

Untersuchungen zum Einsatz von Flugzeug- InSAR in der Gebirgskartographie

Der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
der Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor des Wissenschaftszweiges Ingenieur-Wissenschaften (Dr. Ing.)
vorgelegte Dissertation.

Dipl. Ing. (FH) Thomas Damoiseaux

Tag der Einreichung: 22. April 2002

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr. Ing. habil. Wolf Koch

Gutachter: Prof. Dr. phil. habil. Manfred Buchroithner
Prof. Dr. rer. nat. Peter Kammerer
Prof. Dr. Ing. Jörg Albertz

Tag der Verteidigung: 30. September 2002

Vorwort

Diese Arbeit entstand in den Jahren 1997 bis 2002 bei der Aero-Sensing Radarsysteme GmbH in Kooperation mit der Technischen Universität Dresden und der Fachhochschule München.

Die Betreuung auf Seiten der TU Dresden erfolgte durch Prof. Dr. phil. habil. Manfred F. Buchroithner, dem ich an dieser Stelle für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die vielen kleinen und großen Anregungen im Verlaufe der Arbeit und seine stete Diskussionsbereitschaft besonders danken möchte.

Prof. Dr. Ing. Jörg Albertz sei herzlich für die Übernahme der Zweitkorrektur gedankt.

Den Professoren Dr. rer. nat. Peter Kammerer sowie Dr. rer. nat. Theodor Wintges, die die Arbeit auf Seiten der FH München betreuten, sei ebenfalls herzlich für zahlreiche Denkanstöße und Diskussionen sowie für die vertrauensvolle Zusammenarbeit gedankt. Des Weiteren gilt mein Dank Prof. Dr. Ing. Hartmut Schmidt und Prof. Dr. rer. nat. Eva-Maria Forster für ihre persönliche Anteilnahme am Zustandekommen dieser Arbeit.

Für den bei Aero-Sensing zur Verfügung gestellten Arbeitsplatz danke ich herzlich Ass. Jur. Ralph Derkum und Dr. Ing. João Moreira, der auch die wissenschaftliche Betreuung seitens der Firma übernahm. Des Weiteren bin ich meinen Kollegen Dr. Ing. Marcus Schwäbisch, Dr. rer. nat. Christian Wimmer und Mag. Dr. Reinhold Huber für die Unterstützung auf den Gebieten der Interferometrie, der Datenaufbereitung und der Klassifikation besonders dankbar. Allen anderen Kolleginnen und Kollegen sei auf diese Weise herzlich für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die Unterstützung bei vielen kleinen und großen Fragen gedankt.

Bei Studiendirektor Andreas Wolff und Robert Booker B. A. (Hons.) bedanke ich mich für die Durchsicht der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und Schwiegereltern für eine in allen Belangen außerordentliche Unterstützung während der Arbeit, ohne die diese so nicht möglich gewesen wäre.

Mein abschließender und besonders herzlicher Dank gilt meiner Frau Giulietta und meinem Sohn Joshua für ihr Verständnis und den moralische Beistand während der Erstellung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	viii
Zusammenfassung/Summary	ix
Kapitel 1 Einführung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
Kapitel 2 Entwicklung der Radarfernerkundung	4
2.1 Aufnahmesysteme	4
2.2 SAR-Systeme	6
Kapitel 3 Grundlagen von InSAR	8
3.1 Physikalische Grundlagen	8
3.1.1 Sensorspezifische Parameter	9
3.1.1.1 Frequenz	9
3.1.1.2 Aufnahmegeometrie und Systemauflösung	11
3.1.1.3 Beleuchtungsrichtung	13
3.1.1.4 Einfallswinkel	15
3.1.1.5 Polarisation	15
3.1.2 Objektspezifische Parameter	16
3.1.3 Rückstreumechanismen	16
3.1.3.1 Radargleichung und Rückstreuquerschnitt	17
3.1.3.2 Dielektrische Eigenschaft und Eindringtiefe	17
3.1.3.3 Oberflächenstreuung	18
3.1.3.4 Volumenstreuung	20
3.1.4 Interferenz	20
3.2 SAR-Bildprozessierung und -eigenschaften	21
3.2.1 Prozessierungsverfahren	21
3.2.2 Multilook-Verfahren	22
3.2.3 Single-Look-SAR-Statistik	22
3.2.4 Multi-Look-SAR-Statistik	24
3.3 SAR-Interferometrie	26
3.3.1 Interferometrisches Messprinzip	26
3.3.2 Phase	29
3.3.3 Kohärenz	29
3.3.4 Interferometrische Prozessierung	30
3.3.4.1 Interferogrammgenerierung	31
3.3.4.2 Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten	32
3.3.4.3 Konvertierung der Phase in Geländehöhe	33
3.3.4.4 Geokodierung	34

Kapitel 4 Das AeS-1 InSAR-System.	36
Kapitel 5 Beschreibung der Testgebiete	39
5.1 Edelsberg	40
5.2 Silvrettagruppe	43
5.3 Verwallgruppe	45
Kapitel 6 Datenaufbereitung.	46
6.1 Datenerfassung	47
6.2 InSAR-Prozessierung	50
6.3 Speckle-Filterung	51
6.4 Geokodierung	55
6.5 Minimierung von Unwrapping-Fehlern	59
6.6 Minimierung von Offsets und Rampen	61
6.7 Reliefspezifische radiometrische Korrektur	62
6.8 Mosaikerstellung	64
Kapitel 7 Informationsextraktion I -Reliefeigenschaften.	67
7.1 Eigenschaften des X-Band-DHM	68
7.2 DHM-Postprocessing	69
7.3 Extraktion reliefbeschreibender Informationen	70
Kapitel 8 Informationsextraktion II -Klassifikation der Oberflächenbedeckung.	71
8.1 Klassifikationsalgorithmen	73
8.1.1 Übersicht Alternative 1	74
8.1.2 Übersicht Alternative 2	75
8.2 Primäre Features	76
8.3 Feature-Extraction	77
8.3.1 Texturanalyse	77
8.3.1.1 Lokale Statistik	78
8.3.1.2 Co-Occurrence-Matrix	79
8.3.1.3 Laws-Filter	82
8.4 Feature-Selection	83
8.4.1 JM-Distance	84
8.4.2 Ranking und Multistage-Selection	84
8.5 Klassifikation	87
8.5.1 Maximum-Likelihood-Klassifikator	87
8.5.2 Dempster-Shafer-Evidenztheorie	89
8.5.3 Kontextbezogene Filterung	93
8.5.4 A priori-Wissen	94

Kapitel 9 Einsatzmöglichkeiten des InSAR-Modells in der Gebirgskartographie	95
9.1 Edelsberg	95
9.1.1 Modellanalyse	96
9.1.1.1 Relief	96
9.1.1.2 Kartographische Situation	99
9.1.2 Ableitung kartographischer Produkte	106
9.1.3 Zusammenfassende Bewertung	113
9.2 Verwall- und Silvretta-Gruppe	114
9.2.1 Modellanalyse	115
9.2.1.1 Relief	115
9.2.1.2 Kartographische Situation	119
9.2.2 Ableitung kartographischer Produkte	126
9.2.3 Zusammenfassende Bewertung	133
9.3 Fazit	134
Kapitel 10 Ausblick	136
Kapitel 11 Literaturverzeichnis	137
Kapitel 12 Anhang	150

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1.	Mikrowellensysteme	4
Abbildung 3-1.	Relevante Parameter der Sensor-Objekt-Interaktion.....	8
Abbildung 3-2.	Eindringtiefe und Reflexionsverhalten X-Band.....	10
Abbildung 3-3.	Eindringtiefe und Reflexionsverhalten P-Band.....	10
Abbildung 3-4.	X-Band SAR-Szene von Pfronten, Edelsberggebiet.....	10
Abbildung 3-5.	P-Band SAR-Szene von Pfronten, Edelsberggebiet.....	10
Abbildung 3-6.	SAR-Aufnahmegeometrie.....	11
Abbildung 3-7.	SAR-Abbildungsgeometrie.....	12
Abbildung 3-8.	X-Band West-Ost-Befliegung des Röfleuter Berges, Edelsberggebiet.....	14
Abbildung 3-9.	X-Band Ost-West-Befliegung des Röfleuter Berges, Edelsberggebiet.....	14
Abbildung 3-10.	SAR-Aufnahmegeometrie ohne Reliefeinflüsse.....	14
Abbildung 3-11.	Foreshortening.....	14
Abbildung 3-12.	Layover.....	15
Abbildung 3-13.	Shadow.....	15
Abbildung 3-14.	Polarisationsellipse.....	16
Abbildung 3-15.	Spiegelnde Reflexion.....	19
Abbildung 3-16.	Diffuse Rückstreuung.....	19
Abbildung 3-17.	Corner-Reflektor.....	19
Abbildung 3-18.	Reflektoren in der SAR-Szene.....	19
Abbildung 3-19.	Rückstreuecho c.....	20
Abbildung 3-20.	In Rangerichtung komprimierte Daten.....	21
Abbildung 3-21.	Prozessierter Datensatz.....	21
Abbildung 3-22.	SAR-Aufnahmeprinzip.....	26
Abbildung 3-23.	InSAR-Aufnahmeprinzip.....	27
Abbildung 3-24.	InSAR-Messprinzip.....	28
Abbildung 3-25.	X-Band SAR-Szene Pfronten und Vils, Edelsberggebiet.....	30
Abbildung 3-26.	Kohärenz-Szene aus den X-Band-Daten Pfronten und Vils, Edelsberggebiet... 30	
Abbildung 3-27.	Interferometrische Prozessierungskette.....	30
Abbildung 3-28.	Interferogramm.....	32
Abbildung 3-29.	Unterschied in der Weglängendifferenz für Punkte gleicher Höhe.....	32
Abbildung 3-30.	Phasenverlauf für ein Gebiet mit konstanter Höhe von 0 Metern über NN.....	32
Abbildung 3-31.	Relative Phase nach dem Phase Unwrapping.....	33
Abbildung 3-32.	Prinzip der Geokodierung.....	34
Abbildung 4-1.	X-Band-Antennen.....	38
Abbildung 4-2.	AeS-1 Flugsegment.....	38
Abbildung 5-1.	Geographische Lage der Testgebiete.....	39
Abbildung 5-2.	Geographische Lage des Testgebietes Edelsberg.....	40
Abbildung 5-3.	Kienberg, Vilstal und Edelsberg.....	42
Abbildung 5-4.	Edelsberg und Alpspitz.....	42
Abbildung 5-5.	Geographische Lage der Testgebiete Silvretta und Verwall.....	43
Abbildung 5-6.	Piz Buin-Silvretta.....	44
Abbildung 5-7.	Gipffelur in der Silvretta.....	44
Abbildung 5-8.	Grieskogel-Verwallgruppe.....	45

Abbildung 6-1.	Prozesskette der Datenaufbereitung.	46
Abbildung 6-2.	Flugplanung Edelsberg.	48
Abbildung 6-3.	Flugplanung Verwallgruppe.	49
Abbildung 6-4.	Flugplanung Silvrettagruppe.	49
Abbildung 6-5.	X-Band-Szene ohne Filter.	53
Abbildung 6-6.	X-Band-Szene mit Refind Lee-Filter.	53
Abbildung 6-7.	Szenenausschnitte zur Filteranalyse.	53
Abbildung 6-8.	Perspektiv-Ansicht, ungefilterte Szene.	54
Abbildung 6-9.	Perspektiv-Ansicht, gefilterte Szene (Refind Lee).	54
Abbildung 6-10.	Profile im heterogenen Bereich einer Siedlungsfläche.	55
Abbildung 6-11.	Profile durch eine Kante zwischen zwei homogenen offenen Flächen.	55
Abbildung 6-12.	SAR-Szene Track 2 der Edelsbergbefliegung in Slant Range-Geometrie.	56
Abbildung 6-13.	Geokodierte SAR-Szene von Abbildung 6-12.	56
Abbildung 6-14.	Rampe in Rangerichtung.	57
Abbildung 6-15.	Verkipfung in Metern.	58
Abbildung 6-16.	Verkipfung in rad.	58
Abbildung 6-17.	Phase-zu-Höhe-Kurve.	58
Abbildung 6-18.	Fehlerminimiertes- sowie fehlerbehaftetes- InSAR-Profil mit Referenz-Profil.	60
Abbildung 6-19.	Soll-Positionen eingemessener Corner-Reflektoren.	61
Abbildung 6-20.	Höhendifferenz Track4-Track3.	62
Abbildung 6-21.	Approximation an die Kurven.	62
Abbildung 6-22.	Perspektiv-Darstellung einer SAR-Szene ohne radiometrische Korrektur.	63
Abbildung 6-23.	Perspektiv-Darstellung einer SAR-Szene mit radiometrischer Korrektur.	63
Abbildung 6-24.	Prinzip der Mosaikerstellung.	65
Abbildung 6-25.	Track 3 der Edelsbergbefliegung (West-Ost).	65
Abbildung 6-26.	Track 4 der Edelsbergbefliegung (Ost-West).	65
Abbildung 6-27.	Mosaik aus den Tracks 3 und 4 der Edelsbergbefliegung.	66
Abbildung 7-1.	Perspektiv-Ansicht des InSAR-DHM Verwall ₃	67
Abbildung 7-2.	Höhenlinien aus einem ungefiltertem DHM.	69
Abbildung 7-3.	Höhenlinien aus einem gefiltertem DHM.	69
Abbildung 8-1.	Informationsextraktion II.	73
Abbildung 8-2.	Klassifikationsalgorithmus Alternative 1.	74
Abbildung 8-3.	Klassifikationsalgorithmus Alternative 2.	75
Abbildung 8-4.	X-Band SAR-Szene als Beispiel eines Primären Features.	76
Abbildung 8-5.	Kohärenz-Szene als weiteres Primäres Feature.	76
Abbildung 8-6.	Primäres Feature und daraus abgeleitete textuelle Informationsebenen.	77
Abbildung 8-7.	Feature-Extraction mittels lokaler Statistik.	79
Abbildung 8-8.	Co-Occurrence-Matrizen mit $d=1$ und unterschiedlichem α	79
Abbildung 8-9.	Feature-Extraction mittels Co-Occurrence-Matrizen.	82
Abbildung 8-10.	Laws-Filtersatz.	82
Abbildung 8-11.	Feature-Extraction mittels Laws-Filter.	83
Abbildung 8-12.	Curse of Dimensionality.	83
Abbildung 8-13.	Graphische Ausgabe zum 4. Schritt des Ranking-Verfahrens.	86
Abbildung 8-14.	Prozesskette vom Subset S zu MLK-Resultaten.	87
Abbildung 8-15.	Klassenrepräsentanten.	88
Abbildung 8-16.	Entscheidungsregionen.	88
Abbildung 8-17.	Ausschnitt Edelsberg, Flugrichtung West-Ost.	91
Abbildung 8-18.	Ausschnitt Edelsberg, Flugrichtung Ost-West.	92
Abbildung 8-19.	Ergebnisse der DSET und der konfliktgewichteten Fusion.	92
Abbildung 8-20.	Konfliktgewichtete Fusion.	93

Abbildung 8-21.	Kontextbezogene Filterung.	93
Abbildung 9-1.	Differenz zwischen dem DHM Edelsberg ₃ und dem Referenz-DGM.	97
Abbildung 9-2.	DHM Edelsberg ₃ mit geomorphologisch charakteristischen Gebieten.	97
Abbildung 9-3.	SAR-Szene Edelsberg ₃	100
Abbildung 9-4.	Bodenreferenz Edelsberg.	100
Abbildung 9-5.	Klassifikation Edelsberg _{Klass1}	100
Abbildung 9-6.	SAR-Szene Edelsberg ₁	102
Abbildung 9-7.	SAR-Szene Edelsberg ₂	102
Abbildung 9-8.	Bodenreferenz Edelsberg.	103
Abbildung 9-9.	Klassifikation Edelsberg _{Klass2}	103
Abbildung 9-10.	Topographische Karte Edelsberg.	107
Abbildung 9-11.	Topographische Karte Edelsberg mit integriertem Beleuchtungsmodell.	108
Abbildung 9-12.	Neigungskarte Edelsberg.	110
Abbildung 9-13.	Expositionskarte Edelsberg.	111
Abbildung 9-14.	Höhenstufenkarte Edelsberg.	112
Abbildung 9-15.	Differenz zwischen dem DHM Verwall ₃ und dem Referenz-DGM.	116
Abbildung 9-16.	DHM Verwall ₃ mit geomorphologisch charakteristischen Gebieten.	116
Abbildung 9-17.	Differenz zwischen dem DHM Silvretta ₁ und dem Referenz-DGM.	117
Abbildung 9-18.	DHM Silvretta ₁ mit geomorphologisch charakteristischen Gebieten.	117
Abbildung 9-19.	SAR-Szene Verwall ₃	120
Abbildung 9-20.	Klassifikation Verwall _{Klass1}	120
Abbildung 9-21.	SAR-Szene Verwall ₁	122
Abbildung 9-22.	Kohärenz-Szene Verwall ₁	122
Abbildung 9-23.	Maximum-Likelihood Klassifikation Verwall ₁	122
Abbildung 9-24.	SAR-Szene Verwall ₂	123
Abbildung 9-25.	Kohärenz-Szene Verwall ₂	123
Abbildung 9-26.	Maximum-Likelihood Klassifikation Verwall ₂	123
Abbildung 9-27.	Klassifikation Verwall _{Klass2}	124
Abbildung 9-28.	Topographische Karte Verwallgruppe.	127
Abbildung 9-29.	Topographische Karte Verwallgruppe mit integriertem Beleuchtungsmodell.	128
Abbildung 9-30.	Neigungskarte Verwallgruppe.	129
Abbildung 9-31.	Expositionskarte Verwallgruppe.	130
Abbildung 9-32.	Höhenstufenkarte Verwallgruppe.	131
Abbildung 9-33.	Höhenstufenkarte Silvrettagruppe.	132
Abbildung 12-1.	Referenz-DGM Gebiet Scheidbach.	151
Abbildung 12-2.	DOM Edelsberg ₃ Gebiet Scheidbach.	151
Abbildung 12-3.	Längsprofil Gebiet Scheidbach.	151
Abbildung 12-4.	Querprofil Gebiet Scheidbach.	151
Abbildung 12-5.	Referenz-DGM Gebiet Kreuzbach.	152
Abbildung 12-6.	DOM Edelsberg ₃ Gebiet Kreuzbach.	152
Abbildung 12-7.	Längsprofil Gebiet Kreuzbach.	152
Abbildung 12-8.	Querprofil Gebiet Kreuzbach.	152
Abbildung 12-9.	Referenz-DGM Gebiet Rößleuter Berg.	155
Abbildung 12-10.	DOM Edelsberg ₃ Gebiet Rößleuter Berg.	155
Abbildung 12-11.	Längsprofil Gebiet Rößleuter Berg.	155
Abbildung 12-12.	Querprofil Gebiet Rößleuter Berg.	155
Abbildung 12-13.	Referenz-DGM Gebiet Im Kessel.	157
Abbildung 12-14.	DOM Edelsberg ₃ Gebiet Im Kessel.	157
Abbildung 12-15.	Längsprofil Gebiet Im Kessel.	157
Abbildung 12-16.	Querprofil Gebiet Im Kessel.	157

Abbildung 12-17.	Referenz-DGM Gebiet Auf dem Grat.	159
Abbildung 12-18.	DOM Edelsberg ₃ Gebiet Auf dem Grat.	159
Abbildung 12-19.	Längsprofil Gebiet Auf dem Grat.	159
Abbildung 12-20.	Querprofil Gebiet Auf dem Grat.	159
Abbildung 12-21.	Referenz-DGM Gebiet Am Kreuzeck.	160
Abbildung 12-22.	DOM Edelsberg ₃ Gebiet Am Kreuzeck.	160
Abbildung 12-23.	Längsprofil Gebiet Am Kreuzeck.	160
Abbildung 12-24.	Querprofil Gebiet Am Kreuzeck.	160
Abbildung 12-25.	Referenz-DGM Gebiet Kienberg.	163
Abbildung 12-26.	DOM Edelsberg ₃ Gebiet Kienberg.	163
Abbildung 12-27.	Längsprofil Gebiet Kienberg.	163
Abbildung 12-28.	Querprofil Gebiet Kienberg.	163
Abbildung 12-29.	Referenz-DGM Gebiet Verwallbach.	165
Abbildung 12-30.	DOM Verwall ₃ Gebiet Verwallbach.	165
Abbildung 12-31.	Längsprofil Gebiet Verwallbach.	165
Abbildung 12-32.	Querprofil Gebiet Verwallbach.	165
Abbildung 12-33.	Referenz-DGM Gebiet Rifabach.	166
Abbildung 12-34.	DOM Verwall ₃ Gebiet Rifabach.	166
Abbildung 12-35.	Längsprofil Gebiet Rifabach.	166
Abbildung 12-36.	Querprofil Gebiet Rifabach.	166
Abbildung 12-37.	Referenz-DGM Gebiet Predigberg.	169
Abbildung 12-38.	DOM Verwall ₃ Gebiet Predigberg.	169
Abbildung 12-39.	Längsprofil Gebiet Predigberg.	169
Abbildung 12-40.	Querprofil Gebiet Predigberg.	169
Abbildung 12-41.	Referenz-DGM Gebiet Bergler Loch.	170
Abbildung 12-42.	DOM Verwall ₃ Gebiet Bergler Loch.	170
Abbildung 12-43.	Längsprofil Gebiet Bergler Loch.	170
Abbildung 12-44.	Querprofil Gebiet Bergler Loch.	170
Abbildung 12-45.	Längsprofil Gebiet Verwallgruppe.	173
Abbildung 12-46.	Referenz-DGM Gebiet Silvrettahorn.	174
Abbildung 12-47.	DOM Silvretta ₁ Gebiet Silvrettahorn.	174
Abbildung 12-48.	Längsprofil Gebiet Silvrettahorn.	174
Abbildung 12-49.	Querprofil Gebiet Silvrettahorn.	174
Abbildung 12-50.	Referenz-DGM Gebiet Jamtal Ferner.	175
Abbildung 12-51.	DOM Silvretta ₁ Gebiet Jamtal Ferner.	175
Abbildung 12-52.	Längsprofil Gebiet Jamtal Ferner.	175
Abbildung 12-53.	Querprofil Gebiet Jamtal Ferner.	175
Abbildung 12-54.	Referenz-DGM Gebiet Piz Buin.	178
Abbildung 12-55.	DOM Silvretta ₁ Gebiet Piz Buin.	178
Abbildung 12-56.	Längsprofil Gebiet Piz Buin.	178
Abbildung 12-57.	Querprofil Gebiet Piz Buin.	178
Abbildung 12-58.	Referenz-DGM Gebiet La Cudera.	179
Abbildung 12-59.	DOM Silvretta ₁ Gebiet La Cudera.	179
Abbildung 12-60.	Längsprofil Gebiet La Cudera.	179
Abbildung 12-61.	Querprofil Gebiet La Cudera.	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1.	Wichtige Frequenz- bzw Wellenlängenbereiche der Radarfernerkundung.....	9
Tabelle 4-1.	Wichtige Systemparameter des AeS-1 InSAR-Systems.	36
Tabelle 6-1.	Wichtige Flug- und Radarparameter der Testbefliegungen.	47
Tabelle 6-2.	Vergleich einer ungefilterten mit einer gefilterten homogenen offenen Fläche.	54
Tabelle 6-3.	Parameter zur Geokodierung.....	56
Tabelle 6-4.	Mosaik-Namen der Testgebiete.....	64
Tabelle 9-1.	Differenzmodellanalyse Gebiet Edelsberg.....	96
Tabelle 9-2.	Feature-Selection Szene Edelsberg ₃	99
Tabelle 9-3.	Vergleich Bodenreferenz-Klassifikation Edelsberg _{Klass1}	99
Tabelle 9-4.	Feature-Selection Szene Edelsberg ₁	101
Tabelle 9-5.	Feature-Selection Szene Edelsberg ₂	101
Tabelle 9-6.	Zwischenergebnis Bodenreferenz-Klassifikation Edelsberg ₁	101
Tabelle 9-7.	Zwischenergebnis Bodenreferenz-Klassifikation Edelsberg ₂	101
Tabelle 9-8.	Vergleich Bodenreferenz-Klassifikation Edelsberg _{Klass2}	102
Tabelle 9-9.	Differenzmodellanalyse Gebiet Verwall- und Silvrettagruppe.	115
Tabelle 9-10.	Feature-Selection Szene Verwall ₃	119
Tabelle 9-11.	Feature-Selection Szene Verwall ₁	121
Tabelle 9-12.	Feature-Selection Szene Verwall ₂	121
Tabelle 12-1.	Differenzmodellanalyse Gebiet Scheid- und Kreuzbach.	153
Tabelle 12-2.	Profilanalyse Gebiet Scheidbach.....	154
Tabelle 12-3.	Profilanalyse Gebiet Kreuzbach.....	154
Tabelle 12-4.	Differenzmodellanalyse Gebiet Rößleuter Berg.	156
Tabelle 12-5.	Profilanalyse Gebiet Rößleuter Berg.	156
Tabelle 12-6.	Differenzmodellanalyse Gebiet Im Kessel.....	158
Tabelle 12-7.	Profilanalyse Gebiet Im Kessel.....	158
Tabelle 12-8.	Differenzmodellanalyse Gebiet Auf dem Grat und Am Kreuzeck.	161
Tabelle 12-9.	Profilanalyse Gebiet Auf dem Grat.....	161
Tabelle 12-10.	Profilanalyse Gebiet Am Kreuzeck.....	162
Tabelle 12-11.	Differenzmodellanalyse Gebiet Kienberg.	164
Tabelle 12-12.	Profilanalyse Gebiet Kienberg.	164
Tabelle 12-13.	Differenzmodellanalyse Gebiet Verwall- und Rifabach.....	167
Tabelle 12-14.	Profilanalyse Gebiet Verwallbach.....	167
Tabelle 12-15.	Profilanalyse Gebiet Rifabach.....	168
Tabelle 12-16.	Differenzmodellanalyse Gebiet Predigberg und Bergler Loch.	171
Tabelle 12-17.	Profilanalyse Gebiet Predigberg.....	171
Tabelle 12-18.	Profilanalyse Gebiet Bergler Loch.....	172
Tabelle 12-19.	Profilanalyse Gebiet Verwallgruppe.	173
Tabelle 12-20.	Differenzmodellanalyse Gebiet Silvrettahorn und Jamtal Ferner.	176
Tabelle 12-21.	Profilanalyse Gebiet Silvrettahorn.	176
Tabelle 12-22.	Profilanalyse Gebiet Jamtal Ferner.	177
Tabelle 12-23.	Differenzmodellanalyse Gebiet Piz Buin und La Cudera.	180
Tabelle 12-24.	Profilanalyse Gebiet Piz Buin.	180
Tabelle 12-25.	Profilanalyse Gebiet La Cudera.	181

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, festzustellen, inwieweit die flugzeuggetragene Radarfernerkundung als alleinige Erfassungsmethode der Erdoberfläche zur Erstellung von topographischen und reliefbeschreibenden Karten in Gebirgslandschaften dienen kann. Dies wird anhand von drei Testgebieten, dem Edelsberggebiet in den Allgäuer Alpen sowie der Silvretta- und Verwallgrupe in den Zentralalpen, untersucht. Die Betrachtung der Interaktion zwischen den abzubildenden Objekten und dem Radar-Signal unter Berücksichtigung der sensorspezifischen Charakteristika bildet dabei die Diskussionsgrundlage. Im weiteren werden Methoden zur Datenprozessierung und -aufbereitung vorgestellt, die eine Informationsextraktion bezüglich des Reliefs und der Oberflächenbedeckung für die Erstellung kartographischer Produkte ermöglichen. Die Qualitätsanalyse der Ergebnisse zeigt, dass die Radarfernerkundung, gemessen an den Anforderungen der Gebirgskartographie, ein sinnvolles und nutzbringendes Werkzeug für die Kartenerstellung in alpinen Regionen ist. Für kartographische Anwendungen in Hochgebirgsregionen erweist sich die flugzeuggetragene Radarfernerkundung als einzige Informationsquelle bislang allerdings als nicht ausreichend.

Summary

The aim of this thesis is to determine to what extent aircraft-borne radar remote sensing can be used as the sole method for making recordings of the surface of the earth as a basis for compiling topographical and relief maps of mountainous areas. This is done using three test areas: the Edelsberg area in the Allgäu Alps and the Silvretta and Verwall Groups in the Central Alps. The basis for discussion is provided by examination of the interaction between the objects to be imaged and the radar signal, the sensor-specific characteristics thereby being taken into account. Following this some data processing and conditioning methods used for extracting information on the relief and surface coverage for preparation of cartographical products are presented. Analysis of the quality of the results shows that, measured against the requirements of mountain cartography, radar remote sensing is a practical and useful tool for making maps in Alpine regions. As the sole source of information, however, aircraft-borne radar remote sensing proves to date to be inadequate for cartographical applications in high-mountain regions.

1 Einführung

1.1 Einleitung

Die Aufgabe der Kartographie ist nach [Hake82, S. 14] wie folgt definiert: "Sie hat die theoretischen und praktischen Voraussetzungen dafür zu schaffen, daß kartographische Darstellungen entstehen, aus denen die Benutzer eine möglichst zutreffende Vorstellung oder Erkenntnis der vergangenen, gegenwärtigen oder geplanten Wirklichkeit gewinnen. Der Kartograph wird damit zum Dolmetscher raumbezogener Informationen."

Eine topographische Karte hat dabei zum Ziel, die charakteristischen Landschaftselemente möglichst formtreu und anschaulich abzubilden, so dass das Wesen der Landschaft aus dem Kartenbild spricht [Hofmann70]. Die originäre Erfassung topographischer Informationen erfolgt üblicherweise durch topographische Aufnahmeverfahren und die Auswertung von Luft- bzw. Satellitenbilddaten [Hake95].

In dieser Arbeit wird untersucht, ob bzw. wie weit die Radarfernerkundung als originäre und alleinige Erfassungsmethode zur Erstellung von topographischen Karten in Gebirgslandschaften dienen kann [Damoiseaux99]. Auf eine Kombination mit weiteren Aufnahmeverfahren wie beispielsweise dem Laserscanning zur Generierung von Höhenmodellen oder optischer Fernerkundungssysteme zur Klassifizierung der Geländeoberfläche wird bewusst verzichtet, um die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen des Radarverfahrens aufzuzeigen. Erste Untersuchungen in diese Richtung hat bereits Gitta Domik [Domik85] Anfang der Achtzigerjahre im Rahmen ihrer Dissertation, basierend auf "klassischen" Stereo-SAR-Daten, durchgeführt.

Abbildende Radarsysteme unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Charakteristik und Abbildungseigenschaften beträchtlich von optischen Verfahren. So arbeiten aktive Mikrowellensysteme in einem Frequenzbereich von 0.3 bis 300 GHz, welcher einer Wellenlänge von 1m bis 1mm entspricht. In dem Frequenzbereich von 0.3 bis 10 GHz können Nebel, Wolken und Regen nahezu ungehindert durchdrungen werden und so die Datenaufnahme wetterunabhängig machen. Da der Sensor die hochfrequenten Impulse selbst aussendet, ist das System ebenfalls nicht auf natürliche Beleuchtungsverhältnisse angewiesen. Bei der Aufnahme von Geländeoberflächen mittels Radarsystemen mit synthetischer Apertur (SAR) wird die beleuchtete Fläche zunächst zweidimensional abgebildet. Man unterscheidet dabei die Azimutrichtung, die parallel zur Flugrichtung verläuft, und die Entfernungs- oder Rangerichtung, die senkrecht zur Flugrichtung verläuft. Ferner wird mit Hilfe der SAR-Interferometrie (InSAR) die Geländeoberfläche dreidimensional erfasst.

