

Goethe-Universität Frankfurt am Main
Fachbereich 11: Geowissenschaften/ Geographie
Institut für Physische Geographie

Diplomarbeit

**Der Vergleich der ASTER GDEM und SRTM C-Band
Geländehöhendaten für geomorphometrische und hydrologische
Analysen**

Von
Florian Krebs

Mai 2011

Gutachter:
Prof. Dr. J. Wunderlich
Dr. I. Marzolff

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Mein Dank gilt vor allem Frau Dr. I. Marzolff für die fachliche Unterstützung und konstruktive Kritik. Herrn Prof. Dr. Wunderlich danke ich für die Betreuung der Arbeit.

Mein Dank richtet sich an Nicolas Bongs, der durch seine Kritiken und Anregungen sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Außerdem danke ich noch Valentin Wittich, Benedikt Hahn, Luigi Wenzl und Frederik Daub für ihre Unterstützung.

Ferner möchte ich dem LVMA Vorarlberg in Feldkirch, insbesondere Herrn Batlogg und Herrn Drexler, sowie dem Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation für die Bereitstellung der Geodaten danken.

Mein Dank richtet sich außerdem an die sehr hilfsbereiten Nutzer diverser Internetforen, die immer einen guten Rat zur Stelle hatten.

Zum Schluss möchte ich noch ganz besonderes meinen Eltern danken, die mich immer unterstützt haben und jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Vergleich des ASTER GDEM und SRTM, zweier kostenlos verfügbarer, digitaler Geländehöhenmodelle mit nahezu globaler Abdeckung. Die Untersuchungsgebiete befinden sich im Kleinwalsertal (Österreich) und in Südhessen (Deutschland). Der Vergleich der Geländehöhendaten erfolgt durch die Ermittlung der Höhenabweichung zu Referenzhöhen, die aus hochauflösenden amtlichen Geländemodellen ermittelt wurden. Die Höhenabweichung wurde zudem für bestimmte geomorphologische Oberflächenformen und Landbedeckungen ermittelt. Des Weiteren werden die Geländehöhendaten auf ihre Eignung für geomorphometrische und hydrologische Analysen bewertet.

Abstract

This work focuses on the comparison between the ASTER GDEM and SRTM, two digital elevation models free of charge with nearly global coverage. The study areas are located in Kleinwalsertal (Austria) and in Südhessen (Germany). The comparison deals with the height accuracies in comparison to reference-data. The height accuracy is also estimated for geomorphologic terrain surfaces and land cover. In addition the digital elevation data is evaluated for geomorphometric and hydrologic analyses.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	i
Zusammenfassung.....	ii
Inhaltsverzeichnis.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	viii
1. Einleitung.....	16
1.1 Untersuchungsgegenstand, Zielsetzung und Fragestellung.....	16
1.2 Aufbau.....	17
2. Technischer Hintergrund.....	18
2.1 Begriffsdefinition „Geländemodell“.....	18
2.2. Die Geländemodellerstellung durch Stereokorrelation.....	18
2.2.1 Der ASTER Sensor.....	20
2.2.2 ASTER G-DEM.....	21
2.2.3 Technisch bedingte Schwächen des ASTER GDEM.....	22
2.2.4 Höhengenaugigkeit des ASTER GDEM in Abhängigkeit von Bildstapel...	26
2.3 Die Geländemodellerstellung durch Radarinterferometrie (InSAR).....	27
2.3.1 SRTM Mission.....	28
2.3.2 SRTM CIGAR CSI Version 4.....	29
2.3.3 Technisch bedingte Schwächen der Radartechnik.....	30
3. Der Vergleich des ASTER GDEM mit dem SRTM (State of the Art)	33
3.1 Statistische Analyse der Höhenabweichung.....	33
3.2 Geomorphometrische Vergleiche des ASTER GDEM und SRTM.....	35
3.3 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Landbedeckung.....	36
4. Untersuchungsgebiete.....	39
4.1 Untersuchungsgebiet 1 - Mittelberg (Österreich).....	39
4.2 Untersuchungsgebiet 2 - Südhessen (Deutschland).....	41

5. Daten und Methoden.....	43
5.1 Datengrundlage.....	43
5.1.1 Datenaufbereitung.....	44
5.1.2 Höhenbezüge der Geländemodelle.....	45
5.1.3 Wahl der Rastergröße.....	47
5.2 Höhenabweichung zu Referenzhöhen.....	48
5.2.1 Statistische Analyse der Höhenabweichung.....	48
5.2.2 Lage der Höhenabweichung im Untersuchungsgebiet.....	49
5.2.3 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Reliefklasse.....	50
5.2.3.1 Erstellung einer Reliefklassifizierung.....	50
5.2.4 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Landbedeckungsklasse.....	54
5.2.4.1 Erstellung einer Landbedeckungsklassifizierung.....	55
5.2.5 Höhenabweichung in Abhängigkeit der Bildstapel (ASTER GDEM).....	57
5.3 Geomorphometrische Analysen.....	57
5.3.1 Hangneigung.....	57
5.3.2 Höhenlinien.....	58
5.3.3 Reliefklassifizierung.....	59
5.4 Hydrologische Analysen.....	59
5.5 Überprüfung des ASTER GDEM auf Anomalien.....	61
6. Ergebnisse.....	62
6.1 Untersuchungsgebiet 1 Mittelberg.....	62
6.1.1 Höhenabweichung zu Referenzhöhen.....	62
6.1.1.1 Statistische Analyse der Höhenabweichung.....	62
6.1.1.2 Lage der Höhenabweichung im Untersuchungsgebiet.....	64
6.1.1.3 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Reliefklasse.....	67
6.1.1.4 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Landbedeckung.....	71
6.1.1.5 Höhenabweichung in Abhängigkeit der Bildstapel (ASTER GDEM).....	75
6.1.2 Geomorphometrische Analysen.....	77
6.1.2.1 Hangneigung.....	77
6.1.2.2 Höhenlinien.....	79
6.1.2.3 Reliefklassifizierung.....	80
6.1.3 Hydrologische Analysen.....	83
6.1.4 Überprüfung des ASTER GDEM auf Anomalien.....	87

6.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse UG 1.....	90
6.2	Untersuchungsgebiet 2 Südhessen.....	92
6.2.1	Höhenabweichung zu Referenzhöhen.....	92
6.2.1.1	Statistische Analyse der Höhenabweichung.....	92
6.2.1.2	Lage der Höhenabweichung im Untersuchungsgebiet.....	94
6.2.1.3	Höhenabweichung in Abhängigkeit von Reliefklasse.....	97
6.2.1.4	Höhenabweichung in Abhängigkeit von Landbedeckung.....	101
6.2.1.5	Höhenabweichung in Abhängigkeit der Bildstapel (ASTER GDEM).....	106
6.2.2	Geomorphometrische Analysen.....	107
6.2.2.1	Hangneigung.....	107
6.2.2.2	Höhenlinien.....	109
6.2.2.3	Reliefklassifizierung.....	110
6.2.3	Hydrologische Analysen.....	114
6.2.4	Überprüfung des ASTER GDEM auf Anomalien.....	118
6.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse UG 2.....	121
7.	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....	122
7.1	Statistischer Höhenvergleich.....	122
7.1.1	Höhenabweichung nach Reliefklasse.....	124
7.1.2	Höhenabweichung nach Landbedeckung.....	124
7.1.3	Hangneigung.....	126
7.1.4	Höhenlinien.....	126
7.1.5	Reliefklassifizierung.....	126
7.1.6	Hydrologische Analysen.....	127
7.2	Methodenbewertung.....	127
7.3	Fazit.....	128
8.	Quellen.....	129

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Vereinfachte Darstellung der Bildherstellungsgeometrie für das ASTER <i>along-track</i> Stereobildaufnahmesystem (aus HIRANO 2003).....	20
Abb. 2-2:	<i>Verbleibende Wolkenanomalien</i> über schattiertem Relief (aus ASTER GDEM VT 2009).....	23
Abb. 2-3:	Beispiel einer <i>Stufenanomalie</i> (aus ASTER GDEM VT 2009).....	24
Abb. 2-4:	Beispiel der linearen Szenegrenzen mit kurvenförmigen Bildstapelgrenzen (aus ASTER GDEM VT 2009).....	24
Abb. 2-5:	Beispiel des <i>Pit</i> -Artefakts (aus ASTER GDEM VT 2009). (A) Schattierte Reliefdarstellung; (B) Verlauf der Bildstapelgrenzen. (C) ASTER GDEM Bilddarstellung.	25
Abb. 2-6:	Beispiel des <i>Bump</i> -Artefakts (aus ASTER GDEM VT 2009) (A) Schattierte Reliefdarstellung; (B) Verlauf der Bildstapelgrenzen. (C) ASTER GDEM Bilddarstellung.....	26
Abb. 2-7:	Beispiel des <i>Mole-Run</i> -Artefakts (aus ASTER GDEM VT 2009) (A) Schattierte Reliefdarstellung; (B) Verlauf der Bildstapelgrenzen. (C) ASTER GDEM Bilddarstellung.....	26
Abb. 2-8:	Der Höhenfehler des ASTER GDEM als Funktion der Anzahl der Bildstapel (grün = Einfluss von Wald; Punkt = durchschnittliche Anzahl der Bilder/Punkt) (aus JACOBSEN 2010).....	27
Abb. 2-9:	Interferometrische-Radar Geometrie (LILLESAND 2008:679).....	28
Abb. 2-10:	Konfiguration INSAR SRTM (nach PASSINI 2007 leicht abgeändert)....	29
Abb. 2-11:	Die Geometrie von Radarbildern in gebirgigem Gelände. Punkt 11 wird wegen des <i>Radarschattens</i> nicht abgebildet (aus ALBERTZ 2007:78).....	30
Abb. 2-12:	Reflexion von Radarstrahlen (λ) an Oberflächen verschiedener Rauigkeiten. Links: Spiegelnde Fläche an einer zur Wellenlänge glatten Fläche (z.B. Sand). Rechts: Diffuse Reflexion an einer rauen Fläche (z.B. Felsbrocken) (aus ALBERTZ 2007:60).....	31

Abb. 2-13:	Schematische Darstellung der Eindringtiefen von Radarstrahlen für das X-, C- und L-Band (aus ALBERTZ 2007:61).....	32
Abb. 3-1:	Die aus dem ASTER GDEM und SRTM erzeugten Höhenlinien. Das Höhenintervall beträgt 1000 ft. (aus JACOBSEN 2010).....	36
Abb. 4-1:	Die Lage des UG 1 - Mittelberg. (Eigene Abbildung auf Basis von: Oben: Ausschnitt aus Google Maps, 12.03.11; Unten: Ausschnitt aus Google Earth, 12.03.11).....	39
Abb. 4-2:	Schrägansicht des UG 1 - Mittelberg (Eigene Abbildung auf Basis von Google Earth, 12.03.11; Geländehöhen aus LIDAR-DSM).....	40
Abb. 4-3:	Lage des UG 2 - Südhessen (Ausschnitt aus TK 200 und TK 50).....	41
Abb. 4-4:	Schrägansicht des UG 2 – Südhessen. 5-fach überhöht. (eigene Abbildung auf Basis des DGM10).....	42
Abb. 5-1:	Verarbeitungsprozess der Geländemodelle am des Beispiel des ASTER GDEM (eigene Darstellung).....	45
Abb. 5-2:	Die physikalischen und Geometrischen Höhenbezugsflächen des UG 2 (nach DVW 2009:16).....	46
Abb. 5-3:	Höhenanomalien für das GRS80-Ellipsoid. Rote Markierung: Lage des UG 1 – Südhessen (nach DRESCHER 2005; DVW 2009:16 leicht abgeändert).....	47
Abb. 5-4:	Arbeitsschritte zur Erstellung der Reliefklassen im <i>Benthic Terrain Modeler</i> (aus NOAA CSC 2005 leicht abgeändert).....	50
Abb. 5-5:	Beispiel für die Beschreibung des BPI-Index. Jede Zelle enthält den spezifischen BPI-Wert. Positive Werte sind höher als ihre Umgebung. Der Wert Null charakterisiert flache und/oder ebene Bereiche. Die Kreise definieren den inneren (2) und äußeren (4) Radius der Lageanalyse (aus LUNDBLAD 2008).....	51
Abb. 5-6:	Positive und Negative BPI Bestimmung (aus NOAA CSC 2005).....	52
Abb. 5-7:	Bereiche mit einem BPI im neutralen Bereich. An diesen Stellen wird die Hangneigung zur BPI Bestimmung genutzt (aus NOAA CSC 2005).....	52
Abb. 5-8	Beispiel der Pixelkonfiguration der jeweiligen Reliefklasse (nach Bolognaro-Crevenna (2004) - abgeändert und ergänzt mit eigener Reliefklasse Hänge).....	53
Abb. 5-8:	Der Reflexionsgrad für bestimmte Objektklassen in Abhängigkeit	

	von der Wellenlänge (aus ALBERTZ 2007:156).....	55
Abb. 5-10:	Beispiel für eine Multispektralklassifizierung. Links: Multispektral Satellitenbild. Mitte: Statistische Analyse durch elliptische Linien zur Unterteilung des Merkmalsraumes. Rechts: Erstellung der Thematischen Karte durch die Anwendung der Unterteilung(ALBERTZ 2007:162).....	56
Abb. 5-11:	Der Verarbeitungsprozess der Geländemodelle zur Erstellung der Einzugsgebietsflächen (engl. <i>watershed</i>) und des Gewässernetzes (engl. <i>drainage line</i>) (eigene Darstellung).....	56
Abb. 5-12:	Erstellung der Fließakkumulation (rechts) aus den Fließrichtungen (links). Die Nummern stehen für die Anzahl der Zellen, die in die jeweilige Zelle entwässern (aus ESRI 2010).....	59
Abb. 6-1:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung für das ASTER GDEM und SRTM_R.....	60
Abb. 6-2:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung für das ASTER GDEM_R und SRTM im UG 1.....	63
Abb. 6-3:	UG 1: Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM.....	64
Abb. 6-4:	UG 1: Lage der Höhenabweichung des SRTM_R.....	65
Abb. 6-5:	UG 1: Lage der Differenz der Höhenabweichung von SRTM – ASTER GDEM.....	66
Abb. 6-6:	UG 1: Lage und Anteilswerte der Reliefklassen.....	67
Abb. 6-7:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Kämme</i>	68
Abb. 6-8:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Senken</i>	69
Abb. 6-9:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Ebenen</i>	70
Abb. 6-10:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Hänge</i>	71
Abb. 6-11:	UG 1: Lage und Anteilswerte der Landnutzungsklassen.....	72
Abb. 6-12:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse <i>Gestein</i>	74
Abb. 6-13:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse <i>Wald</i>	74

Abb. 6-14:	UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckung <i>Offen</i>	75
Abb. 6-15:	UG 1: Prozentuale Verteilung der Hangneigungswerte.....	77
Abb. 6-16:	UG 1: Beispielausschnitt der Höhenlinien erzeugt aus dem ASTER GDEM, SRTM_R und DSM_R.....	79
Abb. 6-17:	UG 1: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das ASTER GDEM und DSM_R.....	81
Abb. 6-18:	UG 1: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das SRTM und DSM_R.....	82
Abb. 6-19:	UG 1: Lage der zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel.....	84
Abb. 6-20:	UG 1: Gewässernetz und Teileinzugsgebietsgrenzen erzeugt aus DSM...	85
Abb. 6-21:	UG 1: Gewässernetz und Teileinzugsgebietsgrenzen erzeugt aus ASTER GDEM. (schwarze Pfeile markieren den parallelen Verlauf der Teileinzugsgebietsgrenzen).....	86
Abb. 6-22:	UG 1: Gewässernetz und Teileinzugsgebietsgrenzen erzeugt aus SRTM. (schwarze Pfeile markieren den parallelen Verlauf der Teileinzugsgebietsgrenzen).....	86
Abb. 6-23:	UG 1: Schattiertes Relief des ASTER GDEM. Pfeile: Artefakt <i>Pits</i> . Kreis: Anomalie bedingte, fehlerhafte Darstellung des Geländes.....	89
Abb. 6-24:	UG 1: 3d-Darstellung des Widdersteins aus südlicher Richtung. Markierung: Fehlendes Kammstück des östlichen Widdersteins beim ASTER GDEM.....	90
Abb. 6-25:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R.....	93
Abb. 6-26:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM_R und SRTM.....	93
Abb. 6-27:	UG 2: Lage der Höhenabweichung des ASTER-GDEM.....	94
Abb. 6-28:	UG 2: Die Lage der Höhenabweichung des SRTM_R.....	95
Abb. 6-29:	UG 2: Lage der Differenz der Höhenabweichung von SRTM – ASTER GDEM.....	96
Abb. 6-30:	UG 2: Lage und Anteilswerte der Reliefklassen.....	97
Abb. 6-31:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Kämme</i>	99
Abb. 6-32:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Senken</i>	99

Abb. 6-33:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Ebenen</i>	100
Abb. 6-34:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung der ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse <i>Hänge</i>	101
Abb. 6-35:	UG 2: Lage und Anteilswerte der Landnutzungsklassen.....	102
Abb. 6-36:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse <i>Siedlung</i>	103
Abb. 6-37:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse <i>Wald</i>	104
Abb. 6-38:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse <i>Offen</i>	105
Abb. 6-39:	UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse <i>Wasser</i>	105
Abb. 6-40:	UG 2: Prozentuale Verteilung der Hangneigungswerte.....	107
Abb. 6-41:	UG 2: Beispielausschnitt der Höhenlinien erzeugt aus dem ASTER GDEM, SRTM_R und DGM10_R.....	109
Abb. 6-42:	UG 2: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das ASTER GDEM und DGM10_R.....	111
Abb. 6-43:	UG 2: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das SRTM und DGM10_R.	112
Abb. 6-44:	UG 2: Lage der zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel.....	115
Abb. 6-45:	UG 2: Gewässernetz für drei <i>Drainage Punkte</i> (gelb).....	116
Abb. 6-46:	UG 2: Einzugsgebiet für drei <i>Drainage Punkte</i> (gelb).....	117
Abb. 6-47:	UG 2: Anzahl der verwendeten Bildstapel zur ASTER GDEM Erstellung. (Pfeile markieren die <i>Stufengrenzen</i> der Bildstapel.).....	119
Abb. 6-48:	UG 2: Anomalien und Artefakte des ASTER GDEM (Rote Kreise: Artefakt <i>Pit</i> . Blauer Kreis: Artefakt <i>Mole-Run</i>) A) Schattierte Reliefdarstellung des ASTER GDEM. B) Bildstapel des ASTER GDEM. C) Schattierte Reliefdarstellung des DGM10.....	120

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Aster-Sensor Kenndaten (aus ABRAMS 2000).....	20
Tab. 2-2:	ASTER GDEM Kenndaten (aus ASTER 2009).....	22
Tab. 2-3:	RMSE des ASTER GDEM in Abhängigkeit mit der Anzahl der Bildstapel (nach ASTER GDEM VT 2009).....	27
Tab. 3-1:	Ergebnisse der Untersuchungen von HIRT (2010), HSING-CHUNG CHANG (2010) und JACOBSEN (2010) für das ASTER GDEM und SRTM in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung; Höhe = Höhenbereich der Testgebiete).....	34
Tab. 3-2:	Höhenfehler in Abhängigkeit zur Reliefhöhe (Relief (m) = Höhengradient, Mean = Mittlerer Fehler, Std. Dev.= Standardabweichung, RMSE = Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung) (aus ASTER GDEM VT 2009).....	35
Tab. 3-3:	Der RMSE des ASTER GDEM und SRTM im Vergleich zu den Referenzhöhen des NED für alle Pixel (ALL CONUS) sowie für vier NLCD Landbedeckungsklassen (Wasser, Siedlung, Wald, <i>Offen</i>) (Werte in Metern) (aus ASTER GDEM VT 2009 leicht abgeändert).....	37
Tab. 3-4:	Höhenfehler der digitalen Geländehöhenmodelle im Vergleich mit RTK-GPS für Landnutzung Buschland (aus HSING-CHUNG CHANG 2010).....	37
Tab. 5-1:	Übersicht und Eigenschaften aller verwendeten Geländemodelle.	
Tab. 5-2:	Für die Klassifizierung der Landbedeckung genutzte Aster- Satellitenbilder.....	44
Tab. 5-3:	Koordinatensysteme und Transformationsmethoden (aus ESRI 2008).....	45
Tab. 5-4:	Beispielformenschatz für Reliefklassen.....	55
Tab. 5-5:	Die Landbedeckungsklassen mit Nutzungsbeispielen.....	57
Tab. 6-1:	UG 1: Statistik zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM für unterschiedlichen Rastergrößen. Angaben in Metern (m) (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung; Min/Max = Minimale bzw. maximale Höhenabweichung).....	62
Tab. 6-2:	UG 1: Statistik zur Höhenabweichung für die einzelnen Reliefklassen. Angaben in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der	

	mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung; Min/Max = Minimale bzw. maximale Höhenabweichung).....	68
Tab. 6-3:	UG 1: Statistik zur Höhenabweichung für die einzelnen Landbedeckungsklassen. Angabe in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel des quadratischen Mittelwertes der Höhenabweichung, SD: Standardabweichung).....	73
Tab.6-4:	UG 1: Höhenabweichung des ASTER GDEM in Abhängigkeit von den verwendeten Bildstapeln im UG 1.....	76
Tab. 6-5:	UG 1: Die Häufigkeitsverteilung der Hangneigung für Hangneigungsklassen nach HAYAKAWA (2008).....	78
Tab. 6-6:	UG 1: Abweichung der Hangneigung des ASTER GDEM und SRTM von den Hangneigungen des Referenzgeländemodells. (ME= Mittlerer Fehler, SD = Standardabweichung, Min = Minimalwert, Max = Maximalwert).....	78
Tab. 6-7:	UG 1: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des ASTER GDEM im Vergleich zum DSM_R.....	80
Tab. 6-8:	UG 1: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des SRTM mit dem DSM_R.....	83
Tab. 6-9:	UG 1: Die mittlere Höhe der zur Verfüllung des Geländemodells benötigten Pixel.....	85
Tab. 6-10:	UG 1: Vergleich der Ergebnisse zur Gesamteinzugsbeizgröße und Gewässernetzlänge des UG 1 für das DSM, ASTER GDEM und SRTM...	87
Tab. 6-11:	UG 2: Statistik zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM von den Referenzhöhen für die unterschiedlichen Rastergrößen. Angabe in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel des quadratischen Mittelwertes der Höhenabweichung, SD: Standardabweichung).....	92
Tab. 6-12:	UG 2: Statistik zur Höhenabweichung für die einzelnen Reliefklassen. Angabe in Metern (m).(ME=Mittlerer Fehler; RMSE = Wurzel des quadratischen Mittelwertes der Höhenabweichung; SD=Standardabweichung).....	98
Tab. 6-13:	UG 2: Die Statistik zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die einzelnen Landbedeckungsklassen. Angabe in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung).....	103

Tab. 6-14:	UG 2: Die Höhenabweichung der ASTER GDEM Geländehöhen in Abhängigkeit von den verwendeten Bildstapeln.....	106
Tab. 6-15	UG 2: Anteilswerte der Hangneigung UG 2 für Hangneigungsklassen nach HAYAKAWA (2008).....	108
Tab. 6-16	UG 2: Die Abweichung der Hangneigung des ASTER GDEM und SRTM von den Hangneigungen des DGM10 für das UG 2 - Südhessen.....	108
Tab. 6-17:	UG 2: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des ASTER GDEM mit dem DGM10.....	110
Tab. 6-18:	UG 2: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des SRTM im Vergleich zum DGM10.....	113
Tab. 6-19:	UG 2: Die mittlere Höhe der zur Verfüllung des Geländemodells benötigten Pixel.....	114
Tab. 6-20	UG 2: Größe der Einzugsgebiete und Länge des Gewässernetzes.....	117
Tab. 7-1:	Die Höhenabweichung (in Metern) des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklassen des UG 2 im Vergleich mit den Werten des ASTER GDEM VT (2009).....	125

Abkürzungsverzeichnis

3d	Dreidimensional
ArcGIS	GIS Software der Firma ESRI
Archydro	ArcGIS Erweiterung für hydrologische Analysen
ASTER	Sensor: <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Circa
DHM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSM	Digitales Oberflächenmodell (engl. <i>Digital Surface Model</i>)
GIS	Geographisches Informationssystem
GDEM	engl. <i>global digital elevation model</i>
ggf.	Gegebenenfalls
ME	Mittlerer Fehler (engl. <i>mean error</i>)
METI	Japanische Behörde <i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i>
NOAA	US-Behörde <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NASA	US-Behörde <i>National Aeronautic and Space Administration</i>
RMSE	Wurzel d. mittleren quadratischen Abweichung (engl. <i>root mean square error</i>)
<i>Resampling</i>	Resampling (hier: Übertragen in eine andere Auflösung)
SD	Standardabweichung (engl. <i>standard deviation</i>)
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UG	Untersuchungsgebiet

1. Einleitung

1.1 Untersuchungsgegenstand, Zielsetzung und Fragestellung

Am 26. Juni 2009 wurde von der US-Behörde *National Aeronautic and Space Administration* (NASA) und dem japanischen *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI) ein neues, digitales Höhenmodell mit globaler Abdeckung unter dem Namen ASTER GDEM veröffentlicht (BILLEMONT 2010). Das ASTER GDEM steht seitdem wissenschaftlichen Nutzern kostenlos mit einer Auflösung von einer Bogensekunde zur Verfügung. Bis zur Veröffentlichung des ASTER GDEM war die Referenz unter den global kostenlos verfügbaren Höhendaten das im Jahre 2000 veröffentlichte SRTM C-Band Höhenmodell mit einer Auflösung von drei Bogensekunden (HAYAKAWA 2008).

Bereits vor der Veröffentlichung des ASTER GDEM waren dem Herausgeber einige technische Mängel bekannt, welche die Qualität der Höhendaten maßgeblich einschränken sollen. Aus diesem Grund wurde das ASTER GDEM vorsorglich als Testversion veröffentlicht, da der Herausgeber davon ausgegangen ist, dass der potentielle Nutzen die Mängel überwiegt. Durch die Veröffentlichung erwartet man eine zukünftige Verbesserung des ASTER GDEM durch die Endanwender (ASTER GDEM VT 2009).

Ein wesentlicher Unterschied beider Höhenmodelle besteht in der unterschiedlichen Technik der Erzeugung der Höhendaten. Die Höhendaten des ASTER GDEM wurden durch photogrammetrischen Auswertungen von langjährig aufgenommenen Satellitenbildern des ASTER Sensors (TERRA Satellit) erzeugt (ASTER GDEM VT 2009; BILLEMONT 2010; ABRAMS 2010). Im Gegensatz dazu wurden die SRTM-Höhendaten während einer 11-tägigen Spaceshuttlemission durch ein aktives Radarsystem ermittelt (RABUS 2003; HSING-CHUNG CHANG 2010; HAYAKAWA 2009).

Bedingt durch die sich unterscheidende Technik der Erzeugung der beiden Höhenmodelle sind Unterschiede in der Qualität der Höhendaten zu erwarten. Neben einer kurzen Einführung bezüglich der Akquisetechniken soll vor allem die Beurteilung der Höhendatenqualität im Fokus dieser Arbeit stehen. Hierbei wird das Hauptaugenmerk auf das ASTER GDEM gelegt, da es hierzu im Vergleich zum SRTM nur wenige Arbeiten gibt.

Die Qualität der Höhendaten soll durch Vergleiche mit Referenzhöhendaten ermittelt werden. Die Referenzhöhendaten werden aus amtlichen Höhenmodellen bestimmt. Neben der Berechnung der Abweichung der Modellhöhen von den Referenzhöhen, soll die Höhenabweichung ebenfalls für bestimmte Landbedeckungen und geomorphologische

Oberflächenformen bestimmt werden. Des Weiteren sollen die Eigenschaften der Höhenmodelle bezüglich ihrer Eignung für geomorphometrische und hydrologische Analysen aufgezeigt werden.

Das Ziel dieser Arbeit soll es sein, die Vor- und Nachteile der Höhenmodelle für bestimmte Nutzungskriterien aufzuzeigen. Demnach für welchen Landschaftsraum bzw. bei welchen landschaftlichen Gegebenheiten sich eines der beiden Höhenmodelle anbietet. Zu diesem Zweck wurden für die Analysen zwei Untersuchungsgebiete gewählt, die den charakteristischen Eigenschaften einer Hochgebirgsregion und Mittelgebirgsregion entsprechen, um so einen großen Höhengradienten abzudecken, wie es für mitteleuropäische Landschaftsformen typisch ist.

1.2 Aufbau

In Kapitel 2 soll der technische Hintergrund der beiden Höhenmodelle veranschaulicht und bereits systematisch bedingte Besonderheiten der Höhendaten aufgezeigt werden. Dem folgt in Kapitel 3 eine Zusammenfassung des bisherigen wissenschaftlichen Diskurses zum Vergleich des ASTER GDEM mit dem SRTM. In Kapitel 4 werden die Untersuchungsgebiete vorgestellt, in denen die in Kapitel 5 beschriebenen Methoden Anwendung fanden. Zu den Methoden zählten neben der statistischen Ermittlung der Höhendatenqualität, darüber hinaus Methoden zur Beschreibung der Untersuchungsgebiete durch Fernerkundung. Die Fernerkundungsanalysen beinhalteten die Erstellung einer Landbedeckungskarte aus Multispektral-Satellitenbildern sowie die Ableitung von geomorphologischen Oberflächenformen aus den Höhenmodellen. Diese Elemente werden genutzt, um die Qualität der Höhendaten für unterschiedliche Landbedeckungen und geomorphologische Oberflächenformen zu ermitteln. Des Weiteren wird die Eignung der einzelnen Höhenmodelle für die Erstellung von geomorphologischen Oberflächenformen getestet.

Die Ergebnisse der einzelnen Methoden werden zunächst für jedes Untersuchungsgebiet separat in Kapitel 6 ermittelt. Am Ende werden diese dann in Kapitel 7 zusammengefasst und analysiert.

2. Technischer Hintergrund

2.1 Begriffsdefinition „digitales Geländemodell“

Im Folgenden wird auf die Begrifflichkeiten der Definition von *digitalen Geländemodellen* eingegangen. Diese sind oftmals nicht eindeutig definiert.

Der Begriff des *digitalen Geländemodells* ist der in der Geographie am häufigsten verwendete. Nach LESER (2005: 156) ist ein *digitales Geländemodell* eine "Computer-gestützte Darstellung von *Geländeoberflächen*, [...] durch digital abgespeicherte x-, y-, z-Koordinaten von Punkten auf der Oberfläche. [...] Für die geographisch landschafts-ökologische Arbeit bietet das digitale Geländemodell zahlreiche Einsatzmöglichkeiten, vor allem im Verbund mit Geographischen Informationssystemen (GIS). [...]".

In dieser Arbeit wurde das ASTER GDEM und SRTM bisher als *digitales Höhenmodell* bezeichnet. Die Bezeichnung *Höhenmodell* wird ebenfalls von JACOBSEN (2010) für beide Geländemodelle verwendet. In der Definition von BOLLMANN (2001) ist ein *digitales Höhenmodell* eine „idealisierte Bodenoberfläche ohne Bewuchs, anthropogene Objekte [...] und [ohne] zeitlich stark variable Elemente wie Schnee-, Eis- und (temporäre) Wasserflächen“.

Beim ASTER GDEM und SRTM wird jedoch **nicht** die Höheninformation der idealisierten Bodenoberfläche erfasst, sondern darüber hinaus was sich auf ihr befindet. Demnach handelt es sich bei beiden digitalen Höhenmodellen um *digitale Oberflächenmodelle* (DOM). Hierbei ist vorwiegend die Vegetation zu nennen, die zu einer Erhöhung der tatsächlichen Geländehöhe führt (JACOBSEN 2004).

Diese Auszüge sollen zeigen, dass es teilweise Unstimmigkeiten bei der Definition und Bezeichnung von Höhendaten gibt. Dies liegt vorwiegend an der Definition der *Geländeoberfläche*. Für diese Arbeit wird der Begriff *Geländemodell* für die Beschreibung der *digitalen Oberflächenmodelle* genutzt.

2.2 Die Geländemodellerstellung durch Stereokorrelation

Die Höhendaten des ASTER GDEM wurde durch die Auswertung von Stereo-satellitenbildpaaren durch die Stereokorrelationstechnik erstellt. Um hierbei auftretende Probleme und Einschränkungen zu verstehen, ist es wichtig, zunächst das dahinterstehende

technische Grundprinzip zu erläutern. Trotz der technischen Probleme stellt das ASTER GDEM für den Bereich der automatisierten Stereokorrelationstechnik eine Innovation dar.

Die Möglichkeit Stereo-Satellitenbilder zum Erstellen von globalen digitalen Höhenmodellen zu nutzen, kam erstmalig im Jahre 1986 durch den Start der SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) Satellitenprogrammserie auf. Seitdem wurde eine Vielzahl an Algorithmen und standardisierten Verfahren entwickelt, um Stereobildpaare zur Geländemodellerstellung auszuwerten (CUARTERO 2004, BALTSAVIAS 1993).

Ein Problem bei diesen Verfahren ist deren Automatisierung. In den meisten Fällen ist die Erzeugung von Höhendaten erst nach einer detaillierten Analyse der einzelnen Satellitenbildszenen möglich. Probleme treten hierbei in allen Bereichen auf, die durch die unterschiedlichen Zeitstände der Aufnahme bedingt werden. Folglich kann es Unterschiede in der spektralen, temporalen oder geometrischen Auflösung der zu korrelierenden Satellitenbilder geben. Ein weiteres Problem ist das Identifizieren der, für die DHM Erstellung benötigten, Boden-Kontrollpunkte (GCP) (CUARTERO 2004). Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Großteil der zur DEM Erstellung nutzbaren Satelliten (wie z.B. die SPOT Satelliten) für die Stereobildherstellung eine *Cross-Track* Methode nutzen (HSING-CHUNG CHANG 2010). Bei der *Cross-Track* Methode wird bei jedem Überflug eines Gebietes jeweils ein Bild aufgenommen, das mit den Bildern des vorherigen Überflugs stereokorreliert werden kann, was die bereits erörterten Probleme verursacht. Die Stereobildpaare des ASTER GDEM hingegen werden mit der *Along-Track* Methode aufgenommen. Der Vorteil der *Along-Track* Methode ist die Erstellung beider Satellitenbildpaare mit nur einer kurzen zeitlichen Verzögerung. Beim ASTER SENSOR wird das zweite Satellitenbild ca. 60 Sekunden nach dem ersten erstellt. So sind gleiche Strahlungsverhältnisse sowie die gleichen geometrischen Eigenschaften gegeben. Das *Along-Track* Verfahren des ASTER Sensors wird im nächsten Kapitel (2.2.1) noch ausführlicher erklärt.

Die Erzeugung von Höhendaten aus Stereosatellitenbildern durch die Stereokorrelation erfolgt durch die Analyse der Bildparallaxe. Das Prinzip der Parallaxe wird für das Verständnis dieser Arbeit nicht benötigt. Weiterführend sei auf das Lehrbuch von LÖFFLER (2005) hingewiesen, in dem die Erzeugung von Höhenwerten durch die Parallaxe ausgiebig erklärt wird.

2.2.1 Der ASTER Sensor

Der *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) ist ein hochauflösender Multispektralscanner, der vom METI entwickelt wurde. Der Scanner wurde

Tab. 2-1: Aster-Sensor Kenndaten (ABRAMS 2000).

	VNIR	SWIR	TIR
Spatial resolution (m)	15	30	90
Data rate (Mbps)	62	23	4
Cross-track pointing	± 24	± 8.55	± 8.55
Cross-track pointing	± 318	± 116	± 116
Swath width (km)	60	60	60
Quantization (bits)	8	8	12
Stereo	Y	N	N

Wavelength region	Band	Bandwidth (μm)
VNIR	1	0.52 – 0.60
	2	0.63 – 0.69
	3	0.76 – 0.86
SWIR	4	1.60 – 1.70
	5	2.145– 2.185
	6	2.185– 2.225
	7	2.235– 2.285
	8	2.295– 2.365
	9	2.360– 2.430
TIR	10	8.125– 8.475
	11	8.475– 8.825
	12	8.925– 9.275
	13	10.25 – 10.95
	14	10.95 – 11.65

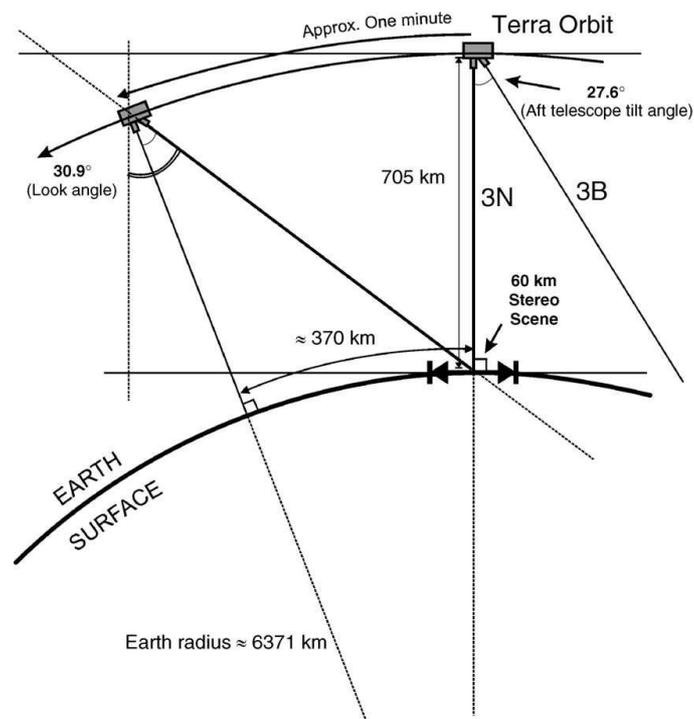


Abb. 2-1: Vereinfachte Darstellung der Bildherstellungsgeometrie für das ASTER *along-track* Stereobildaufnahmesystem (aus HIRANO 2003).

in das TERRA (EOS AM-1) Satellitensystem der NASA integriert, welches im Jahre 1999 startete. Das vordergründige wissenschaftliche Interesse der Mission war ein verbessertes Verständnis der lokalen und regionalen Prozesse an der Erdoberfläche und nahen Atmosphäre sowie deren Interaktion (ABRAMS 2000, YAMAGUCHI 1998).

Der ASTER Sensor hat 14 Spektralkanäle. Drei im sichtbaren und nahen Infrarot (VNIR) mit 15 m Auflösung, 6 Kanäle im kurzwelligen Infrarot (SWIR) mit 30 m Auflösung und 5 Kanäle im Thermalen Infrarot (TIR) mit 90 m Auflösung (vgl. Tab. 2-1). Zusätzlich verfügt das VNIR-System über einen schräggestellten Sensor mit 27,6° Neigung, der entgegengesetzt der Flugrichtung des Satelliten ausgerichtet ist (engl. *aft-looking*). Dieser ermöglicht eine stereoskopische Aufnahme des mit dem *Nadir* Sensor überflogenen Gebietes in rückwärts gerichteter Richtung (engl. *along-track*) (ABRAMS 2000). Um ein Stereobild zu erstellen wird das erste Bild des 60 x 60 km großen Geländes beim Überflug des Satelliten in einer Höhe von 705 km aufgenommen. Nach etwa 60 Sekunden wird der gleiche Bereich mit dem rückwärts gerichteten VNIR Kanal aufgenommen (vgl. Abb. 2-1). Ein Vorteil des ASTER Sensors ist es, dass die Aufnahme des Stereobildes nur kurze Zeit nach der Erstellung des ersten Satellitenbildes erfolgt und so gleiche spektrale Verhältnisse (Umgebungs- und Lichtverhältnisse) für die Satellitenbildszene vorliegen (HIRANO 2003).

2.2.2 Das ASTER GDEM

Das ASTER GDEM wurde durch eine automatische Bildzuordnung von Stereobildern des ASTER-Sensors erzeugt (JACOBSEN 2010). Hierfür wurden alle bis zum Jahre 2007 gesammelten 1.264.118 Stereobilder des VNIR Sensors durch einen automatisierten Prozess stereokorreliert, um digitale Höhendaten mit einer geometrischen Auflösung von einer Bogensekunde zu generieren. Nach ABRAMS (2010) wurden folgende Techniken entwickelt, um die Datenqualität zu steigern:

- Ein Algorithmus zur Identifizierung von mit Wolken kontaminierten Pixeln, der alle ASTER Spektralkanäle nutzte.
- Für jeden Pixel wurden alle als realistisch eingestuftes Höhenwerte summiert und ein Mittelwert gebildet.
- Als unrealistisch eingestufte Werte wurden entfernt.
- Pixel mit lediglich einem oder zwei Höhenwerten wurden durch externe Geländehöhen (z.B. SRTM) oder durch den VOID Wert ersetzt, sofern keine Möglichkeit zur Implementierung von externen Geländehöhen bestand.

- Höhenanomalien sollten automatisiert erkannt und ebenfalls durch Werte eines externen Geländemodells ersetzt werden. Für alle anderen Anomalien, für die es keine Möglichkeit gab einen realistischen Wert zuzuweisen, wurde der Wert -9999 eingetragen.
- Den Ozeanflächen wurde ein Höhenwert von 0 zugewiesen.

Die technischen Kenndaten des ASTER GDEM sind der Tab. 2-2 zu entnehmen. Den ASTER GDEM Szenen ist eine mitgelieferte *NUM-Datei* beigelegt, die die Anzahl der zur Höhenwernerstellung verwendeten Stereobildpaare (*Bildstapel*) enthält.

Tab. 2-2: ASTER GDEM Kenndaten (aus ASTER 2009).

Tile Size	3601 x 3601 (1°-by-1°)
Posting interval	1 arc-second
Geographic coordinates	Geographic latitude and longitude
DEM output format	GeoTIFF, signed 16 bits, and 1m/DN Referenced to the WGS84/EGM96 geoid
Special DN values	-9999 for void pixels, and 0 for sea water body
Coverage	North 83° to south 83°, 22,600 tiles for Version 1

2.2.3 Technisch bedingte Schwächen des ASTER GDEM

Wie bereits in der Einleitung erwähnt wurde schon vor Veröffentlichung des ASTER GDEM *Version 1* eine Vielzahl von Problemen bezüglich der Qualität der Höhendaten erkannt. Aus diesem Grund wurde das ASTER GDEM vom Herausgeber METI und NASA als Testversion veröffentlicht (ASTER GDEM VT 2009).

Vom ASTER GDEM VT (2009) wurden folgende Probleme festgestellt:

- Wie bei den meisten optischen Sensoren setzt die Messung in bewaldeten Gebieten im Bereich des Kronendaches der Bäume an, was zu einer Überhöhung des Geländes um den Wert der Distanz des Kronendaches zum Boden führt.
- Das ASTER GDEM verfügt über keine Inland-Wassermaske. Dementsprechend werden Höhenwerte für Seen und Flüsse automatisiert berechnet, was zu fehlerhaften Höhenwerten führt.
- Die Genauigkeit nimmt mit der Höhe des Reliefs ab.
- Umso niedriger die Anzahl der Bildstapel, desto unpräziser die Geländehöhendaten.

Bedingt durch die verwendeten Algorithmen zur automatisierten Stereokorrelation enthält das ASTER GDEM spezifische Anomalien und Artefakte. Diese haben eine direkte Auswirkung auf die Qualität der Höhendaten und somit auf die effektive Nutzbarkeit des GDEMs für verschiedene Anforderungen (ASTER GDEM VT 2009).

Zu den Anomalien, die im Folgenden ausführlicher erläutert werden, zählen:

- Verbleibende Wolkenanomalien
- Irreguläre Bildstapelgrenzen
- Artefakte: *Pits, Bumps, Mole Runs*

Verbleibende Wolkenanomalien (engl. *residual cloud anomalies*)

Für manche Bereiche der Erdoberfläche konnten trotz langjähriger Aufnahme keine wolkenfreien Szenen erstellt werden. Hiervon betroffen sind vor allem die Bereiche der Tropen sowie die der höchsten nördlichen und südlichen Breiten. Zudem konnten nicht alle Wolkenanomalien aus den Satellitenbildszenen erkannt und durch externe Geländehöhen (wie z.B. SRTM) ersetzt werden (ASTER GDEM VT 2009). Ein Beispiel für die *verbleibende Wolkenanomalie* ist Abb. 2-2 dargestellt. Diese Anomalie bewirkt eine gravierende Abweichung der Geländehöhe.

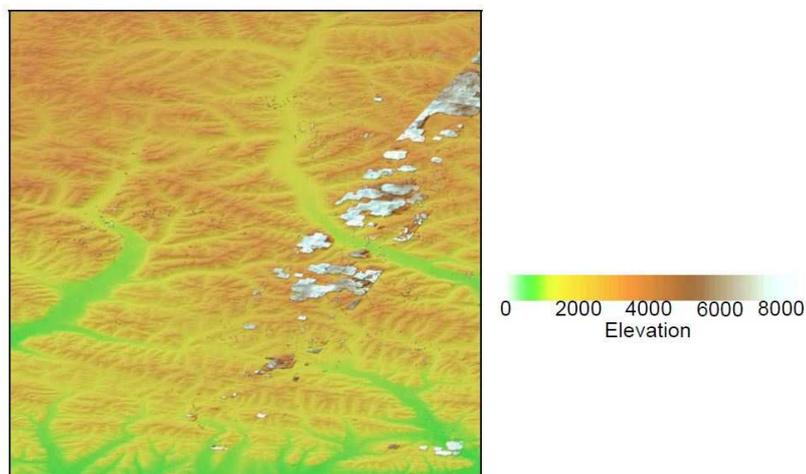


Abb. 2-2: *Verbleibende Wolkenanomalien* über schattierten Relief (aus ASTER GDEM VT 2009).

Stufen an Szenengrenzen (engl. *steps at scene boundaries*)

An den linearen Grenzen der einzelnen Szenen (Szenegrenzen) treten gelegentlich *Stufenanomalien* (engl. *step anomalies*) auf. An diesen Grenzen kommt es zu einer abrupten Höhendifferenz zwischen den angelagerten Szenen. Hierbei ist eine Höhendifferenz um ca. 10 m typisch (vgl. Abb. 2-3) (ASTER GDEM VT 2009).

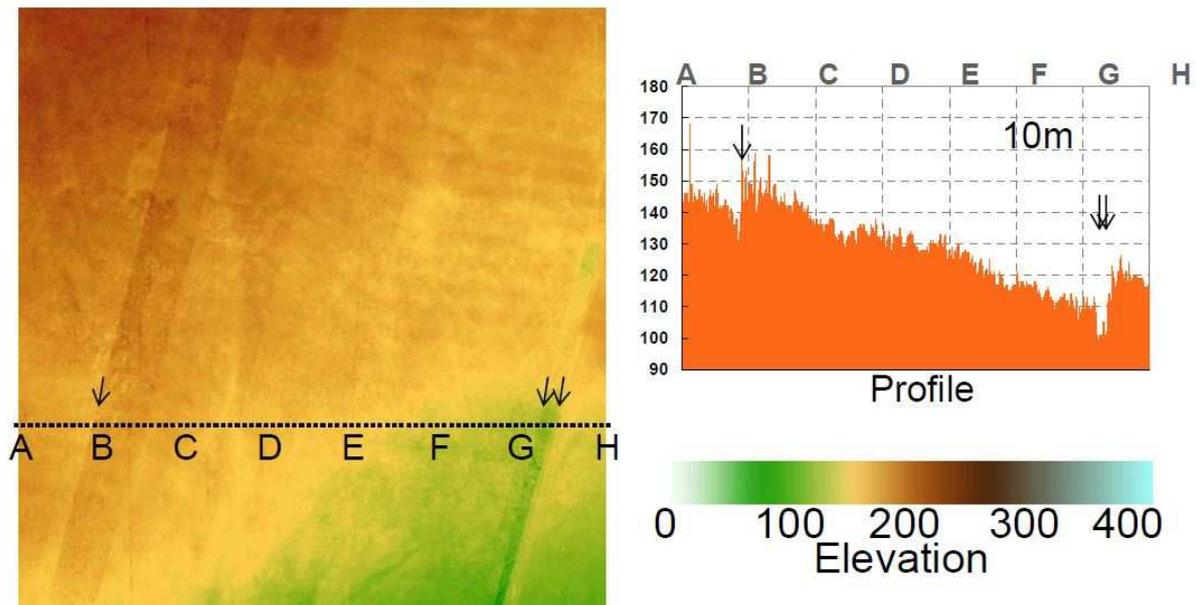


Abb. 2-3: Beispiel einer *Stufenanomalie* (aus ASTER GDEM VT 2009).

Irreguläre Bildstapelgrenzen (engl. *irregular stack number boundaries*)

Die Bildstapel geben die Anzahl der für die Höhenwertermittlung jedes Pixels verwendeten Stereobildpaare an. Die Bildstapel bilden zumeist kurvenförmige Grenzen gleichen Wertes.

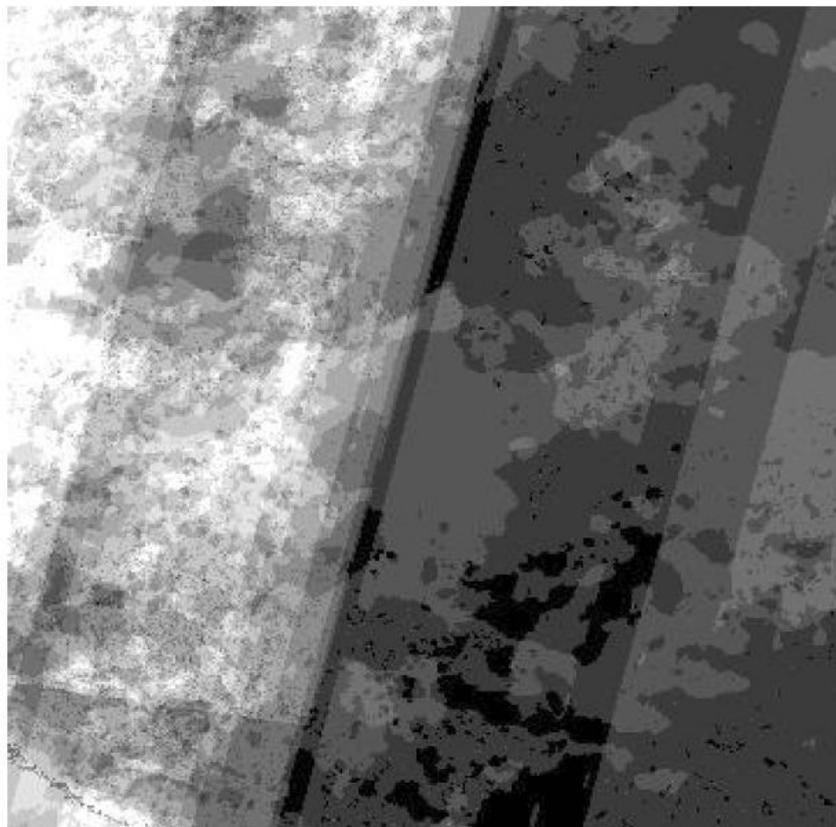


Abb. 2-4: Beispiel der linearen Szenegrenzen mit kurvenförmigen Bildstapelgrenzen (aus ASTER GDEM VT 2009).

