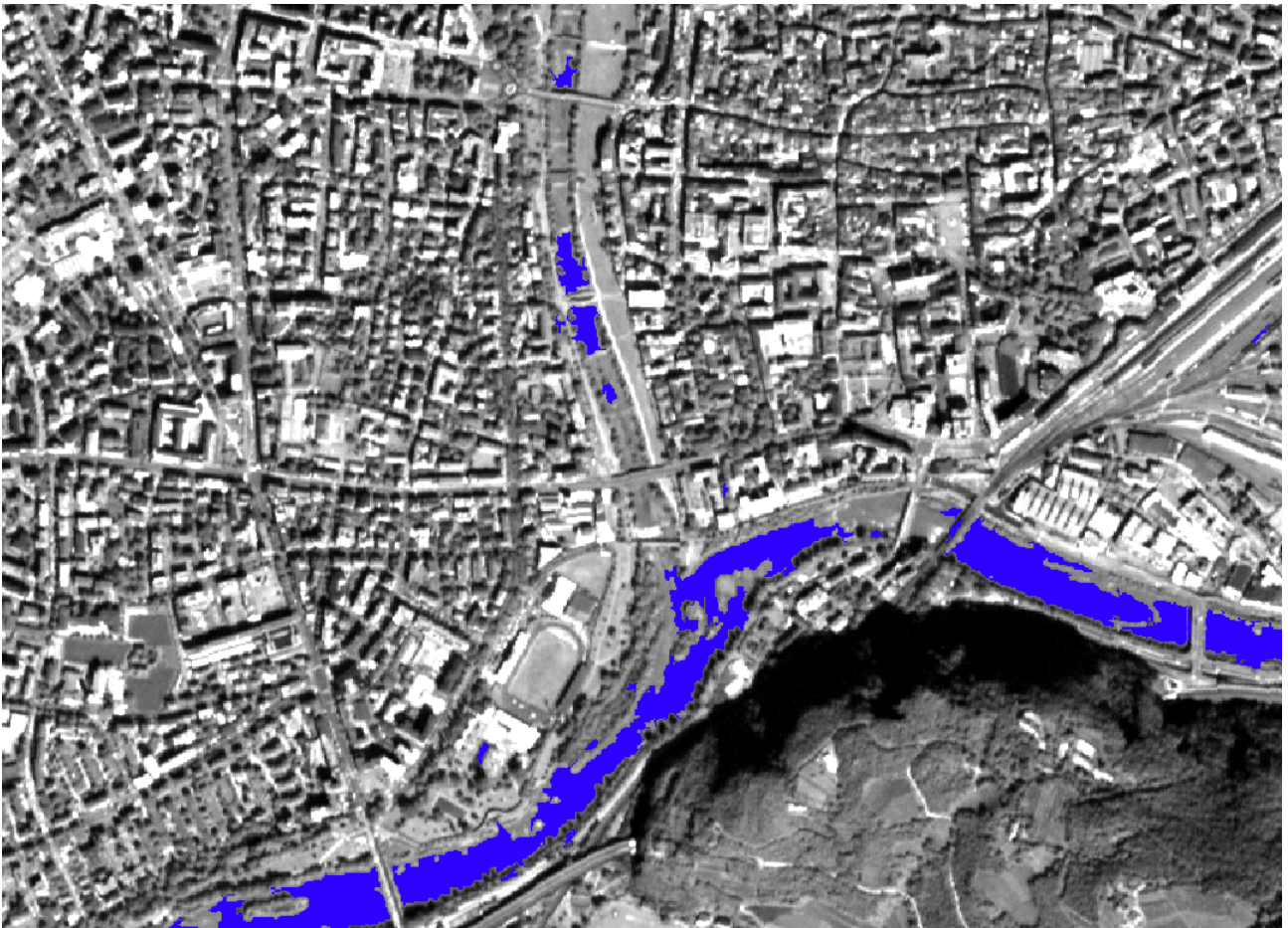


Abb. 34a: Detailausschnitt des Orthobildes überlagert mit geschärfter Wassermaske des Gebiets Bozen

Der abgebildete Detailbereich 34a zeigt den Zusammenfluss von Talfer und Eisack im Innenstadtbereich von Bozen. Aufgrund der hohen Schwellenwerte zur Einhaltung der Homogenitätsbedingungen beim Region Growing existieren fast keine Fehlklassifikationen, sie verhindern aber auch die erfolgreiche Klassifikation von Gewässerbereichen, die von Vegetation überragt werden.



Abb. 34b: Detailausschnitt des Orthobildes überlagert mit geschärfter Wassermaske und Landsat-Wassermaske des Gebiets Bozen

Der zweite Detailausschnitt 34b stellt den Bereich kurz vor dem Zusammenfluss von Etsch und Eisack dar. Der überlagerte Layer in hellgrün zeigt die Landsat-Wassermaske, in blauer Farbe ist die geschärfte Wassermaske zu sehen. Auffallend ist der zentrale Bereich des Ausschnitts, der verdeutlicht, wie sehr der Schärfungsprozess von der ursprünglichen Wassermaske abhängt. An dieser Stelle wurde kein Wasser klassifiziert, so dass keine Grundlage für eine Schärfung vorhanden ist. Ebenfalls signifikant sind die wenigen Fehlklassifikationen in der geschärften Wassermaske, die durch die fehlerhafte Ausweisung von Wasser in der Landsat-Wassermaske potentiell hätten entstehen können.



Abb. 34c: Detailausschnitt des Orthobildes überlagert mit geschärfter Wassermaske und des Gebiets Bozen

Der gezeigte Detailausschnitt 34c bildet die Etsch im nordwestlichen Teil der Szene ab. Gut sichtbar ist die klare Abtrennung von Ufer zu Wasserbereich und die leichten ausfransenden Bereiche am Rand der Wassermaske, welche aus der Ufervegetation resultieren. Dieser Ausschnitt zeigt beispielhaft eine gelungene Wassermaskenschärfung.

Güte der Centerlineableitung

Die Centerline besteht in dieser Szene aus drei Segmenten (siehe Abb. 35). Das erste Segment stellt die Etsch dar, die anderen beiden die Eisack, wobei die Talfer aufgrund fehlender Wassermaske keine Centerline besitzt. Die Centerline repräsentiert im Allgemeinen die geschärfte Wassermaske gut bis ausgezeichnet, weist aber stellenweise Schwächen auf und bildet nicht das gesamte Gewässersystem der Szene ab.

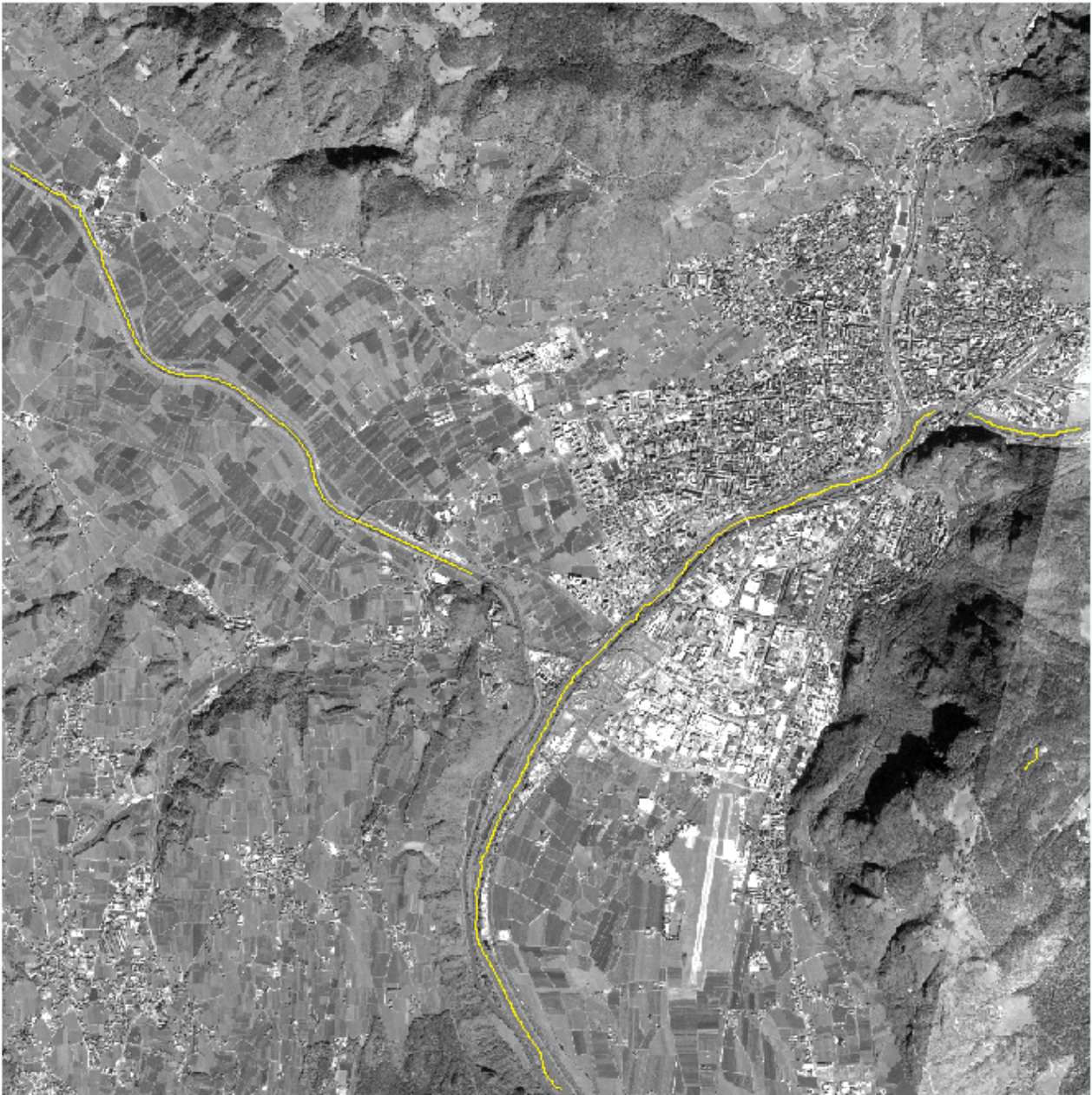


Abb. 35: Orthobild der Szene Bozen mit Centerline

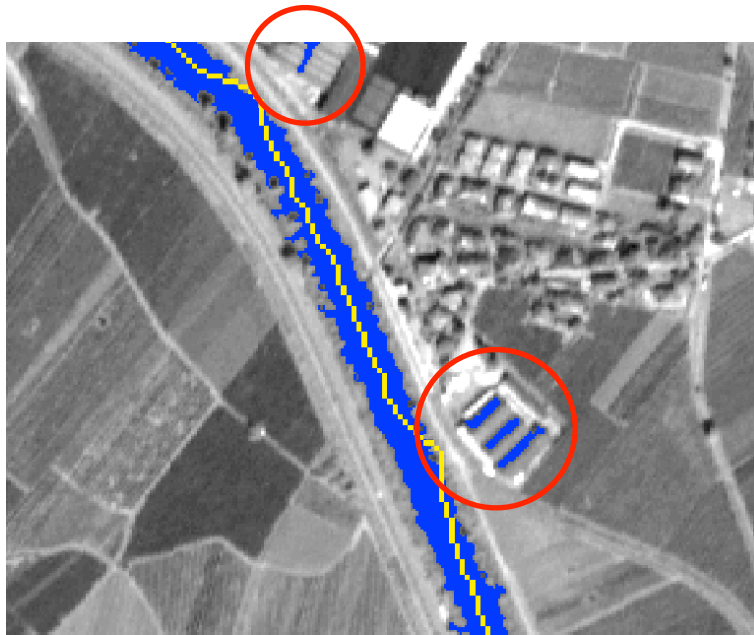


Abb. 36a: Detailausschnitt 1 der Centerline mit geschärfter Wassermaske Bozen

Die Abbildung 36a zeigt die Centerline und die Wassermaske im nördlichen Teil der Etsch. Interessant sind die zwei Ausbuchtungen der Centerline entgegen der östlichen Seite des Flusses, die aufgrund der nahegelegenen Fehlklassifikation entstanden sind (siehe rote Markierung). Auf diese Weise führt die Centerline über den Uferbereich und böte die Möglichkeit der Aufnahme klassifizierter Höhenwerte aus der Fehlklassifikation.

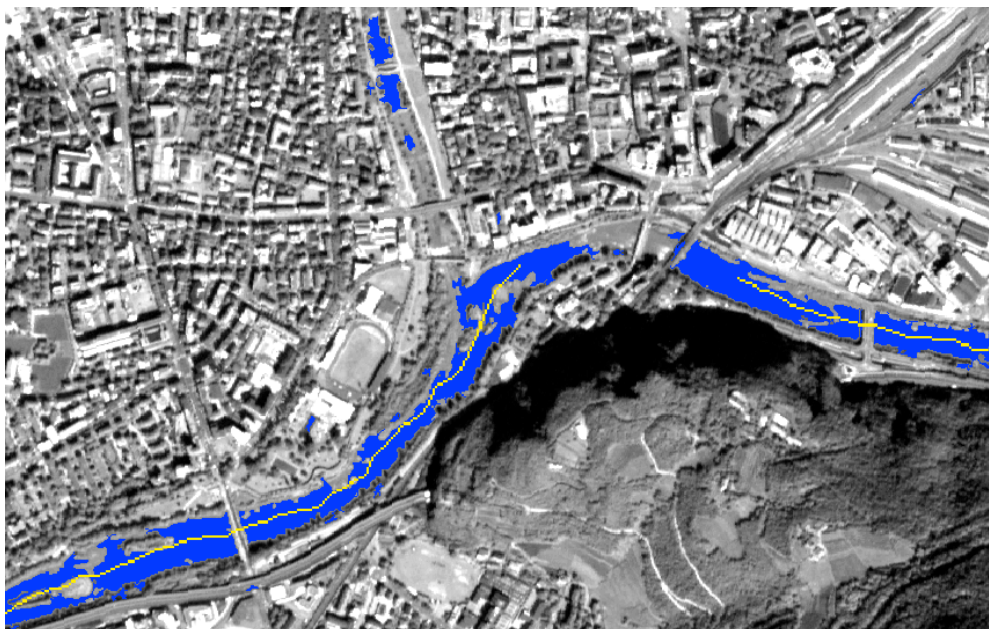


Abb. 36b: Detailausschnitt 2 der Centerline Bozen

Zu sehen sind Teile der beiden Centerlinesegmente der Eisack im Innenstadtbereich Bozens (Abb. 36b). Aufgrund der fehlenden Wassermaske im zentralen Bereich konnte keine Centerline abgeleitet werden, so dass zwei getrennte Segmente entstanden sind.

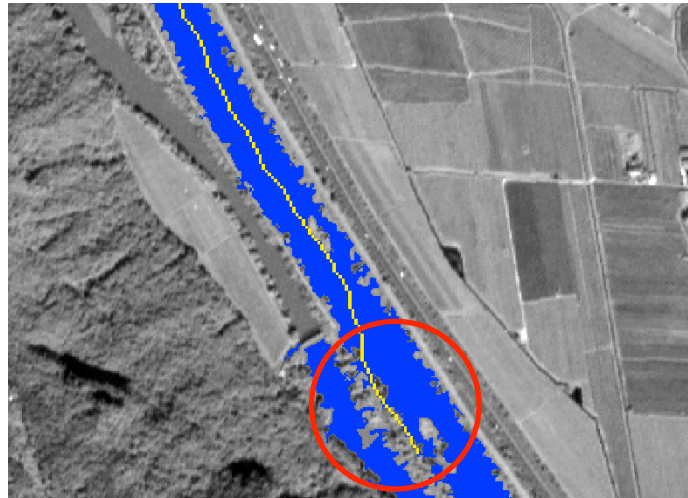


Abb. 36c: Detailausschnitt 3 der Centerline Bozen

Der Detailausschnitt 36c stellt die Centerline im südlichen Szenenrand dar. Der Fluss besitzt einen Seitenarm, der im unteren Teil ebenfalls als Wasser klassifiziert wurde und in die geschärfte Wassermaske übernommen wurde. Infolge dieser Figur liegt die Centerline zwischen beiden Wassermaskenteilen (siehe rote Markierung) und damit außerhalb des Gewässerbereiches.

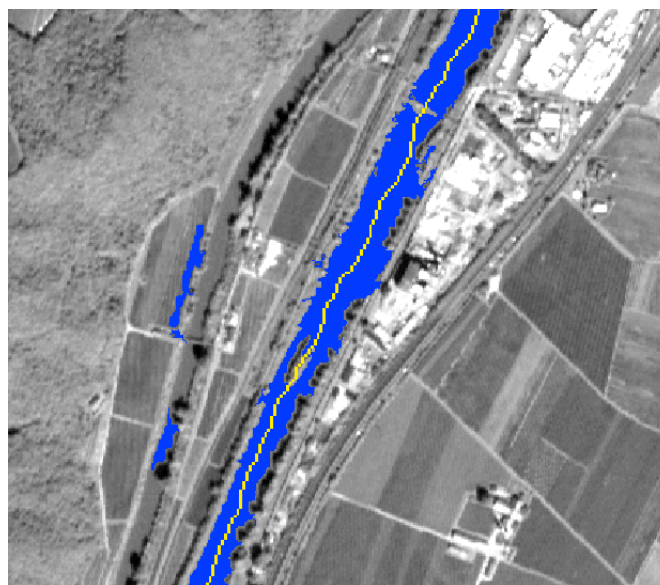


Abb. 36d: Detailausschnitt 4 der Centerline Bozen

Kurz vor dem Zusammenfluss von Etsch und Eisack zeigt der Detailausschnitt 36d die Centerline nur für die Eisack und angesichts der fehlenden Repräsentation der Etsch in der Wassermaske wurde keine Centerline gebildet.

Bedeckungsgrad und allgemeiner Höhenunterschied

Die Szene wird grundsätzlich gut durch drei Centerlinesegmente repräsentiert, so dass 77,85% der identifizierten und geschärften Gewässerflächen im finalen Höhenmodell editiert wurden. Einige Bereiche, speziell der Eisack, konnten nicht korrigiert werden.

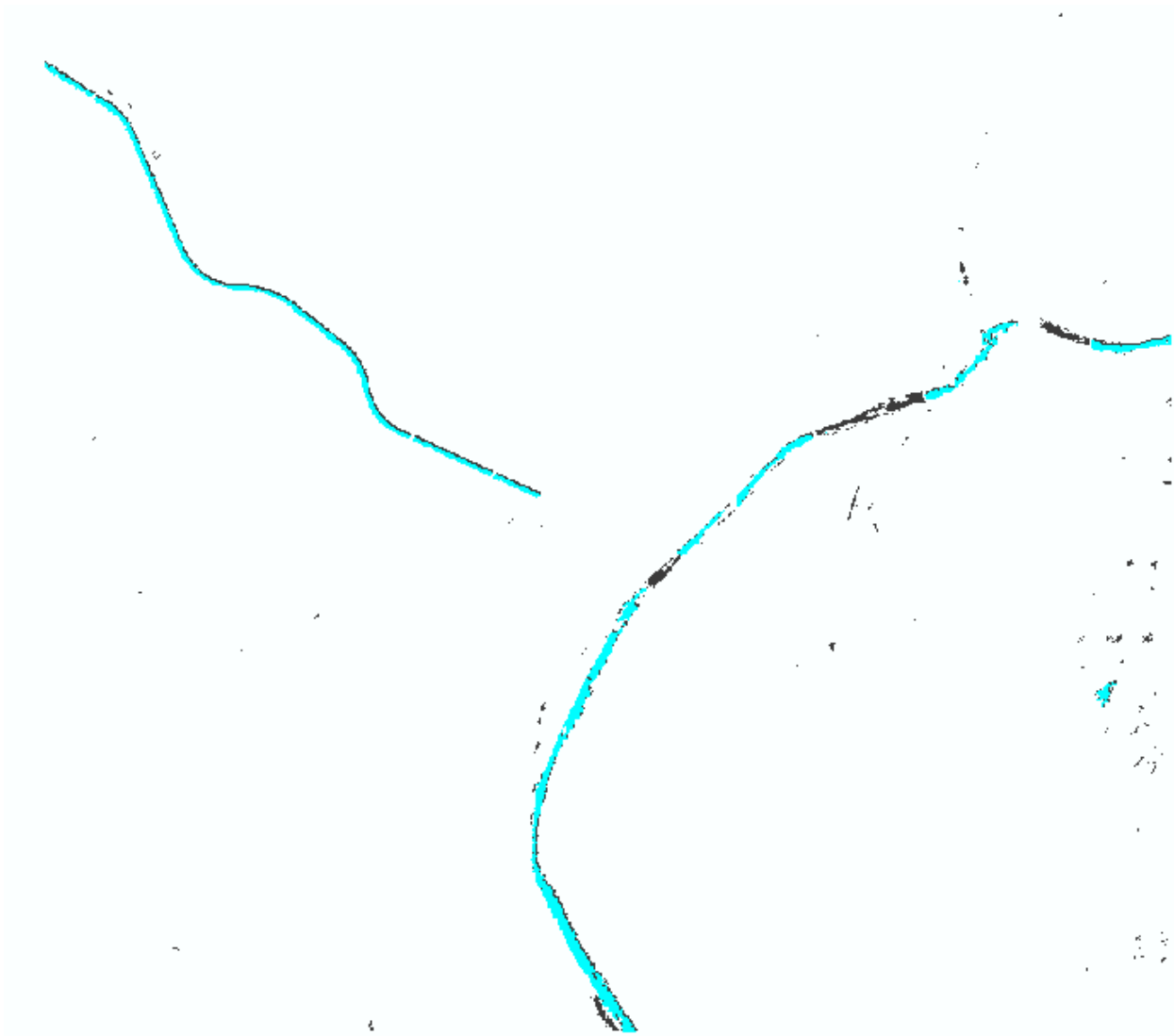


Abb. 37: Abbildung zeigt den Grad der Editierung an, türkise Flächen waren Teil der Editierung, schwarze Bereiche waren Teil der Wassermaske, wurden aber nicht editiert

Schwarze Bereiche in Abbildung 37 sind in der Höhenkorrektur unberücksichtigt geblieben. Ohne einer ausreichenden Anzahl an Stützpunkthöhen findet keine

Höhenverarbeitung statt, so dass die Bereiche als *Void* ausgewiesen werden. Fehlklassifikationen im rechten Bildrand sind weitestgehend ignoriert worden, so dass diese aufgrund ihres einheitlichen Hintergrundwertes leicht korrigierbar sind. Das Segment der Etsch im Nordwesten der Szene ist gut abgedeckt worden. Der leichte Lageversatz der Datenlayer in der Abbildung – sichtbar an den schwarzen Rändern entlang der Maske – resultiert aus unterschiedlichen Projektionen.