Die dreidimensionalen InSAR-Daten dienen nun als Basis zur Generierung eines Modells der Welt, aus dem kartographische Produkte abgeleitet werden. Mit Hilfe von Bodenreferenzdaten wird das Modell verifiziert und dessen Qualität anhand von Kriterien der Gebirgskartographie beurteilt. So wird letztendlich eine Aussage darüber gemacht, inwieweit das erstellte Modell dem Wesen der abgebildeten Landschaft entspricht und die Radarfernerkundung als alleinige Erfassungsmethode geeignet ist.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Bei jeder Fernerkundungsaufnahme erfolgt eine Interaktion zwischen dem Sensor und der abzubildenden Landschaft. Daraus ergeben sich für den jeweiligen Sensor sowohl charakteristische geometrische Abbildungseigenschaften als auch typische Zusammenhänge zwischen dem natürlichen Objekt und dem empfangenen Signal. Das Gesamtproblem liegt nun darin, die erhaltenen Signale so aufzubereiten, dass die gewünschten Informationen extrahiert, ein Modell generiert und daraus kartographische Produkte abgeleitet werden können. Zur Lösung des Problems der Ableitung kartographischer Produkte aus flugzeuggetragenen InSAR-Daten in Gebirgsregionen, zu dem bisher noch keine genaue Untersuchung existiert, sind folgende Punkte zu klären:

- Wie interagiert der Sensor mit seiner spezifischen Charakteristik mit den abzubildenden räumlichen Objekten der Natur? Welche Eigenschaften des Sensors und auch des Objektes sind hierbei zu beachten und wie drücken sie sich im empfangenen Signal aus?
- Wie werden Radarrohdaten zu einem SAR-Bild aufbereitet? Dieser Schritt der eigentlichen Bilderstellung wird als Prozessierung oder Processing benannt. Welche statistische Eigenschaften bzw. welche Abbildungscharakteristik sind den prozessierten SAR-Szenen dabei zu eigen?
- Wie erzeugt man dreidimensionale Darstellungen aus den InSAR-Daten?
- Wie müssen die SAR-Szenen und das digitale Höhenmodell (DHM) optimal aufbereitet werden, um daraus die gewünschten Informationen extrahieren zu können? Dieser Schritt wird als Nachbearbeitung oder Postprocessing der SAR-Bilddaten bezeichnet.
- Mit welchen Methoden kann letztendlich Information extrahiert und ein Modell generiert werden?
- Welche Qualität haben das Modell und die daraus abgeleiteten kartographischen Produkte gemessen an den Anforderungen der Gebirgskartographie?

Das Ziel der Arbeit ist es, zu untersuchen, inwieweit die oben genannten Fragen gelöst werden können, so dass die Erstellung eines Modells der Welt, das dieser in ausgewählten Attributen so genau wie möglich entspricht, realisierbar ist. Aus dem qualitativ zu beurteilenden Modell erfolgt schließlich die Ableitung topographischer Karten bzw. geomorphologischer Karten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit folgt im wesentlichen der Problemstellung. Nachdem in Kapitel 2 ein Überblick über die Entwicklung der Radarfernerkundung gegeben worden ist, folgt im 3. Kapitel eine Einführung in die Grundlagen der SAR-Technologie. Nach der Beschreibung des für die Datengewinnung genutzten AeS-1 Sensors in Kapitel 4 werden im 5. Kapitel die Testgebiete für diese Arbeit beschrieben. Kapitel 6 beinhaltet die gesamte Prozesskette von der Datenerfassung über das Processing bis hin zum Postprocessing. Diesem folgt in den Kapiteln 7 und 8 die Beschreibung der Methoden zur Informationserkennung bzw. -extraktion. In den abschließenden Kapiteln werden die Resultate anhand kartographischer Kriterien sowohl bewertet als auch diskutiert: ferner werden Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten von InSAR-Daten für die (Gebirgs-) Kartographie gegeben.

2 Entwicklung der Radarfernerkundung

Die Abkürzung Radar stammt aus dem Englischen und steht für **radio detection and ranging**. Im Deutschen kann man den Begriff mit Erfassung und Entfernungsmessung mittels Funkmesstechnik wiedergeben. Radar bezeichnet einerseits das Gerätesystem selbst und andererseits das angewandte Verfahren. Die maßgebliche Entwicklung von Radarsystemen begann in der Zeit des 2. Weltkrieges und diente zunächst militärischen Zwecken [Ulaby82]. Mit fortschreitender Technologie sind die Radarsysteme seit den siebziger Jahren auch in den zivilen und wissenschaftlichen Bereich vorgedrungen. Dabei mussten parallel zur Aufnahmetechnik auch die Methoden der SAR-Bildprozessierung weiterentwickelt werden, um eine Auswertung der Daten zu ermöglichen. Im Folgenden wird ein Überblick über verschiedene Aufnahmesysteme, Trägerplattformen und operationell eingesetzte InSAR-Systeme gegeben.

2.1 Aufnahmesysteme

Die Abbildung 2-1 stellt zunächst wichtige Aufnahmesysteme, die sich auf die Mikrowellentechnologie stützen, dar.

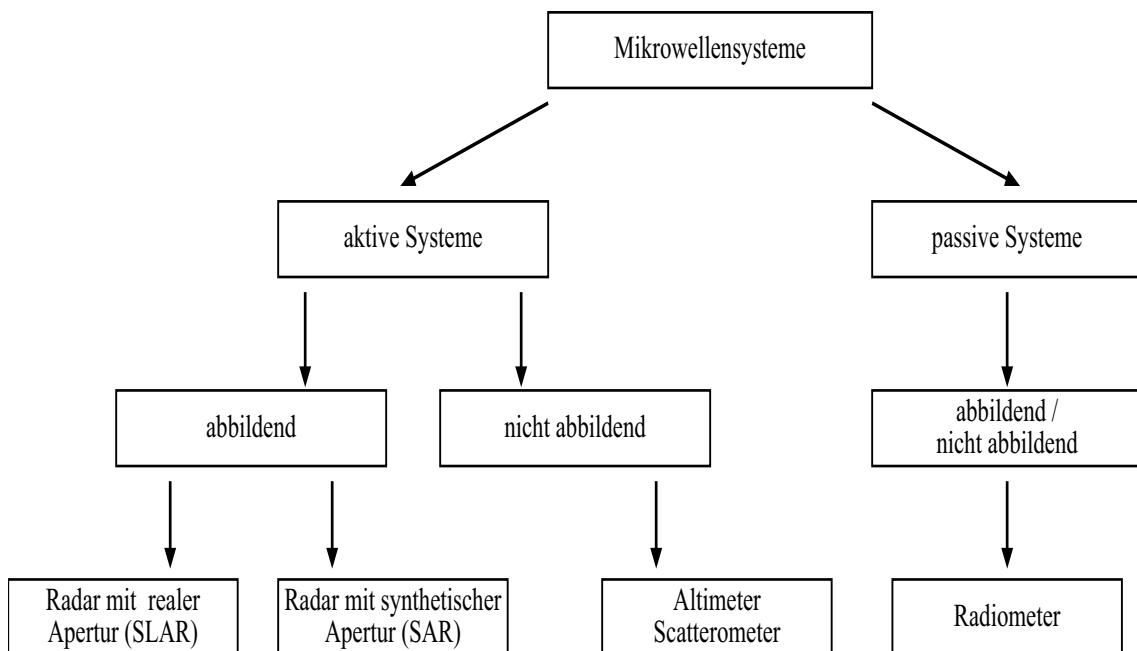


Abbildung 2-1. Mikrowellensysteme nach [AlNakib96, S. 13].

Als primäres Unterscheidungskriterium dient die Unterteilung in aktive und passive Systeme. Während aktive Systeme elektromagnetische Wellen aussenden und empfangen, beschränken sich passive Systeme lediglich auf den Empfang von Signalen im Mikrowellenbereich. Ein solches System ist das Radiometer, das sowohl abbildend als auch nicht abbildend fungieren kann [Ulaby81].

Aktive Systeme lassen sich dann weiter in abbildende und nichtabbildende unterscheiden. Als Beispiel für ein aktives, nicht abbildendes System sei das Altimeter erwähnt, das für exakte Höhenbestimmungen eingesetzt wird, indem eine zentimetergenaue Vermessung des Abstandes zwischen Plattform und rückstreuender Oberfläche erfolgt. Die abbildenden Systeme lassen sich aufgrund ihrer technischen Funktionsweise in Systeme mit realer oder synthetischer Apertur untergliedern:

Das mit einer realen Apertur ausgestattete Side Looking Airborne Radar (SLAR) hat aufgrund physikalischer Gegebenheiten nur eine begrenzte Auflösung in Azimutrichtung. Dies führte zur Entwicklung der Synthetic Aperture Radar (SAR) Technik, deren Hauptvorteil es ist, die Auflösung in Azimutrichtung deutlich zu erhöhen. Da in dieser Arbeit ausschließlich SAR-Daten zur Anwendung kommen, beschränkt sich die weitere Betrachtung auf die SAR-Technologie.

Als Träger von SAR-Systemen können Satelliten, der Space Shuttle, Hubschrauber oder Flugzeuge fungieren. Der Vorteil, vom Weltraum aus zu operieren, liegt in einer langfristigen und kontinuierlichen Überwachung auch unzugänglicher Gebiete, wie z.B. der Ozeane. Die flugzeuggetragenen Systeme haben sowohl den Vorteil der schnelleren Verfügbarkeit und Flexibilität als auch den einer höheren Auflösung und einfacheren Anwendung der SAR-Interferometrie (InSAR).

Die InSAR-Technologie kommt in einem sehr breit gefächerten Anwendungsspektrum zum Einsatz [Buchroithner95]. Beispielsweise können über Land natürliche und anthropogene Veränderungen des Waldes, Überflutungen und Lavaströme kartiert, Biomassevorkommen abgeschätzt oder die Länge von Vegetationsperioden ermittelt werden. Außerdem werden seismische Analysen nach Erdbeben erstellt, Fließgeschwindigkeiten von Gletschern ermittelt oder verschiedene Landoberflächenklassifikationen durchgeführt. Über Wasser kommen Anwendungen wie das Monitoring von Meereis, die Überwachung von Ölteppichen, die Detektion und Ortung von Schiffen, die Überwachung von morphodynamischen Prozessen im Küstenbereich oder die Ermittlung der Meeresbodentopographie im küstennahen Bereich in Frage. Aufgrund der vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten der InSAR-Technologie wird diese von Disziplinen wie der Geographie, Geologie, Geophysik, Hydrologie, Ozeanographie, Meteorologie, Kartographie, Geodäsie, Ökologie, Umwelttechnologie und Archäologie angewandt.

2.2 SAR-Systeme

Die Weiterentwicklung der Radartechnik führte seit dem Ende der siebziger Jahre zu einer Reihe von orbit- bzw. flugzeuggetragenen InSAR-Systemen. Im Folgenden wird ein Überblick [Siegmond01] über die wichtigsten Sensoren, Missionen und Projekte gegeben. Zunächst sind die aus dem All arbeitenden Systeme aufgeführt.

- Der SAR-Sensor des SEASAT-Satelliten der US-amerikanischen NASA agierte im Jahr 1978 für ca. 3 Monate und wurde im L-Band mit einer HH-Polarisation betrieben. Hier stellte sich heraus, dass Radaraufnahmen in der Lage sind, wichtige Daten von Land-, Wasser-, und Eisoberflächen bereit zu stellen [Zebker86].
- Die ersten Missionen an Bord eines Space Shuttles wurden ebenfalls von der NASA durchgeführt. Dabei handelte es sich um die Shuttle Imaging Radar Mission (SIR). Der Start von SIR-A erfolgte 1981 und der von SIR-B 1984. Beide Sensoren sendeten wie SEASAT im L-Band mit einer HH-Polarisation und sollten Fragestellungen zur Geologie und zu Landanwendungen beantworten [Gabriel88], [Ulaby86].
- Die europäische Raumfahrtorganisation ESA betrieb zwei SAR-Sensoren auf den Remote Sensing Satellites (ERS-1 und ERS-2), die beide im C-Band und mit VV-Polarisation operierten. Während ERS-1 von 1991 bis 2000 in Betrieb war, liefert ERS-2 seit 1995 bis heute SAR-Daten. Beide waren einerseits für Meeres- und Landanwendungen konzipiert, andererseits lieferten sie im parallelen Betrieb (Tandemmission) erstmals interferometrisch nutzbare Satellitendaten von großen Teilen der Erdoberfläche [Bammler98].
- Die japanische Raumfahrtagentur NASDA betreibt seit 1992 den Japan Earth Resource Satellite (JERS). Das darauf befindliche HH-polarisierte und im L-Band arbeitende SAR-System lieferte bis 1999 Daten [Bammler98].
- Eine Kooperation der europäischen Institutionen DLR, Dornier bzw. ASI und der NASA führte 1994 zur dritten Space Shuttle Mission, dem SIR-C/X-SAR Projekt. Die europäischen Organisationen steuerten hierzu ein VV-polarisiertes X-Band-System bei, während der amerikanische Anteil je ein vollpolarimetrisches C- bzw. L-Band-Radar war. Erstmals fand bei dieser Mission sowohl ein simultaner Betrieb auf drei verschiedenen Frequenzen als auch eine vollpolarimetrische Aufnahme statt [Schmullius99].
- Der von CCRS entwickelte kanadische Radarsat-Satellit startete 1995 und arbeitet im C-Band mit einer HH-Polarisation. Das System ist flexibel hinsichtlich der Wahl von Einfallswinkel, Auflösung und Streifenbreite [Ahmed90].
- Im Februar 2000 fand die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) als bisher letztes shuttlegetragenes Projekt statt. Analog zum SIR-C/X-SAR-Projekt war dies wiederum eine Kooperation der jeweils gleichen Organisationen aus den USA mit dem C-Band-SAR und Europa mit dem X-Band-System. Hier stand die interferometrische Erfassung der Erde im Mittelpunkt, wobei dies erstmals mit zwei fest montierten Antennen versucht wurde [Werner00].

Parallel zu den orbitgetragenen wurden auch flugzeuggetragene InSAR-Systeme entwickelt, die jeweils nach Frequenzband, Organisation, Jahr der Inbetriebsetzung und Land vorgestellt werden:

- AER-2 X-Band, FGAN, 1995, Deutschland [Ender96]
- AES-1 X- und P-Band, Aero-Sensing, 1996, Deutschland [Hofmann99], [Wimmer00]
- AIRSAR/TOPSAR C-, L- und P-Band, NASA/JPL, 1988, USA [Kramer02], [Zebker92a]
- CARABAS VHF-Band, FOA, 1992, Schweden [Gustavsson97]
- C/X-SAR X- und C-Band, CCRS, 1986, Kanada [Livingstone95]
- DO-SAR X- und C-Band, Dornier, 1989, Deutschland [Faller95]
- EMISAR C- und L-Band, Danish Center for Remote Sensing, 1989, Dänemark [Madsen97]
- E-SAR X-, C-, S-, L- und P-Band, DLR, 1989, Deutschland [Scheiber98]
- ESR X-Band, DERA, ohne Angabe, Großbritannien [White96]
- GEOSAR X- und P-Band, CalGis, 2002, USA [Thompson97]
- IFSARE C-Band, ERIM, 1993, USA [Bullock97]
- RAMSES W-, Ka, Ku, X, C- und L-Band, ONERA, 1992, Frankreich [Sicard96]
- STAR-3i X-Band, Intermap, 1996, Kanada [Sties00]

3 Grundlagen von InSAR

3.1 Physikalische Grundlagen

Die von einem SAR-System ausgesendeten elektromagnetischen Wellen treffen auf ein Objekt, interagieren mit diesem, werden dann zu bestimmten Teilen zurück bzw. weiter reflektiert oder absorbiert und ergeben so die beobachtete Intensität in einer SAR-Szene. Um eine korrekte Interpretation von SAR-Szenen zu gewährleisten, muss die Beziehung zwischen der beobachteten Intensität und dem abzubildenden Objekt richtig erfasst sein. In Abbildung 3-1 werden die wichtigsten Parameter des Sensors und der Natur als abzubildendes Objekt aufgezeigt, die nach ihrer Interaktion dann die Grundlage für die interferometrische Prozessierung der Daten bilden.

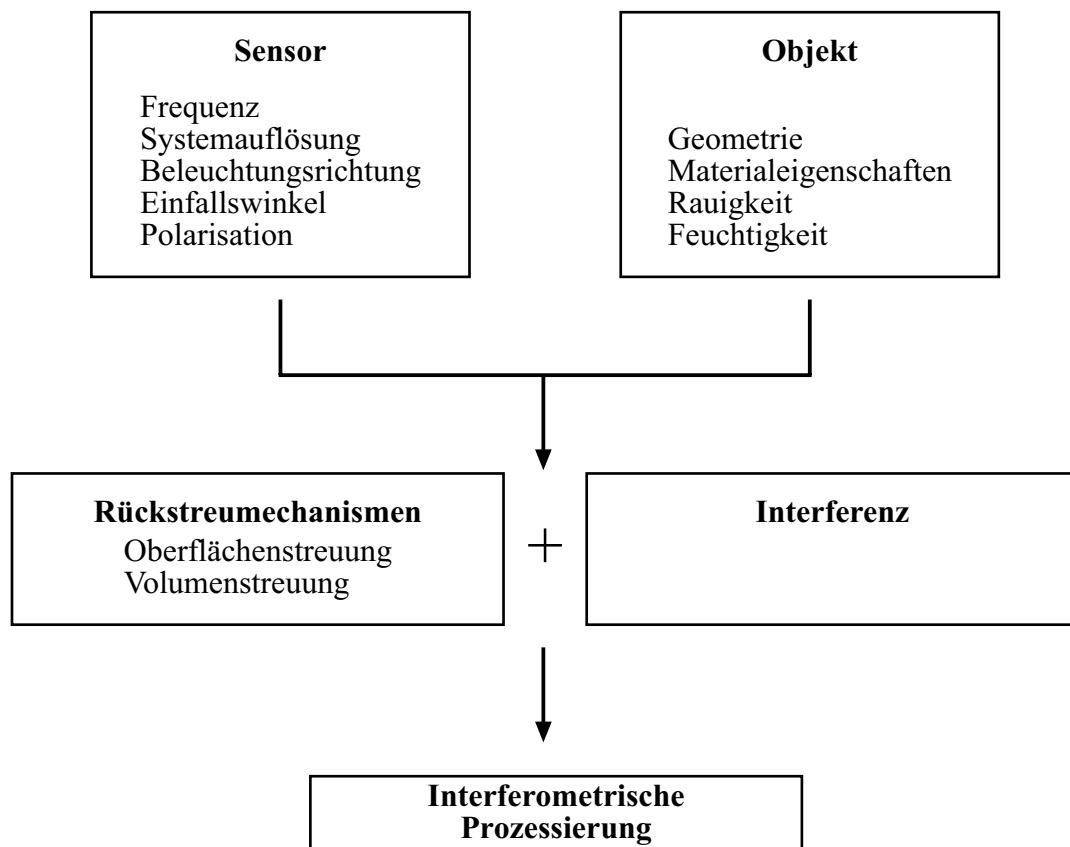


Abbildung 3-1. Relevante Parameter der Sensor-Objekt-Interaktion nach [Holecz93 S. 4].

In den folgenden Abschnitten werden die erwähnten Parameter, die Interaktionsprozesse und die Schritte der interferometrischen Prozessierung näher erläutert.

3.1.1 Sensorspezifische Parameter

Die in Abbildung 3-1 erwähnten Parameter Frequenz, Systemauflösung, Beleuchtungsrichtung, Einfallswinkel und Polarisation tragen im Wesentlichen zur beobachteten Intensität bei und werden daher näher analysiert. Auf weitere weniger relevante Parameter wie z.B. die Antennencharakteristik oder die Pulswiederholfrequenz (PRF) wird im Kontext der einzelnen Abschnitte eingegangen.

3.1.1.1 Frequenz

Häufig genutzte, durch Buchstaben gekennzeichnete Frequenz- bzw. Wellenlängenbereiche in der Radarfernerkundung sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 3-1. Wichtige Frequenz- bzw Wellenlängenbereiche der Radarfernerkundung.

Bezeichnung	Frequenzbereich	Wellenlängenbereich
Ka-Band	12,5 - 42,8 GHz	2,4 - 0,7 cm
X-Band	6,7 - 12,5 GHz	4,5 - 2,4 cm
C-Band	4 - 6,7 GHz	7,5 - 4,5 cm
S-Band	2 - 4 GHz	15 - 7,5 cm
L-Band	1 - 2 GHz	30,0 - 15,0 cm
P-Band	220 - 455 MHz	136,0 - 66,0 cm

Im Gegensatz zu optischen Systemen sind die Mikrowellensysteme in der Lage, in bestimmte Oberflächen oder Materialien einzudringen [Kronberg85]. Je länger eine Welle dabei ist, desto tiefer kann sie eindringen. Kürzere Wellen werden bereits an der Oberfläche reflektiert und liefern daher Informationen über die Oberfläche eines Objektes, während längere Wellen Informationen aus tieferen Schichten zur Verfügung stellen. Das Eindringvermögen ist auch von anderen Parametern wie z.B. der Feuchtigkeit oder der Oberflächenrauigkeit des Materials abhängig. (Siehe dazu die Abschnitte 3.1.3.2 bis 3.1.3.4). Die Abbildungen 3-2 und 3-3 illustrieren die Eindringtiefe und das Reflektionsverhalten verschiedener Wellenlängen am Beispiel einer Vegetationsoberfläche. Das kurzwellige X-Band ist nicht in der Lage, in die Blätterschicht der Bäume einzudringen und wird an der Oberfläche in alle Richtungen gestreut. Das langwellige P-Band durchdringt die Blätterschicht und dünne Äste. Durch Doppelreflektionen, dem so genannten "Double-Bounce-Effekt", an Stamm und Boden wird das Signal zum großen Teil zum Sensor zurückgestreut, was zu einer hohen Reflexion bei Waldflächen führt.

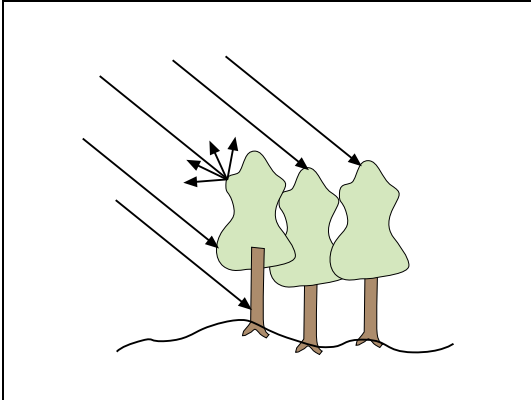


Abbildung 3-2. Eindringtiefe und Reflexionsverhalten X-Band.

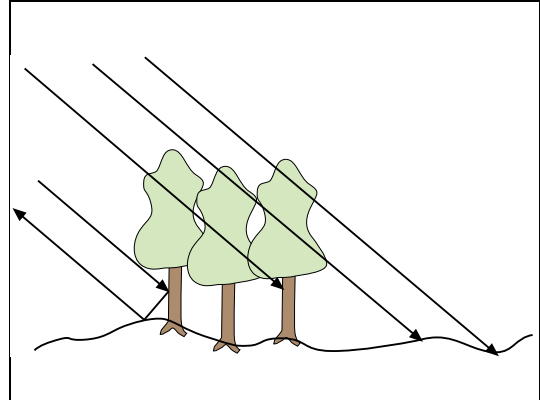


Abbildung 3-3. Eindringtiefe und Reflexionsverhalten P-Band.

Die folgenden Abbildungen zeigen SAR-Szenen des gleichen Gebietes, die jedoch mit verschiedenen Frequenzen aufgenommen sind. Diese Beispiele entstammen, wie auch die der Abbildungen 3-8, 3-9, 3-25 und 3-26 aus den Daten der Edelsberg-Befliegung. Hier wird deutlich, wie sich die benutzte Frequenz auf die Rückstreumechanismen auswirkt. Im X-Band lassen sich landwirtschaftliche Nutzflächen gut voneinander abgrenzen, und auch die Verkehrswege sind deutlich erkennbar. Im P-Band ist beides nicht gegeben, es wird aber eine bessere Unterscheidungsmöglichkeit zwischen Wäldern bzw. anderen Baumbeständen und den landwirtschaftlichen Nutzflächen gewährt. Die Siedlungsflächen sind in beiden Aufnahmen gut sichtbar.

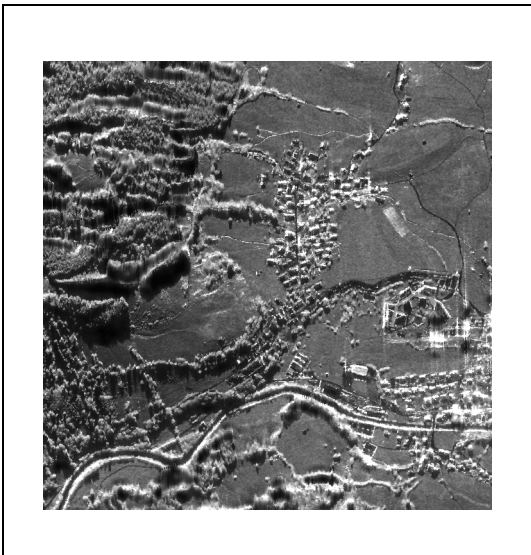


Abbildung 3-4. X-Band SAR-Szene von Pfronten, Edelsberggebiet. Maßstab ca. 1:24 000.

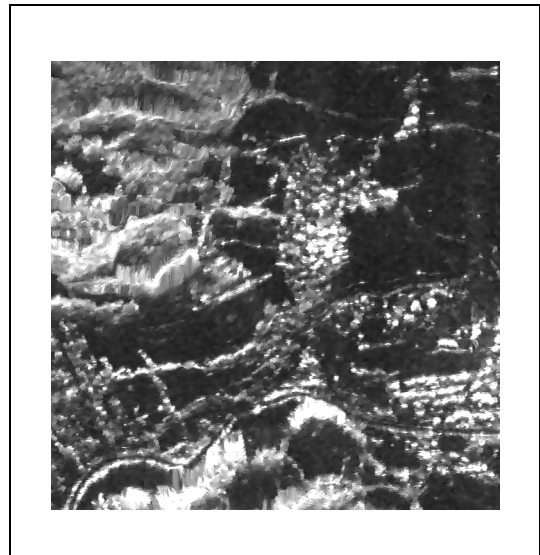


Abbildung 3-5. P-Band SAR-Szene von Pfronten, Edelsberggebiet. Maßstab ca. 1:24 000.

3.1.1.2 Aufnahmegeometrie und Systemauflösung

In der zweidimensionalen SAR-Aufnahmegeometrie werden, wie bereits erwähnt, die Azimut- und Rangerichtung unterschieden. Der Träger bewegt sich also in Flugrichtung vorwärts und beleuchtet die Erdoberfläche schräg nach unten, so dass ein zeilenförmiger Geländeausschnitt in Gestalt einer schmalen Ellipse (Footprint) abgebildet wird. Während die Länge des so abgebildeten Streifens durch die zurückgelegte Flugstrecke bestimmt ist, ist die Streifenbreite von dem Antennenöffnungswinkel und der vom Radar abgetasteten Fläche abhängig. In der Slant Range-Geometrie oder Radar-Abbildungsebene ist die Lage eines Punktes im Abbildungsstreifen durch die Pulslaufzeit zwischen Sensor und Objekt bestimmt. Die Trennung von verschiedenen Punkten auf der Oberfläche wird somit durch unterschiedliche Signallaufzeiten realisiert.

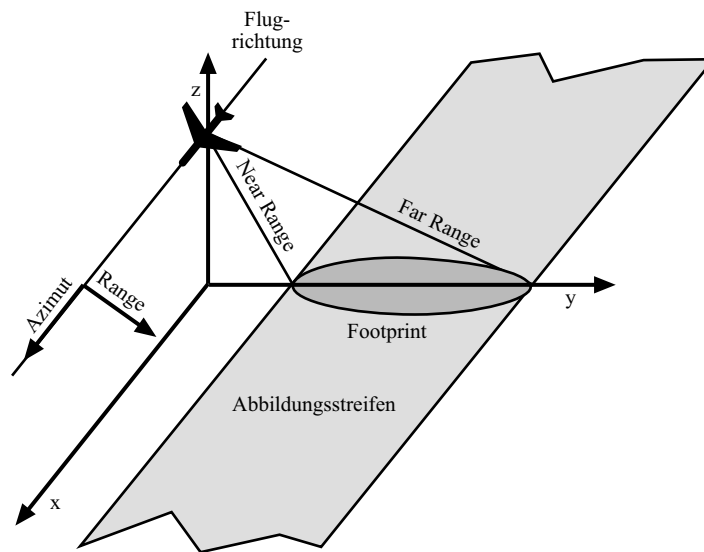


Abbildung 3-6. SAR-Aufnahmegeometrie.

Bei Radarsystemen mit realer Apertur ist die Bodenauflösung in Azimutrichtung durch die Winkelauflösung Θ , die als die Breite der Antennenhauptkeule definiert ist, die Länge L der realen Apertur und die Wellenlänge λ wie folgt bestimmt [Detlefsen89]:

$$\Theta \cong \frac{\lambda}{L} \quad (3-1)$$

Kleinere Winkel- bzw. höhere Bodenaufösungen lassen sich durch kürzere Wellenlängen oder längere Aperturen erzielen, was jedoch praktisch nicht zu realisieren ist, da für übliche Mikrowellenbereiche große Antennen nötig wären. So wäre beispielsweise eine 180 m lange Antenne erforderlich, um bei einer Wellenlänge λ von ca. 3 cm eine Bodenauflösung in Azimutrichtung von 0.5 m zu erreichen.

Eine höhere geometrische Auflösung lässt sich jedoch auch durch die Bildung einer synthetischen Apertur erzielen. Im Flug werden zunächst fortlaufend Mikrowellenimpulse unter einer konstanten Pulswiederholfrequenz gesendet; dadurch überlappen sich einzelne Flächen am Boden. Die synthetische Apertur baut sich dann nach einer gewissen Aufnahmezeit auf, wonach schließlich über die einzelnen realen Teile aufsummiert wird. Verfolgt

man also die Wanderung eines Punktzieles durch die Antennenhauptkeule, dann ergeben sich jeweils einzelne überlappende Unteraperturen oder Antennenelemente, die zusammengenommen aus den einzelnen Beleuchtungszuständen die synthetische Apertur bilden.

Abbildung 3-7 skizziert die Abbildungsgeometrie für SAR-Systeme. Hier bezeichnet Θ_a die Winkelauflösung eines einzelnen Antennenelementes, R_0 den Schrägabstand eines beleuchteten Punktzieles senkrecht zur Flugrichtung und $L_{sa_{max}}$ die maximale Länge der synthetischen Apertur.

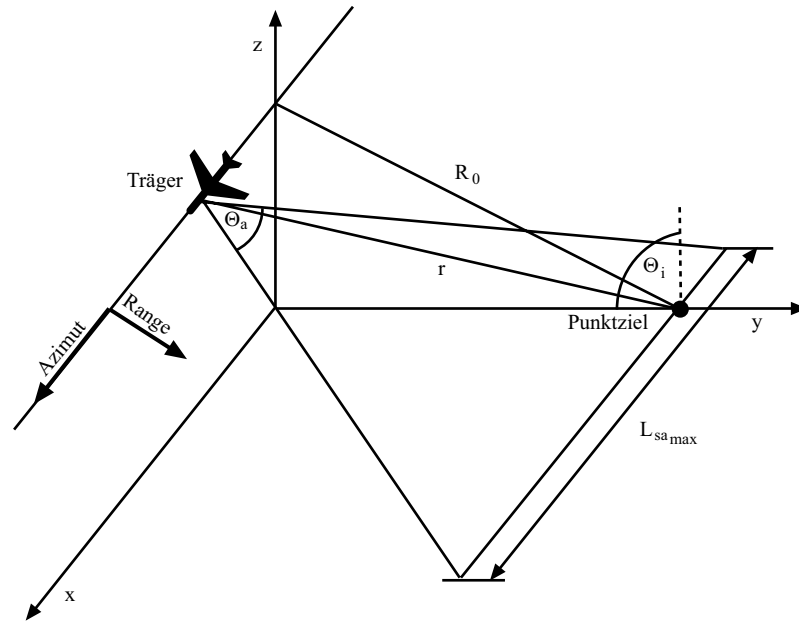


Abbildung 3-7. SAR-Abbildungsgeometrie.

Die Winkelauflösung Θ_{sa} der synthetischen Apertur L_{sa} ergibt sich analog der realen Apertur zu:

$$\Theta_{sa} \cong \frac{\lambda}{2 \cdot L_{sa}} \quad (3-2)$$

Bei einer gegebenen Schrägentfernung R_0 läßt sich die maximale Länge der synthetischen Apertur $L_{sa_{max}}$ nun über die Winkelauflösung eines Antennenelementes Θ_a ermitteln nach:

$$\begin{aligned} L_{sa_{max}} &\cong \Theta_a \cdot R_0 \\ &= \frac{\lambda}{D} \cdot R_0 \end{aligned} \quad (3-3)$$

wobei D die reale Länge der Radarantenne bezeichnet.

Die maximale Winkelauflösung $\Theta_{sa_{max}}$ für die maximale Länge der synthetischen Apertur $L_{sa_{max}}$ ergibt sich nun aus:

$$\Theta_{sa_{max}} \cong \frac{D}{2 \cdot R_0} \quad (3-4)$$

Schließlich ergibt sich die maximale Bodenauflösung $\delta_{az_{max}}$ in Azimutrichtung als:

$$\begin{aligned}\delta_{az_{max}} &= \Theta_{sa_{max}} \cdot R_0 \\ \delta_{az_{max}} &\cong \frac{D}{2}\end{aligned}\quad (3-5)$$

Die Auflösung in Azimutrichtung ist demnach einzig von der Antennendimension abhängig und nicht von der verwendeten Wellenlänge oder der Entfernung, da die Länge der synthetischen Apertur mit der Entfernung zunimmt.