Dies zeigt sich auf Abb. 2-4. Hier repräsentiert jeder Grauton eine unterschiedliche Bildstapelgrenze. Die Bildstapelgrenzen sind der Grund für unerwünschte Anomalien. Diese, als Artefakte beschriebenen Anomalien, können die Form der Bildstapelgrenzen annehmen, da der Höhenwert des Bildstapels im Vergleich zu denen seines Umfeldes starken Wertschwankungen unterliegen kann. Artefakte unterscheidet man in *Pits*, *Bumps* und *Mole Runs* (ASTER GDEM VT 2009).

Pits

Ein Bildstapel, der durch negative Höhenwerte von seinem Umfeld abweicht, kann im Bereich der Bildstapelgrenzen einen s.g. *Pit* erzeugen. Dieser *Pit* kann morphologisch als eine Grube oder Senke beschrieben werden (vgl. Abb. 2-5). *Pits* treten regelmäßig und in hoher Anzahl in nahezu allen ASTER GDEM Szenen auf. Der Höhenfehler im Bereich der Anomalie kann zwischen wenigen Metern bis über 100 m schwanken (ASTER GDEM VT 2009).

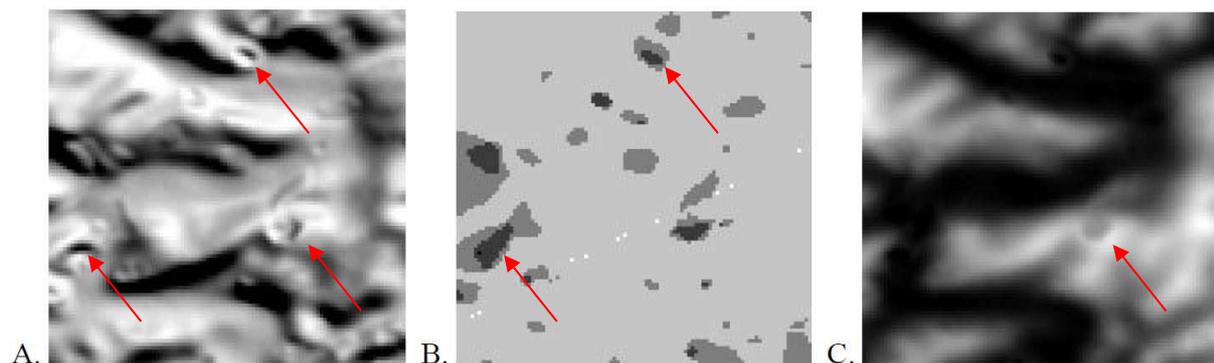


Abb. 2-5: Beispiel des *Pit*-Artefakts (aus ASTER GDEM VT 2009).
 (A) Schattierte Reliefdarstellung;
 (B) Verlauf der Bildstapelgrenzen.
 (C) ASTER GDEM Bilddarstellung.

Bumps

Bumps sind das Gegenstück zu den *Pits* und werden ebenfalls durch Werteunterschiede der aneinanderlagernden Bildstapelgrenzen erzeugt (Abb. 2-6). *Bumps* können in ihrer Form als kleine hügelige Strukturen beschrieben werden. Demnach sind sie höher gelegen als ihr Umfeld und erzeugen so ein eine lokale Ausbeulung des Reliefs, deren grÖÙe der Bildstapelgrenze entspricht. Sie treten mit einer hohen Frequenz in nahezu jeder ASTER GDEM Szene auf. Die *Bumps* kommen vorwiegend in zentralen Absenkungen vor und können eine Erhöhung des Geländes von einigen Metern bis über 100 Meter bewirken (ASTER GDEM VT 2009).

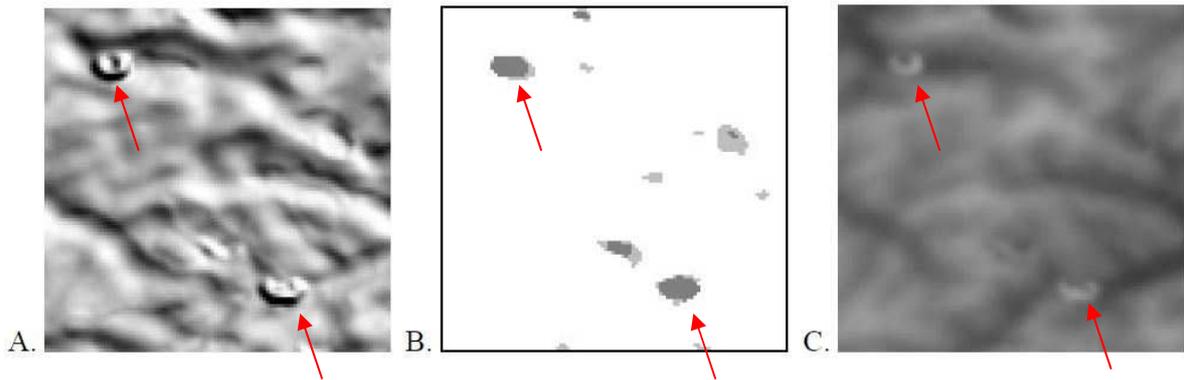


Abb. 2-6: Beispiel des *Bump*-Artefakts (aus ASTER GDEM VT 2009)
 (A) Schattierte Reliefdarstellung;
 (B) Verlauf der Bildstapelgrenzen.
 (C) ASTER GDEM Bilddarstellung.

Mole-Runs

Mole-Runs sind kurvenförmige Artefakte, die die Form der Bildstapelgrenzen annehmen (vgl. Abb. 2-7). Im Gegensatz zu den *Pits* und *Bumps* treten *Mole-Runs* nicht so häufig auf. Zudem liegt der Grad der Erhöhung im Bereich zwischen wenigen, bis selten über 10 m und beschränkt sich vorwiegend auf flaches Terrain. (ASTER GDEM VT 2009).

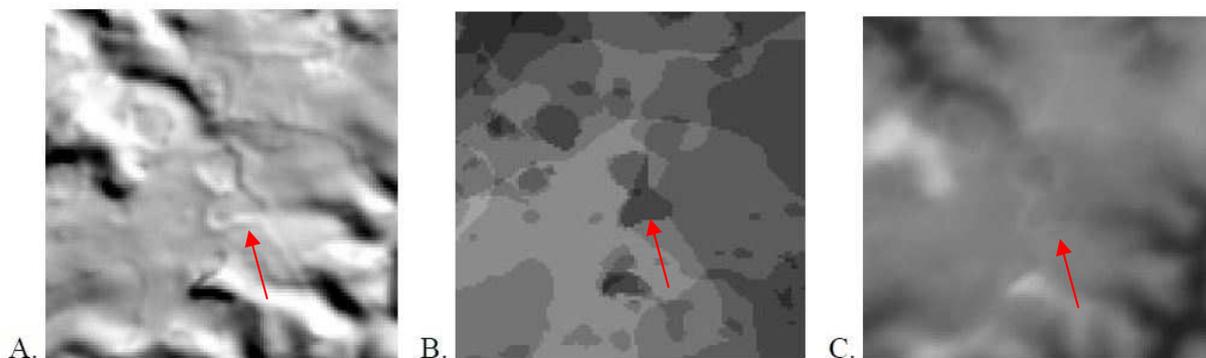


Abb. 2-7: Beispiel des *Mole-Run*-Artefakts (aus ASTER GDEM VT 2009)
 (A) Schattierte Reliefdarstellung;
 (B) Verlauf der Bildstapelgrenzen.
 (C) ASTER GDEM Bilddarstellung.

2.2.4 Die Höhengenaugigkeit des ASTER GDEM in Abhängigkeit von Bildstapeln

Nach den Erkenntnissen von JACOBSEN (2010) und dem ASTER GDEM VT (2009) soll mit zunehmender Bildstapelzahl die Höhengenaugigkeit des ASTER GDEM zunehmen. Die Ergebnisse von JACOBSEN (2010) zur Analyse des Höhenfehlers in Abhängigkeit zur Anzahl der Bildstapel sind auf dem Diagramm in Abb. 2-8 abgebildet. Die Ergebnisse des

ASTER GDEM VT (2009) sind der Tab. 2-3 zu entnehmen. Beide Analysen zeigen eine deutliche Verbesserung der Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit der Bildstapel.

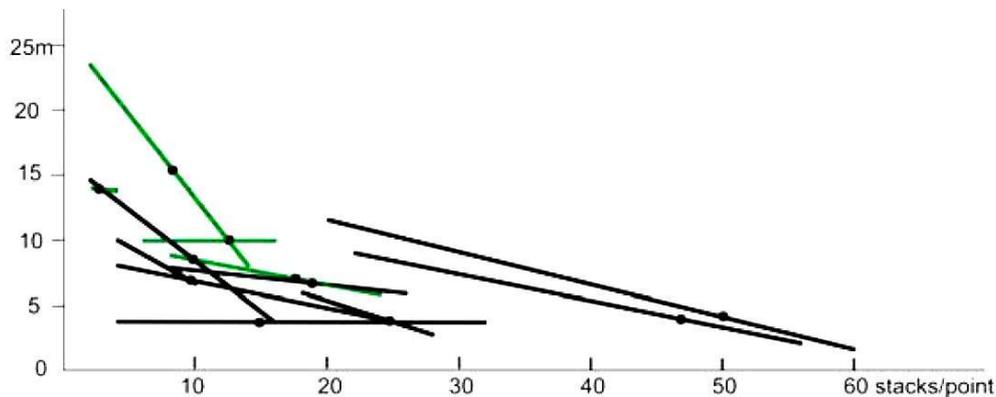


Abb. 2-8: Des Höhenfehlers des ASTER GDEM als Funktion der Anzahl der Bildstapel (grün = Einfluss von Wald; Punkt = durchschnittliche Anzahl der Bilder/Punkt) (aus JACOBSEN 2010).

Tab. 2-3: RMSE des ASTER GDEM in Abhängigkeit mit der Anzahl der Bildstapel (nach ASTER GDEM VT 2009).

	RMSE						
	ALL	Exclude fills	NUM 0 to 4	NUM 5 to 8	NUM 9 to 15	NUM 16 to 30	NUM > 30
GDEM minus NED by NUM	10.80	10.78	16.88	10.83	10.07	9.85	9.27
GDEM minus SRTM1 by NUM	9.72	9.73	12.02	9.97	9.47	9.38	9.06

Die Ergebnisse des ASTER GDEM VT (2009) zeigen zudem eine deutliche Verbesserung der Höhengenaugigkeit ab einer Bildstapelanzahl von über vier Bildstapeln (vgl. Tab. 2-3). An dieser Stelle sollte darüber hinaus erwähnt werden, dass die globale Datenbasis des ASTER GDEM einen hohen Anteil an Pixeln unter einer Bildstapelanzahl von weniger als vier aufweist (ASTER GDEM VT 2009).

2.3 Die Geländemodellerstellung durch Radarinterferometrie (InSAR)

Im Vergleich zu dem vorherigen ASTER System, welches ein passives Aufnahmesystem der elektromagnetischen Strahlung der Erde ist, handelt es sich bei der Radartechnik um ein aktives Fernerkundungssystem. Demnach wird die verwendete elektromagnetische Strahlung vom Aufnahmesystem selbst erzeugt. Hierbei handelt es sich um Mikrowellenstrahlung einer

bestimmten Frequenz. Aus diesem Grund ist die Datenaufnahme unabhängig von den naturgegebenen Strahlungsverhältnissen. Zudem ist die Radartechnik wetterunabhängig, da die erzeugten Mikrowellen Wolken, Dunst und Rauch durchdringen (ALBERTZ 2007:56).

Das Abbildungssystem der Radarinterferometrie basiert auf der Analyse der Phasen des Radarsignals, welches von zwei unterschiedlich positionierten Antennen empfangen wird. Wie in Abb. 2-9 veranschaulicht, kehrt das Radarsignal von Punkt P der Erdoberfläche über die Distanzen r_1 und r_2 zu den Antennen A_1 und A_2 zurück. Die Differenzen der registrierten Weglängen r_1 und r_2 ergeben die Phaseninformationen. Ist die Geometrie der *interferometrischen Basislinie* B bekannt, kann somit die Höhe des Punkte P berechnet werden (LILLESAND 2008:678).

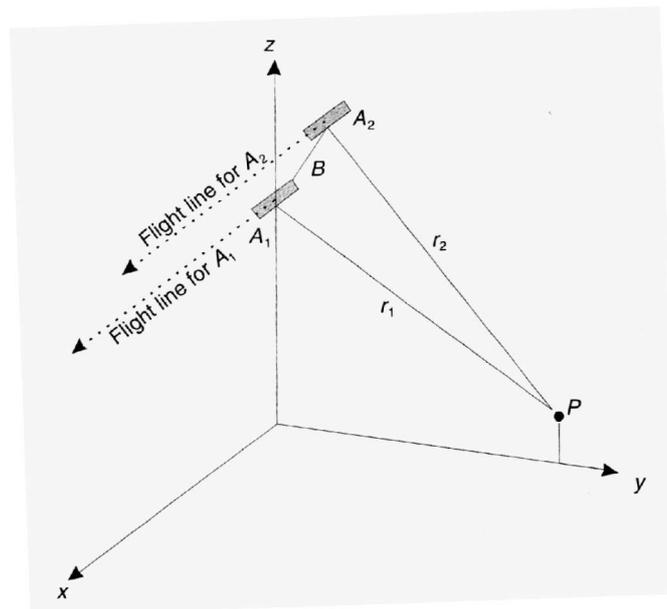


Abb. 2-9: Interferometrische-Radar Geometrie (LILLESAND 2008:679).

Es gibt mehrere Möglichkeiten interferometrische Radardaten zu gewinnen. Die bewährteste Methode ist die *Single-Pass Interferometrie*, bei der das Gebiet lediglich ein Mal überflogen werden muss. Hierbei sind beide Antennen auf einem einzigen Fluggerät oder Satellit montiert. Hierbei fungiert A_1 als Sender und Empfänger, während A_2 lediglich als Empfänger des von A_1 ausgesendeten Signals dient (LILLESAND 2008: 679).

2.3.1 Die SRTM Mission

Im Zeitraum vom 11. bis 22. Februar 2000 haben an Bord des Spaceshuttle Endeavour zwei simultan arbeitende Radarantennen im C- und X-Band die komplette Landmasse zwischen 60°N und 57°S aufgenommen. Die Konfiguration des INSAR SRTM ist der Abb. 2-10 zu

entnehmen. Diese, durch das Interferometrische Synthetische Apertur Radar (InSAR) erfassten Daten, wurden von der *NASA-JPL* und dem *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) ausgewertet, um ein globales digitales Höhenmodell (DHM) mit drei Bogensekunden (C-Band) bzw. einer Bogensekunde (X-Band) Auflösung zu erstellen.

Die Ansprüche des SRTM C-Band DHM sind mit ± 16 m absolut und ± 6 m vertikaler Genauigkeit festgelegt. Diese Präzision soll für 90% der Daten gültig sein (RABUS 2003; LILLESAND 2008: 705f).

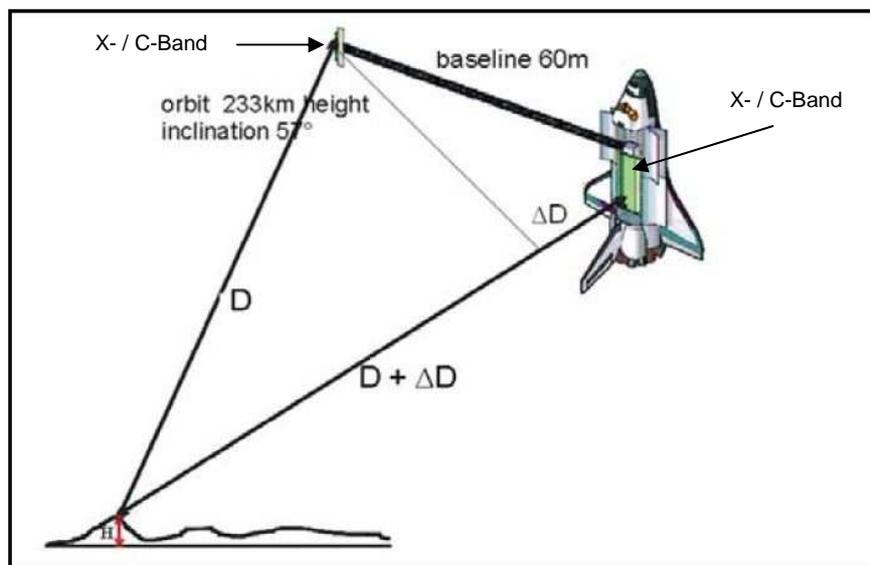


Abb. 2-10: Konfiguration INSAR SRTM (nach PASSINI 2007 leicht abgeändert).

Die Aufnahme der Höhendaten während der Mission erfolgte in beiden Bändern mit einer Auflösung von einer Bogensekunde. Die SRTM C-Band Daten wurden für das Gebiet außerhalb der USA mit dem Verfahren *Kubische Konvolution* auf die gröbere Auflösung von drei Bogensekunden *resampled* (USGS 2011). Die X-Band Daten sind nur in bestimmten Gebieten und gegen Entgelt verfügbar. In dieser Arbeit werden lediglich die C-Band Daten analysiert. Aus diesem Grunde werden im Folgenden nur noch die C-Band Daten beschrieben.

2.3.2 SRTM CIGAR CSI Version 4

Die offizielle Version des SRTM Geländemodells wird von der *NASA* bzw. dem *U.S. Geological Survey* vertrieben. Diese Version enthält Datenlücken (engl. *no-data holes*). In diesen Bereichen war, bedingt durch das Vorkommen von Wasser(-flächen) oder dem

Radarschatten, keine Bestimmung der Geländehöhe möglich. Diese Bereiche verringern die Nutzbarkeit des Geländemodells, besonders für hydrologische Modellierungen (LING 2009).

Das *Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)* hat diese Datenlücken mit eigenen Interpolationsverfahren ergänzt. Nach eigener Aussage handelt es sich bei dieser Version nun um die SRTM-Daten mit der höchsten verfügbaren Qualität (CGIAR 2010). In den Arbeiten von HIRT (2010) wird ebenfalls auf die gute Qualität der Daten hingewiesen, weshalb für diese Arbeit ebenfalls die CGIAR-CSI SRTM Daten genutzt wurden.

2.3.4 Technisch bedingte Schwächen der Radartechnik

Radaraufnahmen haben besonders in steilen Gebieten Genauigkeitsprobleme durch Überlagerungen (engl. *layover*) und den Radarschatten (JACOBSEN 2004). Eine Überlagerung entsteht, wenn der Depressionswinkel (vgl. Abb. 2-11) größer ist als die Hangneigung. Ein Beispiel für den Radarschatten ist auf Abb. 2-11 dargestellt. An diesem Beispiel zeigt sich, dass Punkt 11 bedingt durch den Winkel der Aufnahme nicht erfasst werden kann.

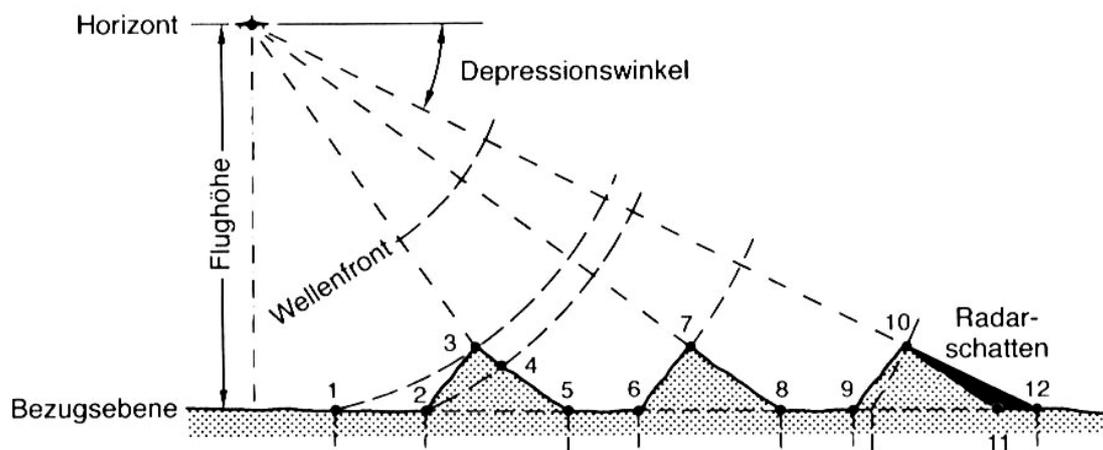


Abb. 2-11: Die Geometrie von Radarbildern in gebirgigem Gelände. Punkt 11 wird wegen des Radarschattens nicht abgebildet (aus ALBERTZ 2007:78).

Die elektrischen Eigenschaften der Materialien an der Erdoberfläche haben einen großen Einfluss auf das Reflexionsvermögen der Mikrowellen. So weisen z.B. metallische Strukturen eine besonders starke Reflexion auf. Ebenfalls wird die Radarstrahlung stark von Materialien mit einer hohen *Dielektrizitätskonstanten (Permittivität)* reflektiert. Dies ist zum Beispiel bei feuchten Böden oder nasser Vegetation der Fall. Mit abnehmender *Dielektrizitätskonstante* verringert sich das Reflexionsvermögen des Materials und erhöht somit die Eindringtiefe des

Radarstrahls. Das Reflexionssignal ist dementsprechend von der Oberflächenschicht abhängig (ALBERTZ 2007:61).

Boden

Die Oberflächenrauigkeit hat einen großen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften. Ist die Oberflächenrauigkeit im Vergleich zur Wellenlänge der Strahlung gering, werden die Mikrowellen gespiegelt. Zum System gelangt in dem Fall kein Signal zurück. An rauen Flächen kann es wiederum zu einer Streuung (*diffuse Reflexion*) der Radarstrahlung kommen (vgl. Abb. 2-12). In diesem Fall gelangt nur ein geringer Teil des Ausgangssignals zum Empfänger zurück (ALBERTZ 2007:60).

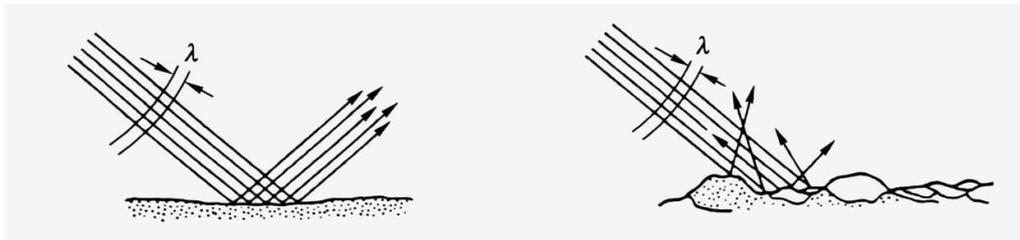


Abb. 2-12: Reflexion von Radarstrahlen (λ) an Oberflächen verschiedener Rauigkeiten.
Links: Spiegelnde Fläche an einer zur Wellenlänge glatten Fläche (z.B. Sand)
Rechts: Diffuse Reflexion an einer rauen Fläche (z.B. Felsbrocken)
(aus ALBERTZ 2007:60).

Wie bereits erwähnt können feuchte Böden und generell Oberflächenfeuchtigkeit für eine besonders starke Reflexion der Radarstrahlung sorgen. Andererseits kann bei trockenen Böden die elektrische Leitfähigkeit um das bis zu 10-Fache verringert sein. Dies bezweckt, dass die Radarstrahlung, in Abhängigkeit der Wellenlänge den Boden (z.B. Alluvium) durchdringen kann und in einigen Fällen sogar die Untergrundgeologie dargestellt wird (vgl. Abb. 2-12; LILLESAND 2008: 667).

Vegetation

Besonders in Gebieten mit dichter Vegetation kann es zur s.g. *Volumenstreuung* des Radarsignals kommen. Wie auf Abb. 2-13 zu erkennen ist, können die Radarstrahlen in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge die Vegetation durchdringen. Hierbei gilt, je größer die Wellenlänge der Strahlung ist, desto tiefer dringt diese in die Vegetation ein und desto größer die Abhängigkeit des Reflexionssignals von der Volumenstreuung (Abb. 2-13; ALBERTZ 2007: 61). Die Radarstrahlen werden demnach von der Vegetationsbedeckung gestreut. Die Streuung ist abhängig von der Dichte der Vegetation und deren Wassergehalt. Umso dichter und feuchter die Vegetation, desto höher die Streuung (LILLESAND 2008: 667ff).

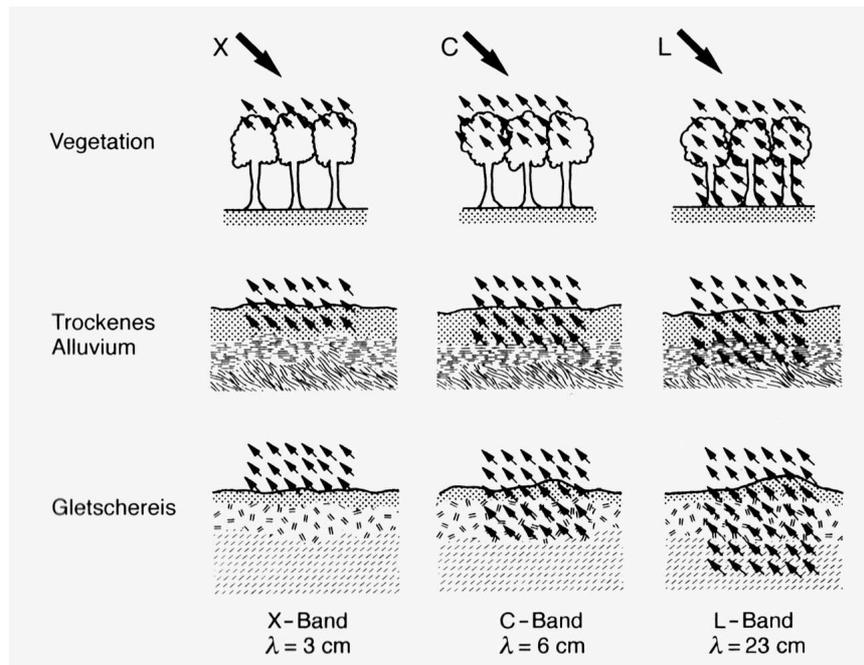


Abb. 2-13: Schematische Darstellung der Eindringtiefen von Radarstrahlen für das X-, C- und L-Band (aus ALBERTZ 2007:61).

Wasser- und Eis

Bedingt durch eine fehlende Rauigkeit und die dadurch auftretende Spiegelung der Strahlen, reflektieren ebene Wasserflächen kein bzw. kaum ein Radarsignal. Raue Wasserflächen können zu einer Streuung des Radarsignals in unterschiedlicher Intensität führen (LILLESAND 2008: 674).

Wie auf Abb. 2-11 abgebildet ist, können bestimmte Wellenlängen sogar in Eis eindringen. Auch hier gilt, je größer die Wellenlänge, desto höher die Eindringtiefe. Eine Besonderheit des X- und C-Bandes, welches bei der SRTM Mission verwendet wurde, ist die Bestimmung von verschiedenen Eis-Typen sowie der Eisdicke (LILLESAND 2008: 674ff).

Siedlungsflächen

Vorwiegend in Siedlungsflächen kommt es in Kantenbereichen zu starker Radar-Rückstrahlung. Diese, als *cardinal effect* bezeichneten Rückstrahleffekte treten auf, wenn benachbarte horizontale und vertikale Flächen zum Sensor hin orientiert sind und die Radarstrahlung spiegelnd reflektieren (ALBERTZ 2007: 61, LILLESAND 2008: 676ff).

3. Der Vergleich des ASTER GDEM mit dem SRTM (State of the Art)

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand des Vergleichs zwischen dem ASTER GDEM und dem SRTM. Alle Veröffentlichungen werden thematisch geordnet und miteinander verglichen.

Das ASTER GDEM VT (2009) fertigte in dessen *ASTER GDEM Validation Summary Report* eine Vielzahl an statistischen Auswertungen zur Genauigkeit des ASTER GDEM und SRTM im Vergleich mit lokalen Referenzgeländemodellen an. Zudem wurde die Höhengenaugkeit beider Geländemodelle für unterschiedliche Landbedeckungsklassen in den USA verglichen. Des Weiteren wurde eine Abhängigkeit der Genauigkeit in Verbindung mit den verwendeten Bildstapeln und dem Höhengradienten aufgezeigt. Bei diesem Report handelt es sich um einen sehr umfangreichen Validierungsarbeit zum ASTER GDEM, der jedoch auch auf Kritik stößt. Für JACOBSEN (2010) findet die Höhengenaugkeit in Abhängigkeit der verwendeten Bildstapel, die morphologischen Details sowie die Abhängigkeit der Höhengenaugkeit von der Geländeneigung zu wenig Beachtung. Darüber hinaus wird der direkte Vergleich des ASTER GDEM mit dem SRTM nur unzureichend diskutiert (JACOBSEN 2010).

Weitere Veröffentlichungen mit einem Fokus auf die Höhengenaugkeit der Geländemodelle gibt es für Australien von HIRT (2010) und HSING-CHUNG CHANG (2010) sowie für verschiedene Untersuchungsgebiete in Europa und Nordamerika von JACOBSEN (2010). Mit besonderem Blick auf geomorphometrische Analysen wurden beide Modelle in Japan von HAYAKAWA (2008) untersucht.

3.1 Statistische Analyse der Höhenabweichung

Bei der statistischen Analyse der Höhenabweichung wurden die beiden Geländemodelle mit Referenzhöhendaten aus Referenzgeländemodellen oder Bodenkontrollpunkten abgeglichen. Hierbei handelt es sich um Analysen, die sich auf die durchschnittliche statistische Genauigkeit der Geländemodelle für das Gesamte Untersuchungsgebiet der jeweiligen Veröffentlichung beziehen.

Die Ergebnisse der Analysen zur Auswertung Höhengenaugkeit des ASTER GDEM VT (2009), HIRT (2010), HSING-CHUNG CHANG (2010) und JACOBSEN (2010) sind auf Tab. 3-1 angegeben. Die Wurzel des quadratischen Mittelwertes (RMSE) (siehe Kapitel 5.2.1)

kann als Indikator für die durchschnittliche Genauigkeit eines Geländemodells herangezogen werden. Beim Vergleich des RMSE zeigt sich eine klare Tendenz zu einer höheren Genauigkeit des SRTM in allen genannten Forschungsarbeiten. Der RMSE-Wert des

Tab. 3-1: Ergebnisse der Untersuchungen von HIRT (2010), HSING-CHUNG CHANG (2010) und JACOBSEN (2010) für das ASTER GDEM und SRTM in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung; Höhe = Höhenbereich der Testgebiete)

	ASTER GDEM			SRTM			Höhe	Genauigkeit Referenz
	ME	RMSE	SD	ME	RMSE	SD		
ASTER GDEM VT (2009) ¹	-3,64	10,87	8,75	1,87	7,10	6,18	n.V.	2-1
HSING-CHUNG CHANG (2010)	-4,7	6,5	4,5	1,7	3,0	2,4	0 - 500	>1m
HIRT (2010)	-9,1	15,7	12,8	5,2	6,1	3,2	0 - 2228	>1m
JACOBSEN (2010)	±6,13 ²	8,17	10,21	3,12 ²	6,62	5,61	n.V.	n.V.

¹Werte für 11 billionen Pixel im Bereich der USA (*ALL CONOUS*).

²Keine Angabe zum Vorzeichen

SRTM ist in den Untersuchungen von HIRT (2010) und HSING-CHUNG CHANG (2010) weniger als halb so groß als der des ASTER GDEM. In den Untersuchungen vom ASTER GDEM VT (2009) und JACOBSEN (2010) fallen die Unterschiede des RMSE geringer aus, wobei auch bei ihnen das SRTM genauer ist.

Das ASTER GDEM VT (2009) analysierte die Höhengenaugkeit der Geländemodelle für das Gebiet der USA durch den Abgleich mit dem *National Elevation Dataset (NED)*. Verglichen wurden die Werte von ca. 11 billionen Pixeln (*ALL CONOUS*). In den Analysen von HIRT (2010) und HSING-CHUNG CHANG (2010) wurde die Höhengenaugkeit des ASTER GDEM und SRTM für Australien überprüft. HIRT (2010) verwendete hierfür insgesamt 6.392 Bodenkontrollpunkte mit einer Höhengenaugkeit von unter einem Meter, die sich repräsentativ über ganz Australien verteilten und alle Höhengradienten Australiens erfassten (0 – 2228 m). Nach HIRTH (2010) sind die höheren Abweichungen des ASTER GDEM größtenteils auf den *Stufeneffekt der Szenegrenzen* (siehe Kapitel 2.2.3) zurückzuführen, der sich regelmäßig durch alle ASTER GDEM Szenen durchzieht.

Die Veröffentlichung von HSING-CHUNG CHANG (2010) bezieht sich auf ein kleineres Untersuchungsgebiet in Australien. Als Höhenreferenz wurden bei diesen Analysen *Real-time kinematic (RTK) GPS* Daten verwendet, deren Genauigkeit im Zentimeterbereich liegen soll. Der Höhengradient des Untersuchungsgebietes lag unter 500 m.

In den Untersuchungen von JACOBSEN (2010) testete er die Höhengenaugkeit der Geländemodelle für 12 Untersuchungsgebiete und leitete die in Tab. 3-1 angegebenen Mittelwerte ab. Leider können in seinen Analysen keine charakteristischen Merkmale der Untersuchungsgebiete, wie z.B. der Höhengradient oder die durchschnittliche Genauigkeit der Referenzgeländemodelle entnommen werden. Dennoch zeigt sich in seinen Ergebnissen, wie bei HIRT (2010) und HSING-CHUNG CHANG (2010), ein leichter Genauigkeitsvorteil beim SRTM, wohingegen in seinen Analysen die Unterschiede geringer ausfallen.

Das ASTER GDEM VT (2009) hat ebenfalls eine Abnahme der Genauigkeit mit zunehmenden Höhengradienten erkannt. Auf Tab. 3-2 sind die Werte der Höhenabweichung für die *ALL CONOUS* in Abhängigkeit eines zunehmenden Höhengradienten angegeben. Bei den Analysen nach Reliefhöhe wird zudem eine Zunahme der Hangneigung angenommen. Demnach nimmt nach den Analysen des ASTER GDEM VT (2009) mit zunehmender Reliefhöhe und Hangneigung die Höhengenaugkeit des ASTER GDEM ab.

Tab. 3-2: Höhenfehler in Abhängigkeit zur Reliefhöhe. (Relief (m) = Höhengradient, Mean = Mittlerer Fehler, Std. Dev.= Standardabweichung, RMSE = Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung) (aus ASTER GDEM VT 2009).

Relief (m)	Mean	Std. Dev.	RMSE
0 – 20	-4.86	6.23	9.19
20 – 40	-4.76	6.32	8.94
40 – 200	-3.35	7.85	9.76
200 - 600	-1.12	13.58	14.76
>600	-1.95	23.32	24.27

3.2 Geomorphometrische Vergleiche des ASTER GDEM und SRTM

Die Arbeiten zur Geomorphometrie des ASTER GDEM im Vergleich zum SRTM beschränken sich auf die Analyse der Hangneigung von HAYAKAWA (2008) sowie der Erzeugung und Interpretation von Höhenlinien durch JACOBSEN (2010). Die Analysen von HAYAKAWA (2008) beinhalteten ebenfalls Genauigkeitsanalysen des ASTER GDEM und SRTM für die geomorphologischen Formen Kämme und Senken.

Die Ergebnisse der Hangneigungsuntersuchungen von HAYAKAWA (2008) zeigen, dass das ASTER GDEM vermehrt sanfte (0° - 12°) und steile ($>33^{\circ}$) Hänge aufweist. Beim SRTM treten die mittleren Hangneigungen (12° - 33°) am häufigsten auf (HAYAKAWA 2008).

Die Untersuchungen von HAYAKAWA (2008) für geomorphologische Formen zeigen, dass das SRTM Geländemodell die Geländehöhe im Bereich von Senken überschätzt. Das ASTER GDEM hingegen soll die Geländehöhe im Bereich von Kämmen unterschätzen. Die Tendenz zeigt eine größere Intensität zur Überschätzung der Geländehöhe in Senken durch das SRTM, als die Unterschätzung von Kämmen durch das ASTER GDEM. Zusammenfassend erfolgt die Darstellung des Geländes durch das ASTER GDEM für die meisten Landformelemente besser, als die des SRTM, wobei besonders die Senken und Käme vom ASTER GDEM realistischer dargestellt werden (HAYAKAWA 2008).

Die Analysen von JACOBSEN (2010) beschäftigen sich mit der visuellen Untersuchung der aus dem ASTER GDEM und SRTM erzeugten Höhenlinien. Hierzu vergleicht er den Verlauf der Höhenlinien mit denen eines Referenzgeländemodells. Im Vergleich sind beim ASTER GDEM mehr Details des Geländes zu erkennen als beim SRTM C-Band 3“ (vgl. Abb. 3-1) (JACOBSEN 2010).

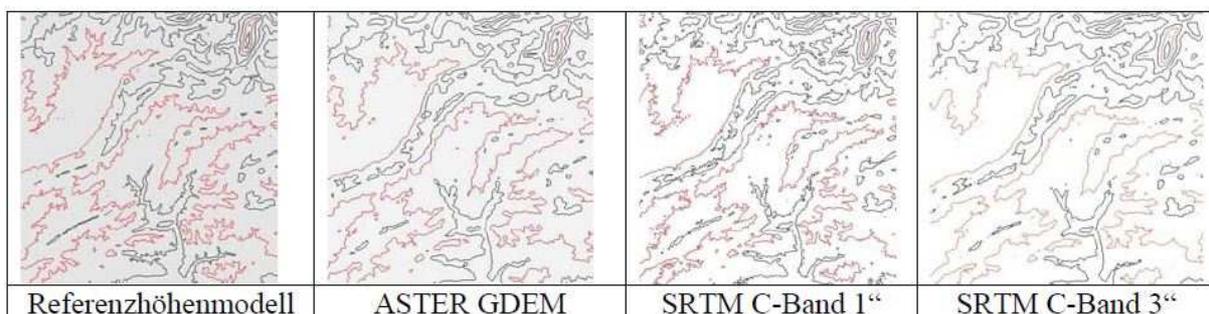


Abb. 3-1: Die aus dem ASTER GDEM und SRTM erzeugten Höhenlinien. Das Höhenintervall beträgt 1000 ft. (aus JACOBSEN 2010).

3.3 Die Höhenabweichung in Abhängigkeit von Landbedeckung

Die Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM in Abhängigkeit von der Landbedeckung wurde vom ASTER GDEM VT (2009) für vier Landbedeckungsklassen aus der *National Land Cover Data* (NLCD) in den USA ermittelt. Die Höhengenaugigkeit des ASTER GDEM und SRTM für die Landbedeckungsklassen Wasser (engl. *water*), Siedlung (engl. *urban*), Wald (engl. *forest*) und Offen (engl. *open*) sind in Tab. 3-3 dargestellt. Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, weist das SRTM mit einem RMSE von 7,10 m für alle

Berechneten Pixel (ALL CONUS) eine höhere Genauigkeit auf, als das ASTER GDEM mit einem RMSE von 10,87 m (vgl. Tab. 3-3). Hierbei ist vor allem die Abweichung des ASTER GDEM im Bereich der Wasserflächen markant. Der Grund hierfür ist das Fehlen einer Inland-Wassermaske beim ASTER GDEM (ASTER GDEM VT 2009).

Tab. 3-3: Der RMSE des ASTER GDEM und SRTM im Vergleich zu den Referenzhöhen des NED für alle Pixel (ALL CONUS) sowie für vier NLCD Landbedeckungsklassen (Wasser, Siedlung, Wald, *Offen*)(Werte in Metern)(aus ASTER GDEM VT 2009 leicht abgeändert).

RMSE						
	ALL CONUS	Water	Urban	Forest	Open	Excluding Water and Ice & Snow
GDEM minus NED by NLCD	10.87	16.53	9.06	10.93	10.33	10.46
GDEM minus SRTM3 by NLCD	10.28	9.34	9.65	10.49	10.30	10.33
SRTM3 minus NED by NLCD	7.10	3.32	5.21	10.76	5.20	7.36

Höhere Abweichungen des ASTER GDEM im Vergleich zum SRTM sind ebenfalls im Bereich der Siedlungsflächen sowie in den offenen Gebieten zu verzeichnen. Lediglich im Bereich der Waldflächen bewegen sich die Abweichungswerte mit 10,76 m RMSE für das SRTM und 10,93 m RMSE für das ASTER GDEM im ähnlichen Bereich (ASTER GDEM VT 2009). Bei der Betrachtung des Mittleren Fehlers (ME) fällt auf, dass das SRTM mit einem Wert von 6,59 m die Geländehöhe im Bereich der Waldflächen systematisch überschätzt. Beim ASTER GDEM ist diese Überschätzung mit einem ME von 1,72 m geringer ausgeprägt.

Die Untersuchungen von HSING-CHUNG CHANG (2010) beschäftigen sich ebenfalls mit der Analyse der Höhenabweichung für die Landnutzung *Buschland*. Diese kann

Tab. 3-4: Höhenabweichung der digitalen Geländehöhenmodelle im Vergleich mit RTK-GPS für Landnutzung *Buschland* (aus HSING-CHUNG CHANG 2010).

	ASTER	SRTM
RMSE (m)	12.4	9.9
mean (m)	-0.7	5.8
s.d. (m)	11.4	7.7

mit der Landnutzung *Offen* verglichen werden. Die Ergebnisse sind auf Tab. 3-4 dargestellt. Auch hier ist die Höhenabweichung des SRTM mit einem RMSE von 9,9 m geringer als der des ASTER GDEM mit 12,4 m. Vergleicht man nun die Ergebnisse von HSING-CHUNG

CHANG (2010) mit den Werten des ASTER GDEM VT (2009) von Tab. 3-3, so ist festzustellen, dass in den Analysen von HSING-CHUNG CHANG (2010) bei beiden Geländemodellen ein höherer RMSE gemessen wurde, das SRTM aber weiterhin genauer ist als das ASTER GDEM.

4. Untersuchungsgebiete

4.1 Untersuchungsgebiet 1 - Mittelberg (Österreich)

Lage des UG 1 Mittelberg

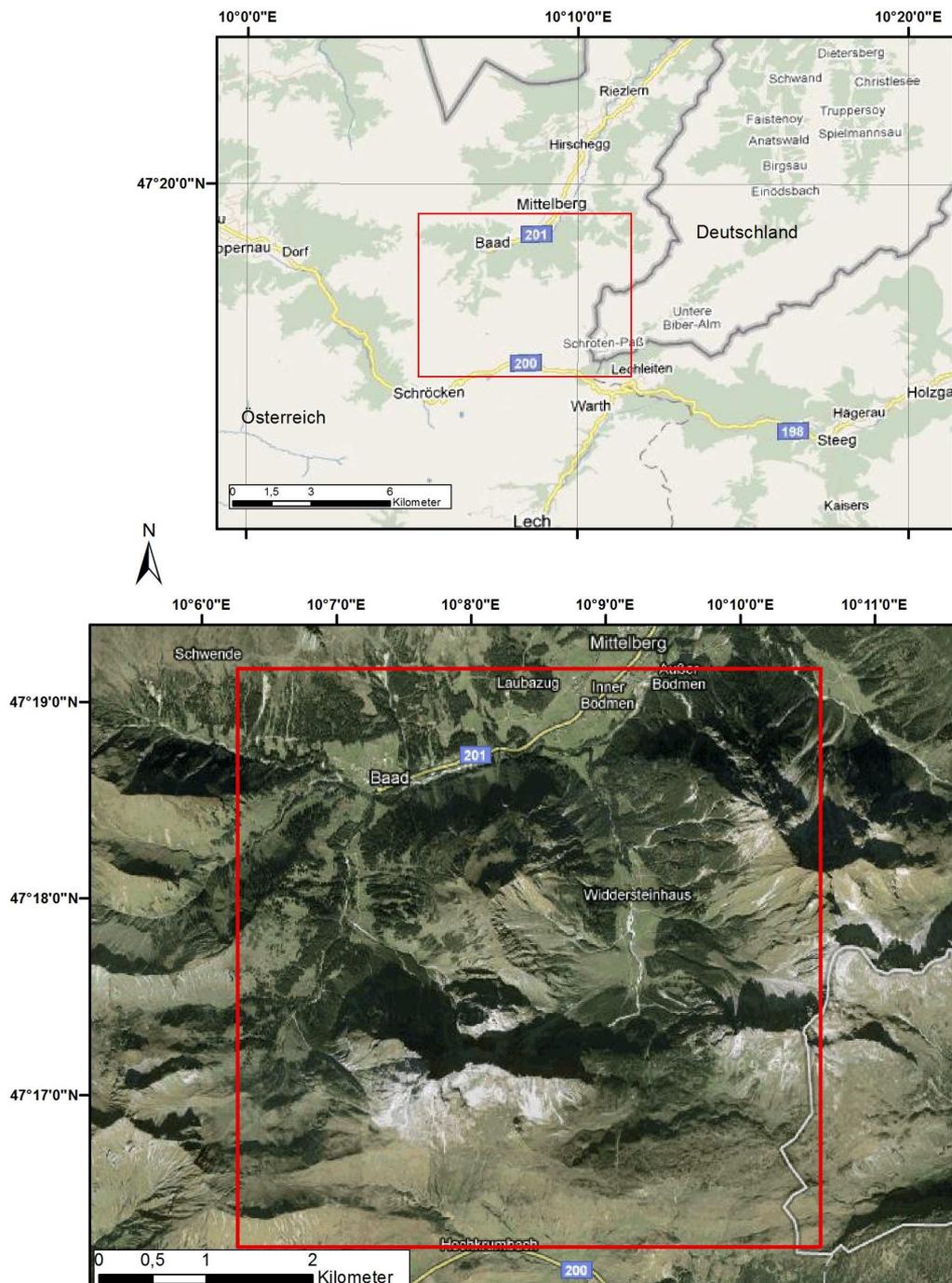


Abb. 4-1: Die Lage des UG 1 - Mittelberg. (Eigene Abbildung auf Basis von; Oben: Ausschnitt aus Google Maps, 12.03.11; Unten: Ausschnitt aus Google Earth, 12.03.11).

Das Untersuchungsgebiet 1 - Mittelberg (UG 1) befindet sich am Alpennordrand im Bereich des Vorarlbergs in Österreich an der Grenze zu Deutschland und gehört zu den südlichen Allgäuer Alpen. Die Bezeichnung Mittelberg ist auf die dort liegende Ortschaft Mittelberg (47°19' N, 10°9' O) zurückzuführen. Das Untersuchungsgebiet hat eine Gesamtfläche von ca. 29,8 km² und erstreckt sich über eine Länge von 5,46 x 5,46 km. Die höchste Erhebung ist der Widderstein mit 2533 m. Der tiefste Punkt liegt in der Bödmer Ebene mit 1160 m (vgl. Abb. 18). Die Höhendifferenz innerhalb des Untersuchungsgebietes beträgt 1373 m.

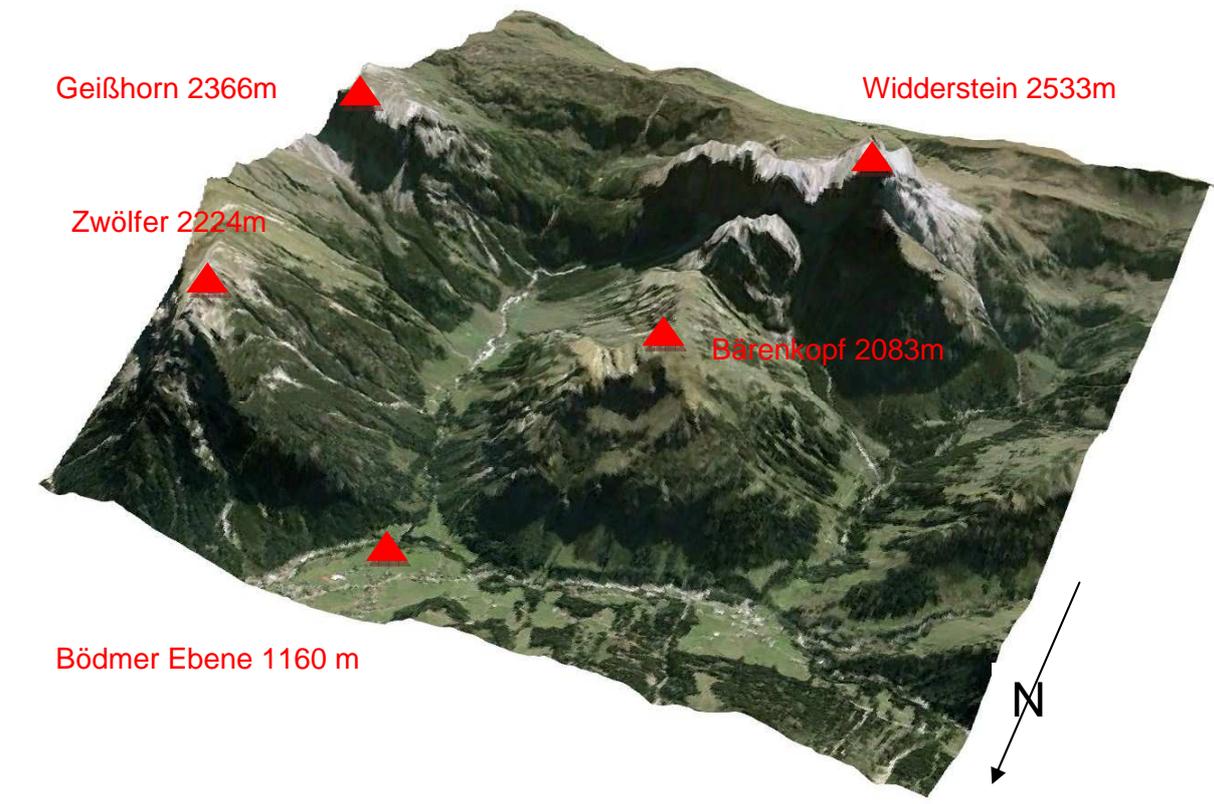


Abb. 4-2: Schrägansicht des UG 1 - Mittelberg (Eigene Abbildung auf Basis von Google Earth, 12.03.11; Geländehöhen aus LIDAR-DSM © Land Vorarlberg).