Der allgemeine eingebrachte Gewässerhöhenunterschied der Szene (siehe Abb. 38) liegt bei 29,8 m, wobei sich der höchste Punkt (259,51) im Osten von Bozen und der niedrigste Punkt (229,71 m) am südlichen Ausfluss befindet. Der höchste Punkt am Anfang der Etsch im Nordwesten liegt bei 232,11 m.



Abb. 38: Abbildung zeigt den höchsten (rot) und niedrigsten (grün) Punkt (Auslass) des Testgebiets ‚Bozen‘

Höhenkonsistenz

Zur Überprüfung der Höhenkonsistenz werden die drei Centerlinesegmente als Diagramm aufgetragen. Hierbei bildet die x-Achse den Höhenverlauf und die y-Achse die Höhe selbst ab.

Das erste Segment ist das der Etsch im nordwestlichen Bereich der Szene (siehe Abb. 39).

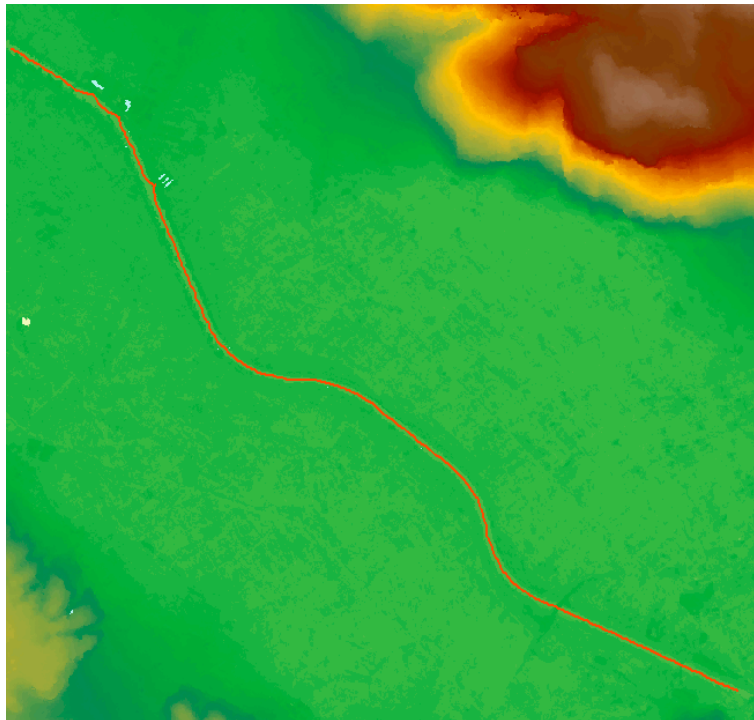


Abb. 39: 1. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets ‚Bozen‘

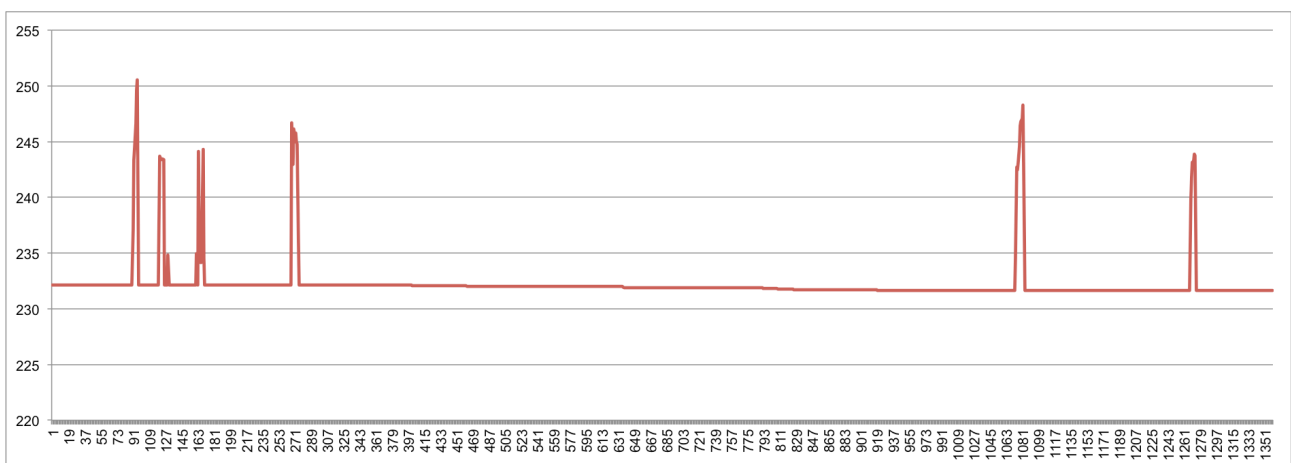


Abb. 40: Diagrammdarstellung des 1. Centerlinesegments des Teilausschnittes mit Ausreißern (Brücken etc.)

Erkennbar ist ein Abnehmen der Höhen entlang der x-Achse und sechs Ausreißer mit ca. 10-15 m Höhe (siehe Abb. 40), bei welchen es sich um Brücken handelt, die nicht unterbrochen wurden. Die Wassermaske wird durch Brücken getrennt, die Centerline zwangsläufig nicht, sofern die Schwellenwerte bei der Centerlineableitung ein Überbrücken von Unterbrechungen zulassen (siehe Abb. 25a, Kap. 5.1.3).

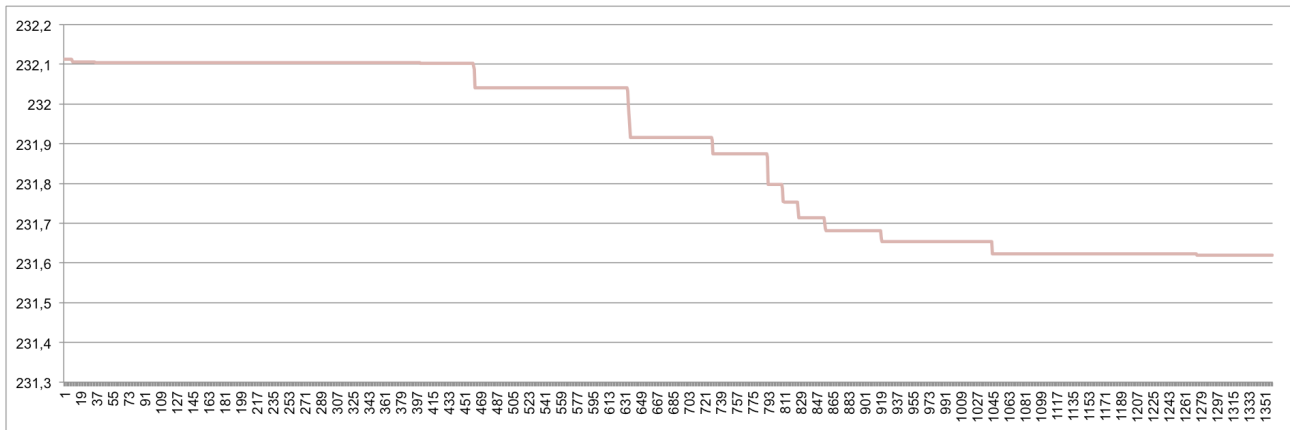


Abb. 41: Diagrammdarstellung des 1. Centerlinesegments mit ausschließlich editierten Höhen, (skalierte Ansicht)

Nach Entfernung der Ausreißer kann auf den relevanten Ausschnitt skaliert werden (siehe Abb. 41). Neben der stufenweisen Abnahme der Höhen ist der geringe Höhenunterschied von 0,5 m zu bemerken. Die Höhenkonsistenz und -kohärenz ist hier gegeben, da die Höhen zusammenhängend einen Abfluss darstellen.

Das zweite Segment umfasst den östlichen Bereich der Szene nahe der Stadt Bozen (siehe Abb. 42). Es besteht aus zwei Wassermaskenteilen, von welchen eines *Void* ist und das andere nur einen Höhenwert besitzt.

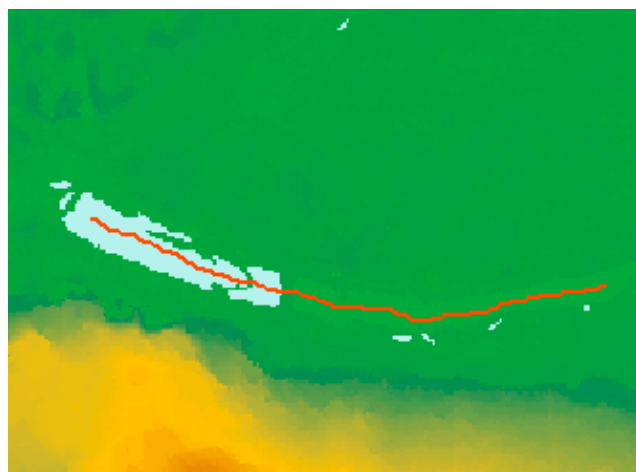


Abb. 42: 2. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets ‚Bozen‘

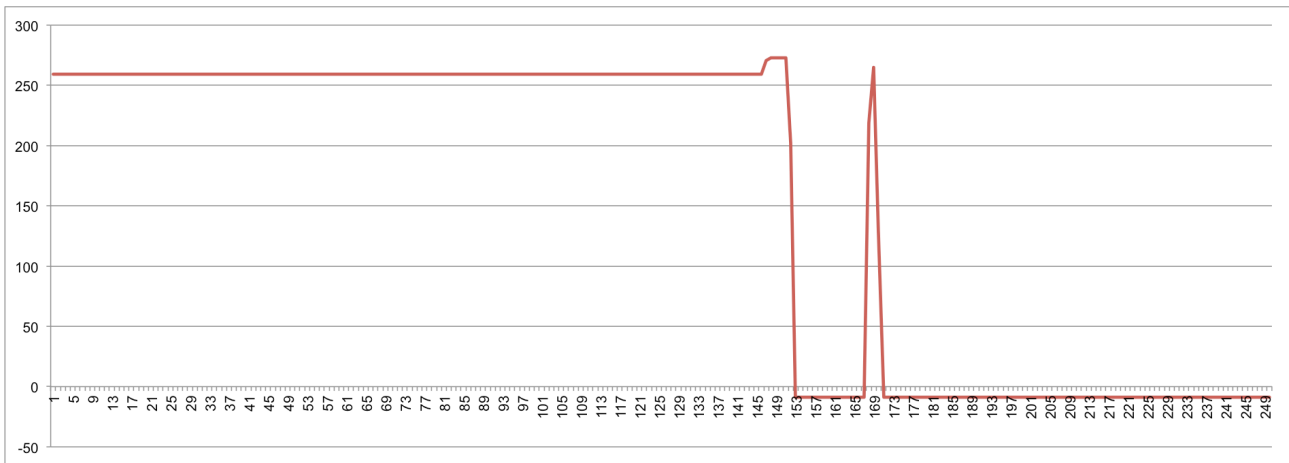


Abb. 43: Diagrammdarstellung des 2. Centerlinesegments mit Ausreißern

Entlang der x-Richtung kommt es zu einem Ausreißer, da die Centerline über eine nicht unterbrochene Brücke verläuft und die Höhen mit einbezogen werden (siehe Abb. 43). Die starke Abnahme der Höhen resultiert aus dem Voidbereich.

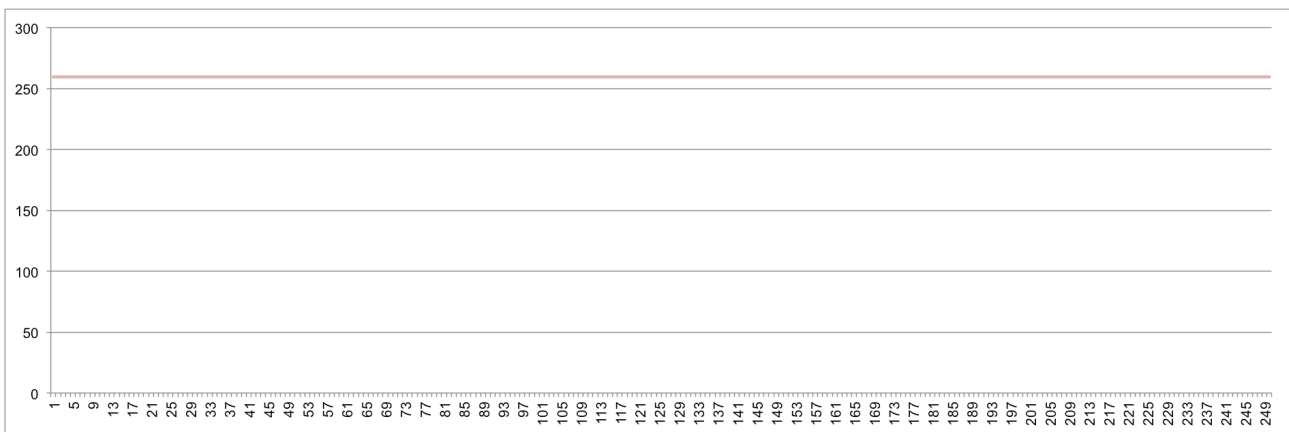


Abb. 44: Diagrammdarstellung des 2. Centerlinesegments nach Entfernung der Fehler

Nach der Ausreißerentfernung besteht das Segment nur aus einer Höhe. Es ist deshalb kohärent und konsistent, stellt aber einen Ausnahmefall dar. Das ist insofern möglich, dass dieses Segment eine geringe Größe aufweist und somit nur ein reliabler Höhenstützpunkt vorhanden war, so dass dieser infolgedessen für das komplette Segment verwendet wird.

Das dritte Segment dieser Szene erstreckt sich von der Stadt Bozen bis zum Auslass im Süden (siehe Abb. 45).

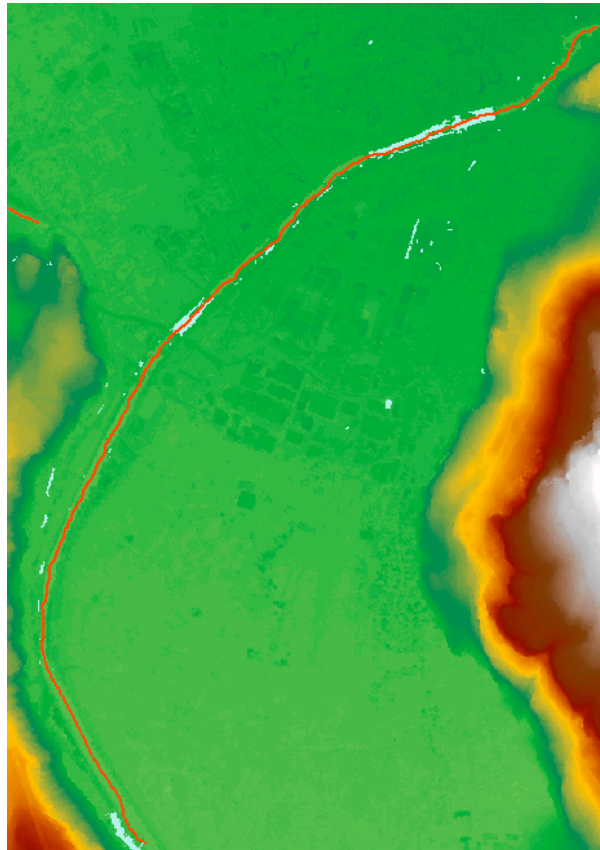


Abb. 45: 3. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets ‚Bozen‘



Abb. 46: Diagrammdarstellung des 3. Centerlinesegments Bozen mit Ausreißern

Prägend für diesen Abschnitt sind die vielen Voidbereiche, die sich im Diagramm manifestieren (siehe Abb. 46). Die Centerline enthält sehr viele Höhen, welche nicht als Gewässer identifiziert worden sind.

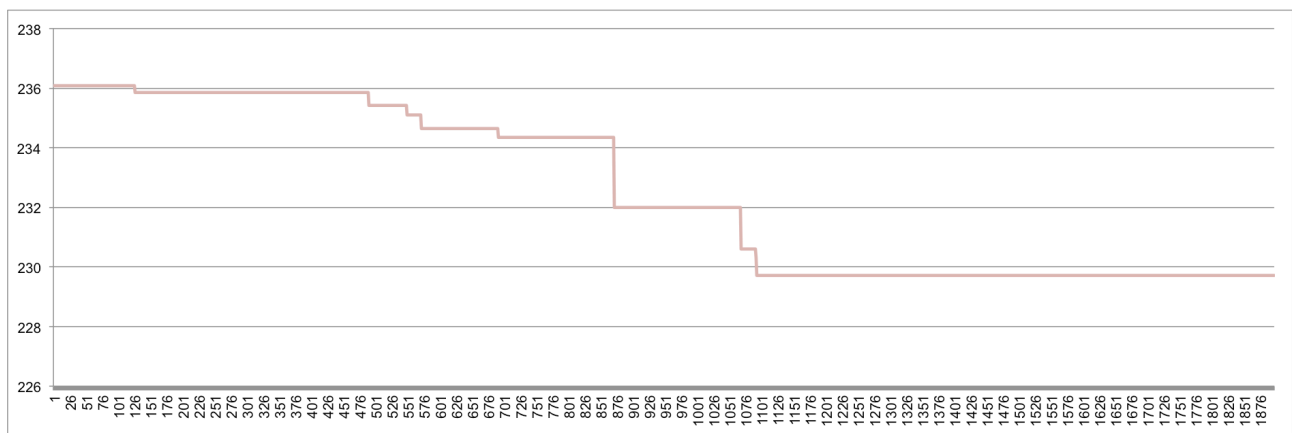


Abb. 47: Diagrammdarstellung des 3. Centerlinesegments nach Entfernung der Fehler

Nach der Ausreißerentfernung sind die Höhen entlang der x-Richtung absteigend und damit ein Abfluss erkennbar (siehe Abb. 47). Dieser Bereich wirft durch die schlechte Wassermassenqualität und die damit verbundene fehlerhafte Ableitung der Centerline Schwierigkeiten auf, die Höhen der Segmente sind jedoch konsistent und kohärent.

Problemgebiete

Eine Betrachtung der Gesamtszene ist nur bedingt möglich, da im Zwischenbereich von Segment 1 und 3 keine Editierung stattgefunden hat. Segment 2 und 3 liegen jedoch nah beieinander und der Höhenunterschied der beiden nächstgelegenen Höhenwerte von über 23 m wirft Fragen auf (siehe Abb. 48).

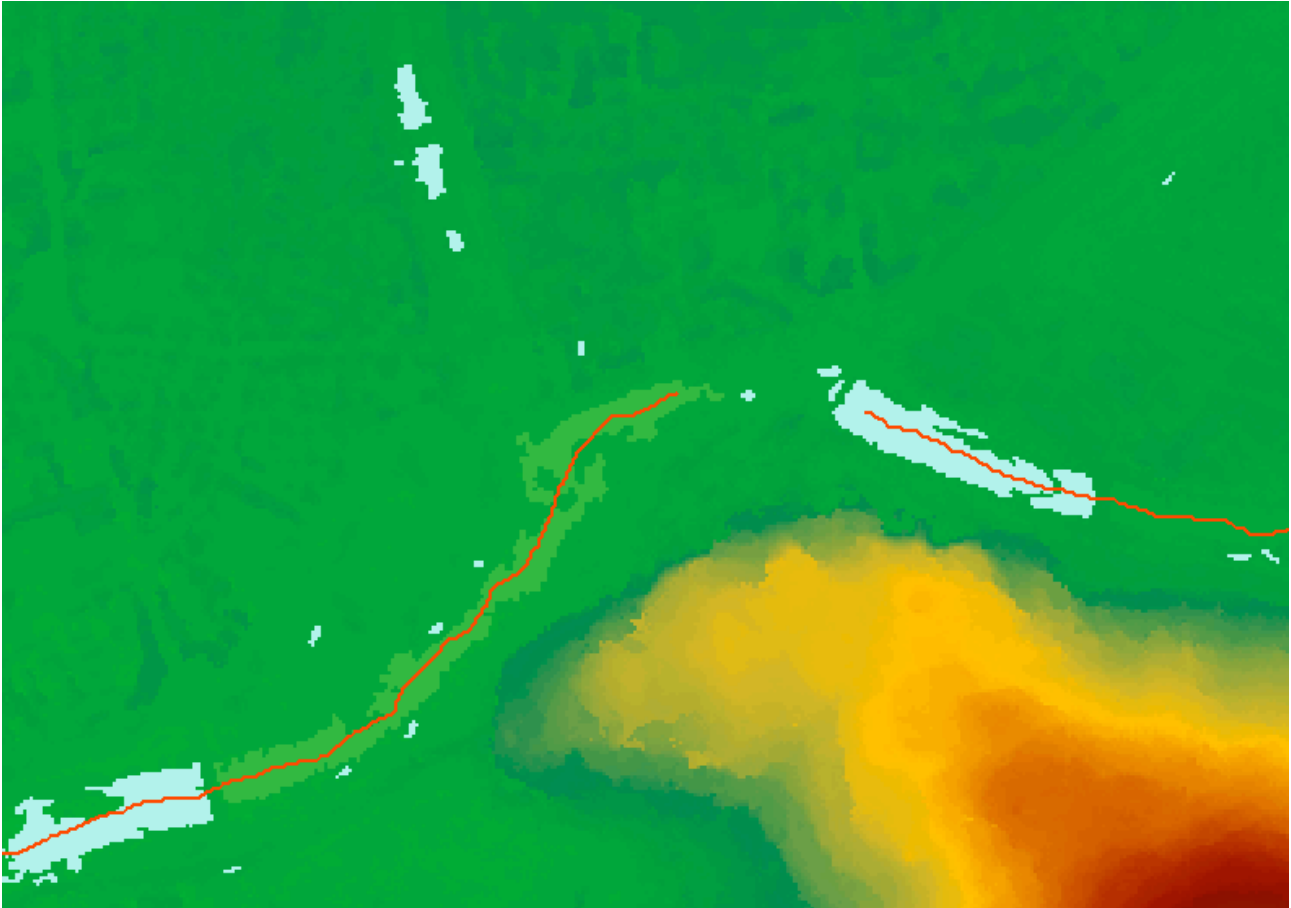


Abb. 48: Das 2. und 3. Centerlinesegment sind nicht miteinander verbunden

Wenn nur wenige Uferhöhenwerte klassifiziert werden, ist die statistische Stabilität als gering zu erwarten, so dass speziell in urbanen und bergigen Gebieten wie diesen potentiell unzuverlässigere Werte verarbeitet werden können.