Im Gegensatz dazu ergibt sich die Auflösung des Radars in Entfernung bzw. Rangerichtung δ_r aus der Sendepulslänge τ_p als:

$$\delta_r = \frac{c \cdot \tau_p}{2}\quad (3-6)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Mit einer Verkürzung der Pulslänge kann also die Auflösung in Entfernung erhöht werden.

Neben der Schrägentfernung ist nun auch die Entfernung auf der Geländeoberfläche zu bestimmen; daraus ergibt sich zusätzlich die Auflösung in Rangerichtung für die Bodenoberfläche δ_{rg} . Die Schrägentfernung wird auf die Oberfläche projiziert und ist wiederum vom lokalen Einfallswinkel Θ_i abhängig. Θ_i variiert nun mit der Bodenneigung, der Entfernung und der Höhe. Die Bodenauflösung δ_{rg} ist gegeben durch:

$$\delta_{rg} = \frac{c \cdot \tau_p}{2 \cdot \sin\Theta_i}\quad (3-7)$$

3.1.1.3 Beleuchtungsrichtung

Aufgrund der schrägen Beleuchtungsrichtung von SAR-Systemen hat die Befliegungsrichtung in zweierlei Hinsicht einen erheblichen Einfluss auf das empfangene Signal. Zum einen gibt es richtungsabhängige Eigenschaften von Objekten, die sich in jeweils charakteristischen Signalintensitäten bzw. -mustern ausdrücken. Zum anderen beeinflusst das Relief die radiometrischen und geometrischen Eigenschaften der SAR-Szene (siehe dazu die Abbildungen 3-10 bis 3-13). Ein Hang, der in Richtung der Antenne geneigt ist, kann einen großen Anteil der auftreffenden Energie in Richtung der Antenne reflektieren, was zu hohen Intensitäten und somit zu hellen Grautönen in der Szene führt. Bei einem der Antenne weggeneigten Hang kommt wenig Energie zurück, was sich in niedrigen Intensitäten bzw. dunklen Grautönen in der Szene bemerkbar macht. Die geometrischen Verzerrungen, die vor allem in Rangerichtung aufgrund der Topographie auftreten, äußern sich im Zusammenstauchen oder Auseinanderziehen von Bildinformationen. Zur radiometrischen und geometrischen Korrektur von SAR-Szenen sei auf die Abschnitte 6.4 bzw. 6.5 verwiesen. So kann das gleiche Gebiet, das von zwei verschiedenen Richtungen beleuchtet wird, in Radarbildern z.T. sehr unterschiedlich wiedergegeben werden. Die Abbildungen 3-8 und 3-9 zeigen ein solches Gebiet. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen und Wälder im oberen Bereich der Abbildungen weisen aufgrund richtungsabhängiger Eigenschaften unterschiedliche Signalintensitäten auf. Der Shadow- bzw. Layover-Effekt, der sich in besonders dunklen bzw. hellen Pixeln äußert, ändert sich an den Waldrändern je nach Befliegungsrichtung. In der unteren Bildhälfte treten aufgrund der Steilheit des Hanges

unterschiedliche Signalintensitäten auf, die sich wiederum in der Umkehr der Shadow- bzw. Layover-Flächen bemerkbar machen.

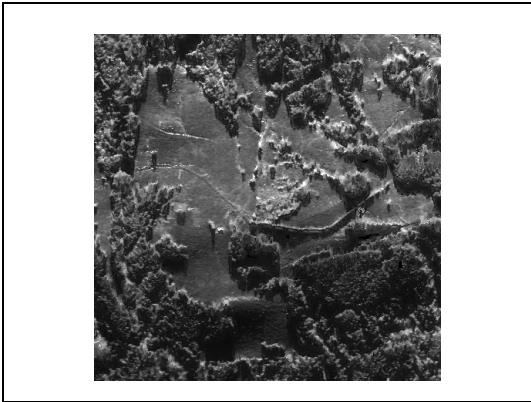


Abbildung 3-8. X-Band West-Ost-Befliegung des Rößleuter Berges, Edlesberggebiet. Maßstab 1:20 000.

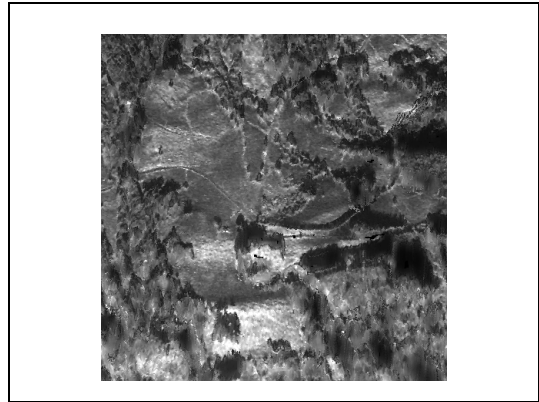


Abbildung 3-9. X-Band Ost-West-Befliegung des Rößleuter Berges, Edlesberggebiet. Maßstab 1:20 000.

Die Abbildungen 3-10 bis 3-13 zeigen die Auswirkungen der reliefbedingten Laufzeitfehler auf die SAR-Aufnahmegeometrie. Im Einzelnen können sie folgende Formen annehmen:

- Ohne Reliefeinflüsse.
- Foreshortening: Verkürzung bzw. Verlängerung von Berghängen, die gegen den Sensor bzw. von diesem weg geneigt sind.
- Layover: Der Hangneigungswinkel α ist größer als der Einfallswinkel θ . In so einem Fall kommt es zu Informationsüberlagerungen, die eine eindeutige räumliche Zuordnung der Signale nicht mehr erlauben.
- Shadow: Der Hangneigungswinkel β ist größer als der Einfallswinkel θ . Die so vom Relief abgeschatteten Gebiete sind, wie der unbeleuchtete Abschnitt CD, nicht mehr sichtbar.

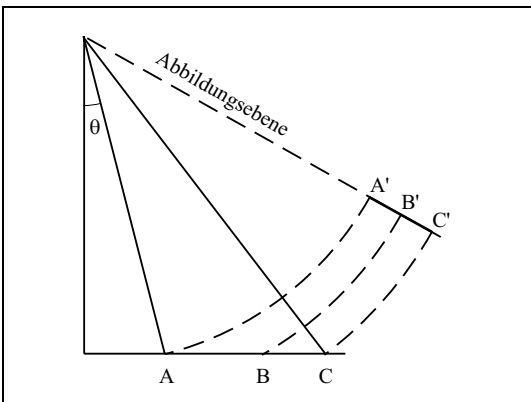


Abbildung 3-10. SAR-Aufnahmegeometrie ohne Reliefeinflüsse.

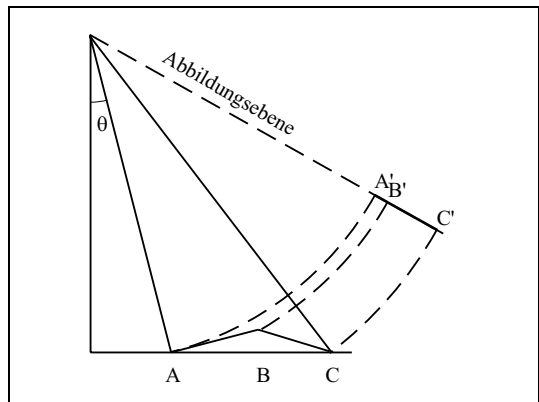


Abbildung 3-11. Foreshortening.

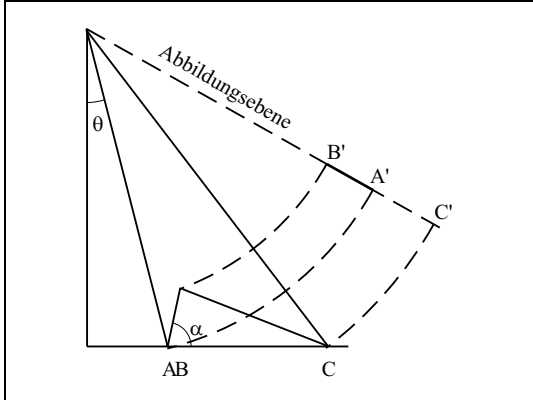


Abbildung 3-12. Layover.

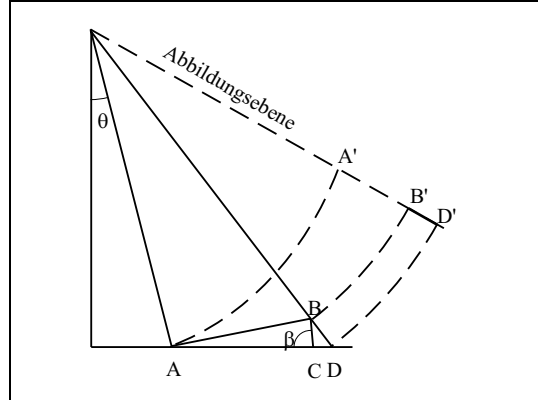


Abbildung 3-13. Shadow.

3.1.1.4 Einfallswinkel

Die Menge der von einem Objekt zurückgestreuten Energie hängt auch von dem Einfallswinkel θ ab, mit dem die Radarstrahlung auf das Objekt trifft. So hängt sowohl der Rückstreuoeffizient σ^0 als auch die Oberflächenstreuung (siehe dazu Abschnitte 3.1.3.1 bzw. 3.1.3.3) u.a. vom Einfallswinkel ab. Bei sonst gleichen Aufnahmeparametern kommt es bei verschiedenen Einfallswinkeln zu unterschiedlichen SAR-Abbildungen. Der Einfluss des Einfallswinkels für den Rückstreuoeffizienten σ^0 lässt sich wie folgt in drei Bereiche unterteilen [Long83]:

- Sehr große Änderungen von σ^0 erhält man bei Einfallswinkeln gegen 90° . Der Abnahme liegt dabei eine Funktion von $(\sin(\Theta))^4$ zugrunde.
- Für mittlere Einfallswinkel nimmt σ^0 nur langsam ab. Hier erfolgt die Abnahme mit der Funktion $\sin\Theta$.
- Da spiegelnde Reflexion bei Einfallswinkeln nahe 0° eine Rolle spielt, steigt in diesen Bereichen σ^0 an.

3.1.1.5 Polarisation

Eine elektromagnetische Welle setzt sich aus dem elektrischen Feld E und dem magnetischen Feld H zusammen, die senkrecht aufeinander stehen. Nach den Maxwell'schen Gleichungen reicht die Kenntnis über eine der beiden Feldgrößen aus, um die jeweils andere vollständig zu beschreiben. Definitionsgemäß lässt sich die Polarisation durch das elektrische Feld E wie folgt charakterisieren: Die Polarisation einer Welle beschreibt die Form des elektrischen Vektors \vec{E} , dessen Spitze sich im allgemeinen Fall entlang einer Ellipse, der sogenannten Polarisationsellipse, bewegt. Die Form und Lage der Polarisationsellipse kann nun mit Hilfe des Ellipzitätswinkels χ und des Orientierungswinkels ψ vollständig beschrieben werden (Abbildung 3-14). Eine lineare Polarisation, welche für operationelle Radarsysteme üblich ist, ist gegeben durch $\chi = 0^\circ$. Je nach der Orientierung der Schwingungsebene kann man zwischen der horizontalen Polarisation mit $\psi = 0^\circ$ und der vertikalen Polarisation mit $\psi = 90^\circ$ unterscheiden. Damit lassen sich nun verschiedene Antennenkonfigurationen, die durch die Polarisationszustände von ausgesendetem und empfangenem Signal gegeben sind, beschreiben:

- Gleichpolarisation:
horizontal gesendet - horizontal empfangen (HH)
vertikal gesendet - vertikal empfangen (VV)
- Kreuzpolarisation:
horizontal gesendet - vertikal empfangen (HV)
vertikal gesendet - horizontal empfangen (VH)

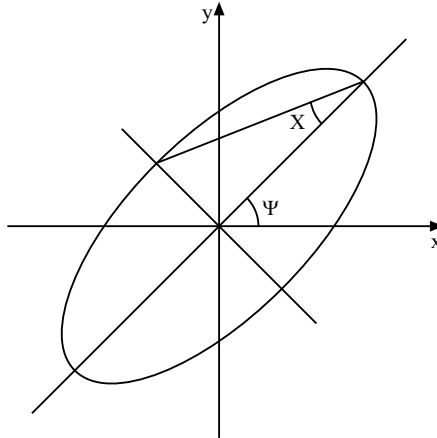


Abbildung 3-14. Polarisationsellipse mit dem Elliptizitätswinkel χ und dem Orientierungswinkel Ψ .

Aus der Kenntnis der Polarisation einer empfangenen Welle können wichtige Rückschlüsse und Zusatzinformationen über die elektrischen Eigenschaften des beleuchteten Objektes gezogen werden. Detailliertere Abhandlungen über das Thema finden sich u.a. bei [Ulaby86], [Zebker91], [Papathanassiou99] und, mit dem Schwerpunkt Kartographie, bei [Kenyi95] und [Hellmann99].

3.1.2 Objektspezifische Parameter

Eine vom Radar beleuchtete Oberfläche enthält zum einen die natürliche Landschaft, wie beispielsweise Böden, Gesteine, Pflanzen oder Gewässer, zum anderen anthropogene Formen, wie z. B. Häuser, Straßen oder Hochspannungsleitungen. Jedes Objekt setzt sich aus seiner individuellen Geometrie, Größe, Form, Ausrichtung, Orientierung, Kompaktheit und Detailstruktur zusammen. Einzelne Objekte treten in ihrer räumlichen Verteilung z.B. einzeln, gestreut oder dicht zusammenstehend auf und können u.a. von Topographie, Mikroklima und Geologie beeinflusst werden. Neben den bereits genannten Parametern sind für die Mikrowellenfernerkundung noch die physikalischen Parameter eines Objektes wie Rauigkeit, Feuchtigkeit und dielektrische Eigenschaft von Bedeutung. Die Auswirkungen einzelner Parameter auf das empfangene Signal werden nun im Kontext der Rückstreuemechanismen diskutiert.

3.1.3 Rückstreuemechanismen

Die Interaktion zwischen den auftreffenden Mikrowellenimpulsen und der durch verschiedene Parameter gekennzeichneten komplexen Oberfläche führt zu einer mehr oder weniger starken Reflexion oder Absorption der Wellen. Die hier zugrunde liegenden Mechanismen werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

3.1.3.1 Radargleichung und Rückstreuquerschnitt

Der Informationsgehalt einer Auflösungszelle im SAR-Bild (Pixel) und somit einer vom Radar aufgelösten Fläche setzt sich in der Regel aus mehreren individuellen Streuern bzw. Objekten mit ihren entsprechenden spezifischen Parametern zusammen. Die erhaltene Energie, zu der jeder stochastisch im Raum verteilte Streuer beiträgt, wird deshalb über die beleuchtete Fläche A integriert.

Die von der Antenne empfangene Energie lässt sich in der Radargleichung unter Berücksichtigung von sowohl sensor- als auch objektspezifischen Parametern nach [Ulaby89] wie folgt ausdrücken:

$$P_{rp}(\Theta) = \iint_A \frac{P_{tq} \cdot G^2(\Theta) \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4} \cdot \sigma^o \cdot dA \quad (3-8)$$

mit: P_r = Empfangsenergie

P_t = Sendeenergie

θ = Einfallswinkel

G = Antennengewinn

R = Distanz zwischen Antenne und Auflösungszelle

σ^o = mittlerer, normierter Rückstreuquerschnitt

λ = Wellenlänge

A = Fläche

dA = Flächenelement

pq = empfangene bzw. ausgesendete Polarisation.

Der dimensionslose normierte Rückstreuquerschnitt σ^o ist in der jeweiligen Aufnahmeconfiguration der einzige nicht beeinflussbare bzw. unbekannt Parameter. Er charakterisiert somit die Rückstreueigenschaften einer aufgelösten Fläche hinsichtlich ihrer objektspezifischen Parameter und ist gleichfalls ein wesentliches Maß für deren Rückstreuintensität.

3.1.3.2 Dielektrische Eigenschaft und Eindringtiefe

Das Reflexions- bzw. Absorptionsverhalten eines Objektes ist maßgeblich von dessen Feuchtigkeitsgehalt, der natürlichen Materialbeschaffenheit bzw. der dielektrischen Eigenschaft und der verwendeten Frequenz abhängig. Materialien können nach [Ulaby86] wie folgt unterteilt werden:

- Homogene Substanzen (reines Wasser, Eis)
- Elektrolytische Lösungen (in Wasser gelöste ionische Salze, z.B. Meerwasser)
- Heterogene Mischungen (alle anderen Materialien)

Die mittlere Dielektrizitätskonstante eines Materials wird bestimmt durch dessen individuelle Substanzen, deren räumliche Verteilung und Orientierung bzgl. dem einfallenden elektrischen Feldvektor sowie ihr Volumen. Generell kann gesagt werden, dass Objekte mit

einer hohen Dielektrizitätskonstante stärker spiegelnd reflektieren als Objekte mit einer niedrigen und dass die Konstante fast linear mit dem Feuchtigkeitsgehalt eines Materials zunimmt [Sabins87]. Beispielsweise hat die dimensionslose relative Dielektrizitätskonstante bei trockenen Böden einen Wert zwischen 3 und 8, für Wasser liegt dieser bei 80 [Kronberg85].

Die Eindringtiefe in ein Material, das aus mehreren Schichten, wie beispielsweise ein Boden mit verschiedenen Horizonten, zusammengesetzt sein kann, hängt neben der Wellenlänge auch von der Dielektrizitätskonstante der Materie ab. Bei trockenen Materialien mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstante dringt ein bestimmter Teil der Energie ein, während der Rest an der Oberfläche diffus gestreut wird. Dieser Energieanteil wird an der Grenze zur nächsten Schicht wiederum reflektiert bzw. zurückgestreut oder er dringt in diese ein. Der reflektierte oder gestreute Anteil kann unter Umständen aus der ersten Schicht austreten und im Falle einer diffusen Rückstreuung von der Antenne empfangen werden. Bei feuchten Materialien mit einer hohen Dielektrizitätskonstante verstärkt sich die Reflexion an der jeweiligen Grenzschicht und dämpft gleichzeitig die Wellen in der Schicht selbst. Nimmt die Dielektrizitätskonstante bzw. die Feuchtigkeit zu, kommt es demnach zu einer stärkeren Reflexion an der Oberfläche der jeweiligen Grenze bei einhergehender Abschwächung der Signale in den Schichten. Hierbei ist noch zu berücksichtigen, dass die Dämpfung im Medium bei kürzeren Wellen stark zunimmt, so dass im Umkehrschluss bei längeren Wellen ein tieferes Eindringen möglich ist. Als Richtwert für die Eindringtiefe E kann im allgemeinen die halbe Wellenlänge angenommen werden [Schanda86]:

$$E \approx \lambda/2 \quad (3-9)$$

3.1.3.3 Oberflächenstreuung

Bei homogenen und dichten Materialien findet die Rückstreuung der elektromagnetischen Wellen an der Oberfläche statt, wobei dafür die Oberflächenrauigkeit der dominierende Faktor ist. Unter der Annahme desselben Einfallswinkels und derselben Frequenz, die ebenfalls die Oberflächenstreuung beeinflussen, gilt: Je rauer eine Oberfläche, desto diffuser die Rückstreuung, bzw. je glatter, desto gerichteter die Reflexion. Siehe dazu Abbildung 3-15 bzw. 3-16. Eine vollständig diffus gestreute Reflexion, die das Gegenteil von einer idealen Spiegelung darstellt, findet auf einer völlig rauen Oberfläche, die dann als Lambertsche Fläche angenommen werden kann, statt [Holecz93]. Eine Oberfläche gilt dann als glatt, wenn die räumlichen Änderungen auf dieser im Verhältnis zur Wellenlänge sehr klein sind, und als rau, wenn die räumlichen Änderungen sehr groß sind. Das Rayleigh-Kriterium beschreibt formal den Sachverhalt der Rauigkeit einer reflektierenden Oberfläche. Demnach gilt eine Fläche als glatt, wenn der Phasenunterschied $\Delta\phi$ zwischen zwei reflektierenden Wellen kleiner ist als $\pi/2$ [Ulaby81].

$$\Delta\phi = 2 \cdot k \cdot h \cdot \cos\theta < \pi/2 \quad \text{oder } h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\theta} \quad (3-10)$$

mit: $k = 2 \cdot \pi/\lambda$

θ = Einfallswinkel

h = lokale Höhenunterschiede auf der Oberfläche

Abbildung 3-4 bzw. 3-5 verdeutlicht ebenfalls den Mechanismus der Oberflächenrauigkeit bei Beleuchtung mit unterschiedlichen Frequenzen. Die sehr dunklen Flächen der P-Band-Szene repräsentieren eine Wiese, die für das langwellige P-Band glatt ist und daher einer spiegelnden Reflexion weg vom Sensor unterliegt. Die gleichen Flächen sind dagegen in der X-Band Szene sehr viel heller, da die Wiese in dieser Frequenz rau ist und daher diffus reflektiert.

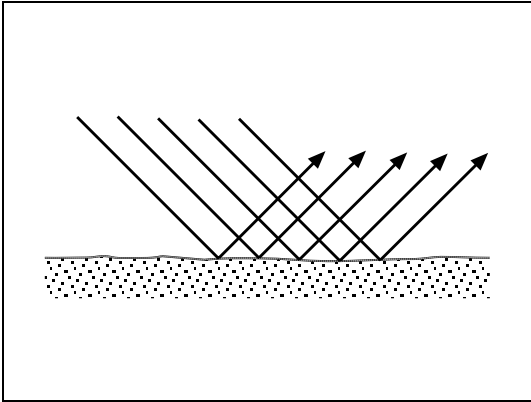


Abbildung 3-15. Spiegelnde Reflexion.

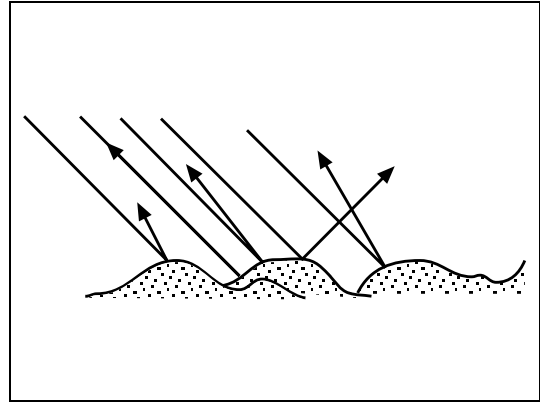


Abbildung 3-16. Diffuse Rückstreuung.

Die idealen Reflexionen, die von Punktstreuern mit einer hohen Dielektrizitätskonstante verursacht werden, macht man sich u.a. für die Geokodierung von SAR-Szenen und die Kalibration des SAR-Systems zu Nutze. Abbildung 3-17 zeigt einen Corner Reflektor, der den größten Anteil der Energie des gesendeten Pulses infolge mehrfacher Spiegelung zur Antenne zurückwirft. Diese Reflektoren, die mittels DGPS genau eingemessen sind, kann man in der SAR-Szene (Abbildung 3-18) durch ihre hohe, punktförmige Helligkeit sehr leicht identifizieren und daher gut als Passmerkmale verwenden. Da der Radarrückstreuquerschnitt RCS dieses Punktziels, der deutlich über dem des umgebenden Hintergrundbildes liegt, genau bekannt ist, werden die Corner-Reflektoren auch für die Kalibration eines SAR-Systems verwendet.



Abbildung 3-17. Corner-Reflektor.

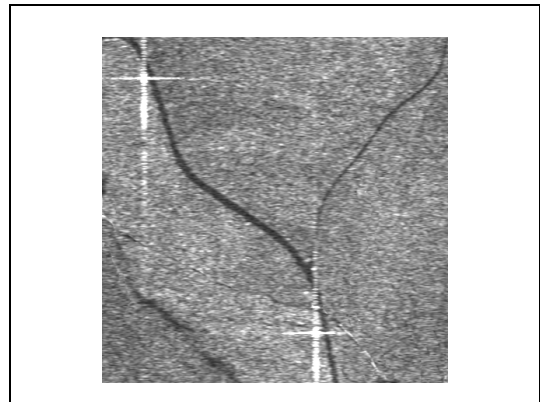


Abbildung 3-18. Reflektoren in der SAR-Szene.

3.1.3.4 Volumenstreuung

Die Volumenstreuung wird wirksam, wenn entweder die Verteilung der Elemente des reflektierenden Mediums nicht homogen ist oder die Elemente des Mediums verschiedene dielektrische Eigenschaften aufweisen. Dann dringt ein Teil der ausgesendeten Welle in das inhomogene Medium ein [Holecz93], und das zurückgestreute Signal setzt sich aus vielen kleinen Einzelstreuungen zusammen. Die Art und Stärke der Volumenstreuung wird neben der Eindringtiefe der Wellen und der Inhomogenität des Mediums auch noch entscheidend durch die Polarisierung der Radarwellen bestimmt, da z.B. kreuz- bzw. gleichpolarisierte Wellen zu verschiedenen Rückstreuanteilen führen.

3.1.4 Interferenz

Durch die Rückstreuung am Erdboden treten bei einer SAR-Aufnahme, wie bei allen kohärenten Abbildungssystemen, durch mehrere Streuer innerhalb einer Auflösungszelle verursachte Interferenzen auf. Das empfangene Signal lässt sich als Vektor c in der komplexen Ebene veranschaulichen und setzt sich, wie in Abbildung 3-19 skizziert, aus der kohärenten Addition aller rückgestreuten Signale $c_1, c_2, c_3, \dots, c_i$ innerhalb einer Auflösungszelle zusammen.

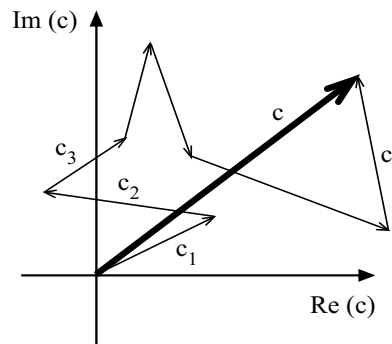


Abbildung 3-19. Rückstreuerecho c .

Dadurch kommt es zu destruktiven bzw. konstruktiven Interferenzen, die sich in den SAR-Bildern im so genannten Speckle-Effekt [Goodman76] äußern und den körnigen Charakter der Bilder verursachen. Der Kontrast des Speckle, der ein Maß für die Körnigkeit darstellt, ist der Variationskoeffizient C_{var} (coefficient of variation), der wie folgt definiert ist:

$$C_{\text{var}} = \frac{\sigma}{E} \quad (3-11)$$

mit: σ = Standardabweichung

E = Erwartungswert

Zur statistischen Beschreibung und Minimierungsmöglichkeiten des Speckle sei auf die Abschnitte 3.2.2, 3.2.3 und 6.3 verwiesen.

3.2 SAR-Bildprozessierung und -eigenschaften

Um eine Auswertung bzw. Weiterverarbeitung der von der Antenne empfangenen Signale, also der SAR-Rohdaten, zu ermöglichen, müssen diese zunächst zu SAR-Bildern verarbeitet werden. Das SAR-Bildprozessierungsverfahren und die statistischen Eigenschaften von SAR-Bildern werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

3.2.1 Prozessierungsverfahren

Für die SAR-Bildprozessierung, die mittels Algorithmen der Signalverarbeitung gelöst wird, werden sowohl die Phase φ als auch die Amplitude A des empfangenen Signals benötigt. Die Rohdaten sind in einer Matrix gespeichert, in der jedes Element c eine komplexe Zahl ist und in der der Realteil $\text{Re}(c)$ mit In-phase I und der Imaginärteil $\text{Im}(c)$ mit Quadratur Q bezeichnet wird:

$$c = I + j \cdot Q \quad (3-12)$$

Die Amplitude A und die Phase φ sind gegeben durch:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (3-13)$$

$$\varphi = \arctan \frac{Q}{I} \quad (3-14)$$

Hauptziel der Prozessierung ist nun eine hohe Auflösung sowohl in Azimut- als auch in Rangerichtung zu erreichen. Dazu werden die Signale in beiden Richtungen entweder im Orts- oder Frequenzbereich mit einer Referenzfunktion, die durch den theoretischen Verlauf des Signals definiert ist, gefaltet. Diese zweidimensionale Faltung bzw. Kreuzkorrelation mit einer Referenzfunktion wird in zwei eindimensionalen Schritten, die jeweils eine Impulskompression bewirken, durchgeführt: und zwar zuerst in Range- und dann in Azimutrichtung. Während Abbildung 3-20 einen bereits in Rangerichtung komprimierten Datensatz zeigt, ist auf Abbildung 3-21 ein fertig prozessiertes SAR-Bild zu sehen.

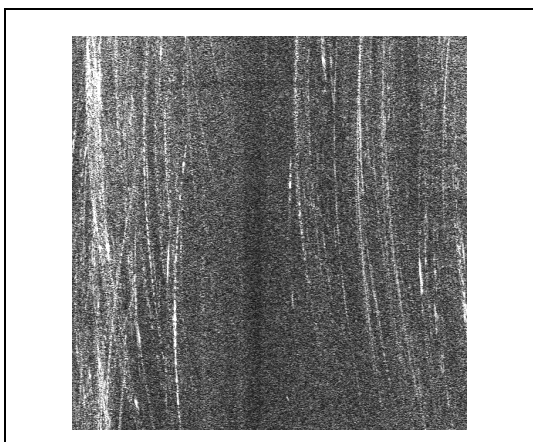


Abbildung 3-20. In Rangerichtung komprimierte Daten.



Abbildung 3-21. Prozessierter Datensatz.

Ein bei der Prozessierung häufig verwendeter Ansatz ist der Range-Doppler-Algorithmus [Schreier93]. Bei flugzeuggetragenen Systemen ist es notwendig, mit Bewegungsextraktionsverfahren [Moreira92] die verschiedenen Bewegungsfehler des Flugzeuges zu kompensieren. Um die hierzu benötigten Abweichungen von der Referenzbahn exakt zu erfassen und schließlich zu korrigieren, werden sehr genaue inertielle Navigationssysteme (INS), die mit differenziellen GPS-Systemen gekoppelt sind, eingesetzt. Diese Systemkonfiguration zeichnet die Position und Lage des Flugzeuges sowie die Winkelmessung der Flugrotation um die drei Raumachsen auf und beschreibt somit die Abweichungen von der Referenzbahn. Detaillierte Beschreibungen zur SAR-Prozessierung finden sich u.a. bei [Bammler93], [Curlander91], [Elachi88], [Hein98], [Oliver98] und [Raney82].

3.2.2 Multilook-Verfahren

Wie in Abschnitt 3.1.4 besprochen, tritt in den SAR-Bildern der Speckle-Effekt auf. Eine Möglichkeit, diesen zu vermindern, ist das Multilook-Verfahren [Moreira90], das während der Prozessierung angewandt wird. Hier wird eine räumliche Mittelung einzelner Abschnitte der synthetischen Antenne über die Werte L_{az} in Azimut- und L_{rg} in Range-Richtung zu einem Multilook-Bild durchgeführt. Die Anzahl der Looks L lässt sich ermitteln nach:

$$L = L_{az} \cdot L_{rg} \quad (3-15)$$

Die Verminderung des Speckles bzw. die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) in einem L-Look-Bild zieht jedoch eine Verschlechterung der geometrischen Auflösung nach sich. Dem gegenüber steht das Single-Look-Bild, in dem die Daten zu einer Szene mit der bestmöglichen Auflösung prozessiert sind. Beim Multilook-Verfahren muss also je nach Anwendung ein Kompromiss zwischen radiometrischer und geometrischer Auflösung gefunden werden. Um den geforderten Anforderungen insgesamt ausreichend zu entsprechen, ist eine Anzahl von 1 bis 20 Looks bei der Prozessierung üblich.

3.2.3 Single-Look-SAR-Statistik

Die Abschnitte zur Single-Look- bzw. Multi-Look-SAR-Statistik diskutieren das statistische Verhalten von SAR-Daten, welche sich grundsätzlich vom Verhalten optischer Daten unterscheiden. Diese Kenntnisse sind sowohl für das Processing als auch das Post-Processing der SAR-Daten im Hinblick auf die zu verwendenden Klassifikationsmethoden von entscheidender Bedeutung.