Geologisch ist das Untersuchungsgebiet in den Bereich der Kalkrandalpen bzw. des Flysch-Berglandes einzuordnen (LIEDTKE 2002:641). Der Gipfelbereich des Widdersteins zeichnet im groben den Stirnrand der Allgäudecke nach. Im Norden bestimmen Zonen der Faltenmolasse, des Flysch und des Helvetikums mit lang gezogenen Bergkämmen das Formenbild. Bedingt durch geringe Resistenz des Flyschgesteins sind die Berge der Flyschzone meist gleichmäßig geböscht und durch gerade Kammrücken verbunden (LIEDTKE 2002: 664). Das Relief des Untersuchungsgebietes wurde maßgeblich während der letzten Eiszeit geformt. Charakteristische glaziale Formen sind noch deutlich erkennbar. Hierzu zählen die großen Kare mit ihren Karschwellen im Süden des Gebiets, an die sich die

Trogtäler des Gemstel- und Bärgundtals anschließen. Das Gewässernetz setzt sich aus dem Gemstelbach und Bärgundbach zusammen, die beide in die Breitach entwässern.

4.2 Untersuchungsgebiet 2 – Südhessen (Deutschland)

Lage des UG 2 Südhessen

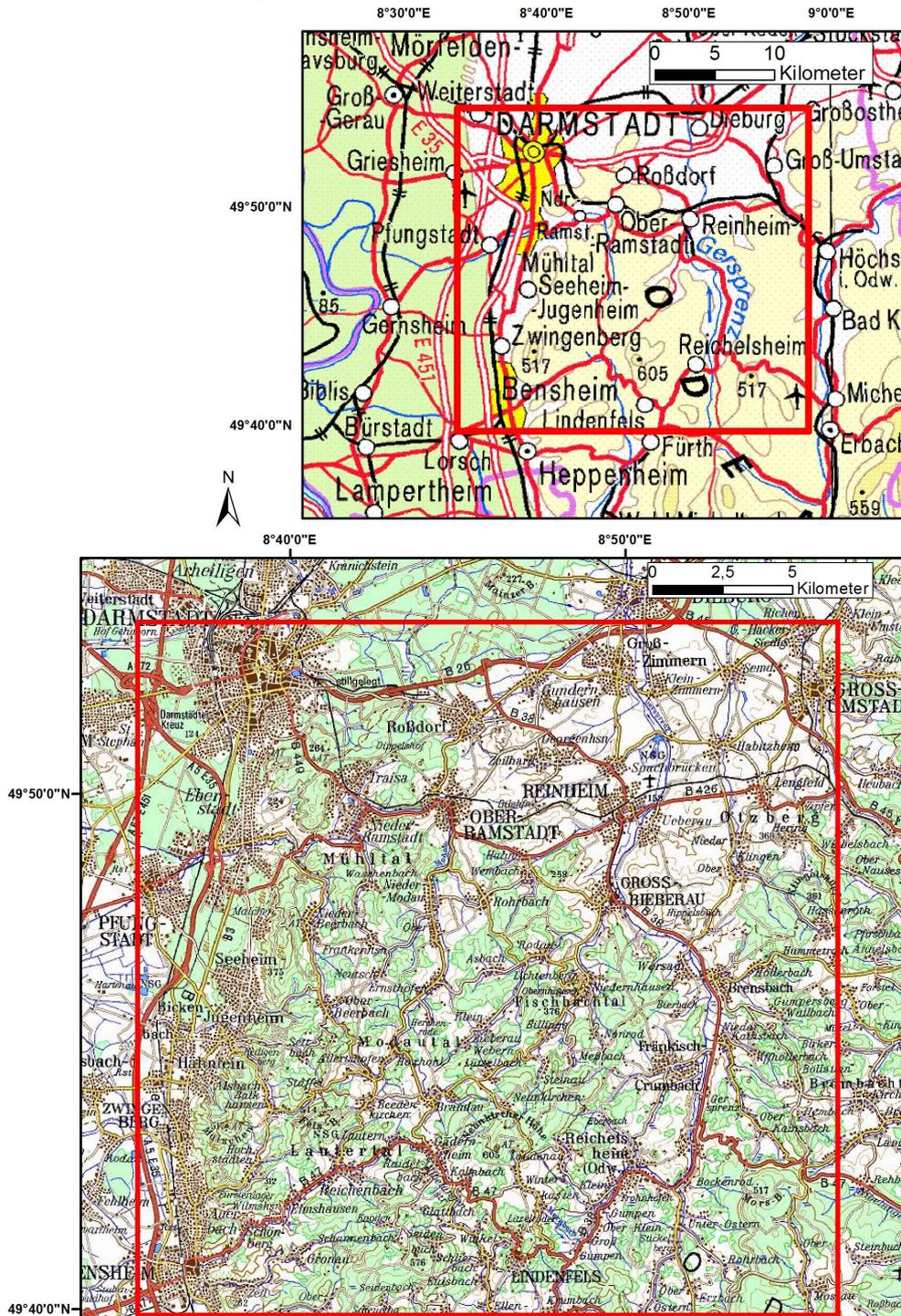


Abb. 4-3: Lage des UG 2 - Südhessen. Aus TK 100 (oben: Ausschnitt Blatt C 6318) und TK 50 (unten: Ausschnitt zusammengesetzt aus Blättern L6116, L6118, L6318, L6316).

Das Untersuchungsgebiet 2 - Südhessen (UG 2) befindet sich im Übergangsbereich des nördlichen, rechtsrheinischen Berglandes. Hier genauer im nordöstlichen Odenwald im Übergangsbereich in den Oberrheingraben mit einer Bruchstufe. Östlich der Oberrheinischen Tiefebene handelt es sich geologisch betrachtet, um eine kristalline Grundgebirgslandschaft, die in diesem Bereich vereinzelt mit Bundsandstein bedeckt sein kann. Die Oberrheinische Tiefebene besteht aus quartärer Verfüllung (Holozän und Pleistozän). Für den südwestlichen Bereich des Untersuchungsgebiets ist ein gegliedertes Rückenrelief mit anschließenden Senken charakteristisch. Zudem weist dieses Gebiet eine starke geologische und geomorphologische Differenzierung auf (LIEDTKE 2002:547f).

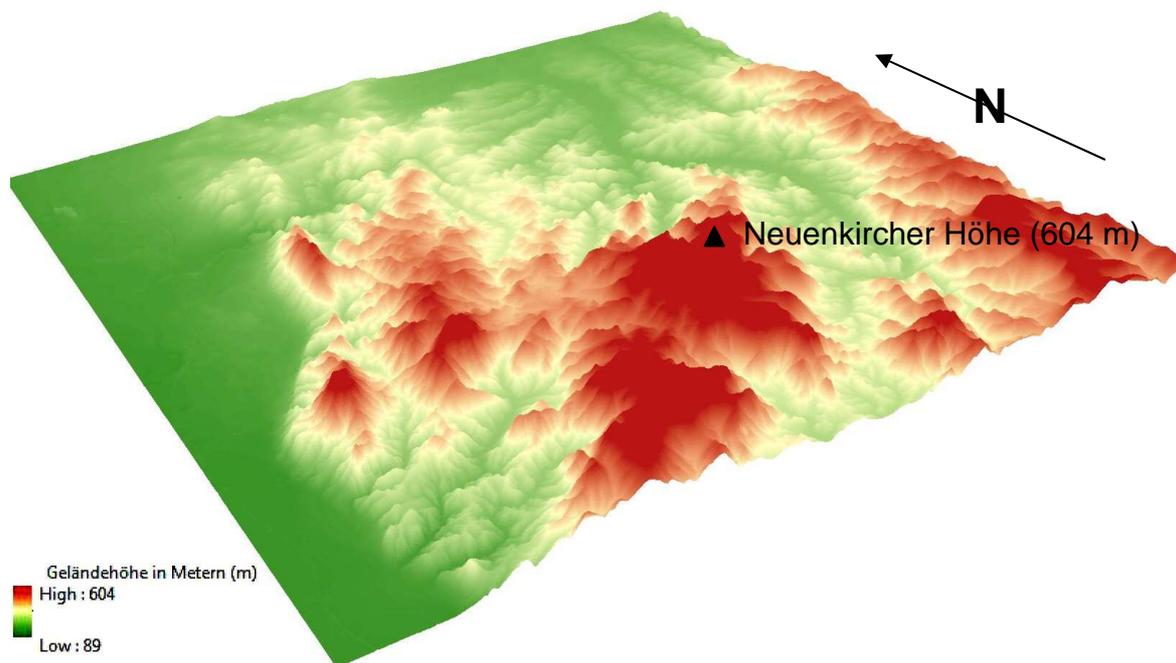


Abb. 4-4: Schrägansicht des UG 2 – Südhessen. 5-fach überhöht. (eigene Abbildung auf Basis des DGM10 Höhenmodells)

Die höchste Erhebung des Untersuchungsgebietes ist mit 604 m die Neunkircher Höhe ($49^{\circ}43'8''N$, $8^{\circ}46'13''O$). Wie auf Abb. 4-4 zu erkennen, beträgt die Höhendifferenz innerhalb des Untersuchungsgebietes 515 m. Das Untersuchungsgebiet hat eine Größe von 625 km² (25 x 25 km) und erstreckt sich entlang der GK-Koordinaten R3470615 - R349515 und H5528075 - H5503075. Wie auf Abb. 4-4 dargestellt ist, liegen die Gebiete mit stark bewegtem Gelände vorwiegend im Südwesten des Untersuchungsgebietes, während im Norden wie Nordwesten eher ruhigeres Gelände dominiert. Die potentielle Vegetation sind Eichen und Buchenwälder, wobei sich die Eichen besonders an Südhängen und in trocken-warmen Tallagen befinden (LIEDTKE 2002:210).

5. Daten und Methoden

5.1 Datengrundlage

In Tab. 5-1 sind die technischen Daten der für diese Arbeit genutzten Geländemodelle angegeben. Das ASTER GDEM sowie das SRTM wurden bereits ausführlich in Kapitel 2 beschrieben. Für das UG 1 wurde vom Landesvermessungsamt Vorarlberg ein LIDAR Geländeoberflächenmodell (DSM) mit einer geometrischen Auflösung von 1 m zur Verfügung gestellt (vgl. Tab. 5-1). Die LIDAR Daten haben eine vertikale Genauigkeit von $\pm 0,3$ m und eignen sich somit hervorragend als Referenzhöhen. Vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) wurde für das UG 2 ein amtliches DGM10 Geländemodell mit einer geometrischen Auflösung von 10 m und einer vertikalen Genauigkeit von $\pm 0,5 - 5$ m zur Verfügung gestellt (vgl. Tab. 5-1).

Tab. 5-1: Übersicht und Eigenschaften aller verwendeten Geländemodelle.

	Geometrische Auflösung	Referenzsystem	Vertikale Genauigkeit	Höhenreferenz
ASTER GDEM	1"	WGS84	± 20 m ¹	EGM96 Geoid
SRTM	3"	WGS84	± 16 m ²	EGM96 Geoid
LIDAR DSM ³	1 m	Bessel_1841_Transverse Mercator	$\pm 0,3$ m	NHN Adria
DGM10	10 m	DHDN-Transverse Mercator	$\pm 0,5 - 5$ m	NHN Amsterdam

¹ABRAMS (2010); ASTER GDEM VT (2009)

²HAYAKAWA (2008); RABUS (2003)

³© Land Vorarlberg

Für die Klassifizierung der Landbedeckung wurden die auf Tab. 5-2 angegebenen ASTER Satellitenbilder genutzt. Die Eigenschaften und Spektralkanäle des ASTER Sensors wurden bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Für das jeweilige Satellitenbild wurde neben der Wolkenbedeckung das Aufnahmedatum berücksichtigt, da je nach Jahreszeit unterschiedliche Voraussetzungen bezüglich der Vegetation und Niederschlagsform (z.B. Schneebedeckung) berücksichtigt werden müssen. Die Überfliegung der Untersuchungsgebiete erfolgte während der SRTM Mission im Monat Februar. Demnach eignet sich zur Wahl des Aufnahmezeitpunkts ebenfalls ein Datum in Annäherung an den Monat Februar, um eine ähnliche Landbedeckung wie zum Aufnahmezeitpunkt des SRTM zu erhalten. Dies gestaltete

sich im UG 1 schwierig, da hier die meisten ASTER-Satellitenbilder wegen eines hohen Anteils an Wolkenbedeckung nicht genutzt werden konnten. Dennoch verspricht das

Tab. 5-2: Für die Klassifizierung der Landbedeckung genutzte Aster-Satellitenbilder.

Untersuchungsgebiet	Aufnahmedatum	Granule ID
UG 1 - Mittelberg	2004-09-17T10:27:07Z	SC:AST_L1A.003:2025829066
UG 2 - Südhessen	2003-03-23T10:27:56Z	SC:AST_L1A.003:2013148068

Aufnahmedatum im September weitestgehend Schneefreiheit im Gebiet. Zudem sollen sich keine markanten Unterschiede in der Vegetationsbedeckung auf die Landbedeckungskartierung auswirken. Ein ASTER Satellitenbild aus dem Aufnahmemonat März konnte für die Landbedeckungskartierung des UG 2 genutzt werden. Demnach können hier ähnliche Landbedeckungsbedingungen wie bei der SRTM Mission angenommen werden.

5.1.1 Datenaufbereitung

Wie aus Tab.5-3 abzulesen ist, werden das ASTER GDEM und SRTM Geländemodell im geographischen Koordinatensystem WGS 1984 ausgeliefert. Um die Geländemodelle mit den Referenzhöhen vergleichbar zu machen, müssen diese, wie es ebenfalls NIKOLAKOPOULOS (2006) und REICH (2004) in ihren Untersuchungen machen, in das geodätische Koordinatensystem des Referenzgeländemodells projiziert werden. Die Projektion erfolgt mit der Software ArcGIS 10.0. Die Transformationsmethoden vom geographischen WGS 1984 Koordinatensystem in das jeweilige geodätische Koordinatensystem des Untersuchungsgebietes ist der Tab. 5-3 zu entnehmen.

Tab. 5-3: Koordinatensysteme und Transformationsmethoden (aus ESRI 2008).

	Geographisches Koordinatensystem	Transformation	Geodätisches System
UG 1	GCS_WGS_1984	MGI_to_WGS_1984_3	MGI_Austria_GK_West
UG 2	GCS_WGS_1984	DHDN_To_WGS_1984_2 - Germany – West	DHDN_3_Degree_Gauss_Zone_3

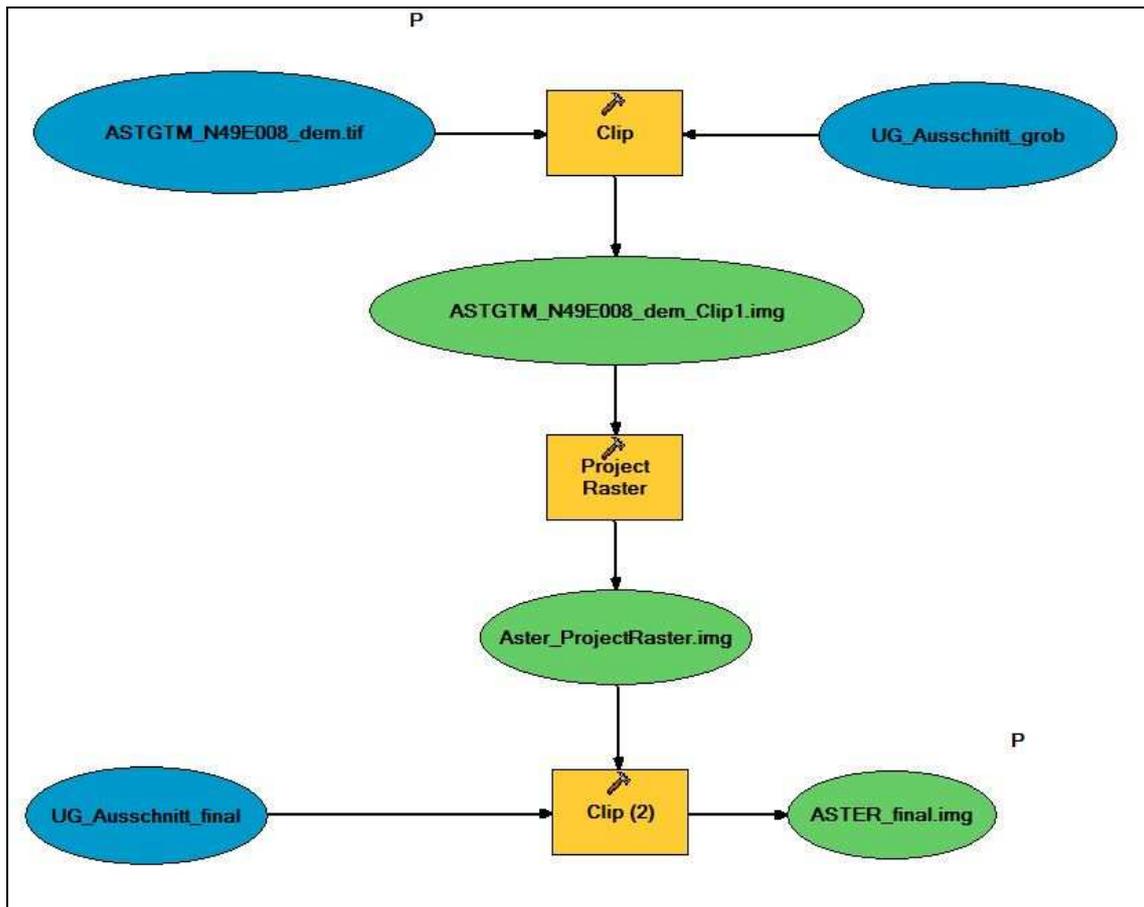


Abb. 5-1: Verarbeitungsprozess der Geländemodelle am Beispiel des ASTER GDEM (eigene Darstellung).

Die einzelnen, zur Aufbereitung der Geländemodelle nötigen Schritte sind auf Abb. 5-1 am Beispiel des ASTER GDEM dargestellt. Als erstes wurde der Bereich des Untersuchungsgebietes aus der Kachel, die das Untersuchungsgebiet enthält, großzügig ausgeschnitten und in das geodätische Referenzsystem (vgl. Tab. 5-3) projiziert. Nach der Projektion wurde der genaue Bereich des Untersuchungsgebietes ausgeschnitten. Das so erhaltene Geländemodell wurde nun für die Analysen genutzt.

5.1.2 Höhenbezüge der Geländemodelle

Bei der Projektion von einem geographischen in ein geodätisches Koordinatensystem könnte es durch unterschiedliche Höhenbezüge der Höhendaten zu Problemen kommen. Die Höhen der Referenzgeländemodelle beziehen sich auf das Normalhöhennull (NHN). Für das Geländemodell des UG 1 entspricht das NHN dem Pegel Adria. Im UG 2 ist es der Amsterdamer Pegel.

Die Höhendaten des ASTER GDEM und SRTM sind auf das EGM96 Geoid projiziert. Demnach muss vor dem Höhenvergleich der Geländemodelle mit den Referenzhöhen die *Geoidundulation* (Geoidhöhe) im Vergleich zur jeweiligen NHN-Fläche berücksichtigt werden. Das Geoid ist die Äquipotentialfläche im Schwerefeld der Erde, welche sich dem mittleren Meeresspiegel bestmöglich annähert (BOLLMANN 2001: 302).

Unter der Annahme, dass die mittlere Meeresspiegelhöhe in etwa den jeweiligen Pegeln der NHN-Flächen entspricht, sollte die Höhenabweichung des Höhenbezugspunktes gering (<1 m) ausfallen. Um diese Annahme weiter zu festigen, wird im Folgenden der Höhenbezug für das UG 2 überprüft. Das UG 2 eignet sich für diese Analyse besonders, da hier, im Gegensatz zum UG 1, mehr Grafiken zum Veranschaulichen der Problemstellung zur Verfügung stehen.

Die Geländehöhen des ASTER GDEM und SRTM beziehen sich, wie bereits erwähnt, auf das *EGM96 Geoid*. Da sich die Referenzgeländemodelle auf die jeweilige NHN-Fläche beziehen ist zu ermitteln, wie hoch die Höhenabweichung des *EGM96 Geoids* zur NHN-Fläche ist.

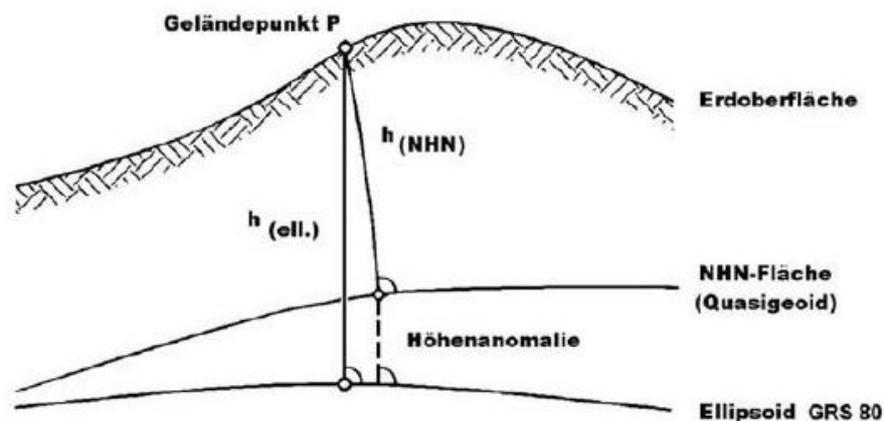


Abb. 5-2: Die physikalischen und Geometrischen Höhenbezugsflächen des UG 2 (nach DVW 2009:16).

Wie in Abb. 5-2 veranschaulicht wird, entspricht die NHN-Fläche der Höhe des Quasigeoids auf dem GRS80 Ellipsoid. Der Höhenunterschied der NHN-Fläche zum GRS80 Ellipsoid wird auf Abb. 5-2 als *Höhenanomalie* bezeichnet und entspricht der Höhe des deutschen *Quasigeoids*. Da die Ellipsoidhöhe des GRS80 Ellipsoids in diesen Breiten dem WGS84 Ellipsoid entspricht, und es somit zu keinen Ellipsoidbedingten Höhenabweichungen kommt, beschreibt lediglich die Differenz der *Quasigeoidhöhe* zum *EGM96 Geoid* die Höhenabweichung. In Abb. 5-3 ist die Höhe des *Quasigeoid* (*Höhenanomalien*) für Hessen

angegeben. Für das Untersuchungsgebiet in Südhessen kann anhand der Abbildung eine *Quasigeoidhöhe* von ca. 48 m für das UG 1 angenommen werden.

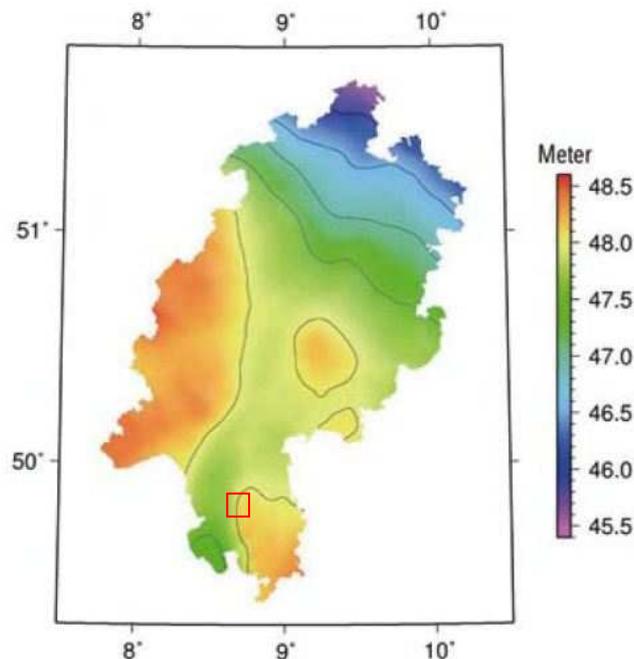


Abb. 5-3: Höhenanomalien für das GRS80-Ellipsoid. Rote Markierung: Lage des UG 1 - Südhessen (nach DRESCHER 2005; DVW 2009:16 leicht abgeändert).

Für das *EGM96 Geoid* kann die Geoidhöhe für das Untersuchungsgebiet mit dem *NGA EGM96 Geoid Calculator* berechnet werden (NGA 2008). Die Ergebnisse der Berechnung weisen ebenfalls eine Geoidhöhe des *EGM96* von ca. 48 m aus. Beide Geoide haben demnach im Bereich des Untersuchungsgebietes die gleiche Geoidhöhe. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich bedingt durch die gleichen Höhen der Ellipsoide (GRS80 = WGS84) sowie der Geoide (Quasigeoid = EGM96) keine Höhenabweichungen für den Höhenbezugspunkt des UG 2 ergeben sollten.

Im UG 1 beziehen sich die Referenzhöhen des LIDAR-DSM auf das NHN Adria. Vom LVMA Vorarlberg wurde eine Datei mitgeliefert, aus der die Geoidhöhen für das UG 1 entnommen werden konnten. Nach Stichproben der Geoidhöhen im Vergleich zum *EGM96* Geoid sollten die Höhenunterschiede der Geoide unter einem Meter liegen.

5.1.2 Wahl der Rastergröße

Neben einem einheitlichen Koordinatensystem mussten alle Geländemodelle ebenfalls auf eine einheitliche Rastergröße *resampled* werden. Da die geometrische Auflösung des SRTM Geländemodells um das 3-Fache größer ist, als die des ASTER GDEM (vgl. Tab. 5-1), muss

eines der beiden Modelle entweder in eine gröbere, bzw. feinere Auflösung *resampled* werden. In den Untersuchungen von HIRT (2010), HAYAKAWA (2008) und NIKOLAKOPOULOS (2006) wurde die gröbere Auflösung des SRTM gewählt. Hierbei nutzte HAYAKAWA (2008) einen ASTER GDEM-Datensatz, der lediglich jede dritte Reihe und Spalte der ASTER GDEM Höhendaten nutzte, während die beiden anderen Untersuchungen sich eines Mittelwertes von drei ASTER GDEM Rasterzellen bedienen.

Da die feinere Auflösung des ASTER GDEM generell eine große Stärke des Modells sein kann, wurde der Focus auf die Analyse des ASTER GDEM in dessen nativer Auflösung gesetzt. Vielmehr bot es sich an, das SRTM in eine kleinere Auflösung zu *resamplen*, da hierbei keine Details des Modells verloren gehen. Dementsprechend wurde das Referenzgeländemodell und SRTM durch die Interpolationsmethode *Kubische Konvolution* auf ein feineres bzw. gröberes Raster *resampled*. Bei der *Resampling-Methode Kubischen Konvolution* wird der neue Rasterwert aus dem gewichteten Mittel der umliegenden 16 Rasterwerte des bestehenden Rasters berechnet (BILL 2002).

Die Geländehöhendaten des ASTER GDEM und SRTM werden als Ganzzahlen geliefert. Die Geländehöhendaten der Referenzgeländemodelle sind wiederum zentimetergenau. Um das Datenaufkommen zu reduzieren und um die Darstellung der Ergebnisse zu vereinfachen, wurden die Geländehöhendaten der Referenzgeländemodelle ebenfalls auf Ganzzahlen gerundet. Da die Genauigkeit der Referenzgeländemodelle teilweise sogar im Bereich von mehreren Metern (vgl. Tab. 5-1) liegt, sollte diese Modifizierung der Referenzhöhen kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

Nach JACOBSEN (2004) soll das projizieren und *resamplen* der Geländemodelle zu einer Verschlechterung der Datenqualität führen. Um diese These zu überprüfen und dadurch entstehende Genauigkeitsverluste des SRTM quantifizieren zu können, wird das ASTER GDEM sowie das jeweilige Referenzgeländemodell bei einigen Analysen ebenfalls auf die Größe des SRTM *resampled* und verglichen.

5.2 Höhenabweichung zu Referenzhöhen

5.2.1 Statistische Analyse der Höhenabweichung

Ziel des statistischen Vergleichs war es, die Genauigkeit der Höhendaten des ASTER GDEM und SRTM zu analysieren. Die Genauigkeit der Höhendaten kann als Abweichung jedes Pixels der Geländemodelle von den Referenzgeländemodellen quantifiziert werden. Dementsprechend ist die Differenz der Geländehöhen die *Höhenabweichung* der

Geländemodelle. Hierbei wird angenommen, dass das Referenzgeländemodell die tatsächliche Geländehöhe des Untersuchungsgebietes darstellt.

Die Höhenabweichung wurde für jeden Pixel der Untersuchungsgebiete berechnet. Um einen einheitliche Wert zur Beschreibung der durchschnittlichen Höhenabweichung zu erhalten, eignen sich folgende, für die Beschreibung der Höhengenaugigkeit eines Geländemodells üblichen, Variablen. Zu den Variablen zählt der Mittlere Fehler (ME) (engl. *mean error*), die Wurzel des quadratischen Mittelwertes (RMSE) (engl. *root mean square error*) und die Standardabweichung (SD; engl. *standard deviation*).

$$ME = \frac{\sum (z_{DEM} - z_{Ref})}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (z_{DEM} - z_{Ref})^2}{n}}$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum [(z_{DEM} - z_{Ref}) - ME]^2}{n-1}}$$

Der ME ist der Mittelwert der Höhenabweichung. Berechnet wird er aus der Summe der zu messenden Höhen (Z_{DEM}) abzüglich der Referenzhöhen (Z_{REF}), dividiert durch die Anzahl der Messpunkte. Der RMSE ist die Wurzel aus den gemessenen Höhe (Z_{DEM}) abzüglich der Referenzhöhen (Z_{REF}) zum Quadrat, dividiert durch die Anzahl der Messpunkte. Ähnlich dem RMSE gestaltet sich die Berechnung der SD. Sie ist die Wurzel der zu messenden Höhe (Z_{DEM}) abzüglich der Referenzhöhe (Z_{REF}) abzüglich der ME zum Quadrat, dividiert durch die Anzahl der Messpunkte abzüglich eins (LI 1988: , FISHER 2006: , HENGL 2009: 95).

Für die Beschreibung und Interpretation der Höhengenaugigkeit sind die Werte des RMSE und ME ausreichend. Da die SD in den meisten Fällen dem RMSE entspricht, wird die SD in den Analysen nicht weiter beschrieben und verglichen.

5.2.2 Lage der Höhenabweichung im Untersuchungsgebiet

Von LI (1988), FISCHER (2006) und HENGL (2009) wird kritisiert, dass die statistische Auswertung nach ME, RMSE und SD keine Aufschlüsse über die räumliche Verteilung des Höhenfehlers liefert. Diese Erkenntnis ist logisch, da zur Berechnung der statistischen Variablen ein Mittelwert aller Höhenabweichungen gebildet wird. Aus diesem Grund wird die Höhenabweichung in ihrer Lage für beide Untersuchungsgebiete in

kartographischer Form aufbereitet. Dies ermöglicht das Erkennen von Bereichen hoher und niedriger Höhenabweichung der Geländemodelle von den Referenzhöhen.

5.2.3 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Reliefklasse

5.2.3.1 Erstellung einer Reliefklassifizierung

Die Höhengenaugigkeit der ASTER GDEM und SRTM Geländemodelle wurde für insgesamt vier definierte geomorphologische Oberflächenformen bestimmt. Im Folgenden werden diese geomorphologischen Oberflächenformen als *Reliefklassen* bezeichnet.

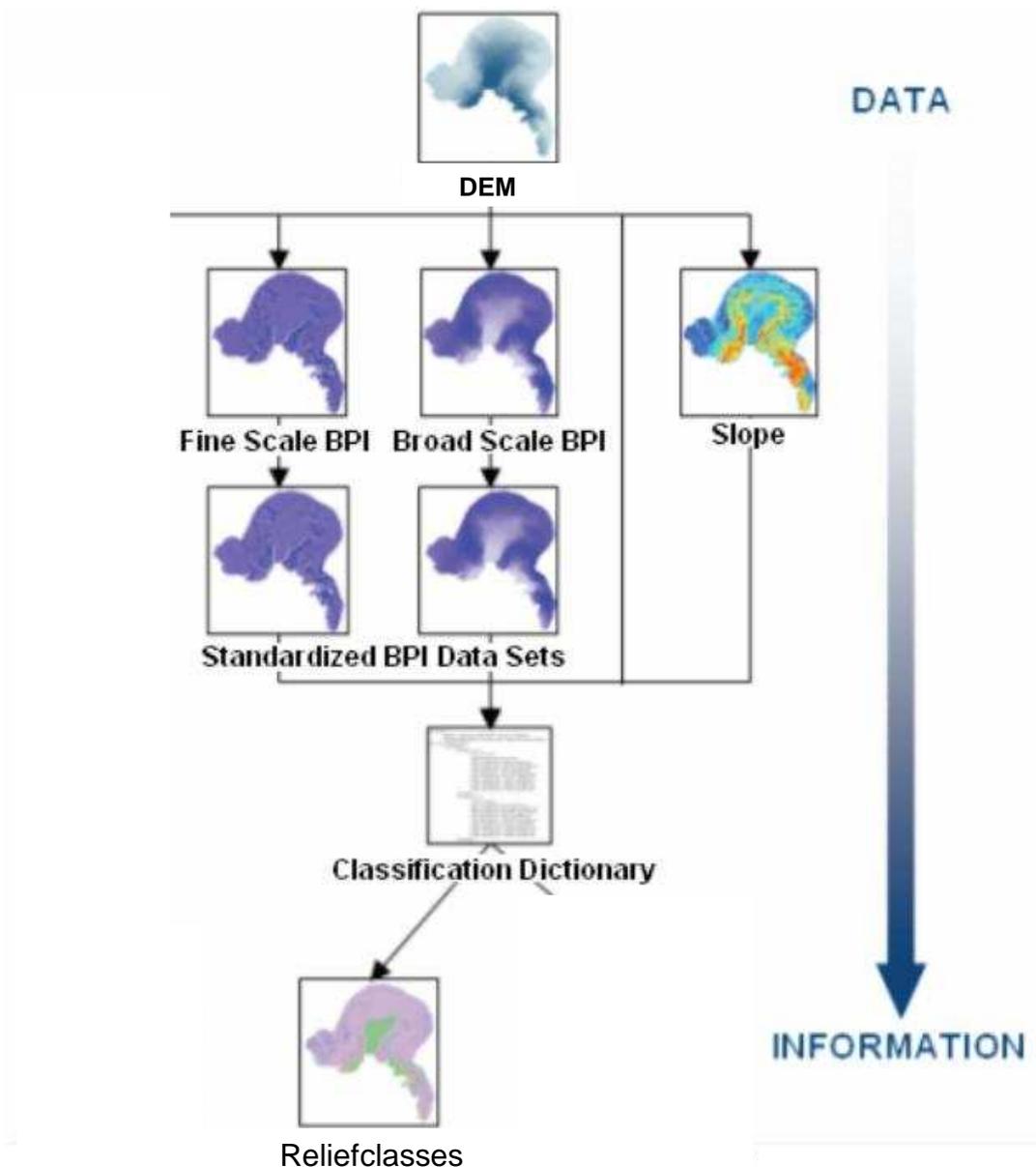


Abb. 5-4: Arbeitsschritte zur Erstellung der Reliefklassen im *Benthic Terrain Modeler* (aus NOAA CSC 2005 leicht abgeändert).

Für die Erstellung der Reliefklassen eignet sich die Nutzung eines von WEISS (2001) entwickelten *Topographic position index* (TPI). Als Beispiel für die Anwendung dieser Methode sind die Analysen von TAGIL (2008) zu nennen, bei denen Reliefklassen für die terrestrische Umgebung erzeugt wurde. Um die Reliefanalysen dieser Arbeit wie TAGIL (2008) durchzuführen, wäre eine Vielzahl von Softwaretools nötig gewesen, deren Beschaffung sich als schwierig erwies. Aus diesem Grunde fiel die Wahl der Software auf eine von der *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) entwickelte *ArcGIS* Extension: *Benthic Terrain Modeler* (BTM). Diese Extension wurde eigens zur Analyse der Meeresbodenmorphologie erstellt, verwendet aber ebenfalls den von WEISS (2001) entwickelten TPI-Algorithmus (NOAA CSC 2005, LUNDBLAD 2008). Der TPI-Algorithmus wird beim BTM lediglich als BPI-Algorithmus bezeichnet. Aus genannten Gründen war anzunehmen, dass sich diese Extension ebenfalls für die terrestrische Umgebung eignet.

Die Arbeitsschritte zur Erstellung der Reliefklassen sind in Abb. 5-4 dargestellt. Die Grundlage für die Erstellung der Reliefklassen ist das jeweilige Geländemodell. Aus diesem werden alle weiteren Analyselayer abgeleitet. Aus den Höhenwerten des Geländemodells wurde zunächst ein *Benthic Position Index* (BPI) für kleineräumige (engl. *fine scale*) und großräumige (engl. *broad scale*) Analysen erstellt (vgl. Abb. 5-4).

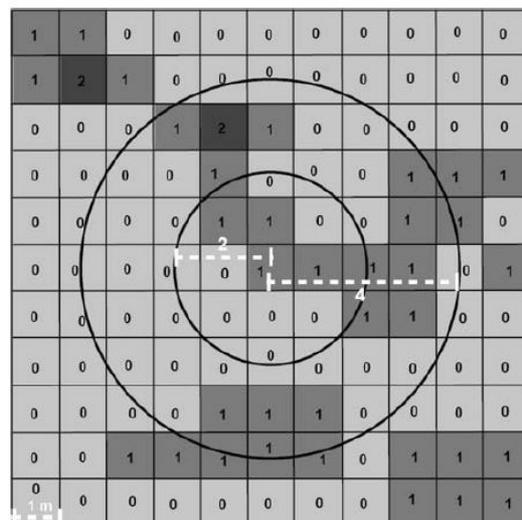


Abb. 5-5: Beispiel für die Beschreibung des BPI-Index. Jede Zelle enthält den spezifischen BPI-Wert. Positive Werte sind höher als ihre Umgebung. Der Wert Null charakterisiert flache und/oder ebene Bereiche. Die Kreise definieren den inneren (2) und äußeren (4) Radius der Lageanalyse (aus LUNDBLAD 2008)

Der BPI (bzw. TPI) analysiert die Pixel in ihrer Lagebeziehung zueinander. Für jede Rasterzelle wird ein spezifischer BPI-Wert ermittelt, der sich aus der Position des Pixels in

seinem Umfeld ergibt (vgl. Abb. 5-5). Hierbei wird der Unterschied der Geländehöhe einer Zelle zur mittleren Geländehöhe der Nachbarzellen gemessen (vgl. Abb. 5-6). Positive

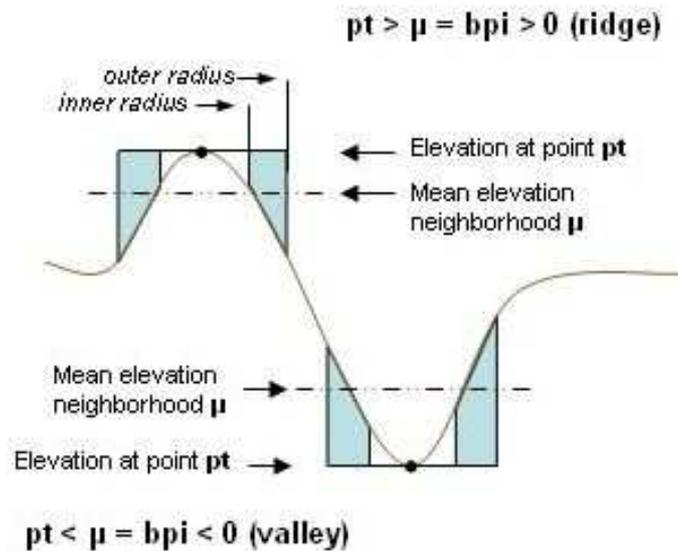


Abb. 5-6: Positive und Negative BPI Bestimmung für Kämme (ridge) und Senken (valley) (aus NOAA CSC 2005).

Zellenwerte zeigen an, dass die Zelle höher liegt als die mittlere Höhe ihrer Nachbarzellen. Negative Zellenwerte zeigen an, dass die Zelle niedriger liegt als die mittlere Höhe ihrer Nachbarzellen (vgl. Abb. 5-6). Zudem kann die Hangneigung als weiteres Klassifizierungskriterium verwendet werden. So können darüber hinaus flache Bereiche wie z.B. Ebenen weiter untergliedert werden (Abb. 5-7). Das Grundprinzip der BPI-Methode ist demnach, durch die Konstellation von Wertepaaren der klassifizierten Pixel, eine Beschreibung von

$pt \sim \mu = bpi \sim 0$ (constant slope, flat area, saddle)
Check slope of point to differentiate

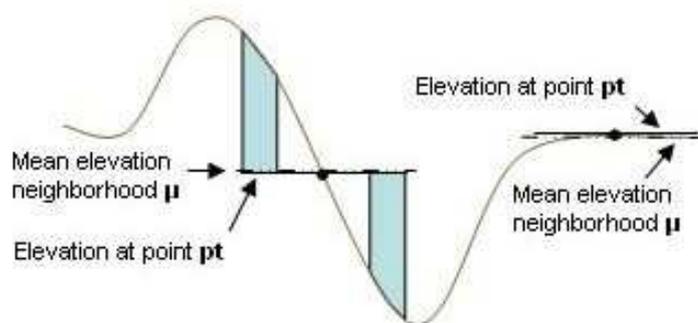


Abb. 5-7: Bereiche mit einem BPI im neutralen Bereich. An diesen Stellen wird die Hangneigung zur BPI Bestimmung genutzt (aus NOAA CSC 2005).

Reliefformen zu ermöglichen. So können innerhalb der BPI-Matrix (vgl. Abb. 5-5) Elemente nach ihrer Pixelkonfiguration definiert werden. Beispielsweise können hintereinander gereihte, positive Werte in einem negativen Umfeld als Rücken, bzw. der Morphologie einer rückenähnlichen Struktur entsprechend, klassifiziert werden. Die Konstellation der Pixel und die daraus resultierenden Elemente müssen vom Nutzer im *classification dictionary* definiert werden (WEISS 2001; LUNDBLAD 2008; TAGIL 2008). Der Fokus der Reliefklassifizierung dieser Arbeit sollte bei einfachen und eindeutig voneinander abzugrenzenden Klassen liegen. Aus diesem Grunde wurden die einfachen *Standard-Reliefklassen* des BTM-Tools verwendet. Auf Abb. 5-8 sind Beispiele der Pixelkonstellation für die in diese Standard-Reliefklassen angegeben.

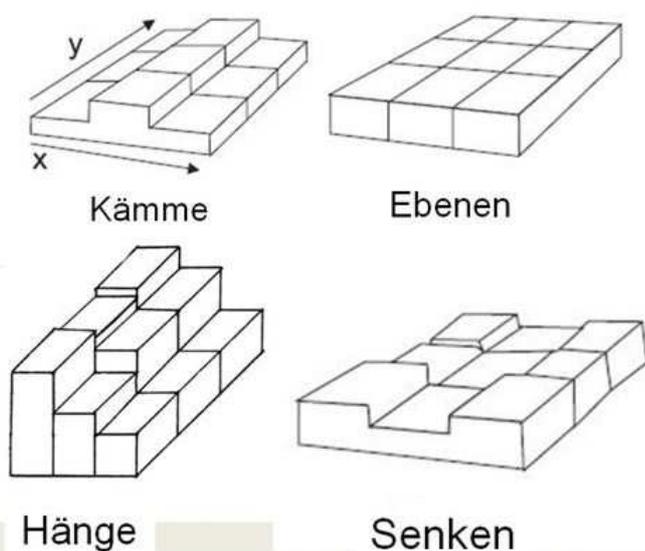


Abb. 5-8 Beispiel der Pixelkonfiguration der jeweiligen Reliefklasse (nach Bolognaro-Crevenna (2004) - abgeändert und ergänzt mit eigener Reliefklasse Hänge).

Die Bezeichnung der einzelnen Reliefklassen gestaltet sich als problematisch, da ein Überbegriff zur Beschreibung der Reliefklassen verwendet werden musste. Der Begriff musste außerdem einer generalisierten Formenausprägung entsprechen, die aus morphologischer Sicht jedoch einer Menge kleinerer, ähnlicher Formen entsprechen könnte. Demnach beinhaltet eine Klasse zumeist eine Vielzahl an artverwandten Formenschätzen. In Tab. 5-4 sind die verwendeten Formen und Beispiele für mögliche assoziierte Formen angegeben. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass es nicht der Anspruch dieser Arbeit ist, das Relief eines Untersuchungsgebietes durch ein Geländemodell korrekt darzustellen bzw. zu erfassen, da die Validierung der Ergebnisse aus den

Referenzgeländemodelle nur im Gelände erfolgen kann. Vielmehr geht es darum, die Qualitäten der verschiedenen Modelle zu erörtern.

Tab. 5-4: Beispielformenschatz für die Reliefklassen.

Kämme (engl. <i>crests</i>)	z.B. Bergkamm, Kante, Bergrücken, Stufen, Kuppen, Gipfel etc.
Senken (engl. <i>depression</i>)	z.B. Absenkung, Hohlform, Grube, Mulde, Rinne etc.
Ebenen (engl. <i>flat</i>)	z.B. Ebene, Flachland etc.
Hänge (engl. <i>slopes</i>)	z.B. Hang, Böschung etc.

Die Reliefklassifizierung erfolgt für zwei unterschiedliche Analysen der Geländemodelle. Zum Einen soll die Reliefklassifizierung aus dem jeweiligen Referenzgeländemodell eine realitätsnahe Klassifizierung des Untersuchungsgebietes darstellen. Die Referenzgeländemodelle wurden hierfür auf die Größe des ASTER GDEM *resampled*. Auf deren Grundlage basiert die Analyse zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM für jede der vier Reliefklassen. Des Weiteren wurde diese Methode genutzt, um die Eigenschaften des ASTER GDEM und SRTM auf deren Eignung zur Erzeugung der Reliefklassen zu überprüfen. Hierbei wurde die native Auflösung des ASTER GDEM bzw. SRTM für die Erzeugung der Reliefklassen genutzt. Um die Reliefklassen mit dem Referenzreliefklassen vergleichbar zu machen, wurde das Referenzgeländemodell ebenfalls auf jeweilige native Auflösung des entsprechenden Geländemodells angepasst. Vergleichen sollte nun der Anteilswert der einzelnen Reliefklassen sowie die Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel zwischen dem Referenzgeländemodell und dem zu untersuchenden Geländemodell. Der Anteilswert sollte Aufschluss darüber geben, ob eine Klassifizierung bestimmter Klassen deutlich häufiger oder weniger häufig auftritt. Bei der Analyse der Lageübereinstimmung sollte die Genauigkeit der Reliefklassifizierung überprüft werden, demnach ob die klassifizierten Pixel des zu untersuchenden Geländemodells mit denen des Referenzgeländemodells in ihrer Lage übereinstimmen.

5.2.4 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Landbedeckungsklasse

Um die Höhenabweichung der Untersuchungsgeländemodelle für unterschiedliche Landbedeckungsklassen berechnen zu können, wurde für jedes Untersuchungsgebiet eine Landbedeckungsklassifizierung durchgeführt.

5.2.4.1 Erstellung einer Landbedeckungsklassifizierung

Die Spektralkanäle der ASTER Satellitenbilder können genutzt werden, um die Landbedeckung zu identifizieren und zu klassifizieren. Bedingt durch die hohe geometrische und spektrale Auflösung des ASTER Sensors mit 14 Spektralkanälen eignen sich die Satellitenbilder des Sensors besonders gut für die Klassifizierung der Landbedeckung (YÜKSEL 2008).

Das Grundprinzip der s.g. *Multispektral-Klassifizierung* ist es, die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Objekten der Erdoberfläche, wie z.B. Boden, Vegetation und Wasser, zu nutzen. Wie auf Abb. 5-9 zu erkennen ist, weisen die Objektklassen für bestimmte Wellenlängen einen unterschiedlichen Reflexionsgrad auf. Die in den Spektralbereichen λ_1 , λ_2 , λ_3 aufgenommenen Messdaten für die Objektklassen Boden, Vegetation und Wasser

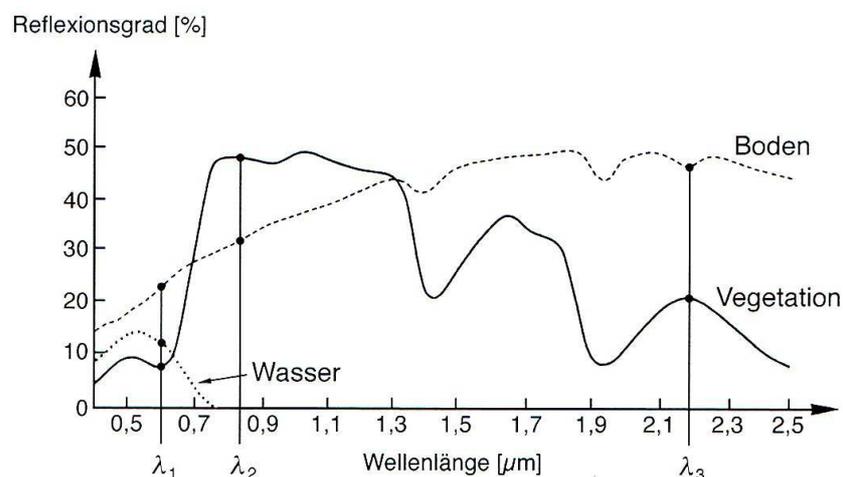


Abb. 5-9: Der Reflexionsgrad für bestimmte Objektklassen in Abhängigkeit von der Wellenlänge (aus ALBERTZ 2007:156).

werden sich demzufolge voneinander unterscheiden. Diese Differenzen sind weitgehend material- bzw. objektspezifische Eigenschaften, die zur Abgrenzung der verschiedenen Objektklassen dienen können (ALBERTZ 2007:155f). Die unterschiedlichen Spektralbereiche der Objektklassen werden anhand von *Trainingsgebieten* vom Nutzer erfasst, um der

entsprechenden Objektklasse eine eigene Signatur zuzuweisen (LILLESAND 2008: 559; YÜKSEL 2008).