Die Wassermaske weist insbesondere im städtischen Gebiet Schwächen auf, so dass das dritte Centerlinesegment und die damit verbundene Höhenkorrektur scheitert. Eine Nachbearbeitung ist an dieser Stelle unabdingbar. Die Höhen wurden entsprechend dem Abflusskriterium jedoch korrekt behandelt und stellen hierfür eine geeignete Grundlage zur Verfügung.

6.3.1.2 Vergleich der Prozessierungsmethodiken

In diesem Abschnitt werden die beiden Klassifikationsmethodiken (siehe Kap. 5.1.2) mit den zwei Möglichkeiten zur Einbringung des Abflusskriteriums für das Testgebiet Bozen in Zusammenhang gebracht. Wie im allgemeinen Teil (siehe Kap. 6.3.1.1) bereits erwähnt wurde, besteht das Testgebiet aus drei Centerlinesegmenten, von welchen jenes, das die Etsch im Nordwesten darstellt, aufgrund guter Abbildung am besten für den Vergleich geeignet ist.

Höhenprofil

Die vier möglichen Kombinationen aus linearem [*linear*]²⁵, adaptiven [*adapt*] Abflusskriterium und der Verwendung von Qualitylayern [*Quality*] und Orthobild/Oberflächenmodell [*Ortho*] wurden anhand eines Diagramms gegenübergestellt (siehe Abb. 49). Im Vorfeld wurden die Höhenwerte von Ausreißern befreit (vgl. dazu Ausreißerbefreiung im vorherigen Abschnitt 6.3.1.1).

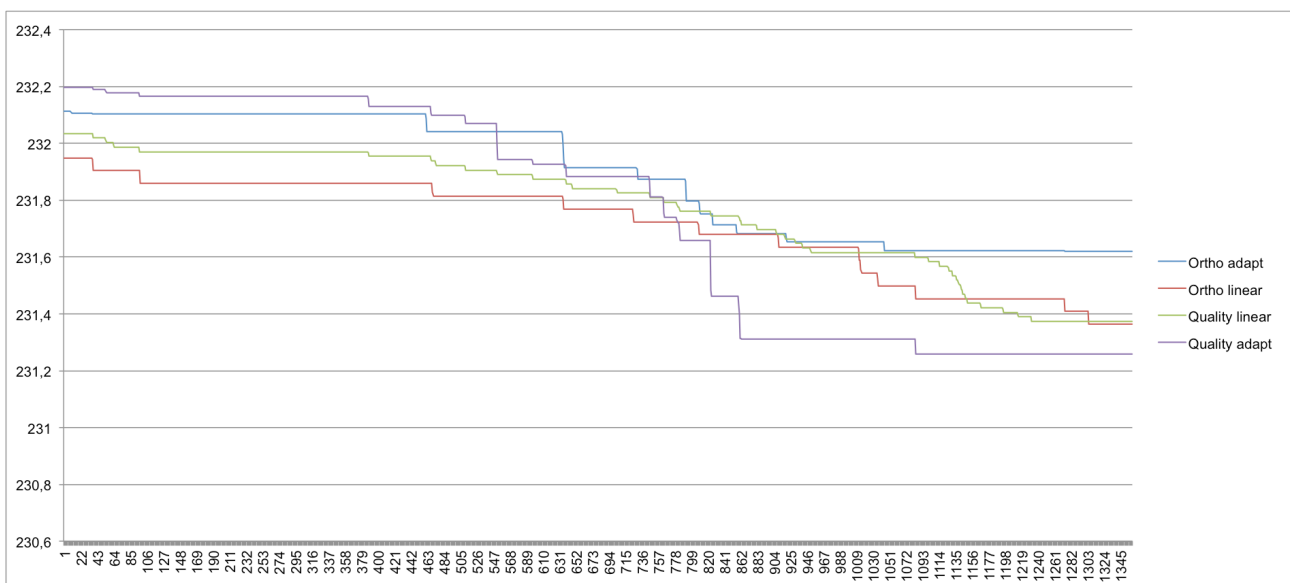


Abb. 49: Vergleich der vier unterschiedlichen Prozessierungsmethodiken am Testgebiet ‚Bozen‘

Insgesamt besitzt dieses Segment entlang der Centerline 1360 Höhenwerte nach der Editierung. Die Höhenwerte aller Kombinationen bewegen sich im gleichen Intervall und besitzen einen ähnlichen Kurvenverlauf, auch wenn die Variante mit Qualitylayer und adaptivem Abflusskriterium die größte Ausdehnung besitzt.

²⁵ Name des Abflusskriteriums bzw. Klassifikationsmethodik in eckigen Klammern steht für Bezeichnung in Diagramm und Tabelle

	<i>Ortho adapt</i>	<i>Ortho linear</i>	<i>Quality linear</i>	<i>Quality adapt</i>
Max	232,113	231,949	232,035	232,198
Min	231,619	231,364	231,374	231,258
Differenz	0,494	0,586	0,661	0,940
Mean	231,883	231,708	231,772	231,753
Std	0,208	0,172	0,212	0,391

Tabelle 4: Statistiken zur Prozessierung des Testgebiets ‚Bozen‘, Angaben in Metern

Die Tabelle 4 zeigt statistische Größen der vier Varianten. Es werden der maximale und minimale Höhenwert der jeweiligen Höhenkurve sowie deren Differenz angegeben. Zudem wurde aus allen Werten einer Höhenkurve der Mittelwert sowie die Standardabweichung ermittelt.

Die Höhendifferenz der Orthobild/Oberflächenmodell Variante mit adaptivem Abflusskriterium ist am geringsten, wohingegen die Variante über Qualitylayer mit gleichem Abflusskriterium am höchsten ist. Dies lässt sich auf die Charakteristika der Klassifikationsmethodik zurückführen. Der Höhenunterschied klassifizierter Uferhöhen ist bei der Orthobildklassifikation tendenziell geringer als bei der Qualitylayerklassifikation, da Objekthöhen von morphologischen Höhen unterschieden werden können. Das adaptive Abflusskriterium berücksichtigt im Gegensatz zum linearen Ansatz lokale Ausprägungen stärker, was sich infolgedessen in der Höhendifferenz manifestiert.

Resümee

Das Centerlinesegment ist in allen Fällen das gleiche, lediglich die Höhenklassifikation und die anschließende Verarbeitung unterscheiden sich. Durch das relativ flache Gebiet sind größere Abweichungen der unterschiedlichen Varianten ausgeblieben. Die Abbildung 50 zeigt das hydrologisch korrigierte Oberflächenmodell des Testgebiets Bozen.

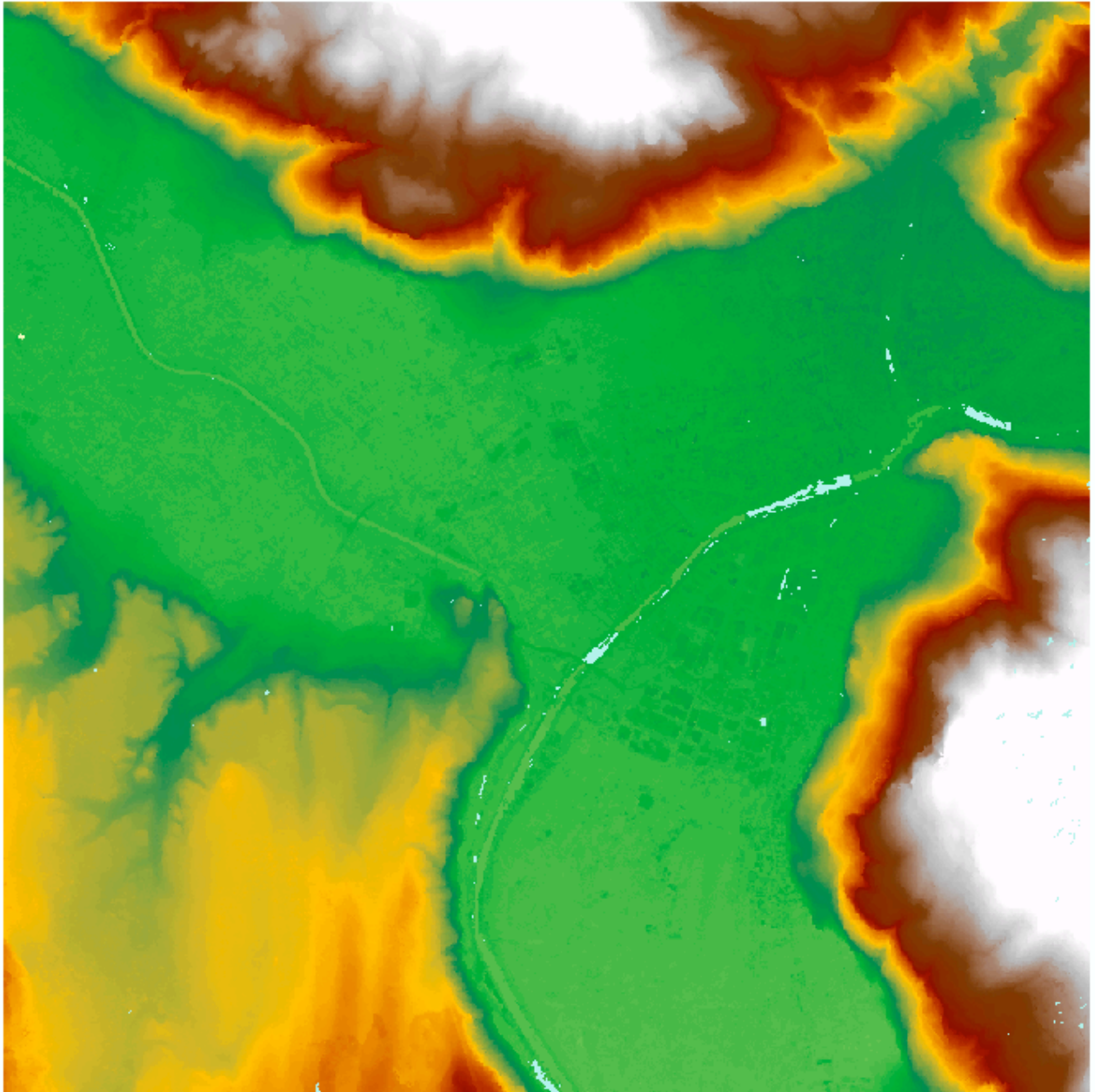


Abb. 50: Hydrologisch korrigiertes Oberflächenmodell Bozen

6.3.2 Etschtal

6.3.2.1 Allgemein

Wassermaskenqualität

Die Landsat-Wassermaske für dieses Testgebiet ist dem gleichen Datensatz entnommen wie für das Testgebiet Bozen.

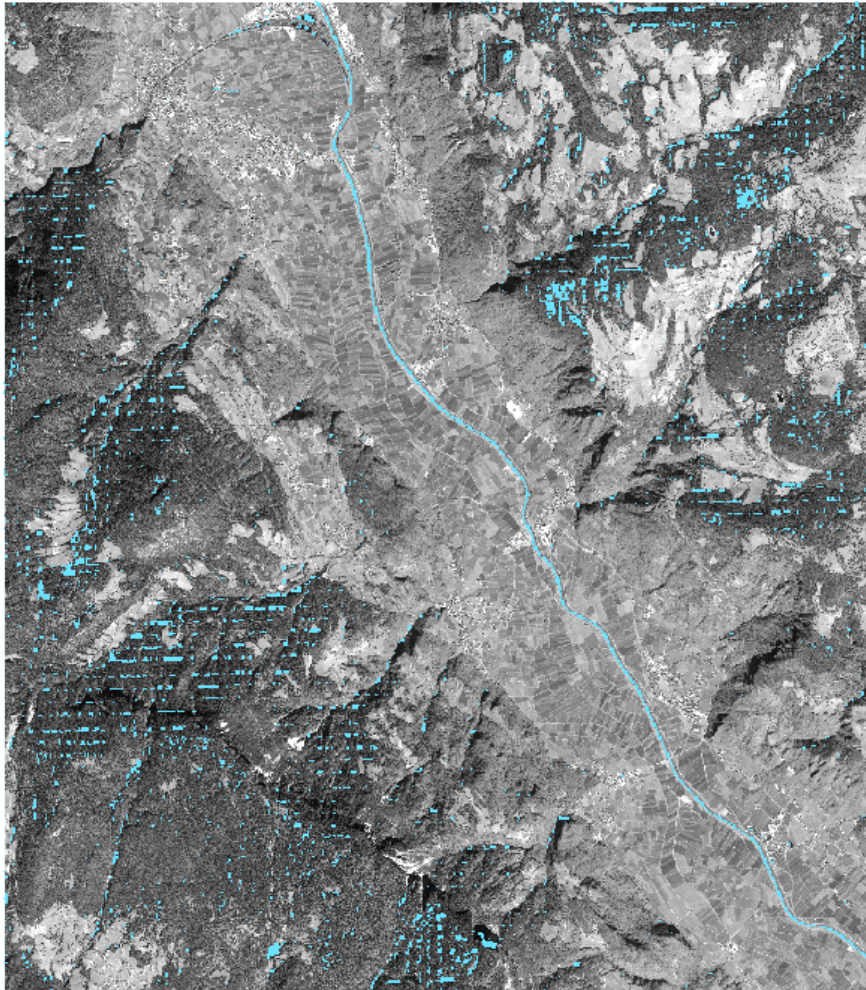


Abb. 51: Orthobild überlagert mit Landsat-Wassermaske des Testgebiets ‚Etschtal‘

Gut erkennbar sind die streifenhaften Artefakte in der Landsat-Wassermaske, welche vor allem in gebirgigen und bewaldeten Bereichen östlich und westlich der Etsch auftreten (siehe Abb. 51). Die Etsch selbst wird durchgängig abgebildet, selbst die teichartigen Strukturen im nördlichen Bereich der Szene.

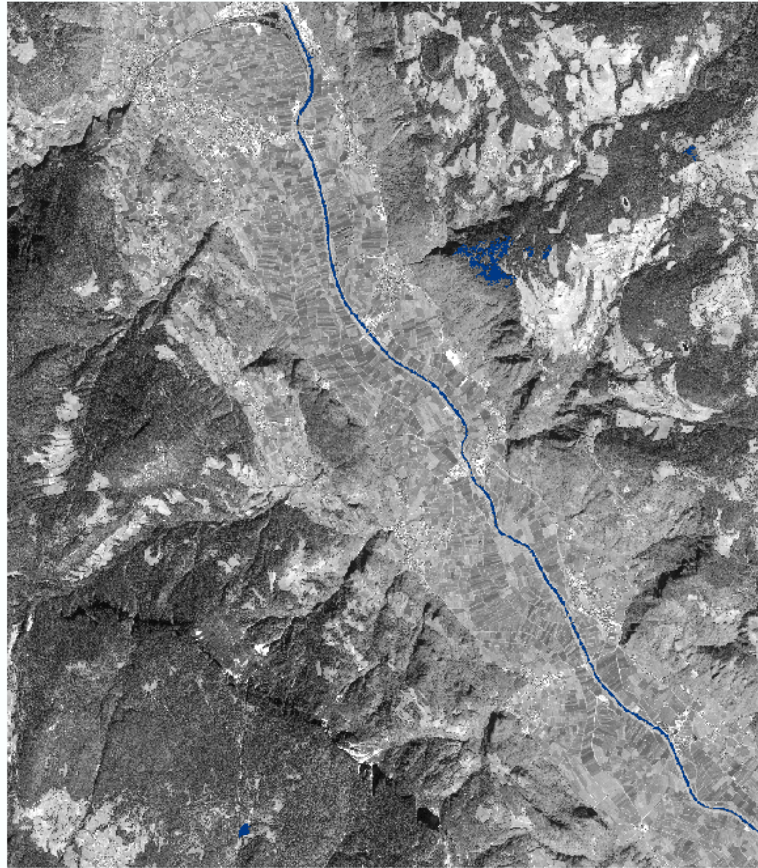


Abb. 52: Orthobild des Etschtals mit geschärfter Wassermaske

Die geschärfte Wassermaske dieses Testgebiets zeigt, wie erfolgreich das Verfahren der Wassermaskenschärfung eine Fortpflanzung von Fehlklassifikationen vermeiden kann. Der Fluss wurde durchgängig und gut abgebildet (siehe Abb. 52).

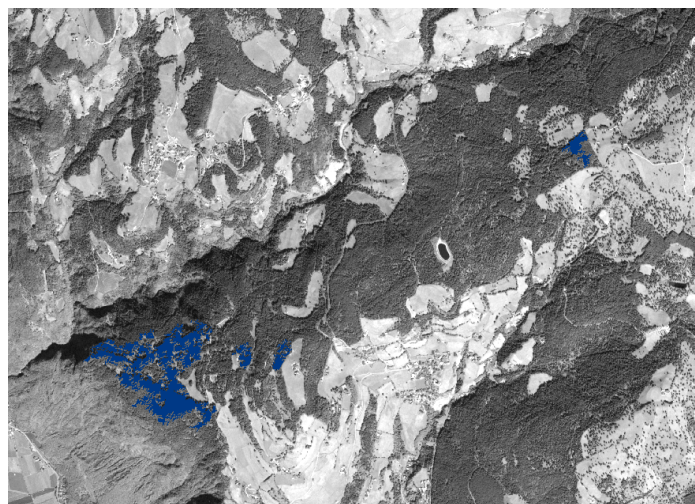


Abb. 53a: Detailausschnitt der geschärften Wassermaske des Testgebiets ‚Etschtal‘

Der erste Detailausschnitt 53a zeigt Fehlklassifikationen im Osten der Szene, welche aus Hangschatten resultieren. Fehler dieser Art sind nach manueller Bearbeitung der Landsat-Wassermaske auszuschließen.



Abb. 53b: Detailausschnitt der geschärften Wassermaske des Testgebiets ‚Etschtal‘

Der Ausschnitt 53b stellt die Etsch im Süden der Szene dar. Der Fluss wird in der Wassermaske gut repräsentiert, welche durch Brücken unterbrochen wird und steht stellvertretend für die ebenfalls gelungene Wassermaskenschärfung in den restlichen Bereichen dieses Testgebiets.



Abb. 53c: Detailausschnitt der geschärften Wassermaske des Testgebiets ‚Etschtal‘

Die Abbildung 53c zeigt die Landsat-Wassermaske in türkis im Norden der Szene, welche von der geschärften Wassermaske in dunkelblau überlagert wird. Die Etsch wird korrekt abgebildet, wohingegen die Teichlandschaft (siehe Markierung Abb. 53d) nicht in die geschärfte Wassermaske übernommen wurde, da beide Gewässer spektral zu sehr voneinander abweichen. Die Wassermaske ist etwas ausgefranst und passt sich damit an die Ufervegetation an.



Abb. 53d: Zu Abb.53c gehöriger Ausschnitt des Orthobildes Etschtal

Güte der Centerlineableitung

Aufgrund der gut definierten Wassermaske und der einfachen Flussstruktur wurde die Centerline zuverlässig abgeleitet und besteht aus zwei Centerlinesegmenten, die die Etsch abbilden (siehe Abb. 54). Die Centerline wurde auch für die Fehlklassifikationen im östlichen Bereich der Szene gebildet.