Jeder Wert eines Pixels der in komplexer Form vorliegenden SAR-Daten entspricht dem Ergebnis der Rückstreuung einer Auflösungszelle. Das gesamte empfangene Signal kann demnach wie folgt dargestellt werden:

$$\vec{A} = \sum_{i=1}^{N_s} A_i e^{j\varphi_i} = A_e e^{j\varphi} \quad (3-16)$$

Der Real- und der Imaginärteil von A_e sind als A_I und A_Q gegeben und folgendermaßen beschrieben:

$$A_I = A_e \cos \varphi = \sum_{i=0}^{N_s} A_i \cos \varphi_i \quad (3-17)$$

$$A_Q = A_e \sin \varphi = \sum_{i=0}^{N_s} A_i \sin \varphi_i \quad (3-18)$$

Durch die kohärente Addition der Einzelsignale in einer Auflösungszelle kommt es, wie in Abschnitt 3.1.4 besprochen, zu Interferenzen und somit zum Speckle-Effekt. Für die Zusammensetzung des Gesamt-Streusignals aus mehreren Streuzentren in einer Auflösungszelle gelten grundsätzlich folgende, für die Statistik von Single-Look-SAR-Aufnahmen maßgebende Annahmen [Ulaby81]:

- Amplitude und Phase der einzelnen Streuer sind statistisch unabhängig. Die Nachbarschaftseffekte von nebeneinander stehenden Streuern können vernachlässigt und so die Einzelsignale aufsummiert werden.
- Es wird nur voll entwickeltes Speckle betrachtet, wo die Phase gleichmäßig über $[-\pi, \pi]$ verteilt ist und es sich somit um eine homogene Fläche handelt.
- Die Anzahl der Einzelstreuer N_s ist so groß, dass A_I und A_Q als normalverteilt und unkorreliert betrachtet werden können.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen und für $A_e \geq 0$ lässt sich aus einer entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Amplitude A_e eine Rayleigh-Verteilung mit σ als Standardabweichung und eine Gleichverteilung für die Phase φ herleiten:

$$p(A_e) = \frac{A_e}{\sigma^2} e^{-\frac{A_e^2}{2\sigma^2}} \quad (3-19)$$

$$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad (3-20)$$

Die ersten beiden Momente der Rayleigh-Verteilung sind als Erwartungswert $E()$ bzw. Varianz $D^2()$ gegeben mit:

$$E(A_e) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \quad (3-21)$$

$$D^2(A_e) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2 \quad (3-22)$$

Der Variationskoeffizient ist nach [Lee94] gegeben als:

$$C_{\text{var}_A} = \frac{\sqrt{D^2(A_e)}}{E(A_e)} \approx 0,5227 \quad (3-23)$$

Neben den Amplitudendaten werden auch die Intensitäten P betrachtet. Die Verteilung von P abgeleitet aus Gleichung 3.17 reduziert sich für $P = A_e^2$ und $dP = 2A_e dA_e$ auf folgende Exponentialverteilung:

$$p(P) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{P}{2\sigma^2}} \quad (3-24)$$

Die ersten beiden Momente der Exponentialverteilung sind:

$$E(P) = 2\sigma^2 = \bar{P} \quad (3-25)$$

$$D^2(P) = 4\sigma^4 = \bar{P}^2 \quad (3-26)$$

Unter Berücksichtigung von $E(P)$ lässt sich Gleichung 3.21 wie folgt umschreiben:

$$p(P) = \frac{1}{\bar{P}} e^{-\frac{P}{\bar{P}}} \quad (3-27)$$

Der Variationskoeffizient ist demnach gegeben als:

$$C_{\text{var}_P} = \frac{\sqrt{D^2(P)}}{E(P)} = \frac{\sqrt{\bar{P}^2}}{\bar{P}} = 1 \quad (3-28)$$

Wird eine der Annahmen verletzt, was z.B. bei heterogenen Flächen oder bei der Dominanz eines einzelnen Streuelementes in einer Auflösungszelle (Metallmast, Corner Reflektor) der Fall ist, gelten andere Verteilungen wie beispielsweise die K- oder die Rice-Nakagami-Verteilung [Ebeling80] und [Fried76].

3.2.4 Multi-Look-SAR-Statistik

Die statistische Beschreibung von Multi-Look-SAR-Bildern erfolgt durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, also mittels Statistik erster Ordnung.

Multi-Look-Intensitätsbilder aus einer homogenen Fläche können nach einer inkohärenten, unkorrelierten Addition der P_i mit L -Looks wie folgt beschrieben werden:

$$P_L = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L P_i = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (A_{Li}^2 + A_{Qi}^2) \quad (3-29)$$

Wie bereits gezeigt unterliegen Single-Look-Intensitätsbilder einer Exponentialverteilung. Für Multi-Look-Intensitätsbilder lässt sich durch Faltung von L -Exponentialverteilungen und unter Berücksichtigung bestimmter Annahmen [Huber98a], [Ulaby86] sowie $P_L \geq 0$ eine Gamma-Verteilung herleiten:

$$p(P_L) = \frac{L^L}{\Gamma(L)} P_L^{L-1} e^{-LP_L} \quad (3-30)$$

wobei $\Gamma()$ die Gamma-Funktion bezeichnet.

Die ersten beiden Momente dieser Verteilung sind:

$$E(P_L) = 1 \quad (3-31)$$

$$D^2(P_L) = \frac{1}{L} \quad (3-32)$$

Der Variationskoeffizient lässt sich daraus wie folgt angeben:

$$C_{\text{var}_{PL}} = \frac{\sqrt{D^2(P)}}{E(P)} = \frac{C_{\text{var}_P}}{\sqrt{L}} = \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (3-33)$$

Die genannten statistischen Größen gelten wiederum nur in homogenen Gebieten. Heterogene Gebiete lassen sich mit der der Gammaverteilung ähnlichen K-Verteilung modellieren. Eine für die Weiterverarbeitung der Daten wichtige Eigenschaft der Gammaverteilung ist, dass sie für $L > 10$ einer Normalverteilung zustrebt [Holecz93].

Multilook-Amplitudenbilder werden aus der Wurzel der Intensitäten erzeugt mit:

$$A_L = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L A_i^2} \quad (3-34)$$

Die daraus resultierende Verteilung ergibt sich, als Wurzel der Gamma-Verteilung, zu:

$$P(A_L) = \frac{2L^L}{\Gamma(L)} A_L^{2L-1} e^{-LA_L^2} \quad (3-35)$$

mit den ersten Momenten:

$$E(A_L) = \frac{L + \frac{1}{2}}{\sqrt{L}\Gamma(L)} \quad (3-36)$$

und

$$D^2(A_L) = 1 - \left(\frac{\Gamma\left(L + \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{L}\Gamma(L)} \right)^2 \quad (3-37)$$

und dem daraus entsprechenden Variationskoeffizienten:

$$C_{\text{var}_{AL}} = \frac{\sqrt{D^2(A_L)}}{E(A_L)} = \sqrt{\frac{L\Gamma^2(L)}{\Gamma^2\left(L + \frac{1}{2}\right)} - 1} \quad (3-38)$$

Wie bei den Intensitäten gelten die diskutierten statistischen Größen wiederum nur für homogene Gebiete. In heterogenen Gebieten kommt entweder die K- oder die Rice-Nakagami-Verteilung zur Geltung. Die für die Amplitudendaten besprochene Verteilung nähert sich bereits bei $L > 4$ einer Normalverteilung an [Holecz93].

3.3 SAR-Interferometrie

Die SAR-Interferometrie (InSAR), [Coltelli96], [Gens96], [Massonnet93] und [Schwäbisch95] nutzt die Phaseninformation des SAR-Signals, um eine dreidimensionale Erfassung der Erdoberfläche zu realisieren. Ähnlich wie in der Stereometrie wird die Höhe aus zwei Aufnahmen desselben Gebietes berechnet. Der Vorteil der interferometrischen Phasenauswertung gegenüber einer stereometrischen Amplitudenauswertung hat zwei Aspekte. Die Messgenauigkeit der Parallaxen liegt bei der Phasenauswertung im Bereich von 1/10 mm, während diese, eine gleiche Basislinie vorausgesetzt, bei einer stereometrischen Amplitudenauswertung im Dezimeterbereich liegt. Außerdem ist die Phasenauswertung, im Gegensatz zur Stereometrie, unabhängig vom Bildkontrast, so dass auch die Erzeugung von Höhenmodellen über Eis- oder Schneeflächen möglich ist. Generell können mit der Hilfe von InSAR-Daten digitale Höhenmodelle erzeugt, Höhenänderungen detektiert oder mittels Kohärenzanalyse Veränderungen auf der Erdoberfläche beobachtet werden. Eine Genauigkeitsanalyse von Höhenmodellen aus der SAR-Interferometrie, dem Laserscanning und der Photogrammetrie als weiteren Höhenerfassungsmethoden findet sich bei [Meier01].

3.3.1 Interferometrisches Messprinzip

Nachdem die Lage eines Punktes in der Entfernungsrichtung durch die Laufzeit zwischen Sensor und Objekt bestimmt ist, wird eine Trennung von verschiedenen Punkten auf der Oberfläche durch unterschiedliche Signallaufzeiten realisiert. Dies ist aber nicht mehr möglich, wenn deren Signallaufzeit gleich ist. Dann kommt es zu mehrdeutigen Abbildungen, wodurch Unterschiede in der Geländehöhe nicht mehr aufgelöst werden können.

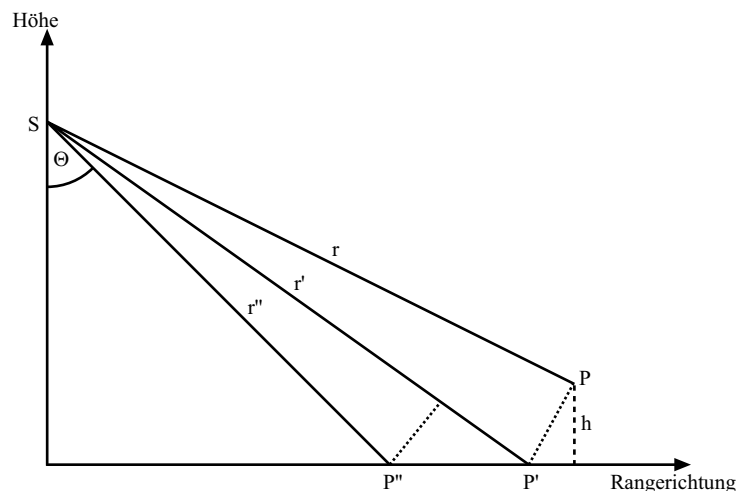


Abbildung 3-22. SAR-Aufnahmeprinzip mit $r = r'$ nach [Schwäbisch95, S. 13].

Zur Auflösung der Mehrdeutigkeiten und somit zur Erfassung der Höhe wird eine zweite Empfängerposition S_2 benötigt, die räumlich von der ersten S_1 getrennt ist. Demnach weisen einzelne Punkte unterschiedliche Signallaufzeiten bzw. Weglängen von den zwei

Sensorpositionen zu der Geländeoberfläche auf. Mit diesem Messverfahren lassen sich Geländeoberflächen dreidimensional erfassen.

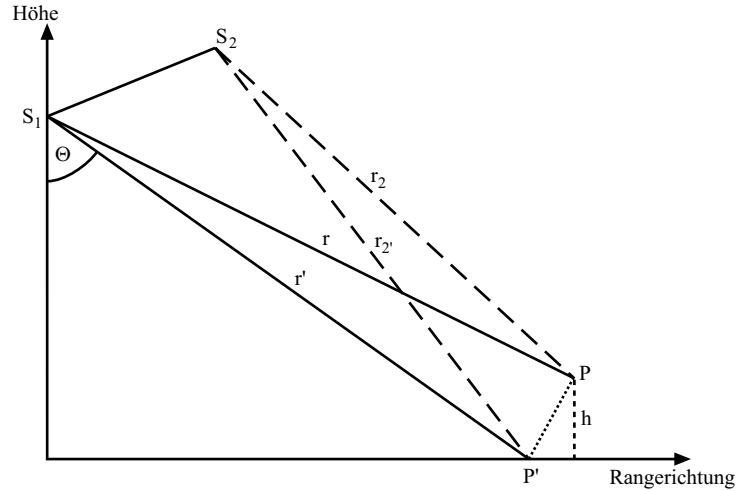


Abbildung 3-23. InSAR-Aufnahmeprinzip mit $r = r'$ aber $r_2 \neq r'_2$ nach [Schwäbisch95, S. 13].

Bei der Auflösung der Mehrdeutigkeiten nutzt die InSAR-Signalverarbeitung den kohärenten Charakter abbildender Radarsysteme, welcher durch eine feste Phasenbeziehung zwischen zwei elektromagnetischen Wellen zum Ausdruck kommt und folgende Beziehung hat:

$$\varphi = \frac{2\pi R}{\lambda} + \varphi_0 \quad (3-39)$$

Diese Beziehung sagt aus, dass sich die Phase φ mit einem rausch- und rückstreuungsspezifischen Anteil φ_0 , einer monochromatischen elektromagnetischen Welle der Länge λ proportional zur zurückgelegten Weglänge R verhält. Schließlich wird beim InSAR-Verfahren eine Phasendifferenzmessung durchgeführt, die somit der Bestimmung eines Weglängenunterschiedes entspricht.

Das Messprinzip verdeutlicht Abbildung 3-24. Die Basislinie B ist beschrieben durch den Basislinienwinkel ξ sowie den Abstand zwischen den beiden Aufnahmepositionen S_1 und S_2 , welche die Aufnahmegeometrie für den Zielpunkt P durch die Blickwinkel Θ_1 und Θ_2 sowie den Schrägentfernungen r_1 und r_2 bestimmen. Der Weglängenunterschied Δ_r wird über die Phasendifferenz bestimmt nach:

$$\Delta_r = \frac{\lambda}{2 \cdot 2\pi} (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3-40)$$

Der Faktor 2 resultiert aus der doppelten Weglänge des Signals.

Näherungsweise wird dann für die Geländehöhe h die Proportionalitätsbeziehung in Abhängigkeit von der Phasendifferenz angegeben mit:

$$h \approx \frac{\lambda r \cdot \sin \theta}{4\pi B} \cdot \Delta\varphi \quad (3-41)$$

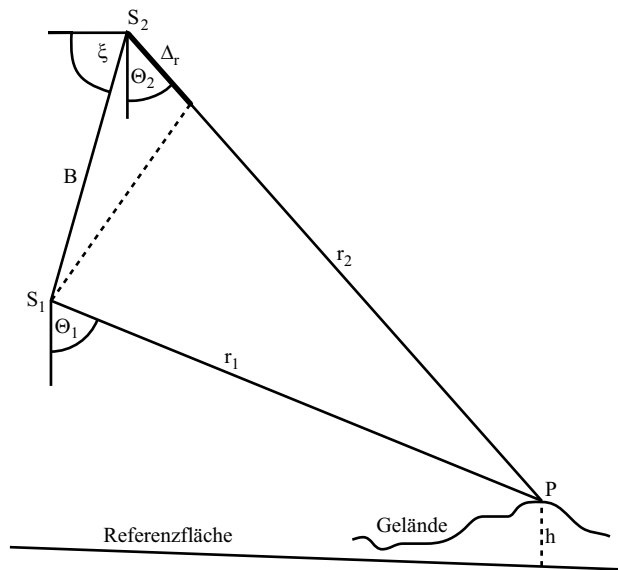


Abbildung 3-24. InSAR-Messprinzip nach [Schwäbisch95, S. 14].

Voraussetzung für die Signifikanz der Phasendifferenzmessung ist, dass φ_0 in beiden Beobachtungen gleich ist. φ_0 beschreibt dabei einerseits den Phasenteil des Signals, welcher von den spezifischen Rückstreuungseigenschaften der Streuer innerhalb einer Auflösungszelle abhängt, und andererseits den Rauschanteil des Signals, der durch verschiedene Störeffekte bedingt ist. Die interferometrische Messung ist daneben in hohem Maße von der Signalkohärenz, die den Grad der Ähnlichkeit der Einzelbeobachtungen beschreibt, abhängig. Die Basislinie darf einen gewissen kritischen Wert nicht überschreiten, sonst kommt es zu vollständiger Dekorrelation der Signale. Auch darf sich das beleuchtete Objekt in seinen Streueigenschaften zwischen den beiden Aufnahmen nur so stark verändern, dass es nicht zu völlig verschiedenen Rückstreusignalen kommt.

Das InSAR-Prinzip findet bei zwei Aufnahmeverfahren Anwendung:

- **Single-Pass-Interferometrie.** Es handelt sich dabei um die Aufnahme der Signale, die vom einem Sender ausgesendet und mit zwei Empfängern empfangen werden. Die Empfänger sind in festem Abstand zueinander montiert und stellen die Basislinie B dar. Dies wird primär auf Flugzeugen verwendet, wobei hier die Bewegungskompensation von größter Wichtigkeit ist, da im Gegensatz zu Satelliten die Flugbahn bei Flugzeugen wesentlich variabler ist. Ein Vorteil liegt darin, dass die zeitliche Dekorrelation der Signale nahezu entfällt, da die Aufnahmen fast zeitgleich, im Mikrosekundenbereich, stattfinden.
- **Repeat-Pass-Interferometrie.** Diese Methode wird entweder für orbit- oder für flugzeuggestützte Radarsysteme, die große Basislinien benötigen, angewandt. Man erhält interferometrisch verwertbare Aufnahmen durch zweimalige Beleuchtung eines Ziels auf leicht versetzten Flugbahnen. Daraus ergeben sich jedoch, bedingt durch den längeren zeitlichen Abstand zwischen den Aufnahmen oder Ungenauigkeiten in der Flugpositionierung, stärkere Dekorrelationen.

3.3.2 Phase

Die grundlegende Messgröße der Radar-Interferometrie ist die Phase φ des SAR-Signals, deren wichtigste Eigenschaften bereits in den Abschnitten 3.1.4, 3.2.1 und 3.2.3 diskutiert wurden. Aus den genannten Annahmen folgt, dass die Phase einer Einzelbeobachtung nicht signifikant mit den Rückstreuereigenschaften eines Objektes verknüpft ist, wie dies bei der Amplitude, deren Erwartungswert sich proportional zum Rückstreuquerschnitt σ^0 verhält, der Fall ist. Beim interferometrischen Messprinzip wird nun nicht eine Einzelmessung, sondern die Differenz zweier Phasenmessungen betrachtet, wobei unter gewissen Voraussetzungen eine feste Phasenbeziehung, also Kohärenz, zwischen den Signalen besteht.

3.3.3 Kohärenz

Vernachlässigt man das systemimmanente Empfängerrauschen, so ist die Radarrückstreuung ein deterministischer Prozess, d. h. dass bei gleichen Bedingungen gleiche Rückstreuergebnisse entstehen. Unter Voraussetzung einer phasentreuen Prozessierung würde das eine vollständige Kohärenz der Signale bedeuten. Bei realen Aufnahmebedingungen ist diese hochgradige Kohärenz, bedingt durch folgende Störeffekte, jedoch nicht gegeben:

- a. Thermisches Rauschen des Radarsystems
- b. Fehler bei der Datenakquisition, -prozessierung bzw. -weiterverarbeitung
- c. Unterschiedliche atmosphärische Bedingungen
- d. Änderung der Rückstreuereigenschaften von Objekten infolge zeitlicher Dekorrelation
- e. Unterschiedliche Beobachtungspositionen.

Das Maß der Kohärenz γ zweier SAR-Signale c_1 und c_2 ergibt sich aus [Schwäbisch95]:

$$\gamma = \frac{E(c_1 \cdot \bar{c}_2)}{\sqrt{E(|c_1|^2) \cdot E(|c_2|^2)}} \quad (3-42)$$

$E()$ bezeichnet dabei den Erwartungswert und \bar{c} die konjugiert komplexe Zahl von c . Da $|\gamma|$ Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, ist die Dekorrelation durch $(1-|\gamma|)$ definiert [Schwäbisch95]. Die einzelnen Störeffekte äußern sich durch ihre Dekorrelationsanteile, die nun multiplikativ zu dem gesamten Kohärenzfaktor γ_{ges} zusammengefasst werden [Zebker92b]:

$$\gamma_{\text{ges}} = \gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c \cdot \gamma_d \cdot \gamma_e \quad (3-43)$$

Die Kohärenz gilt zum einem als Maß für die Qualität der interferometrischen Phase, zum anderen werden durch sie Änderungen an der Oberfläche oder unterschiedliche Streueigenschaften, z. B. die einer Waldfläche, beschrieben.

Die Abbildung 3-26 zeigt ein Kohärenzbild, in dem hohe Kohärenzwerte durch sehr helle Grauwerte beschrieben werden, gegenüber dem dazugehörigen Amplitudenbild in Abbildung 3-25. Die Bereiche niederer Kohärenz wie Waldflächen, Shadow oder Layover kommen durch zeitliche oder Signal-Dekorrelationen zustande, während in Bereichen hoher Kohärenz, wie Wiesen oder Siedlungen, diese Störeffekte zu vernachlässigen sind.

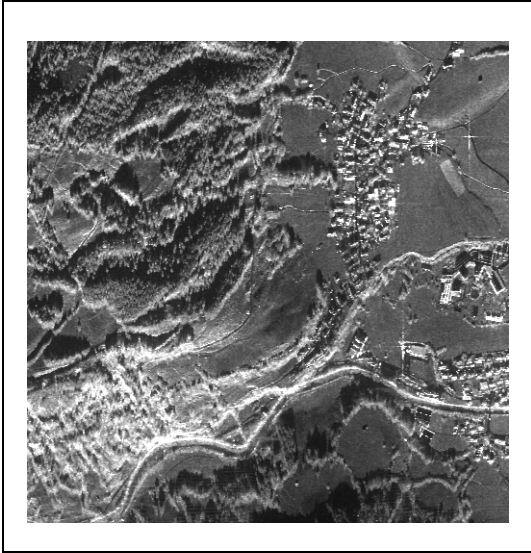


Abbildung 3-25. X-Band SAR-Szene Pfronten und Vils, Edelberggebiet. Maßstab ca. 1:19 000.

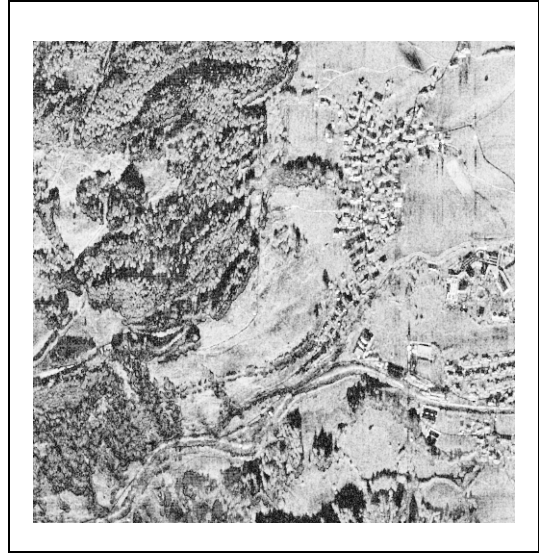


Abbildung 3-26. Kohärenz-Szene aus den X-Band-Daten Pfronten und Vils, Edelberggebiet. Maßstab ca. 1:19 000.

3.3.4 Interferometrische Prozessierung

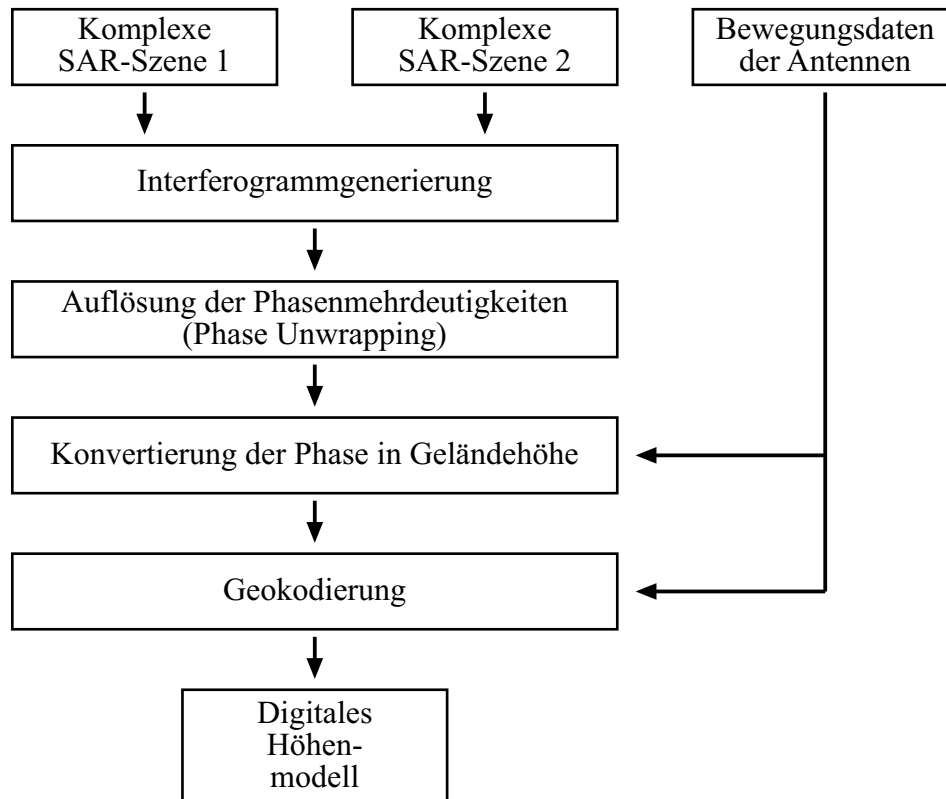


Abbildung 3-27. Interferometrische Prozessierungskette.

Die interferometrische Prozessierungskette beinhaltet eine Vielzahl einzelner Schritte, von denen die wichtigsten in Abbildung 3-27 dargestellt sind. Ausgehend von zwei komplexen SAR-Szenen steht in der Kette hin zum Höhenmodell eine optimale möglichst rauscharme Aufbereitung der interferometrischen Phase und die Minimierung von systematischen Fehlern im Vordergrund.

3.3.4.1 Interferogrammgenerierung

Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmepositionen ist die Bildgeometrie der beiden SAR-Szenen verschieden. Die im allgemeinen gegeneinander verschobenen und verzerrten Bilddaten müssen zunächst so exakt wie möglich [Just94] einander angepasst bzw. koregistriert werden, um ein möglichst rauscharmes Interferogramm zu erzeugen und einen hohen Kohärenzgrad der Daten zu gewährleisten.

Um eine subpixelgenaue Koregistrierung durchzuführen müssen zunächst die Parameter der Abbildungsgleichung zwischen beiden Bildern ermittelt und diese anschließend auf einem regelmäßigen Raster neu abgetastet (Resampling) werden [Schwäbisch95]. Eine gängige Methode zur Bestimmung des Versatzes ist die Durchführung von Kreuzkorrelationen in verschiedenen Bereichen der Bilder [Prati90], [Schwäbisch95], wobei der Grad der Kohärenz als Indikator für die Güte der Anpassung genutzt wird. Als Resampling-Methoden werden dann bilineare [Lin92] oder quadratische [Small93] Verfahren und auch kubische Splines [Geudner95] eingesetzt.

Beide Datensätze decken nun mittels einer optimalen Koregistrierung den geometrisch gleichen Bereich ab. Im Allgemeinen enthalten sie jedoch aufgrund der verschiedenen Blickwinkel bei der Aufnahme verschiedene Informationen, die im Interferogramm einen zusätzlichen Rauschanteil verursachen. Mit Hilfe spektraler Verschiebungen und Bandpassfilterungen werden diese Dekorrelationen beseitigt und wird das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert [Schwäbisch95].

Das interferometrische Signal I oder auch Interferogramm entsteht nun durch pixelweise komplexe Multiplikation der beiden koregistrierten und gefilterten Einzelwerte c_1 und c_2 :

$$I = c_1 \cdot \bar{c}_2 \quad (3-44)$$

Die entscheidende Größe des InSAR-Prinzips ist die Phase von I , die interferometrische Phase Φ , deren Wertebereich wie der der Einzelphasenwerte zwischen $[-\pi, \pi]$ verteilt liegt.

$$\Phi = \arctan \left[\frac{\text{Im}(c_1 \cdot \bar{c}_2)}{\text{Re}(c_1 \cdot \bar{c}_2)} \right] \quad (3-45)$$

Dadurch ergibt sich eine hochgradige Mehrdeutigkeit der interferometrischen Phase, wie in den Fringes des Interferogramms in Abbildung 3-28 ersichtlich ist. Ein Fringe stellt jeweils den gesamten Wertebereich der Phase dar, der in einer Farbdarstellung von weiß über rot nach schwarz verläuft.

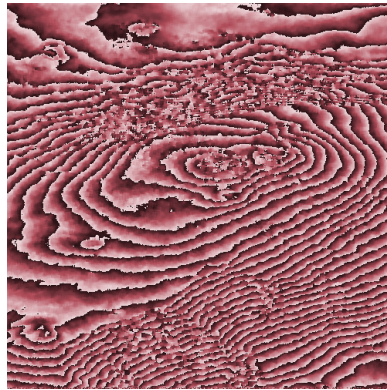


Abbildung 3-28. Interferogramm.

Jedes Interferogramm enthält zunächst einen Phasenanteil, welcher nicht durch die Topographie, sondern durch die Seitensichtgeometrie bedingt ist. In Rangerichtung ergeben sich auch bei ebenem Gelände für zwei Punkte gleicher Geländehöhe unterschiedliche Weglängen, was einen parallelen Phasenverlauf erwarten lässt und somit zu einem Ansteigen in Rangerichtung führt. Abweichungen bezüglich der Parallelität in Azimutrichtung können sich aus Höhenunterschieden im Gelände oder Variationen in der Aufnahmegeometrie ergeben.

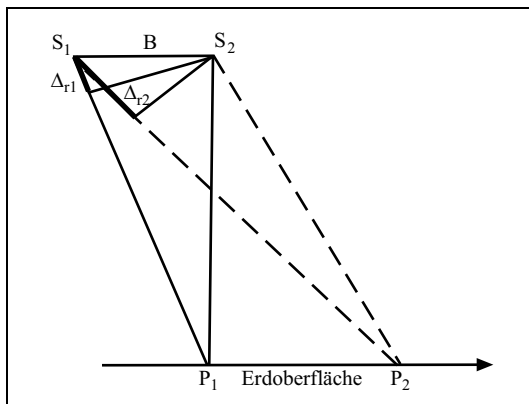


Abbildung 3-29. Unterschied in der Weglängendifferenz für Punkte gleicher Höhe.

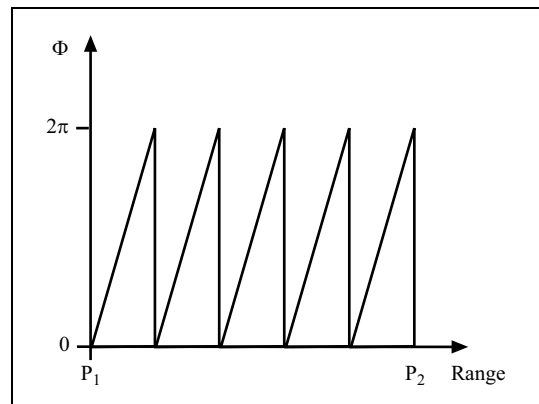


Abbildung 3-30. Phasenverlauf für ein Gebiet mit konstanter Höhe von 0 Metern über NN.

Mit Hilfe verschiedener Methoden [Schwäbisch95] kann man diese Effekte modellieren und somit die Phase der flachen Erde von der interferometrischen Phase abziehen, was zu einem Interferogramm mit rein topographischen Fringes führt.

3.3.4.2 Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten

Nach einer weiteren Reduktion des Rauschens der interferometrischen Phase [Goldstein88], [Schwäbisch95] erfolgt als komplexestes Problem des InSAR-Prinzips die Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten (Phase Unwrapping). Da die Messung der interferometrischen Phase auf den Bereich $[-\pi, \pi]$ beschränkt ist, lässt sich die gesamte

Höhendynamik einer realen Geländeoberfläche nur für sehr kleine Basislinien oder für sehr geringe Höhenunterschiede erfassen. In der Regel ist die interferometrische Phase insofern mehrdeutig, als gleiche relative Phasenwerte verschiedenen absoluten Phasenunterschieden im Sinne der Weglängendifferenz entsprechen können. Diese Mehrdeutigkeiten werden beim Phase Unwrapping aufgelöst und so wird die ungewrappte relative Phase bestimmt, aus der dann Höheninformationen abgeleitet werden. Unter der Voraussetzung, dass das Signal hinreichend abgetastet ist, lässt sich das Problem durch Integration lösen, indem man an den Phasensprüngen den Phasenwert um den Betrag von 2π korrigiert. Da das Signal aufgrund von Phasenrauschen oder zu starker Geländeneigung jedoch nicht überall hinreichend abgetastet ist, führt diese lokale Unterabtastung zu einem globalen Fehler in der ungewrappten Phase. Nähere Beschreibungen und verschiedene Lösungsansätze des Phase Unwrapping-Problems finden sich u.a. bei [Ghiglia98], [Goldstein88], [Pritt94], [Reigber97] und [Schwäbisch95]. Die Abbildung 3-31 zeigt den relativen Phasenverlauf aus dem Interferogramm der Abbildung 3-28 nach dem Phase Unwrapping, das bereits qualitativ die Form des Geländes beschreibt.