Überwachte Multispektral-Klassifizierung

Sind die Trainingsgebiete bestimmt, müssen die Daten weiter verarbeitet werden. Dies erfolgt durch eine, s.g. überwachte Klassifizierung. Die Durchführung der Überwachten Klassifizierung erfolgte mit dem *Maximum-Likelihood-Verfahren*. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit, bei dem aufgrund statistischer Kenngrößen der vorgegebenen Klassen, die Wahrscheinlichkeit berechnet wird, mit denen die einzelnen Pixel eine entsprechende Signatur zugewiesen bekommen. Dementsprechend wird jedem Pixel eine Landbedeckungsklasse mit der größten Wahrscheinlichkeit zugeordnet. (ALBERTZ 2007: 155, LILLESAND 2008: 559).

Das Kartieren von Trainingsgebieten sowie die abschließende Klassifizierung der Landbedeckung, erfolgt mit der Software ERDAS IMAGINE 9.2. Zur Kartierung werden Satellitenbilder aus Google Earth zur Hilfe genommen. Auf Abb. 5-10 ist ein Beispiel für eine Multispektralklassifizierung angegeben.

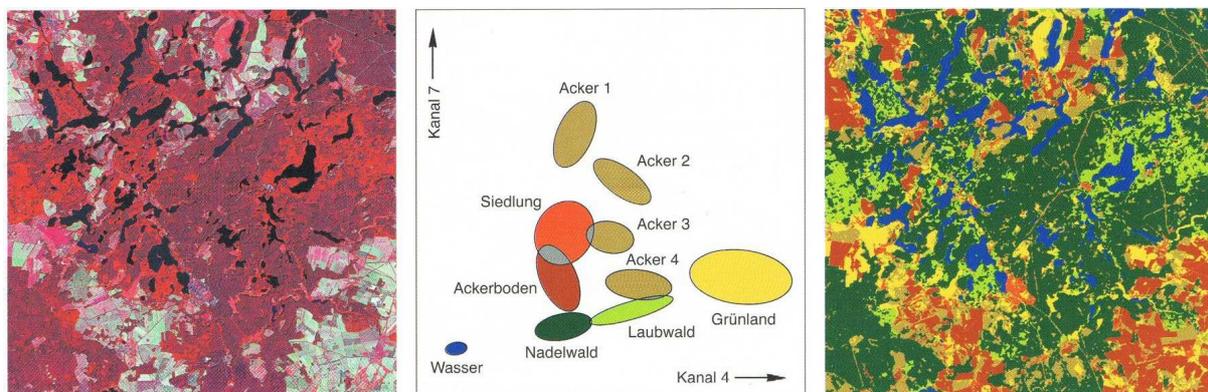


Abb. 5-10: Beispiel für eine Multispektralklassifizierung. Links: Multispektral Satellitenbild. Mitte: Statistische Analyse durch elliptische Linien zur Unterteilung des Merkmalsraumes. Rechts: Erstellung der Thematischen Karte durch die Anwendung der Unterteilung (ALBERTZ 2007:162).

Wahl der Landbedeckungsklassen

Als Landbedeckungsklassen wurden für diese Arbeit, aus Gründen der Vergleichbarkeit, die gleichen Landbedeckungsklassen gewählt, die den *NLCD land cover type classes* des ASTER GDEM VT (2009) entsprechen.

Tab. 5-5: Die Landbedeckungsklassen der Landbedeckungsklassifizierung mit Nutzungsbeispielen.

Gestein (UG 1) / Siedlung (UG 2)	z.B. Offenliegendes Gestein, Siedlungen, Straßen, Brücken, Steinbrüche
Wald	z.B. Laubwald, Nadelwald, Mischwald
Offen	z.B. Äcker, Wiesen, Weiden, Grünland
Wasser	z.B. Seen, Fließgewässer

Die Landbedeckungsklassen der Landbedeckungsklassifizierung sind mit Nutzungsbeispielen auf Tab. 5-5 angegeben. Eine Differenzierung der Landbedeckungsklasse Gestein / Siedlung ist aufgrund des gleichen Spektralbereichs der Objektklassen nicht möglich. Eine unterschiedliche Bezeichnung dieser Klasse für das jeweilige Untersuchungsgebiet ergibt sich aus den unterschiedlichen (natur-)räumlichen Bedingungen. Das Vorkommen von Offenem Gestein ist im UG 1 dominant. Zusammenhängende Siedlungsflächen können für dieses Gebiet nicht erfasst werden, während im UG 2 – mit Ausnahme der Steinbrüche – Siedlungsflächen und Autobahnen vermehrt klassifiziert werden können.

Die Landbedeckungsklassen Wald und Offen kommen in beiden Untersuchungsgebieten vor. Die Landbedeckungsklasse Wald umfasst Laub-, Nadel- und Mischwälder. Bei der Offenen Landbedeckung handelt es sich um Flächen mit niedrigem Bewuchs wie Äcker, Wiesen, Weiden und Grünland. Die Wasserflächen treten nur im UG 2 auf, sind aber wegen ihres geringen Vorkommens für die Auswertung der Höhenabweichung nicht repräsentativ.

5.2.5 Höhenabweichung in Abhängigkeit der Bildstapel (ASTER GDEM)

Im Lieferumfang des ASTER GDEM ist ebenfalls ein *NUM*-Layer enthalten, der die Anzahl der aggregierten Bildstapel zur Höhenberechnung der Pixel enthält. Dieser wurde mit den Methoden der Datenaufbereitung aus Kapitel 5.1.1 bearbeitet und mit der aus Kapitel 5.2.2 erzeugten Karte der Höhenabweichung verschnitten. So konnte für jede Bildstapelzahl die entsprechende Höhenabweichung erfasst werden.

5.3 Geomorphometrische Analysen

5.4.1 Hangneigung

Der Geländefaktor Hangneigung hat für viele naturräumliche Prozesse eine zentrale Bedeutung (MAUKISCH 1996). Wie in den Untersuchungen von MAUKISCH (1996) stand auch bei dieser Arbeit die Frage im Vordergrund, inwieweit die Hangneigung in den Untersuchungsgebieten richtig dargestellt wird. Hierfür wurden die, aus dem ASTER GDEM und SRTM erzeugten Hangneigungen mit den Hangneigungen des Referenzgeländemodells verglichen. Der Vergleich der Geländemodelle erfolgte zum Einen für die native Auflösung der einzelnen Geländemodelle (ASTER GDEM = 1"; SRTM = 3"), sowie für die Auflösung des jeweils anderen Modells (ASTER GDEM = 3"; SRTM = 1"). Demnach wurden beide Geländemodelle auf die jeweilige Rastergröße des anderen angepasst und mit den Referenzhangneigungen, die ebenfalls auf die passende Auflösung resampled wurden, verglichen.

Die Erstellung der Hangneigung wurde mit der Software ArcGIS 10.0 durchgeführt. Hierbei wird für jede Zelle des Rasters die maximale Änderung des Wertes im Vergleich zu den acht Nachbarzellen ermittelt. In ArcGIS 10.0 wird folgender Algorithmus zur Ermittlung der Hangneigung verwendet:

$$\text{slope_radians} = \text{ATAN} \left(\sqrt{[\text{dz}/\text{dx}]^2 + [\text{dz}/\text{dy}]^2} \right) * 180/\pi \quad (\text{ESRI 2010})$$

5.3.2 Höhenlinien

Um morphologische Geländedetails erkennen zu können, gibt es eine Reihe von Möglichkeiten die einzelnen Geländemodelle auszuwerten. Eine technisch-analytische Form ist das Auswerten durch unterschiedliche Algorithmen, wie es in Punkt 5.3.3 gemacht wird.

Für JACOBSEN (2010) kann das Erkennen von morphologischen Details ebenfalls durch visuelle Betrachtung von Höhenlinien erfolgen. Anhand der Höhenlinien können einzelne Geländedetails visuell aus der Konstellation der Höhenlinien abgeleitet werden. Hierbei spielt nach JACOBSEN (2010) vor allem die persönliche Erfahrung zur Interpretation des Linienverlaufs eine große Rolle. Generell kann bei dieser Form der Auswertung der

Geländemodelle angenommen werden, dass ein unruhiger Verlauf der Höhenlinien für eine exaktere Formenbeschreibung des Geländes steht, da kleinere Unebenheiten besser wahrgenommen werden und so auch kleinere Formen visuell erkannt werden können (JACOBSEN 2010).

Die Erstellung der Höhenlinien erfolgte mit ArcGIS 10.0. Als Höhenintervall wurde für beide Untersuchungsgebiete ein Wert von 100 m festgelegt. Zur Analyse der Höhenlinien wurde die Rastergröße des ASTER GDEM genutzt.

5.3.3 Reliefklassifizierung

Aus dem ASTER GDEM und SRTM wurden, mit der in Kapitel 5.2.3.1 vorgestellte Methode der Reliefklassifizierung, Reliefklassen erzeugt und mit denen des Referenzgeländemodells verglichen.

5.4 Hydrologische Analysen

Das Anwendungspotential von digitalen Geländemodellen für hydrologische Fragestellungen ist sehr groß. Sie finden vorwiegend Anwendung in der Modellierung des Abflusses eines Gebietes. Durch die Analyse von digitalen Geländemodellen können für jeden Geländepunkt des Einzugsgebietes spezifische hydrologische Eigenschaften ermittelt werden (MEIJERINK 1994).

Technisch erfolgten die hydrologischen Analysen mit den ArcGIS Hydro-Tools (V. 2.0). In Abb. 5-11 sind die einzelnen Arbeitsschritte zur Ermittlung der Einzugsgebiete und des Gewässernetzes angegeben. Bei allen Geländemodellen wurden zunächst die Senkenbereiche (engl. *sinks*) verfüllt. Bei den *sinks* handelt es sich um Zellen eines Geländemodells, die von Zellen höherer Geländehöhe umgeben sind und sich störend auf den Fließalgorithmus auswirken (BURROUGH & MCDONNEL 1998: 194f; TARBOTON 2008).

Die Fließrichtungen wurden mit Hilfe des am häufigsten verwendeten und einfachsten Algorithmus, dem D8 Algorithmus bestimmt. Hierbei wird angenommen, dass eine Zelle zu Gänze nur in jeweils *eine* andere Zelle entwässert und dies in Richtung des größten Gradienten. Das Ergebnis ist eine Rasterkarte, deren Zellen mit einem Wert versehen sind, der die Nachbarzelle angibt, in die die Zelle zu entwässert (vgl. Abb. 5-12; FÜRST 2004: 209). Die Fließakkumulation konnte aus dem Rasterdatensatz der Fließrichtungen erstellt werden. Hierbei wird, wie auf Abb. 5-12 dargestellt, eine Wertematrix erstellt, die an jeder Stelle die

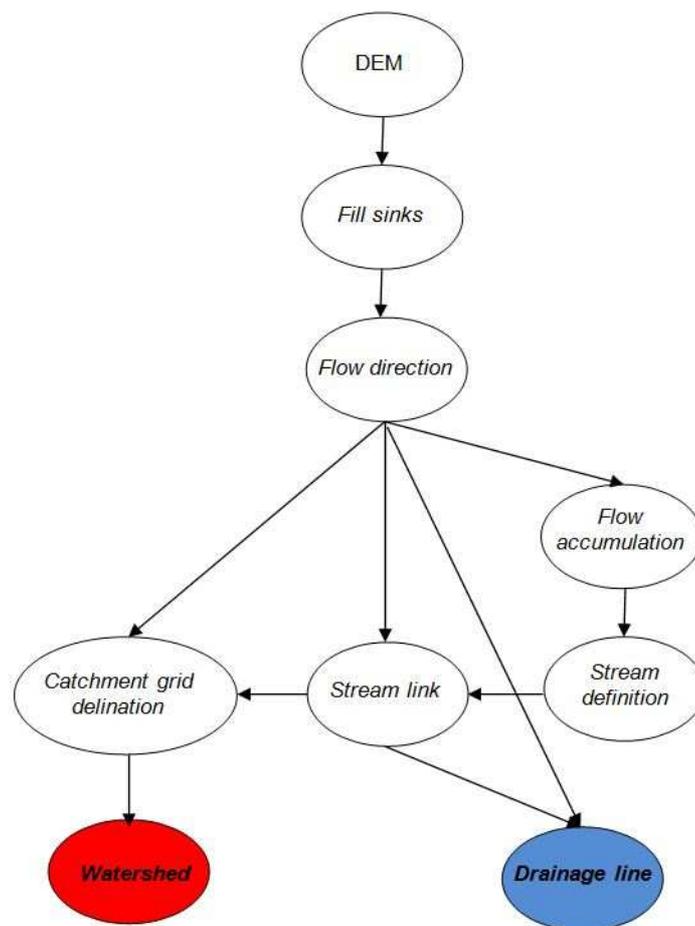


Abb. 5-11: Der Verarbeitungsprozess der Geländemodelle zur Erstellung der Einzugsgebietsflächen (engl. *watershed*) und des Gewässernetzes (engl. *drainage line*) (eigene Darstellung).

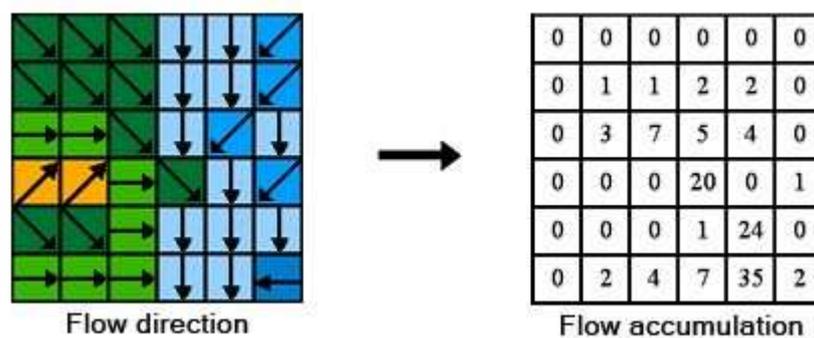


Abb. 5-12: Erstellung der Fließakkumulation (rechts) aus den Fließrichtungen (links). Die Nummern stehen für die Anzahl der Zellen, die in die jeweilige Zelle entwässern (aus ESRI 2010).

Anzahl der Pixel enthält, die in diese Zelle entwässern. Demzufolge enthält „der Pixel am Gebietsauslass die Fläche des gesamten Einzugsgebietes“(FÜRST 2004:210). Um aus den

Werten der Fließakkumulation ein Gewässernetz zu erzeugen, muss ein Grenzwert definiert werden, ab dem ein Gewässer zu fließen beginnt, bzw. im GIS eine Gewässerlinie erzeugt wird. Der übliche Standardwert, der auch für die Analysen dieser Arbeit verwendet wurde, beträgt ein Prozent der Gesamtpixel des verwendeten Geländemodells.

Nach der Erzeugung des Gewässernetzes konnten die Einzugsgebiete abgegrenzt werden. Die Ermittlung der Einzugsgebiete erfolgt ebenfalls auf Grundlage der Fließrichtungen sowie des definierten Gewässernetzes.

Da sich beide Untersuchungsgebiete in ihrer Größe und Geländemorphologie stark unterscheiden, wurden bei beiden Untersuchungsgebieten unterschiedliche Auswertungskriterien festgelegt. Im UG 1 erfolgte die Berechnung des Gewässernetzes und der Einzugsgebiete für das komplette Untersuchungsgebiet. Beim UG 2 wurden drei Punkte (*Drainage Punkte*) mit unterschiedlicher Lage im Bereich des Gebietsauslasses bestimmt, für die das jeweilige Einzugsgebiet und Gewässernetz erstellt wurde.

5.5 Visuelle Analysen - Überprüfen des Aster GDEM auf Anomalien

Das ASTER GDEM weist eine Reihe von technisch bedingten Anomalien auf, die bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert wurden. Das Überprüfen des ASTER GDEM auf die genannten Anomalien kann lediglich durch eine optische Analyse des Geländemodells durch den Betrachter erfolgen. Da die Anomalien des ASTER GDEM vorwiegend auf die Anzahl der verwendeten Bildstapel zurückzuführen sind, muss das ASTER GDEM mit dem beigefügten *NUM*-Layer der Bildstapel abgeglichen werden. Um die Anomalien visuell identifizieren zu können, wurde aus dem ASTER GDEM ein Layer mit einem schattierten Relief erstellt.

6. Ergebnisse

6.1 Untersuchungsgebiet 1 Mittelberg

6.1.1 Höhenabweichung zu Referenzhöhen

6.1.1.1 Statistische Analyse der Höhenabweichung

Im Folgenden wird die Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM vom Referenzgeländemodell im UG 1 - Mittelberg beschrieben. Die Analyse erfolgt mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Verfahren. In Tab. 6-1 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die unterschiedlichen Rastergrößen (ASTER GDEM/SRTM) dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung ist auf Abb. 6-1 für die Rastergröße ASTER GDEM und auf Abb. 6-2 für die Rastergröße SRTM als Kurvendiagramm dargestellt.

Tab. 6-1: UG 1: Statistik zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM für unterschiedliche Rastergrößen. Angaben in Metern (m) (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung; Min/Max = Minimale bzw. maximale Ausreißer).

Höhenabweichung	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM_R	SRTM
ME	-2,44	1,36	-2,47	4,07
RMSE	27,87	32,90	26,16	39,87
SD	27,77	32,87	25,96	39,67 m
Min / Max	-338 / 179	-180 / 189	-325 / 150	-183 / 231

Beim Vergleich der Höhengenaugkeit des ASTER GDEM mit dem SRTM in Tab. 6-1 kann eine geringere Höhenabweichung des ASTER GDEM festgestellt werden. Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind um ca. 5 m (RMSE) genauer als die des SRTM.

Der ME des ASTER GDEM liegt im negativen Bereich, demnach wird die Geländehöhe durch das ASTER GDEM systematisch unterschätzt. Der positive ME des SRTM_R und SRTM zeigen eine systematische Überschätzung der Geländehöhe an. Die Überschätzung durch das SRTM_R ist geringer als die des SRTM. Durch das *Resampling* haben sich die Höhenabweichungen bei beiden Geländemodellen verringert.

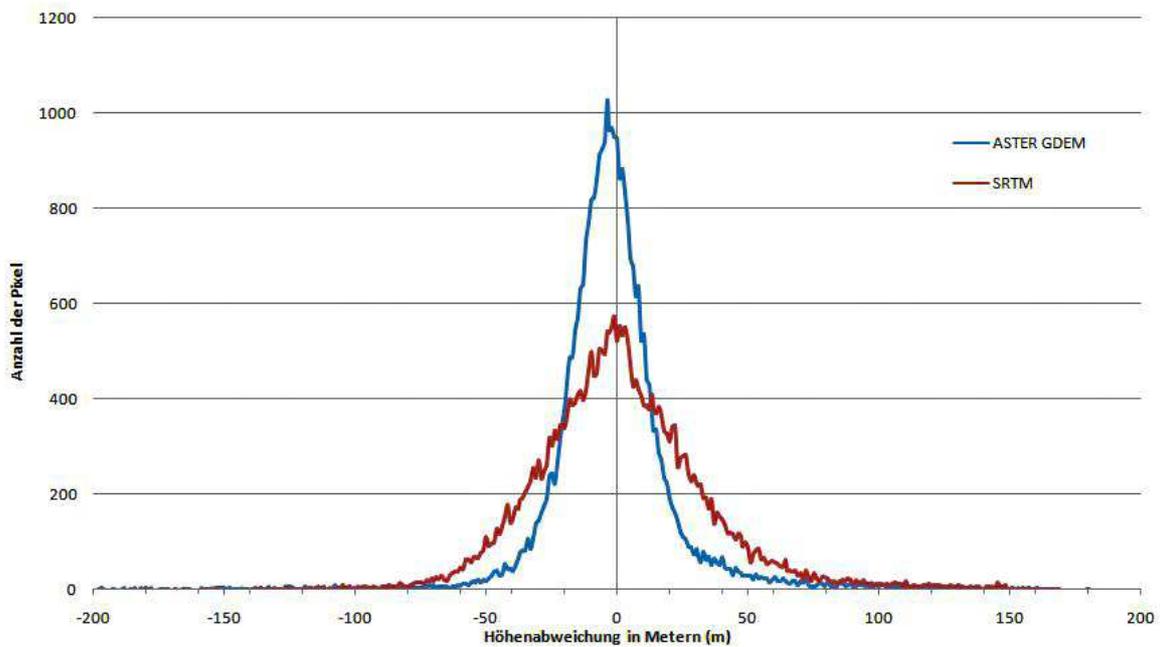


Abb. 6-1: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung für das ASTER GDEM und SRTM_R.

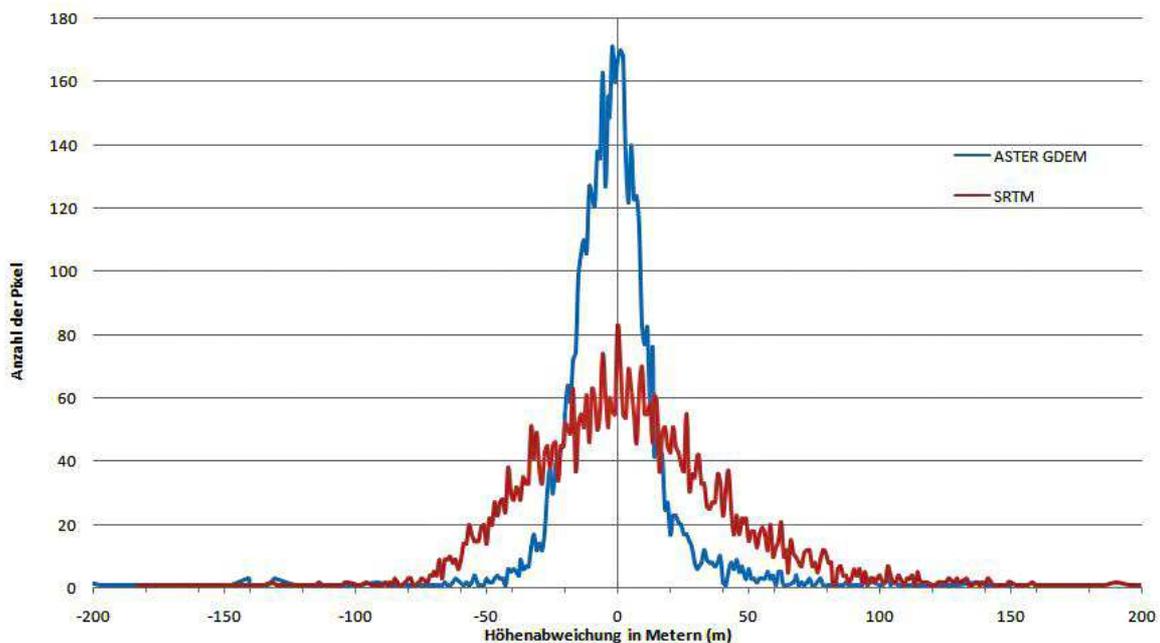


Abb. 6-2: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung für das ASTER GDEM_R und SRTM.

Die auf den Abbildungen 6-1 und 6-2 dargestellten Kurven weisen beide eine ähnliche Grundtendenz auf. Das Maximum wird im Bereich des Nullpunkts, demnach des Punktes mit Übereinstimmung der Modellhöhen zu den Referenzhöhen, erreicht. Die Verteilung des Höhenfehlers nimmt ebenfalls bei beiden Geländemodellen radial, vom Nullpunkt ausgehend,

in positiver wie negativer Richtung ab. Das ASTER GDEM enthält deutlich mehr Werte im niedrigen Abweichungsbereich als das SRTM, was ebenfalls der Kurvenverlauf auf Abb. 6-1 bestätigt. Dennoch weist das ASTER GDEM höhere Ausreißer auf als das SRTM (vgl. Tab. 6-1). Der RMSE gewichtet größere Werte höher, weshalb die RMSE-Werte des ASTER GDEM schlechter ausfallen als durch den Kurvenverlauf auf den Abbildungen 6-1 und 6-2 zunächst anzunehmen wäre.

6.1.2 Lage der Höhenabweichung im Untersuchungsgebiet

Auf den Abbildungen 6-3 und 6-4 ist die Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R von den Referenzhöhen für das UG 1 dargestellt. Bei positiven Werten wird die Geländehöhe durch das Geländemodell überschätzt, bei negativen Werten wird die

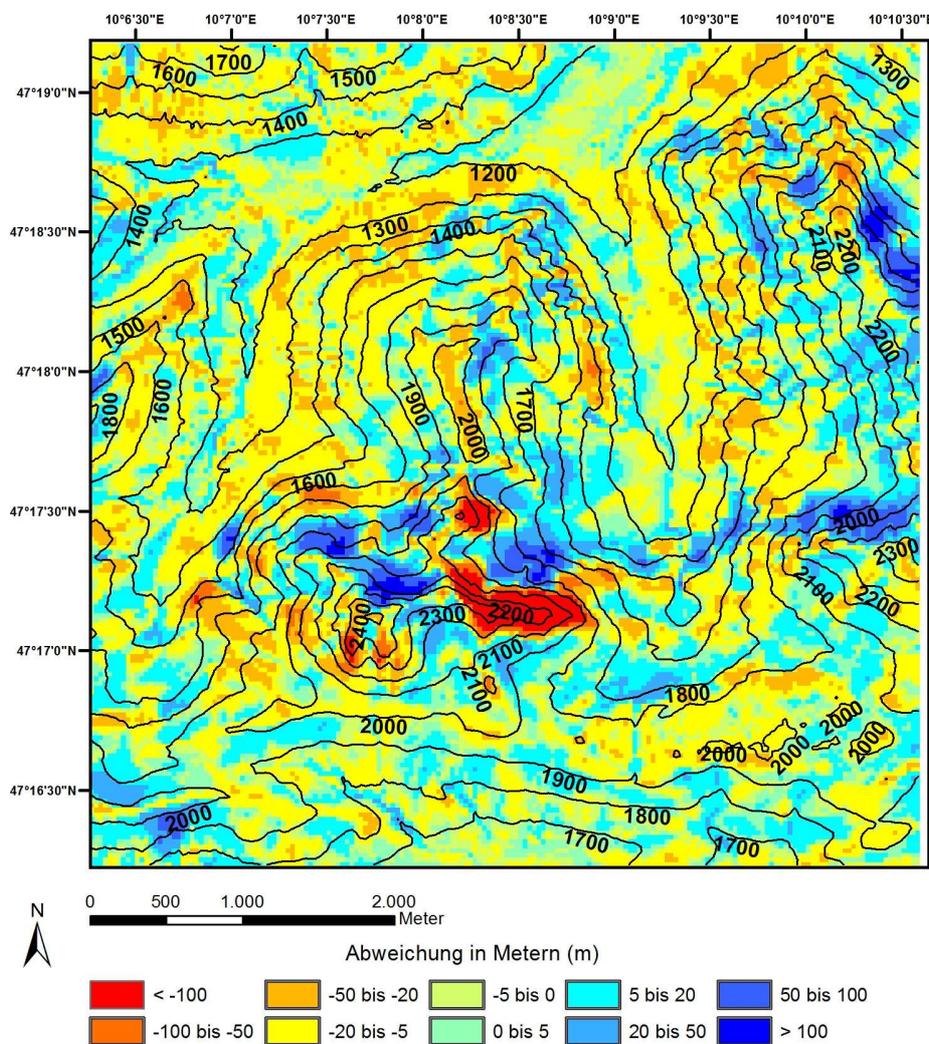


Abb. 6-3: UG 1: Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM vom DSM_R (© Land Vorarlberg).

Geländehöhe unterschätzt. Für diese Auswertung wurde bei beiden Geländemodellen die *Rastergröße* des ASTER GDEM verwendet.

Wie auf Abb. 6-3 zu erkennen, befinden sich die größten Höhenabweichungen, sowohl negativ als auch positiv, in den hoch gelegenen Gipfel- und Kammgebieten. Auffällig hohe Abweichungen sind vor allem im Bereich des Widdersteins ($47^{\circ}17'00''\text{N}$; $10^{\circ}08'00''\text{O}$) festzustellen. Die Höhenabweichungen betragen in diesem Bereich über ± 100 m. Des Weiteren kann in diesem Bereich ein scharfer Übergang von hohen Werten negativer und positiver Höhenabweichung gemessen werden.

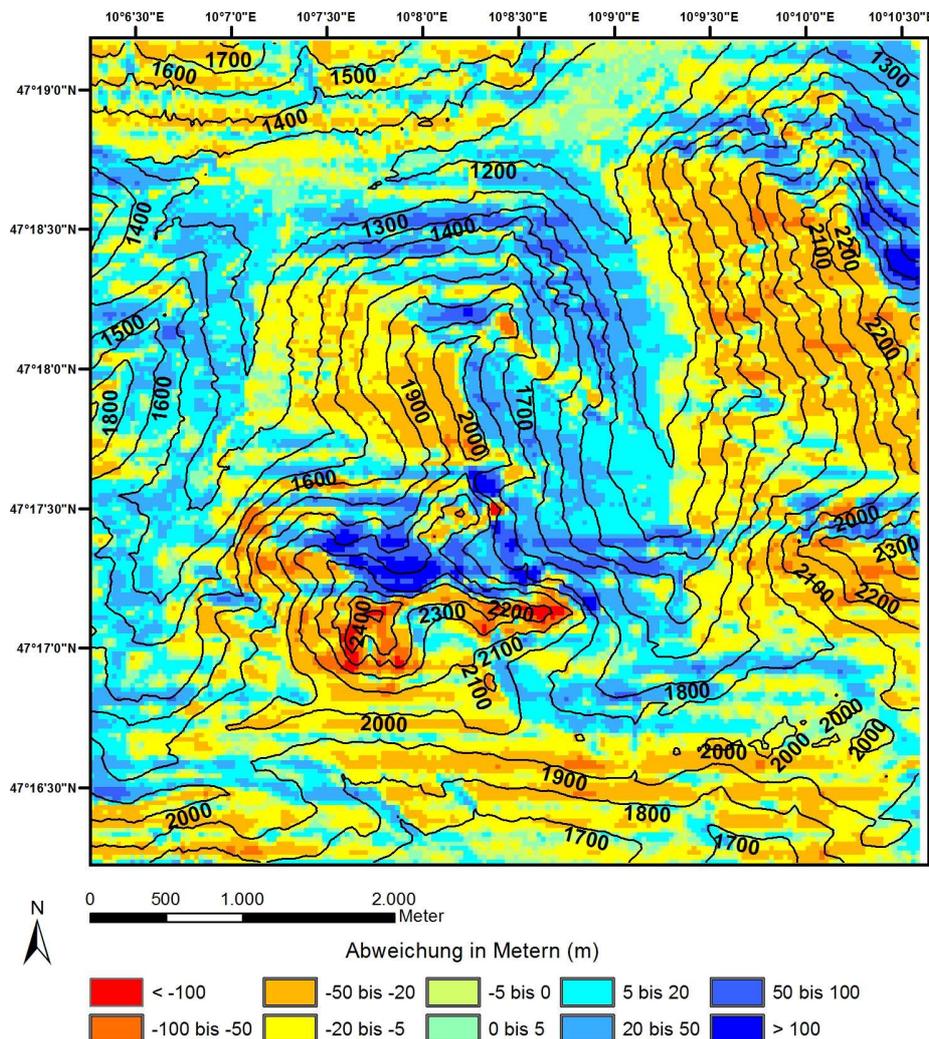


Abb. 6-4: UG 1: Lage der Höhenabweichung des SRTM_R vom DSM_R (© Land Vorarlberg).

Wie das ASTER GDEM hat das SRTM_R besonders hohe Abweichungen in den Gipfel- und Kammgebieten (vgl. Abb. 6-3 mit 6-4). Hierbei ist ebenso der Bereich des Widderstein ($47^{\circ}17'00''\text{N}$; $10^{\circ}08'00''\text{O}$) mit hohen Höhenabweichungen zu nennen. Wie beim ASTER GDEM

ist auch hier ein scharfer Wechsel von negativen Höhenabweichungen und positiven Höhenabweichungen erkennbar. Auffällig ist eine Tendenz des SRTM_R die Geländehöhe von Nord und Nordöstlich exponierter Hänge systematisch zu überschätzen. Umgekehrt wird bei Süd und Südöstlich exponierten Hängen die Geländehöhe eher systematisch unterschätzt.

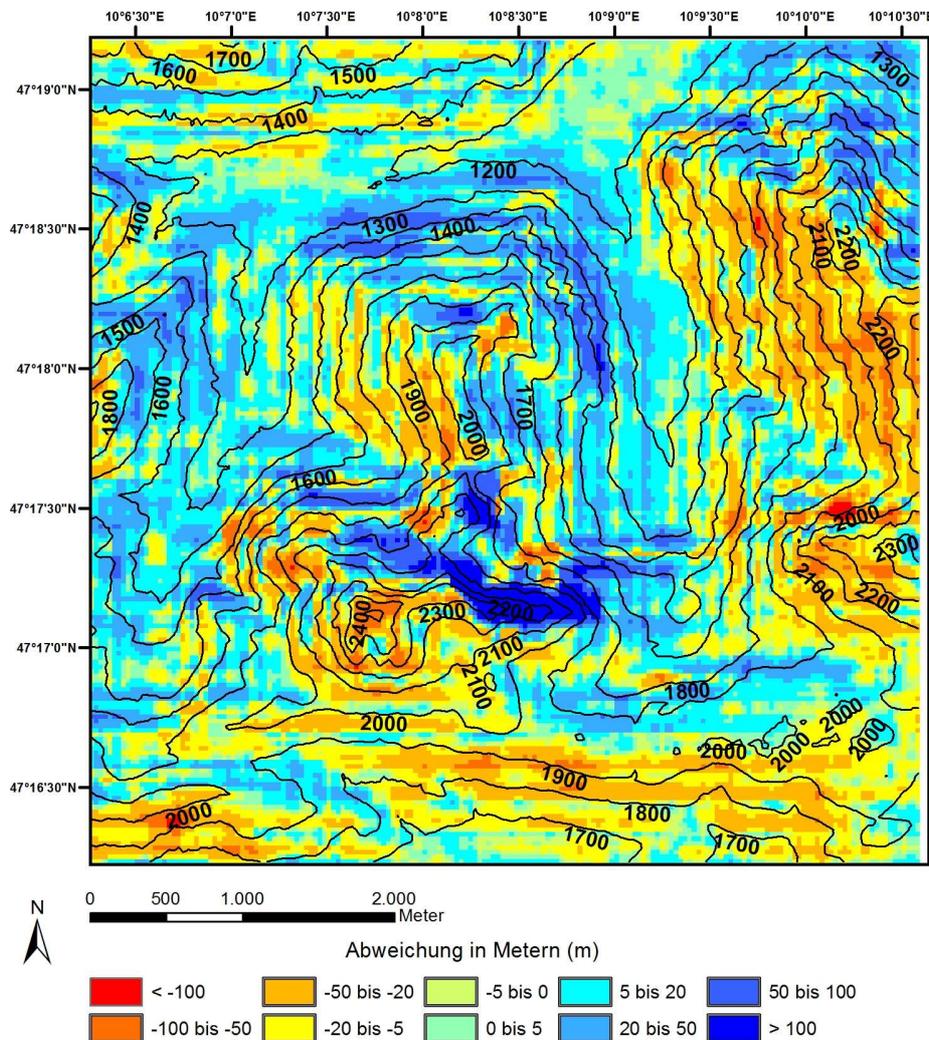


Abb. 6-5: UG 1: Lage der Differenz der Höhenabweichung von SRTM - ASTER GDEM.

Auf Abb. 6-5 ist die Lage der Differenz der Höhenabweichung des SRTM vom ASTER GDEM dargestellt. Die Gebiete der höchsten Abweichungen liegen, wie auf den Abbildungen 6-3 und 6-4, im Bereich der Gipfel und Kämme. Dies zeigt an, dass es ebenfalls hohe Höhendifferenzen zwischen den beiden Geländemodellen geben muss.

6.1.3 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Reliefklasse

Die Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell wird ebenfalls für vier Reliefklassen ermittelt. Die Reliefklassen wurden aus dem Referenzgeländemodell, mit einer in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Methode, erstellt. Die Ergebnisse der Reliefklassifizierung sind auf Abb. 6-6 dargestellt. Wie auf Abb. 6-6 zu erkennen, stellen die Hänge die am häufigsten vorkommende Reliefklasse und decken somit den Großteil der Fläche des Untersuchungsgebietes ab. Die Käme bilden meist den Bereich der großen, zusammenhängenden Gipfel und Bergkämme, treten aber auch im Bereich lokaler Erhebungen auf. Die Senken lagern meist den Gipfel und Kambereichen an, kommen aber ebenfalls am Boden von Kerb- und Sohlenkärbtälern vor. Im Bereich des weniger stark bewegten Geländes befinden sich die Ebenen.

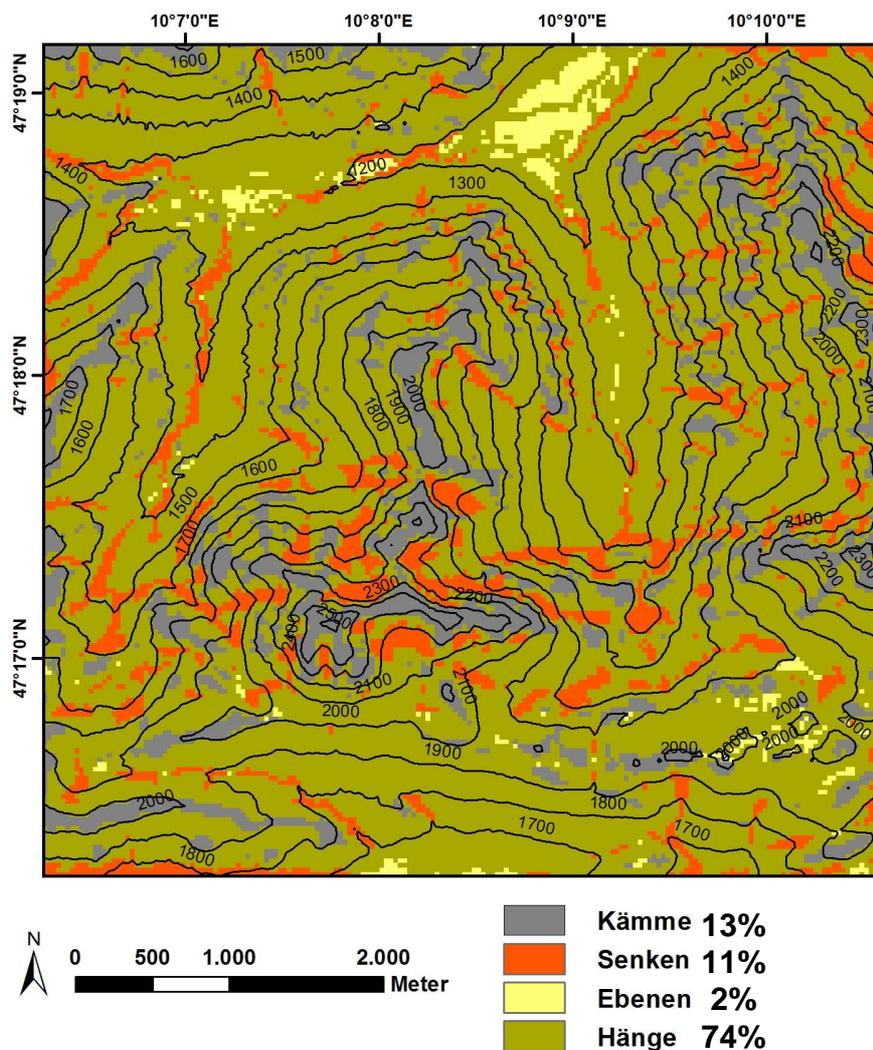


Abb. 6-6: UG 1: Lage und Anteilswerte der Reliefklassen (erzeugt aus DSM © Land Vorarlberg).

Da eine korrekte Validierung der Reliefklassifizierung nur im Gelände möglich ist, muss für die Zwecke dieser Arbeit die visuelle Betrachtung der Höhenlinien in Kombination mit den Reliefklassen als Validierung der Reliefklassifizierung ausreichen. Hierbei ist festzustellen, dass der Verlauf der Höhenlinien größtenteils mit der zu erwartenden Morphologie der Reliefklasse übereinstimmt.

Die Reliefklassen wurden im Folgenden mit der Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell aus Kapitel 6.1.2 verschnitten. In Tab. 6-2 und den Abbildungen 6-7, 6-8, 6-9 und 6-10 sind die Ergebnisse für jede Reliefklasse als Diagramm dargestellt.

Tab. 6-2: UG 1: Statistik zur Höhenabweichung für die einzelnen Reliefklassen. Angaben in Metern. (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung)

	ME		RMSE		SD	
	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM	SRTM_R
Kämme	-22,99	-15,06	51,83	39,89	45,95	36,94
Senken	18,48	26,55	37,38	48,55	32,50	40,64
Ebenen	-2,16	1,75	6,42	8,16	6,05	7,98
Hänge	-1,99	0,45	19,43	28,80	19,33	28,79

Kämme

Die Geländehöhen des SRTM_R sind im Bereich der Reliefklasse Kämme genauer. Dies belegt der deutlich niedrigere RMSE des SRTM_R (vgl. Tab. 6-2). Beim ASTER GDEM sind für diese Reliefklasse die höchsten Höhenabweichungen von allen Reliefklassen festzustellen. Anhand des Kurvenverlaufes könnten zunächst genauere Höhenwerte des ASTER GDEM angenommen werden. In den RMSE des ASTER GDEM fließen die höchsten, beim ASTER GDEM gemessenen, Ausreißer aus dem negativen Höhenabweichungsbereich ein (vgl. Tab. 6-1). Diese werden auf Abb. 6-7 durch die Begrenzung der X-Achse auf ± 150 m nicht angezeigt. Da der RMSE große Werte höher gewichtet, liegt der Grund für den erhöhten RMSE an den hohen Ausreißerwerten des ASTER GDEM.

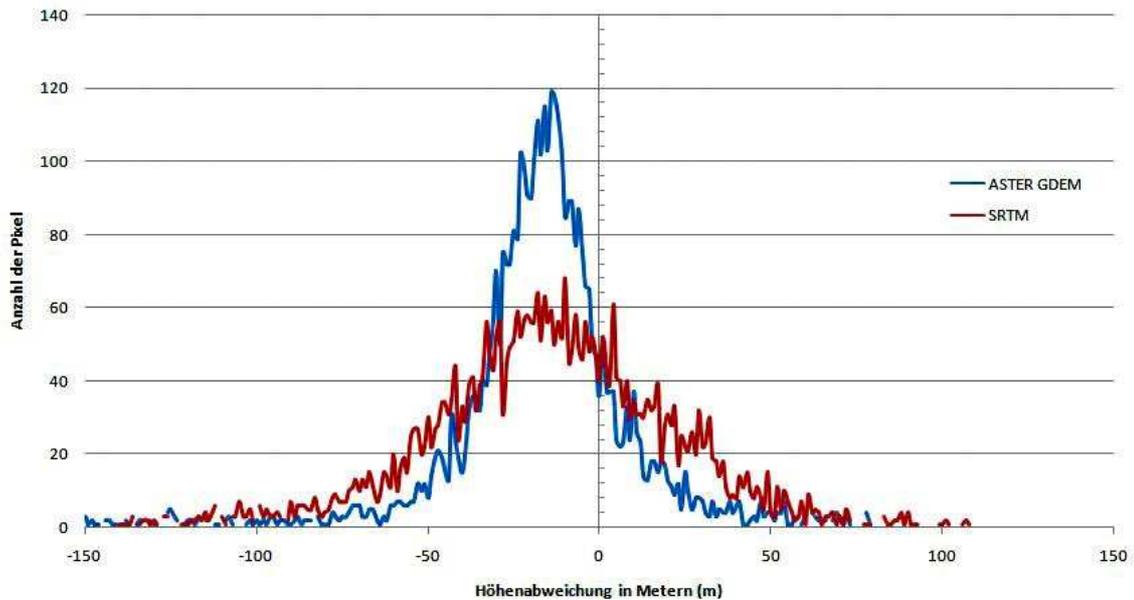


Abb. 6-7: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Kämme*.

Wie auf Abb. 6-7 zu erkennen ist, liegt eine deutliche Tendenz beider Geländemodelle in den negativen Höhenabweichungsbereich vor. Dies belegt der ME von -22,99 m für das ASTER GDEM sowie -15,06 m für das SRTM_R. Demnach neigen beide Geländemodelle dazu, die Geländehöhe im Bereich der Kämme systematisch zu unterschätzen.

Senken

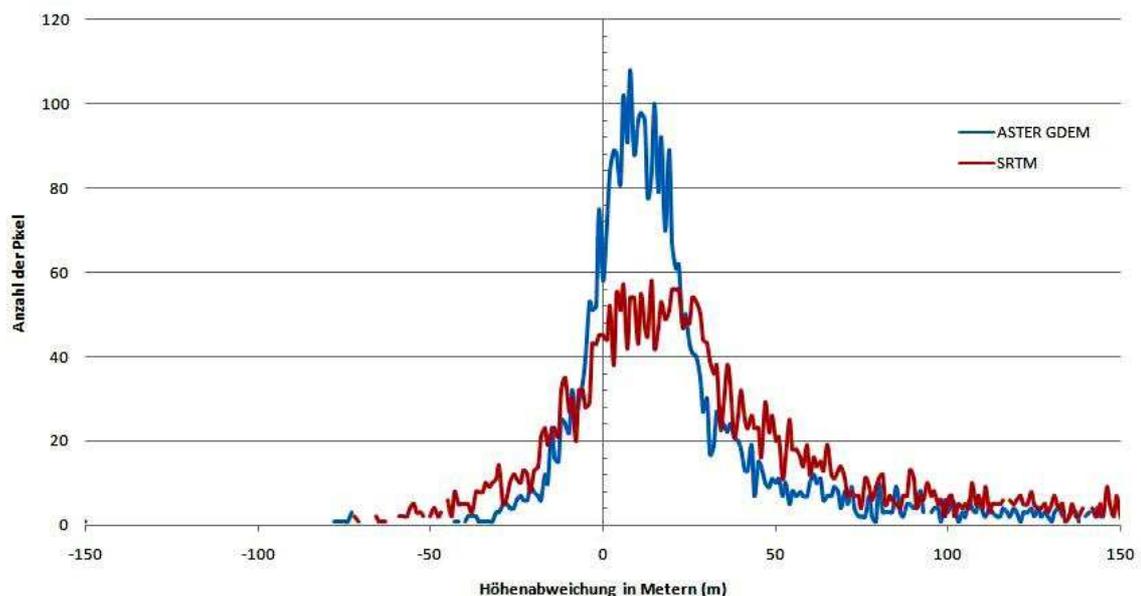


Abb. 6-8: UG 1: Die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Senken*.

Im Bereich der Reliefklasse Senken sind die Geländehöhen des ASTER GDEM genauer. Der RMSE des ASTER GDEM ist deutlich niedriger als der des SRTM_R (vgl. Tab. 6-2).

Vergleicht man die Kurve auf Abb. 6-8 wird deutlich, dass eine Gewichtung der Häufigkeitsverteilung bei beiden Geländemodellen in den positiven Höhenabweichungsbereich erfolgt. Daraus lässt sich folgern, dass die Geländehöhe im Bereich der Senken bei beiden Geländemodellen systematisch überschätzt wird. Diese Tendenz ist beim ASTER GDEM mit einem ME von 18,48 m geringer ausgeprägt als beim SRTM_R mit 26,55 m. Zudem sind beim SRTM_R für die Reliefklasse Senken die höchsten Höhenabweichungen (RMSE) von allen Reliefklassen festzustellen.

Ebenen

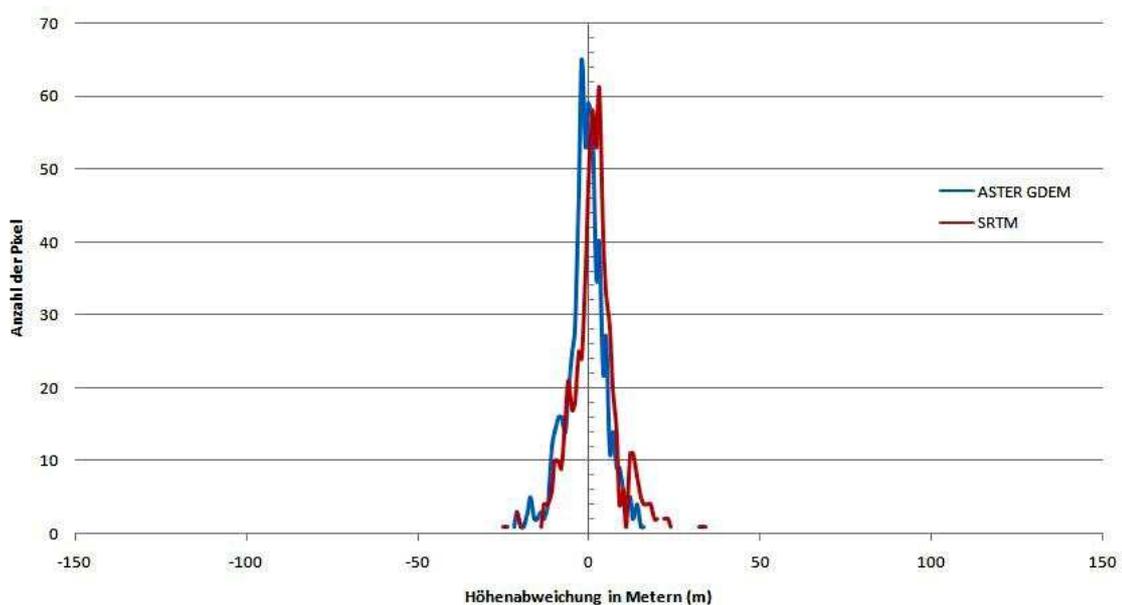


Abb. 6-9: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Ebenen*.