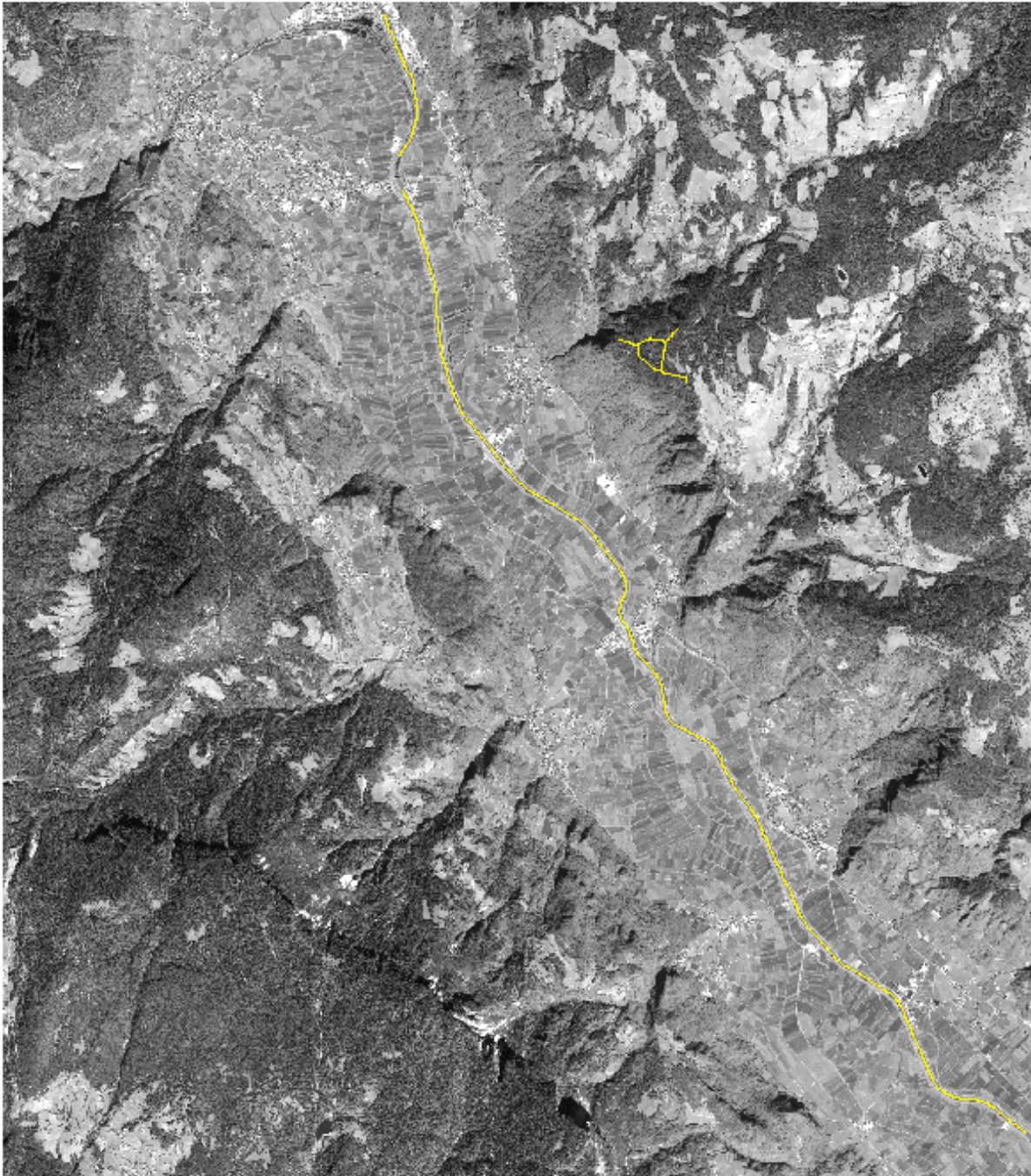


Abb. 54: Centerline des Testgebiets ‚Etschtal‘

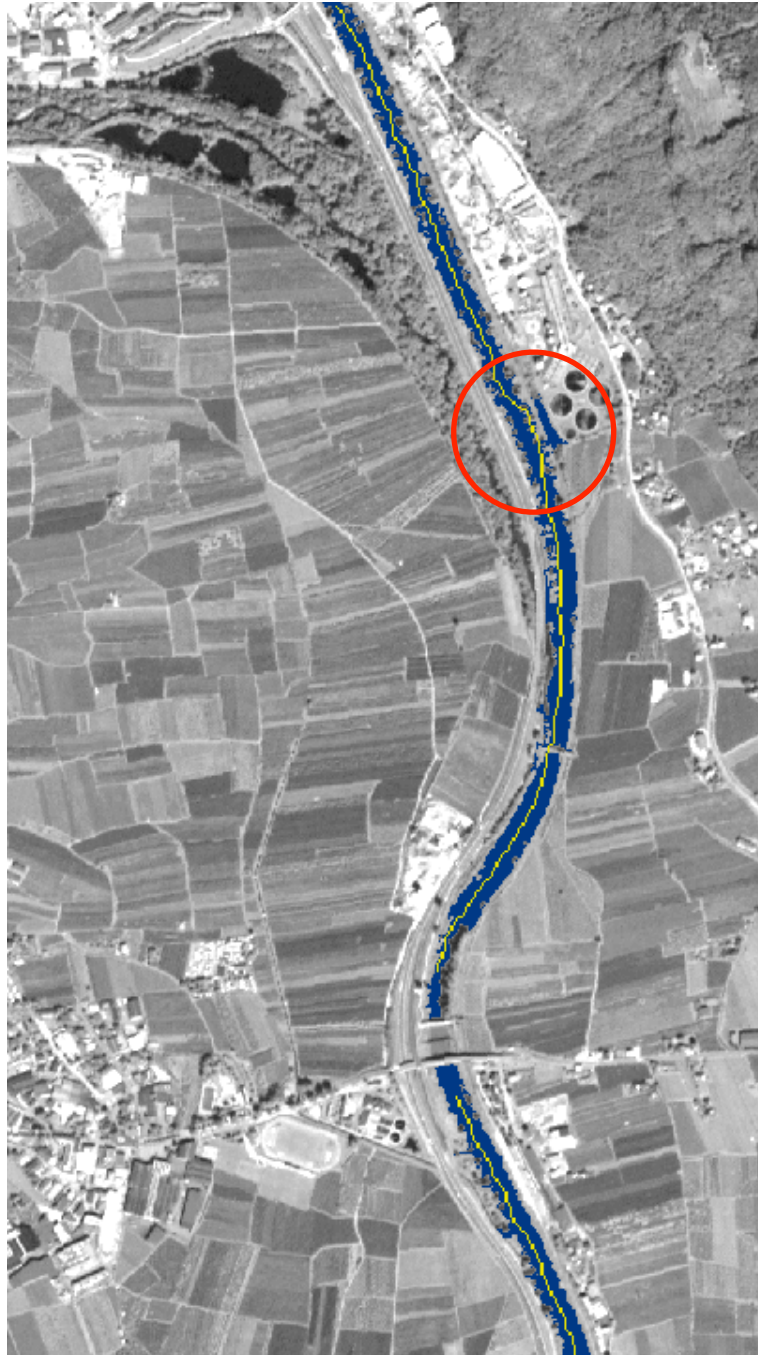


Abb. 55a: 1. Detailausschnitt der Centerline des Testgebiets ‚Etschtal‘

Die erste Detailabbildung 55a zeigt den Bereich südlich der Stadt Meran und das erste Centerlinesegment, welches bis zu einer Brücke im unteren Teil des Ausschnitts durchgängig ist. Ebenso tritt erneut das Phänomen auf, dass die Centerline durch eine

Ausbuchtung den Uferbereich streift, da es in Gewässernähe eine Fehldetektion gibt (siehe rote Markierung in der Abbildung 55a).



Abb. 55b: 2. Detailausschnitt der Centerline des Testgebiets ‚Etschtal‘

Weiter südlich setzt sich die zweite Centerlinesegment korrekt fort und keine Fehler sind erkennbar (siehe Abb. 55b). Die Flussbreite variiert kaum und die Brücken sind zu schmal, um die Centerline erneut zu unterbrechen. Für die weitere Verarbeitung stellt dies eine ideale Voraussetzung dar.

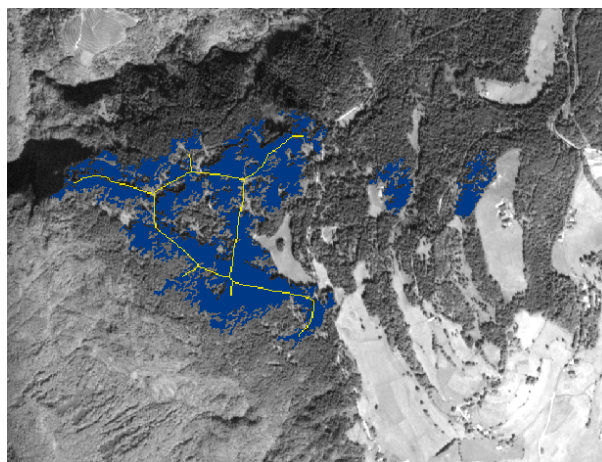


Abb. 55c: 3. Detailausschnitt der Centerline des Testgebiets ‚Etschtal‘

Die letzte Detailaufnahme des dritten Centerlinesegments zeigt die Centerline im Gebiet der Fehlklassifikation (siehe Abb. 55c). Fehlklassifikationen können, wie auch im Testgebiet Bozen gezeigt, die Centerlineableitung beeinflussen oder wie in diesem Beispiel in einer eigenen Centerline resultieren. Nachträglich kann dieses Gebiet korrigiert werden, wird aber innerhalb des Prozesses ignoriert.

Bedeckungsgrad und allgemeiner Höhenunterschied

Die Etsch besteht in diesem Testgebiet aus zwei Centerlinesegmenten. Editiert wurden insgesamt 79,91% der ursprünglichen Fläche der Wassermaske, Fehlklassifikationen sind dabei eingeschlossen, so dass der Bedeckungsgrad hierdurch natürlicherweise reduziert wird, da diese auch Teil der Wassermaske sind. Vor allem der in der Markierung in Abbildung 56 sichtbare schwarze Bereich der Fehlklassifikation stellt einen verhältnismäßig großen Flächenanteil der gesamten Wassermaske da, so dass die statistische Angabe des Bedeckungsgrades irreführend gering erscheint, obwohl der gesamte relevante Flussbereich erfolgreich editiert wurde.

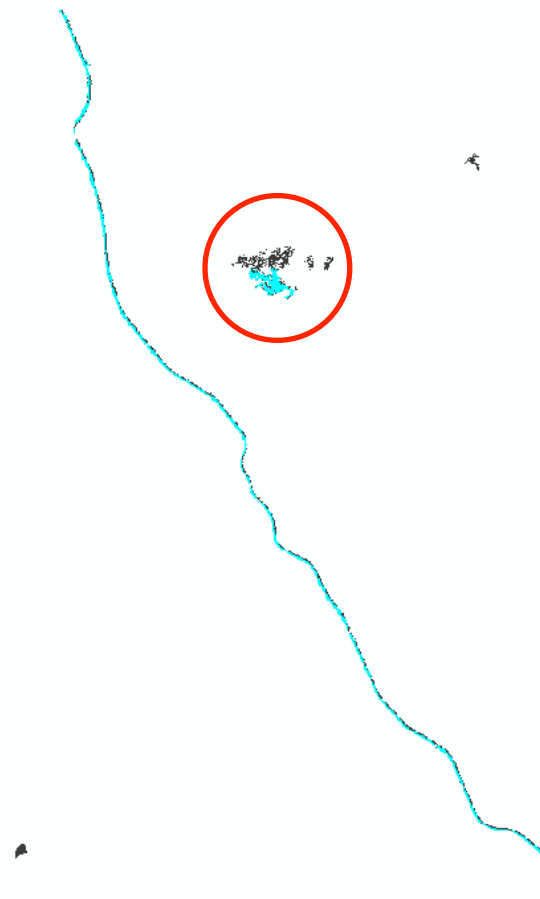


Abb. 56: Abbildung zum Bedeckungsgrad des Testgebiets ‚Etschtal‘

Die Abbildung 56 zeigt, dass der gesamte Flusslauf editiert wurde. Der Lageversatz der Überdeckungsklassifikation zur Wassermaske ergibt sich wie beim Testgebiet Bozen durch unterschiedliche Projektionen der Datensätze.

Der Gewässerhöhenunterschied von Nord nach Süd beträgt 19,79 m bei einer Flusslänge von gut 18,5 km. Der höchste Punkt liegt mit 255,26 m im Norden, der niedrigste bei 235,47 m beim Auslass im Süden (siehe Abb. 57).



Abb. 57: Darstellung der höchsten (rot) und niedrigsten (grün) Gewässerhöhe

Höhenkonsistenz

Das erste Centerlinesegment (siehe Abb. 58) des Testgebietes Etschtal ist mit 523 abgenommenen Höhen deutlich kürzer als das zweite mit 4012 Höhen.

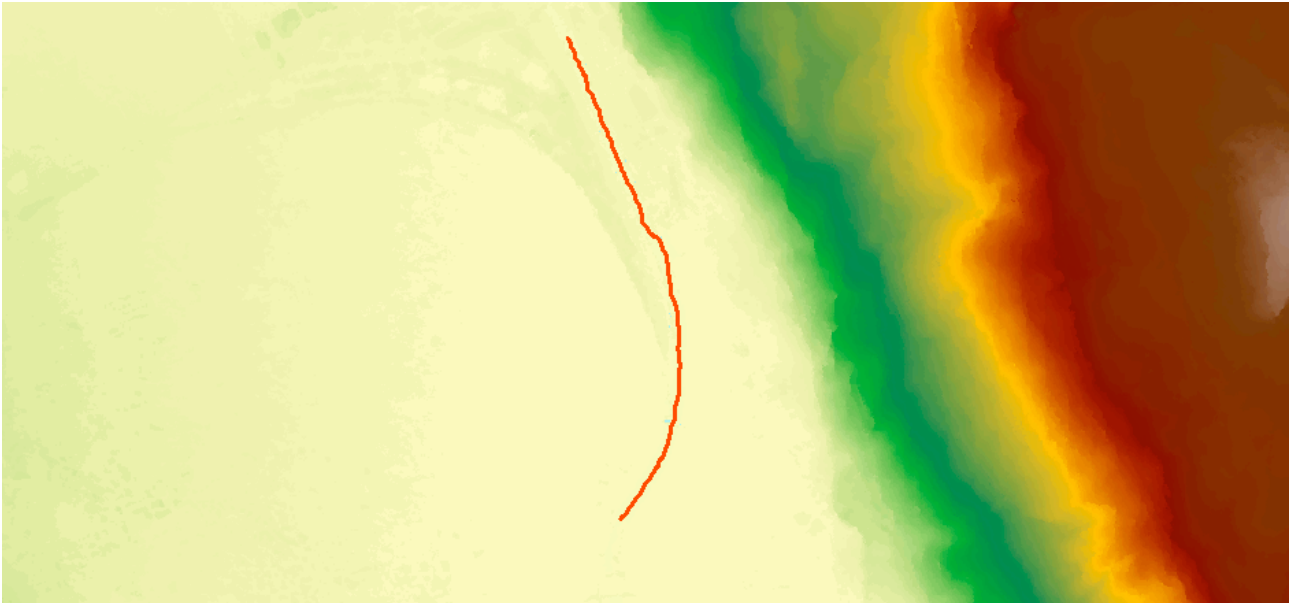


Abb. 58: 1. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets ‚Etschtal‘



Abb. 59: 1. Höhenverlauf des 1. Centerlinesegments inklusive Brücken und Fehler

Die Höhen entlang der Centerline (siehe Abb. 59) zeigen neben Brücken ebenso Ausreißer, welche aus Bereichen stammen, welche zwar Teil der Wassermaske sind, aber für die keine Höhenverarbeitung stattgefunden hat, da keine repräsentative Menge an Höhenwerten vorhanden war.

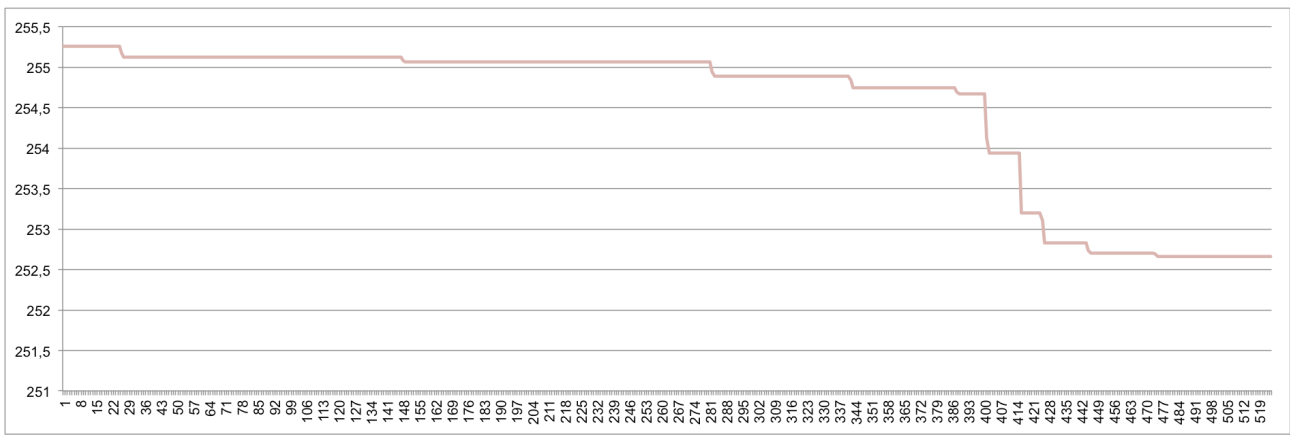


Abb. 60: 1. Centerlinesegment nach Entfernung der fehlerhaften Bereiche

Nach der Entfernung fremder Höhen aus dem Diagramm ergibt sich folgender Verlauf (siehe Abb. 60). Die Höhen dieses Segments sind konsistent und kohärent. Im Süden anschließend beginnt das zweite Centerlinesegment, welches bis zum Auslass reicht (siehe Abb. 61).

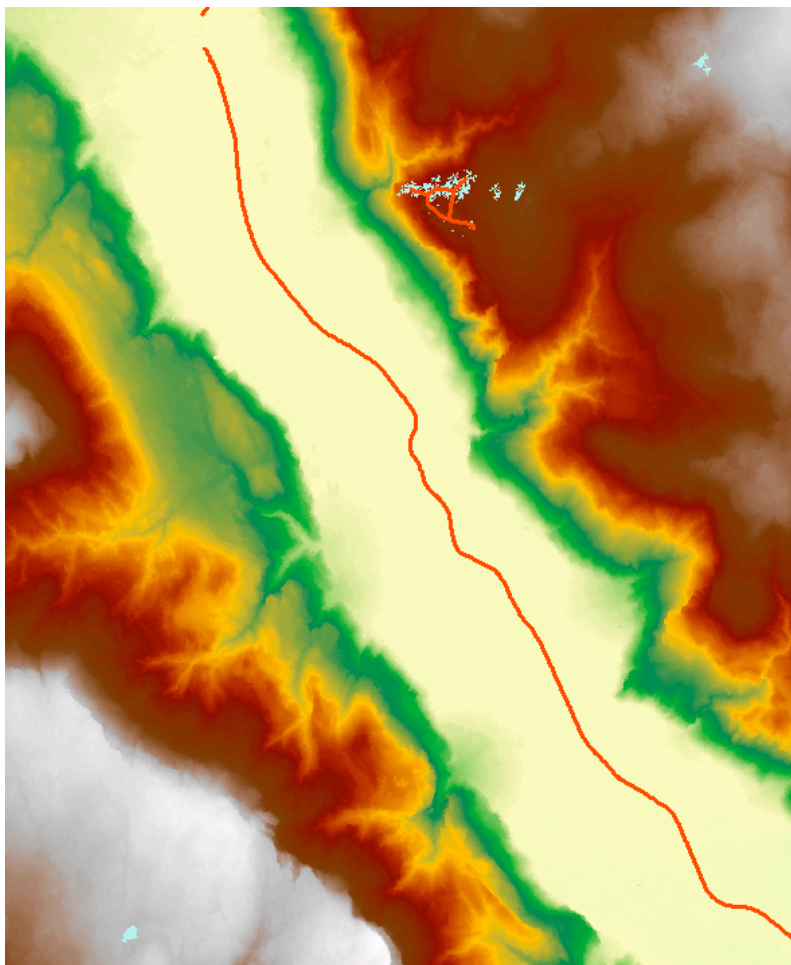


Abb. 61: 2. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets ‚Etschtal‘

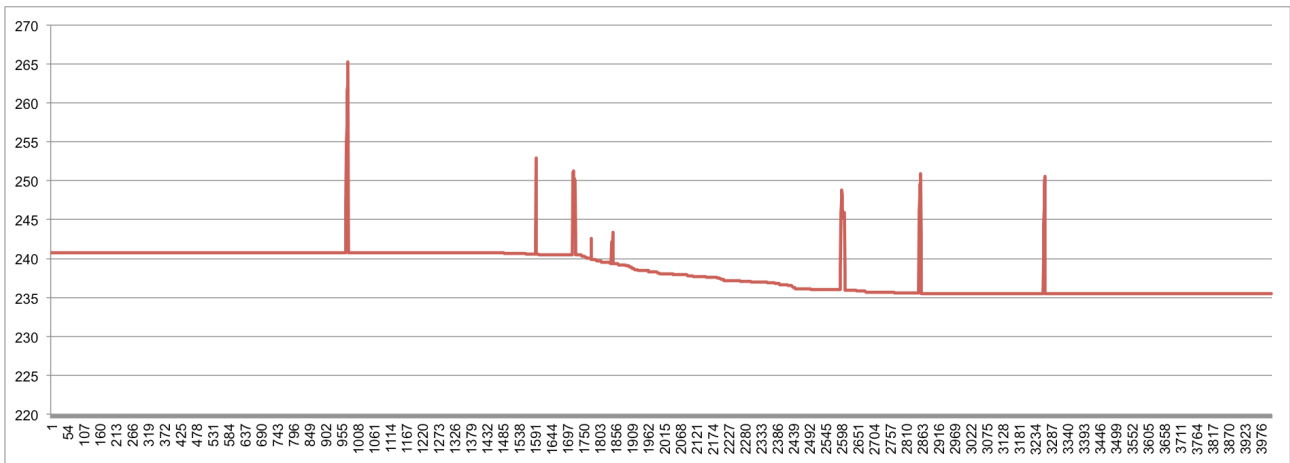


Abb. 62: Belassene Höhenkurve des 2. Centerlinesegments (inklusive gut sichtbarer Brücken)

Die unbearbeiteten Höhen zeigen erneut Brücken und Bereiche, welche die Centerline überspannt (siehe Abb. 62).

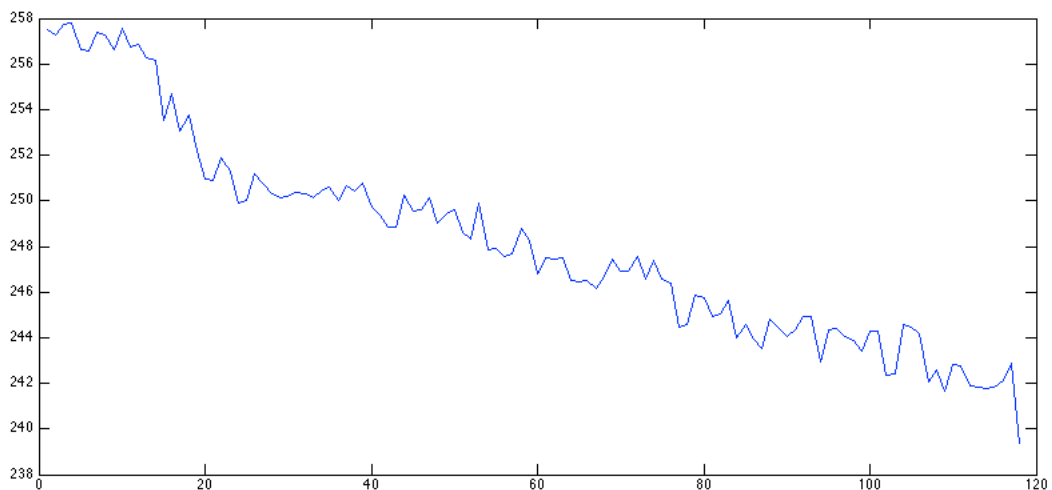


Abb. 63: Der Höhenverlauf innerhalb des Prozesses ohne jegliche Verarbeitung. Der Abfluss ist gut erkennbar

Interessant an dieser Stelle ist die gelungene Klassifikation der Uferhöhen, so dass bereits ohne Höhenverarbeitung ein Abfluss erkennbar wurde (siehe Abb. 63). Der vertikale Offset, der für die Editierung abgezogen wird, ist in dieser Abbildung nicht berücksichtigt.