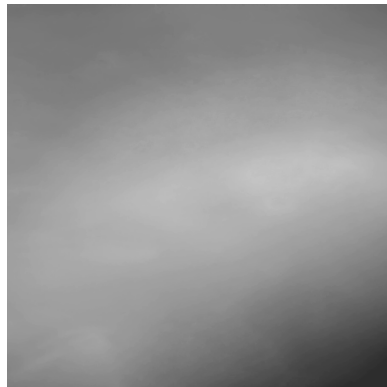


Abbildung 3-31. Relative Phase nach dem Phase Unwrapping.

3.3.4.3 Konvertierung der Phase in Geländehöhe

Die relative Phase nach dem Phase Unwrapping wird nun unter Berücksichtigung der speziellen Aufnahmegeometrie in die Geländehöhe konvertiert. Dies ist notwendig, da aufgrund von Nichtlinearitäten innerhalb des interferometrischen Abbildungsvorganges, z.B. in steilen topographischen Bereichen, gleiche Phasenwerte im Bild nicht unbedingt gleichen Höhen entsprechen müssen. Der Vorgang der Höhenmessung eines Punktes auf der Erdoberfläche muss, wie jeder Messvorgang, auf eine Referenz bezogen werden, die hier in Form eines sich gut an die Geoidform annähernden Rotationsellipsoides gegeben ist. Für die interferometrische Höhenbestimmung gelangt man somit zur Ellipsoidhöhe, die den vertikalen Abstand des zu messenden Punktes vom zugrundegelegten Ellipsoid bezeichnet.

Eine Möglichkeit, aus der Phase die Geländehöhe abzuleiten, erfolgt nach [Small93] über eine genaue Modellierung der Basislinie. Zunächst wird eine ausreichende Zahl von Referenzpunkten, deren Lage und Höhe bekannt sind, über das Bild verteilt. Mit Hilfe dieser Informationen wird Lage und Orientierung der Basislinie ermittelt, was schließlich zur Höhenberechnung führt.

Ein weiteres Verfahren [Schwäbisch95] nutzt hingegen nur einen Referenzpunkt für die Höhenbestimmung. Hier wird die relative Phase nach dem Phase Unwrapping zunächst in einem regelmäßigen Gitter gemessen, um dann für einen Teilbereich der Werte die Phase-zu-Höhe-Beziehung zu modellieren und mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung zu ermitteln. Mit Hilfe des Referenzpunktes erfolgt die Berechnung der absoluten Phase, die dann unter Nutzung der Phase-zu-Höhe-Funktion für jedes Pixel in Höhe umgerechnet wird. Die Qualität des Modells kann durch die Einführung weiterer Referenzpunkte gesteigert werden, da diese eine Ausgleichung der Höhenwerte ermöglichen.

3.3.4.4 Geokodierung

Nach der Konvertierung der Phase in Geländehöhe liegt bereits ein digitales Höhenmodell (DHM) vor, das allerdings noch die Slant Range-Geometrie aufweist. Zur sinnvollen Nutzung der Daten, um z.B. einen Vergleich mit anderen Geodaten zu ermöglichen, muss das DHM nun in eine bestimmte Kartenprojektion transformiert werden. Dieser Schritt wird im allgemeinen als Geokodierung bezeichnet. Um ein Pixel auf die gewählte Referenzfläche zu projizieren, muss zunächst dessen Lage im Raum berechnet werden, die zweidimensional durch die Range- bzw. Azimut-Zeitkoordinaten gegeben ist. Durch die Berücksichtigung der Höhe lässt sich schließlich jedes Pixel dreidimensional festlegen. Abbildung 3-32 verdeutlicht den Sachverhalt, indem durch die Kenntnis der Aufnahmeposition \vec{S} , der Schrägentfernung \vec{r} und der Ellipsoidhöhe h die Lage \vec{P} des Bildpunktes über einem Bezugsellipsoid bestimmt wird [Schwäbisch95].

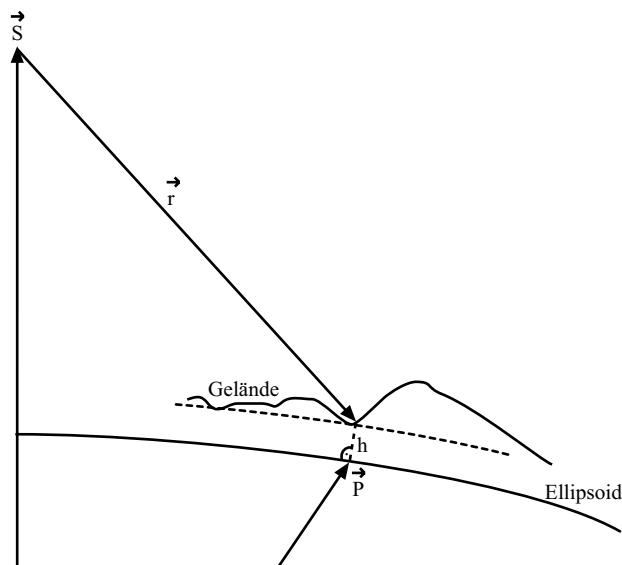


Abbildung 3-32. Prinzip der Geokodierung nach [Schwäbisch95, S. 81].

Nachdem die dreidimensionale Lage der Punkte im Raum über dem Bezugsellipsoiden berechnet worden ist, lassen sich diese in die gewählte Kartenprojektion transformieren. Dies geschieht entweder mit einer Bild-zu-Objekt-Transformation oder der hierzu inversen Methode einer Objekt-zu-Bild-Transformation. Im ersten Verfahren wird für jeden Bildpunkt die zugehörige Lage im Objektraum gesucht, wobei eine Menge unregelmäßig ver-

teiler Bildpunkte entsteht, die mittels Triangulation, in eine flächenhafte Beschreibung der Geländehöhen führt. Im zweiten Verfahren wird für jeden Objektpunkt die Aufnahme-position gesucht, um dieser dann den entsprechenden Grauwert zuweisen zu können. Hier können die Abtastintervalle bzw. die Matrix des geokodierten Bildes vorgegeben werden, was im Gegensatz zum ersten Fall die flächenhafte Beschreibung der Geländehöhen vereinfacht, da die einfachen und schnellen Interpolationsverfahren der digitalen Bildverarbeitung diese Anordnung in Rasterform erfordern [Schwäbisch95]. Das in einer bestimmten Kartenprojektion vorliegende DHM kann nun mit Hilfe bereits vorhandener Daten erstellt, mit gleichen oder anderen Erfassungsmethoden verglichen und validiert werden.

4 Das AeS-1 InSAR-System

Alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Radardaten wurden mit dem AeS-1 InSAR-System erfasst. Dieses flugzeuggetragene, hochauflösende und interferometrische System wurde von der Firma Aero-Sensing Radarsysteme entwickelt und gebaut. Der erste Einsatz des Zwei-Antennen-X-Band-Systems fand im August 1996 statt, und es befindet sich seit Oktober des gleichen Jahres im operationellen Einsatz. Im Frühjahr 1998 wurden dann erste interferometrische Aufnahmen mit dem P-Band [Schwäbisch99b] gemacht, das seit Herbst 2000 auch vollpolarimetrisch betrieben wird. Zu erwähnen ist speziell die Dreiantennenkonfiguration des X-Bandes, die erstmals im Herbst 1999 zum Einsatz kam. Hierbei wird gleichzeitig mit verschiedenen Basislinien aufgenommen, was eine Verbesserung der Höhenmodell-Qualität nach sich zieht. Tabelle 4-1 fasst die wichtigsten Parameter des Systems zusammen [Wimmer00]. Bereits 1992 ist das enorme kartographische Potential des P-Bandes für Gebirgsareale von Manfred Buchroithner [Buchroithner92] und [Papathanassiou93] erwähnt worden.

Tabelle 4-1. Wichtige Systemparameter des AeS-1 InSAR-Systems.

	X-Band	P-Band
Frequenz	9.35 - 9.75 GHz	380 - 450 MHz
Systembandbreite	400 MHz	70 MHz
PRF	bis 16 KHz	bis 16 KHz
Polarisation	HH	HH, VV, VH, HV
Leistung	2.5 kW	2.0 kW
Pulslänge	2.6 μ s	2.6 μ s
Basislinie	0.6 bzw. 2.4 m Single Pass	25 - 50 m Repeat Pass
Blickwinkel im mittleren Entfernungsbereich	45°	45°
Streifenbreite	1 - 15 km	1 - 15 km
Bodenauflösung Azimut \times Range	bis zu 0, 5m \times 0, 5m	bis zu 0, 7m \times 1, 5m
Höhengenauigkeit	bis 0.05 m	bis 1.0 m
Fluggeschwindigkeit	50 - 200 m/s	70 - 120 m/s
Flughöhe	500 - 9000 m	500 - 7000 m

Das gesamte System setzt sich aus einem Boden- und einem Flugsegment zusammen, deren einzelne Komponenten im Folgenden näher beschrieben werden [Schwäbisch99a].

- Das **Bodensegment** ist in nachstehend aufgeführte Subsysteme untergliedert.

Vor einer Befliegung erfolgt in der *Flugplanung* die Festlegung sowohl der Koordinaten des zu befliegenden Gebietes und der einzelnen Tracks als auch die Einstellung der Radarparameter, wie z.B. der Auflösung.

Nach der Befliegung findet die Übertragung der Radarrohdaten im *Transkriptionssystem* auf Digital Linear Tapes (DLT) mit einer Speicherkapazität von 35 GBytes statt. In einem weiteren Schritt erfolgt die Prozessierung der D-GPS/INS-Daten des Fluges, um diese dann den entsprechenden Rohdaten zuzuordnen.

Bei der *InSAR-Prozessierung* werden die Rohdaten zunächst vom Band gelesen und interferometrisch prozessiert, um dann die Resultate schließlich auf DLT-Band bzw. Festplatte zu schreiben. Dies wird mit einem PC-Cluster, der durch ein schnelles Ethernet-Netzwerk verbunden ist, realisiert.

Die *Archivierung* der auf DLT-Tapes geschriebenen Rohdaten und Resultate wird mit Hilfe einer Datenbank, die eine hochentwickelte Benutzerschnittstelle zur Prozesssteuerung enthält, kontrolliert.

Die *GPS-Bodenstation* besteht aus einem leistungsstarken GPS-Empfänger, der mit dem Flug-Kontrollsystem verbunden ist und somit eine kinematische Echtzeit-D-GPS-Führung während des Fluges ermöglicht. Die empfangenen und aufgezeichneten Daten sind zusätzlich für eine hochgenaue Off-Line-Prozessierung der Flugzeugdaten von großem Nutzen.

- Das **Flugsegment**, das üblicherweise von einer Rockwell Air Commander getragen wird, besteht aus folgenden Subsystemen.

Die *Antennen* haben ein Ausmaß von $36 \times 13 \times 15$ cm bzw. $33 \times 81 \times 48$ cm in Breite, Höhe und Tiefe für des X- bzw. P-Band und sind leicht am Flugzeug zu installieren. Der alternierende Wechsel zwischen Sendung und Empfang der Antennen im Mikrosekundenbereich wird von einem Schalter gesteuert.

Mit einem *Sender/Empfänger* werden die Signale übertragen und empfangen; dabei kommen ein digitaler Chirp Generator und eine Wanderfeldröhre zur Anwendung. Hochgeschwindigkeitszirkulatoren ermöglichen hier bis zu einer Pulswiederholfrequenz (PRF) von 16 kHz eine volle Interferometrieleistung.

Ein *Steuerungsrechner* mit Festplatteneinheit und Zeitgeber kontrolliert den Sender/Empfänger und wird selbst wieder vom Flug-Kontrollsystem geregelt. Die maximale Aufnahmezeit für jede der drei 144 GByte fassenden Festplatten beträgt 32 Mbyte in einer Sekunde.

Das *Flug-Führungssystem* basiert auf dem schon erwähnten kinematischen Echtzeit-D-GPS, das mit einem Inertial Navigation System (INS) gekoppelt ist. Auf einem Display werden der nominelle Flugweg, dem der Pilot folgt, und die Abweichung davon angezeigt. Die Position des Flugzeuges ist in Echtzeit mit einer absoluten Genauigkeit von 1 m gegeben und erlaubt so die Einhaltung des nominellen Flugweges mit einer Abweichung unter 10 m.



Abbildung 4-1. X-Band-Antennen.



Abbildung 4-2. AeS-1 Flugsegment.

Eine hochgenaue interferometrische Prozessierung wird durch drei Eigenschaften des Systems garantiert [Wimmer00]:

Geringes Phasenrauschen: Das Phasenrauschen hat seine Hauptursachen in internen Verzerrungen des Radars sowie im thermischen Rauschen. Die durch stationäre Messungen ermittelten internen Verzerrungen des AeS-1 betragen in der Standardabweichung 0.5° . Der thermische Rauschanteil ist durch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) bestimmt, welches nach einer Konfiguration 30dB beträgt und so zu einem Rauschen von 5.5° in der interferometrischen Phase führt.

Genauigkeit der Basislinie: Für die Vermessung der Basislinie wird die Position der Phasenzentren an den Antennen benötigt. Das Messzentrum der INS, worin der Ursprung des Koordinatensystems für sämtliche Positionsdaten liegt, ist mittels Theodolit auf 0.1 mm Genauigkeit in der Lage und auf 0.01° in der Achsausrichtung vermessen worden. Die Bestimmung der Basislinie zwischen den Antennen und der INS, ebenfalls mit Hilfe eines Theodoliten, ergab eine Genauigkeit von 0.1 mm.

Genaue Navigationsdaten: Zur genauen Bestimmung der Antennenausrichtung während eines Fluges dienen die gemessenen Positionen und Rotationen der gesamten Antennenstruktur. Dazu wird eine Kombination aus INS- und GPS-Daten verwendet. Unter Nutzung zweier GPS-Bodenstationen und einer sowohl differenziellen als auch kohärenten Prozessierung kann bei einer günstigen Satellitenkonstellation und einem Abstand unter 50 km zwischen Flugzeug und Bodenstation eine absolute Genauigkeit von 3 cm erreicht werden. Nach der Verrechnung beider Datentypen ergeben die absoluten Genauigkeiten bezogen auf das Messzentrum Werte von 3 cm bei den Positionsdaten und 0.003° bei den Rotationsdaten. Unter Einbeziehung mehrerer Corner-Reflektoren bei der Optimierung des Phasenverlaufes lässt sich die absolute auf die relative Winkelgenauigkeit, die bei 0.0003° liegt, reduzieren .

5 Beschreibung der Testgebiete

Untersuchungsgegenstand der Arbeit ist es, festzustellen in welchem Maße in der Hochgebirgskartographie mit dem Einsatz von InSAR-Daten als originäre und einzige Erfassungsmethode für die Kartenerstellung ein neuer Weg beschritten werden kann. Dies soll anhand von drei Testgebieten, dem Edelsberggebiet in den Allgäuer Alpen und der Silvretta- bzw. Verwallgruppe in den Zentralalpen, untersucht werden. Abbildung 5-1 skizziert die geographische Lage der Gebiete, die im folgenden hinsichtlich ihrer jeweiligen Ausdehnung, Geologie, Geomorphologie und Vegetation beschrieben werden.

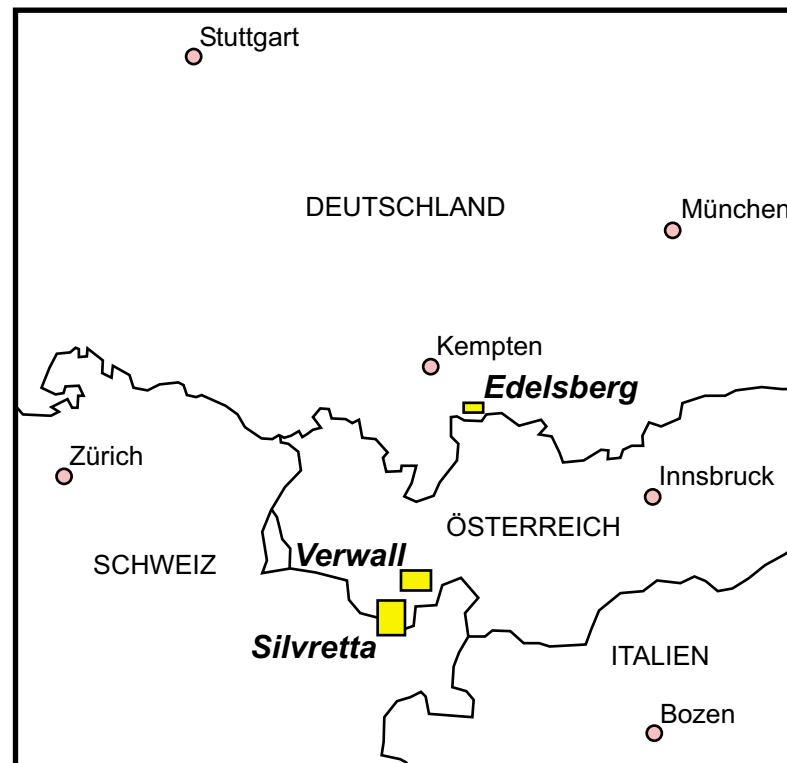


Abbildung 5-1. Geographische Lage der Testgebiete.

5.1 Edelsberg

Das Edelsberggebiet [Hofmann70], dessen geographische Lage in Abbildung 5-2 umrissen ist, befindet sich westlich von Pfronten in den Allgäuer Alpen und ist von München aus über Landsberg und Marktoberdorf zu erreichen. Das Untersuchungsgebiet beinhaltet den ganzen Edelsbergstock und wird im Osten von Pfronten und im Süden vom Kienberg begrenzt. Die Nordgrenze verläuft auf der Höhe von Kappel, und im Westen markiert die Linie zwischen Langenschwand und Reuter Wanne die Grenze. Die Besonderheit des Testgebietes ist es, dass die an dieser Stelle etwa 2-3 km breite Flyschzone des Edelsberges im Süden von den nördlichen Kalkalpen bzw. im Norden vom Helvetikum und somit von andersartigen geologischen Einheiten, die im Folgenden näher beschrieben werden, flankiert ist.

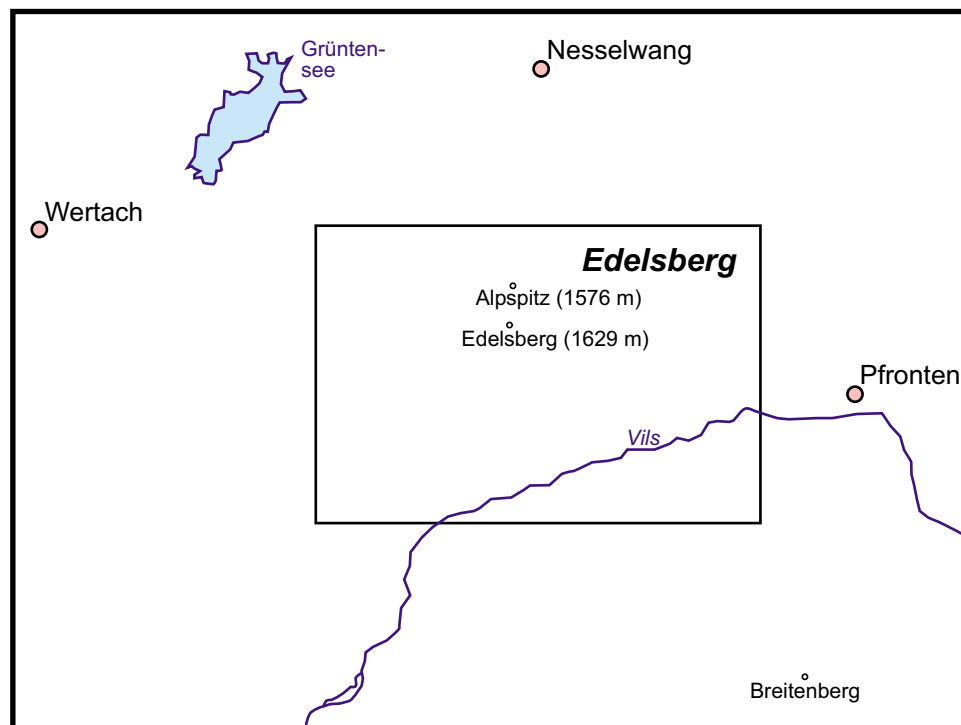


Abbildung 5-2. Geographische Lage des Testgebietes Edelsberg.

- **Flyschzone**

Die Flyschzone des Edelsbergs (1629 m) [Hofmann70] ist in erster Linie aus Sandsteinen mit kalkigen Bindemitteln sowie Tonschiefer und Tonsteinen mit wechselndem Kalkgehalt aufgebaut. Die drei Gesteinsarten, die gut geschichtet, plattig oder bankig sind, bilden entweder einheitlich geschlossene Schichtserien oder können miteinander wechsellagern.

Die Flyschzone, die charakteristisch für Randzonen alpiner Faltengebirge ist [Leser93a], bedingt durch die petrographische Zusammensetzung der Flyschgesteine zunächst weiche Mittelgebirgsformen. Die höchsten Gebiete des Edelsbergs sind aus leicht verwitternden Sandsteinen aufgebaut, die einerseits zu gerundeten Geländeformen ohne Schrofen oder Felsklippen führen und andererseits keine ausgesprochenen Steilhänge bilden. An ausreichend flachen Geländestellen kommt es zu Vernässung und Moorbildung. Die trotz eingeschalteter harter Kieselgesteinsbänke wenig standfesten Tonschiefer verursachen Geländedepressionen oder Verflachungen und führen aufgrund ihrer Wasserundurchlässigkeit zu Bodennässe, Erdschlipfen oder größeren Hangrutschungen. Auf dem Grundwasserstauer liegen häufig Moore und es kommt, besonders an der Grenze zum Sandstein, zu zahlreichen Quellaustritten. Die Neigung zu rascher Verwitterung und die geringe Wasserdurchlässigkeit der Flyschgesteine führen zu intensiver Tiefenerosion und somit zu einem scharfen Einschneiden der Oberflächengewässer in die Gesteine. Diese sind in den bis zu 100 Metern tief eingerissenen Schluchten, in denen schroffe Felsen, Wasserfälle und zu Rutschungen neigende schroffe Hänge zu Tage treten, bloßgelegt.

- **Nordrand der Kalkalpen**

Im Süden des Edelsbergs verläuft das Vilstal als Grenze zwischen der Flyschzone und dem Nordrand der Kalkalpen [Hofmann70], der durch den Kienberg repräsentiert wird. Dieser ist im höheren und auch steileren Teil aus wechselnd kalkigem Hauptdolomit bzw. im unteren Berghang aus bunten Kalkkonglomeraten, Sandsteinen und Kalkmergeln aufgebaut. Der Kienberg ist durch eine dichte Bewaldung, einige Wiesenflächen sowie Felswände gekennzeichnet. Mit 1536 m ist er etwas niedriger als der Edelsberg, weist jedoch schärfere Formen als jener auf und ist beträchtlich steiler.

- **Helvetikum**

Die Grenze der Flyschzone nach Norden zum Helvetikum [Hofmann70] ist ebenso wie die Südgrenze durch strukturell vorgezeichnete Längstäler markiert, die aber weit weniger geradlinig sind als das Vilstal im Süden. Das Helvetikum ist aus Schratte- und Seewerkalk, denen Sandsteine, Mergel- und Tonschieferserien zwischengeschaltet sind, aufgebaut. Das Vorgebirge mit dem Alpstiz (1575 m) als höchstem Gipfel ist ebenfalls niedriger als der Edelsberg und neben Wiesen und bewaldeten Gebieten durch scharfe Formen wie Felswände, Grate und schroffe Gipfel gekennzeichnet.

Das unterschiedliche Oberflächenbild, das die Abtragungsformen der jeweiligen tektonischen Strukturen widerspiegelt, wird örtlich von eiszeitlicher Moränenbildung bzw. postglazialer Schuttüberdeckung verwischt [Hofmann70]. Das Vilstal war in der jüngsten Eiszeit zwischen 1300 m im Westen und 1250 m im Osten von einem Gletscher erfüllt. Seine Grundmoränen verhüllen dabei breite Taldepressionen im Bereich der Vils und im Osten des Edelsbergs. Außerdem bedingte er einen Seitenmoränenwall am Südhang des Edelsbergs im Almgelände "Am Grund" und eine Trogschulter zwischen Eibenmoos und Rölfleuter Berg. Das Kar auf der Nordostseite der Reuter Wanne ist durch Lokalvergletscherung verursacht, welche evtl. auch formgebend für andere, ähnlich hoch gelegene nach Ost bzw. Nordost exponierte Hohlformen war. Schutthalden und Bergstürze, die bezeichnend für harte Kalkgesteine sind, finden sich demzufolge nicht im Flysch, sondern nur in den Felsgebieten der Reuter Wanne, des Alpsitz' und des Kienbergs.

Die Vegetation des gesamten Gebietes ist sowohl von Wiesen und Weiden als auch von Bergmischwäldern mit hauptsächlich Buchen, Tannen, Fichten, aber auch Bergahorn und Grauerle geprägt. Bei den Wäldern dominiert in den tieferen Bereichen die Buche, während in den höheren Regionen die Fichte vorherrscht.



Abbildung 5-3. Kienberg, Vilstal und Edelsberg.

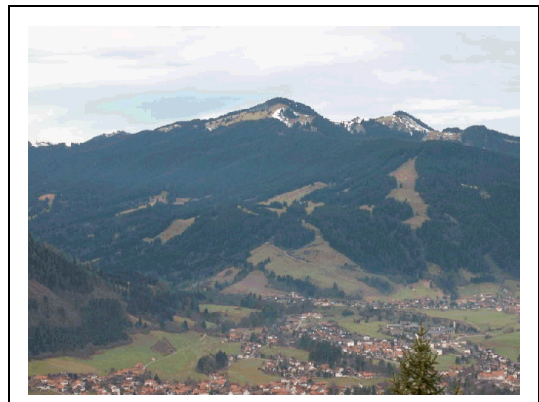


Abbildung 5-4. Edelsberg und Alpsitz.

5.2 Silvrettagruppe

Die Silvrettagruppe befindet sich in den Zentralalpen im Grenzgebiet der österreichischen Bundesländer Tirol und Vorarlberg sowie des Schweizer Kantons Graubünden. Von Innsbruck aus ist das Gebiet durch das Paznauntal über die Silvrettahochalpenstraße zur Bielerhöhe zu erreichen. Die Hochalpenstraße führt weiter durch das Montafon in Richtung Bludenz. Das Untersuchungsgebiet der Silvrettagruppe [AVa], dessen geographische Lage in Abbildung 5-5 skizziert ist, erstreckt sich ungefähr vom Vermunt-Stausee im Nordwesten über die Bieler Spitze bis zum Jamtal im Nordosten. Richtung Süden folgt die Begrenzung dem Jamtal und dem Jamtalferner bis zum Fil da Tuoi. Von dort aus geht es Richtung Westen über den Piz Tiatscha zum Vernela-Paß und über die Verstandklaköpfe und dem Großlitzner zurück zum Vermunt-Stausee als Ausgangspunkt. Die höchsten bzw. bekanntesten Gipfel des Testgebietes sind der Piz Buin (3312 m), das Silvrettahorn (3244 m) und die Dreiländerspitze (3197 m); die weiteren Gipfel sind zwischen 2500 und 3200 m hoch. Von den zahlreichen Gletschern im Testgebiet seien der Silvretta-, Ochsentaler- und Vermunt-Gletscher bzw. der Jamtal-Ferner erwähnt.

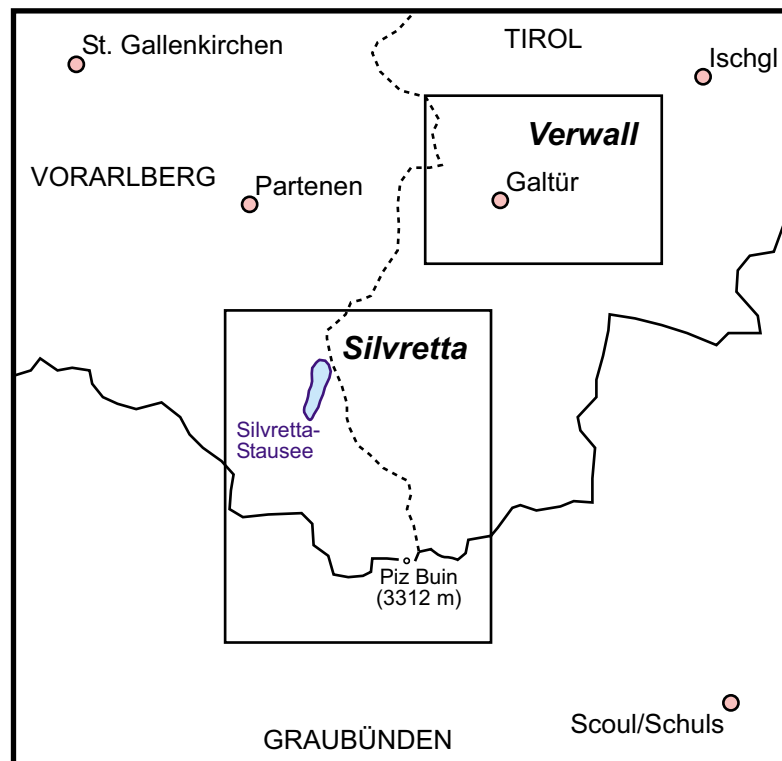


Abbildung 5-5. Geographische Lage der Testgebiete Silvretta und Verwall.

Die Silvrettagruppe ist aus der Silvrettadecke oder dem Silvrettakristallin aufgebaut [HGEX97], [Richter78] und [Staub71], das sich im wesentlichen aus Gneisen zusammensetzt. Hierbei finden sich sowohl hellere Orthogneise wie z. B. Granitgneise, die magmatischen Ursprungs sind, als auch dunklere Paragneise sedimentogenen Ursprungs wie z.B. dunkel- und hellgrün gebänderte Hornblendgneise oder glimmerreiche Schiefergneise.

Die Geomorphologie [HGEX97] des Gebietes ist zum einem von der Zusammensetzung der Gesteine und zum anderen durch die starke Vergletscherung gekennzeichnet. Kleinere Reliefelemente wie Furchen, eingeschnittene Bäche, enge Schluchten, kleine Hügel oder steile Wände treten aufgrund der vorkommenden Gesteine zurück. Andererseits treten infolge der Brüchigkeit der Gesteine große Geröll- und Schutthalden oder auch Trümmfelder auf. Die Silvretta ist ein Felsgebirge mit alpinem Formenschatz und Gipfelfluren von 2500 bis 3300 m, das am Rande der Gruppe starke Erosionseinschnitte aufweist. Die Vergletscherung mit Firnfeld- und Kargletschern sowie kleinen Eisfeldern auf Karen und Gehängen führt zu einem reichhaltigen glazialen Formenschatz. Dieser wird durch glazial-erosive bzw. fluvioglaziale Prozesse gebildet und findet sich in Formen wie Trogtälern oder den Formenkomplexen der glazialen Serie [Leser93a], [Schulz95] wieder.

Auf den silikatischen Gesteinen des Silvrettagebietes bilden sich saure bis sehr saure Böden wie Podsole, Ranker und Braunerden sowie in der nivalen Stufe Lithosole. In den verschiedenen Höhenstufen besteht die Vegetation aus Bergwäldern, subalpinen und alpinen Zwergstrauchheiden sowie alpinem Rasen, die schließlich von Matten-, Moos- und Flechtengesellschaften abgelöst werden. Außerdem ist die Silvrettagruppe reich an Hochgebirgsflachmooren.



Abbildung 5-6. Piz Buin-Silvretta.



Abbildung 5-7. Gipfelflur in der Silvretta.

5.3 Verwallgruppe

Die Verwallgruppe befindet sich etwas nördlich der Silvretta-Gruppe ebenfalls in den Zentralalpen. Die Grenze zwischen den österreichischen Bundesländern Tirol und Vorarlberg verläuft längs über die Gruppe, die sich einerseits von Landeck aus durch das Stanzer- bzw. Klostertal nach Bludenz, andererseits von dort aus durch das Montafon über die Silvretta-Hochalpenstraße weiter durch das Paznauntal umfahren lässt. Das Untersuchungsgebiet der Verwallgruppe [AVb], dessen geographische Lage ebenfalls der Abbildung 5-5 zu entnehmen ist, tangiert im Süden die Ausläufer der Silvretta-Gruppe auf der Linie vom Dreiköpfel im Osten über den Predigberg bis hin zur Gorfenspitze im Westen. Von hier geht es über den Fädner Spitz zum Ochsental nach Norden und dann ostwärts über die Fasulzwillinge und dem Grauen Kopf bis hin zum Paznauer Kar. Nach Süden vervollständigt die Linie ausgehend vom Paznauer Kar über Mathon bis wiederum zum Dreiköpfel das Gebiet. Im Testgebiet, das als einzigen Gletscher den Fasulferner beinhaltet, erreichen die Gipfelfluren eine Höhe zwischen 2400 und 2850 m. Die höchsten Gipfel der Verwallgruppe sind der Hohe Riffler (3168 m), die Kuchenspitze (3148 m), die Küchlspitze (3147 m) und der Pat-teriol (3056 m), die aber alle außerhalb des beflogenen Gebietes liegen.