Bei den Ebenen handelt es sich mit 2% aller Pixel um die kleinste Reliefklasse. Dementsprechend sind die erhobenen Werte von ihrer Aussagekraft im Vergleich zu den anderen Klassen als eher gering einzuschätzen.

Die Höhendaten für die Reliefklasse Ebenen weisen bei beiden Geländemodellen keine signifikanten Abweichungen auf. Mit einem RMSE von unter 10 m werden die Geländehöhen im Bereich der Ebenen bei beiden Geländemodellen am präzisesten von allen Reliefklassen wiedergegeben. Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind dennoch geringfügig genauer als die des SRTM_R.

Unter Betrachtung des Kurvenverlaufs der Häufigkeitsverteilung auf Abb. 6-9 ist ebenfalls eine Tendenz bei beiden Geländemodellen in den negativen (ASTER GDEM) und positiven (SRTM_R) Höhenabweichungsbereich zu erkennen. Das ASTER GDEM neigt mit einem ME von -2,16 m geringfügig dazu, die Geländehöhe im Bereich der Ebenen zu unterschätzen. Beim SRTM_R ist es umgekehrt. Der ME von 1,75 m zeigt eine Tendenz zur Überschätzung der Geländehöhe an.

Hänge

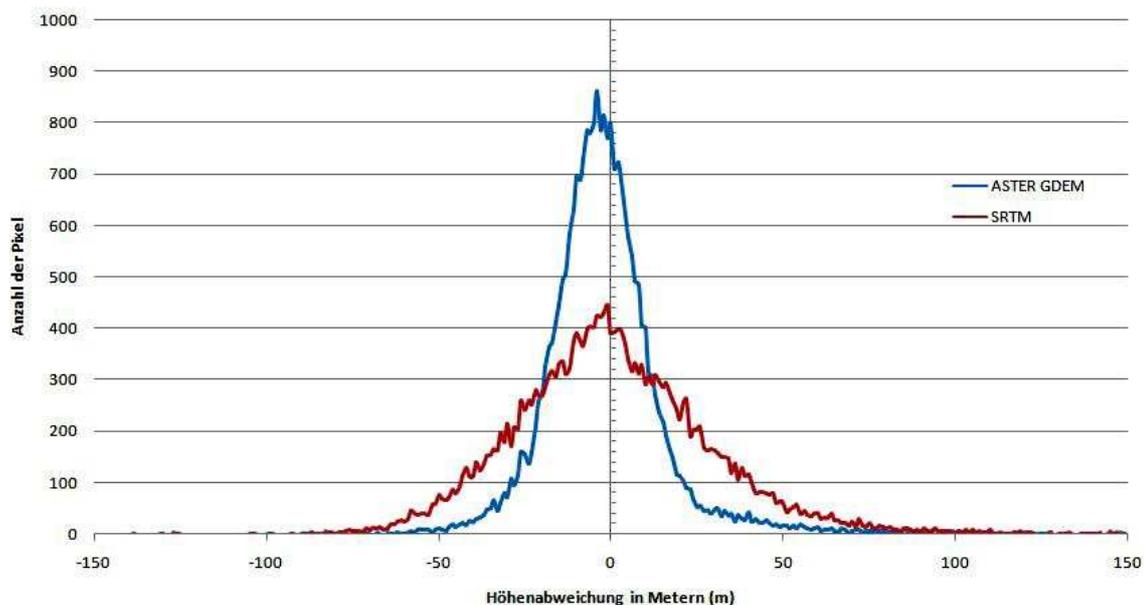


Abb. 6-10: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Hänge*.

Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind im Bereich der Reliefklasse *Hänge* genauer. Dies belegt der deutlich niedrigere RMSE des ASTER GDEM (vgl. Tab. 6-2). Das ASTER GDEM neigt mit einem ME von -1,99 m dazu, die Geländehöhe der *Hänge* zu unterschätzen. Das SRTM_R überschätzt mit einem ME von 0,45 m die Geländehöhe geringfügig.

6.1.1.4 Höhenabweichung in Abhängigkeit von der Landbedeckung

Die Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell wird für drei Landbedeckungsklassen ermittelt. Die Landbedeckungsklassen wurden mit einer, in Kapitel 5.2.4.1 beschriebenen Methode, erstellt. Die Ergebnisse der Landbedeckungsklassifizierung sind auf Abb. 6-11 dargestellt.

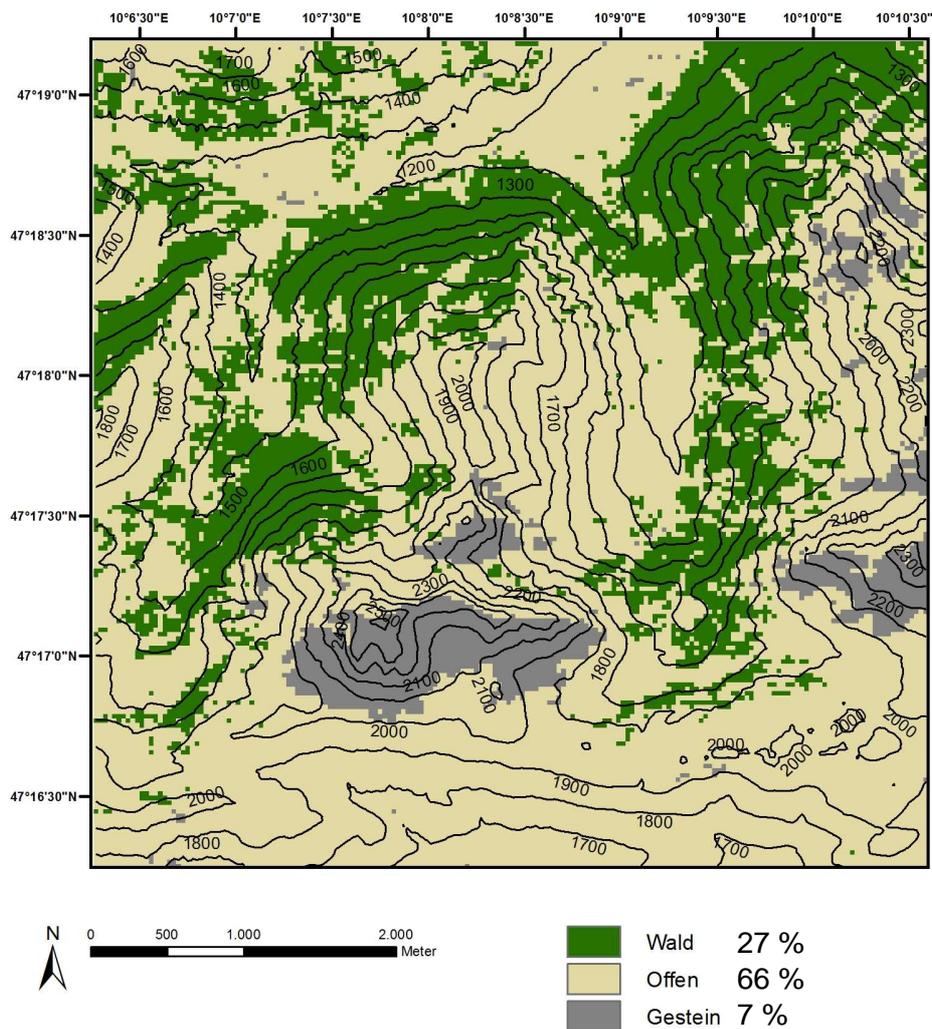


Abb. 6-11: UG 1: Lage und Anteilswerte der Landnutzungsklassen.

Die Landbedeckungsklassifizierung erfolgt für die Landbedeckungsklassen Wald, Offen und Gestein. Wie in Kapitel 5.2.4.1 beschrieben, wird zudem eine Auswertung der Landbedeckungsklasse Wasser angestrebt. Im UG 1 konnte diese Landbedeckungsklasse nicht kartiert werden und findet somit keine Berücksichtigung in den folgenden Auswertungen.

Die größte Landbedeckungsklasse sind die Offenen Flächen mit niedrigem Bewuchs. Diese decken 66% der Fläche des Untersuchungsgebietes ab (vgl. Abb. 6-11). Die Offenen Flächen befinden sich im Übergangsbereich zwischen den Waldgebieten und dem Gestein. Das Gestein tritt vorwiegend im Höhenbereich ab 2000 Metern auf und ist als Landbedeckungsklasse besonders an den Gipfelbereichen des Widdersteins, Geißhorns und Zwölfer vorzufinden.

Die Waldgebiete liegen in den tieferen Lagen der Täler und Hänge bis zu einer Höhe von ca. 1800 m. Ab einer Höhe von ca. 1800 m bildet die Waldgrenze eine natürliche Barriere (HAGEDORN 2006).

Die Landbedeckungsklassen wurden im Folgenden mit der Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell aus Kapitel 6.1.1.2 verschnitten. In Tab. 6-3 und den Abbildungen 6-12, 6-13 und 6-14 sind die Ergebnisse der Verschnidung für jeden Landbedeckungsklasse als Diagramm dargestellt.

Tab. 6-3: UG 1: Statistik zur Höhenabweichung für die einzelnen Landbedeckungsklassen. Angabe in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel des quadratischen Mittelwertes der Höhenabweichung, SD: Standardabweichung)

	ME		RMSE		SD	
	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM	SRTM_R
Gestein	-13,60	-18,48	53,67	51,82	51,93	48,42
Wald	-4,46	6,22	21,07	30,94	20,59	30,31
Offen	-0,49	1,40	26,43	31,15	26,43	31,12

Gestein

Auf Abb. 6-12 ist die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse Gestein dargestellt. Die Geländehöhen sind bei beiden Geländemodellen im Bereich der Landbedeckungsklasse Gestein sehr ungenau. Zudem werden die höchsten Höhenabweichungen von allen Landbedeckungsklassen bei beiden Geländemodellen festgestellt.

Wie der Kurvenverlauf auf Abb. 6-12 zeigt, liegt ein Großteil der Höhenabweichungen des SRTM_R im negativen Abweichungsbereich. Beim ASTER GDEM ist diese Tendenz aus dem Kurvenverlauf nicht abzuleiten. Dennoch neigen beide Geländemodelle dazu, die Geländehöhe im Bereich der Landbedeckungsklasse Gestein zu unterschätzen. Hierbei ist die Tendenz des SRTM_R mit einem ME von -18,48 m deutlicher ausgeprägt als die des ASTER GDEM mit einem ME von -13,60 m.

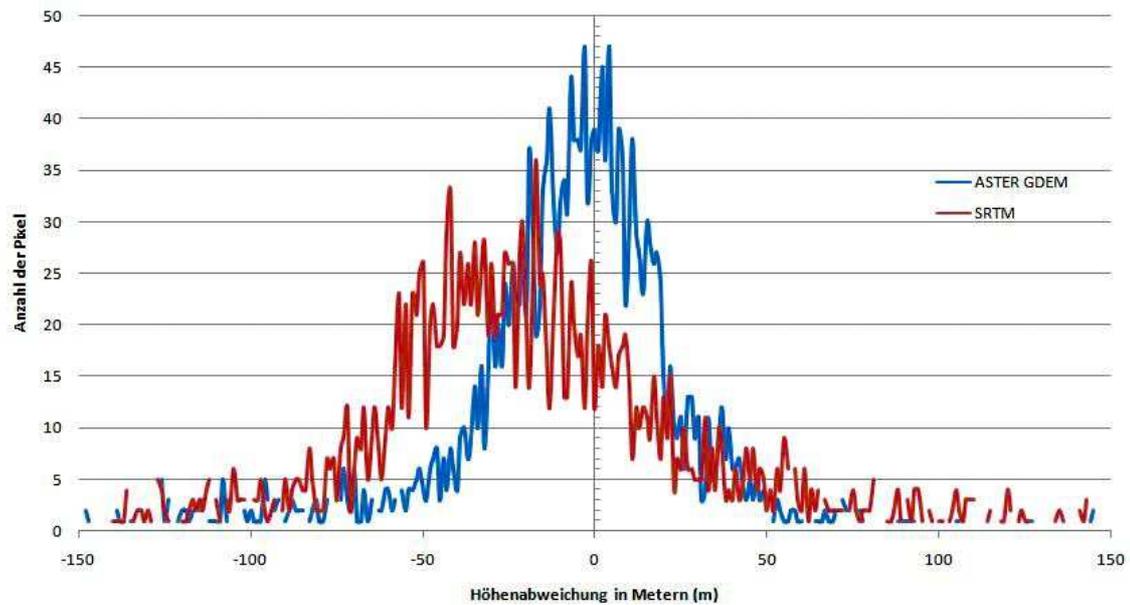


Abb. 6-12: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse *Gestein*.

Wald

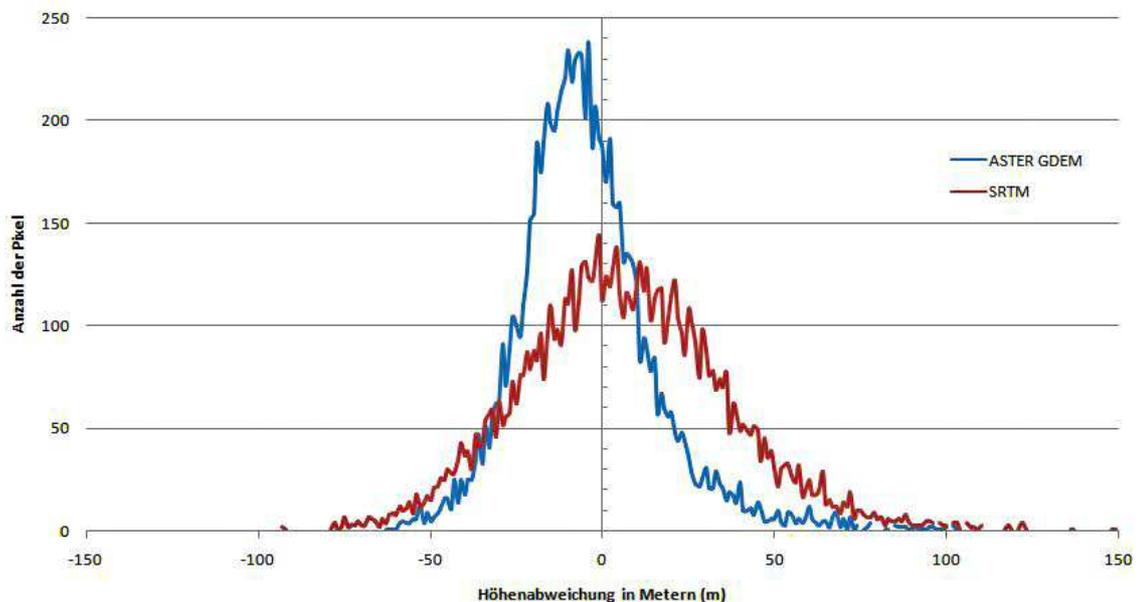


Abb. 6-13: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse *Wald*.

Im Bereich der Landbedeckungsklasse Wald fallen die Höhenabweichungen für das ASTER GDEM im Vergleich zum SRTM_R deutlich geringer aus. Im Durchschnitt sind die Höhenabweichungen des ASTER GDEM um ca. 10 m RMSE niedriger als die des SRTM_R.

Vergleicht man den Kurvenverlauf der Abb. 6-13 wird deutlich, dass beim ASTER

GDEM eine Gewichtung der Häufigkeitsverteilung in den negativen Höhenabweichungsbereich erfolgt. Das SRTM_R orientiert sich in den positiven Bereich. Dies belegt ebenfalls der ME des ASTER GDEM mit -4,45 m bzw. 6,22 m beim SRTM_R. Demnach werden die Geländehöhen im Bereich der Landbedeckungsklasse Wald vom ASTER GDEM unterschätzt, während die Geländehöhen vom SRTM_R überschätzt werden. Für die Landbedeckungsklasse Wald werden zudem für beide Geländemodelle die geringsten Höhenabweichungen innerhalb aller Landbedeckungsklassen gemessen.

Offen

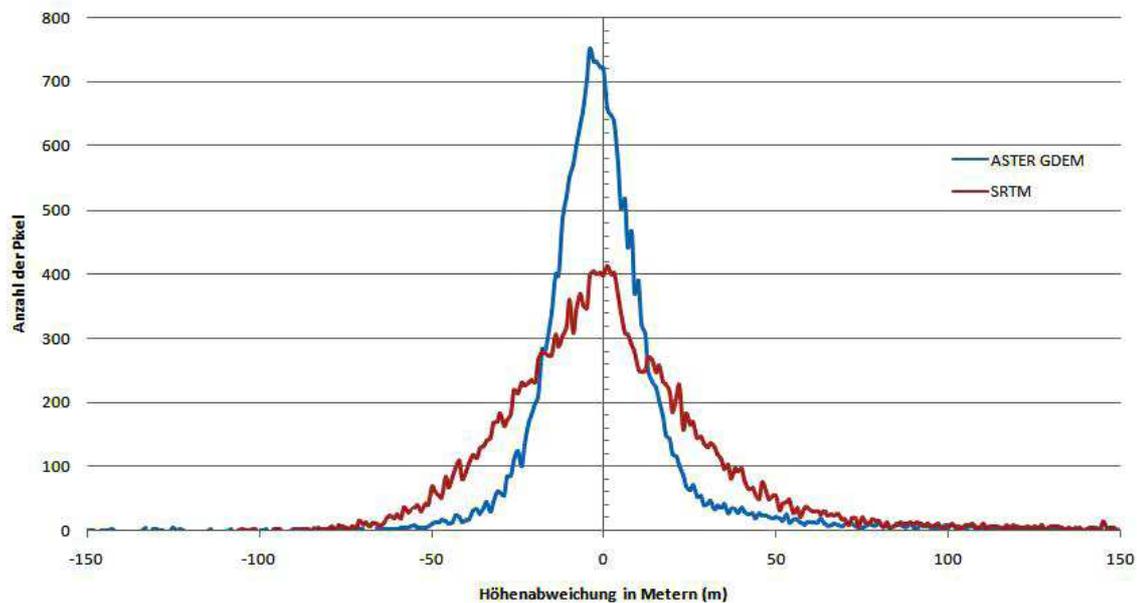


Abb. 6-14: UG 1: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckung *Offen*.

Für die Landbedeckungsklasse *Offen* ist die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung auf Abb. 6-14 dargestellt. Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind genauer als die des SRTM_R. Die Geländehöhe wird vom ASTER GDEM mit einem ME von -0,49 m nur geringfügig unterschätzt. Das SRTM_R weist mit einem ME von 1,40 m eine leichte Tendenz auf, die Geländehöhe zu überschätzen.

6.1.1.5 Höhenabweichung in Abhängigkeit der Bildstapel (ASTER GDEM)

Um die Genauigkeit des ASTER GDEM in Abhängigkeit zur Anzahl der, für die Erzeugung der Geländehöhen verwendeten Bildstapel zu analysieren, wird die Lage der

Höhenabweichungen aus Kapitel 6.1.2 mit der Anzahl der Bildstapel verschnitten. Auf Tab. 6-4 sind die Ergebnisse der Verschneidung dargestellt.

Bei Betrachtung der Werte des RMSE und der SD ist festzustellen, dass sich beide Werte mit zunehmender Anzahl der Bildstapel tendenziell verringern. Daraus lässt sich folgern, dass mit zunehmender Anzahl der Bildstapel die Genauigkeit der Höheninformation des Pixels systematisch zunimmt. Dieser Trend wird bei dieser Auswertung lediglich durch die Bildstapelanzahl 11 und 12 widerlegt. Die Klasse 12 hat mit 0,87% Pixelanteil nur sehr wenige Pixel, und ist demnach nicht repräsentativ.

Tab.6-4: UG 1: Höhenabweichung des ASTER GDEM in Abhängigkeit von den verwendeten Bildstapeln im UG 1.

Anzahl der Bildstapel	Pixelanteil	ME	RMSE	SD
1	0,05%	-136,31	181,31	123,47
2	0,34%	-36,99	128,74	123,74
3	1,57%	-24,38	102,55	99,71
4	2,88%	1,84	68,07	68,08
5	5,22%	7,47	39,54	38,84
6	10,42%	-0,56	27,86	27,85
7	29,10%	-3,35	16,17	15,82
8	32,27%	-3,38	13,69	13,26
9	8,65 %	-0,57	13,29	13,28
10	5,36%	0,11	12,74	12,74
11	3,27%	-1,85	10,69	10,53
12	0,87%	-1,50	11,32	11,24

6.1.2 Geomorphometrische Analysen

6.1.2.1 Hangneigung

Auf Abb. 6-15 sind die Anteilswerte der Hangneigung für das UG 1 dargestellt. Alle Kurven zeigen einen ähnlichen Trend. Am häufigsten kommen bei allen Geländemodellen die Hangneigungen zwischen 20° und 40° vor. Der Kurvenverlauf des ASTER GDEM zeigt die größten Übereinstimmungen mit dem Kurvenverlauf des DSM_R. Das SRTM_R neigt dazu, die flachen Hänge unter 20° zu überschätzen. Beim SRTM werden die Hangneigungen von 5 - 20° überschätzt. Der unruhige Verlauf des SRTM ist bedingt durch geringere Anzahl der verwendeten Pixel.

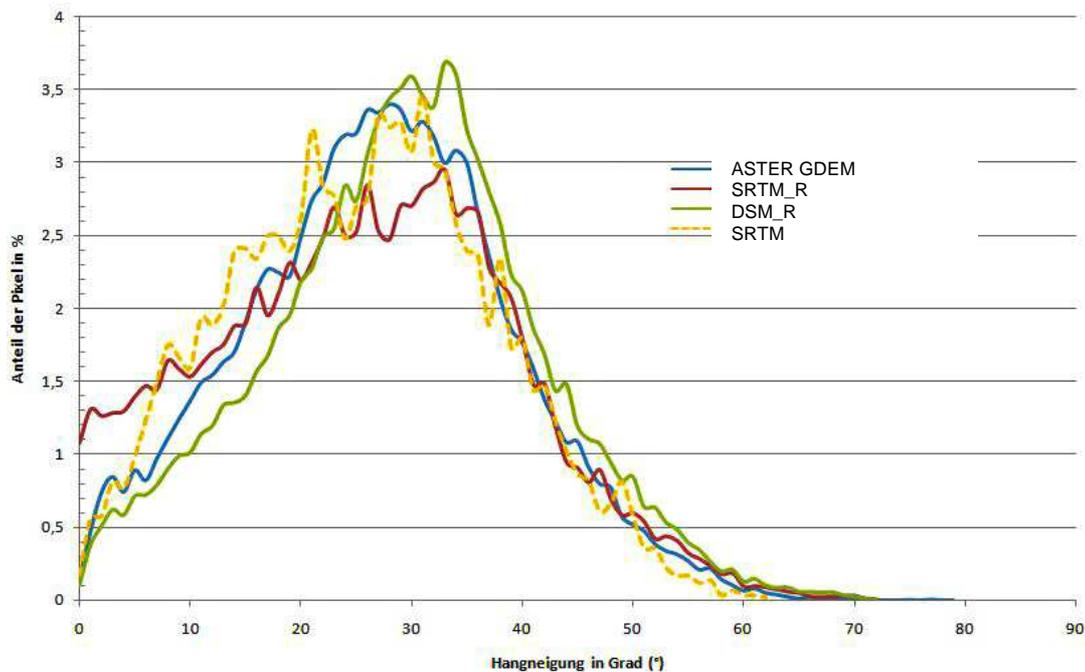


Abb. 6-15: UG 1: Prozentuale Verteilung der Hangneigungswerte für das ASTER GDEM, SRTM_R, DSM_R (Rastergröße ASTER GDEM) und SRTM.

In Tab. 6-5 ist die Häufigkeitsverteilung der Hangneigungen nach den Klassen von HAYAKAWA (2008) eingeteilt. Vergleicht man den Kurvenverlauf des ASTER GDEM auf Abb. 6-15 mit den Anteilswerten aus Tab. 6-5, sind beim ASTER GDEM die größten Übereinstimmungen mit dem Referenzgeländemodell (DSM_R) zu erkennen. Die flachen Hänge ($0 - 12^\circ$) werden vom SRTM_R überschätzt. Das SRTM unterschätzt darüber hinaus die steilen Hänge ($>33^\circ$). Beim SRTM_R liegen außerdem deutlich weniger Hangneigungen im mittleren Hangneigungsbereich ($13-32^\circ$).

Tab. 6-5: UG 1: Die Häufigkeitsverteilung der Hangneigung für Hangneigungsklassen nach HAYAKAWA (2008).

	0 - 12°	13 - 32°	>33°
ASTER GDEM	10,88%	53,24%	35,88%
SRTM_R	16,65%	45,34%	38,01%
DSM_R (ASTER GDEM)	9,68%	53,66%	36,66%
SRTM	15,43%	55,31%	29,26%

In Tab. 6-6 sind die statistischen Ergebnisse zur Abweichung der Hangneigung der Geländemodelle zum Referenzgeländemodell angegeben. Generell weisen beide Geländemodelle eine systematische Tendenz auf, die Hangneigung geringfügig zu unterschätzen. Beim ASTER GDEM ist der ME mit $-2,21^\circ$ im Vergleich zum SRTM_R mit $-1,89^\circ$ leicht erhöht. Die SD fällt beim ASTER GDEM mit $8,15^\circ$ niedriger aus als beim SRTM_R mit $11,03^\circ$.

Andere Ergebnisse ergeben sich beim Vergleich der beiden Modelle bei einem *Resampling* auf das SRTM. Hier weist das SRTM statistisch gesehen genauere Hangneigungen auf als das ASTER GDEM_R. Der ME des SRTM ist mit $-0,38^\circ$ geringer als der des ASTER GDEM_R mit $-3,34^\circ$. Die SD des SRTM ist ebenfalls niedriger als die des ASTER GDEM_R. Durch das *Resampling* verbessert sich die Übereinstimmung der Hangneigungen des SRTM mit den Referenzhangneigungen, während sich die des ASTER GDEM_R verschlechtert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Hangneigungen des ASTER GDEM sowohl anteilig, wie auch in der statistischen Genauigkeit eine höhere Übereinstimmung mit den Referenzhangneigungen aufweisen als das SRTM. Demnach sind die Hangneigungen des ASTER GDEM im UG 1 genauer.

Tab. 6-6: UG 1: Abweichung der Hangneigung des ASTER GDEM und SRTM von den Hangneigungen des Referenzgeländemodells. (ME= Mittlerer Fehler, SD = Standardabweichung, Min = Minimalwert, Max = Maximalwert).

	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM_R	SRTM
ME	$-2,21^\circ$	$-1,89^\circ$	$-3,34^\circ$	$-0,38^\circ$
SD	$8,15^\circ$	$11,03^\circ$	$9,25^\circ$	$8,68^\circ$
Min	$-64,88^\circ$	$-61,54^\circ$	$-63,61^\circ$	$-46,59^\circ$
Max	$57,91^\circ$	$55,72^\circ$	$34,17^\circ$	$34,73^\circ$

6.1.2.2 Höhenlinien

Die aus den Geländemodellen abgeleiteten Höhenlinien sind auf Abb. 6-16 für einen Beispielausschnitt des UG 1 dargestellt. Das DSM_R (grün) soll als Referenz für den Verlauf der Höhenlinien fungieren.

Der unruhige Verlauf der Höhenlinien des DSM_R lässt vermuten, dass die Geländeform detailliert dargestellt wird. Die aus dem ASTER GDEM erzeugten Höhenlinien adaptiert sich größtenteils an die Referenzhöhenlinien des DSM (vgl. Abb. 6-16 A, C). Die Linienführung ist sehr gerade und gleichmäßig. Jedoch werden kleinere Reliefänderungen nicht sichtbar (vgl. Abb. 6-16 A, D). Der Verlauf der SRTM-Höhenlinien weicht in manchen Bereichen deutlich von den Referenzhöhenlinien ab (vgl. Abb. 6-16 A, B, D). Unter Berücksichtigung der dreifach größeren Auflösung des SRTM orientiert sich der Verlauf der Höhenlinien dennoch weitestgehend an den Referenzhöhenlinien (vgl. Abb. 6-16 C).

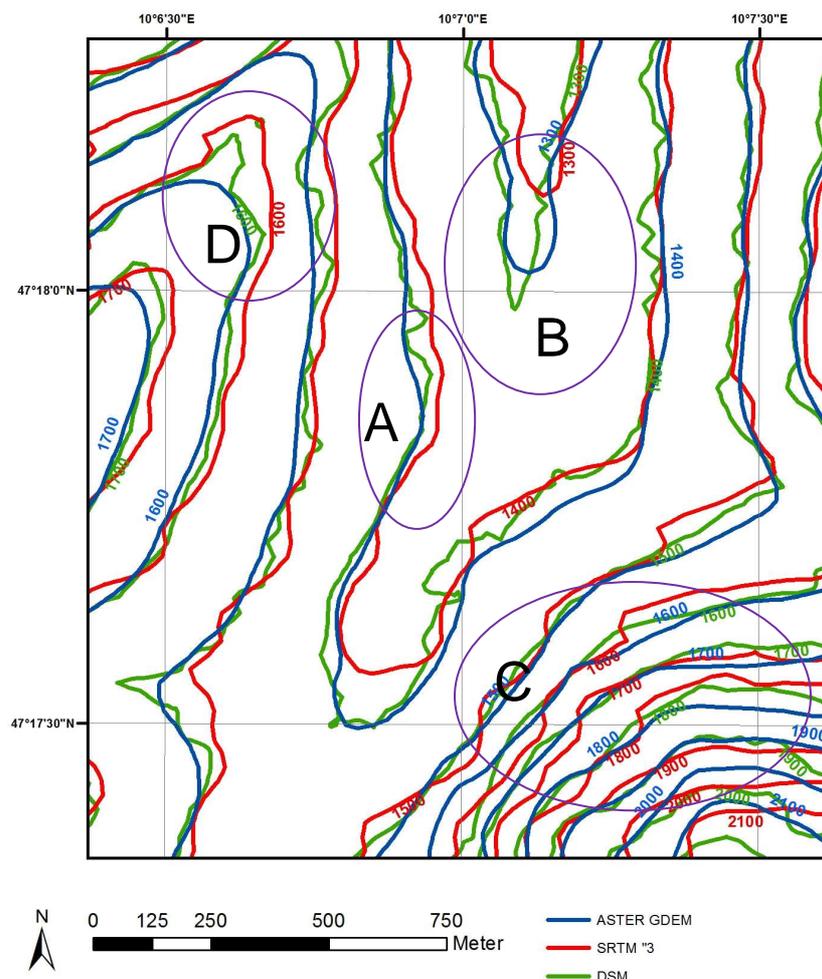


Abb. 6-16: UG 1: Beispielausschnitt der Höhenlinien erzeugt aus dem ASTER GDEM, SRTM_R und DSM_R.

6.1.2.3 Reliefklassifizierung

Aus dem ASTER GDEM und SRTM werden, mit der in Kapitel 5.2.3.1 beschriebenen Methode, Reliefklassen erzeugt. Das Referenzgeländemodell wurde zum Vergleich auf die jeweilige Auflösung des zu untersuchenden Geländemodells angepasst. Die Ergebnisse sind auf Abb. 6-17 und in Tab. 6-7 für das ASTER GDEM und auf Abb. 6-18 und Tab. 6-8 für das SRTM dargestellt.

Der Vergleich der Reliefklassen auf Abb. 6-17 des ASTER GDEM mit dem DSM_R zeigt ein höheres Detailreichtum des DSM_R. Die Gipfel und Kämme der Berge werden vom DSM richtigerweise als zusammenhängende Strukturen kartiert. Beim ASTER GDEM wird der Gipfel des Geißhorn sowie der angelagerte Kammbereich zum Zwölfer nicht als zusammenhängende Struktur erkannt. Das DSM_R bildet eher fein verästelte Reliefstrukturen aus, bei denen selbst kleinere Formen erfasst werden. Als Beispiel hierfür sei auf den östlichen Bereich des Gemsteltals ($47^{\circ}18'20''N$; $10^{\circ}10'0''O$) hingewiesen, in dem es eine dichte Abfolge von kleineren Kämmen und Senken gibt. Aus der Schrägansicht des Untersuchungsgebietes auf Abb. 4-2 kann man für diesen Bereich Murrinnen annehmen, die im DSM richtigerweise als Senken kartiert werden. Beim ASTER GDEM werden diese Formen nicht erkannt. Das ASTER GDEM bildet zudem vermehrt zusammenhängende, homogene Strukturen aus. Besonders bei den Senken sind die Unterschiede in Lage und Form markant.

Tab. 6-7: UG 1: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des ASTER GDEM im Vergleich zum DSM_R.

	ASTER GDEM	DSM_R	Lageübereinstimmung
Kämme	11,66%	12,94%	49,36%
Senken	8,71%	11,09%	29,87%
Ebenen	2,59%	1,94%	56,14%
Hänge	77,04%	74,03%	85,32%

In Tab. 6-7 sind die Anteilswerte der erzeugten Reliefklassen des ASTER GDEM und DSM_R angegeben. Beide Geländemodelle weisen ähnlich hohe Anteilswerte für die jeweilige Reliefklasse auf. Lediglich im Bereich der Senken und Ebenen kommt es zu leichten Unterschieden. Demnach werden vom ASTER GDEM mehr Pixel als Ebenen klassifiziert, bzw. weniger Pixel als Senken klassifiziert als beim DSM_R.

Die Lage der Pixel der einzelnen Reliefklassen des ASTER GDEM im Vergleich zum DSM_R zeigte hohe Übereinstimmungen für die Reliefklasse Hänge. Des Weiteren stimmen

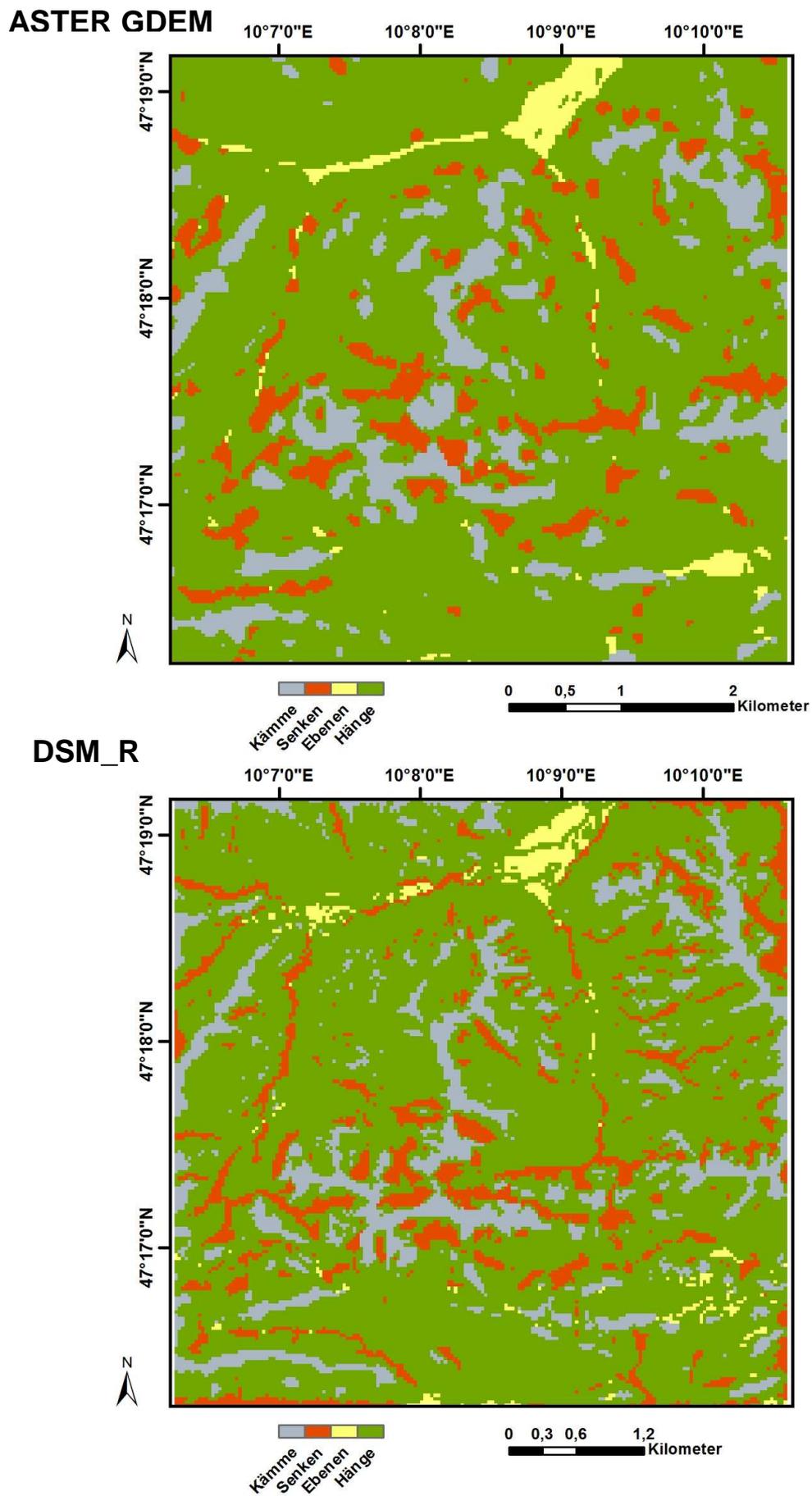


Abb. 6-17: UG 1: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das ASTER GDEM und DSM_R (DSM © Land Vorarlberg).

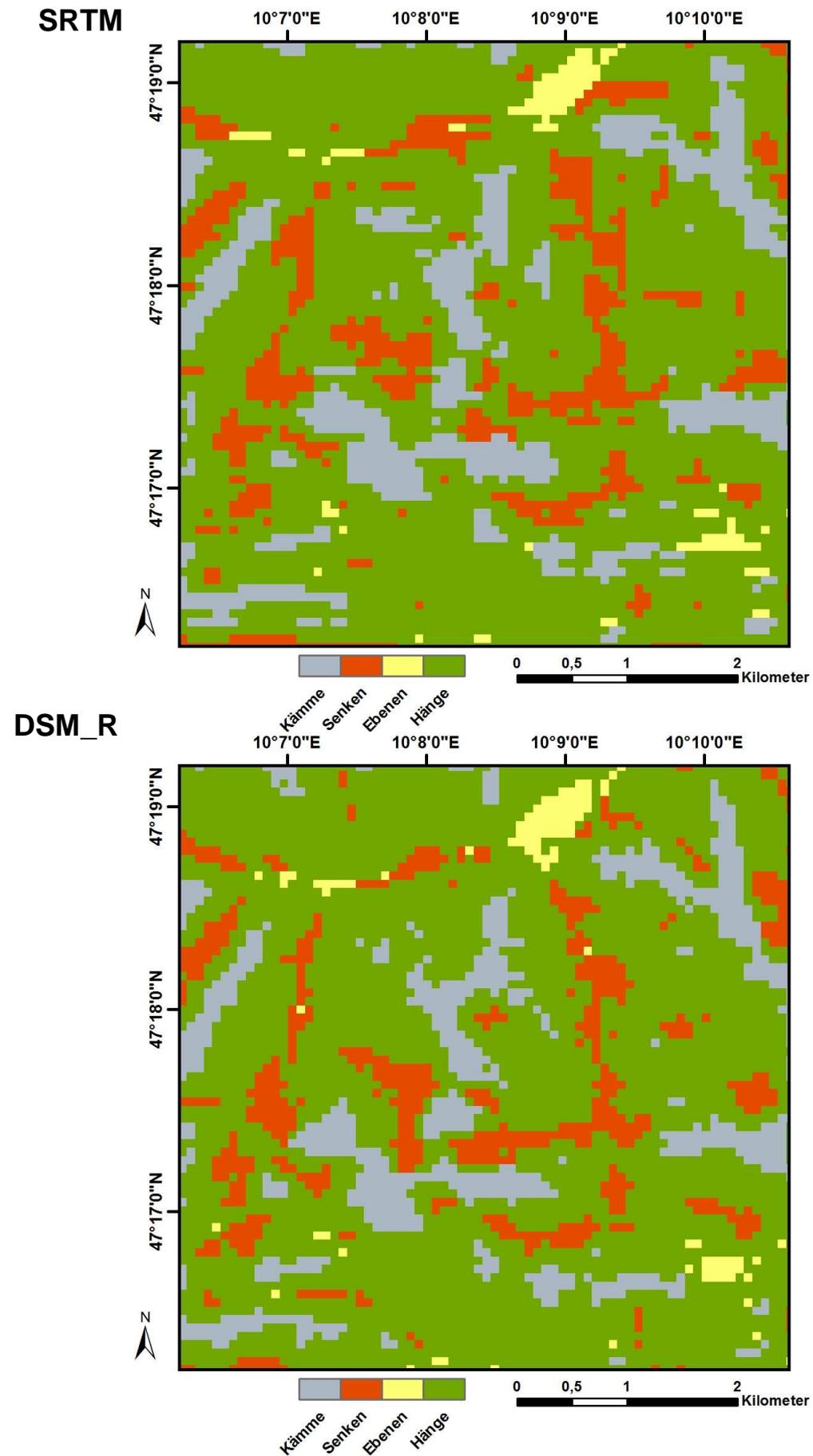


Abb. 6-18: UG 1: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das SRTM und DSM_R (DSM © Land Vorarlberg).

Tab. 6-8: UG 1: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des SRTM mit dem DSM_R (DSM © Land Vorarlberg).

	SRTM	DSM_R	Lageübereinstimmung
Kämme	15,55%	14,25%	66,92%
Senken	14,06%	13,08%	58,33%
Ebenen	2,19%	1,95%	49,61%
Hänge	68,21%	70,72%	86,66%

etwa die Hälfte der als Kämme und Ebenen klassifizierten Pixel des ASTER GDEM in ihrer Lage mit denen des DSM_R überein. Lediglich bei den Senken liegt die Übereinstimmung unter 30%.

Die Lage der Reliefklassen des SRTM und DSM_R sind auf Abb. 6-18 dargestellt. Beim Vergleich der beiden Klassifizierungen wird deutlich, dass beide eine sehr ähnliche Struktur bezüglich ihres Verteilungsmusters und Form der Reliefklassen aufweisen. Dies belegen ebenfalls die in Tab. 6-8 angegebenen Anteilswerte der einzelnen Reliefklassen. Die Abweichungen des SRTM vom DSM_R betragen lediglich wenige Prozent. Ebenfalls gute Werte sind bei der Lageübereinstimmung der Pixel für das SRTM kennzeichnend. Die Lageübereinstimmung der Reliefklasse Hänge ist mit 86,66% sehr gut. Die Reliefklasse Kämme wird mit 66,92% ebenfalls noch gut erfasst. Noch ausreichend ist die Lageübereinstimmung der Reliefklassen Senken und Ebenen.

6.1.3 Hydrologische Analysen

Um Erkenntnisse über spezielle Eigenschaften der Geländemodelle in Hinblick auf hydrologische Analysen sammeln zu können, wurden die Geländemodelle mit den in Kapitel 5.4 vorgestellten Methoden untersucht. Hierzu zählten die Analyse zur Anzahl und Höhe der zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel, deren Lage im Untersuchungsgebiet sowie Form, Größe und Verlauf des Gewässernetzes und der dazugehörigen Einzugsgebiete.

Verfüllung der Pixel

In Tab. 6-9 ist mittlere Höhe der, zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel, dargestellt. Die Werte zeigen eine Tendenz, dass das ASTER GDEM im Vergleich zu den

beiden anderen Geländemodellen, mehrere und/oder tiefere Senkenbereiche aufweist, die verfüllt werden müssen.

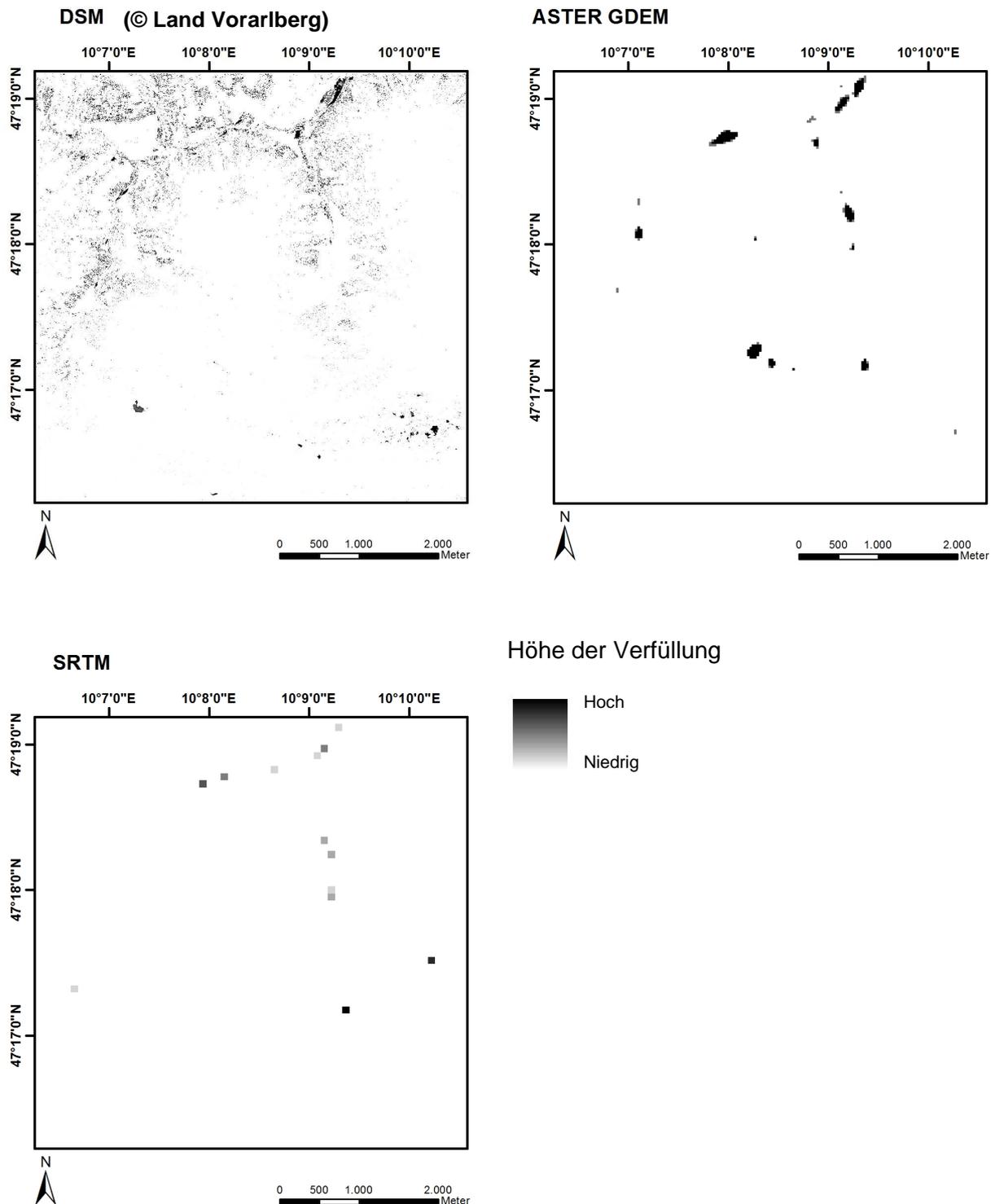


Abb. 6-19: UG 1: Lage der zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel.

Auf Abb. 6-19 ist die Lage der, zur Verfüllung des Geländemodells benötigten Pixel, für das DSM, ASTER GDEM und SRTM dargestellt. Beim DSM ist eine gleichmäßige Verfüllung vor allem in den Ebenen Bereichen im Nordwesten des Untersuchungsgebietes erkennbar.

Tab. 6-9: UG 1: Die mittlere Höhe der zur Verfüllung des Geländemodells benötigten Pixel.

	ASTER GDEM	SRTM	DSM
Mittlere Höhe	5,86 m	2,69 m	0,58 m

Ebenso sind die Bereiche der Hochebenen im Südosten des Untersuchungsgebietes stark von der Verfüllung betroffen. Beim ASTER GDEM konzentriert sich die Verfüllung auf größere, zusammenhängende Bereiche der Ebenen und Talböden. Des Weiteren ist ebenso eine großflächige Verfüllung im Bereich des östlichen Kammes des Widdersteins zu verzeichnen (47°17'20"N; 10°8'10" O). Die Verfüllung des SRTM beschränkt sich größtenteils auf die Ebenen sowie die Talböden. Des Weiteren ist eine größere Verfüllung noch an der Karschwelle des Gemsteltals sowie am Geißhorn zu erkennen (vgl. Abb. 6-19).

Gewässernetz und Einzugsgebiete

Auf den Abbildungen 6-20, 6-21 und 6-22 sind die Gewässernetze sowie die dazugehörigen Teileinzugsgebiete, erzeugt aus dem jeweiligen Geländemodell, dargestellt.

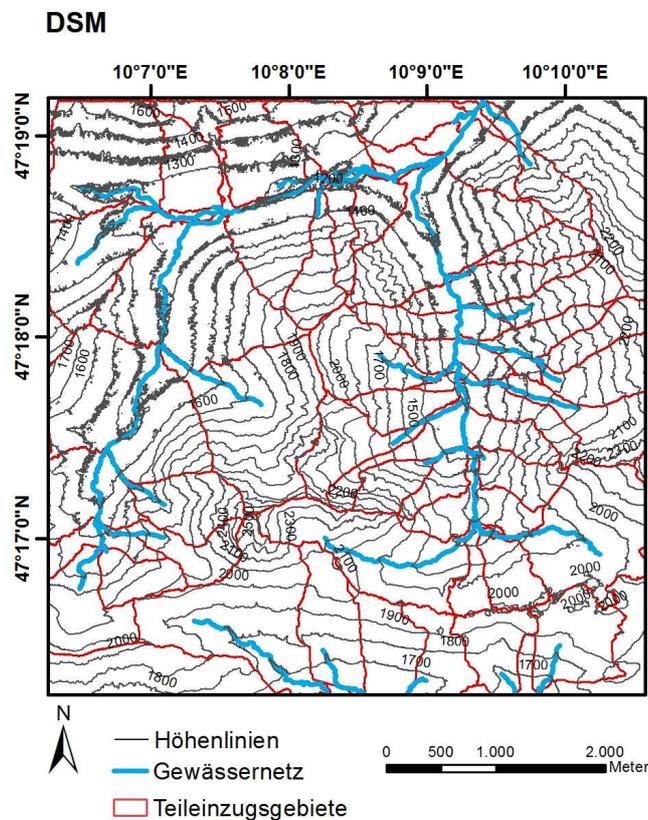


Abb. 6-20: UG 1: Gewässernetz und Teileinzugsgebietsgrenzen erzeugt aus DSM (DSM © Land Vorarlberg).