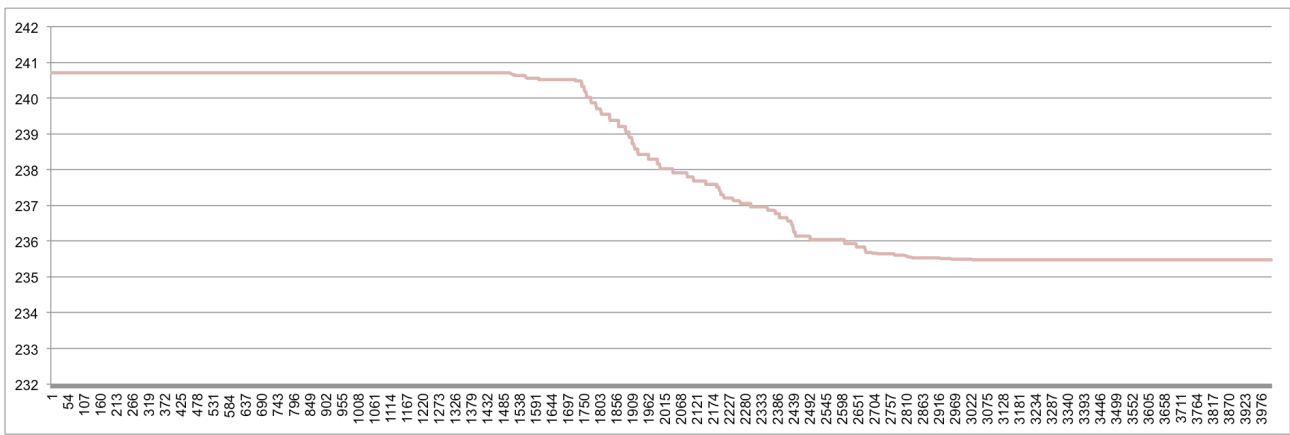


Abb. 64: 2. Centerlinesegment des Gebiets ‚Etschtal‘ nach Entfernung unzugehöriger Höhen

Nach der Höhenverarbeitung und der Entfernung fremder Höhen bildet sich der Höhenverlauf ab. Eine Abnahme der Höhen ist im mittleren Drittel gut erkennbar, wohingegen das erste und letzte Drittel nur geringe Höhenveränderungen aufweist. Die Kohärenz und Konsistenz der Höhen sind bei diesem Segment erfüllt.

Problemgebiete

Die Höheneditierung für den Verlauf der Etsch dieses Testgebiets ist korrekt, so dass die einzigen problematischen Gebiete fehlklassifizierte Bereiche in den höheren Lagen sind (siehe Abb. 65). Im Speziellen sind die fehlklassifizierten Bereiche im östlichen Bereich zu nennen, welche sich in einer erwartungsgemäßen fehlerhaften Höheneditierung fortsetzen.

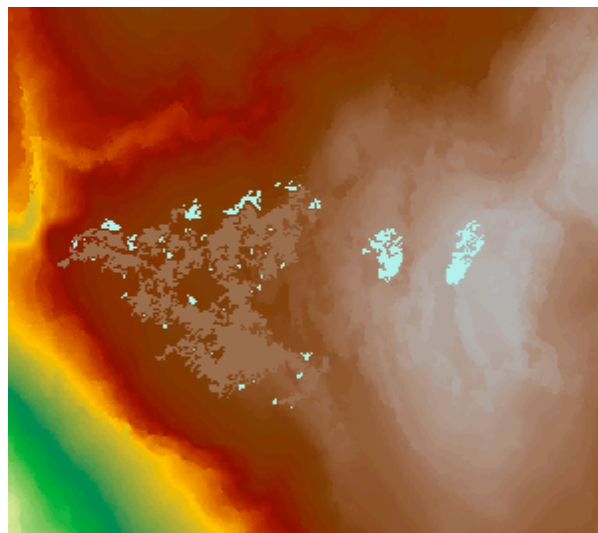


Abb. 65: Fehlerhafte Klassifikation setzt sich in falscher Oberflächenmodelleditierung fort, Gebiet ‚Etschtal‘

6.3.2.2 Vergleich der Prozessierungsmethodiken

Für die Bewertung und den Vergleich der unterschiedlichen Methodiken wird das längere der beiden Centerlinesegmente verwendet.

Höhenprofil

Analog zum ersten Testgebiet wurden die unterschiedlichen Klassifikationsmethodiken den verschiedenen Arten der Einbringung des Abflusskriteriums gegenübergestellt (siehe Abb. 66).

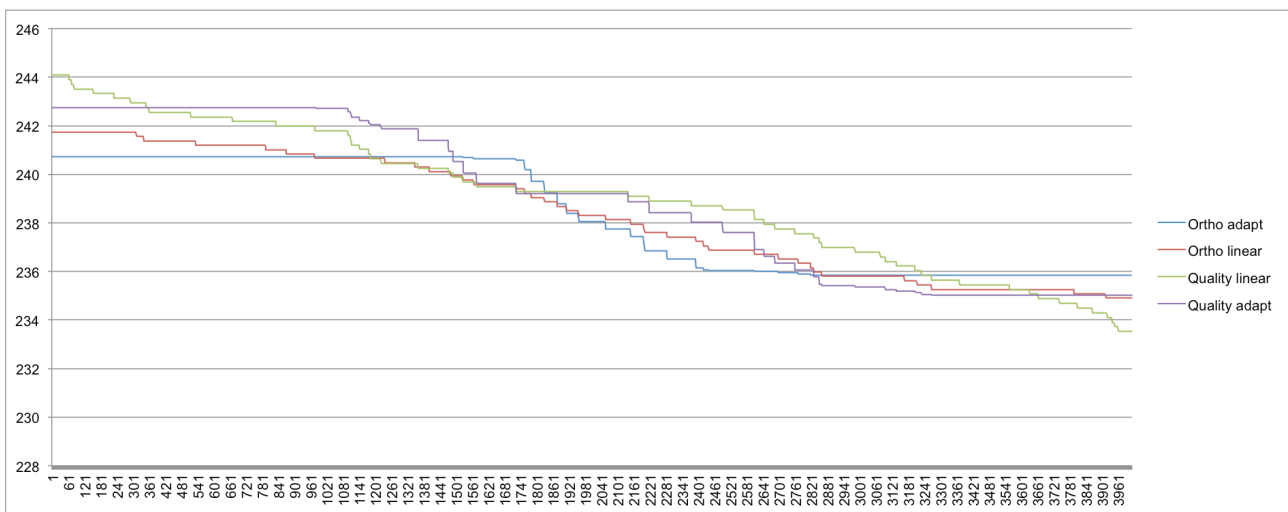


Abb. 66: Vergleich der vier Prozessierungsmöglichkeiten im Höhenverlauf zum Gebiet ‚Etschtal‘

Die Abbildung zeigt die Kurven der vier Kombinationsmöglichkeiten. Auffallend ist das konstante Abnehmen der Höhen bei Kurven mit linearem Abflusskriterium, wohingegen beim adaptiven Verfahren, wie im vorherigen Abschnitt zu den allgemeinen Eigenschaften des Testgebiets bereits erwähnt wurde, ein Abnehmen der Höhen nur im mittleren Intervall des Verlaufs zu beobachten ist.

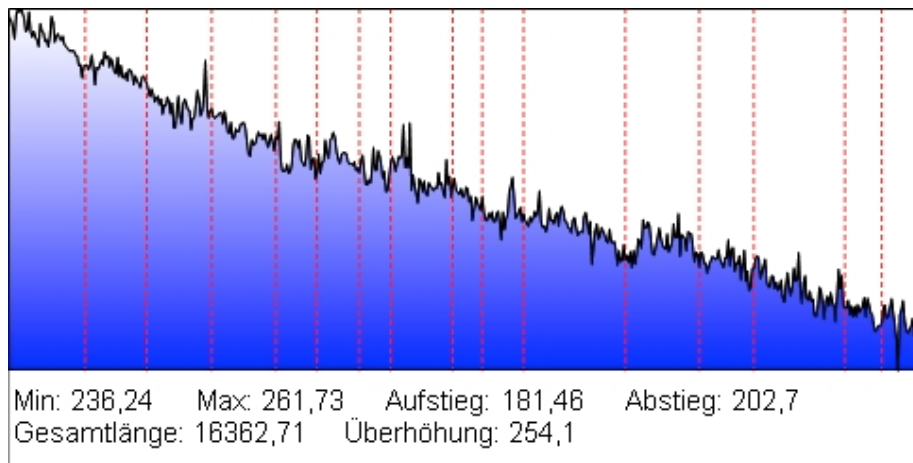


Abb. 67: Höhenprofil des Oberflächenmodells entlang des südlichen Ufers des 2. Centerlinesegments, Testgebiet ‚Etschtal‘

Entnimmt man Höhen des zweiten Centerlinesegments entlang des Flussufers, liegt der Schluss nahe, dass lineare Kriterium entspräche der Topographie besser (siehe Abb. 67).

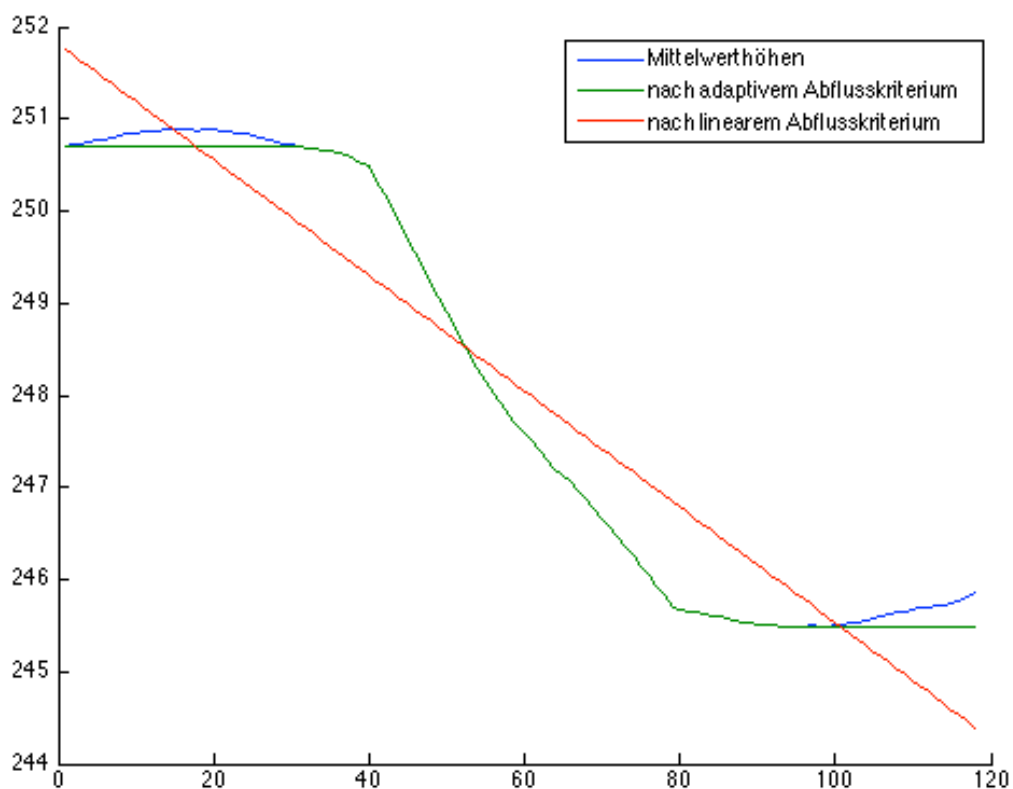


Abb. 68: Vergleich der Abflusskriterien am Beispiel des 2. Centerlinesegments des Testgebiets ‚Etschtal‘

Anhand der Abbildung 68 wird das Phänomen veranschaulicht. Die blaue Kurve zeigt die Höhen des zweiten Segments, welche durch den gleitenden Mittelwert geglättet wurden. Am Anfang der Kurve steigen die Höhenwerte an, bis diese kurz vor dem 40. Höhenwert wieder abnehmen. Das adaptive Abflusskriterium (grüne Kurve in Abb. 68) reduziert die Höhe der Stützpunkte entsprechend der Fließrichtung und passt sich dem ursprünglichen Höhenverlauf an. Nachteilig können sich lokale Minima auswirken, da der Höhenverlauf bis zu einer weiteren Unterschreitung auf diesem Wert verweilt. Das lineare Abflusskriterium hingegen konstruiert eine Kurve, welche lokale Phänomene nicht berücksichtigt.

	<i>Ortho adapt</i>	<i>Ortho linear</i>	<i>Quality linear</i>	<i>Quality adapt</i>
Max	240,714	241,735	244,093	242,737
Min	235,846	234,899	233,531	235,019
Mean	238,315	238,365	239,096	238,993
Std	2,256	2,425	2,789	3,091
Differenz	4,868	6,836	10,562	7,719

Tabelle 5: Statistiken zur Prozessierung des Testgebiets ‚Etschtal‘

Die Höhen der Qualitylayerklassifikation liegen in der Regel höher als die der Klassifikation über Orthobilder und Oberflächenmodell, da zwischen Objekt- und Bodenhöhe nicht unterschieden werden kann (siehe Tabelle 5). Die Tabelle veranschaulicht diesen Umstand, auch wenn der Unterschied nur gering ausfällt. Das lineare Abflusskriterium resultiert in den größeren Höhendifferenzen (vgl. Abbildung 66), was sich auf das Verfahren zurückführen lässt.

Resümee

Dieses Testgebiet und insbesondere das zweite Centerlinesegment ermöglichen eine gute Veranschaulichung und Vergleich der Charakteristika aller Prozessierungsmethodiken. Im operationellen Betrieb mag die Verschiedenartigkeit der Methodiken und deren Bedeutung aufgrund praktischer Überlegungen geringer ausfallen, die Qualität der Verfahren ist jedoch vergleichbar, da das Gebiet mit jeder Methodik gut korrigiert wurde. Die Fehlklassifikationen, die sich in die Editierung fortsetzen, mindern jedoch die Qualität des Höhenmodells. Die Abbildung 69 zeigt das hydrologisch korrigierte Oberflächenmodell.

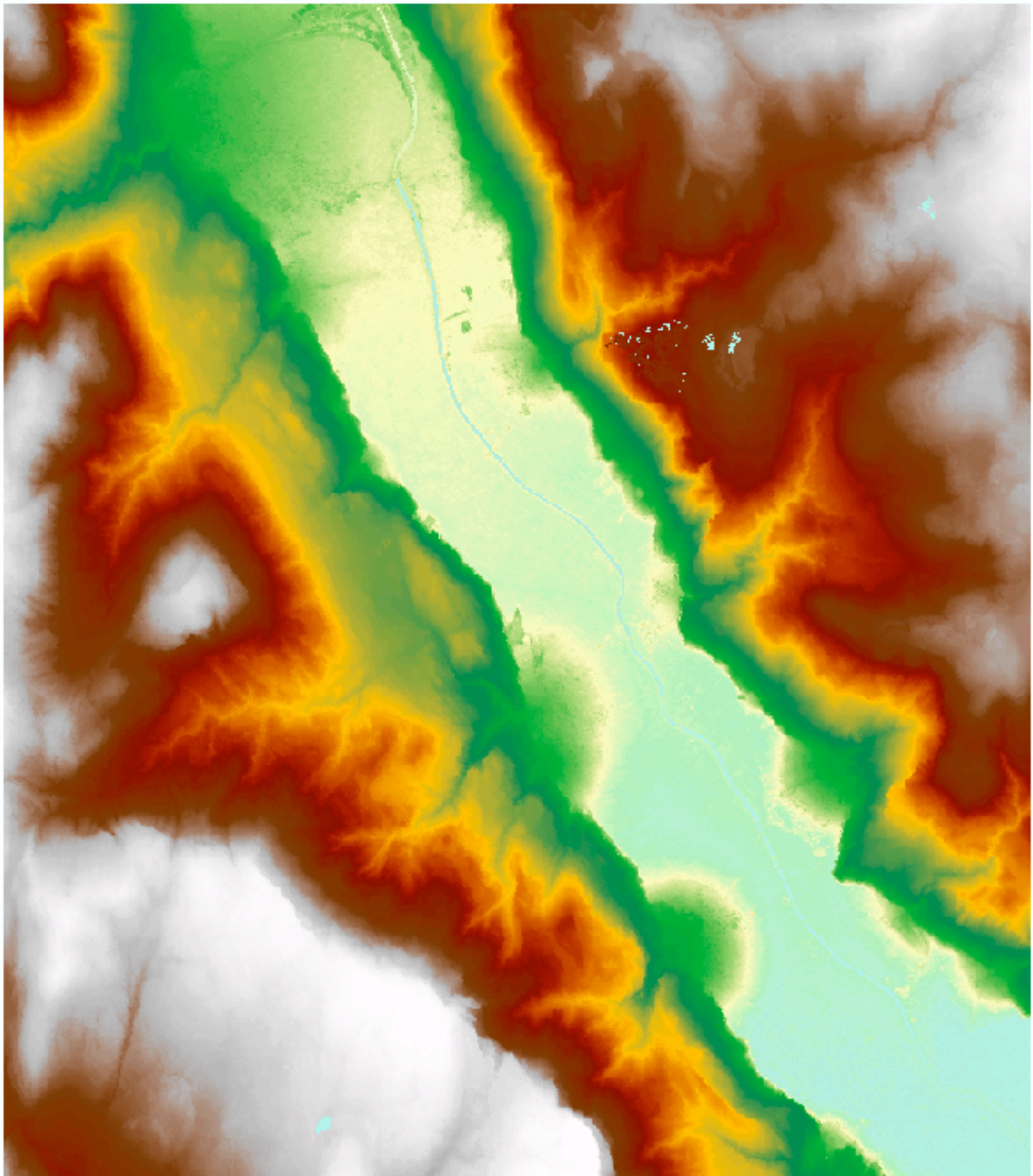


Abb. 69: Hydrologisch korrigiertes Oberflächenmodell des Testgebiets ‚Etschtal‘

6.3.3 Drau

6.3.3.1 Allgemein

Wassermaskenqualität



Abb. 70: Landsat-Wassermaske überlagert Orthobild des Testgebietes ‚Drau‘

Die Landsat-Wassermaske repräsentiert das Testgebiet Drau in der Gesamtausdehnung mit einer Flussbreite von 200 m - 350 m gut (siehe Abb. 70). Nebenarme mit 50 m Breite werden ebenfalls berücksichtigt. Einige kleinere Gewässer säumen den Flussverlauf und sind in der Wassermaske enthalten. Fehlklassifikationen im landwirtschaftlichen Bereich sind nicht ausgeschlossen.

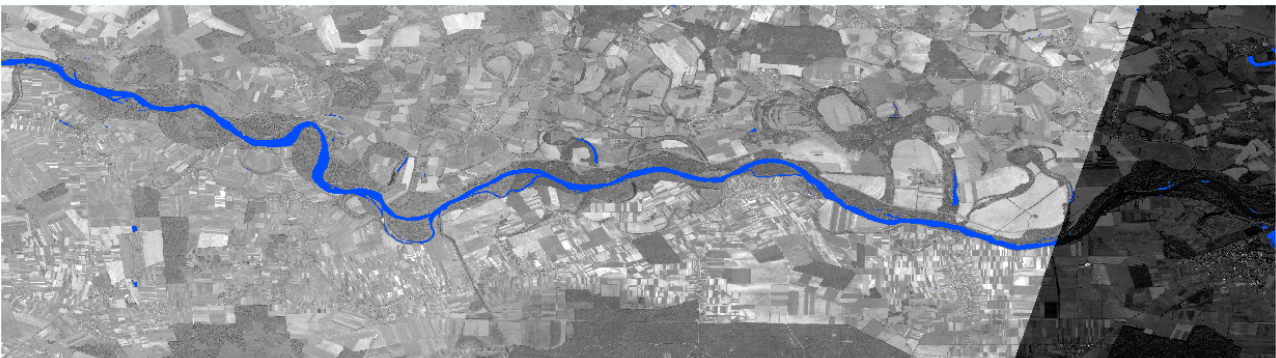


Abb. 71: Geschärfte Wassermaske überlagert Orthobild des Testgebietes ‚Drau‘

Die Wassermaskenschärfung ist ebenso weitestgehend gelungen, so dass der Hauptfluss und einige Nebenarme vorliegen (siehe Abb. 71). Die Szene ist das mit Abstand größte Testgebiet, so dass das vorliegende Orthobild aus mehreren Einzelszenen mosaikiert wurde. Im Rahmen des Schärfungsprozesses definieren dynamische Homogenitätsparameter die Zugehörigkeit von Einzelsegmenten zur Wassermaske.