Das Hochkristallin der Verwallgruppe gehört geologisch zur Silvrettadecke [Staub71] und ist demzufolge aus eben diesen Kristallingesteinen aufgebaut.

Geomorphologie und Vegetation sind aufgrund der räumlichen Nähe und des gleichen geologischen Aufbaues ähnlich der Silvretta. Die Gipfelfluren der im Vergleich zur Silvretta-Gruppe nicht sehr stark vergletscherten Verwallgruppe erreichen Höhen zwischen 2400 und 3200 m.



Abbildung 5-8. Grieskogel-Verwallgruppe.

6 Datenaufbereitung

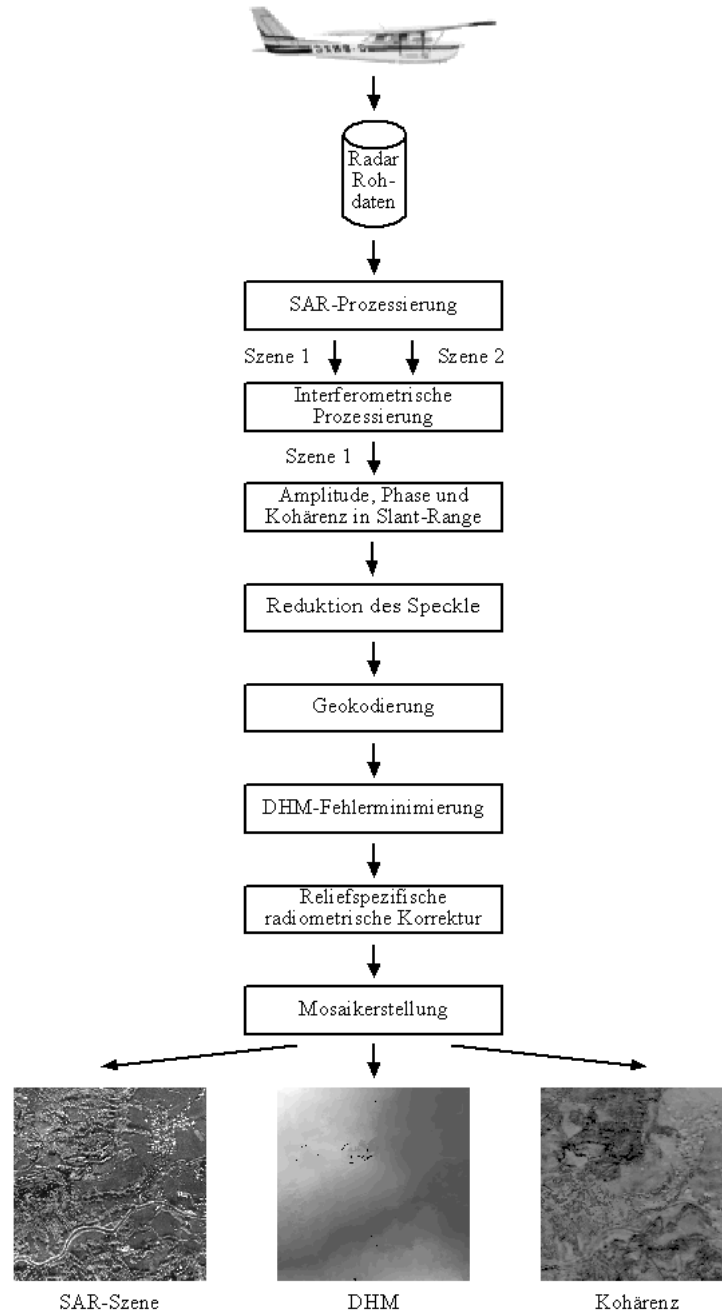


Abbildung 6-1. Prozesskette der Datenaufbereitung.

Die über den jeweiligen Testgebieten erfolgten Radar-Rohdaten stehen nun am Anfang einer Prozesskette, die bis hin zur Karte führt. Diese Kette lässt sich in die Datenaufbereitung, die Informationsextraktion und die daraus folgende Bildung eines InSAR-Modells untergliedern. Die Güte der aus dem InSAR-Modell generierten kartographischen Endprodukte hängt folglich in starkem Maße von einer möglichst optimalen Datenaufbereitung bzw. Informationsextraktion ab. Abbildung 6-1 zeigt die einzelnen Schritte der Datenaufbereitung, die mit der Datenerfassung beginnt, alle für die Arbeit notwendigen Processing- und Postprocessing- Schritte beinhaltet und mit verschiedenen Mosaikerstellungsvorschlägen für die SAR-Szene, das digitale Höhenmodell (DHM) und die Kohärenzdarstellung des jeweiligen Testgebietes endet.

6.1 Datenerfassung

In der Tabelle 6-1 sind die wichtigsten Flug- und Radarparameter der Befliegungen über den Testgebieten zusammengestellt.

Tabelle 6-1. Wichtige Flug- und Radarparameter der Testbefliegungen.

	Edelsberg	Verwallgruppe	Silvrettagruppe
Datum	05. 05. 1998	03. 05. 1999	03. 05. 1999
Zeit	12:21 - 14:20 UTC	7:35 - 8:03 UTC	9:02 - 10:15 UTC
Wetterbedingung	bewölkt	sonnig	sonnig
Mittlere Flughöhe	3092 m	6041 m	6048 m
Mittlere Fluggeschwindigkeit	82 m/s	118 m/s	118 m/s
Anzahl der Tracks	6	5	10
Streifenbreite	2 km	4 km	4 km
Bandbreite	400 MHz	200 MHz	200 MHz
Wellenlänge	3,107 cm	3,107 cm	3,107 cm
Polarisation	HH	HH	HH
SAR-Datentyp	Amplitude	Amplitude	Amplitude
Anzahl der Looks	10	10	20
PRF	7599 Hz	7788 Hz	7843 Hz
Pixel Spacing Range × Azimut	0, 375 × 0, 617 m	1, 500 × 1, 930 m	3, 000 × 3, 890 m
Einfallswinkel	45°	45°	45°

Im Folgenden werden die einzelnen Aufnahmekonfigurationen für die jeweiligen Testgebiete näher erläutert.

- **Edelsberg**

Der Edelsberg wurde, wie in Abbildung 6-2 ersichtlich, in sechs je 2 km breiten Tracks erfasst, wobei die zur späteren Geokodierung genutzten Corner-Reflektoren in Track 4 liegen. Die Beleuchtung des gesamten Gebiets erfolgte dabei aus zwei verschiedenen Richtungen. Sowohl die drei Tracks der West-Ost Richtung als auch die der Ost-West Richtung überlappen sich jeweils um 50%. Im Idealfall liegen also vier verschiedene Informationen eines Teilgebietes vor. Die Beleuchtung aus verschiedenen Richtungen und auch die Überlappung einzelner Tracks dienen dazu, Reliefeinflüsse auf die Aufnahmegeometrie wie Shadow oder Layover zu minimieren und somit so viele Informationen wie möglich für die weitere Prozesskette zu erhalten. Die strenge Ost-West-bzw. West-Ost-Befliegungsrichtung ist aufgrund der Streichrichtung des Edelsbergs und seiner angrenzenden Berge sinnvoll ausgewählt. Das ca. 54 km² große Gebiet war bis auf kleine Flächen in den Gipfelregionen zum Befliegungszeitpunkt schneefrei.

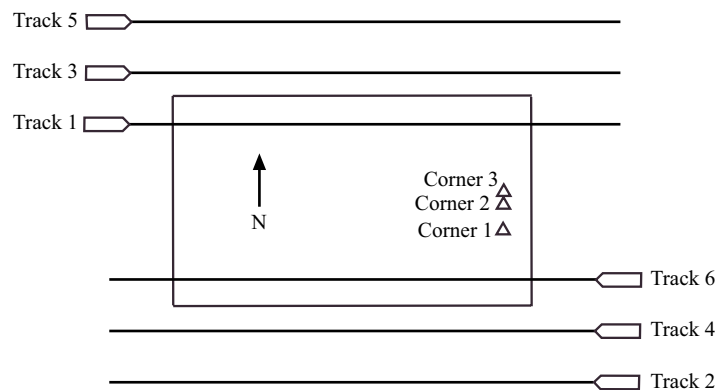


Abbildung 6-2. Flugplanung Edelsberg.

- **Verwallgruppe**

Das Gebiet der Verwallgruppe ist aus denselben Gründen wie der Edelsberg aus zwei verschiedenen Richtungen beleuchtet und in fünf je 4 km breiten Tracks erfasst worden (siehe dazu Abbildung 6-3). Bedingt durch die Streichrichtung der Gipfelfluren wurde wiederum eine strenge West-Ost- bzw. Ost-West-Befliegungsrichtung gewählt, in der sich die jeweiligen Tracks um 50 % überlappen. Der Track 2 dient in dem 89 km² großen Ausschnitt der Verwallgruppe, die am Tag der Befliegung bis in mittlere Hanglagen voll und in Tallagen teilweise schneebedeckt war, als Cornertrack. Aufgrund der Gebietsgröße wurde eine Trackbreite von 4 km gewählt, was in diesem Fall zu einer Bandbreite von 200 MHz führt. Diese Bandbreite, die halb so groß wie die der Aufnahme des Edelsbergs ist, bedingt eine zweifache Verschlechterung der Entfernungsauflösung, und zwar von 0.375 m auf 0.75 m.

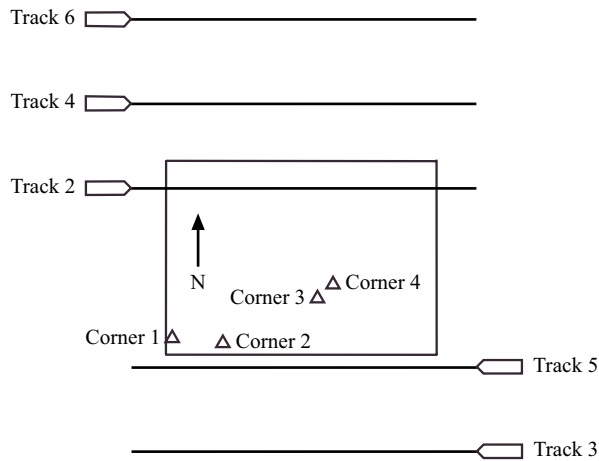


Abbildung 6-3. Flugplanung Verwallgruppe.

- **Silvrettagruppe**

Für das 287 km² große Teilgebiet der Silvrettagruppe gelten in den Punkten Band- bzw. Streifenbreite und zweimaliger Beleuchtung mit entsprechender Überlappung einzelner Tracks dieselben Voraussetzungen wie für die Verwallgruppe. Allerdings verläuft hier die Befliegungsrichtung aufgrund der Streichrichtung der meisten Gipfelfluren von Nord nach Süd bzw. von Süd nach Nord. Das Gebiet war bei der Datenaufnahme nahezu vollständig schneebedeckt und daher mit dem PKW nicht zugänglich. Die Corner-Reflektoren wurden daher im Raum Galtür aufgestellt und von einem zusätzlichen in Abbildung 6-4 nicht aufgeführten Track erfasst.

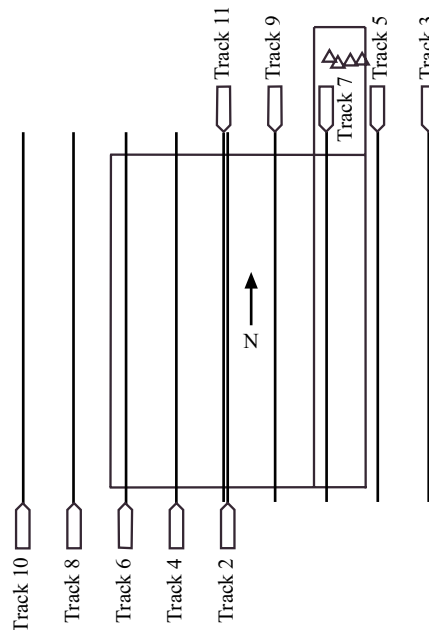


Abbildung 6-4. Flugplanung Silvrettagruppe.

6.2 InSAR-Prozessierung

Die interferometrische Prozessierung folgt bis zur Stufe vor dem Phase Unwrapping der relativen Phase grundsätzlich den bereits diskutierten Prinzipien. So wird die Range-Kompression im Frequenzraum unter Nutzung des Sendesignales als Referenzfunktion durchgeführt, während die Azimut-Kompression ein hybrider Algorithmus aus Korrelationen im Frequenzraum und Faltungen im Zeitbereich ist [Wimmer00]. Für die Bewegungskompensation bzw. Koregistrierung der Daten beider Antennen ist bei der InSAR-Prozessierung die Entscheidung zu treffen, ob diese mittels eines Referenz-DHMs oder der mittleren Geländehöhe eines Gebietes durchgeführt wird. Das Referenz-DHM beschreibt die gesamte Höhendynamik eines Gebietes, wohingegen die mittlere Geländehöhe einem Höhenmodell mit nur einem für das ganze Gebiet durchgehend konstanten Wert entspricht. Die Wahl der mittleren Geländehöhe richtet sich im allgemeinen nach der durchschnittlichen Geländehöhe der Corner-Reflektoren. Für die Verwallgruppe beispielsweise liegen diese im Raum Galtür bei ca. 1600 m über NN. Die höchsten Gipfel in diesem Gebiet weisen jedoch Höhen bis ca. 2900 m auf, so dass eine maximale Differenz von 1300 m zwischen realem Gelände und der gewählten mittleren Geländehöhe besteht. Ein Teil der Bewegungskompensation besteht nun aus der Transformation der realen Flugbewegungen auf den für die Prozessierung angenommenen idealen Flugtrack. Die Genauigkeit der Transformation über jedem einzelnen Geländepunkt hängt hierbei mit der Kenntnis seiner Höhe zusammen. Je genauer die wahre Höhe eines Punktes vorliegt, desto exakter ist die Transformation auf den idealen Flugtrack.

Des weiteren reduziert sich der interferometrische Fehler, der durch die räumliche Verteilung beider Antennen bedingt ist, durch eine präzisere Kenntnis der jeweiligen Geländepunkthöhen. Wird mit der mittleren Geländehöhe prozessiert, ist die Transformation nur für die Geländepunkte exakt, die tatsächlich auf dieser Höhe liegen. Alle anderen Punkte weisen demzufolge einen mehr oder weniger großen Fehler auf. Diese können unter Verwendung eines Referenz-DHMs bei der Prozessierung minimiert werden, da die Geländehöhen selbst bei qualitativ schlechteren Referenzen in Gebieten mit hoher Reliefenergie noch wesentlich genauer sind als die mittlere Geländehöhe. Die berichtigte Bewegungskompensation führt schließlich zu einer Verbesserung der Daten hinsichtlich ihrer Schärfe und auch ihrer Auflösung. Die Güte der theoretisch ermittelten Koregistrierung wird ebenfalls erhöht, da durch eine genauere Kenntnis der Geländepositionen die einzelnen Verschiebungsparameter präziser geschätzt werden können. Das Referenz-DHM stammt dabei entweder aus anderen Datenquellen wie bei der Prozessierung des Edelsberges oder es wird aus den Daten selbst erstellt, wie dies bei der Prozessierung der Silvretta- bzw. Verwallgruppe der Fall war. Für den letzteren Fall werden die Daten zunächst mit der mittleren Geländehöhe prozessiert, woraus ein DHM in erster Näherung erstellt wird. Hierbei liegt es auf der Hand, dass aus oben genannten Gründen selbst eine nochmalige Prozessierung mit dem genäherten DHM bereits eine entscheidende Verbesserung gegenüber der Prozessierung mit der mittleren Geländehöhe bringt.

Nach der Interferogrammgenerierung wird die Phase dann mit einem Moving-Average-Fenster gewünschter Größe gefiltert. Der Filterung folgt das Phase Unwrapping mittels eines Region-Growing-Algorithmus, der von einem homogenen Bereich höchster Kohärenz ausgehend die gesamte Phase iterativ unwrappt. Aus soft- und hardwaretechnischen Gründen kann ein ganzer Track, wie in den Abbildungen 6-2 bis 6-4 dargestellt, nicht auf

einmal prozessiert werden. Er wird zunächst in verschiedene Parts aufgeteilt und erst nach der Prozessierung wieder zu einem Track zusammengesetzt. Die Anzahl der Parts eines Tracks ist u.a. von dessen Länge und dem Überlappungsbereich zwischen zwei angrenzenden Parts abhängig. So wird beispielsweise der Corner Track des Edelsberggebietes für die Prozessierung in fünf Parts unterteilt. Nach Abschluss der InSAR-Prozessierung und dem Zusammensetzen der Parts stehen dann sowohl die Bildprodukte der SAR-Szene, der Kohärenz und der ungewrappten relativen Phase in der Slant Range-Geometrie als auch die zu einem Track gehörigen Meta-Daten zur Verfügung.

6.3 Speckle-Filterung

Die Informationsextraktion aus SAR-Bildern, wie beispielsweise eine Bild-Segmentierung oder Klassifikation, wird durch den Speckle-Effekt und die daraus resultierende Bildstatistik erschwert [Buchroithner93] und [Tsilibaris91]. Zur Reduktion des Speckle (speckle-reducing) stehen grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung [Lee94]. Als erste ist dabei die bereits beschriebene Multilook-Bildung während der Prozessierung zu erwähnen. Ein zweiter Weg, den dieser Abschnitt behandelt, ist die Filterung der prozessierten Bilder im Ortsbereich. Die letzte, hier nur angesprochene Möglichkeit kombiniert zur Reduktion des Speckle entweder multitemporale [Huber99], -frequente [Novak90] oder -polarisierte [Lee91] SAR-Szenen.

Der Filterung im Ortsbereich liegt das multiplikative Rauschmodell [Ulaby86], [Huber99] in homogenen Regionen zugrunde, welches besagt, dass der Speckle mit der Intensität zunimmt. Das Modell ist wie folgt definiert:

$$Z = X \cdot V \quad (6-1)$$

mit: Z = beobachtete verrauschte Intensität

X = mittlere Rückstreuung

V = Zufallsvariable der Interferenz

Der Kontrast des Speckle, der ein Maß für dessen Körnigkeit darstellt, wird in homogenen Regionen mittels des bereits definierten Parameters C_{var} beschrieben. Dieser nimmt um so kleinere Werte an, je geringer der Kontrast, also die Wirkung des Speckle ist. Der Parameter C_{var} für ein L-Look-Amplitudenbild kann folgendermaßen, nach bereits erwähnten Formeln, aus dem Bild selbst geschätzt oder aber theoretisch berechnet werden:

$$C_{\text{var}_{\text{AL}}} = \frac{\sqrt{D^2(A_L)}}{E(A_L)} = \sqrt{\frac{L\Gamma^2(L)}{\Gamma^2(L + \frac{1}{2})} - 1} \quad (6-2)$$

Der theoretische Wert für 10 Looks, mit denen der Edelsberg prozessiert wurde, sollte demnach bei 0.159074 liegen. Stichproben in homogenen Gebieten der Edelsbergaufnahme ergaben jedoch Werte um 0.17, was 8.7 Looks entspricht. Diese Differenz ist hauptsächlich mit der Überlappung von Looks, welche die effektive Anzahl der Looks um ca. 10 % verringert [Moreira90], zu begründen, oder die Stichproben sind nicht vollständig homogen und weichen so vom zugrundegelegten Bildmodell ab.

Die Reduktion des Speckle mit Hilfe der Multilook-Bildung geht, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, mit einer gleichzeitigen Verschlechterung der geometrischen Auflösung einher. Das primäre Ziel einer Speckle-Filterung im Ortsbereich ist es daher, den Speckle zu reduzieren, ohne dabei den Informationsgehalt im Bild zu verringern. Im Detail soll ein Speckle-Filter folgende Eigenschaften aufweisen [Lee94]:

- Eine hohe Adaptivität des Filters ist Grundvoraussetzung dafür, dass einerseits homogene Flächen geglättet werden, andererseits Kanten oder Texturen erhalten bleiben.
- Als weitere Anforderung ist die Verbesserung der radiometrischen analog zur Beibehaltung der geometrischen Auflösung zu nennen.
- Die radiometrische Information in homogenen Regionen soll unter gleichzeitiger Glättung der Fläche beibehalten werden. Dies bedeutet, dass der Mittelwert in dieser Region unverändert bleibt, während die Standardabweichung abnimmt. Die Kanten zwischen der homogenen Region und deren Nachbarbereichen sollen in ihrer Schärfe aber bestehen bleiben (edge-preserving).
- In heterogenen Regionen ist es das Ziel, keine allzu großen Variationen herbeizuführen, da diese mit einem Informationsverlust einhergehen. Kanten, Punkte und Linien sollen, ohne geglättet oder verwischt zu werden, weiterbestehen. Der Filter soll daher so konzipiert sein, dass seine Wirkung mit einer zunehmender Heterogenität im Bildbereich zurückgeht.
- Details wie dünne Linien oder Punktziele, die klein aber noch voneinander unterscheidbar sind, sollen beibehalten werden.
- Letztendlich soll der Filter das dem Bild zugrunde liegende multiplikative Rauschmodell berücksichtigen.

Nicht-specklespezifische Filter, wie z.B. der Median- oder Mean-Filter, berücksichtigen das Rauschmodell nicht und reduzieren zudem die geometrische Auflösung stark; sie kommen daher für eine Anwendung nicht in Frage. Stellvertretend für die specklespezifischen Filter, die die oben genannten Forderungen mehr oder weniger erfüllen, wird der für die Arbeit verwendete Refined Lee-Filter [Lee81] im Folgenden näher analysiert. Einen ausführlichen Überblick über die verschiedenen Filter geben u.a. [Holecz93], [Lee94] und [Shi94]. Es sei hier noch auf zwei weitere Filter, die neben dem Refined Lee-Filter häufig zur Anwendung kommen, hingewiesen. Zum einen handelt es sich um den Frost-Filter [Frost82], zum anderen um den Gamma-Gamma-Map-Filter [Lopes93]; beide konnten aufgrund einer bis zum Bearbeitungszeitpunkt nicht fehlerfrei abgeschlossenen Implementierung in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Der Refined Lee-Filter ist ein Algorithmus [Lee81] und [Huber99], der die lokale Statistik mit Mittelwert und Varianz unter Einbeziehung von Informationen über die Richtung von Kanten zur Reduktion des Speckles nutzt. Über das gesamte Bild läuft ein 7×7 Pixel großes Fenster, wobei das zu filternde Pixel in der Mitte des Fensters liegt. Mittels eines Schwellwertes, der auf den Bildgradienten bezüglich neun sich überlappenden 3×3 Pixel großer Fenster angewandt wird, kann eine Kante im Fenster erkannt und gegebenenfalls deren Orientierung bestimmt werden. In einem weiteren Schritt wird berechnet, auf welcher Seite der Kante sich das zu filternde Pixel befindet, und dieses schließlich aufgrund

der lokalen Statistik im in Frage kommenden Teilbereich gefiltert. Dies führt dazu, dass bei der Filterung Kanten und feine Details nicht verschmieren, sondern durch die Reduktion des Rauschens entlang der Kante diese erhalten und bzgl. ihrer Schärfe noch verbessert wird. Um einen visuellen Eindruck von der Wirkung des Filters zu bekommen, stehen sich in den Abbildungen 6-5 und 6-6 eine mit 10 Looks prozessierte ungefilterte bzw. gefilterte Szene gegenüber.

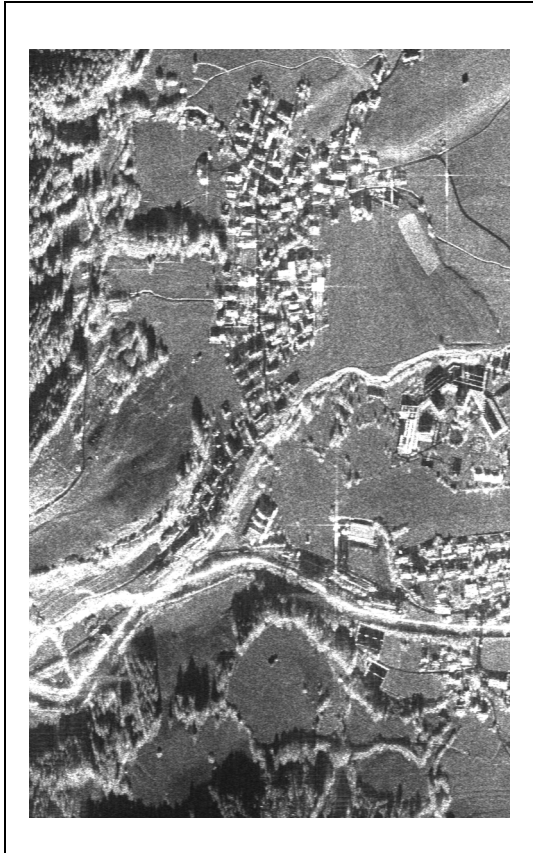


Abbildung 6-5. X-Band-Szene ohne Filter.

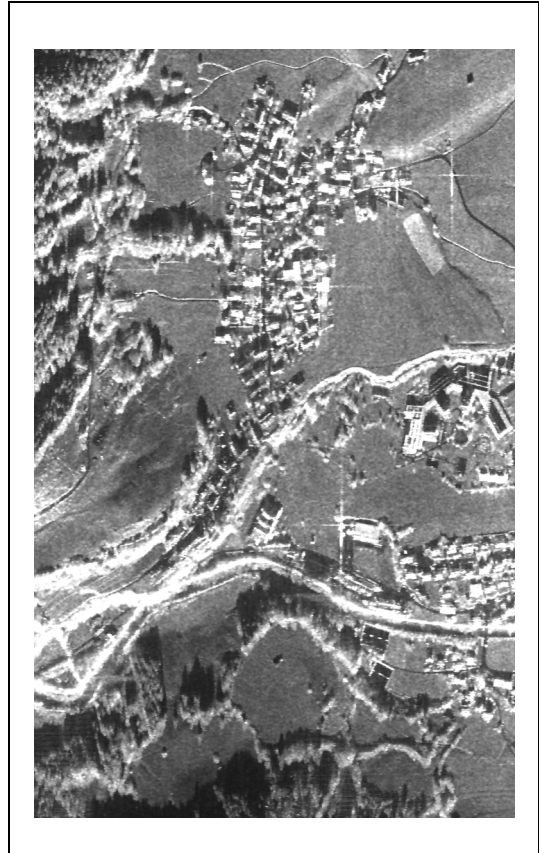


Abbildung 6-6. X-Band-Szene mit Refind Lee-Filter.

Anhand von charakteristischen Szenenausschnitten wird analysiert, ob und inwieweit der Filter den eingangs geforderten Eigenschaften entspricht. Abbildung 6-7 zeigt diese Ausschnitte, die von links nach rechts jeweils eine ungefilterte bzw. eine mit dem Refind Lee-Algorithmus gefilterte Szene einer homogenen offenen Fläche, einer heterogenen Siedlung und einer Kante zwischen zwei homogenen Flächen darstellen.

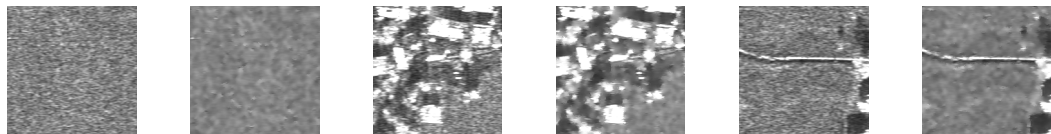


Abbildung 6-7. Szenenausschnitte zur Filteranalyse. V. l. n. r.: Homogene offene Fläche, heterogene Siedlung und Kante zwischen zwei homogenen Flächen.

Tabelle 6-2. Vergleich einer ungefilterten mit einer gefilterten (Refind Lee) homogenen offenen Fläche.

	Ungefiltert	Gefiltert (Refind Lee)
Mittelwert	25.8719	25.8676
Standardabweichung	4.35647	2.11478
C_{var}	0.168386	0.0817541
Anzahl effektiver Looks	9	38

Wie aus der Tabelle 6-2 zu entnehmen, ist in der homogenen offenen Fläche der Mittelwert beider Szenen nahezu identisch, während im gefilterten Ausschnitt die Standardabweichung und somit auch der Parameter C_{var} um etwas mehr als Faktor zwei abnimmt. Daraus lässt sich die theoretische Anzahl von ungefähr 38 Looks für diese Szene ableiten. Die Abbildungen 6-8 und 6-9 des 100×100 Pixel großen Ausschnittes verdeutlichen anhand der Perspektiv-Darstellung der Amplitudenwerte die Glättungswirkung des Filters. Die ungefilterte Szene ist dabei wegen der höheren Standardabweichung sehr viel unruhiger als die gefilterte, die wesentlich glatter und somit in sich homogener ist.

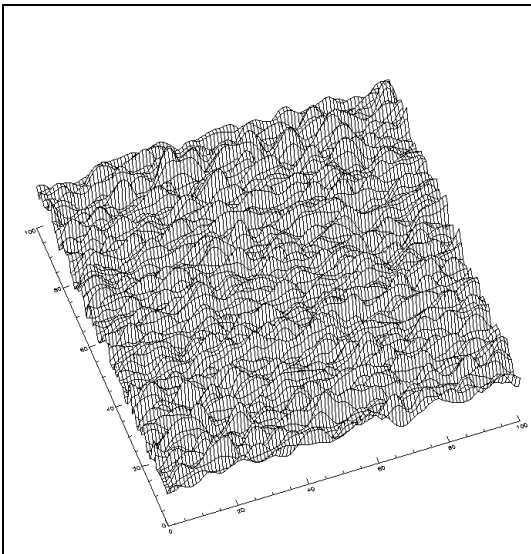


Abbildung 6-8. Perspektiv-Ansicht, ungefilterte Szene.

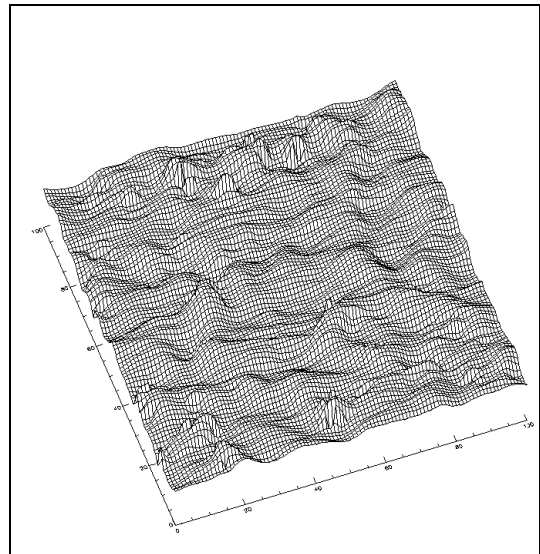


Abbildung 6-9. Perspektiv-Ansicht, gefilterte Szene (Refind Lee).

Die nur unwesentlich verschiedenen Profile durch den heterogenen Siedlungsbereich in Abbildung 6-10 zeigen, dass in diesen Gebieten kaum Informationen verloren gehen und so die Szene nahezu unverändert bleibt. Die Profile in Abbildung 6-11 zeigen nochmals die glättende Wirkung in den homogenen Bereichen bei gleichzeitiger Erhaltung der Kante zwischen diesen Flächen. Die schwarze Profillinie steht jeweils für den ungefilterten, die rote für den gefilterten Szenenausschnitt.

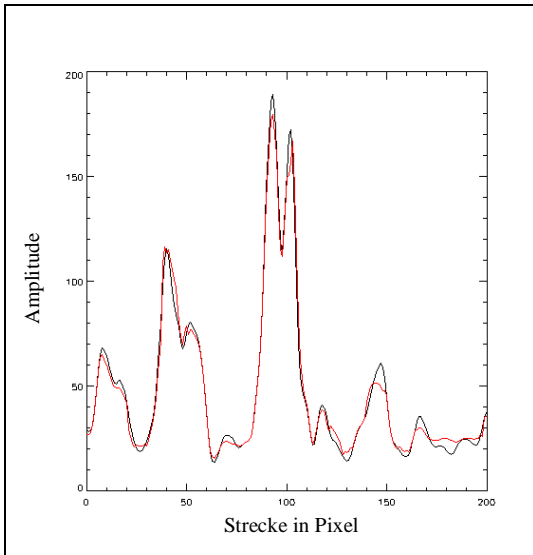


Abbildung 6-10. Profile im heterogenen Bereich einer Siedlungsfläche.