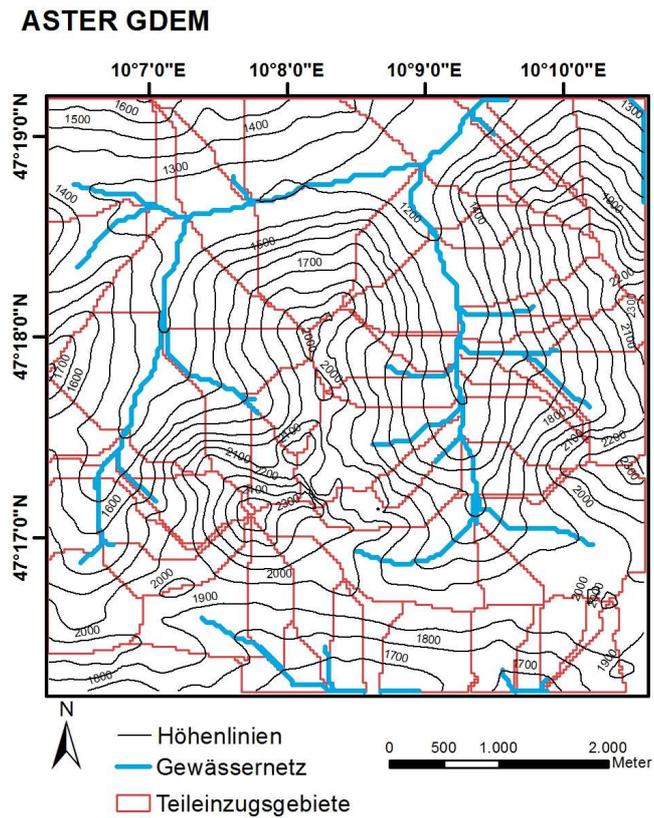


Abb. 6-21: UG 1: Gewässernetz und Teileinzugsgebietsgrenzen erzeugt aus ASTER GDEM.

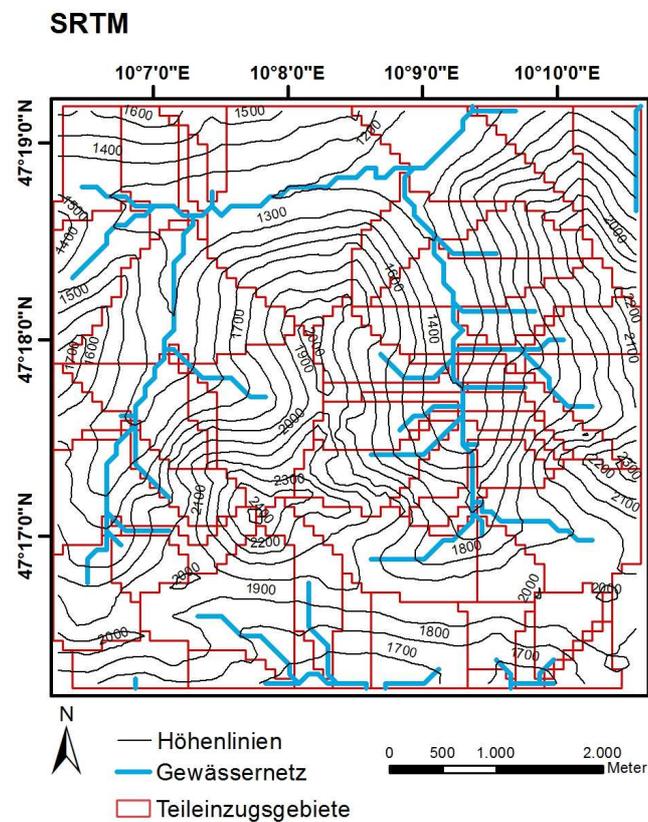


Abb. 6-22: UG 1: Gewässernetz und Teileinzugsgebietsgrenzen erzeugt aus SRTM.

Das Gewässernetz des DSM ist der Rastergröße entsprechend fein untergliedert (vgl. Abb. 6-20). Demnach wirken sich auch kleinste Höhenunterschiede auf den Verlauf der Gewässerlinie aus. Ebenso folgt der Verlauf der Teileinzugsgebietsgrenzen feinsten Reliefunterschieden. Im Vergleich hierzu zeigt das ASTER GDEM bereits einen lineareren Verlauf des Gewässernetzes und der Teileinzugsgebietsgrenzen (vgl. Abb. 6-20 mit 6-21). Zudem zeigt sich in einigen Bereichen eine auffällige Parallelität der Teileinzugsgebietsgrenzen (vgl. Abb. 6-20; 47°18'0"N, 10°9'0"O). Beim SRTM ist der lineare Verlauf des Gewässernetzes sowie der Teileinzugsgebietsgrenzen noch deutlicher ausgeprägt als beim ASTER GDEM (vgl. Abb. 6-20 mit Abb. 6-21).

Tab. 6-10: UG 1: Vergleich der Ergebnisse zur Gesamteinzugsbeitsgröße und Gewässernetzlänge erzeugt aus DSM, ASTER GDEM und SRTM.

	DSM (© Land Vorarlberg)	ASTER GDEM	SRTM
EZG (Größe)	26,72 km ²	28,81 km ²	29,69 km ²
Gewässernetz (Länge)	34,56 km	28,44 km	32,16 km

Auf Tab 6-10 sind die Gesamteinzugsgebietsgrößen und Gewässernetzlängen des DSM, ASTER GDEM und SRTM angegeben. Bedingt durch die unterschiedlichen Rastergrößen und der damit verbunden Möglichkeit, die Abgrenzung der Einzugsgebiete innerhalb der spezifischen Rastergröße durchzuführen, nimmt die Größe der Einzugsgebiete mit zunehmender Rastergröße zu. Demnach ist die Gesamteinzugsgebietsgröße beim SRTM mit 29,69 km² am größten, gefolgt vom ASTER GDEM mit 28,81 km². Beide Geländemodellen neigen dem entsprechend dazu, die Größe der Einzugsgebiete zu überschätzen.

Die Länge des Gewässernetzes beträgt beim ASTER GDEM nur 82% der Gewässernetzlänge des DSM. Demnach wird die Länge des Gewässernetzes vom ASTER GDEM deutlich unterschätzt. Beim SRTM ist die Gewässernetzlänge ebenfalls etwas geringer, aber näher an der Gewässernetzlänge des DSM.

6.1.4 Überprüfung des ASTER GDEM auf Anomalien

Die Datenstruktur des ASTER GDEM erzeugt in der Geländedarstellung eine Reihe von *Anomalien* und *Artefakte*, die bereits in Kapitel 2.2.3 diskutiert wurden. Im Folgenden wird nun versucht, vereinzelte Anomalien und Artefakte des ASTER GDEM für das UG 1 zu identifizieren.

Im UG 1 können keine, durch *verbleibenden Wolkenanomalien* verursachte Höhenanomalien, identifiziert werden. Ebenso ist es nicht möglich *Stufen an Szenegrenzen* zu erkennen, da das UG 1 innerhalb einer abgegrenzten Szene befindet.

Das UG 1 enthält dennoch bildstapelbedingte Anomalien und Artefakte. Auf Abb. 6-23 A ist das ASTER GDEM mit schattiertem Relief dargestellt. Durch die Schattierung ist es möglich, die einzelnen Artefakte des ASTER GDEM deutlicher zu erkennen. Die einzelnen Pfeile markieren lokal auftretende *Pits*. Vergleicht man die Position der *Pits* mit der Anzahl der, auf Abb. 6-23 B dargestellten Anzahl der Bildstapel, wird ein Zusammenhang deutlich. In diesen Bereichen liegt die Anzahl der verwendeten Bildstapel meist unter 4. Demnach kann für diese Bereiche das bildstapelbedingte Auftretenden des *Pit*-Artefakts belegt werden. Die Artefakte *Bumps* und *Mole-Runs* konnten im UG 1 nicht identifiziert werden.

Auf Abb. 6-23 C ist der Kammbereich des östlichen Widdersteins mit einem Kreis in der schattierten Reliefdarstellung des DSM markiert. Beim Vergleich dieses Bereichs mit dem schattierten Relief des ASTER GDEM auf Abb. 6-23 A wird deutlich, dass beim ASTER GDEM der markierte Kammbereich des Widdersteins morphologisch nicht richtig erfasst wird. Auf Abb. 6-24 ist der Bereich des Widdersteins aus südlicher Richtung betrachtet, in 3d dargestellt. Auffällig ist hier das Fehlen des östlichen Bergkammes beim ASTER GDEM.

Auf Abb. 6-3 wurden für diesen Bereich bereits erhöhte negative Höhenabweichungen des ASTER GDEM festgestellt. Wie auf Abb. 6-22 B zu erkennen, ist in diesem Bereich die Anzahl der zur GDEM Erstellung verwendeten Bildstapel mit ca. 1- 4 Bildpaaren sehr niedrig. An diesem Beispiel zeigt sich, dass wenige Bildstapel hohe Höhenabweichungen und eine daraus resultierende, fehlerhafte Darstellung der Reliefs durch das ASTER GDEM bedingen können.

Das SRTM weist in diesem Bereich ebenfalls negative Höhenabweichungen auf (vgl. Abb. 6-4). Dennoch kann dieser Bereich im SRTM morphologisch als Kamm identifiziert werden (vgl. Abb. 6-23).

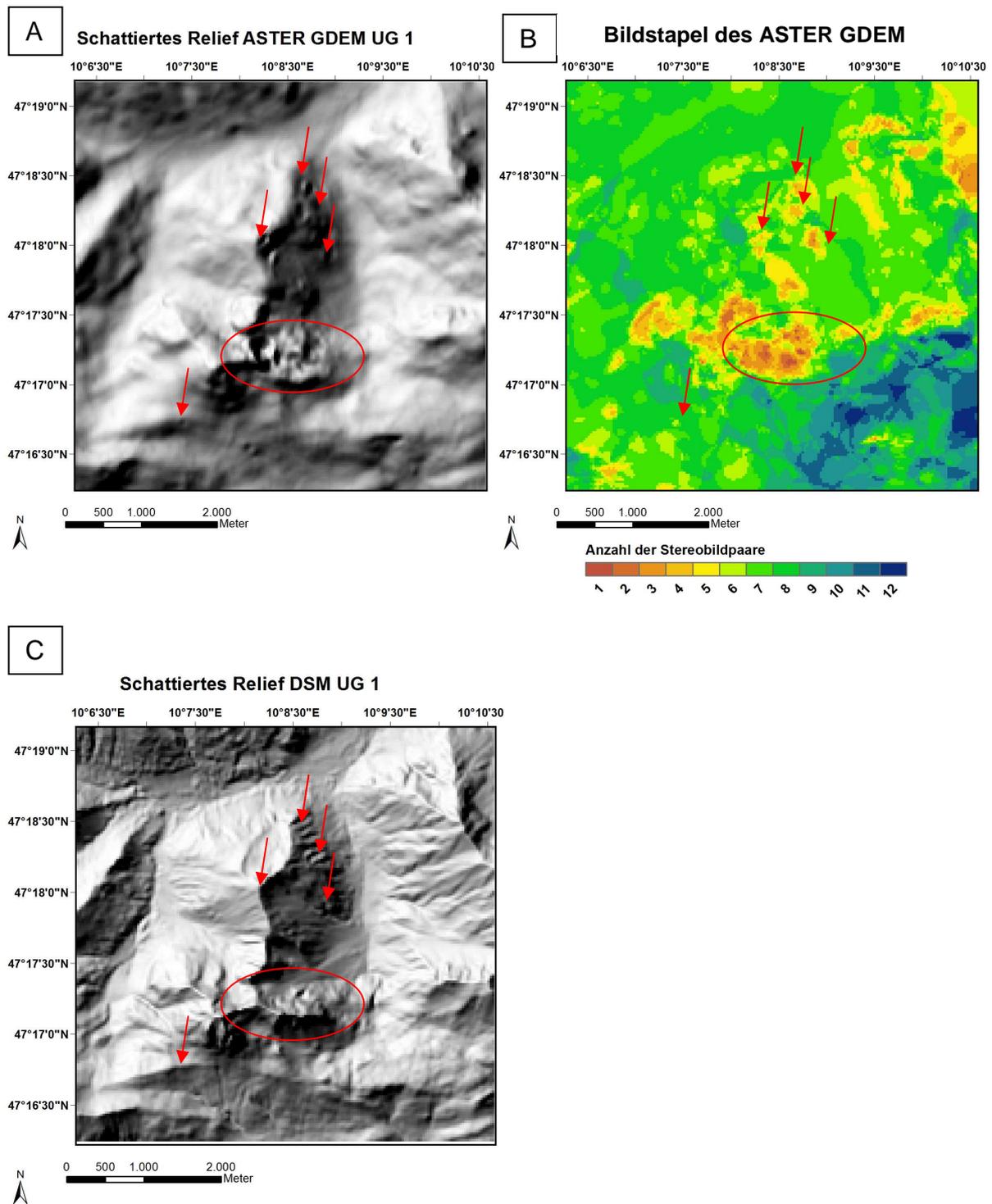


Abb. 6-23: UG 1: Schattiertes Relief des ASTER GDEM. Pfeile: Artefakt *Pits*. Kreis: Anomalie bedingte, fehlerhafte Darstellung des Geländes.

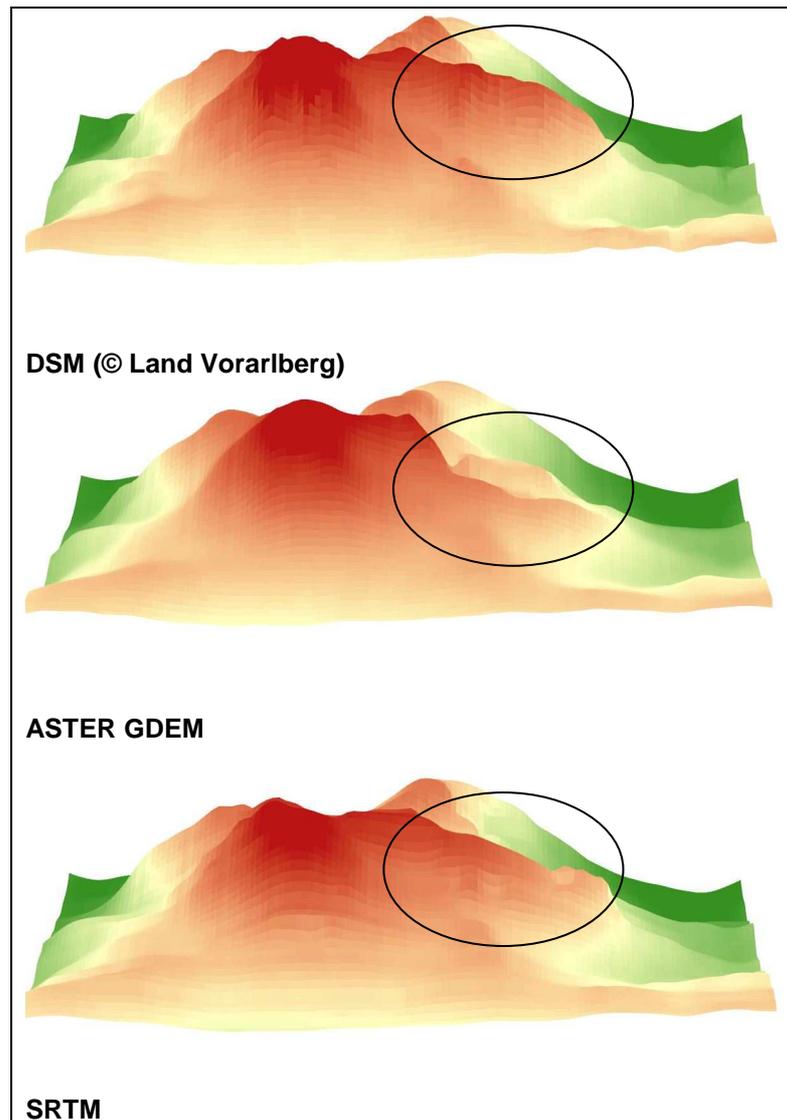


Abb. 6-24: UG 1: 3d-Darstellung des Widdersteins aus südlicher Richtung. Markierung: Fehlendes Kammstück des östlichen Widdersteins beim ASTER GDEM.

6.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse UG 1 - Mittelberg

Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind im Vergleich zum SRTM statistisch gesehen genauer. Zudem kann ein Zusammenhang der Höhengenaugkeit in Abhängigkeit von Reliefklasse und Landbedeckungsklasse aufgezeigt werden.

Beim ASTER GDEM sowie beim SRTM sind Gipfel- und Bergkammbereiche besondere Problemzonen mit z.T. sehr hohen Höhenabweichungen von den Referenzhöhen. Dies zeigen die großen Höhenabweichungen der Reliefklasse Kämme sowie der Landbedeckungsklasse Gestein bei beiden Geländemodellen (vgl. Tab. 6-2 und 6-3). Beim ASTER GDEM sind die Höhenabweichungen sogar so hoch, dass ein kompletter Kammbereich des östlichen Widdersteins fehlt (vgl. Abb. 6-24). Zudem weisen beide Geländemodelle hohe

Abweichungen im Bereich von Senken auf (vgl. Tab. 6-2). Während die Geländehöhen des ASTER GDEM im Bereich der Kämme am ungenauesten sind, hat das SRTM im Bereich der Senken die größten Höhengenaugkeitsprobleme. Zudem ist die Qualität der ASTER GDEM Höhendaten direkt von der Anzahl der verwendeten Bildstapel abhängig (vgl. Tab. 6-4). Umso mehr Bildstapel für die GDEM Erstellung verwendet wurden, desto genauer ist die Höheninformationen.

Die Analyse der Hangneigung zeigte Vorteile beim ASTER GDEM. Die Anteilswerte der Hangneigungsklassen nach HAYAKAWA (2008) stimmen hier tendenziell mit denen des Referenzgeländemodells überein (vgl. Tab. 6-5). Das SRTM tendiert dazu, die Hänge im Bereich von 0 - 12% zu überschätzen und die Hänge über 33% zu unterschätzen.

Nach der visuellen Interpretation der Höhenlinien zeigten sich leichte Vorteile beim ASTER GDEM. Die Höhenlinien entsprachen in ihrem Verlauf am ehesten denen des Referenzgeländemodells.

Im Bereich der Reliefklassifizierung zeigte das SRTM die größten Übereinstimmungen der Reliefklassen mit dem Referenzgeländemodell. Hier stimmten die morphologischen Strukturen sowie deren Lage im Untersuchungsgebiet weitestgehend überein. Das ASTER GDEM erzeugte im Vergleich zum Referenzgeländemodell zu wenig Senken und konnte zudem die feinen Strukturen des Referenzgeländemodells nicht darstellen.

Die hydrologischen Analysen zeigten auf, dass das ASTER GDEM im Vergleich zum SRTM ein höheres Maß an hydrologisch relevanter Senkenverfüllung benötigt. Diesem Sachverhalt tragen ebenfalls die auftretenden Anomalien und Artefakte bei.

Das SRTM überschätzt die Größe der Einzugsgebiete. Das ASTER GDEM unterschätzt die Gewässernetzlänge.

6.2 Untersuchungsgebiet 2 - Südhessen

6.2.1 Höhenabweichung zu Referenzhöhen

6.2.1.1 Statistische Analyse der Höhenabweichung

Im Folgenden wird die Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM vom Referenzgeländemodell im UG 2- Südhessen beschrieben. In Tab. 6-11 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die unterschiedlichen Rastergrößen (ASTER GDEM/SRTM) dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung ist auf Abb. 6-25 für die Rastergröße ASTER GDEM und auf Abb. 6-26 für die Rastergröße SRTM als Kurven-
diagramm dargestellt.

Tab. 6-11: UG 2: Statistik zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM von den Referenzhöhen für die unterschiedlichen Rastergrößen. Angabe in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel des quadratischen Mittelwertes der Höhenabweichung, SD: Standardabweichung).

Höhenabweichung	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM_R	SRTM
ME	-1,50 m	5,34 m	-0,48 m	6,60 m
RMSE	8,77 m	11,09 m	8,75 m	11,81 m
SD	8,64 m	9,72 m	8,73 m	9,79 m

Beim Vergleich der Höhengenaugigkeit des ASTER GDEM mit dem SRTM in Tab. 6-11 kann eine geringere Höhenabweichung des ASTER GDEM festgestellt werden. Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind um ca. 1 m (RMSE) genauer als die des SRTM.

Der ME des ASTER GDEM liegt im negativen Bereich, was eine systematische Unterschätzung der Geländehöhen anzeigt. Der positiven ME des SRTM_R und SRTM zeigt eine systematische Überschätzung der Geländehöhe an. Die Ausprägung ist beim SRTM_R geringer als beim SRTM. Die Höhengenaugigkeit des SRTM hat sich durch das *Resampling* auf das SRTM_R verbessert.

Auf den Abbildungen 6-25 und 6-26 ist die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung beider Geländemodelle für die entsprechende *Rastergröße* dargestellt. Die Kurve des SRTM_R und SRTM erreicht ihr Maximum jeweils im Bereich des Nullpunktes, demnach im Bereich der Übereinstimmung von den Modellhöhen mit den Referenzhöhen. Von dort aus fällt die Kurve in den negativen wie positiven Bereich radial ab, mit einer leicht erhöhten Gewichtung in den positiven Höhenabweichungsbereich.

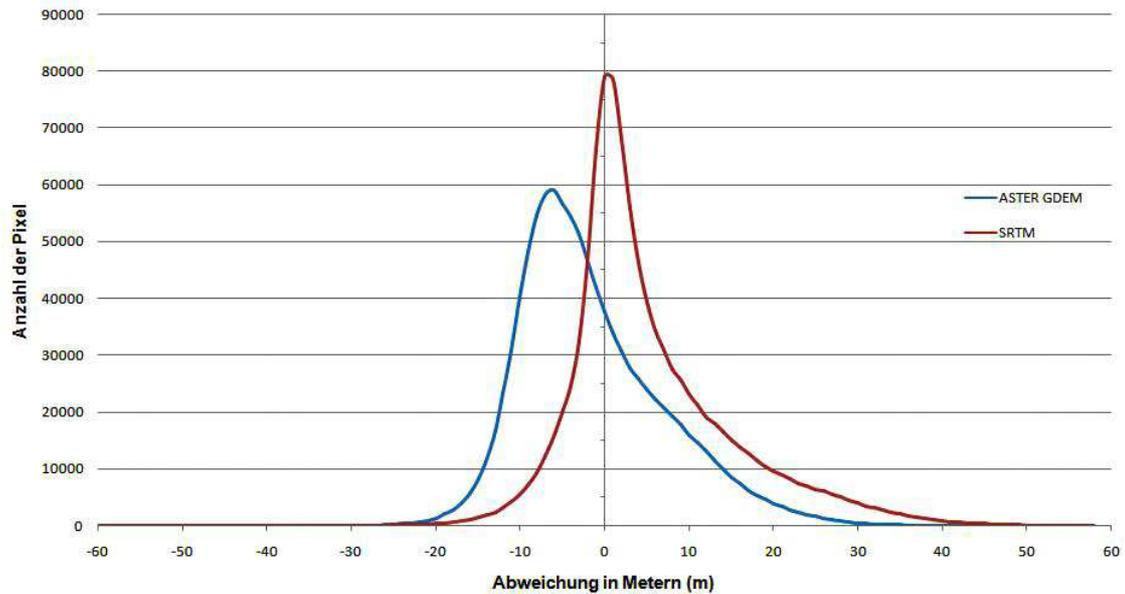


Abb. 6-25: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R.

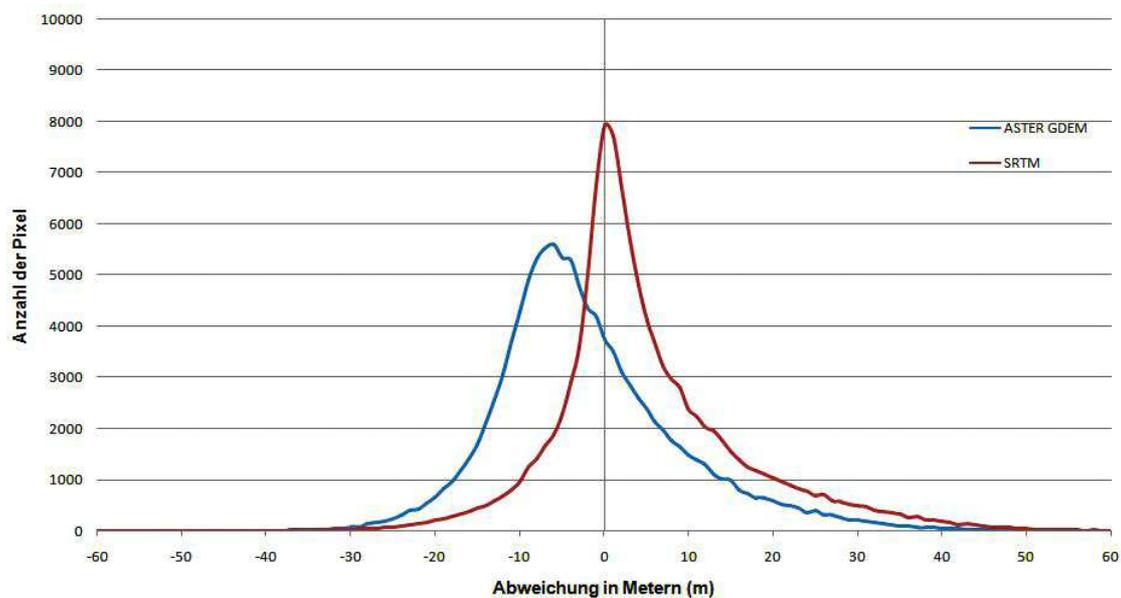


Abb. 6-26: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM_R und SRTM.

Beim ASTER GDEM ist ein deutlicher Versatz der Kurve in den negativen Höhenabweichungsbereich zu erkennen. Dennoch weist das SRTM_R mit einem ME von 5,34 m eine stärkere Tendenz zur Überschätzung der Geländehöhe auf, als dass die Geländehöhe vom ASTER GDEM mit einem ME von -1,50 m unterschätzt wird.

6.2.1.2 Lage der Höhenabweichung im Untersuchungsgebiet

Auf den Abbildungen 6-27, 6-28 und 6-29 ist die Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für das UG 2 - Südhessen dargestellt. Bei positiven Werten handelt es sich um eine Überschätzung der Geländehöhe, bei negativen Werten wird die Geländehöhe

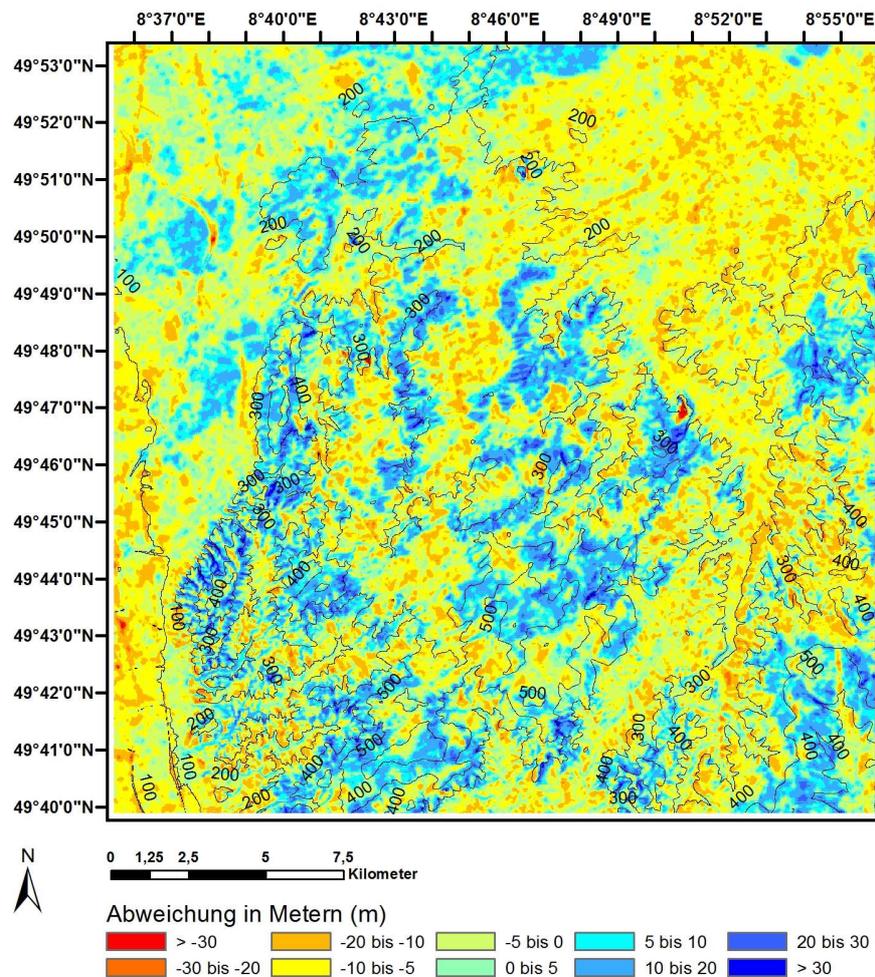


Abb. 6-27: UG 2: Lage der Höhenabweichung des ASTER-GDEM.

unterschätzt. Für die Auswertung nach Lage wurde die *Rastergröße* ASTER GDEM verwendet.

Auf Abb. 6-27 ist die Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM für das UG 2 dargestellt. Zu erkennen ist eine Tendenz des ASTER GDEM, die Geländehöhe im Bereich von schwach bewegtem Gelände eher zu unterschätzen, sowie die Geländehöhe im stärker bewegten Gelände eher zu überschätzen. Als Beispiel zur Unterschätzung ist hier der zusammenhängende Bereich der Ebenen im Nord-Osten des Gebietes zu nennen. Hier sind

großflächige Abweichungen im Bereich zwischen -5 m bis -30 m zu verzeichnen. Als Beispiel zur Überschätzung der Geländehöhe ist besonders der Bereich der Bruchkante des Oberrheingrabens zu nennen (ab $49^{\circ}43'00''\text{N}$ / $8^{\circ}38'00''\text{O}$ in NO Richtung).

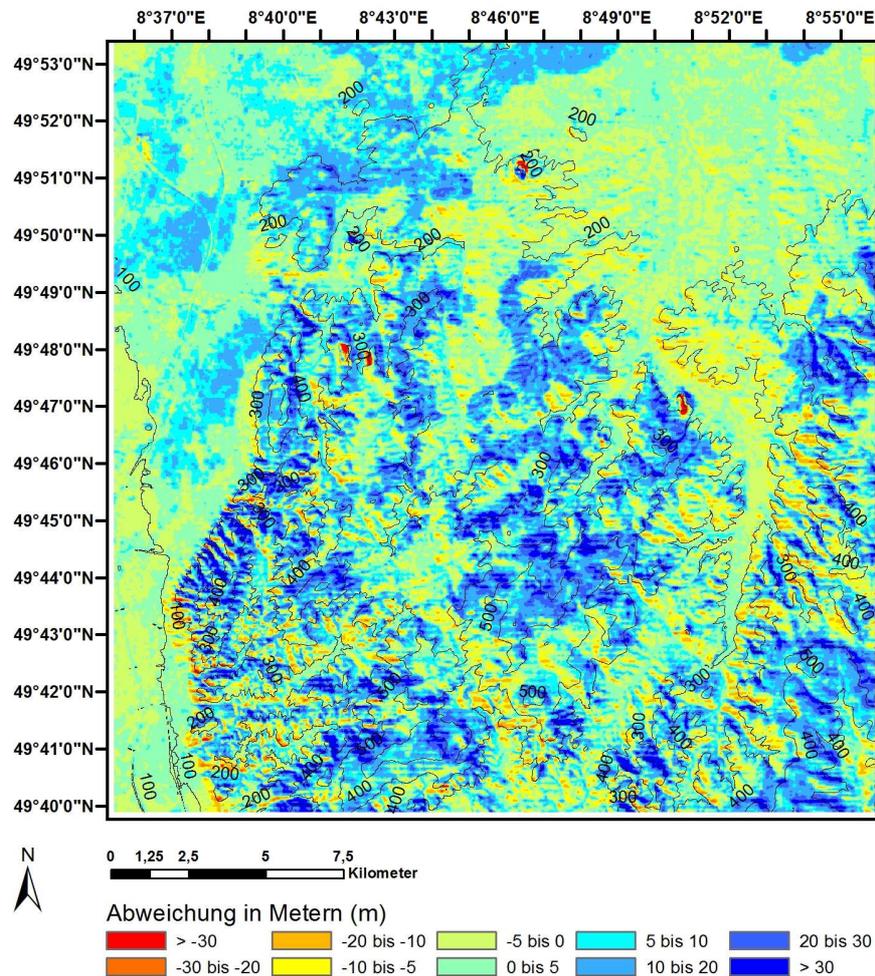


Abb. 6-28: UG 2: Die Lage der Höhenabweichung des SRTM_R.

Die Lage der Höhenabweichung für das SRTM_R ist auf Abb. 6-28 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass ein Großteil der Abweichungen des SRTM_R Geländemodells sich im positiven Bereich bewegt. Demnach wird die Geländehöhe in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes vom SRTM_R überschätzt. Auffällige Unterschätzungen der Geländehöhe treten lediglich im NO des Gebietes im Bereich der Ebenen auf, sowie in wenigen Bereichen des stärker bewegten Geländes. Als weiteres Beispiel zur Überschätzung der Geländehöhe ist besonders der Bereich der Neunkircher Höhe ($49^{\circ}43'8''\text{N}$, $8^{\circ}46'13''\text{O}$) zu nennen.

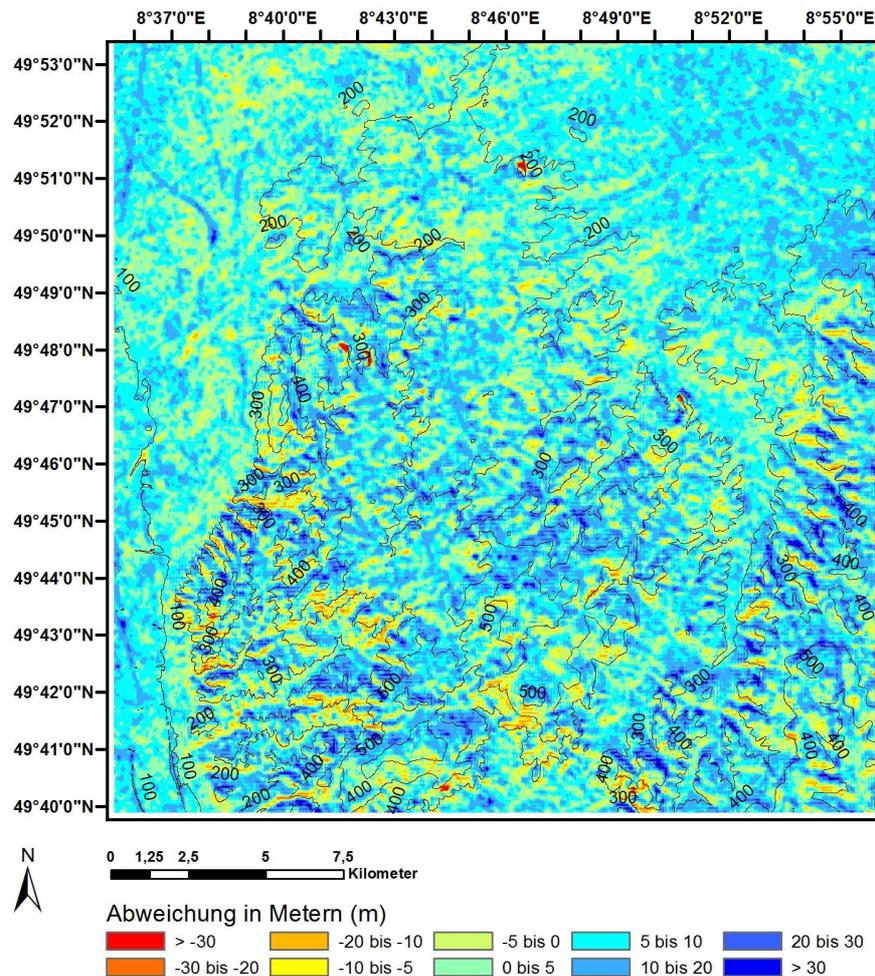


Abb. 6-29: UG 2: Lage der Differenz der Höhenabweichung von SRTM - ASTER GDEM

Auf Abb. 6-29 ist die Lage der Differenz der Höhenabweichung des SRTM_R vom ASTER GDEM dargestellt. Ein Großteil des Untersuchungsgebietes zeigt positive Abweichungswerte auf. Dies belegt, dass die Überschätzung der Geländehöhen durch das SRTM_R stärker ausgeprägt ist, als die Unterschätzung der Geländehöhe beim ASTER GDEM.

6.2.1.3 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Reliefklasse

Die Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell wird ebenfalls für vier Reliefklassen ermittelt. Die Reliefklassen wurden aus dem Referenzgeländemodell, mit einer in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Methode, erstellt. Die Ergebnisse der Reliefklassifizierung sind auf Abb. 6-30 dargestellt.

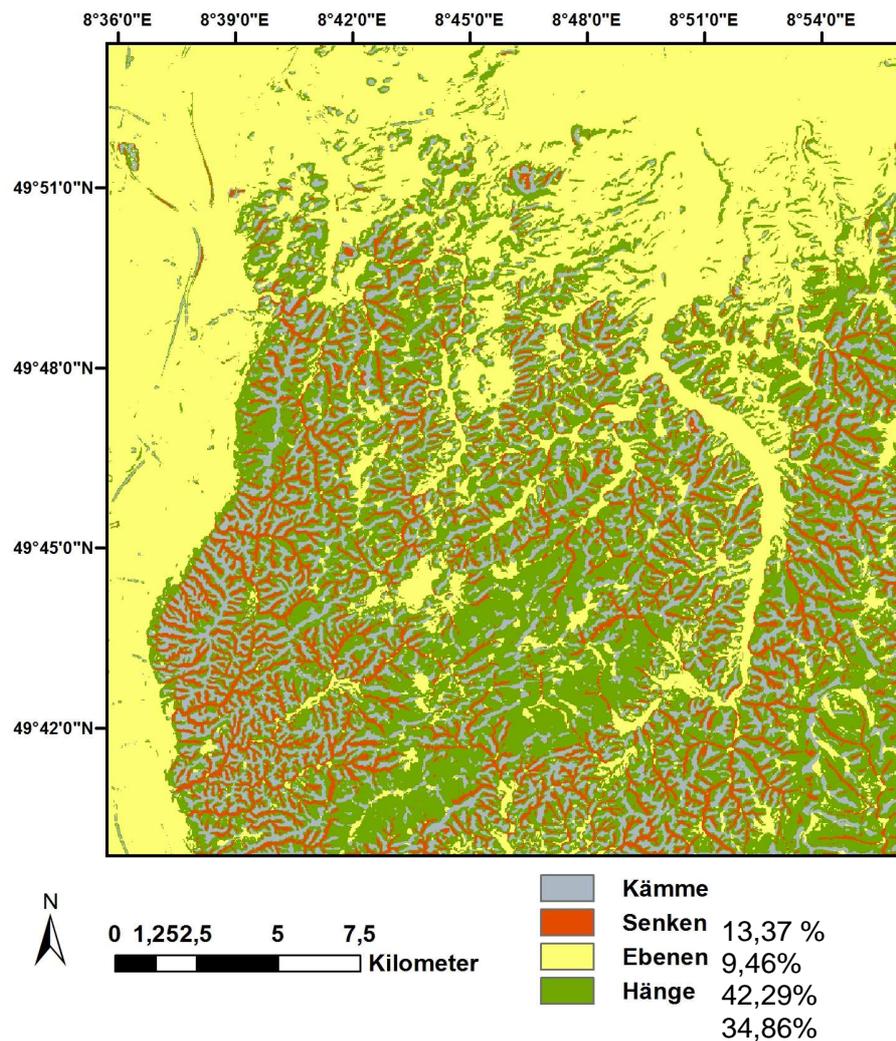


Abb. 6-30: UG 2: Lage und Anteilswerte der Reliefklassen.

Die im UG 2 - Südhessen am häufigsten auftretende Reliefklasse sind die Ebenen. Die Ebenen haben einen Flächenanteil von 42,29% an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes. Am häufigsten treten die Ebenen im Bereich westlich der Bruchkante des Oberrheingrabens sowie im Norden und Nordosten des Untersuchungsgebietes auf. Die Hänge bilden mit 34,86 % der Gesamtfläche die zweitgrößte Reliefklasse. Sie befinden sich meist im Übergangsbereich zwischen den Ebenen und dem stärker bewegten Gelände. Im stärker bewegten Gelände, welches sich ab der Bruchkante des Oberrheingrabens in östlicher Richtung erstreckt, dominieren die Reliefklassen Kämme (13,37%) sowie die Senken (9,46%). Die Kämme und Senken treten meist in unmittelbarer Abfolge auf.

Da eine korrekte Validierung der Reliefklassifizierung nur im Gelände möglich ist, muss für die Zwecke dieser Arbeit die visuelle Betrachtung der Höhenlinien in Kombination

mit den Reliefklassen als Validierung der Reliefklassifizierung ausreichen. Hierbei ist festzustellen, dass der Verlauf der Höhenlinien größtenteils mit der zu erwartenden Morphologie der Reliefklasse übereinstimmt.

Die Reliefklassen werden im Folgenden mit der Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell aus Kapitel 6.2.1.2 verschnitten. In Tab. 6-12 und den Abbildungen 6-31 bis 6-34 sind die Ergebnisse der Verschneidung für jede Reliefklasse dargestellt.

Tab. 6-12: UG 2: Statistik zur Höhenabweichung für die einzelnen Reliefklassen. Angabe in Metern (m). (ME=Mittlerer Fehler; RMSE = Wurzel des quadratischen Mittelwertes der Höhenabweichung; SD=Standardabweichung)

	ME		RMSE		SD	
	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM	SRTM_ R
Kämme	-3,93 m	2,97 m	9,78 m	11,32 m	8,95 m	10,93 m
Senken	6,63 m	14,29 m	11,87 m	18,50 m	9,85 m	11,76 m
Ebenen	-3,75 m	2,67 m	7,33 m	5,61 m	6,31 m	4,93 m
Hänge	-0,05 m	7,06 m	8,97 m	13,14 m	8,97 m	11,08 m

Kämme

Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind im Bereich der Reliefklasse Kämme genauer. Dies belegt der etwas niedrigere RMSE des ASTER GDEM (vgl. Tab. 6-12). Wie der Kurvenverlauf auf Abb. 6-31 zeigt, ist eine deutliche Tendenz des ASTER GDEM in den negativen Höhenabweichungsbereich zu erkennen. Diese Tendenz belegt ebenfalls der negative ME des ASTER GDEM mit -3,93 m. Demzufolge werden die Geländehöhen des ASTER GDEM im Bereich der Kämme systematisch unterschätzt. Beim SRTM_R ist eine Tendenz in den positiven Abweichungsbereich zu erkennen. Mit einem ME des SRTM_R von 2,97 m fällt die Überschätzung der Geländehöhe etwas geringer aus als die Unterschätzung der Geländehöhe durch das ASTER GDEM.

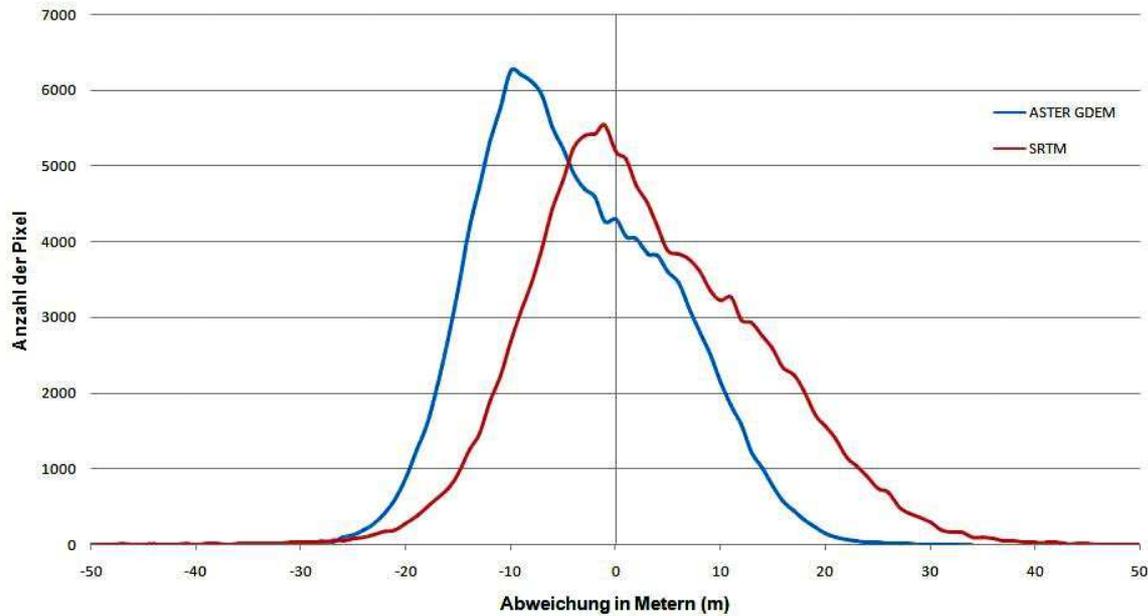


Abb. 6-31: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Kämme*.

Senken

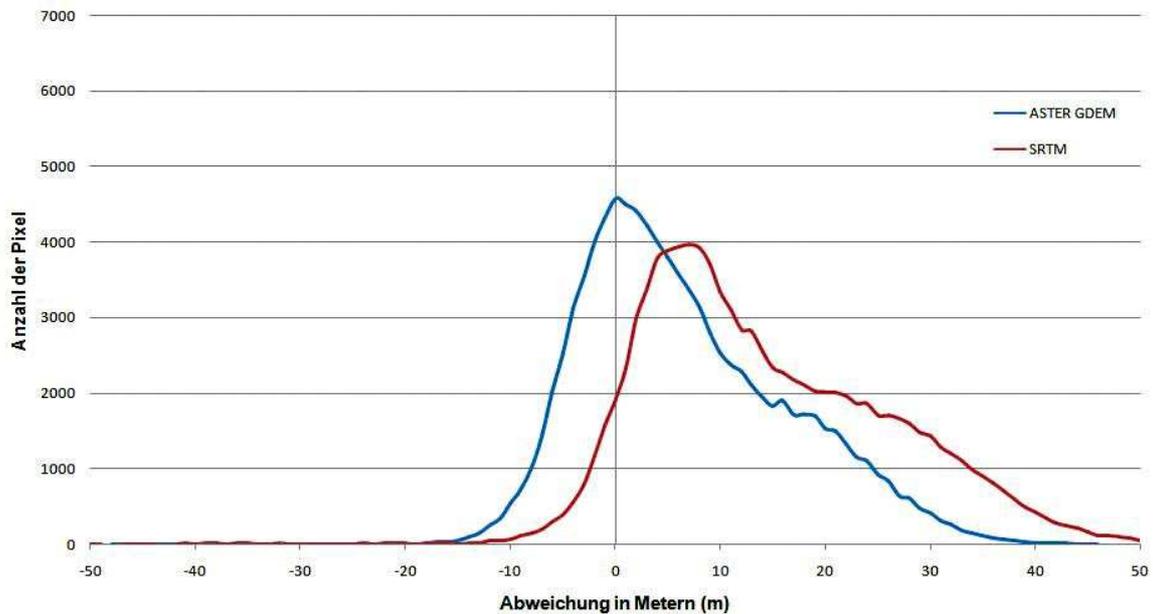


Abb. 6-32: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Senken*.

Im Bereich der Reliefklasse Senken sind ebenfalls die Geländehöhen des ASTER GDEM genauer. Der RMSE des ASTER GDEM ist um ca. 6,63 m niedriger als der des SRTM_R.

Auf Abb. 6-32 ist eine Gewichtung der Kurve in den positiven Höhenabweichungsbereich bei beiden Geländemodellen zu erkennen. Demnach werden die Höhen im Bereich der Reliefklasse Senken von beiden Geländemodellen systematisch überschätzt. Die Überschätzung fällt beim SRTM mit einem ME von 14,29 m deutlicher aus als beim ASTER GDEM mit einem ME von 6,63 m.

Ebenen

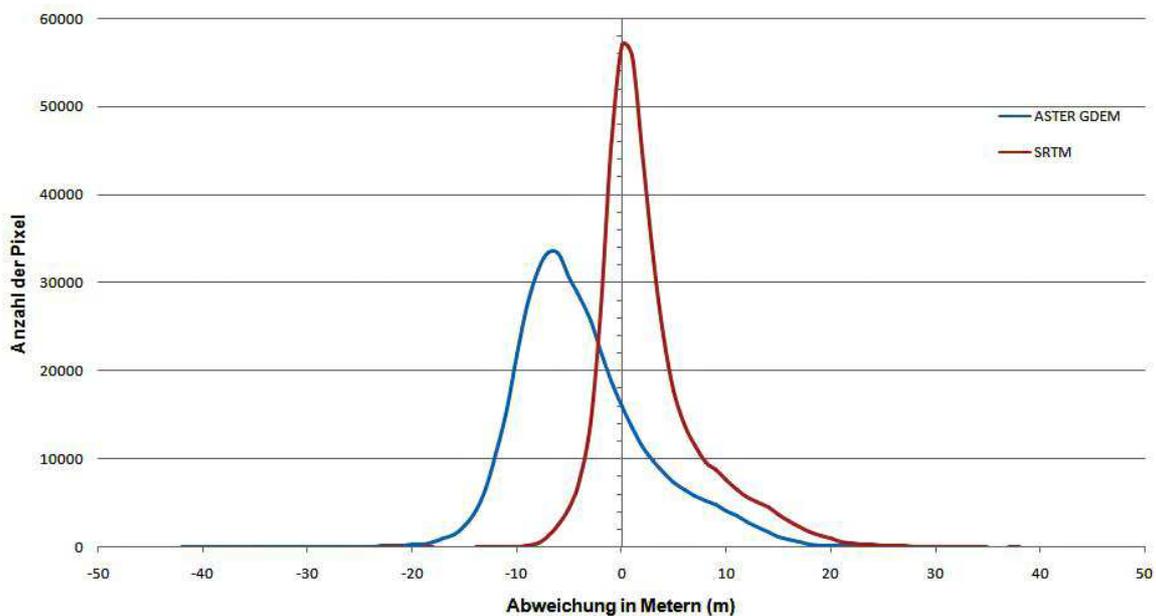


Abb. 6-33: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Ebenen*.