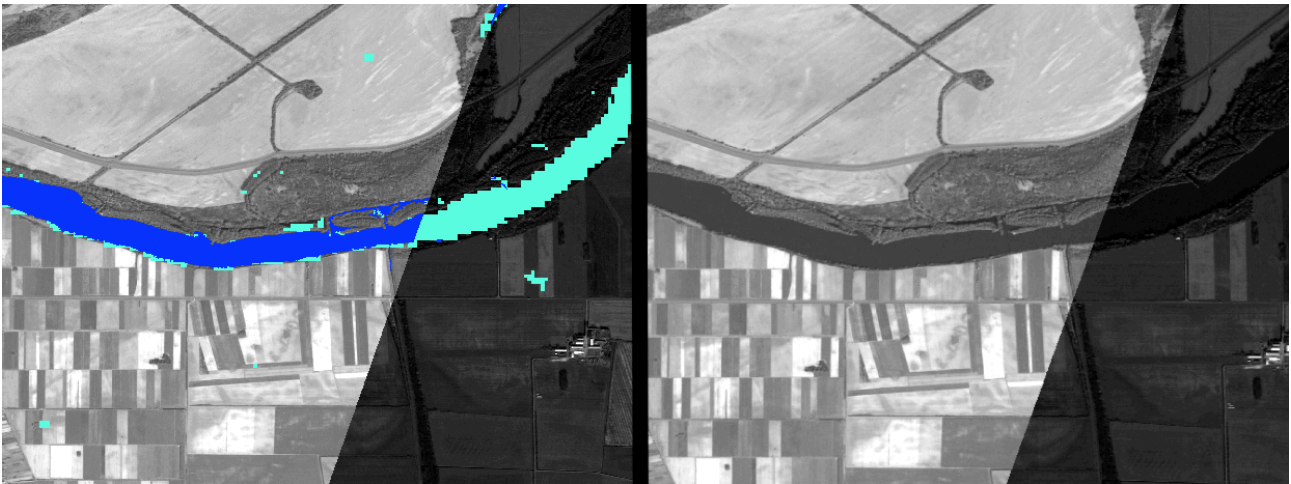


Abb. 72a: Detailausschnitt der geschärften Wassermaske und des Orthobildes des Testgebietes ‚Drau‘

Obwohl die Landsat-Wassermaske den östlichen Teil des Gebietes erfolgreich als Wasser klassifiziert, schließt das Schärfungsverfahren die Region aufgrund zu großer spektraler Unterschiedlichkeit aus (siehe Abb. 72a). Die ursprünglich zur Vermeidung von Fehlklassifikationen entwickelte Methode schlägt fehl und der gesamte östliche Bereich des Testgebietes ist nicht Bestandteil der weiteren Prozessierung.

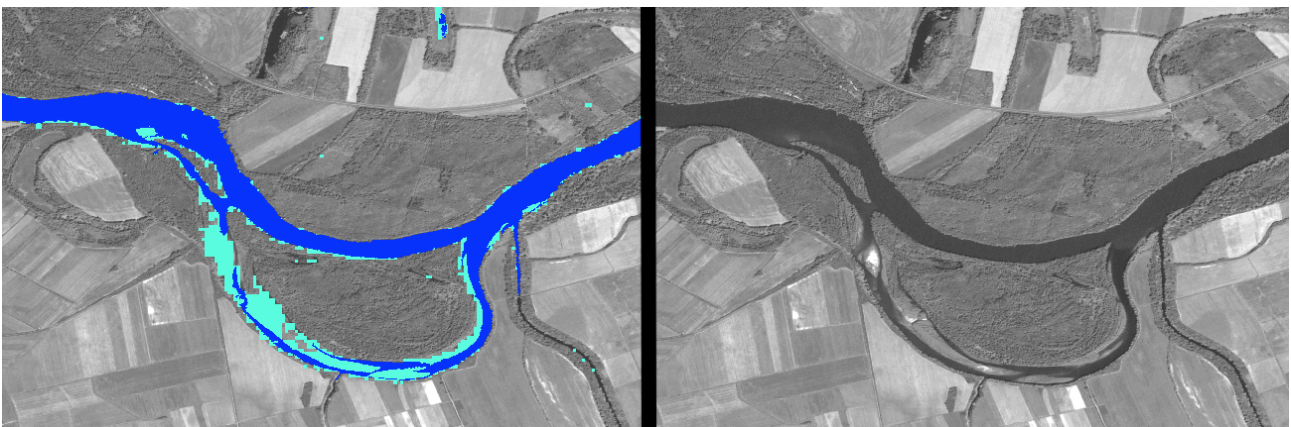


Abb. 72b: Detailausschnitt der geschärften Wassermaske und des Orthobildes des Testgebietes ‚Drau‘

Ähnlich verhält es sich bei diesem Ausschnitt, wobei eine Sandbank im Fluss die erfolgreiche Klassifikation verhindert, was infolgedessen Konsequenzen für die Centerlineableitung und damit Gewässertopologie haben wird (siehe Abb. 72b).

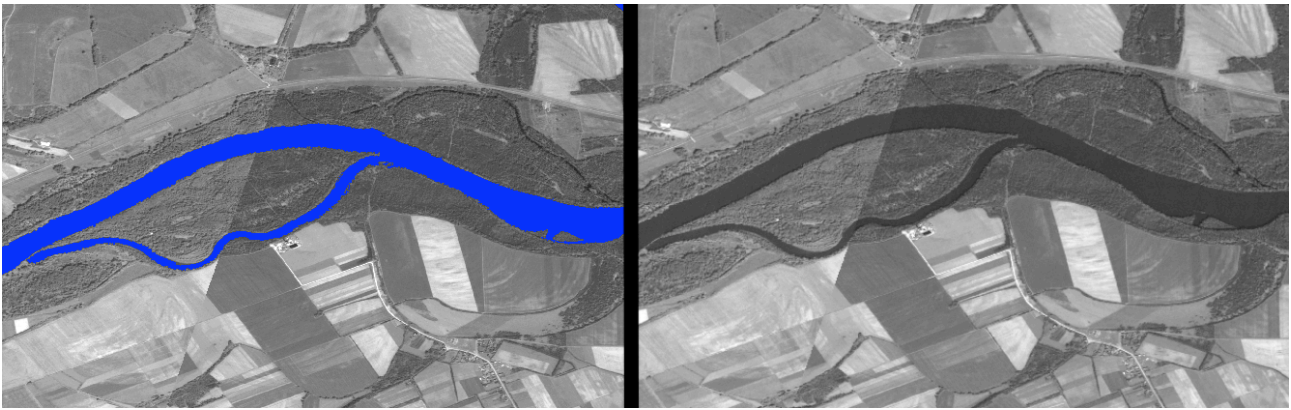


Abb. 72c: Detailausschnitt der geschärften Wassermaske und des Orthobildes des Testgebiets ‚Drau‘

Dieser Ausschnitt (siehe Abb. 72c) zeigt eine erfolgreiche Klassifikation des Haupt- und eines Nebenarms über eine Szenengrenze hinweg.

Güte der Centerlineableitung

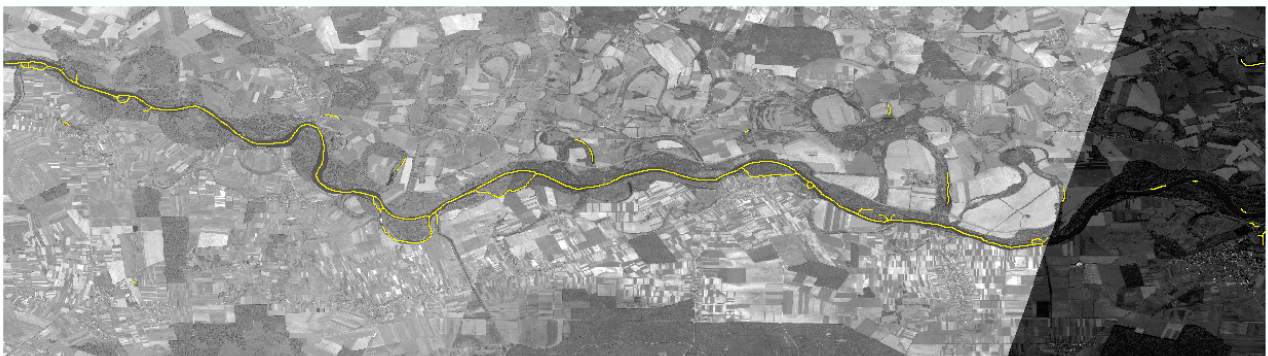


Abb. 73: Gesamte Centerline des Testgebiets ‚Drau‘

Der Hauptfluss und einige Nebenarme werden durch die Centerline ausreichend gut dargestellt (siehe Abb. 73). Einige fragmentierte Centerlinesegmente sind Resultat von Fehlklassifikationen oder Stehgewässern.

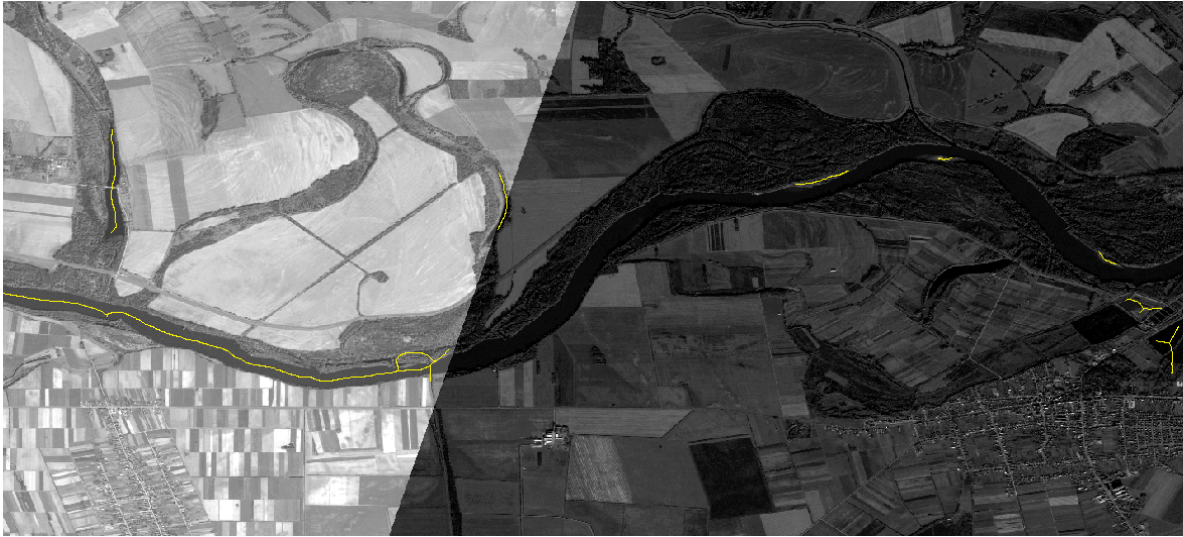


Abb. 74a: Detailausschnitt der Centerline im Testgebiet ‚Drau‘

Der östliche, spektral abweichende Bereich blieb von der Wassermaskenschärfung ausgeschlossen, so dass die Centerlineableitung erwartungsgemäß nicht stattfand (siehe Abb. 74a). Eine Höhenkorrektur wird demnach ausbleiben.



Abb. 74b: Detailausschnitt der Centerline im Testgebiet ‚Drau‘

Der unklassifizierte Bereich der Wassermaske (vgl. Abb 72b) aufgrund der Sandbank hat ein Durchbrechen der Centerline zur Folge (siehe Abb. 74b). Zu Beobachten ist ebenso ein Überlagern der Centerline mit weiteren Sandbänken beziehungsweise Schwemmflächen im Bereich des Nebenarmes.

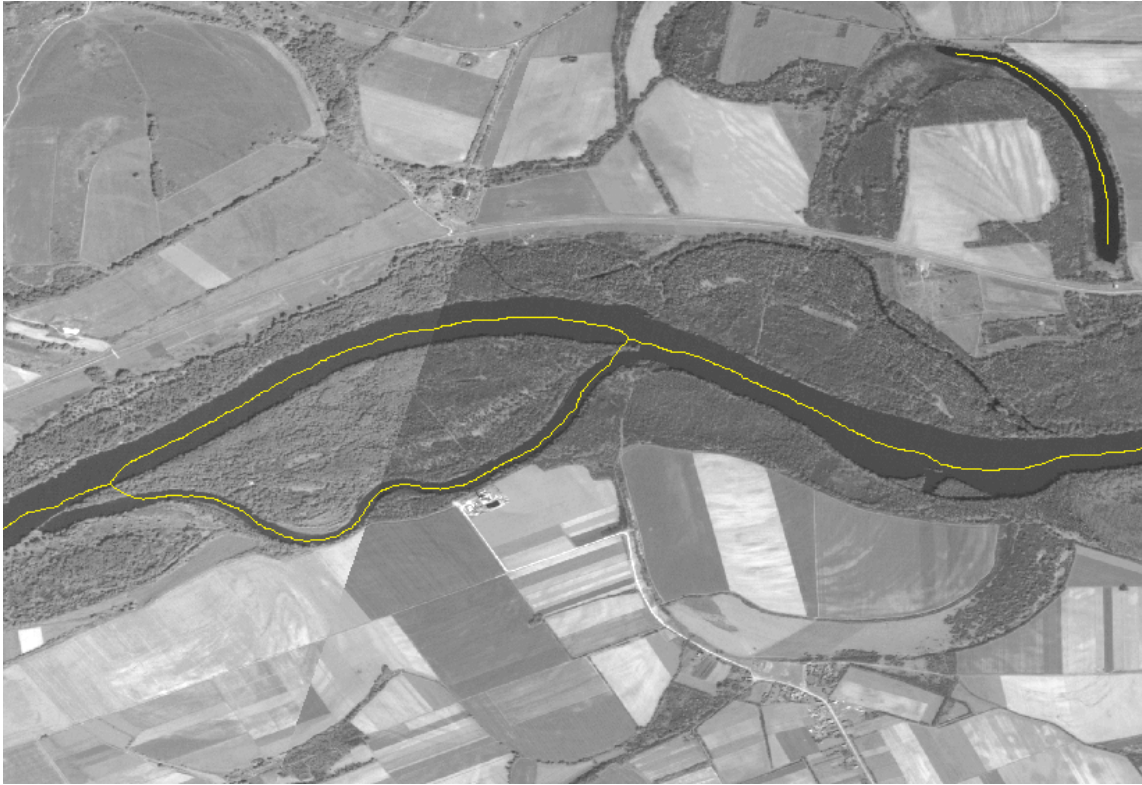


Abb. 74c: Detailausschnitt der Centerline im Testgebiet ‚Drau‘

Die Abbildung 74c zeigt die Centerline eines erfolgreich klassifizierten Teils der Wassermaske im Grenzbereich zweier Einzelszenen. Die Centerlineableitung ist konzipiert, Brücken gegebenenfalls zu überspannen, um die Gewässertopologie zu verbessern. Obwohl die Klassifikation erfolgreich war, besteht zwischen Haupt- und Seitenarm im westlichen Bereich eine nicht vorhergesehene Verbindung durch die Centerline. Zusätzlich ist ein isolierter Teil der Centerline im nordöstlichen Eck des Szenenausschnitts zu sehen, welcher für die weitere Prozessierung keine Bedeutung besitzt.

Bedeckungsgrad und allgemeiner Höhenunterschied

Die Szene besitzt mit der Drau als Hauptgewässer einschließlich der Centerlinesegmente aus Fehlklassifikationen oder Stehgewässern 65 Einzelsegmente. Die editierten Flächen betragen 74,54% der gesamten klassifizierten Wasserfläche.

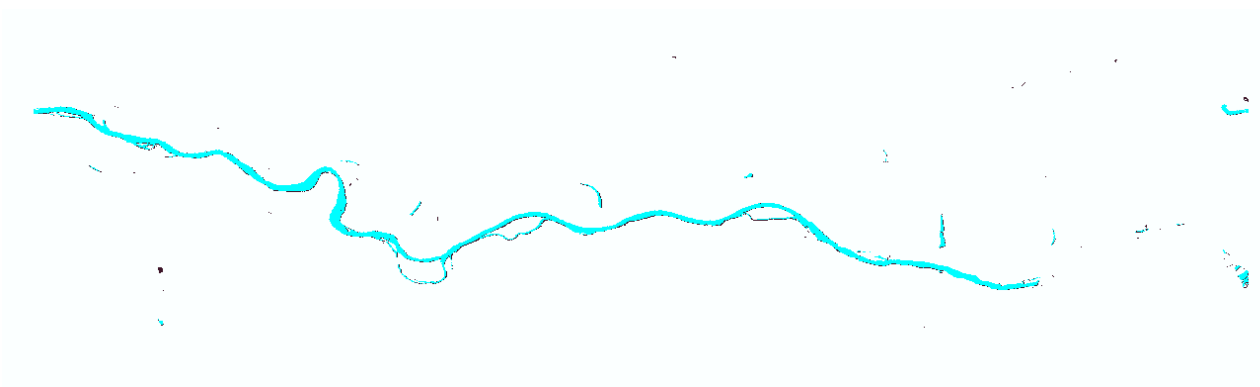


Abb. 75: Abbildung zum Bedeckungsgrad des Testgebiets ‚Drau‘

Es ist erkennbar, dass der gesamte Flussverlauf bis auf den unklassifizierten östlichen Bereich des Testgebietes editiert wurde (siehe Abb. 75).

Der Höhenunterschied des Hauptflusses beträgt 1,92 m auf eine Flusslänge von guten 35 km. Der höchste Punkt liegt bei 130,10 m, der niedrigste bei 128,18 m (siehe Abb. 76).



Abb. 76: Höchste und niedrigste Gewässerhöhe im hydrologisch korrigierten Höhenmodell des Testgebietes ‚Drau‘

Höhenkonsistenz

Zur Überprüfung der Höhenkonsistenz und -kohärenz wurden alle Centerlinesegmente, welche den Hauptfluss Drau in diesem Testgebiet darstellen, zu einer Centerline zusammengefasst (siehe Abb. 77).

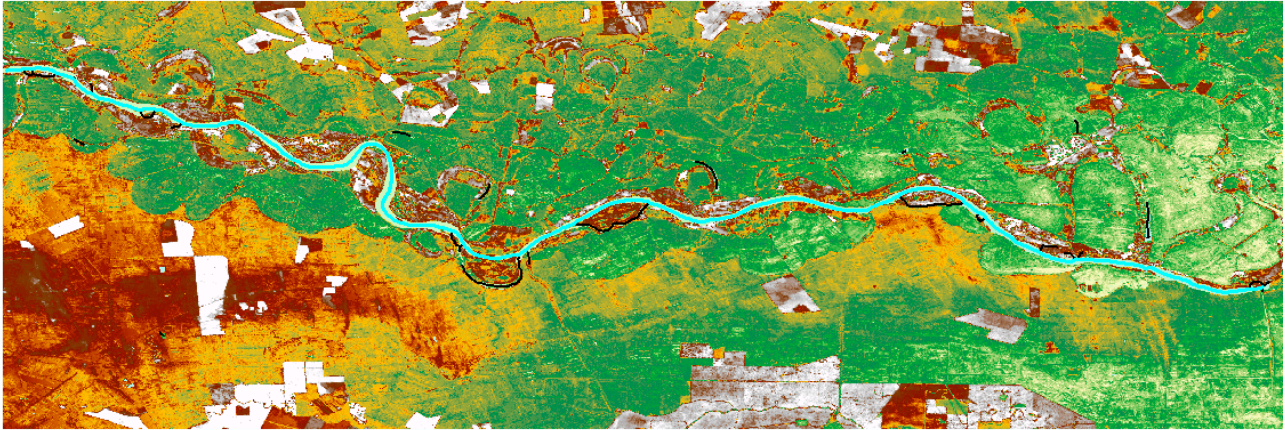


Abb. 77: Ausschnitt des markierten Bereichs des Centerlinesegments zur Überprüfung der Höhenkonsistenz im Gebiet ‚Drau‘

Die Centerline des Hauptflusses ist im Generellen durchgängig, wird jedoch aufgrund topologischer Phänomene im *Shapeformat* getrennt und muss für die Darstellung als Diagramm erneut zusammengesetzt werden. Nebenarme werden bei der Analyse nicht berücksichtigt.

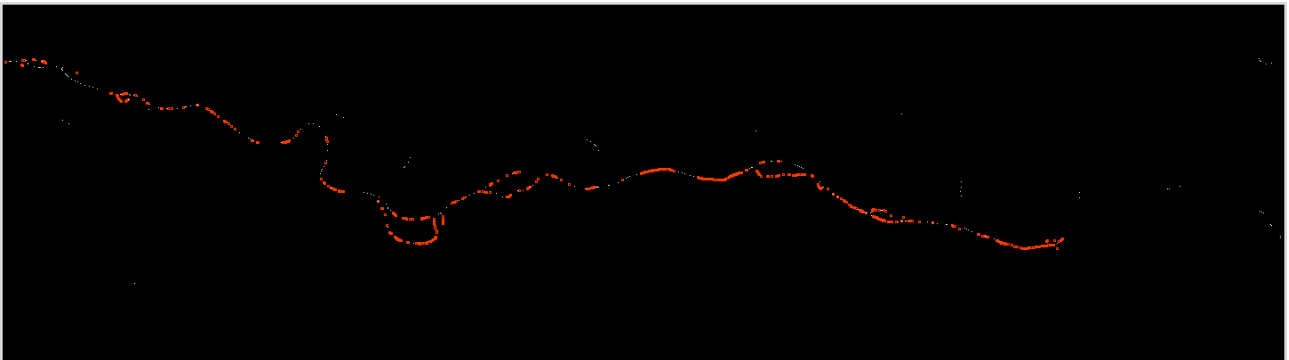


Abb. 78: Abbildung der Höhenstützpunkte für das verwendete Centerlinesegment im Gebiet ‚Drau‘

Die Punkte auf der Centerline entsprechen den Höhenstützpunkten, von welchen die Höhen in den Gewässerbereichen editiert werden (siehe Abb. 78). Bis auf einen Ausreißer in der ersten Hälfte sind die Höhen weitestgehend korrekt, was sich auf das Fehlen von Brücken in diesem Gebiet zurückführen lässt (siehe Abb. 79).

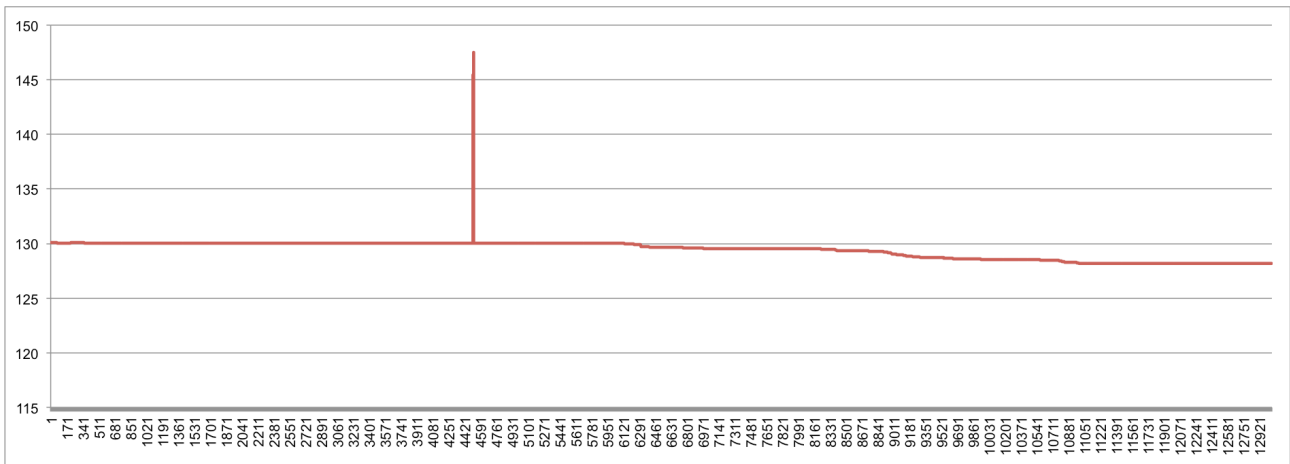


Abb. 79: Höhenverlauf des kombinierten Centerlinesegments im Testgebiet ‚Drau‘, welche nur einen fehlerhaften Wert enthält. Die editierten Höhen sind korrekt.