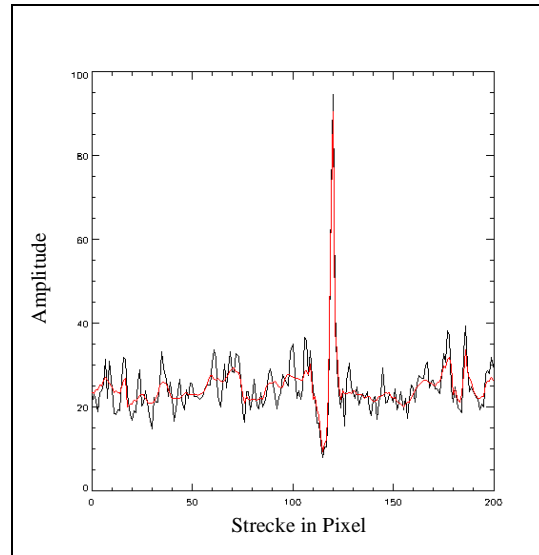


Abbildung 6-11. Profile durch eine Kante zwischen zwei homogenen offenen Flächen.

Die Analyse ergab, dass der Filter den geforderten Eigenschaften im hohen Maße entspricht und somit eine spätere Klassifikation der Daten verbessert. Die einzelnen Tracks aller Testgebiete wurden daher mit dem Refined Lee-Algorithmus gefiltert. Die Filterung in einem 7×7 Pixel großen Fenster und dem Bildmodell angepassten Parametern geschieht sinnvollerweise vor der Geokodierung, da diese die der Szene ursprünglich zugrunde liegende Statistik verletzen kann.

6.4 Geokodierung

Um die Daten für kartographische Anwendungen nutzbar zu machen, muss zunächst eine Transformation von der Slant Range-Geometrie in eine geeignete Kartenprojektion erfolgen. Zunächst wird bei der Geokodierung die absolute Phase bestimmt, d.h. dass einigen ungewrappten relativen Phasenwerten genau gemessene Höhenwerte zugewiesen werden [Schreier93]. Dies geschieht mit Hilfe der Corner-Reflektoren, die mittels statischer GPS-Messung bis auf 1 cm Höhengenaugigkeit eingemessen und in den Daten exakt zu lokalisieren sind. Wie bereits in Abschnitt 3.3.4.4 beschrieben, werden dann die Slant Range-Daten in ein globales geodätisches System mit einem dazugehörigen Bezugsellipsoid überführt. Dabei handelt es sich im Falle der AeS-1-Prozessierungskette um das World Geodetic System WGS84. Die räumliche Lage $\vec{S} + \vec{r}$ jedes Bildpixels ist in diesem System zunächst kartesisch bestimmt, um es dann mittels einer inversen Helmert-Projektion in geographische Koordinaten zu transformieren. Letztendlich wird der Datensatz aus den geographischen WGS84-Koordinaten in einer sinnvoll gewählten Kartenprojektion abgebildet. Mit den nun vorhandenen Informationen lassen sich neben dem Höhenmodell auch Bildprodukte wie Kohärenz oder SAR-Szene georeferenzieren. Während Abbildung 6-12 eine SAR-Szene in der Slant Range-Geometrie zeigt, ist dieselbe Szene in der darauf folgenden Abbildung geokodiert. Man beachte u.a. die Reliefeinflüsse auf die SAR-Aufnahmegeometrie am Beispiel des Kienbergs in dem umrandeten Bereich. In der Slant Range-Szene erkennt man den gesamten Südhang des Kienbergs durch das

sehr helle Pixelband; der in der Realität nur unwesentlich längere Nordhang verläuft dann bis zum Rand der Markierung. Diese Verkürzung bzw. Verlängerung der Berghänge durch den Foreshortening-Effekt ist, wie in Abbildung 6-13 zu sehen, durch die Geokodierung ausgeglichen. Die extrem dunklen bzw. hellen Pixel kommen durch den Shadow-, Layover- und auch Foreshortening-Effekt zustande und verdeutlichen, dass eine Informationsextraktion in diesen Bereichen nicht möglich ist.

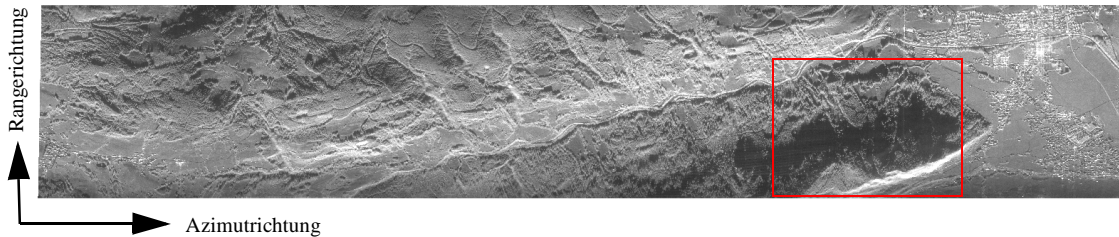


Abbildung 6-12. SAR-Szene des zweiten Tracks der Edelsbergbefliegung in Slant Range-Geometrie.

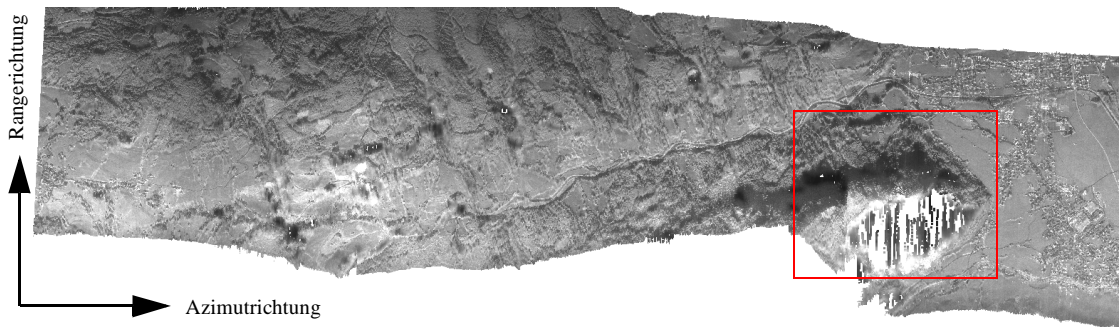


Abbildung 6-13. Geokodierte SAR-Szene von Abbildung 6-12.

Die Tabelle 6-3 stellt als Grundlage einer weiteren Diskussion wichtige Geokodierungsparameter bzgl. der jeweiligen Testgebiete zusammen.

Tabelle 6-3. Parameter zur Geokodierung.

	Edelsberg	Verwallgruppe	Silvrettagruppe
Kartennetz	Gauß-Krüger	Gauß-Krüger	Schiefachsig konforme Zylinderabb.
Mittelmeridian/Land	12/D	M28/AUT	CH
Rasterweite in m	2 × 2	2 × 2	3 × 3
Gebietsausdehnung			
Rechtswerte	4382894 - 4393608	135540 - 145195	796455 - 810498
Hochwerte	5270338 - 5275352	5200610 - 5209825	187728 - 202938
Interpolationsverfahren	Nächste Nachbarschaft	Nächste Nachbarschaft	Nächste Nachbarschaft

Tabelle 6-3. Parameter zur Geokodierung.

	Edelsberg	Verwallgruppe	Silvrettagruppe
Kohärenzschwellwert	0.3	0.3	0.0
Verwendete Corner-Reflektoren und ihre absolute Differenz zur GPS-Messung in m	CR1: 0.291 CR2: 0.090	CR1: 0.269 CR2: 0.252 CR3: 0.375 CR4: 0.538	CR1: 0.912 CR2: 1.536 CR3: 1.400
Durchschnittlicher Phase-zu-Höhe-Wert über Range in m/rad	8.000	18.922	21.356

Als Verfahren, das die Überführung der Slant Range-Informationen in das regelmäßige Raster gewünschter Größe realisiert, wird die Nächste-Nachbarschaft-Interpolation [Albertz01] eingesetzt. Phasen- und Amplitudeninformationen, die bei der Geokodierung einen bestimmten Kohärenzschwellwert unterschreiten, sind im geokodierten Produkt nicht berücksichtigt und mit einem Fehlwert belegt, da ihr Informationsgehalt für eine Weiterverarbeitung nicht zuverlässig genug ist. Des weiteren erfolgt bei der Geokodierung in einem Fenster gewünschter Größe eine Median- und Mittelwert-Filterung des DHMs, um die Oberflächenrauigkeit zu reduzieren bzw. um Ausreißer zu eliminieren.

Anhaltswerte für die Güte des DHMs sind u.a. zum einen die absoluten Differenzen zwischen den im DHM bzw. im Feld gemessenen Positionen der Corner-Reflektoren und eventuell auftretende Rampen in Rangerichtung. Der schematische Verlauf einer solchen Rampe, die sich in einer gleichmäßig ansteigenden oder absteigenden Verkippung in eine Richtung äußert, ist in Abbildung 6-14 dargestellt. Um eine Rampe erkennen zu können, müssen die Corner-Reflektoren wenn möglich den gesamten Bereich zwischen Near und Far Range abdecken. Treten zu hohe absolute Differenzen oder Rampen auf, sind diese in systemimmanenten Messungenauigkeiten oder Fehlern in der InSAR-Prozessierungskette und in nicht hinreichend kompensierten Bewegungsfehlern des Flugzeuges zu suchen und wenn möglich zu kompensieren.

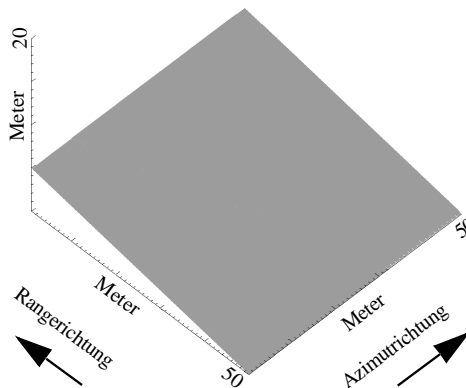


Abbildung 6-14. Rampe in Rangerichtung.

Die Abbildungen 6-15 und 6-16 zeigen eine Verkippung zwischen den beiden Corner-Reflektoren des Edelsberggebietes, die sich bei einem Abstand von ca. 800 Range-Zeilen auf 0.42 m bzw. 0.0525 rad beläuft. Der Abschnitt 6.6. diskutiert die Lösungsmöglichkeiten für beide Probleme.

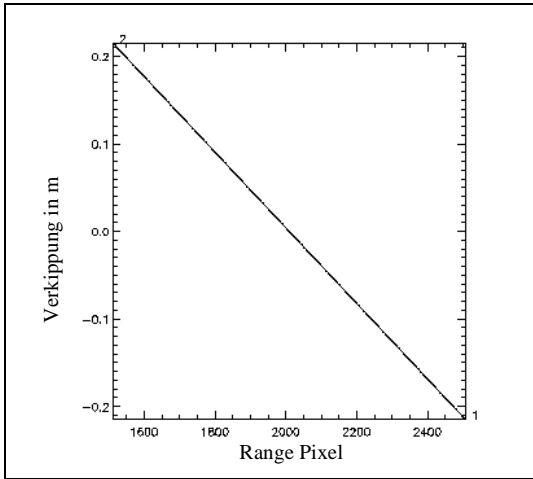


Abbildung 6-15. Verkippung in Metern.

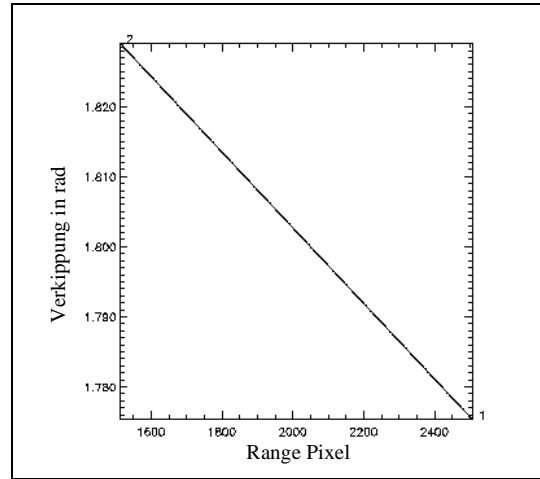


Abbildung 6-16. Verkippung in rad.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Phase-zu-Höhe-Kurve, aus der sich die qualitativen Einflüsse von Unwrapping-Fehlern in der Phase, die einen Wert von 2π oder ein Vielfaches davon annehmen können, auf die Geländehöhe berechnen lassen. Zunächst zeigt die Kurve auf, wie viele Meter in der jeweiligen Range-Zeile einem Phasenwert von einem rad entsprechen. Des Weiteren wird der durchschnittliche Phase-zu-Höhe-Wert über den gesamten Range-Bereich aus der Kurve berechnet. Für den Corner-Track des Edelsberggebietes ergibt sich gemäß Tabelle 6-3 ein Mittelwert von 8.000 m pro 1 rad. Ein Unwrapping-Fehler von 2π ($\pi \approx 3,14159$ rad) wirkt sich demnach bei der Geokodierung mit einem Fehler von $\pm 50,265$ m auf die Genauigkeit des DHMs aus. Eine Möglichkeit der Reduktion von Unwrapping-Fehlern wird im nächsten Abschnitt besprochen.

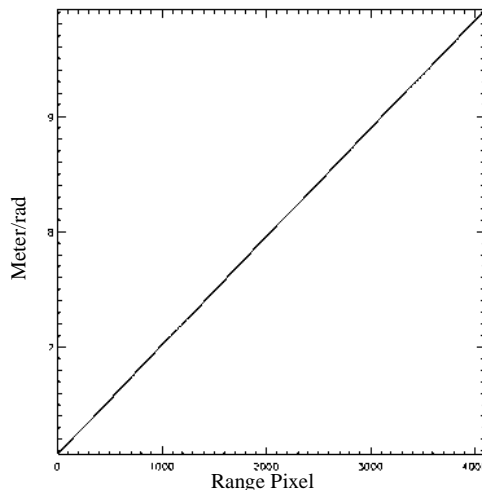


Abbildung 6-17. Phase-zu-Höhe-Kurve.

Das aus dem Corner-Track erstellte DHM dient nun als Referenz für die Bestimmung der absoluten Phase derjenigen Tracks, die keine Corner-Reflektoren als Bezugspunkte haben. Im Überlappungsbereich eines Slant Range-Tracks und eines DHMs als Referenzfläche wird in einem Fenster bestimmter Größe iterativ der absolute Phasenwert des Tracks ermittelt. Nach dieser Berechnung erfolgt die Geokodierung dieser Tracks analog der bereits besprochenen Corner-Tracks.

6.5 Minimierung von Unwrapping-Fehlern

Wie bereits aufgezeigt, bedingen Phase-Unwrapping-Fehler stark verfälschte Höhenwerte in einem InSAR-DHM. Infolge der SAR-Aufnahmegeometrie ist eine falsche Höhe des weiteren die Ursache für eine falsche Lage des entsprechenden Pixels in der geokodierten SAR-Szene. Unwrapping-Fehler ergeben sich u.a. aus einer lokalen Unterabtastung aufgrund von Phasenrauschen oder zu starker Geländeneigung, was sich im Layover- bzw. Shadow-Effekt äußert, und verursachen globale Fehler in der ungewrappten Phase und somit auch im InSAR-DHM. Da das Relief in Hochgebirgsregionen von großen Hangneigungen geprägt ist, kann dies bei ungünstigen Aufnahmepositionen zu einer hohen Anzahl von Layover- bzw. Shadow-Flächen führen. Demzufolge ist für eine qualitativ hochwertige DHM-Erstellung das Problem der Unwrapping-Fehler möglichst exakt und flächendeckend zu lösen.

Der in dieser Arbeit zur Problemlösung verwendete Algorithmus nutzt ein Referenz-DHM, dessen Qualitäten im Weiteren beschrieben werden. Zunächst wird dazu sowohl das Referenz-DHM als auch das zu verbessernde InSAR-DHM in die Slant Range-Geometrie transformiert. In dieser Geometrie bestehen zum einen eindeutige und einfache Rangebeziehungen zwischen den DHMs, was die Vergleichbarkeit der Modelle deutlich erleichtert, und zum anderen ist es möglich, die Phase-zu-Höhe-Beziehung für jede Range-Zeile anzugeben. Bei dem anschließenden Vergleich jedes Pixels der beiden Höhenmodelle wird die Phase-zu-Höhe-Beziehung für jede Range-Zeile berücksichtigt, aus der sich der jeweilige Höhenwert, der π entspricht, ableiten lässt. Weicht die Höhe des zu untersuchenden Pixels des InSAR-DHMs nun um nicht mehr als π ab, so bleibt dessen Höhenwert erhalten. Ist die Differenz jedoch größer als π , wird die Höhe um 2π entsprechend der Abweichungsrichtung entweder nach oben oder nach unten korrigiert. Dieses iterative Verfahren ist dann beendet, wenn jedes Pixel des zu verbessernden DHMs innerhalb von π liegt.

Das zu verwendende Referenz-DHM sollte demnach eine durchschnittliche Höhengenaugigkeit von π gegenüber dem InSAR-DHM aufweisen und in sich möglichst fehlerfrei sein. Es besteht die Möglichkeit, dieses direkt aus der InSAR-Befliegung zu gewinnen, oder es stehen Daten aus anderen Quellen dafür zur Verfügung. Für erstere Möglichkeit muss jedoch eine Befliegung mit drei Antennen, in die gleichzeitig eine große und eine kleine Basislinie konfiguriert ist, erfolgen. Die kleine Basislinie erfasst dabei in dem 2π -Intervall eines Fringe eine größere Höhendynamik, als dies bei einer großen Basislinie der Fall ist. Zur Abdeckung des Höhenunterschiedes eines Gebiets werden also bei einer Konfiguration mit der kleinen Basislinie weniger Fringes benötigt, was wiederum weniger Phasensprünge bedingt und somit die Möglichkeit von Unwrapping-Fehlern reduziert. Diese Messung ist jedoch aufgrund der größeren Höhendynamik und der demzufolge schlechteren Höhengenaugigkeit ungenauer als die Messung mit einer großen Basislinie. So wird letztlich das hoch-

genaue, aber für Unwrapping-Fehler anfälligere DHM aus der großen Basislinienkonfiguration mit dem ungenaueren aber mit weniger Unwrapping-Fehlern behafteten DHM aus der Anordnung mit kleiner Basislinie korrigiert.

Beide Möglichkeiten weisen folgende Vor- bzw. Nachteile auf: Eine Referenz aus anderen Datenquellen hat sicherlich keine Unwrapping-Fehler, kann aber trotzdem qualitativ minderwertig sein oder durchschnittlich um mehr als π abweichen. Ein weiterer Nachteil kann darin liegen, dass dieses DHM die Oberfläche ohne Vegetation und anthropogene Bauten erfasst, was beim X-Band-InSAR-DHM ja nicht der Fall ist. Beides führt bei Gebieten, die eine größere Differenz als π , aber keine Unwrapping-Fehler zeigen, zu Fehlern im Algorithmus. Bei der SAR-internen Lösungsmöglichkeit ist dies natürlich nicht der Fall, aber hier können aus den oben genannten Gründen Unwrapping-Fehler nicht ausgeschlossen werden. Für die Befliegung der Testgebiete dieser Arbeit stand die Drei-Antennen-Konfiguration noch nicht zur Verfügung, und daher kamen Referenzen aus anderen Datenquellen zur Verwendung.

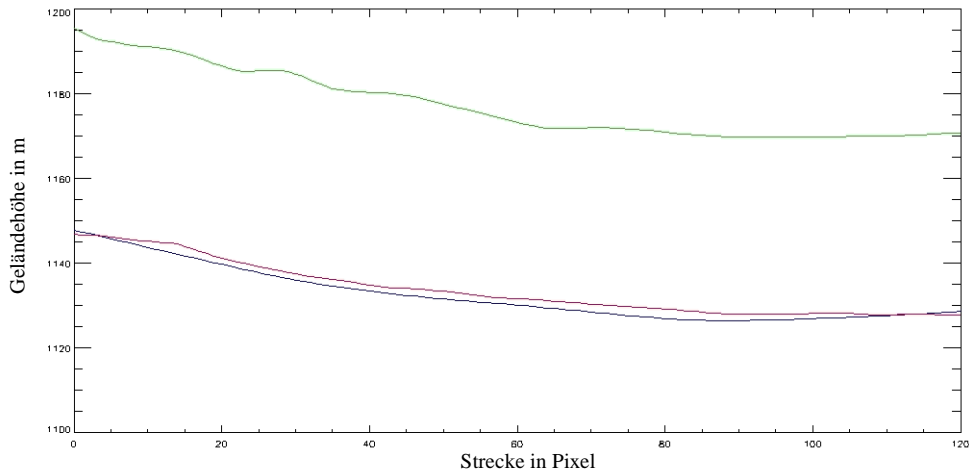


Abbildung 6-18. Fehlerminimiertes- (rot) sowie fehlerbehaftetes- (grün) InSAR-Profil mit dem entsprechendem Referenz-Profil (blau).

Die oben stehende Abbildung zeigt drei Profile, die auf einer Länge von 242 m bei einer Pixelauflösung von 2 m, in einem Gebiet mit sehr niedriger Vegetationshöhe aus folgenden Höhenmodellen gezogen wurden. Das Referenz-DHM wird dabei von der blauen, das noch nicht verbesserte InSAR-DHM von der grünen und das mittels des Algorithmus verbesserte InSAR-DHM von der roten Profillinie dargestellt. Die durchschnittlichen Höhen der Profile betragen 1132,51 m für das Referenz-, 1133,84 m für das verbesserte und 1177,46 m für das unverbesserte InSAR-DHM. Die Differenz zwischen den beiden InSAR-DHMs beträgt 43,62 m, was genau einem 2π -Sprung im nahen bis mittleren Range-Bereich entspricht. Nach der Anwendung des Algorithmus sind die Profillinien des Referenz- und des verbesserten InSAR-DHMs nahezu identisch. Sämtliche Tracks aller Testgebiete wurden auf diese Weise korrigiert. Dabei wurden aus oben genannten Gründen Phase-Unwrapping-Fehler zwar nicht gänzlich eliminiert, jedoch deutlich reduziert.

6.6 Minimierung von Offsets und Rampen

In einem nächsten Schritt findet zunächst die Untersuchung und gegebenenfalls eine Verbesserung der Höhenmodelle des jeweiligen Tracks hinsichtlich des Auftretens eines Höhenversatzes bzw. von Rampen gegenüber einer Referenz statt. Als absolute Referenzen dienen dabei die Höhen der auf cm-Genauigkeit eingemessenen Corner-Reflektoren, deren Messwerte mit den entsprechenden Höhenwerten des Corner-Track-DHMs jedes Gebietes verglichen werden. Eine eventuell auftretende Abweichung zur Referenz wird durch eine Verkippung und/oder einen Ausgleich des Höhenversatzes bis hin zum kleinsten möglichen Wert berichtigt. Ein Beispiel dafür gibt die Abbildung 6-19, in der die grüne Linie den Versatz der DHM-Höhen zu den gemessenen Corner-Höhen zeigt. Das Höhenmodell weist eine Verkippung um ca. 1 Meter gegenüber der aus der Corner-Vermessung stammenden blauen Soll-Linie auf. Die rote Linie präsentiert hier das Ergebnis einer Anpassung des DHMs an die Referenzhöhen durch die genannten Methoden.

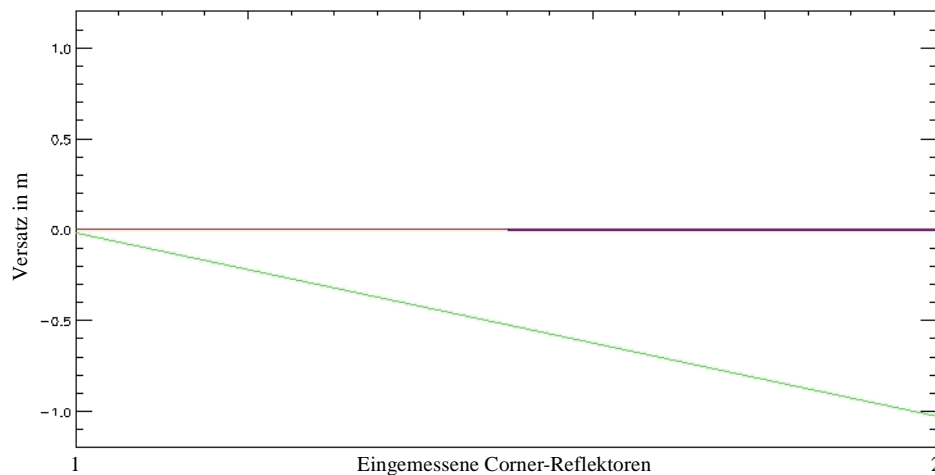


Abbildung 6-19. Soll-Linie der eingemessenen Corner-Reflektoren (blau) mit der höhenversetzten (grün) und -angepassten (rot) Linie des Edelsberg Corner-Tracks.

Das berichtigte Corner-Track-DHM dient dann wiederum als Referenz für die Anpassung der anderen Tracks, was anhand des Edelsberg-Testgebiets erläutert wird. Aus der Abbildung 6-20 lässt sich entnehmen, dass Track 3 ungefähr das gleiche Gebiet abdeckt wie der Corner-Track 4. Mittels Differenzbildungen im Überlappungsbereich beider Tracks wird Track 3 auf einen möglichen Versatz und/oder Rampen hin untersucht. Dies geschieht mit Hilfe von Profilen durch die jeweiligen DHMs in einem möglichst reliefarmen Abschnitt, da in einem solchen wegen der spezifischen SAR-Aufnahmegeometrie die zuverlässigsten Werte liegen. Die grüne Profillinie in Abbildung 6-20 zeigt die Differenz von Track 3 zu Track 4 auf einer 1732 m langen Strecke, aus der sowohl ein Versatz als auch eine Rampe zu erkennen ist. Zur Bestimmung des Versatzes und/oder der Rampe wird eine Approximation an die Kurve genutzt, wie sie in Abbildung 6-21 dargestellt ist. Dies hat den Vorteil, dass die Kurve ihrem generellen Verlauf folgt und nicht mit lokalen Fehlern behaftet ist und somit die Ermittlung des Versatzes bzw. der Rampe erleichtert. Ist der Fehler bestimmt, wird dieser so genau wie möglich mit den oben genannten Methoden kompensiert, was jeweils die rote Profillinie in beiden Abbildungen als Ergebnis dieses Vorganges zeigt. Die

übrigen West-Ost- bzw. Ost-West- Tracks werden dann analog der beschriebenen Vorgehensweise an Track 3 bzw. Track 4 angepasst.

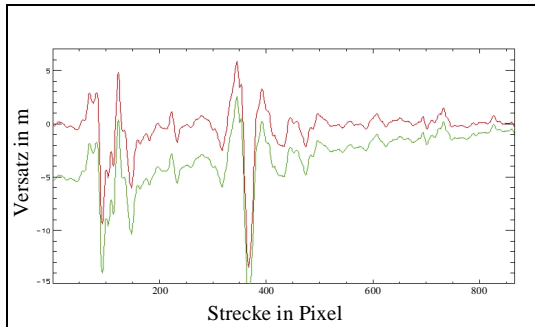


Abbildung 6-20. Höhendifferenz Track4-Track3.

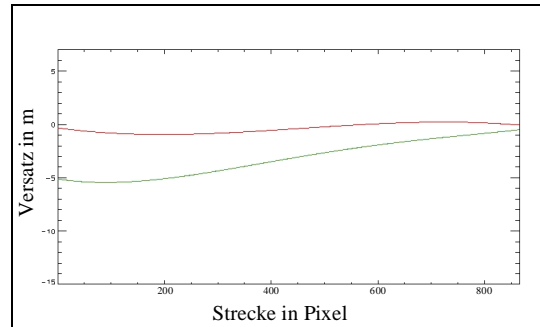


Abbildung 6-21. Approximation an die Kurven.

6.7 Reliefspezifische radiometrische Korrektur

Die radiometrischen Eigenschaften einer Radarfernerkundungsaufnahme ergeben sich aus der Interaktion zwischen den auftreffenden Mikrowellenimpulsen, dem abgebildeten Objekt und dem daraus folgenden Intensitätswert in der SAR-Szene. Im Idealfall ist dieser empfangene Intensitätswert für das jeweilige Objekt, z.B. eine Weidenfläche, über die ganze Aufnahme verteilt gleich. Bei SAR-Abbildungen ist dies jedoch aufgrund der systemgegebenen Aufnahmeeigenschaften bzw. der Antennencharakteristik nicht der Fall. So ergibt sich beispielsweise ein jeweils anderer Intensitätswert für die Weidenfläche je nachdem, ob sie sich in einem ebenen Bereich, einem dem Sensor zugewandten bzw. abgewandten Hang oder im Near bzw. Far Range-Bereich befindet. Diese Intensitätsunterschiede gleichartiger Objekte verursachen bei der Informationserkennung bzw. -extraktion und einer anschließenden Klassifikation Probleme, da die eindeutige Zuordnung von Objekt zu Intensitätswert nicht mehr gegeben ist. Das Ziel einer radiometrischen Korrektur ist es demnach, die physikalischen Eigenschaften von Objekten von den systemimmanenten bzw. topographisch bedingten Einflüssen zu trennen [Holecz93]. Die Weidenfläche soll nach der radiometrischen Korrektur sowohl im Near als auch im Far Range-Bereich und unabhängig von der Geländeexposition und -neigung den jeweils gleichen Intensitätswert in der SAR-Szene aufweisen. Für eine genaue radiometrische Korrektur [Holecz98] in stark reliefierten Gebieten sind folgende drei Probleme mit Hilfe hochauflösender Höhen- daten, exakter Antennendaten bzgl. ihrer Position und ihres Blickwinkels und der entsprechenden SAR-Geometrie zu lösen:

- Die Richtcharakteristik der Antenne bedingt, dass die Antenne nur unter einem bestimmten Winkel mit maximaler Leistung sendet bzw. empfängt. Liegt dieser Winkel z.B. im mittleren Range-Bereich einer Aufnahme, so nimmt die Sendeleistung sowohl zum Near als auch zum Far Range-Bereich hin ab, was dann wiederum zu weniger empfangener Energie und somit zu einem geringeren Intensitätswert in der Szene führt. Dieser Effekt wird mit Hilfe der genauen Kenntnis des Antennendiagramms sowie der Antennenposition und -lage kompensiert.

- Mitentscheidend für die Rückstreuintensität eines Objektes ist, unter welchem Einfallswinkel die Radarstrahlen auf das Objekt treffen, in welchem Abstand sich dieses zum Sensor befindet bzw. wie es zum Sensor hin exponiert und geneigt ist. Diese Parameter, die ebenfalls zu verschiedenen Intensitätswerten in Pixeln mit gleichen Objekten führen, lassen sich durch Höhendaten und die Kenntnis der Aufnahmegeometrie bestimmen. Mittels trigonometrischer Berechnungen erfolgt dann die Bereinigung dieser relief- und einfallswinkelbedingten radiometrischen Fehler.
- Der systemimmanente Leistungsabfall nach Far Range hin, der für jede Range-Zeile mit $1/R^2$ modelliert werden kann, wird schließlich mit Hilfe eines Polynoms korrigiert. Damit wird ausgeglichen, dass im Far Range-Bereich bedingt durch die längere Wegstrecke zum Sensor hin weniger Energie als von einem gleichen Objekt im Near Range-Bereich zurückkommt, was sich folgerichtig in unterschiedlichen Intensitäten auswirkt.

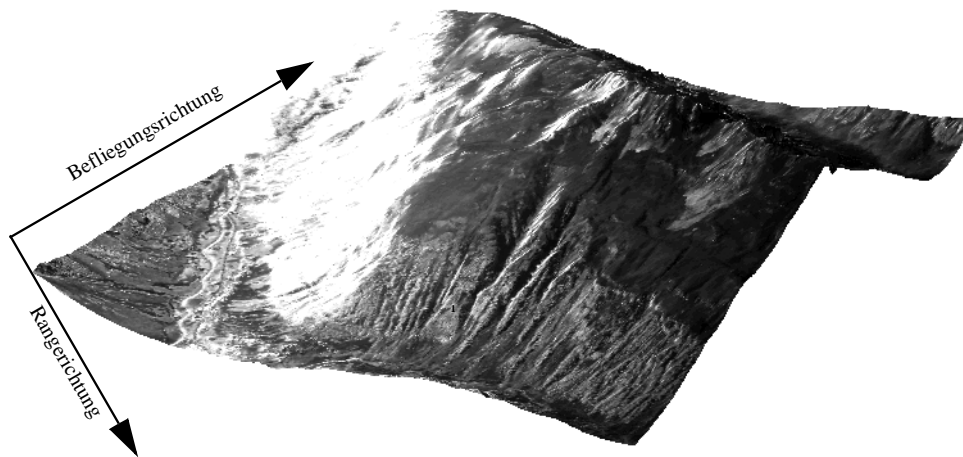


Abbildung 6-22. Perspektiv-Darstellung einer größtenteils schneebedeckten SAR-Szene aus der Verwallbefliegung ohne radiometrische Korrektur, mit einer Höhendifferenz von ca. 1100 m.