Die Ebenen sind im UG 2 die am häufigsten auftretende Reliefklasse. Die Geländehöhen des SRTM_R sind im Bereich der Ebenen genauer als die des ASTER GDEM (vgl. Tab. 6-12). Der auf Abb. 6-33 dargestellte Kurvenverlauf des SRTM_R erreicht im Bereich des Nullpunktes sein Maximum. Für den Kurvenverlauf des ASTER GDEM ist eine eindeutige Gewichtung in den negativen Höhenabweichungsbereich zu erkennen. Das ASTER GDEM neigt dementsprechend dazu, die Geländehöhe im Bereich der Reliefklasse Eben zu unterschätzen. Der ME von -3,75 m des ASTER GDEM bestätigt diese Tendenz. Beim SRTM_R wird die Geländehöhe der Ebenen tendenziell überschätzt, dementsprechend liegt der ME mit 2,67 m im positiven Bereich.

Hänge

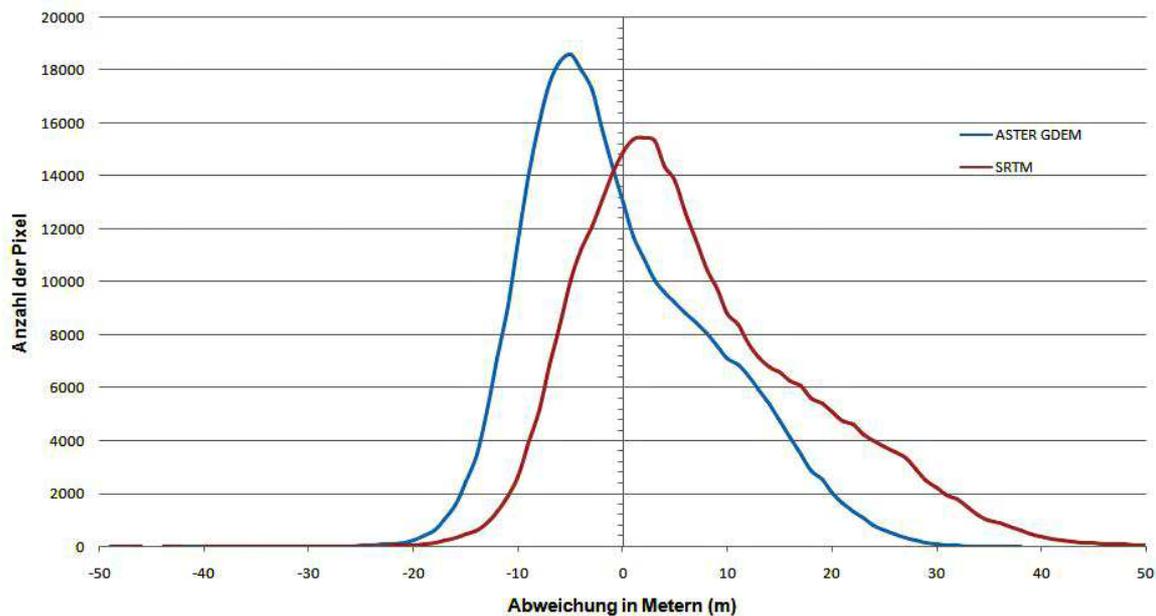


Abb. 6-34: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung der ASTER GDEM und SRTM_R für die Reliefklasse *Hänge*.

Im Bereich der Hänge sind die Höhenabweichungen des ASTER GDEM geringer. Dies belegt der deutlich niedrigere RMSE des ASTER im Vergleich zum SRTM_R (vgl. Tab. 6-12). Wie auch auf Abb. 6-34 zu erkennen, neigt das SRTM_R mit einem ME von 7,06 m dazu, die Geländehöhe der Reliefklasse Hänge zu überschätzen. Das ASTER GDEM lässt hier, wegen des sehr niedrigen ME von -0,05 m, keine eindeutige Tendenz erkennen.

6.2.1.4 Höhenabweichung in Abhängigkeit von Landbedeckung

Die Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell wird für vier Landbedeckungsklassen ermittelt. Die Landbedeckungsklassen wurden mit einer, in Kapitel 5.2.4.1 beschriebenen Methode, erstellt. Die Ergebnisse der Landbedeckungsklassifizierung sind auf Abb. 6-35 dargestellt.

Die Landbedeckungsklassifizierung erfolgte für die Landbedeckungsklassen Wald, Offen, Siedlung und Wasser. Die größte Landbedeckungsklasse sind die Offenen Flächen mit einem Anteil von 40,32 % an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes. Die großen Siedlungsbereiche befinden sich im Nord-Westen (Darmstadt) und Süd-Westen (Zwingenberg), entlang des Oberrheingrabens. Ab der Bruchkante, die sich ungefähr entlang 8°38'30 von Norden

nach Süden zieht, beginnen die größeren zusammenhängenden Waldgebiete, die mit offenen Flächen wie Äckern und Wiesen durchzogen sind. Im Nord-Osten des Gebietes dominiert die Landbedeckungsklasse Offen. Hierbei handelt es sich ebenfalls weitestgehend um großflächige Wiesen und Äcker, in die vermehrt kleinere Siedlungen eingebettet sind. Vereinzelt kleinere Wasserflächen befinden sich in der Nähe der Siedlungsbereiche entlang des Oberrheingrabens.

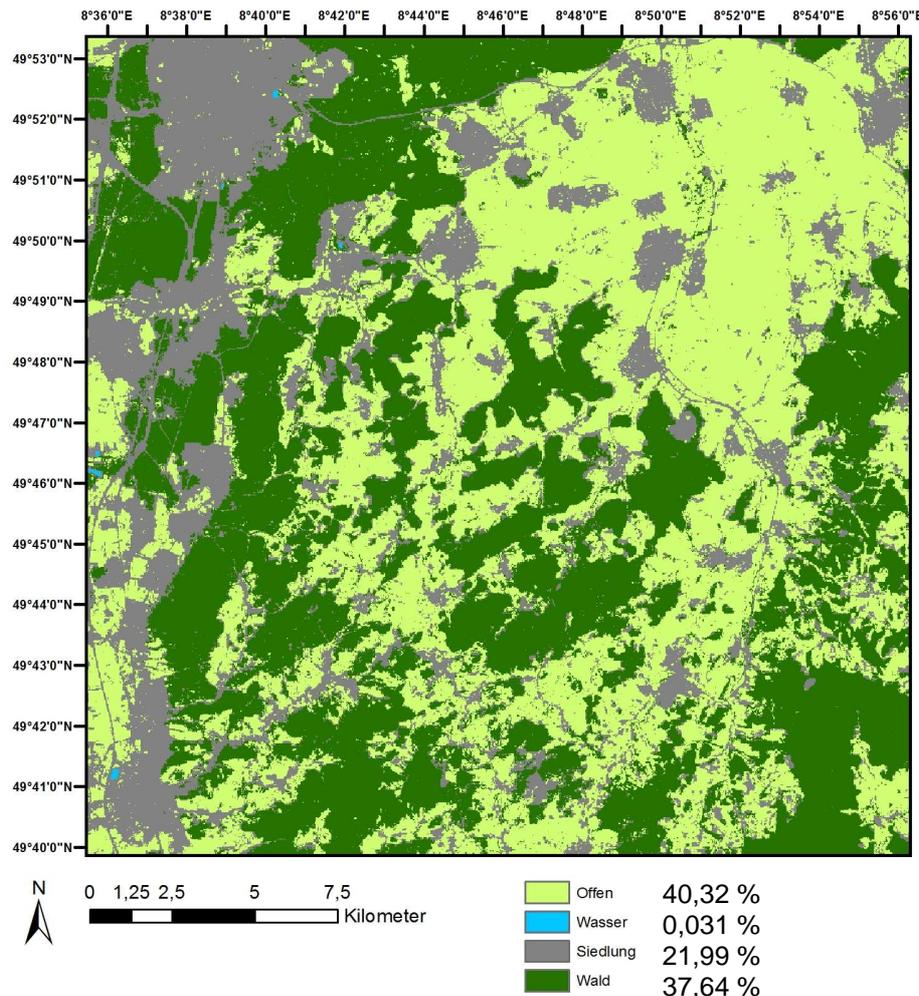


Abb. 6-35: UG 2: Lage und Anteilswerte der Landnutzungsklassen.

Die Landbedeckungsklassen wurden im Folgenden mit der Lage der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R vom Referenzgeländemodell aus Kapitel 6.2.1.2 verschnitten. In Tab. 6-13 und den Abbildungen 6-36 bis 6-39 sind die Ergebnisse der Verscheidung für jede Landbedeckungsklasse dargestellt.

Tab. 6-13: UG 2: Die Statistik zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die einzelnen Landbedeckungsklassen. Angabe in Metern (m). (ME: Mittlerer Fehler, RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, SD: Standardabweichung)

	ME		RMSE		SD	
	ASTER GDEM	SRTM	ASTER GDEM	SRTM	ASTER GDEM	SRTM
Siedlung	-3,45 m	4,07 m	6,75 m	6,61 m	5,80 m	6,06 m
Wald	4,86 m	12,30 m	10,23 m	16,37 m	9,00 m	10,79 m
Offen	-6,37 m	0,31 m	8,26 m	5,58 m	5,26 m	5,57 m
Wasser	-1,16 m	-5,70 m	9,18 m	13,45 m	9,13 m	12,20 m

Siedlung

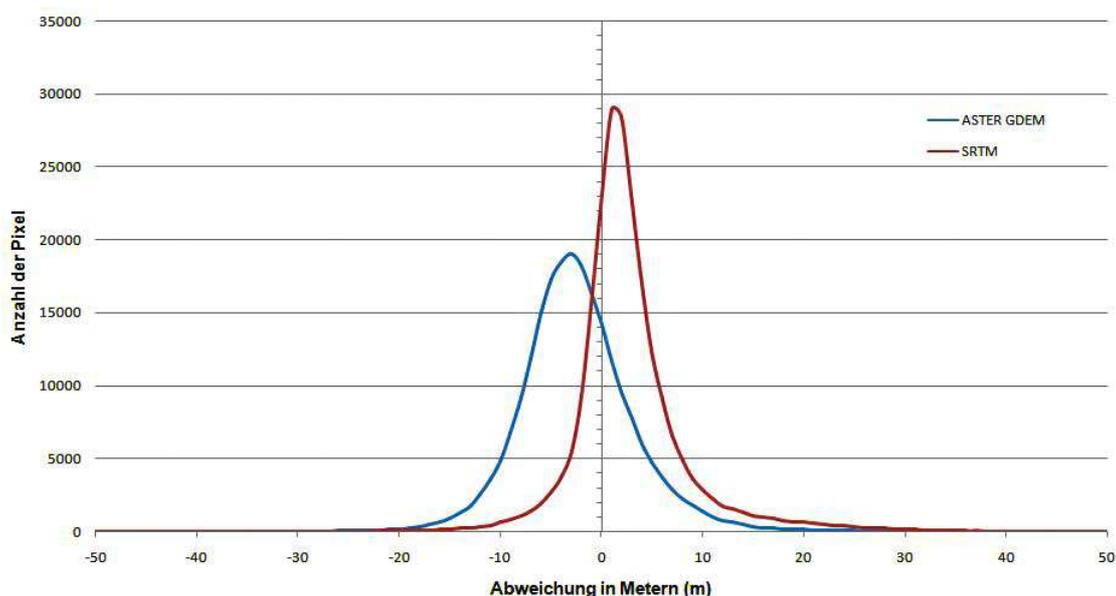


Abb. 6-36: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse *Siedlung*.

Die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichungen für die Landbedeckungskategorie Siedlungen ist auf Abb. 6-36 dargestellt. Für die Landbedeckung Siedlungen kann keines der beiden Geländemodelle eindeutige Vorteile der Höhengenaugigkeit gegenüber dem anderen aufweisen. Das SRTM ist mit einem RMSE von 6,61 m nur geringfügig genauer als das ASTER GDEM mit einem RMSE von 6,75 m.

Wie der Kurvenverlauf auf Abb. 6-36 zeigt, neigt das ASTER GDEM dazu, die Geländehöhe im Bereich der Siedlungen zu unterschätzen. Das SRTM_R überschätzt die

Geländehöhe. Diese Tendenzen bestätigt ebenfalls der ME des ASTER GDEM von -3,45 m sowie der ME des SRTM_R von 4,07 m.

Wald

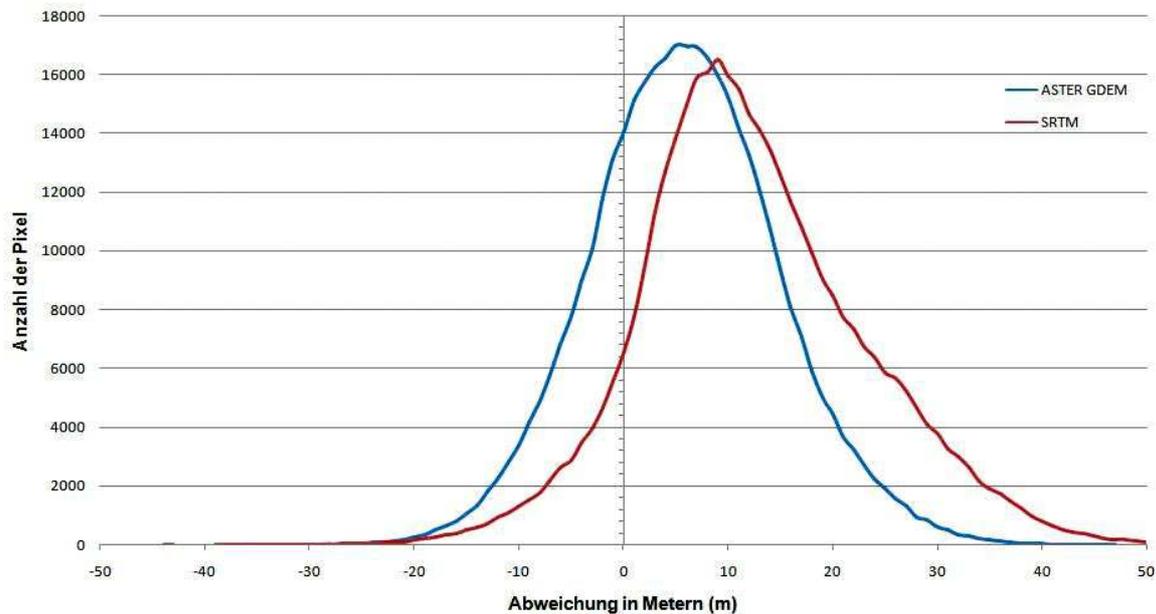


Abb. 6-37: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse *Wald*.

Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind im Bereich der Landbedeckungsklasse Wald genauer als die des SRTM_R. Der RMSE des ASTER GDEM ist um ca. 6,14 m niedriger als der des SRTM_R (vgl. Tab. 6-13). Auf Abb. 6-37 ist die Höhenabweichung für die Landbedeckungsklasse Wald dargestellt. Deutlich zu erkennen ist eine Überschätzung der Geländehöhe bei beiden Geländemodellen. Beim SRTM_R ist die Überschätzung mit einem ME von 12,30 m am deutlichsten ausgeprägt, während die Überschätzung beim ASTER GDEM mit einem ME von 4,86 m moderater ausfällt. Zudem werden beim SRTM_R für die Landbedeckungsklasse Wald die höchsten Höhenabweichungen (RMSE) von allen Landbedeckungsklassen verzeichnet.

Offen

Im Bereich der Landnutzungsklasse Offen sind die Geländehöhen des SRTM_R genauer als die des ASTER GDEM. Der RMSE des SRTM_R ist um ca. 2,68 m geringer als der des ASTER GDEM (vgl. Tab. 6-12).

Beim Vergleich des Kurvenverlaufs auf Abb. 6-38 ist deutlich zu erkennen, dass die Geländehöhen der Landbedeckungsklasse Offen vom ASTER GDEM systematisch unterschätzt werden. Diese Tendenz belegt ebenfalls der ME von -6,37 m des ASTER GDEM. Beim SRTM lässt sich hier, wegen des sehr niedrigen ME von 0,31 m, keine Tendenz erkennen.

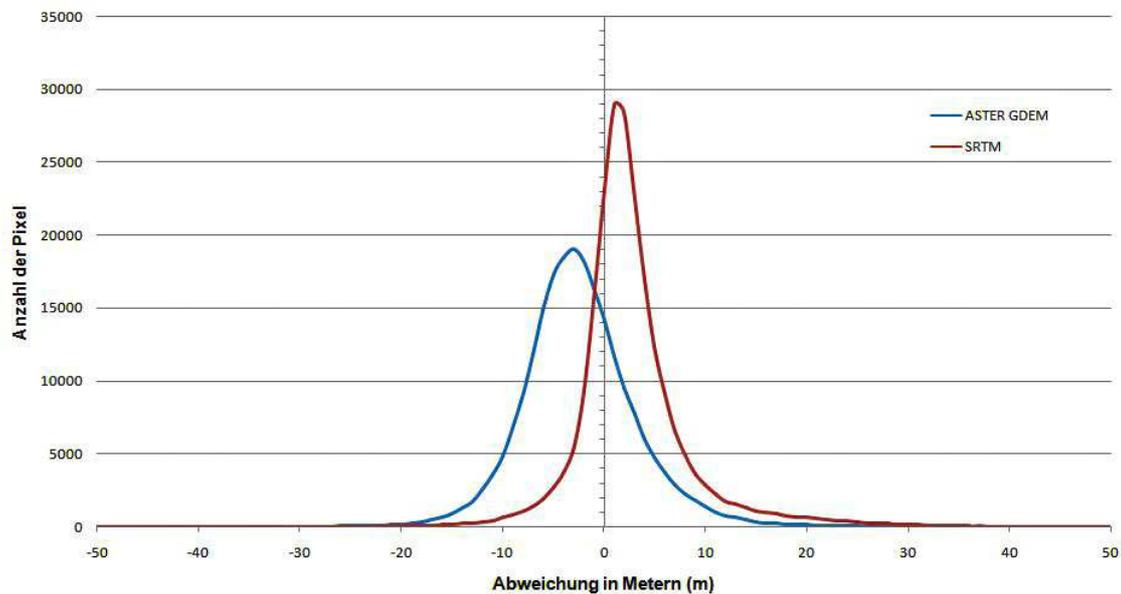


Abb. 6-38: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse *Offen*.

Wasser

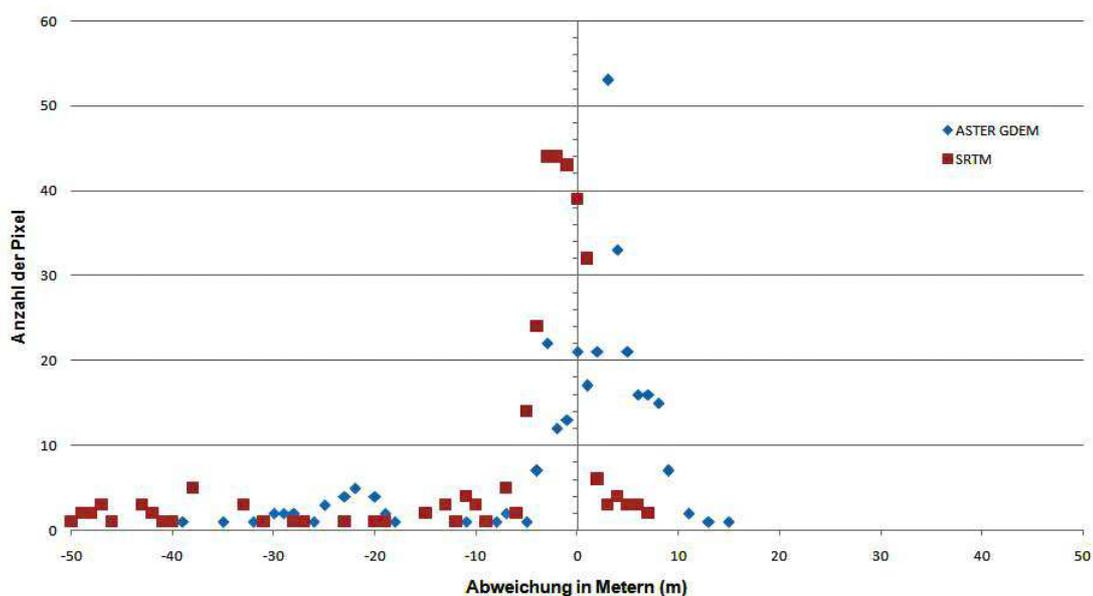


Abb. 6-39: UG 2: Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklasse *Wasser*.

Bedingt durch die geringe Anzahl an Pixeln der Landbedeckungsklasse Wasser sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung nicht repräsentativ. Die Ergebnisse der Häufigkeitsverteilung nach Höhenabweichung sind vollständigshalber auf Abb. 6-39 dargestellt. Eine leichte Tendenz zur Unterschätzung ist bei beiden Geländemodellen zu erkennen. Das ASTER GDEM weist zudem leichte Höhengenaugkeitsvorteile gegenüber dem SRTM auf (vgl. Tab. 6-12).

6.2.1.5 Höhenabweichung in Abhängigkeit der Bildstapel (ASTER GDEM)

Um die Höhenabweichung des ASTER GDEM in Abhängigkeit zur Anzahl der, für die Erzeugung der Geländehöhen verwendeten Bildstapel zu analysieren, werden die Ergebnisse zur Lage der Höhenabweichungen aus Kapitel 6.2.1.2 mit der Anzahl der Bildstapel aus dem *NUM-Layer* verschnitten. In Tab. 6-14 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tab. 6-14: UG 2: Die Höhenabweichung der ASTER GDEM Geländehöhen in Abhängigkeit von den verwendeten Bildstapeln.

Anzahl der Bildstapel	Pixelanteil	ME	RMSE	SD
6	0,0021 %	16,08	16,45 m	3,52
7	0,0167%	7,50	13,39 m	11,10
8	0,34%	5,83	11,43 m	9,83
9	1,19%	3,16	9,76 m	9,24
10	2,33%	1,82	9,91 m	9,74
11	4,17%	-0,89	9,81 m	9,77
12	9,50%	-2,48	8,79 m	8,44
13	14,79%	-1,09	8,50 m	8,42
14	19,42%	-1,16	8,76 m	8,68
15	19,73%	-1,57	8,53 m	8,38
16	17,02%	-2,08	8,77 m	8,52
17	7,48%	-2,58	8,47 m	8,06
18	2,96%	-1,61	8,98 m	8,83
19	0,92%	-3,92	7,68 m	6,60
20	0,12%	-5,91	7,28 m	4,25

Beim Vergleich der Werte des RMSE und der SD ist als Trend festzustellen, dass sich beide Werte mit zunehmender Anzahl der Bildstapel tendenziell verringern. Daraus lässt sich

folgern, dass mit zunehmender Anzahl der Bildstapel die Genauigkeit der Höheninformation des Pixels systematisch zunimmt (vgl. Tab. 6-14).

6.2.2 Geomorphometrische Analysen

6.2.2.1 Hangneigung

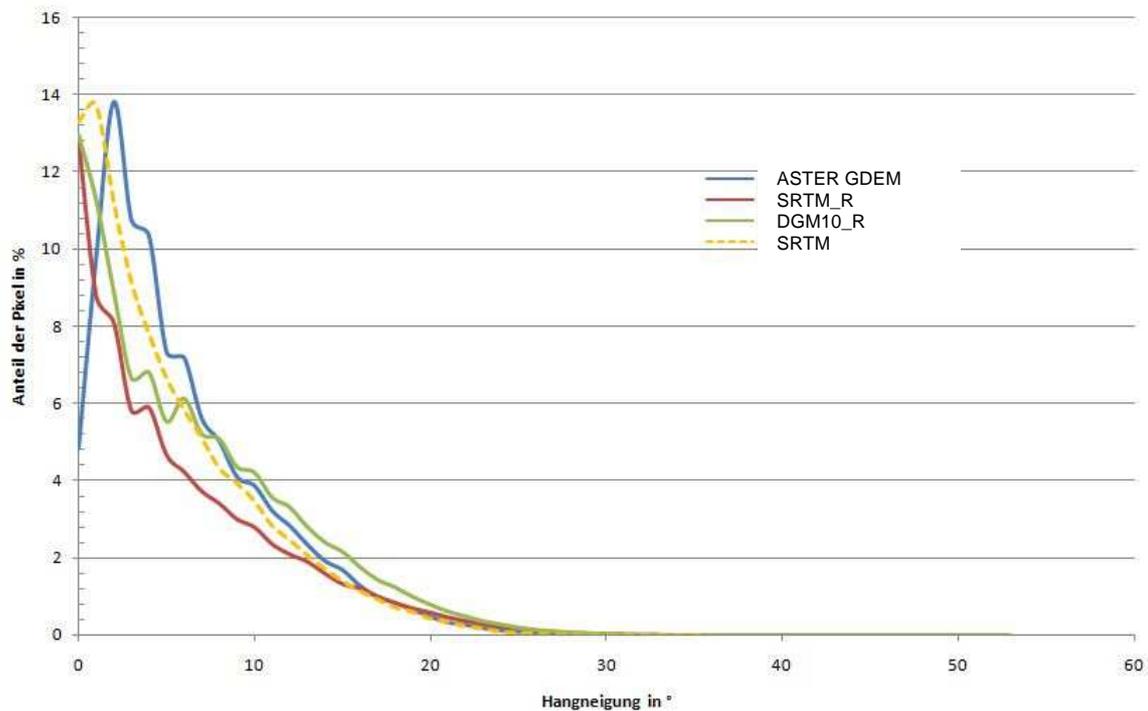


Abb. 6-40: UG 2: Prozentuale Verteilung der Hangneigungswerte für das ASTER GDEM, SRTM_R, DGM10_R (Rastergröße ASTER GDEM) und SRTM.

Auf Abb. 6-40 sind die Anteilswerte der Hangneigung für das UG 2 dargestellt. In Tab. 6-15 ist die Häufigkeitsverteilung der Hangneigungen nach den Klassen von HAYAKAWA (2008) eingeteilt. Wie auf Abb. 6-40 zu erkennen, entspricht der Kurvenverlauf des SRTM_R zeigt die größten Übereinstimmungen mit dem Kurvenverlauf des DGM10_R. Dies belegen ebenfalls die Anteilswerte in Tab. 6-15.

Der Kurvenverlauf des ASTER GDEM zeigt einen klaren Trend zur Überschätzung der geringen Hangneigungen im Bereich von 2-6°, während die Hangneigungen unter 2° zu selten vorkommen. Ab einer Hangneigung von über 8° nähert sich der Kurvenverlauf des ASTER GDEM dem des DGM10_R an.

Das SRTM hat im Vergleich zum DGM10 mehr Hänge im Bereich 0-6° und weniger im Bereich über 6° zu verzeichnen. Ab einer Hangneigung von 2° klingt die Kurve des SRTM gleichmäßig ab (vgl. Abb. 40).

Tab. 6-15 UG 2: Anteilswerte der Hangneigung UG 2 für Hangneigungsklassen nach HAYAKAWA (2008).

	0 - 12°	13 - 32°	>33°
ASTER GDEM	88,63%	11,36%	0,01%
SRTM_R	84,45%	15,48%	0,07%
DGM10_R (RS ASTER GDEM)	83,97%	15,99%	0,04%
SRTM	89,98%	10,02%	0%

In Tab. 6-16 sind die statistischen Ergebnisse zur Abweichung der Hangneigung der Geländemodelle zum Referenzgeländemodell angegeben. Beide Geländemodelle weisen eine Tendenz auf, die Hangneigung geringfügig zu unterschätzen. Beim ASTER GDEM ist der ME mit -0,45° im Vergleich zum SRTM_R mit -0,12° leicht erhöht. Die SD fällt beim ASTER GDEM 3,72° bedingt durch den erhöhten ME, niedriger aus als beim SRTM mit 4,59° SD. Die Werte der höchsten Abweichungen (Min/Max) sind beim ASTER GDEM etwas kleiner als beim SRTM.

Tab. 6-16 UG 2: Die Abweichung der Hangneigung des ASTER GDEM und SRTM von den Hangneigungen des DGM10 für das UG 2 - Südhessen.

	ASTER GDEM	SRTM_R	ASTER GDEM_R	SRTM
ME	-0,45°	-0,12°	-0,055°	-0,001°
SD	3,72°	4,59°	2,63°	0,11°
Min	- 37,58°	-40,06°	-27,09°	-1,14°
Max	35,58°	38,42°	22,18°	1,14°

Durch das *Resampling* auf das SRTM verbessern sich die Werte bei beiden Geländemodellen. Während der Mittelwert nahezu neutral ist, fällt zudem der Wert der SD beim SRTM deutlich geringer aus. Beim SRTM sind hier, im Vergleich zum ASTER GDEM, statistisch gesehen die höchsten Übereinstimmungen mit dem DGM10.

6.2.2.2 Höhenlinien

Die aus den Geländemodellen abgeleiteten Höhenlinien sind auf Abb. 6-41 für einen Beispielbereich des UG 2 dargestellt. Das DGM10_R (grün) soll als Referenz für den realen Verlauf der Höhenlinien fungieren.

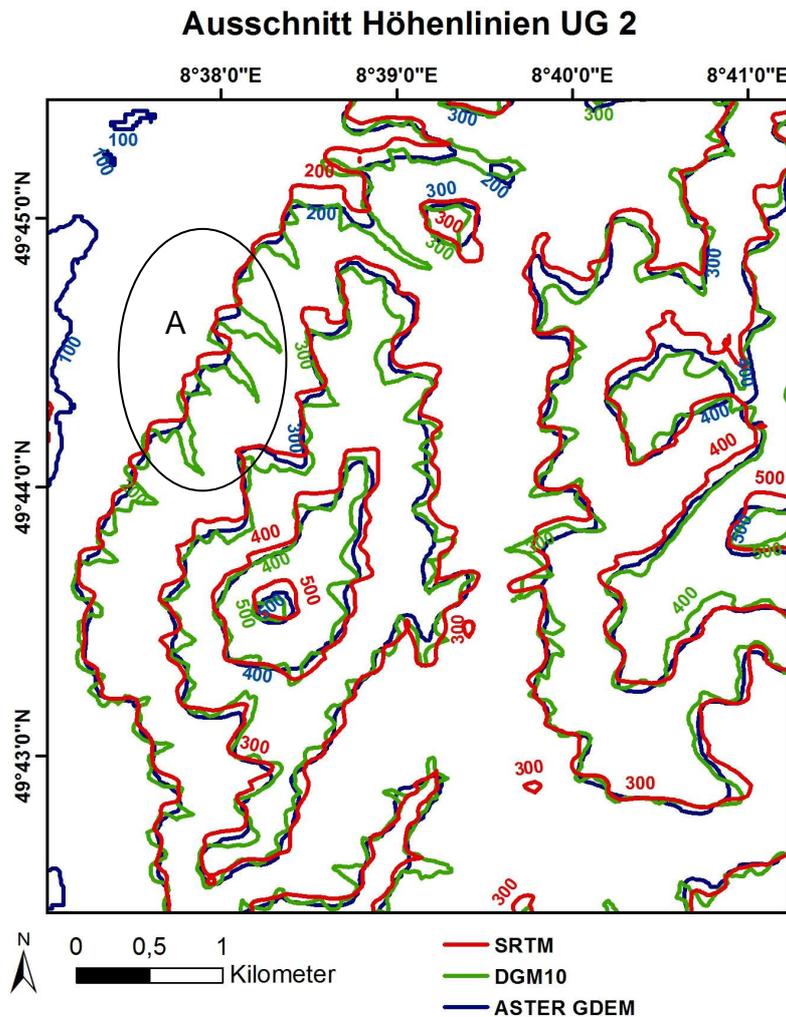


Abb. 6-41: UG 2: Beispielausschnitt der Höhenlinien erzeugt aus dem ASTER GDEM, SRTM_R und DGM10_R.

Der unruhige Verlauf der Höhenlinien des DGM10_R lässt annehmen, dass die Geländeform detailliert dargestellt wird (vgl. Abb. 6-41). Wie die Markierung A auf Abb. 6-19 zeigt, werden die feineren Reliefunterschiede des DGM10_R weder vom ASTER GDEM noch vom SRTM_R erfasst. Dennoch kann durch den visuellen Vergleich ein etwas näherer Verlauf der Höhenlinien des ASTER GDEM an den Referenzhöhenlinien angenommen werden.

7.2.2.3 Reliefklassifizierung

Aus dem ASTER GDEM und SRTM wurden, mit der in Kapitel 5.2.3.1 beschriebenen Methode Reliefklassen, erzeugt. Das Referenzgeländemodell wurde zum Vergleich auf die jeweilige Auflösung des zu untersuchenden Geländemodells angepasst. Die Ergebnisse sind auf Abb. 6-20 und in Tab. 6-19 für das ASTER GDEM und auf Abb. 6-42 und Tab. 6-17 für das SRTM dargestellt.

Das DGM10_R zeigt ruhigere, zusammenhängend homogene Formen, ohne Einschränkung des Detailreichtums (vgl. Abb. 6-42). Hier ist besonders der Bereich an der Bruchkante des Oberrheingrabens (49°42'0N; 8°39'0"O) zu nennen, in dem die Formung und Abfolge der Käme und Senken klaren Mustern folgt. Beim ASTER GDEM sind diese Muster nur unzureichend ausgeprägt. Vielmehr werden diese Reliefklassen oftmals von Ebenen durchzogen, die visuell eine Art Streuung der Reliefklassen in diesem Bereich bewirken. Zudem treten beim ASTER GDEM in den großen, zusammenhängenden Bereichen der Ebenen in Norden und Nordwesten des Gebietes eine Vielzahl von Hänge und Senken auf, die so im DGM10 nicht kartiert wurden.

In Tab. 6-17 sind die Anteilswerte und Lageübereinstimmung der Reliefklassen des ASTER GDEM und DGM10 angegeben. Die Anteilswerte der Reliefklassen Senken und Hänge sind bei beiden Geländemodellen nahezu identisch. Bei den beiden anderen Reliefklassen werden aus dem ASTER GDEM im Vergleich zum DGM10 weniger Käme, dafür aber mehr Ebenen erzeugt.

Tab. 6-17: UG 2: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des ASTER GDEM mit dem DGM10.

	ASTER GDEM	DGM10_R	Lageübereinstimmung
Kämme	9,93%	13,33%	55,92%
Senken	9,41%	9,42%	43,85%
Ebenen	45,41%	42,29%	76,01%
Hänge	35,25%	34,50%	58,11%

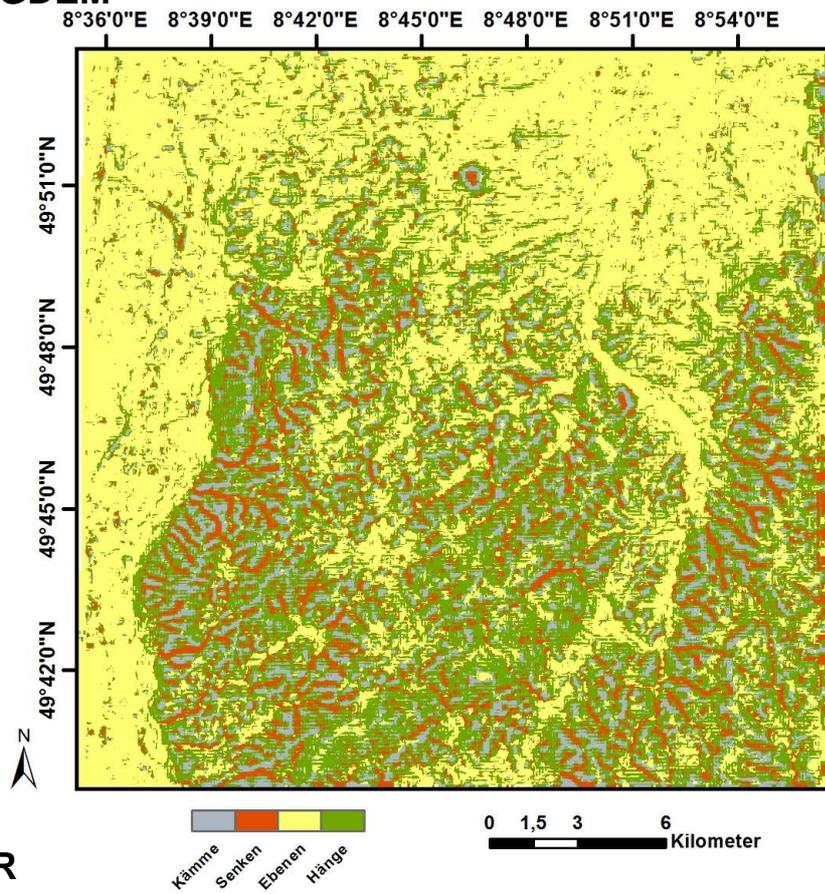
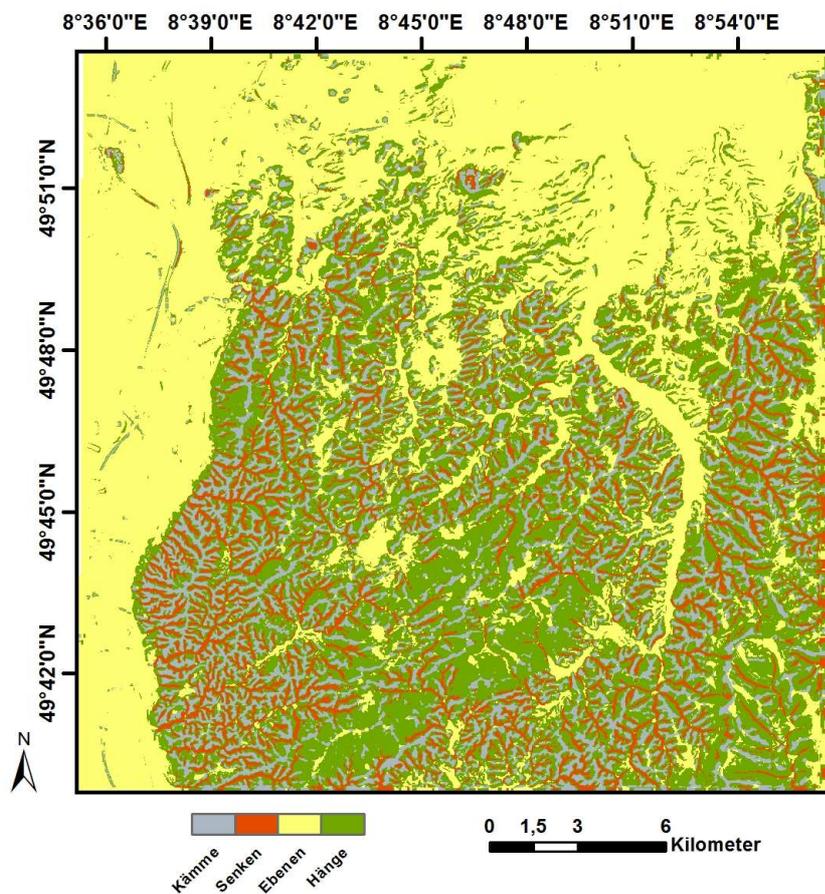
ASTER GDEM**DGM10_R**

Abb. 6-42: UG 2: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das ASTER GDEM und DGM10_R.

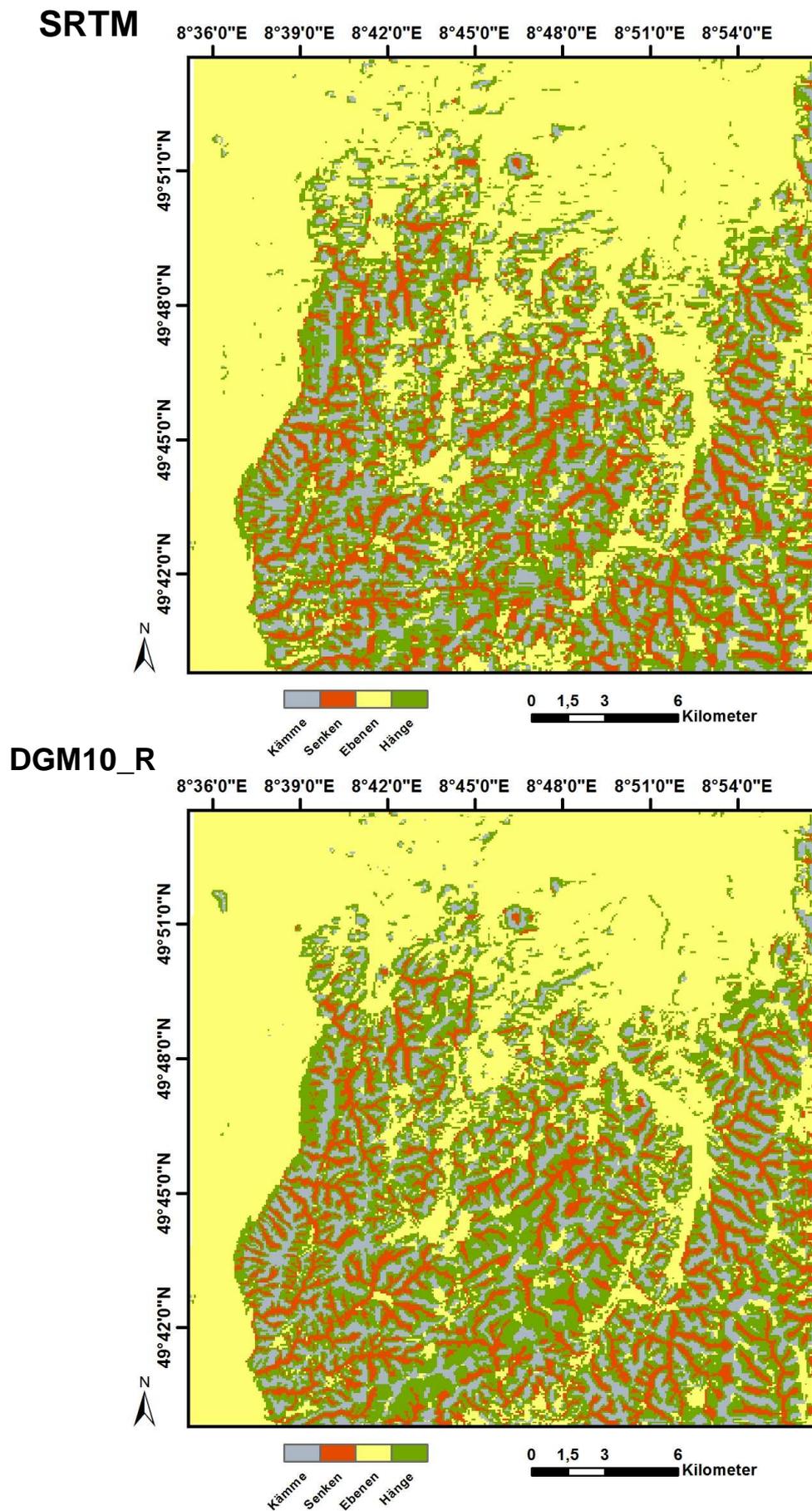


Abb. 6-43: UG 2: Lage der Reliefklassen erzeugt durch das SRTM und DGM10_R.

Bei der Überprüfung der Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des ASTER GDEM mit dem DGM10 wird deutlich, dass lediglich bei der Reliefklasse Ebenen gute Ergebnisse erzielt werden. Bei den Ebenen stimmen 76,01% der Pixel beider Geländemodelle überein. Die geringsten Lageübereinstimmungen können bei der Reliefklasse Senken verzeichnet werden. Bei den Senken stimmen nur 43,85% der Pixel in ihrer Lage überein. Die Lageübereinstimmung der Reliefklassen Kämmen und Hänge beträgt etwas mehr als die Hälfte.

Auf Abb. 6-43 und Tab. 6-18 sind die Ergebnisse der Reliefklassifizierung für das SRTM im Vergleich mit dem DGM10_R dargestellt. Beim Vergleich der Reliefklassifizierung des SRTM mit dem DGM10_R kann bei der visuellen Betrachtung eine hohe Übereinstimmung der beiden Klassifizierungen abgeleitet werden. Während bei den Ebenen und Hängen kaum Unterschiede ausgemacht werden können, stimmen zudem die Kämmen und Senken in ihrer Form und Lage größtenteils überein. Selbst kleinere Strukturen wie bei 49°51'0"N / 8°46'30"O stimmen in ihrer Morphologie und Abfolge der Reliefklassen gut überein.

In Tab. 6-18 sind die Anteilswerte und Lageübereinstimmung der Reliefklassen des SRTM und DGM10_R angegeben. Die Anteilswerte der Reliefklassen Kämmen und Senken sind bei beiden Geländemodellen nahezu identisch. Die beiden anderen Reliefklassen werden aus dem SRTM im Vergleich zum DGM10 weniger Hänge, dafür aber mehr Ebenen erzeugt.

Tab. 6-18: UG 2: Anteilswerte der Reliefklassen und Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des SRTM im Vergleich zum DGM10.

	SRTM	DGM10	Lageübereinstimmung
Kämme	12,72%	12,73%	62,25%
Senken	12,10%	12,31%	61,40%
Ebenen	48,53%	45,49%	94,72%
Hänge	26,65%	29,47%	96,74%

Bei der Überprüfung der Lageübereinstimmung der klassifizierten Pixel des SRTM mit dem DGM10_R wird deutlich, dass bei den Reliefklassen Ebenen und Hänge sehr große Übereinstimmungen zu verzeichnen sind. Des Weiteren stimmen bei den Kämmen und Senken über 60% der Pixel in ihrer Lage überein.

6.2.3 Hydrologische Analysen

Um Erkenntnisse über spezielle Eigenschaften der Geländemodelle in Hinblick auf hydrologische Analysen sammeln zu können, wurden die Geländemodelle, mit den in Kapitel 5.4 vorgestellten Methoden, untersucht. Hierzu zählten die Analyse zur Anzahl und Höhe der zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel, deren Lage im Untersuchungsgebiet, sowie Form, Größe und Verlauf des Gewässernetzes und der dazugehörigen Einzugsgebiete.

Verfüllung der Pixel

Auf Tab. 6-19 ist die mittlere Höhe der, zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel, angegeben. Die Werte zeigen eine Tendenz an, dass das ASTER GDEM im Vergleich zu den beiden anderen Modellen, mehrere oder tiefere Senkenbereiche aufweist.

Tab. 6-19: UG 2: Die mittlere Höhe der zur Verfüllung des Geländemodells benötigten Pixel.

	ASTER GDEM	SRTM	DGM10
Mittlere Höhe	3,34 m	2,47 m	2,36 m

Die Lage der zum Verfüllen der Geländemodelle benötigten Pixel ist auf Abb. 6-44 dargestellt. Die Verfüllung erfolgte bei allen Geländemodellen, wie zu erwarten, vorwiegend im Bereich der Ebenen. Beim DGM10 ist ein Gebiet im Bereich 49°44"0N / 8°35"30O besonders von der Verfüllung betroffen. Beim ASTER GDEM im Vergleich zum SRTM sind es weitaus mehr und tiefere Pixel, die für die Verfüllung benötigt wurden. Auf Abb. 6-44 sind Bereiche markiert, die beim SRTM und ASTER GDEM besonders stark, jedoch beim DGM10 nicht verfüllt wurden.

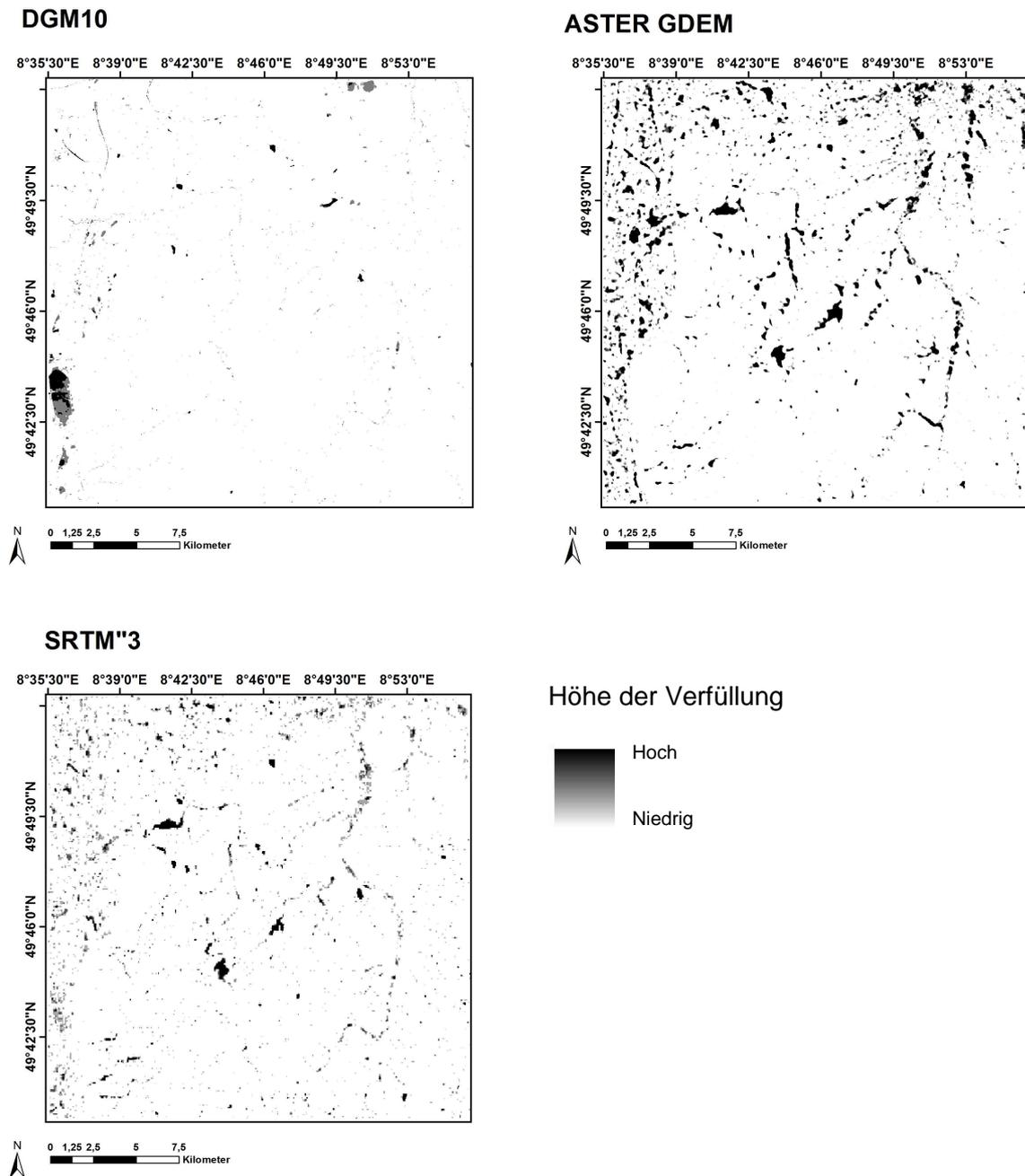


Abb. 6-44: UG 2: Lage der zur Verfüllung der Geländemodelle benötigten Pixel.