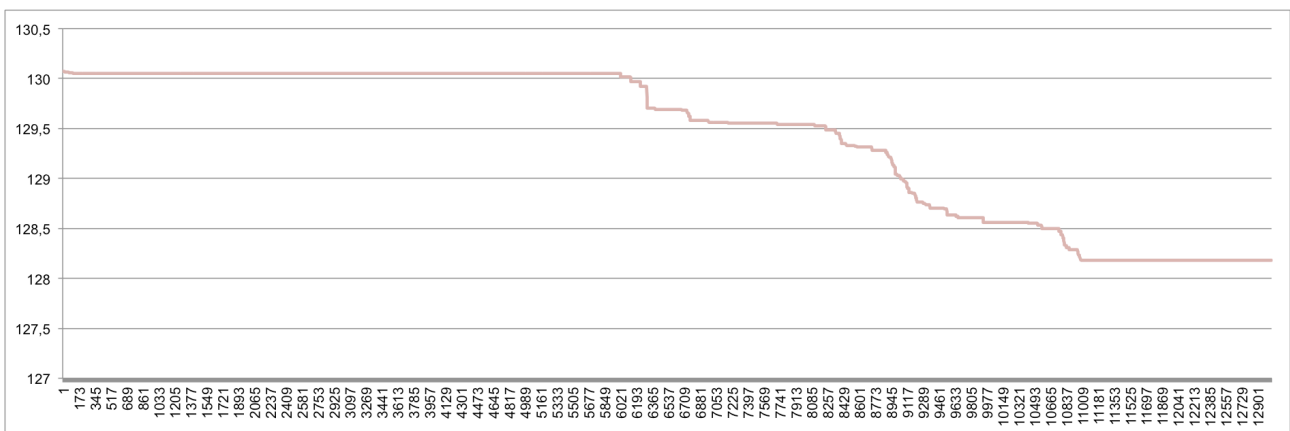


Abb. 80: Höhenverlauf nach Entfernung des fremden Höhenwerts des Centerlinesegments im Testgebiet ‚Drau‘

Nach der Korrektur lässt sich ein Abnehmen der Höhen in der zweiten Hälfte beobachten (siehe Abb. 80). Der relativ geringe Höhenunterschied entlang des Verlaufs lässt sich auf das flache Gebiet zurückführen. Eine Profilanalyse ist aufgrund der starken Ufervegetation nur bedingt sinnvoll. Die Kohärenz und Konsistenz ist über den gesamten Verlauf gegeben.

Problemgebiete

Die Wassermaskenschärfung konnte nicht auf eine Art und Weise eingestellt werden, dass sowohl der östliche Teil der Drau als Wasserfläche klassifiziert wurde, ohne dass große Teile fehlklassifiziert würden. Inwiefern eine Histogrammanpassung von Einzelszenen im Rahmen der Mosaikierung sinnvoll ist, lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht bewerten, könnte für die Qualität der Klassifikation allerdings von Vorteil sein. Des Weiteren wurden einige landwirtschaftliche Flächen fälschlicherweise als Wasser klassifiziert, was sich vor dem Hintergrund einer möglichen Nachkorrektur jedoch als untergeordnetes Problem erweist.

6.3.3.2 Vergleich der Prozessierungsmethodiken

Die Segmente des Testgebiets sind zum Teil sehr kurz, weswegen im allgemeinen Teil auf die Betrachtung des gesamten Hauptflusses zurückgegriffen wurde und die Einzelsegmente hierfür zusammengefasst wurden. Für den Vergleich der Prozessierungsmethodiken werden in diesem Abschnitt sechs Einzelsegmente kombiniert, die unmittelbar aufeinanderfolgen (siehe Abb. 81).

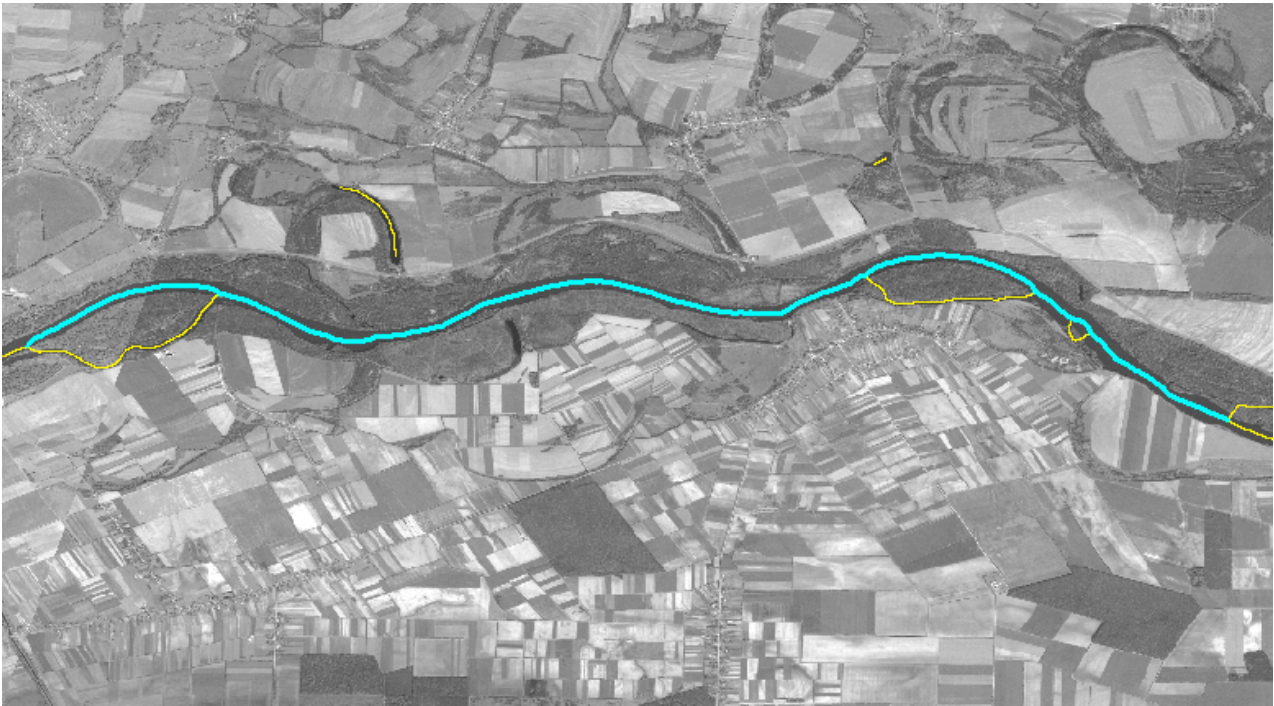


Abb. 81: Gewählter Centerlinebereich im Testgebiet ‚Drau‘ für den Vergleich der Prozessierungsmethodiken

Höhenprofil

Die kombinierten Centerlinesegmente der vier Kombinationsmöglichkeiten der Prozessierungsoptionen wurden gegenübergestellt (siehe Abb. 82).

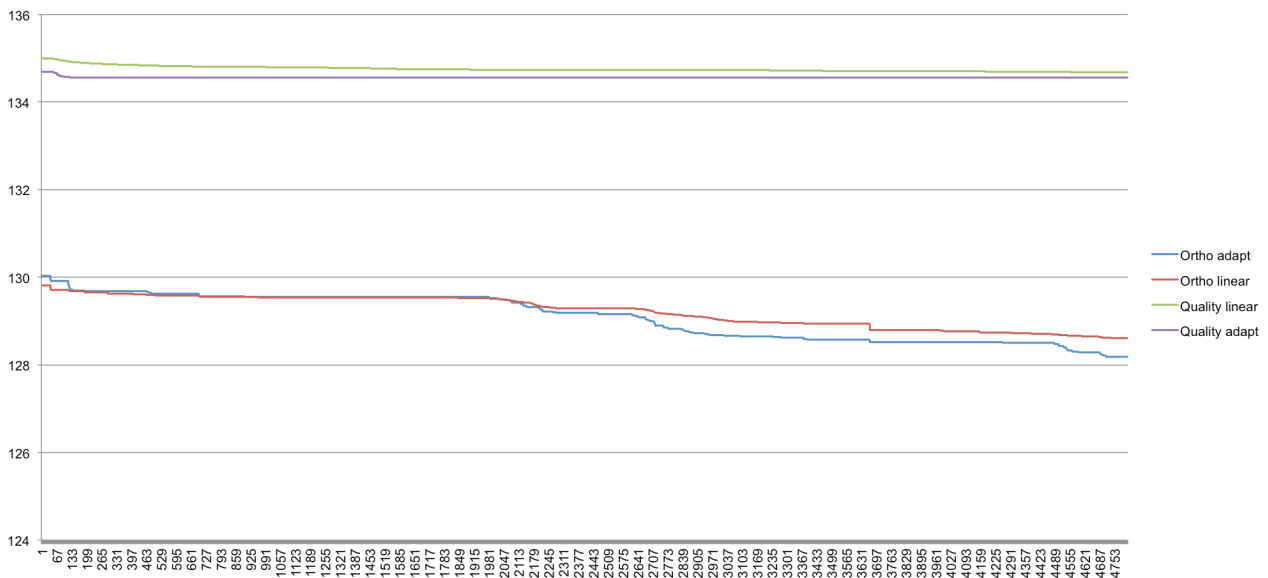


Abb. 82: Höhenverlauf der unterschiedlichen Prozessierungsmethodiken im Testgebiet ‚Drau‘

Das Testgebiet befindet sich in einer ländlichen Region mit abwechslungsreicher Landbedeckung. Im Speziellen stehen Waldbedeckung und flache Wiesen in Ufernähe in stetigem Wechsel. An den Höhenkurven wird erkennbar, dass die Höhen auf Basis der Qualitylayerklassifikation einige Meter höher liegen als die der Ortho- und Oberflächenmodellklassifikation. Die Ursache hierfür liegt erneut bei der Unempfindlichkeit gegenüber der Unterscheidung von Boden- zu Objekthöhe der Qualitylayerklassifikation, welche in diesem Fall aufgrund größerer Forstbestände in Ufernähe besonders zum Tragen kommt.

	<i>Ortho adapt</i>	<i>Ortho linear</i>	<i>Quality linear</i>	<i>Quality adapt</i>
Max	130,034	129,813	135,003	134,688
Min	128,181	128,611	134,682	134,558
Mean	129,090	129,226	134,755	134,560
Std	0,512	0,354	0,063	0,016
Differenz	1,853	1,202	0,321	0,130

Tabelle 6: Statistiken des gewählten Centerlineausschnitts zur Prozessierung des Testgebiets ‚Drau‘

Die Standardabweichung und die Differenz der Höhenwerte liegen bei den Ortho- und Oberflächenmodellklassifikationen deutlich über denen der Qualitylayervariante (siehe Tabelle 6). Diese statistischen Angaben beziehen sich auf die editierten Höhen jener Centerlinesegmente im Ausgabehöhenmodell, wobei das eigentliche Centerlinesegment innerhalb des Prozesses noch vor der Editierung statistisch zusammenhängend betrachtet werden kann.

	Ortho adapt	Quality adapt
Max	140,103	146,294
Min	138,181	144,558
Mean	139,161	145,213
Std	0,778	0,619
Differenz	1,922	1,736

Tabelle 7: Statistik zu den 626 Höhenstützpunkten, welche für dieses Centerlinesegment innerhalb des Prozesses verarbeitet wurden (der Offset wurde noch nicht berücksichtigt)

Zur Verifikation der Statistik wurden die Werte, welche sich auf das zusammenhängende Centerlinesegment (vgl. Abb. 73) beziehen, innerhalb des Prozesses ermittelt (siehe Tabelle 7). Die Unterschiedlichkeit der Höhenniveaus bleibt auch innerhalb des Prozesses ähnlich, die statistischen Angaben zur Standardabweichung, Differenz und Mittelwert nähern sich jedoch an. Die Aussage lässt sich also bestätigen.

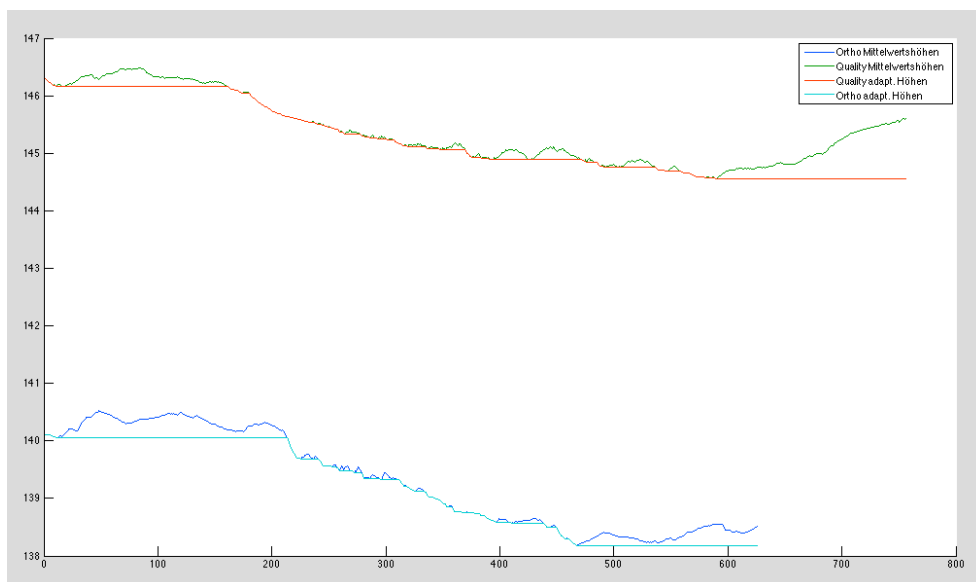


Abb. 83: Höhenverlauf der Höhen nach Anwendung des gleitenden Mittelwerts sowie Einbringung des adaptiven Abflusskriteriums beider Klassifikationsmethoden für das zusammenhängende Centerlinesegment

Die Abbildung 83 zeigt die Höhenkurven des gesamten Centerlinesegments der Mittelwertshöhen und Höhen nach Einbringung des adaptiven Abflusskriteriums innerhalb des Prozesses, welche für die Editierung des Oberflächenmodells verwendet werden. Die Verkürzung der beiden unteren Linien ist auf die geringere Anzahl von Höhenstützpunkten der Ortho- und Oberflächenmodellklassifikation zurückzuführen. Die Ähnlichkeit der Kurven ist gut erkennbar. Das erste Drittel ist geprägt von einer Zunahme der Höhen, so dass das adaptive Abflusskriterium die Höhen bis zur nächsten Abnahme auf das geringste Niveau reduziert. Das zweite Drittel zeigt die Kurven bei einer gleichmäßigen Abnahme von ca. 1,5 m, wohingegen der letzte Teil der Kurven von einem erneuten Anstieg geprägt ist.

Resümee

Dieses Testgebiet zeigt deutlich die Unterschiede der zwei Klassifikationsmethodiken auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ufervegetation das Ergebnis hinsichtlich der Mittelwerthöhe beeinflusst, der Verlauf der Kurve bleibt weitestgehend unbeeinträchtigt. Die Editierung hat gut funktioniert, so dass der Höhenverlauf erkennbar wird und korrekt abgebildet ist. Lediglich der östliche Bereich der Szene konnte nicht verarbeitet werden. Die Abbildung 84 zeigt das hydrologisch korrigierte Oberflächenmodell.

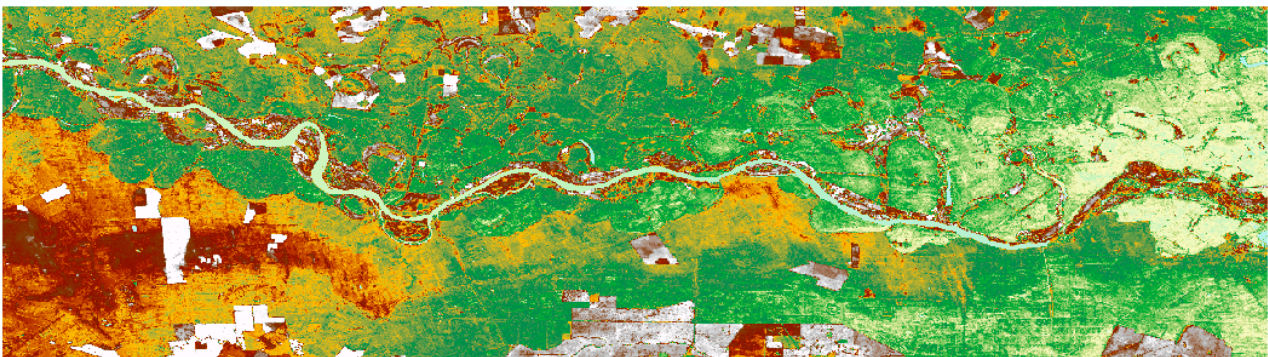


Abb. 84: Hydrologisch korrigiertes Oberflächenmodell des Testgebiets ‚Drau‘

7. Fazit und Ausblick

Diese Arbeit demonstriert eine Möglichkeit zur hydrologischen Korrektur von IRS P5 Oberflächenmodellen. Angelehnt an konventionelle Verfahren der hydrologischen Bildverarbeitung wurden Methoden entwickelt, welche ausgehend von Landsat, SRTM und IRS P5 Datensätzen die hydrologische Korrektur weitestgehend – mit Rücksicht auf unterschiedliche Aufnahmegebiete und deren individuelle Charakteristika – automatisch durchführen.

Es wurde gezeigt, welche Herausforderung die Verarbeitung von Datensätzen unterschiedlicher Herkunft und deren Homogenisierung vor dem Hintergrund der Automatisierung und gegenseitiger Abhängigkeit darstellt. Bei fehlerhafter Ableitung der Landsat-Wassermaske ist die Qualität der geschärften Wassermaske und in Folge die Centerline gefährdet, so dass eine Höhenkorrektur scheitern kann. Zudem stehen die Eigenschaften eines Oberflächenmodells den Voraussetzungen einer hydrologischen Verarbeitung gegenüber, so dass infolgedessen eine Anpassung an die Bedürfnisse des Datensatzes erfolgen muss. Diese Umstände stellen einen signifikanten Unterschied zu konventionellen Verfahren dar, welche als Datengrundlage Geländemodelle verwenden, so dass neben der Vermeidung von Folgefehlern durch Nichtverwendung von Sekundärdaten der Prozess durch die direkte Verarbeitung des Höhenmodells vereinfacht wird.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik basiert auf drei einzelnen Schritten. Zuerst werden über Qualitylayer, das Orthobild und das Oberflächenmodell verlässliche Uferhöhen als Stützpunkte klassifiziert, welche anschließend auf eine abgeleitete Flussmittellinie (*Centerline*) übertragen werden. Infolgedessen können die Höhen unabhängig von Flussbreite und -form in vektorieller Art und Weise hinsichtlich eines ermittelten Abflusskriteriums korrigiert werden. Letztendlich werden die verarbeiteten Höhen wieder in die Fläche übertragen. Das Verfahren erlaubt einerseits einen großen Spielraum bei der individuellen Einbringung von Abflusskriterien oder gewünschtem Fließverhalten, birgt andererseits jedoch ein erhöhtes Fehlerrisiko.

Im Rahmen der Ergebnisbesprechung wurden anhand der einzelnen Testgebiete die Vor- und Nachteile des Verfahrens erläutert und Einblicke in die Prozessierung gegeben. Auf die individuellen Charakteristika der Gebiete wurde Bezug genommen sowie Einzelphänomene im Detail nachgegangen, wobei versucht wurde, eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Analyse der drei Testgebiete zu gewährleisten.

Am Beispiel des Testgebiets Bozen wurde deutlich, wie einfach das Verfahren fehlschlagen kann, wenn Fehlklassifikationen in der Landsat-Wassermaske vorhanden sind und ein Mangel an Höhenstützpunkten vorliegt. Auf solche Eventualitäten muss das Verfahren

vorbereitet sein und beispielsweise auf Basis der anderen Segmente und der Topologie der Centerline (semi-)global abgeleitete Höhen für Fehlerbereiche konstruieren können. Zusätzlich soll eine Berücksichtigung aller Gewässertypen angestrebt werden. Küstengebiete und Stehgewässer könnten auf Basis eigens klassifizierter Wassermasken identifiziert oder im Rahmen der Prozessierung durch Topologie und Form individuell verarbeitet werden.

Des Weiteren stützt sich die Höhenklassifikation im Augenblick auf Qualitylayer oder Orthobild und Oberflächenmodell. Die Ergebnisvalidierung hat gezeigt, dass die Qualität der Höhenkorrektur und die Einbringung des Abflusskriteriums nur in geringer Weise vom Klassifikationsergebnis abhängt. Der Unterschied der Klassifikationsmethodik zeigt sich vielmehr im direkten Vergleich der Höhenniveaus der jeweiligen Höhenkurven als in der Charakteristik der Kurven selbst (vgl. Abb. 83). Beide Verfahren besitzen ihre Gültigkeit, wohingegen die Höhenklassifikation auf Basis der Qualitylayer lediglich aufgrund der Mehrfachabdeckung und des aktuellen IRS P5 Workflow ermöglicht wird. Um das Verfahren auf andere Daten anzuwenden und den Datenaufwand zu reduzieren, wäre eine ausschließliche Klassifikation des Höhenmodells nach geeigneten, reliablen Höhen denkbar. Vorteilhaft wäre diese Klassifikation auch im Hinblick auf ein fehlendes Orthobild, wobei die obligatorische Wassermaske in diesem Fall entweder manuell erstellt oder über andere Quellen bezogen werden müsste.

Betrachtet man die Abbildungen zu Höhenverläufen im Kapitel zur Ergebnisbesprechung, sind Brücken und andere Hindernisse, die die Centerline überbrückt, aufgrund der Centerlinetopologie kein Grund für einen Bruch mit dem konsistenten und kohärenten Abfluss. Die Höhenmodelle sind de facto *hydro-enforced*, wären Brücken etc. im Oberflächenmodell durchbrochen. Eine Erweiterung des bisherigen Verfahrens auf diese Funktionalität ist aufgrund der vorhandenen Centerline denkbar.

Außerdem bietet das hydrologisch korrigierte Oberflächenmodell eine geeignete Grundlage für eine topologische Modellierung, welche Metadaten zur Hydromorphologie bereitstellt.

Unabhängig von diesen Punkten konnte sich die Methodik neben den besprochenen Testgebieten auch bei anderen Datensätzen bewähren und stellt eine geeignete Möglichkeit zur Erweiterung des Verwendungszwecks von Oberflächenmodellen dar, ohne dass eine aufwändige und fehleranfällige Konvertierung zu einem Geländemodell durchgeführt werden muss. Die hydrologisch korrigierten Oberflächenmodelle bieten für weitere Anwendungen eine Grundlage, auch wenn die volle Verwendbarkeit für hydrologische Analysen einschränkend betrachtet werden muss, da ausschließlich klassifizierte Wasserflächen verarbeitet wurden und morphologisch und hydrologisch irrelevante Höhen stets in den Restflächen vorhanden sind. Für die Identifikation von Brücken vor dem Hintergrund der Infrastrukturplanung oder der Abgrenzung von Land-

zu Wasserfläche im Wassermanagement bis hin zur ästhetischen Visualisierung von Höheninformation stellt das hier gezeigte Verfahren somit einen Ausbau der Anwendungsgebiete von Oberflächenmodellen dar.

Bibliografie

- [1] FE-Lexikon, "*Definition Rasterdaten*," 2012. Verfügbar unter: <http://fe-lexikon.info/lexikon-r.htm#rasterdaten>
- [2] P. d'Angelo and P. Reinartz, "Dsm Based Orientation of Large Stereo Satellite Image Blocks," 2012.
- [3] Astrium, "*SPOT Satellites*," 2012. Verfügbar unter (09.10.12): <http://www.astrium-geo.com/>
- [4] R. J. Boain, "A-B-Cs of Sun-Synchronous Orbit Mission Design," 2004.
- [5] J. Hijazi, "Elevation Extraction from Satellite Data using PCI Software."
- [6] K.-D. Tönnies, "GrundlagenCV, Stereo Vision - Korrespondenzproblem," 2008.
- [7] S. Hermann, R. Klette, and E. Destefanis, "Inclusion of a Second-Order Prior into Semi-Global Matching," 2009.
- [8] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," 2002.
- [9] H. Hirschmüller, "Stereo Matching by Semiglobal Matching and Mutual Information," 2008.
- [10] ISRO, 2012. Verfügbar unter (10.11.12): <http://www.isro.org/satellites/cartosat-1.aspx>
- [11] NRSC, 2012. Verfügbar unter (10.11.12): <http://www.nrsc.gov.in>
- [12] P. d'Angelo, A. Uttenthaler, S. Carl, F. Barner, and P. Reinartz, "Automatic Generation of High Quality DSM Based on IRS-P5 Cartosat-1 Stereo Data," 2010.
- [13] USGS, "Global Land Survey 2000," 2009.
- [14] University of Maryland, "Landsat Technical Guide."
- [15] PlanetObserver, "Product Details Planet Observer DEM," 2011.
- [16] USGS and H. K. Heidemann, "Lidar Base Specification Version 1.0," 2012.
- [17] M. F. Hutchinson, "A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data With Automatic Removal of Spurious Pits," 1989.
- [18] M. F. Hutchinson, "*ANUDEM*," 2011. Verfügbar unter (11.11.12): <http://fennerschool.anu.edu.au/research/software-datasets/anudem>
- [19] L. Martz and J. Garbrecht, "The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models," 1998.
- [20] L. Martz and J. Garbrecht, "*TOPAZ*," 1999. Verfügbar unter (15.11.12): <http://homepage.usask.ca/~lwm885/topaz/index.html>
- [21] A. Hasan, P. Pilesjo, and A. Persson, "Drainage Area Estimation in Practice, How to Tackle Artefacts in Real World Data," 2012.
- [22] J. F. O'Callaghan and D. M. Mark, "The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data," 1984.
- [23] D. Tarboton, K. A. T. Schreuders, D. W. Watson, and M. E. Baker, "Generalized terrain-based flow analysis of digital elevation models," 2009.

- [24] D. Tarboton, "*Terrain Analysis using Digital Elevation Models (TAUDEM)*," 2012. Verfügbar unter (08.10.12) : <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5.0/>
- [25] W. Saunders, "Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis," 2000.
- [26] F. L. Hellweger, "*AGREE - DEM Surface Reconditioning System*," 1997. Verfügbar unter (02.08.13): <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>
- [27] F. Shahzad and R. Gloaguen, "TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis," 2011.
- [28] ESRI, "*Arc Hydro*," 2012. Verfügbar unter (10.09.12): <http://resources.arcgis.com/en/communities/hydro/index.html>
- [29] T. E. Chow, "An Assessment of Hydrologic Enforcement Methods on Various Drainage Features," 2010.
- [30] V. Garcia, "Automated Techniques to Map Headwaters Stream Networks in Piedmont Ecoregion of North Carolina," 2004.
- [31] S. Vaughn, "Hydrologically-Conditioned LiDAR Data for Watershed Delineation and Modeling," 2010.
- [32] S. K. Merz, "Use of Hydrologically Enforced and Conditioned Digital Elevation Models for Coastal Inundation Modelling," 2011.
- [33] Conservation Science Program of World Wildlife Fund, "*HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales)*," 2010. Verfügbar unter (09.10.12): <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/>
- [34] USGS, "Documentation for the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Water Body Data Files," 2003.
- [35] G. Chander, A. Sampath, C. Huang, and G. Gutman, "Assessment of the NASA-USGS Global Land Survey (GLS) Datasets," 2012.
- [36] GAF AG, "*GAFmap Website*," 2012. Verfügbar unter (10.11.2012): <http://www.gaf.de/content/gafmap>
- [37] M. Rumpf and A. Telea, "A Continuous Skeletonization Method Based on Level Sets," 2002.
- [38] N. R. Howe, "*MATLAB Implementation of Contour-Pruned Skeletonization*," 2004. Verfügbar unter (06.01.13): <http://www.cs.smith.edu/~nhowe/research/code/>

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Schematische Darstellung einer Stereoaufnahme durch IKONOS
Seite 10, Quelle: GeoEye
- Abbildung 2:** IRS P5 Stereobildpaar
Seite 13, Quelle: eigene
- Abbildung 3:** IRS P5 Oberflächenmodell (ungefüllt)
Seite 16, Quelle: eigene
- Abbildung 4:** IRS P5 Qualitylayer der Standardabweichung (Stdlayer)
Seite 17, Quelle: eigene
- Abbildung 5:** IRS P5 Qualitylayer mit der Anzahl der verwendeten Layer (Numlayer)
Seite 17, Quelle: eigene
- Abbildung 6:** IRS P5 Orthobild auf Oberflächenmodell
Seite 18, Quelle: eigene
- Abbildung 7:** Namenskonvention Fließrichtung
Seite 22, Quelle: eigene
- Abbildung 8:** Schema: Mulde und Erhebung in Höhenmodell
Seite 23, Quelle: ESRI
- Abbildung 9:** Darstellung der Entfernung einer Mulde auf Pixelebene
Seite 23, Quelle: ESRI
- Abbildung 10:** Fließrichtung, Flussakkumulation
Seite 26, Quelle: ESRI, bearbeitet
- Abbildung 11:** Beschreibung eines Einzugsgebietes
Seite 27, Quelle: ESRI
- Abbildung 12:** Abbildung zu Hydrologieanwendung mit LiDAR
Seite 28, Quelle: Sean Vaughn
- Abbildung 13:** Dreidimensionale Darstellung von Gewässer im Oberflächenmodell
Seite 30, Quelle: eigene
- Abbildung 14:** WM-Schärfung: Landsat-Wassermaske und Orthobild
Seite 38, Quelle: eigene
- Abbildung 15:** WM-Schärfung: Segmente auf Orthobild
Seite 39, Quelle: eigene
- Abbildung 16:** WM-Schärfung: Segmente, Landsat-Wassermaske und Orthobild
Seite 39, Quelle: eigene
- Abbildung 17:** WM-Schärfung: Geschärfte Wassermaske und Orthobild
Seite 40, Quelle: eigene
- Abbildung 18:** Dreidimensionale Oberflächenmodellldarstellung mit Voids im Gewässerbereich
Seite 42, Quelle: eigene

- Abbildung 19:** Vergleich der Höhenklassifikationen
Seite 44, Quelle: eigene
- Abbildung 20:** Orthobild mit Rangefilterklassifikation
Seite 45, Quelle: eigene
- Abbildung 21:** Höhenstützpunkte der Rangefilterklassifikation
Seite 46, Quelle: eigene
- Abbildung 22:** Centerlineableitung: Filterung der Wassermaske
Seite 47, Quelle: eigene
- Abbildung 23:** Centerlineableitung: Intensitätskarte
Seite 48, Quelle: eigene
- Abbildung 24:** Centerlineableitung: Isolierte Centerline
Seite 48, Quelle: eigene
- Abbildung 25a:** Schemata zur Centerlineableitung
Seite 50, Quelle: eigene
- Abbildung 25b:** Schemata zur Centerlineableitung
Seite 50
- Abbildung 25c:** Schemata zur Centerlineableitung
Seite 50
- Abbildung 25d:** Schemata zur Centerlineableitung
Seite 50
- Abbildung 26a:** Vergleichsdiagramm Höhenverläufe der Klassifikationsmethoden
(unbearbeitet)
Seite 52, Quelle: eigene
- Abbildung 26b:** Vergleichsdiagramm der Orthoklassifikation vor und nach
Ausreißerentfernung (Interquartilsabstand)
Seite 54, Quelle: eigene
- Abbildung 26c:** Vergleichsdiagramm Höhenverläufe der Klassifikationsmethoden
(oberes und unteres Quartil entfernt)
Seite 54, Quelle: eigene
- Abbildung 26d:** Vergleichsdiagramm Höhenverläufe der Klassifikationsmethoden
(Filterung durch gleitenden Mittelwert)
Seite 55, Quelle: eigene
- Abbildung 26e:** Vergleichsdiagramm Höhenverläufe der Klassifikationsmethoden
(lineares Abflusskriterium)
Seite 57, Quelle: eigene
- Abbildung 26f:** Vergleichsdiagramm Höhenverläufe der Klassifikationsmethoden
(adaptives Abflusskriterium)
Seite 58, Quelle: eigene
- Abbildung 27:** Orthobild des Testgebiets ‚Bozen‘
Seite 61, Quelle: eigene

- Abbildung 28:** Panoramabild des Etschtals
Seite 62, Quelle: Creative Commons Lizenz, Wikipedia
- Abbildung 29:** Orthobild des Testgebiets ‚Etschtal‘
Seite 62, Quelle: eigene
- Abbildung 30:** Benutzeroberfläche Wassermaskenschärfungstool
Seite 64, Quelle: eigene
- Abbildung 31:** Benutzeroberfläche HydroTool
Seite 65, Quelle: eigene
- Abbildung 32:** Orthobild Bozen mit überlagerter Landsat-Wassermaske
Seite 68, Quelle: eigene
- Abbildung 33:** Orthobild Bozen mit überlagerter geschärfte Wassermaske
Seite 69, Quelle: eigene
- Abbildung 34a:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Bozen
Seite 70, Quelle: eigene
- Abbildung 34b:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Bozen
Seite 71
- Abbildung 34c:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Bozen
Seite 72
- Abbildung 35:** Orthobild der Szene Bozen mit Centerline
Seite 73, Quelle: eigene
- Abbildung 36a:** Detailausschnitt Centerline Bozen
Seite 74, Quelle: eigene
- Abbildung 36b:** Detailausschnitt Centerline Bozen
Seite 74
- Abbildung 36c:** Detailausschnitt Centerline Bozen
Seite 75
- Abbildung 36d:** Detailausschnitt Centerline Bozen
Seite 75
- Abbildung 37:** Anteil an editierten Flächen in Bezug auf Wassermaske Bozen
Seite 76, Quelle: eigene
- Abbildung 38:** Höchste und niedrigste Gewässerhöhe Bozen
Seite 77, Quelle: eigene
- Abbildung 39:** 1. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets Bozen
Seite 78, Quelle: eigene
- Abbildung 40:** Diagrammdarstellung des 1. Centerlinesegments Bozen unbearbeitet
Seite 78, Quelle: eigene
- Abbildung 41:** Diagrammdarstellung des 1. Centerlinesegments Bozen korrigiert
Seite 79, Quelle: eigene

- Abbildung 42:** 2. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets Bozen
Seite 79, Quelle: eigene
- Abbildung 43:** Diagrammdarstellung des 2. Centerlinesegments Bozen unbearbeitet
Seite 80, Quelle: eigene
- Abbildung 44:** Diagrammdarstellung des 2. Centerlinesegments Bozen korrigiert
Seite 80, Quelle: eigene
- Abbildung 45:** 3. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets Bozen
Seite 81, Quelle: eigene
- Abbildung 46:** Diagrammdarstellung des 3. Centerlinesegments Bozen unbearbeitet
Seite 81, Quelle: eigene
- Abbildung 47:** Diagrammdarstellung des 3. Centerlinesegments Bozen korrigiert
Seite 82, Quelle: eigene
- Abbildung 48:** Abbildung 2. und 3. Centerlinesegment Bozen
Seite 83, Quelle: eigene
- Abbildung 49:** Vergleich der vier unterschiedlichen Prozessierungsmethodiken Bozen
Seite 84, Quelle: eigene
- Abbildung 50:** Hydrologisch korrigiertes Oberflächenmodell Bozen
Seite 86, Quelle: eigene
- Abbildung 51:** Landsat-Wassermaske des Testgebiets Etschtal
Seite 87, Quelle: eigene
- Abbildung 52:** Geschärfte Wassermaske des Testgebiets Etschtal
Seite 88, Quelle: eigene
- Abbildung 53a:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Etschtal
Seite 88, Quelle: eigene
- Abbildung 53b:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Etschtal
Seite 89
- Abbildung 53c:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Etschtal
Seite 89
- Abbildung 53d:** Orthobildausschnitt Etschtal
Seite 90, Quelle: eigene
- Abbildung 54:** Centerline des Testgebiets Etschtal
Seite 91, Quelle: eigene
- Abbildung 55a:** Detailausschnitt der Centerline Etschtal
Seite 92, Quelle: eigene
- Abbildung 55b:** Detailausschnitt der Centerline Etschtal
Seite 93
- Abbildung 55c:** Detailausschnitt der Centerline Etschtal
Seite 93

- Abbildung 56:** Anteil an editierten Flächen in Bezug auf Wassermaske Etschtal
Seite 94, Quelle: eigene
- Abbildung 57:** Höchste und niedrigste Gewässerhöhe Etschtal
Seite 90, Quelle: eigene
- Abbildung 58:** 1. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets Etschtal
Seite 96, Quelle: eigene
- Abbildung 59:** Diagrammdarstellung des 1. Centerlinesegments Etschtal unbearbeitet
Seite 96, Quelle: eigene
- Abbildung 60:** Diagrammdarstellung des 1. Centerlinesegments Etschtal korrigiert
Seite 97, Quelle: eigene
- Abbildung 61:** 2. Centerlinesegment in einem Teilausschnitt des Gebiets Etschtal
Seite 97, Quelle: eigene
- Abbildung 62:** Diagrammdarstellung des 2. Centerlinesegments Etschtal unbearbeitet
Seite 98, Quelle: eigene
- Abbildung 63:** Diagramm des 2. Centerlinesegments innerhalb Prozess unbearbeitet
Seite 98, Quelle: eigene
- Abbildung 64:** Diagrammdarstellung des 2. Centerlinesegments Etschtal korrigiert
Seite 99, Quelle: eigene
- Abbildung 65:** Fehlklassifikation Etschtal
Seite 99, Quelle: eigene
- Abbildung 66:** Vergleich der vier unterschiedlichen Prozessierungsmethodiken Etschtal
Seite 100, Quelle: eigene
- Abbildung 67:** Höhenprofil entlang des Ufers Etschtal
Seite 101, Quelle: eigene
- Abbildung 68:** Vergleich der Abflusskriterien Etschtal
Seite 101, Quelle: eigene
- Abbildung 69:** Hydrologisch korrigiertes Oberflächenmodell Etschtal
Seite 103, Quelle: eigene
- Abbildung 70:** Landsat-Wassermaske des Testgebiets Drau
Seite 104, Quelle: eigene
- Abbildung 71:** Geschärfte Wassermaske des Testgebiets Drau
Seite 104, Quelle: eigene
- Abbildung 72a:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Etschtal
Seite 105, Quelle: eigene
- Abbildung 72b:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Etschtal
Seite 105
- Abbildung 72c:** Detailausschnitt geschärfte Wassermaske Etschtal
Seite 106

- Abbildung 73:** Centerline des Testgebiets Drau
Seite 106, Quelle: eigene
- Abbildung 74a:** Detailausschnitt Centerline Drau
Seite 107, Quelle: eigene
- Abbildung 74b:** Detailausschnitt Centerline Drau
Seite 107
- Abbildung 74c:** Detailausschnitt Centerline Drau
Seite 108
- Abbildung 75:** Anteil an editierten Flächen in Bezug auf Wassermaske Drau
Seite 109, Quelle: eigene
- Abbildung 76:** Höchste und niedrigste Gewässerhöhe Drau
Seite 109, Quelle: eigene
- Abbildung 77:** Abbildung verwendetes Centerlinesegment für Analyse Drau
Seite 110 Quelle: eigene
- Abbildung 78:** Höhenstützpunkte des Centerlinesegments Drau
Seite 110, Quelle: eigene
- Abbildung 79:** Diagrammdarstellung des Centerlinesegments Drau unbearbeitet
Seite 111, Quelle: eigene
- Abbildung 80:** Diagrammdarstellung des Centerlinesegments Drau korrigiert
Seite 111, Quelle: eigene
- Abbildung 81:** Verwendeter Centerlinebereich für Vergleich der Prozessierung Drau
Seite 112, Quelle: eigene
- Abbildung 82:** Vergleich der vier unterschiedlichen Prozessierungsmethodiken Etschtal
Seite 113, Quelle: eigene
- Abbildung 83:** Vergleich Klassifikationsmethodik an Höhenkurven Drau
Seite 114, Quelle: eigene
- Abbildung 84:** Hydrologisch korrigiertes Oberflächenmodell Drau
Seite 115, Quelle: eigene

Abkürzungsverzeichnis

ALOS - Advanced Land Observation Satellite, japanischer Fernerkundungssatellit

ANUDEM - Australian National University Digital Elevation Model, Software zur hydrologischen Verarbeitung von Höhenmodellen

AOI - Area of Interest, ausgewählter Ausschnitt eines Datensatzes

CE90 - Circular Error of 90%, Lagegenauigkeitsangabe

DEM - Digital Elevation Model

DGM - Digitales Geländemodell

DHM - Digitales Höhenmodell

DOM - Digitales Oberflächenmodell

DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Forschungseinrichtung für Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr

DSM - Digital Surface Model, digitales Oberflächenmodell

DTED - Digital Terrain Elevation Data, Datenformat

ETM - Enhanced Thematic Mapper, Sensor des LANDSAT-7 Satelliten

GCP - Ground Control Point, Passpunkte für Satellitenbilder

GDEM - Global Digital Elevation Map, globales Höhenmodell

GEO - geostationärer Orbit (35 786 km)

GLS - Global Land Survey, Datensätze zu LANDSAT etc.

IRS - Indian Remote Sensing, Bezeichnung für Erdbeobachtungssatelliten der ISRO

ISRO - Indian Space Research Organisation, indische Raumfahrtbehörde

LE90 - Linear Error of 90%, Höhengenaugkeitsangabe

LEO - low Earth orbit unter einer Höhe von 2 000 km

LiDAR - Light Detection and Ranging, Methode zur optischen Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung

MATLAB - MATrix LABoratory bezeichnet eine Programmierumgebung und -sprache

MEO - Orbit zwischen LEO und GEO (von 2 000 km bis 35 786 km)

MIR - mittleres Infrarot (IR-B), Bereich ab 1,4 μm

NASA - National Aeronautics and Space Administration, US-amerikanische Raumfahrtbehörde

NDWI - Normalized Differenced Water Index, Index zur Klassifikation von Wasserflächen

NIR - Nahes Infrarot (IR-A und IR-B), Bereich von 780 nm bis 3 μm

NGA - National Geospatial-Intelligence Agency, US-amerikanischer Nachrichtendienst

RPC - Rational Polynomial Coefficients, Korrekturkoeffizienten, welche einem Satellitenbild optional beiliegen

SGM - Semi-Global Matching, Matchingalgorithmus zur Ableitung von Tiefeninformation aus Stereobildpaaren

SML - Spatial Modeler Language, proprietäre Skriptsprache der Firma ERDAS zur Transformation von Raster- und Vektordaten

SPOT - Système Pour l'Observation de la Terre, französisches Satellitenprogramm

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission, Raumfahrtmission zur radargestützten Erfassung der Erdoberfläche

SSO - Sun-synchronous orbit, gleiche Rotationsänderung wie Erde

SWBD - SRTM Water Body Data, weltweiter hydrologischer Datensatz basierend auf SRTM

TIN - Triangulated Irregular Network, Datenstruktur von Höhenmodell

TM - Thematic Mapper, Sensor des LANDSAT-4/5 Satelliten

USGS - United State Geological Survey, US-amerikanische, US-amerikanische geowissenschaftliche Behörde

VHR - Very High Resolution, siehe HR

WV - WorldView, Satellitensystem der amerikanischen Firma DigitalGlobe