Gewässernetz und Einzugsgebiete

Auf Abb. 6-45 ist das Gewässernetz für drei *Drainage Punkte* (engl. *drainage points*) am Gebietsauslass dargestellt. Wie zu erwarten ist der Verlauf des Gewässernetzes im Bereich des stärker bewegten Geländes für alle drei Geländemodelle weitestgehend ähnlich, da hier eine Abgrenzung durch den Höhengradienten eindeutiger erfolgen kann. Größere Abweichungen des ASTER GDEM und SRTM vom DGM10 kommen zumeist ab einem Höhengradienten von unter 200 m vor. Hierbei handelt es sich um den Bereich der Ebenen, in

dem bedingt durch geringe Höhenunterschiede, eine Abweichung vom Referenzgewässernetz zu erwarten ist.

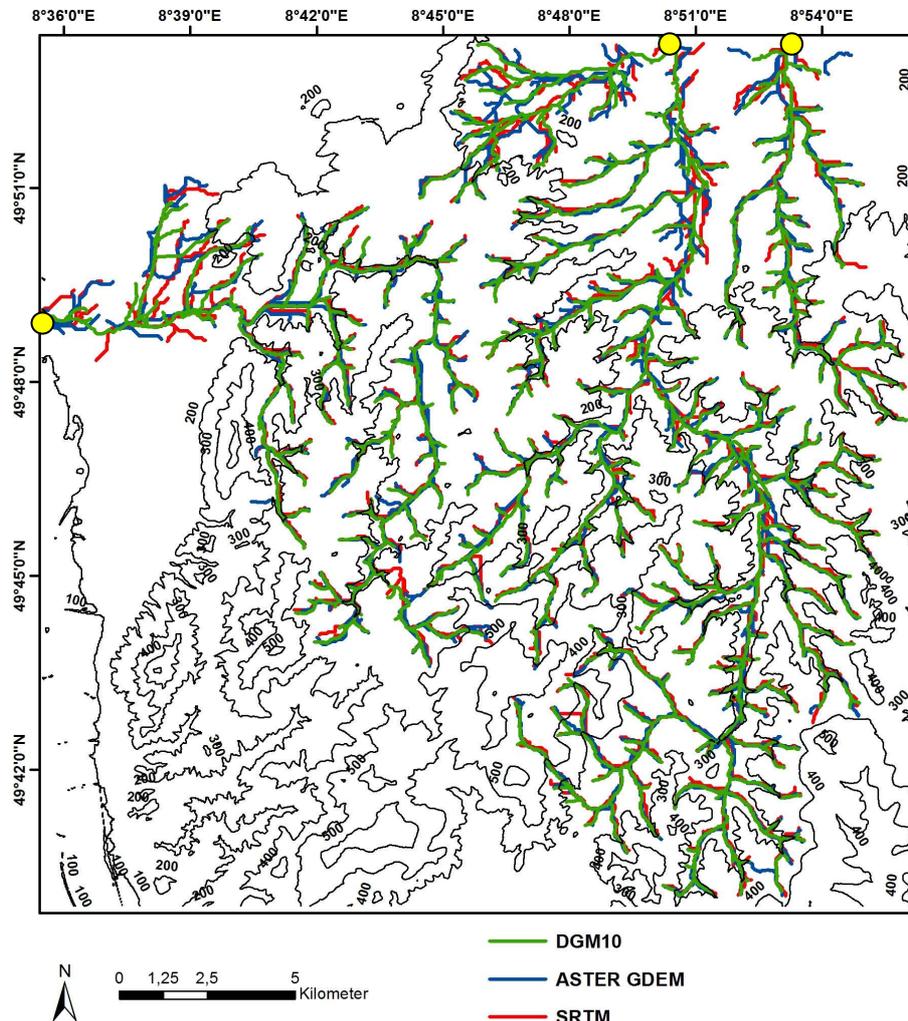
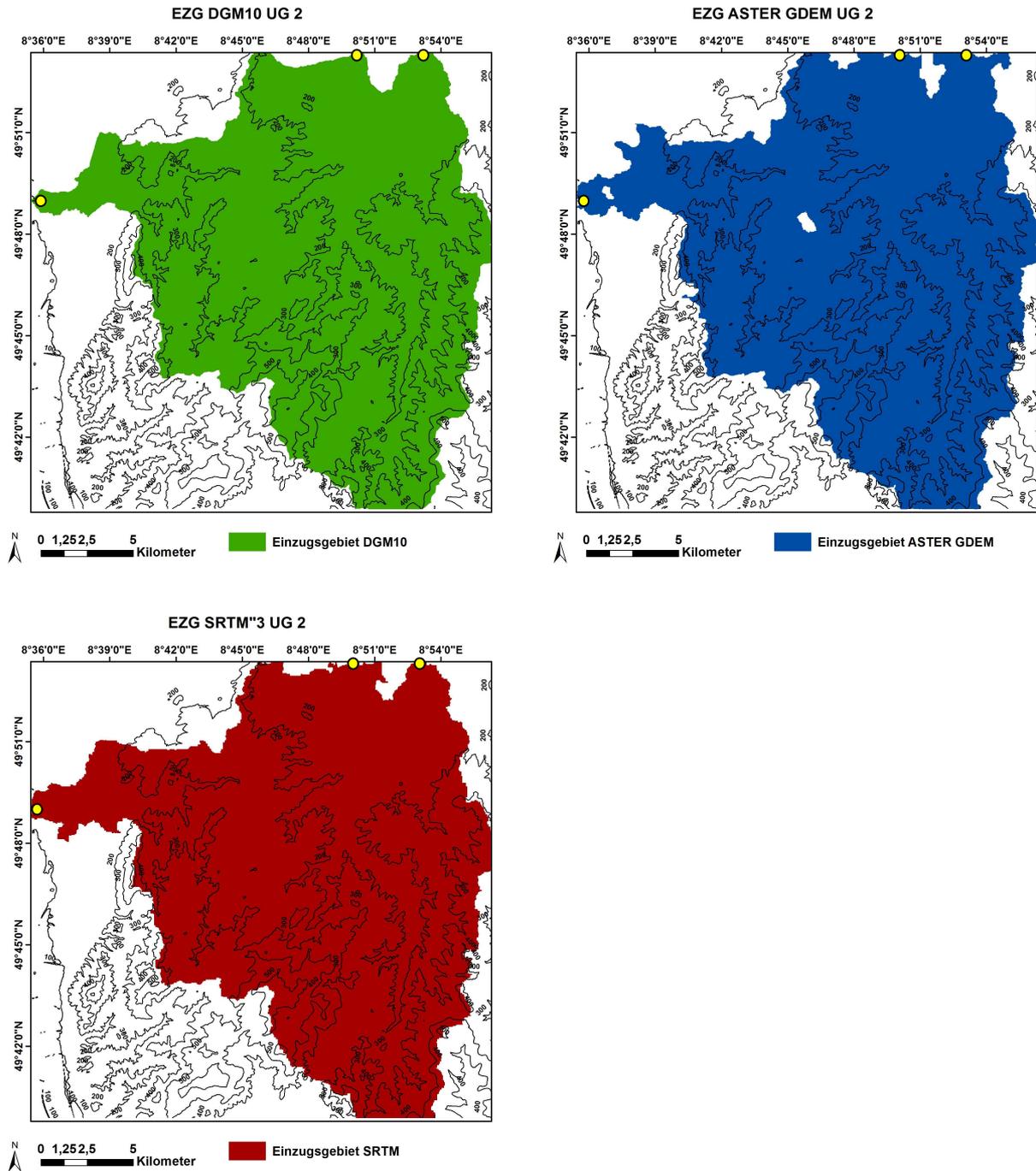


Abb. 6-45: UG 2: Gewässernetz für drei *Drainage Punkte* (gelb).

Auf Tab. 6-20 sind die Größen der Einzugsgebiete sowie das dazugehörige Länge des Gewässernetzes für das ASTER GDEM, SRTM und DGM10 angegeben. Im Vergleich zum DGM10 überschätzen das ASTER GDEM sowie das SRTM die Größe des Einzugsgebietes um ca. 10 km², was lediglich eine Überschätzung von ca. 2% ausmacht. Eindeutiger sind die Ergebnisse des Gewässernetzes. Während die Länge des Gewässernetzes des ASTER GDEM in etwa dem des DGM10 entspricht, ist das SRTM Gewässernetz um 5,4 % bzw. 36,17 km länger als das DGM10 Gewässernetz.

Tab. 6-20 UG 2: Größe der Einzugsgebiete und Länge des Gewässernetzes.

	DGM10	ASTER GDEM	SRTM
EZG (Größe)	469,59 km ²	479,24 km ²	480,39 km ²
Gewässernetz (Länge)	673,78 km	674,70 km	709,95 km

Abb. 6-46: UG 2: Einzugsgebiet für drei *Drainage Punkte* (gelb).

Die Einzugsgebiete für das UG 2 sind auf Abb. 6-46 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass es im Bereich südlich von 49°48'0N kaum Unterscheidungen in der Abgrenzung der jeweiligen Einzugsgebiete gibt. Zu Unterschieden kommt es erst im Bereich der Ebenen. Erwähnenswert sind beim ASTER GDEM noch zwei kleinere Bereiche innerhalb des Einzugsgebiets, die nicht als zum Einzugsgebiet zugehörig klassifiziert wurden. Eines liegt im Bereich um 49°49'5N / 8°36'50O, das andere 49°48'0N / 8°45'0O. Hier hatte möglicherweise der Schwellenwert, ab dem definiert wird wann ein Fließgewässer entsteht, nicht ausgereicht, um die fehlenden Bereiche zu erfassen.

6.2.4 Überprüfung des ASTER GDEM auf Anomalien

Die Datenstruktur des ASTER GDEM erzeugt in der Geländedarstellung eine Reihe von *Anomalien* und *Artefakte*, die bereits in Kapitel 2.2.3 diskutiert wurden. Im Folgenden werden vereinzelte Anomalien und Artefakte des ASTER GDEM im UG 2 identifiziert.

Auf Abb. 2-47 ist die Anzahl der zur ASTER GDEM Erstellung verwendeten Bildstapel dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass sich die Anzahl der verwendeten Bildstapel lokal deutlich unterscheidet. Im UG 2 wurden mindestens 6 Bildstapel zur Erzeugung der Geländehöhen verwendet. Diese geringe Anzahl an verwendeten Bildstapeln tritt großflächig im Südosten des Untersuchungsgebietes auf. Die maximale Anzahl der verwendeten Bildstapel beträgt 20 Bildstapel. Diese Anzahl wurde im nördlichen Bereich des Gebietes, bei 49°50'0N / 8°48'20O erreicht. Des Weiteren sind - auf Abb. 2-47 durch die Pfeile gekennzeichnet - *Stufen an Szenegrenzen* sichtbar. Diese Stufen haben aber, entgegen der Prognose in Kapitel 2.2.3, keine Auswirkung auf die Geländehöhe.

Die ASTER GDEM Szenen enthalten im UG 2 eine Vielzahl an bildstapelbedingten Artefakten. Auf den folgenden Abbildungen 6-48 und 6-49 werden die, im Methodenteil beschriebenen Artefakte *Pits*, *Bumps* und *Mole-Run*, im ASTER GDEM nachgewiesen.

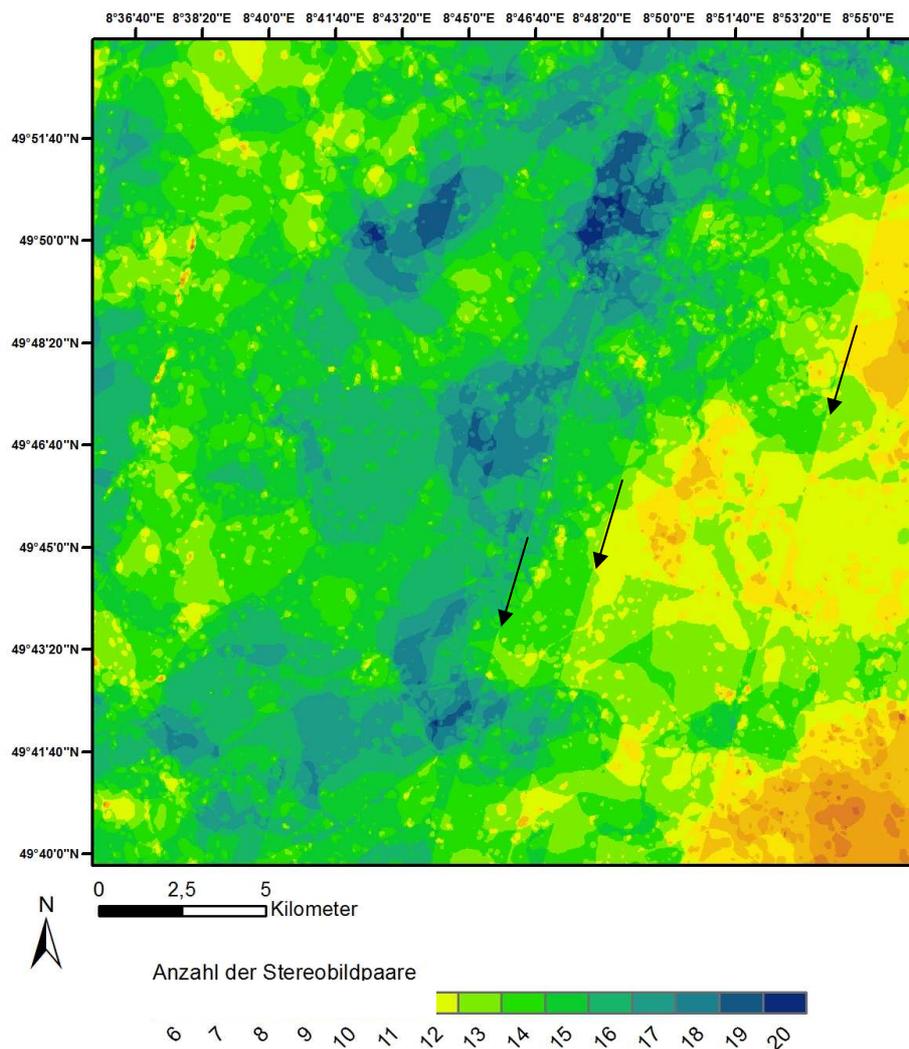


Abb. 6-47: UG 2: Anzahl der verwendeten Bildstapel zur ASTER GDEM Erstellung. (Pfeile markieren die *Stufengrenzen* der Bildstapel.)

Auf der Abb.6-48 ist ein Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit einem Beispiel für die im ASTER GDEM auftretenden Artefakte dargestellt. Das Beispiel befindet sich im Südosten des Untersuchungsgebietes. Auf der Abb. 6-48 (A) ist das ASTER GDEM mit schattiertem Relief dargestellt. Hierbei werden die im Methodenteil bereits beschriebenen Artefakte besonders gut visualisiert. Der, durch einen roten Kreis markierte Artefakt *Pit*, tritt im UG 2 besonders häufig auf. Eine mögliche Identifizierung des Artefakts *Mole-Runs* wurde mit einem blauen Kreis gekennzeichnet. Beim Vergleich zur Lage der Artefakte von (A) mit der Anzahl der Bildstapel in (B), ist ein Zusammenhang deutlich gegeben. Dass es sich hierbei tatsächlich um Artefakte handelt, kann anhand des Referenzgeländemodells (C) aufgezeigt

werden, da diese punktuellen Einwölbungen und *Mole-Runs* im Referenzgeländemodell nicht auftreten.

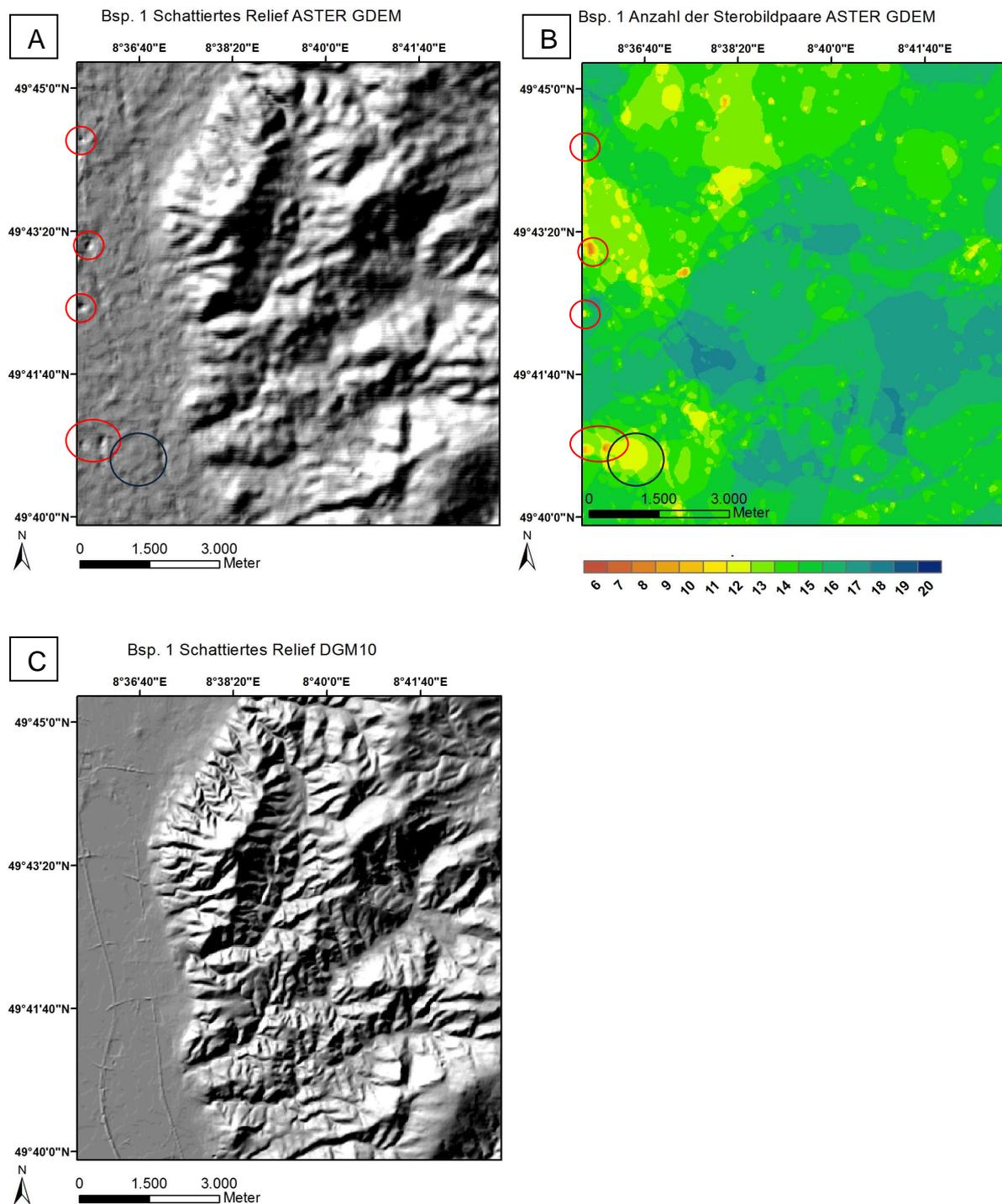


Abb. 6-48: UG 2: Anomalien und Artefakte des ASTER GDEM (Rote Kreise: Artefakt *Pit*. Blauer Kreis: Artefakt *Mole-Run*)
 A) Schattierte Reliefdarstellung des ASTER GDEM.
 B) Bildstapel des ASTER GDEM.
 C) Schattierte Reliefdarstellung des DGM10.

6.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse UG 2

Die Geländehöhen des ASTER GDEM sind im Vergleich zum SRTM statistisch gesehen genauer. Das ASTER GDEM neigt dazu, die Geländehöhe systematisch zu unterschätzen. Beim SRTM wird die Geländehöhe systematisch überschätzt.

Die Höhenabweichungen des ASTER GDEM fallen für alle Reliefklassen und Landbedeckungsklassen moderat aus. Das SRTM zeigte Höhengenaueigkeitsprobleme für die Reliefklasse Senken, sowie in bewaldeten Gebieten. Andererseits sind die Geländehöhen des SRTM im schwach bewegten Gelände sowie in Bereichen mit niedrigem Bewuchs genauer als die des ASTER GDEM.

Die Qualität der ASTER GDEM-Höhenwerte sind direkt von der Anzahl der verwendeten Bildstapel des ASTER GDEM abhängig. Demnach ist der Höhenwert pro Pixel umso genauer, je mehr Bildstapel für die Höhenwertermittlung verwendet wurden.

Die aus dem SRTM berechneten Hangneigungen sind genauer als die des ASTER GDEM. Zudem kommen die Hangneigungen im Bereich von 2° - 6° im ASTER GDEM deutlich zu häufig vor.

Nach der visuellen Interpretation der Höhenlinien zeigten sich leichte Vorteile beim ASTER GDEM. Die Höhenlinien entsprachen in ihrem Verlauf am ehesten denen des Referenzgeländemodells.

Die Reliefklassifizierung zeigte klare Vorteile beim SRTM. Die aus dem SRTM erzeugten Reliefklassen Ebenen und Hänge entsprachen in ihrer Anzahl und Lage weitestgehend denen des Referenzgeländemodells. Beide Geländemodelle hatten beim Kartieren der Reliefklassen Kämme und Senken die größten Diskrepanzen, wobei hier dennoch die Ergebnisse des SRTM besser ausfallen als die des ASTER GDEM.

Die hydrologischen Analysen zeigten auf, dass das ASTER GDEM im Vergleich zum SRTM ein höheres Maß an Senkenverfüllung benötigt. Diesem Sachverhalt tragen ebenfalls die auftretenden Anomalien und Artefakte bei. Die Analyse der Gewässernetze und Einzugsgebiete zeigte keine nennenswerten Unterschiede zum Referenzgeländemodell auf.

7. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Vor- und Nachteile der Höhenmodelle für bestimmte Nutzungskriterien aufzuzeigen. Hierfür wurden beide Geländemodelle im Vergleich mit amtlichen Referenzgeländemodellen auf deren Höhenabweichung und Eignung für geomorphometrische und hydrologische Analysen untersucht. Zudem wurde die Höhenabweichung für unterschiedliche Reliefklassen und Landbedeckungen ermittelt. Zu den geomorphometrischen Analysen zählten der Vergleich der Hangneigung, die visuelle Analyse zum Verlauf der Höhenlinien und das Erzeugen von Reliefklassen aus den Geländemodellen. Bei den hydrologischen Analysen wurde die benötigte Verfüllung der Geländemodelle, die Größe und Form von Einzugsgebieten sowie das Gewässernetz erzeugt und miteinander verglichen.

Die Analysen erfolgten für zwei Untersuchungsgebiete. Das UG 1 repräsentiert eine Hochgebirgsregion, das UG 2 eine Mittelgebirgsregion. Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Untersuchungsgebiete mit den thematischen Teilen entsprechend zusammengefasst und in Kontext gesetzt.

7.1 Statistischer Höhenvergleich

Im statistischen Vergleich sind die Höhenabweichungen des ASTER GDEM in beiden Untersuchungsgebieten geringer als die des SRTM. Beide Modelle haben eine unterschiedliche Tendenz zur Unter- bzw. Überschätzung der Geländehöhen. Das ASTER GDEM tendiert dazu, die Geländehöhen systematisch zu unterschätzen. Die Geländehöhen werden vom SRTM - wie bei einem *DOM* üblich - systematisch überschätzt.

Beim Vergleich der RMSE-Werte des UG 1 mit dem UG 2 fällt auf, dass bei beiden Geländemodellen im UG 1 gegenüber dem UG 2 die RMSE-Werte um den Faktor drei erhöht sind. Dies liegt vorwiegend daran, dass die Höhenunterschiede innerhalb des UG 1 im Vergleich zum UG 2 wesentlich höher sind (vgl. Kapitel 4). Demzufolge lassen sich lediglich die Werte des UG 2 mit den in Kapitel 3.1 gesammelten Werten der Höhenabweichung vergleichen. In den Analysen in Kapitel 3.1 waren die Höhenabweichungen des SRTM im Vergleich zum ASTER GDEM durchweg genauer. Diese Ergebnisse können für das UG 2 nicht bestätigt werden.

Bei den meisten Analysen in Kapitel 3.1 werden keine Angaben zu den verwendeten Bildstapeln des ASTER GDEM gemacht. Deren Anzahl bestimmt maßgeblich die Qualität der ASTER GDEM Höhendaten. Des Weiteren beziehen sich die Höhenabweichungen auf flächenmäßig sehr große Untersuchungsgebiete, die bei manchen Analysen die Größe eines Kontinents erfassen. Dies ist der Grund der Annahme, dass im Durchschnitt ein größerer Anteil an Ebenen und schwach bewegtem Gelände in die Statistik eingehen, als in den vergleichsweise kleinflächigen Untersuchungsgebieten dieser Arbeit. Im Bereich der Ebenen weist das SRTM geringere Höhenabweichungen auf als das ASTER GDEM (vgl. Tab. 6-14 und 6-19). Durch die unterschiedliche Anzahl der Ebenen könnten die niedrigeren Höhenabweichungen des SRTM in den anderen Forschungsarbeiten erklärt werden.

Erstaunliche Ergebnisse zeigten sich beim SRTM durch das *Resampling* auf die kleinere Auflösung des ASTER GDEM (SRTM_R). Die Höhengenaugigkeit des SRTM_R nahm in beiden Untersuchungsgebieten - am deutlichsten im UG 1 - zu. Die Gründe hierfür sind noch nicht geklärt. Das SRTM_R Raster könnte sich - durch die kleinere Auflösung und Neuberechnung der Rasterwerte aus Mittelwerten der umliegenden Pixel - sanfter in das Relief einpassen. Zudem sei noch darauf hingewiesen, dass das SRTM vor der Veröffentlichung von der Auflösung mit einer Bogensekunde, in eine mit drei Bogensekunden *resampled* wurde (vgl. Kapitel 2.3.1). Demnach wurde das SRTM zurück in dessen ursprüngliche Auflösung *resampled*. Durch das mehrfache *Resampling* sind die ursprünglichen Werte nicht wieder hergestellt worden, dennoch kann festgehalten werden, dass das SRTM ursprünglich auf eine kleinere Auflösung ausgelegt war.

Das ASTER GDEM VT (2009) hat bereits eine Abhängigkeit der Höhenabweichung von der Reliefhöhe in Verbindung mit zunehmender Hangneigung analysiert (vgl. Tab. 3-2). Diese Erkenntnisse sind nachvollziehbar, da im Bereich des stärker bewegten Geländes durch die räumliche Konzentration von hohen, reliefbedingten Höhenänderungen, ein höherer Fehler - z.B. durch Messungsprobleme (siehe Kapitel 2) - entstehen kann, als im schwach bewegten Gelände.

Das ASTER GDEM VT (2009) gibt ab einer Höhe von >600 m einen RMSE von 24,27 m für das ASTER GDEM an (vgl. Tab. 3-2). Vergleicht man diese Werte mit den hier vorliegenden Ergebnissen des UG 1 (RMSE 27,87 m), welches sich innerhalb eines Höhengradienten von 1800 m befindet, können diese Einschätzungen bestätigt werden. Für den Bereich der Reliefhöhe des UG 2 wird vom ASTER GDEM VT (2009) für das ASTER

GDEM ein durchschnittlicher RMSE von 12,26 m (40 - 600 m) ausgegeben. Beim Vergleich dieser Werte mit den Ergebnissen des UG 2, ist die vom ASTER GDEM VT (2009) angenommene Höhenabweichung des ASTER GDEM zu hoch.

Die Auswertung der Höhenabweichung nach Anzahl der Bildstapel bestätigt bei beiden Untersuchungsgebieten die Thesen von JACOBSEN (2010) und dem ASTER GDEM VT (2009), dass mit zunehmender Bildstapelzahl die vertikale Genauigkeit des ASTER GDEM zunimmt.

7.1.1 Höhenabweichung nach Reliefklasse

Die Analyse zur Höhengenaugkeit nach Reliefklasse zeigte die größten Höhenabweichungen im Bereich der Reliefklassen *Kämme* und *Senken* auf. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da es sich bei den Kämmen und Senken um die Reliefklassen mit räumlich am stärksten konzentrierten Höhenunterschieden von allen Reliefklassen handelt. Die Tendenz beider Geländemodelle zeigt eine Unterschätzung der Geländehöhen im Bereich der Kämmen sowie eine Überschätzung im Bereich der Senken. Demnach kann hierbei festgestellt werden, dass das Gelände in diesen Reliefbereichen *eingeebnet* wird. Die *Einebnung* ist beim SRTM durch das *Resampling* nachzuvollziehen. Beim ASTER GDEM liegen die Gründe hierfür nicht am *Resampling*.

Diese Erkenntnisse stimmen mit den Ergebnissen von HAYAKAWA (2008) überein, die in Kapitel 3.2 erläutert wurden. Zudem soll nach HAYAKAWA (2008) das Überschätzen der Geländehöhe in Senkenbereichen durch das SRTM häufiger auftreten als die Unterschätzung der Geländehöhen in Kammereichen beim ASTER GDEM. Diese Einschätzung kann ebenfalls durch die Ergebnisse des UG 2 bestätigt werden, da hier niedrigere Höhenabweichungen des ASTER GDEM im Vergleich zum SRTM für den Bereich der Senken gemessen werden können (vgl. Tab. 6-19).

7.1.2 Höhenabweichung nach Landbedeckung

Der Höhengradient im UG 1 hat einen starken Einfluss auf die Höhengenaugkeit der Geländemodelle. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Ergebnisse der Höhenabweichungen für die einzelnen Landbedeckungsklassen nicht zur Analyse der charakteristischen Eigenschaften jeder Landbedeckungsklassen herangezogen werden können.

Aus diesem Grund werden im Folgenden lediglich die Höhenabweichungen der Landbedeckungsklassen des UG 2 diskutiert.

Auf Tab. 7-1 sind die Ergebnisse zur Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM für die einzelnen Landbedeckungsklassen des UG 2 im Vergleich zu den Erkenntnissen des ASTER GDEM VT (2009) angegeben. Im Gegensatz zu den Ergebnissen des ASTER GDEM VT (2009) fallen die Höhenabweichungen des ASTER GDEM im UG 2 niedriger aus. Zudem sind die Werte der Höhenabweichung des SRTM im UG 2 erhöht.

Während die Höhenabweichungen im Bereich der Landbedeckungsklassen *Siedlung* und *Offen* nur leicht erhöht sind, fallen die Unterschiede im Bereich der Waldflächen deutlich höher aus. Das SRTM liegt im Bereich der Landbedeckungsklasse Wald weit über dem vom ASTER GDEM VT (2009) ermittelten Wert.

Tab. 7-1: Die Höhenabweichung (in Metern) des ASTER GDEM und SRTM_R für die Landbedeckungsklassen des UG 2 im Vergleich mit den Werten des ASTER GDEM VT (2009).

	ME			RMSE		
	<i>Siedlung</i>	<i>Wald</i>	<i>Offen</i>	<i>Siedlung</i>	<i>Wald</i>	<i>Offen</i>
ASTER GDEM UG 2	-3,45	4,86	-6,37	6,75	10,23	8,26
ASTER GDEM - ASTER GDEM VT (2009)	-4,06	1,75	-6,50	9,06	10,93	10,33
SRTM UG 2	4,07	12,30	0,31	6,61	16,37	5,58
SRTM - ASTER GDEM VT (2009)	2,04	6,59	0,16	5,21	10,76	5,20

Da es sich bei beiden Geländemodellen um *digitale Oberflächenmodelle* (siehe Kapitel 2.1) handelt, waren Höhenabweichungen bei beiden Geländemodellen besonders in Bereichen von Wäldern und Siedlungen anzunehmen. Während die Höhenabweichungen beider Geländemodelle für Siedlungen moderat ausfallen, sind beim SRTM die Abweichungen im Bereich der Wälder markant. Da das ASTER GDEM systematisch dazu neigt, die Geländehöhe zu unterschätzen, wirkt sich die Unterschätzung der Geländehöhe im Bereich der Wälder positiv auf die Höhengenaugigkeit des ASTER GDEM aus. Demnach neutralisiert sich die Geländeüberhöhung durch die Kronendächer des Waldes mit der systematischen Unterschätzung der Geländehöhe des ASTER GDEM. Diese Annahme belegt ebenfalls der

ME des ASTER GDEM, der nur im Bereich der Landbedeckungsklasse Wald positiv ist (vgl. Tab. 7-1).

7.1.3 Hangneigung

Die Hangneigungen des ASTER GDEM sind in den Hochgebirgsregionen (UG 1), die Hangneigungen des SRTM hingegen im Bereich des Mittelgebirges (UG 2) genauer. Die Aussage von HAYAKAWA (2008), dass flache (0° - 12°) und steile ($>33^{\circ}$) Hänge im ASTER GDEM sowie mittlere (12° - 33°) Hänge eher im SRTM auftreten, konnte nicht bestätigt werden. Die Analysen dieser Arbeit zeigten eine Überschätzung der flachen Hänge (0° - 12°) durch das SRTM auf. Zudem werden im UG 2 die mittleren Hänge vom SRTM unterschätzt. Im UG 2 kommen beim ASTER GDEM auffällig selten Hangneigungen im Bereich von 0 - 2° vor. Dies kann auf die Erzeugungstechnik durch die Parallaxe zurückzuführen sein, die möglicherweise erst ab einer Hangneigung von über 2° gute Ergebnisse erzielt.

7.1.4 Höhenlinien

Die visuelle Interpretation zum Verlauf der, aus dem ASTER GDEM und SRTM erzeugten Höhenlinien zeigte keine eindeutigen Erkenntnisse auf. In beiden Untersuchungsgebieten ist eine geringfügig genauere Orientierung der Höhenlinien des ASTER GDEM an den Referenzhöhenlinien gegeben, was aber lediglich durch die feinere Auflösung bedingt ist.

7.1.5 Reliefklassifizierung

Die Ergebnisse der Reliefklassifizierung wiesen Vorteile des SRTM nach. Bei beiden Untersuchungsgebieten zeigten sich deutlich höhere Übereinstimmungen der Reliefklassen des SRTM mit den Reliefklassen des Referenzgeländemodells. Das ASTER GDEM hatte besonders Probleme bei der Klassifizierung von Senken.

Ein möglicher Grund für die besseren Klassifizierungsergebnisse des SRTM kann an dessen größerer Auflösung liegen, da weniger Pixel für die Analyse ausgewertet werden und somit der Formenschatz eines generalisierten Reliefs zu größeren Übereinstimmungen mit den Reliefklassen des Referenzgeländemodells führen kann. Da die feinere Auflösung des ASTER

GDEM aber ein Kriterium zur Wahl des Geländemodells ist, muss die Datenqualität dennoch der Auflösung entsprechend gut sein.

7.1.6 Hydrologische Analysen

Das ASTER GDEM benötigt in beiden Untersuchungsgebieten statistisch gesehen mehr bzw. höhere Pixel für die Verfüllung des Geländemodells. Hier kann es einen Zusammenhang zwischen den vom ASTER GDEM erzeugten Artefakten (z.B. *Pits*) geben, die in ihrer Größe und Tiefe unterschiedlich ausfallen können. Da sich bereits das Identifizieren der Artefakte als problematisch erwies, gestaltet sich die Quantifizierung über die Auswirkungen des *Pit*-Artefakts als schwierig. Zudem ist im UG 1, durch eine bildstapelbedingte Verschlechterung der Datenqualität, eine Anomalie der Oberflächenmorphologie entstanden, die verfüllt werden musste. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das ASTER GDEM mehr hydrologisch relevante Senkenbereiche aufweist als das SRTM.

Die berechneten Gewässernetze zeigten für das ASTER GDEM und das SRTM in beiden Untersuchungsgebieten keine systematischen Auffälligkeiten. Die Größe der Einzugsgebiete steht in Abhängigkeit von der Rastergröße. Das SRTM tendiert dazu, die Größe der Einzugsgebiete am deutlichsten zu überschätzen. Dies ist bedingt durch die dreifach gröbere Auflösung des SRTM zu erwarten, da hier Auflösungsbedingt keine Differenzierung innerhalb des Bereichs von drei Bogensekunden erfolgt.

7.2 Methodenbewertung

Die Qualität der Höhendaten des ASTER GDEM und SRTM wurde mit einer Vielzahl an, in Kapitel 5 beschriebenen Methoden analysiert. Die statistische Beschreibung der Höhenabweichung des ASTER GDEM und SRTM erfüllte als Grundlage ihren Zweck, hätte jedoch alleinstehend wenig Aussagekraft über die eigentliche Qualität der Höhendaten. Verbunden mit mehreren qualitativen Aspekten wie der Landbedeckungs- und Reliefklassen, konnten so spezifische Eigenschaften der Geländemodelle aufgezeigt werden. Vielmehr hat sich bei den geomorphometrischen Analysen gezeigt, dass die statistischen Höhengenaugkeitsvergleiche zwar als Kriterium zur Beurteilung der Datenqualität herangezogen werden können, diese aber keine Aussage über die Qualität zur Darstellung der Oberflächenmorphologie durch die Geländemodelle beinhalten.

Die Analyse der Höhenlinien durch visuelle Interpretation zeigte grob eine Tendenz der beiden Geländemodelle auf, inwiefern diese das Gelände generalisieren. Leider fehlte dieser Methode die Möglichkeit der Quantifizierung, so dass die Aussagekraft dieser Methode gering einzuschätzen ist.

Die hydrologischen Analysen erfüllten ihren Zweck, ohne nennenswerte Auffälligkeiten aufzuzeigen. Gerade in diesem Bereich hätten, bedingt durch die Anomalien und Artefakte des ASTER GDEM, gravierende Unterschiede auftreten können.

7.3 Fazit

Diese Arbeit hat eine Vielzahl an Informationen zur Qualität der Geländehöhen­daten des ASTER GDEM und SRTM aufgezeigt. Die Frage, welches der beiden Geländemodelle sich nun für zukünftige Nutzer besser eignet, ist nicht eindeutig zu beantworten. Die Analysen zeigten, dass die dreifach kleinere Rastergröße des ASTER GDEM nicht zwangsläufig zu qualitativ besseren Höheninformationen führt. Vielmehr steht die Qualität des ASTER GDEM in direkter Abhängigkeit zu den Bildstapeln, die für die Ermittlung der Geländehöhe verwendet wurden. Die Überprüfung der genutzten Bildstapel des ASTER GDEM aus der mitgelieferten *NUM*-Datei ist demnach als eines der wesentlichen Kriterien zur Beurteilung der Datenqualität heranzuziehen. Hier lassen sich bereits problematische Bereiche sowie die technisch bedingten Artefakte und Anomalien identifizieren. Zusammenfassend lässt sich zum ASTER GDEM sagen, dass ab einer Bildstapelanzahl von mindestens neun (9), eine gute Datenqualität vorhanden ist. Beträgt die Anzahl der Bildstapel weniger als vier (4), sollte von einer Nutzung des ASTER GDEM abgesehen werden. Demnach ist die Nutzung des ASTER GDEM an verschiedene vorangehende Überprüfungen gebunden.

Auch wenn das SRTM im statistischen Höhenvergleich zum ASTER GDEM durchweg höhere Abweichungen der Geländehöhe aufweist, ist die Datenqualität der Auflösung dennoch ausreichend. Im Vergleich zum ASTER GDEM kann das SRTM direkt ohne vorangehende Überprüfungen zur Datenqualität genutzt werden. Insbesondere in Gebieten mit einem niedrigen Höhengradienten ist die Anwendung des SRTM dem ASTER GDEM sogar vorzuziehen. Dies belegen die Ergebnisse der Ebenen in beiden Untersuchungsgebieten, die als Beispiel für gering bewegtes Gelände herangezogen werden können.

Zudem hat das *Resampling* der SRTM Daten auf das kleinere Raster des ASTER GDEM erstaunlich gute Ergebnisse erzielt. In beiden Untersuchungsgebieten verringert sich

der durchschnittliche Höhenfehler des SRTM nach dem *Resampling*. Demnach kann das SRTM bedenkenlos auf eine kleinere Rastergröße *resampled* werden, ohne die Höhengenaugigkeit negativ zu beeinflussen.

8. Quellen

- ABRAMS, M. (2000): The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 21, 5, 847–859.
- ABRAMS, M. (2010): The Aster Global DEM. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, April 2010, 344–348.
- ABRAMS, M. (2002): ASTER Users Handbook. Internet:
http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_documents/aster_user_guide_v2.pdf
Zugriff 7.10.2010.
- ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3. Auflage. Wiss. Buchges, Darmstadt. 1 - 254
- AREFI, H. und P. REINARTZ (2010): Elimination of the Outliers from ASTER GDEM Data. Internet: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/11/11_01_Paper_200.pdf.
Zugriff 21.1.0.2010.
- ASTER, Ed. (2009): ASTER GDEM Readme File – ASTER GDEM Version 1.
- ASTER GDEM VT (2009): ASTER Global DEM Validation Summary Report.
http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf. Zugriff: 01.10.2010
- BALTSAVIAS, E.P. und STALLMANN, D. (1993): SPOT stereo matching for digital terrain model generation. Proc. of 2nd Swiss Symposium on Pattern Recognition and Computer Vision, Zurich.
- BILL, R. und ZEHNER, M.L. (2002): Cubic Convolution - Geoinformatik Lexikon. Internet:
<http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=-579963653>.
Zugriff: 28.12.2010
- BILLEMONT, S. (2010): Validation of ASTER GDEM over Tibet. Delft University of Technology. Internet: <http://www.angelcorp.be/data/projects/AE3-E10/Paper/Paper.pdf> Zugriff: 21.10.2010.

- BOLLMANN, J. (2001): Lexikon der Kartographie und Geomatik : in zwei Bänden; Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg ; Berlin
- BOLONGARO-CREVENNA, A. (2002): Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology* 67 (2005), 407–422.
- BUNDESAMT FÜR EICH UND VERMESSUNGSWESEN (o.J.): EPSG-Übersicht: Geodätisches Datum und Projektionen in Österreich. Internet: http://www.bev.gv.at/pls/portal/docs/PAGE/BEV_PORTAL_CONTENT_ALLGEMEIN/0100_NEWS/0150_ARCHIV/ARCHIV_2007/NEUE%20EPSG%20-%20CODES%20FUER%20OESTERREICH/PROJEKTIONEN_TRANSF.PDF. Zugriff 06.10.2010.
- BURROUGH, P. A. und MCDONNELL, R. A. (1998): Principals of Geographical Information Systems Spatial Information Systems and Geostatistics: Oxford University Press. 1-333.
- CGIAR (2010): CGIAR-CSI SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. Internet: <http://SRTM.csi.cgiar.org/>. Zugriff 12.11.2010.
- CUARTERO, A., FELICÍSIMO, and ARIZA, F.J. (2004): Accuracy of DEM generation from TERRA-ASTER stereo data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35, 225–260.
- DVW (2009): Deutscher Verein für Vermessungswesen - Mitteilungen. Internet <http://www.dvwhessen.de/downloads/DVWHeft1-2009.pdf>. Zugriff: 08.01.2011.
- DRESCHER, R. (2005): Berechnung einer hochauflösenden Digitalen Finite Element Höhenbezugsfläche für Hessen. Internet: http://www.dfhbf.de/dokumente/DFHBF-Hessen-Poster_Drescher_TUD.pdf. Zugriff: 08.01.2011.
- ESRI, I. (2008): Geographic transformations.
- ESRI, I. (2010): ArcGIS 10Help.
- FISHER, P. (2006): Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*, 30, 467–489.
- FÜRST, J. (2004): GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft. Univ. für Bodenkultur, Habil.-Schr.-Wien, 2004. Wichmann, Heidelberg.
- HAGEDORN, F. (2006): Die Waldgrenze. Die Alpen 9/2006. Internet: http://alpen.sac-cas.ch/html_d/archiv/2006/200609/ad_2006_09_15.pdf. Zugriff 10.03.2011.
- HATO, M., H. TSU, H., TACHIKAWA, T., ABRAMS, M. und BAILEY, B. (2009): The ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) -for societal benefit -. Internet: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFM.U33B0065H>. Zugriff 21.10.2010.

- HAYAKAWA, Y.S.(2008): Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM -3. *Geophysical Research Letters*, VOL. 35, L17404.
- HENGL, T. und REUTER, H.I., Eds. (2009): *Geomorphometry. Concepts, software, applications. Developments in soil science 33.* Elsevier, Amsterdam. 1-765
- HVBG (2009): Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation - Produktmarketing. 2009. Produktkatalog Heft 4 "Digitale Geobasisdaten" Stand Mai 2010. Internet:
http://www.hvbg.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HMWVL_15/HVBG_Internet/med/02d/02d307d5-da11-b821-f012-f31e2389e481., Zugriff 14.12.2010.
- HIRANO, A. (2003): Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57, 356 - 370.
- HIRT, C., M. S. Filmer und W. E. Featherstone (2010): Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57: 3, 337 - 347.
- HSING-CHUNG CHANG, X. und L., LINLIN GE (2010): Assessment of SRTM, ACE2 and ASTER GDEM using RTK-GPS. School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales. Internet:
http://www.gmat.unsw.edu.au.proxy.ub.uni-frankfurt.de/snap/publications/chang_etal2010a.pdf. Zugriff: 14.05.2011.
- JACOBSEN, K. (2004): Generierung und Validierung von Höhenmodellen aus Weltrauminformationen. Internet: http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/jac_04_dgpf.pdf. Zugriff: 20.01.2011.
- JACOBSEN, K. (2005): *Analyses of SRTM Elevation Models*, University of Hannover, Germany. Internet: http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/ASEjac.pdf Zugriff: 25.11.2010
- JACOBSEN, K. (2010): Vergleich von ASTER GDEM- mit SRTM -Höhenmodellen DGPF Tagungsband 19 / 2010.
- JACOBSEN, K., and PASSINI, R., Eds. (2010): *Analysis of ASTER GDEM Elevation Models ISPRS Com 1*, Calgary on CD.
- LESER, H. und DIERCKE, C. (2005): *Diercke-Wörterbuch allgemeine Geographie.* dtv 3422. Westermann; Dt. Taschenbuch-Verl., München. 1-1119

- LI, Z. (1988): On the measure of digital terrain model accuracy. *Photogrammetric Record*, 12(72), 873-877.
- LIEDTKE, H. (2002): *Physische Geographie Deutschlands*. Klett-Perthes. Gotha und Stuttgart S. 1-768
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. und CHIPMAN, J.W. (2008). *Remote sensing and image interpretation*. Wiley, Hoboken, NJ.
- LÖFFLER, E., HONECKER, U. und STABEL, E. (2005): *Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten; mit 9 Tab.n. Studienbücher der Geographie*. Borntraeger, Berlin. 1-287
- LUNDBLAD, E. et. al (2006): A Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa. *Marine Geodesy*, 29: 89-111
- LVMA Vorarlberg (2010): *Land Vorarlberg - Laserscanning Höhenmodell Vorarlberg (DSM-L, DTM-L)*. Internet:
http://www.vorarlberg.gv.at/vorarlberg/bauen_wohnen/bauen/landesvermessungsamt/weitereinformationen/geobasisdaten/praeziseshoehenmodellvora.htm.
Zugriff 14.12.2010.
- MAUKISCH, M. (1996): Vergleich Digitaler Geländemodelle als Grundlage für naturraumanalysen, Internationales Symposium INTERPRAEVENT 1996. Tagungspublikation, Band 4, Seite 51 - 61
- NASA (2001): Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). http://eosps0.gsfc.nasa.gov/ftp_docs/lithographs/ASTER_litho.pdf. Zugriff 21.10.2010.
- NIKOLAKOPOULOS, K.G. (2006): SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 21 10 November 2006, 4819-4838.
- NGA (2008): NGA EGM96 Geoid Calculator. Internet: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>. Zugriff: 10.02.2011
- NOAA CSC (2005): *Benthic Terrain Modeler*. Internet:
http://dusk.geo.orst.edu/djl/samoa/BTM_Exercise.pdf. Zugriff: 09.01.2011.
- PASSINI, R. und JACOBSEN, K. (2007): High Resolution SRTM Height Models. *IntArchPhRS*, XXXVI. Band 1/W51.

- RABUS, B. (2003): The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57, 241-262.
- REICH, M. (2004): Vergleich von digitalen Höhenmodellen. Internet: http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/publikationen/fachartikel/2002/reich_dhm_vergleich.pdf .
Zugriff 11.03.2011.
- TAGIL, S. (2008): GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms Around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Science*, vol. 8, Issue 6, p.910-921
- TARBOTON, D. (2008): Terrain Analysis Using Digital Elevation Data (TauDEM). Internet: <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/> Zugriff: 14.04.2011
- YAMAGUCHI, Y. (1998): Overview of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 4, 1062-1071.
- YÜKSEL, A. (2008): Using ASTER Imagery in Land- use/cover Classification of Eastern Mediterranean Landscapes According to CORINE Land Cover Project. Internet: <http://pdf.easechem.com/pdf/25/035758be-9e84-4508-83b5-0ff2455560c2.pdf>.
Zugriff: 20.12.2010.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Frankfurt am Main, 25.05.2011

Florian Krebs