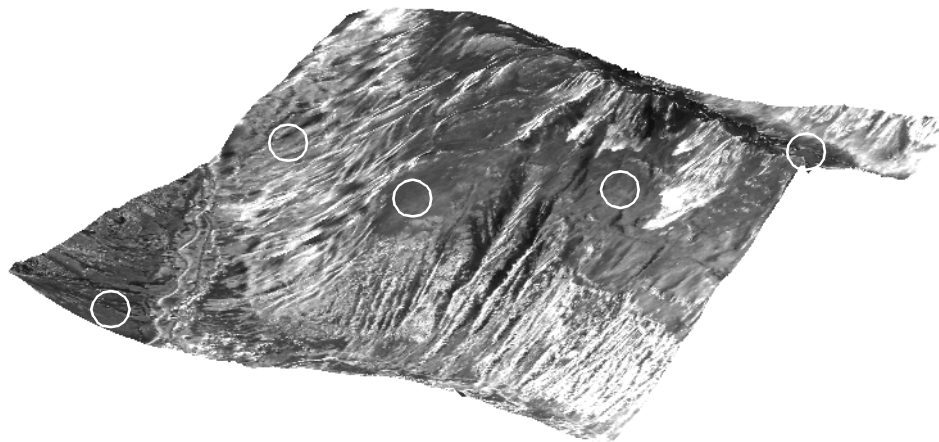


Abbildung 6-23. Perspektiv-Darstellung der SAR-Szene aus Abbildung 6-22 mit radiometrischer Korrektur, worin ausgewählte Schneefelder über die gesamte Rangerichtung weiss markiert sind.

Die Abbildungen 6-22 bzw. 6-23 zeigen SAR-Bilder der Verwallbefliegung in Perspektiv-Darstellung, um mit Hilfe des Reliefeindrucks die Wirkungsweise der radiometrischen Korrektur auf die SAR-Szene aufzuzeigen. Das Tal der Trisanna, das durch die Flussmäander auf der linken Bildhälfte zu erkennen ist, trennt zunächst den sensorabgewandten vom -zugewandten Hang des Predigbergs, der in Abb. 6-22 durch die sehr hellen Pixel deutlich zu erkennen ist. Diesem schließt sich in der rechten Bildhälfte ein Gebirgskamm an, der wiederum zum Jamtal bzw. zum Laraintal, zu sehen im unteren bzw. oberen Teil des Bildes, abfällt. In der Abbildung 6-23 sind mehrere Schneefelder, die über das gesamte Range-Spektrum und in verschiedenen Expositionen bzw. Neigungsstufen liegen, weiss markiert. In der nicht korrigierten Szene ist eine Objekt-Intensitätswert-Zuordnung nicht möglich, da die Schneefelder hier Grauwerte von weiß über grau bis hin zu schwarz annehmen. In der korrigierten Szene liegen die Grauwerte der Schneefelder hingegen im mittleren Bereich und lassen sich so über die gesamte Szene hinweg als solche identifizieren. Die Qualität einer späteren Informationsextraktion bzw. Klassifikation wird aus den gezeigten Gründen durch die radiometrische Korrektur erhöht, die demnach auf alle Tracks der jeweiligen Testgebiete angewandt wurde.

6.8 Mosaikerstellung

Die Prozesskette der Datenaufbereitung findet mit der Mosaikerstellung ihr Ende. In diesem Abschnitt wird diskutiert, wie die einzelnen Tracks des SAR-Bildes, des DHMs bzw. der Kohärenz zu Gesamtszenen des entsprechenden Bildproduktes eines Testgebietes fusioniert werden. Für jedes Gebiet stehen nach der Mosaikerstellung schließlich drei Szenen pro Bildprodukt, aufgeteilt nach den einzelnen Flugrichtungen, zur Verfügung. Die Tabelle 6-4 gibt Auskunft darüber, welche Tracks bei welcher Flugrichtung für das jeweilige Testgebiet verwendet wurden. Der Mosaik-Name, der im weiteren Verlauf der Arbeit gebraucht wird, bezieht sich dann auf alle oder einzeln genannte Bildprodukte der verschiedenen Testgebiete und Flugrichtungen.

Tabelle 6-4. Mosaik-Namen der Testgebiete.

Mosaik-Name	Testgebiet	Flugrichtung	Verwendete Tracks
Edelsberg ₁	Edelsberg	West-Ost	1, 3, 5
Edelsberg ₂	Edelsberg	Ost-West	2, 4, 6
Edelsberg ₃	Edelsberg	beide	1, 2, 3, 4, 5, 6
Verwall ₁	Verwallgruppe	West-Ost	2, 4, 6
Verwall ₂	Verwallgruppe	Ost-West	3, 5
Verwall ₃	Verwallgruppe	beide	2, 3, 4, 5, 6
Silvretta ₁	Silvrettagruppe	Süd-Nord	2, 4, 6, 8, 10
Silvretta ₂	Silvrettagruppe	Nord-Süd	3, 5, 7, 9, 11
Silvretta ₃	Silvrettagruppe	beide	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11

Die Abbildung 6-24 zeigt am Beispiel zweier Tracks das Prinzip der Mosaikerstellung auf. In einem Vorverarbeitungsschritt werden die SAR-Bilder zunächst durch Mittelwertbildung einander angeglichen, so dass gleiche Objekte über die gesamte Szene hinweg gleiche Intensitätswerte aufweisen. Aus dem Durchschnittswert beider Informationen im Überlappungsbereich wird dann die neue Intensität errechnet, um so einen kantenfreien Übergang zwischen den Tracks zu gewährleisten. Für das DHM bzw. die Kohärenz ist der Vorverarbeitungsschritt aufgrund der fehlenden Radiometrie nicht notwendig, die Mosaikerstellung erfolgt analog zum oben beschriebenen Verfahren. Die Bildung des Durchschnittswertes im Überlappungsbereich erfolgt grundsätzlich aus allen zur Verfügung stehenden Tracks, deren Anzahl je nach Flugrichtung auch mehr als zwei sein kann.

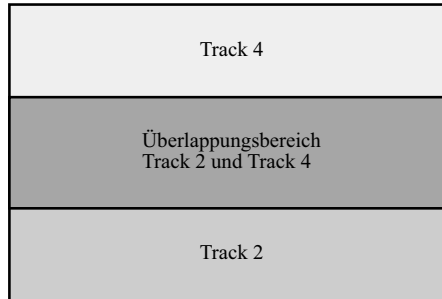


Abbildung 6-24. Prinzip der Mosaikerstellung.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Beispiel einer Mosaikerstellung zweier Tracks aus gegenläufigen Flugrichtungen. Die SAR-Bilder der Tracks 3 bzw. 4 weisen zunächst richtungsabhängige Eigenschaften auf, die im Mosaik dann stark verwischen. Bei einer Mosaikerstellung aus Tracks nur einer Flugrichtung tritt dieser Effekt nicht auf und die jeweiligen richtungsabhängigen Bildeigenschaften bleiben erhalten. Welcher Lösung hinsichtlich der Güte der nachfolgenden Informationsextraktion bzw. Klassifikation der Vorzug zu geben ist, wird in Kapitel 9 diskutiert.



Abbildung 6-25. Track 3 der Edelsbergbefliegung (West-Ost). Maßstab ca 1:22 000.

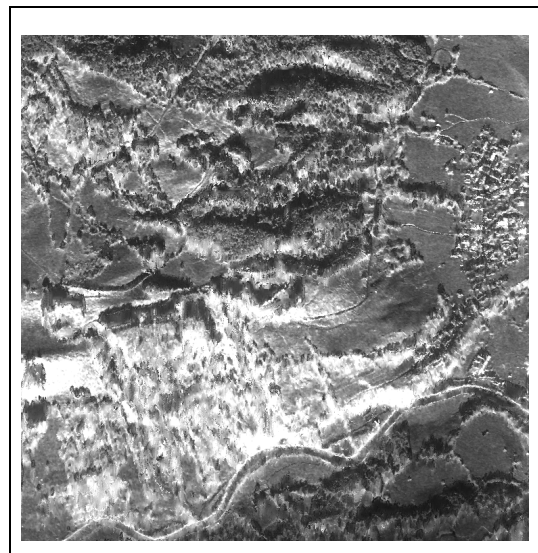


Abbildung 6-26. Track 4 der Edelsbergbefliegung (Ost-West). Maßstab ca 1:22 000.

Rangerichtung
↑



Abbildung 6-27. Mosaik aus den Tracks 3 und 4 der Edelsbergbefliegung. Maßstab ca 1:22 000.

7 Informationsextraktion I - Reliefeigenschaften

Die aufbereiteten dreidimensionalen Datensätze dienen nun als Basis für die Generierung eines Modells der realen Welt. Dieses Modell, das die Grundlage für die Ableitung der kartographischen Produkte ist, enthält die DHMs und die daraus abgeleiteten Reliefeigenschaften sowie die thematischen Informationen über die Oberflächenbedeckung der Testgebiete. Als Grundlage für die Beschreibung der Reliefeigenschaften der Testgebiete dienen nun die jeweiligen InSAR-DHMs, deren Generierung und Optimierung in den entsprechenden Abschnitten bereits erörtert wurde. Um den Eindruck eines Hochgebirgsreliefs zu vermitteln, zeigt Abbildung 7-1 das InSAR-DHM Verwall₃ in perspektivischer Darstellung. Dieses Kapitel setzt sich zunächst mit den grundsätzlichen X-Band-Höheninformationen und daraus resultierenden Modelleigenschaften auseinander, diskutiert dann das InSAR-DHM Postprocessing, um schließlich die Extraktion verschiedener reliefbeschreibender Informationen für kartographische Anwendungen aus dem DHM aufzuzeigen.

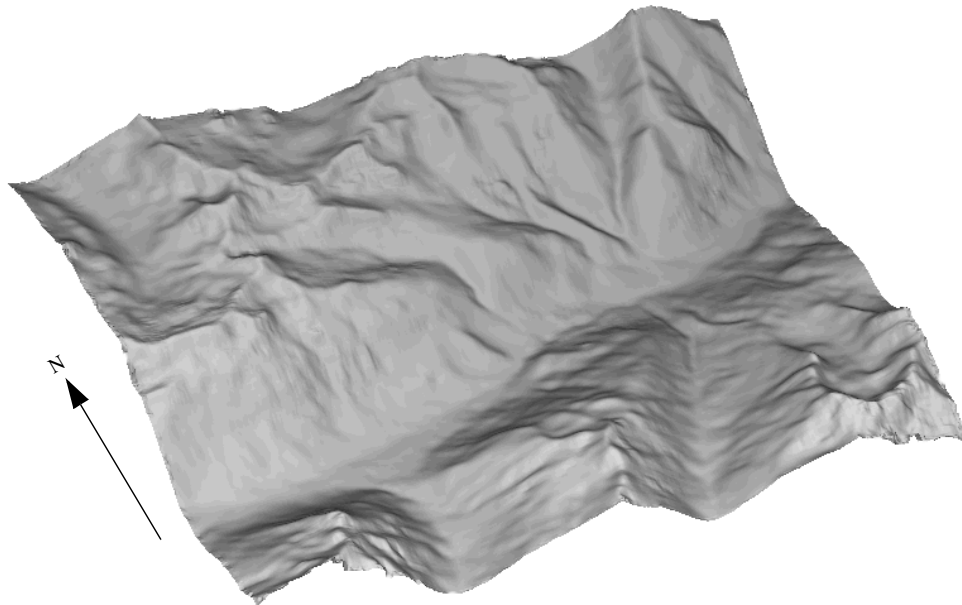


Abbildung 7-1. Perspektiv-Ansicht des InSAR-DHM Verwall₃ (6,5 km x 6,6 km, Überhöhungsfaktor 0.4).

7.1 Eigenschaften des X-Band-DHM

Wie bereits erörtert, beträgt der Richtwert für die Eindringtiefe der Radarwellen in ein beleuchtetes Objekt im allgemeinen die halbe Wellenlänge. Für das X-Band des AES-1-Systems liegt dieser Wert somit bei 1-2 cm. Demzufolge beschreiben InSAR-Daten dieses Wellenlängenbereiches nicht die reliefbezogene Erdoberfläche bzw. eigentliche Geländeoberfläche, sondern die tatsächliche Landschaftsoberfläche, inklusive Höhenobjekten wie Wälder, Bäume, Schneeflächen oder Häuser. Daraus ergibt sich sowohl ein wesentlicher Unterschied zur topographischen Karte, welche die Geländeoberfläche ohne zusätzliche Höhenobjekte beschreibt [Hake95], als auch zur Definition des digitalen Geländemodells (DGM) [AdV89]. Als eine Konsequenz daraus müssen Modelle, welche Höhenbeschreibungen zum Inhalt haben, definiert bzw. voneinander abgegrenzt werden. Eine ausführliche Diskussion dazu findet sich bei [Schmieder97], an dessen Arbeit die folgenden hier relevanten Modelldefinitionen angelehnt sind:

- Der Begriff des digitalen Höhenmodells (DHM) ist sehr allgemein gefasst und dient als Oberbegriff aller Modelle, die Höheninformationen von Objekten jeglicher Art zum Inhalt haben.
- Ein digitales Geländemodell (DGM) ist nach [AdV89] u.a. definiert als dreidimensionales digitales Modell, das nur die reliefbezogene Erdoberfläche hinsichtlich Lagekoordinaten, Höhenwerten und geomorphologischen Informationen beschreibt.
- Das digitale Oberflächenmodell (DOM) hingegen beschreibt das Gelände und sämtliche nicht-reliefbezogene Objekte, die noch Kontakt mit der eigentlichen Geländeoberfläche haben.

Nach den vorangegangenen Definitionen handelt es sich bei dem Modell aus den X-Band-Daten um ein DOM und bei den für die Validierung sowie den für die Minimierung von Unwrapping-Fehlern (Kap. 6.5) genutzten Referenzmodellen um ein DGM. Zur Vereinfachung wurde und wird im Verlauf der Arbeit für die möglichen Modelle der Oberbegriff DHM genutzt und nur im Bedarfsfall der Unterschied explizit abgegrenzt.

Als weitere Konsequenz ergibt sich eine durch nicht-reliefbezogene Objekte induzierte Höhendifferenz zwischen den InSAR-DHMs gegenüber dem jeweiligen Referenz-DHM, die bei der Validierung zu berücksichtigen ist. Aufgrund des Höhenversatzes zeigen die aus dem InSAR-DHM abgeleiteten Höheninformationen an den Differenzstellen Werte, die in dieser Form nicht in eine topographische Karte nach klassischer Definition [Hake95] gehören. Das Ziel dieser Arbeit ist es jedoch zu untersuchen, inwieweit es grundsätzlich möglich ist, ein Modell hochalpiner Regionen aus InSAR-Daten zu erstellen, das diesen in ausgewählten Attributen so genau wie möglich entspricht. Das X-Band-Modell genügt an dieser Stelle somit nicht den Erfordernissen der Kartographie. Dies wird jedoch in Kauf genommen, da die Verfeinerung des Modells, wie etwa die Reduktion aller nicht-reliefbezogener Objekte auf die Geländehöhe, allein aus X-Band-Daten weit über eine grundsätzliche Betrachtung der Modellerstellung hinausgeht. Beispielsweise ist die Berechnung von Baumhöhen in Wäldern aus diesen Daten bisher nicht gelöst [Schmieder97] und kann sicherlich Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein. Eine weitere Möglichkeit zur Modellverfeinerung bietet der interferometrische Einsatz weiterer, für diese Arbeit allerdings nicht zur Verfügung stehender Frequenzbänder, wie das P-Band, welche zur Lösung des Problems der Baumhöhenreduktion wesentlich beitragen [Schwäbisch99b].

Die Analyse der Genauigkeit und auch der Plausibilität der erstellten ungefilterten InSAR-Höhenmodelle gegenüber den entsprechenden Referenz-DHMs mittels Profillinien, flächenhaften Differenzbildungen und statistischen Auswertungen wird in Kapitel 9 ausführlich diskutiert.

7.2 DHM-Postprocessing

Vor der Extraktion der reliefbeschreibenden Informationen für die Kartenerstellung erfolgt hier eine nochmalige Bearbeitung der DHMs mit einem Mittelwertfilter empirisch bestimmter Fenstergröße, was eine Glättung des DHMs bzw. eine Eliminierung von Kleinstformen im DHM zur Folge hat. Dies bedingt für die kartographische Darstellung der daraus abgeleiteten Reliefinformationen wiederum eine bessere Visualisierbarkeit sowie eine homogenere und graphisch klarere Darstellung als bei einer Ableitung aus ungefilterten DHMs. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass dieser Glättungs- bzw. Selektionsvorgang nicht einer korrekten kartographischen Generalisierung entspricht und demzufolge die Genauigkeit der dargestellten Informationen herabsetzt. Eine automatisierte Generalisierung von InSAR-DHMs oder der daraus abgeleiteten Reliefinformationen für bestimmte Maßstäbe oder Maßstabsfolgen ist sicherlich eine für die Zukunft sinnvolle Aufgabe, aber nicht der Inhalt dieser Arbeit.

Die Abbildungen 7-2 und 7-3 zeigen Höhenlinien, die aus einem ungefilterten bzw. mit einem 15×15 Pixel großem Mittelwertfilter bearbeiteten DHM für einen Maßstab von 1:25 000 abgeleitet wurden. In letzterer ist eine bessere Visualisierung und damit Interpretation durch die homogene und geglättete Höhenliniendarstellung sowie die Eliminierung von Kleinstformen gegenüber der ersten Abbildung gewährleistet. Dies geht jedoch, bedingt durch die nicht-kartographische Generalisierung, auf Kosten der Informationsqualität der Karten.

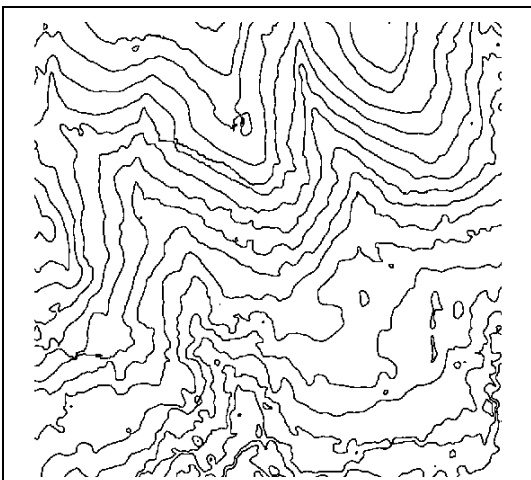


Abbildung 7-2. Höhenlinien aus einem ungefiltertem DHM.

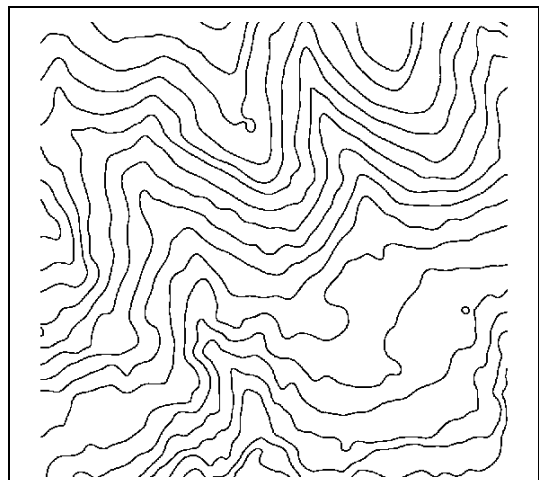


Abbildung 7-3. Höhenlinien aus einem gefiltertem DHM. Mittelwertfiltergröße 15×15 Pixel.

7.3 Extraktion reliefbeschreibender Informationen

Das Relief bezeichnet u.a. zusammenfassend die Oberflächenformen der Erde, deren geomorphologische Betrachtung anhand verschiedener Reliefeigenschaften, welche die Oberflächenformen vergleichen und systematisieren, zu realisieren ist [Leser93b]. Für die Ableitung topographischer Karten bzw. Karten zur geomorphologischen Reliefbetrachtung aus den InSAR-DHMs werden exemplarisch reliefbeschreibende Informationen bzgl. Höhe, Neigung und Exposition sowie ein Beleuchtungsmodell extrahiert. Das erfolgt mittels der Algorithmen des in der Kartographie gebräuchlichen Geoinformationssystems Arc/View. Auf die dabei zugrunde liegenden Methoden wird aufgrund der oben genannten Zielsetzung der Arbeit nicht eingegangen. Im Weiteren erfolgt ein Überblick über die Eigenschaften der extrahierten Informationen sowie deren Anwendungsmöglichkeiten. Die Abschnitte 9.1.2 und 9.2.2 diskutieren dann Vorschläge für die zielgerechte Umsetzung der gewonnenen Daten in kartographische Produkte.

- Höhe

Die Höhenstufen in Gebirgslandschaften sind entscheidend von den Klimafaktoren Temperatur, die mit zunehmender Höhe im Mittel abnimmt, sowie Niederschlag und Strahlungsintensität, die mit der Höhe steigen, bestimmt. Diese bedingen wiederum für jede Höhenlage eine charakteristische Bodenentwicklung, Vegetation und Tierwelt. Des weiteren erlauben absolute und relative Höhenwerte eine Einteilung der Gebirge in Hoch- und Mittelgebirge, Berg- und Hügelland mit ihrem jeweiligen charakteristischen Formenschatz [Schulz95].

- Exposition

Die Exposition, welche die Winkeldifferenz zwischen der Falllinie eines Hanges und der geographischen Nordrichtung in einer gedachten Horizontalebene angibt, ist wie die Hangneigung für Intensität und Richtung von geomorphologischen Prozessen von großer Relevanz [Leser93b], [Schulz95]. Von der Exposition hängen außerdem mikroklimatische Aspekte ab, die wiederum die Bodenbildung und auch die Flora und die Fauna beeinflussen.

- Hangneigung

Die Hangneigung, welche den Neigungswinkel eines bestimmten Hangstückes gegenüber einer gedachten Horizontalfläche angibt, wirkt sich des Weiteren auf die Geschwindigkeit der Wasser- und Stoffbewegungen am Hang und somit auf die Stärke der Abtragungsprozesse aus. Darüber hinaus ist die Hangneigung für alle anthropogenen Eingriffe einer der wichtigsten Parameter.

Die kartographische Aufbereitung der Kontinuumsflächen Höhe, Exposition bzw. Hangneigung soll gewährleisten, dass fachgerechte Rückschlüsse auf die jeweiligen Charakteristika und damit einhergehende Prozesse zu ziehen sind. Diese Darstellung der genannten Kontinua durch Isolinien und/oder Flächenfarben ist sicherlich von wesentlichem Interesse bei der Reliefbetrachtung. Um jedoch eine bessere Vorstellung und Visualisierung des Reliefs zu ermöglichen, ist die Erstellung eines Beleuchtungsmodells entweder als singuläres kartographisches Produkt oder als mögliche Basiskarte sowohl für die Kontinuumsdarstellungen als auch für die topographische Karte sinnvoll.

8 Informationsextraktion II - Klassifikation der Oberflächenbedeckung

Dieses Kapitel zeigt verschiedene Möglichkeiten auf, um die thematische Information aus den InSAR-Daten zu extrahieren. Dazu stehen im Wesentlichen die folgenden sechs verschiedenen Ansätze zur Verfügung [Holecz93]:

- Informationsextraktion basierend auf verschiedenen Frequenzen [Brown92]:
Dieses Verfahren benötigt mehrere SAR-Szenen mit jeweils unterschiedlichen Frequenzen. Die Information wird dann aufgrund der spektralen Trennbarkeit, welche durch das unterschiedliche frequenzabhängige Rückstreuverhalten der Streuer bedingt ist, extrahiert.
- Informationsextraktion basierend auf verschiedenen Einfallswinkeln [Ford88]:
Wie bereits diskutiert sind die Rückstreuwerte eines Streuers einfallswinkelabhängig. Unter bestimmten Umständen ist dann eine bessere Trennbarkeit der verschiedenen Streuer voneinander durch unterschiedliche Einfallswinkel gegeben.
- Informationsextraktion basierend auf verschiedenen Polarisierungen [Hellmann99], [Papathanassiou99]:
Die Kenntnis der Polarisation einer empfangenen Welle erlaubt Rückschlüsse und Zusatzinformationen über die elektrischen Eigenschaften des beleuchteten Objektes. Verschiedene Objekte können dann durch die Betrachtung der zur Auswahl stehenden Polarisationszustände voneinander diskriminiert und somit extrahiert werden.
- Informationsextraktion basierend auf verschiedenen Beleuchtungsrichtungen:
Reliefbedingte Einflüsse wie Shadow oder Layover sind bei der Erfassung eines Gebietes aus verschiedenen Beleuchtungsrichtungen teilweise oder vollständig ausgeglichen, was eine nahezu flächendeckende Klassifikation ermöglicht.
- Informationsextraktion basierend auf verschiedenen Aufnahmezeitpunkten:
Auch die Detektion der Veränderungen von Streuern (Dekorrelationen) mittels multi-temporalen SAR-Szenen oder Kohärenzinformationen aus der Interferometrie erlaubt wiederum eine thematische Interpretation.
- Informationsextraktion basierend auf tonalen und textuellen Unterschieden:
Aufgrund verschiedener a priori-Informationen und räumlicher Nachbarschaftsbeziehungen werden Intensitätsänderungen zwischen den unterschiedlichen Objekten erkannt, quantitativ beschrieben und extrahiert.

Für eine Merkmalsextraktion aus den InSAR-Daten stehen grundsätzlich zwei unterschiedliche Wege zur Disposition:

- Zum einem erfolgt die Beschreibung der Merkmale eines Objektes mittels mindestens zweier verschiedenartiger Messungen. Die Informationen hierzu liefern die Ansätze mit multiplen Frequenzen, Einfallswinkeln und Polarisationen.
- Für die anderen Ansätze erfolgt die Merkmalsbeschreibung unterschiedlicher Objekte aus einer Messung bzw. gleichartigen Messungen mittels räumlicher Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Objekten.

Für eine Klassifikation der Daten stehen dann unabhängig des gewählten Weges folgende Methoden zur Wahl:

- Nichtparametrische Klassifikatoren:
Nichtparametrische Methoden legen der Verteilung der zu kategorisierenden Daten keine Annahme zugrunde. Sie basieren grundsätzlich auf Vergleichsoperationen zwischen Trainingsbeispielen. Dieses Verfahren kann in manchen Fällen von Vorteil sein, aber andererseits reagiert es sehr empfindlich auf Rauschen und Datenausreißer. Beispiele solcher Methoden sind:
 - Nearest Neighbourhood [Schalkoff92]
 - Entscheidungsbaum [Jain89]
 - ART-Netzwerke (**A**daptive **R**esonance **T**heory) [Carpenter89]
- Verteilungsunabhängige Klassifikatoren:
Hier wird der Merkmalsraum mittels entsprechender Diskriminanten in verschiedene Entscheidungsräume aufgeteilt. Vertreter dieser Methoden sind u.a.:
 - CART-Bäume (**C**lassification and **R**egression **T**rees) [Breiman84]
 - MLP-Netzwerke (**M**ultilayer **P**erceptron) [Rumelhart86]
- Parametrische Klassifikatoren:
Parametrische Methoden legen den Daten ein bestimmtes Modell zugrunde und klassifizieren dieses dann anhand von Abschätzungen der Modellparameter aus den Trainingsbeispielen. Wenn der Datensatz mit der zugrundeliegenden Annahme z.B. einer multivariaten Gaußverteilung übereinstimmen, ist dieses Modell statistisch stabil und unempfindlich gegen Ausreißer. Diese Methode wird u.a. von folgenden Algorithmen repräsentiert:
 - Maximum Likelihood [Swain78]
 - RBF-Netzwerke (**R**adial **B**asis **F**unction) [Bishop95]
- Methoden zur Wissensverschmelzung:
Die bisher vorgestellten Klassifikationsmethoden beruhen allesamt darauf, Informationen lediglich aus den zur Verfügung stehenden Bilddaten zu generieren. Bei der Wissensverschmelzung wird zusätzlich Wissen aus der Kombination verschiedener Klassifikatoren, dem Hintergrundwissen zu den Daten oder der Fusion mit Datensätzen anderer Art wie beispielsweise GIS- oder optische Fernerkundungsdaten mit einbezogen, um so das Klassifikationsergebnis zu verbessern. Beispiele von Ansätzen und Methoden zur Wissensverschmelzung sind:

- Kombination verschiedener Klassifikatoren [Kittler98]
- Kontextbezogene Klassifikatoren [Besag86]
- Bayes'sche Fusion [Bloch96]
- Dempster-Shafer-Evidenztheorie [Dempster68], [Klein93]
- Experten-Systeme [Winston93]

In dieser Arbeit setzt sich die Datengrundlage für die Klassifikation ausschließlich aus gleichartigen Messungen zusammen. Für die Kategorisierung wurde die parametrische Maximum Likelihood-Methode gewählt, da für die Daten, wie in den entsprechenden Abschnitten diskutiert, aufgrund einer hohen Anzahl von Looks und der Speckle-Filterung eine multivariate Gaußverteilung angenommen werden kann. Diese Annahme wird, zumindest in stark approximierter Form, auch für die Daten aus der Texturanalyse zugrunde gelegt. Die Weiterverarbeitung der kategorisierten Daten erfolgt dann mit Hilfe der Dempster-Shafer-Evidenztheorie, einem kontextbezogenen Klassifikator und einem Experten-System, die auf die speziellen Eigenschaften der InSAR-Daten abgestimmt sind.

8.1 Klassifikationsalgorithmen

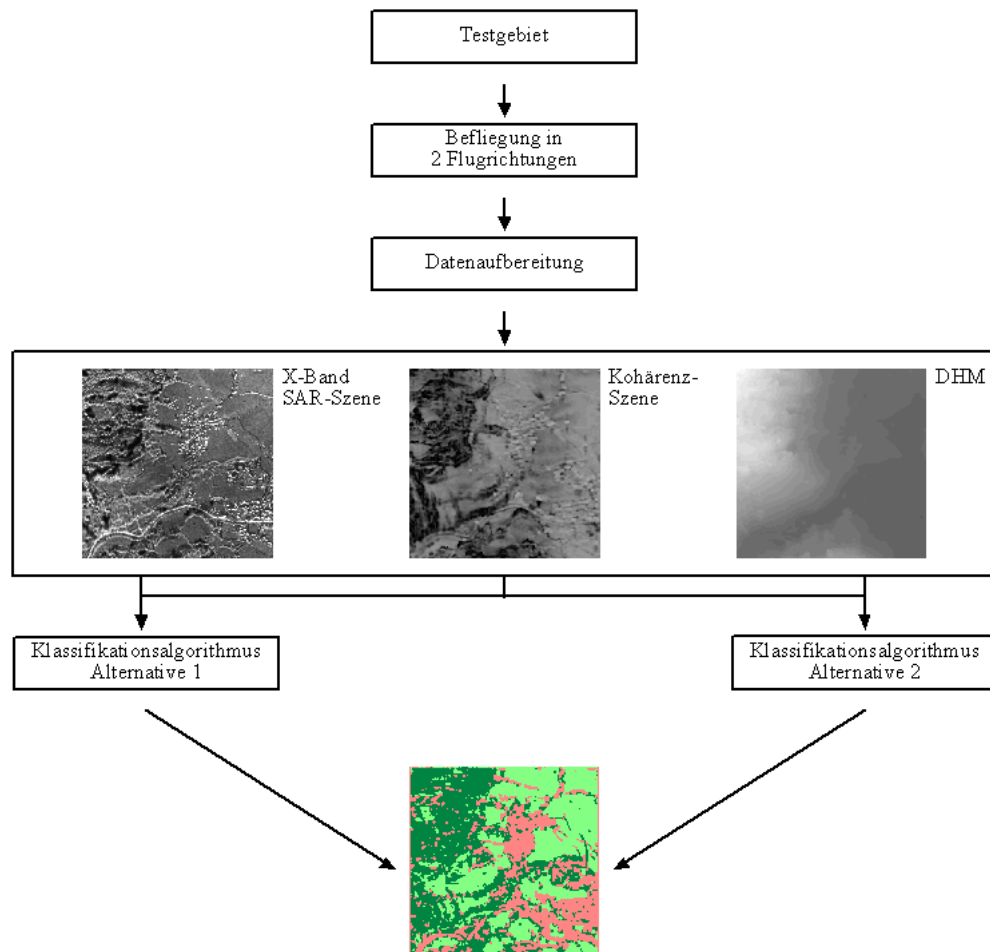


Abbildung 8-1. Informationsextraktion II.

Im Folgenden wird zunächst eine Überblick über die zwei Alternativen zur Durchführung der Klassifikation der Daten gegeben, um anschließend deren Details zu diskutieren.

8.1.1 Übersicht Alternative 1

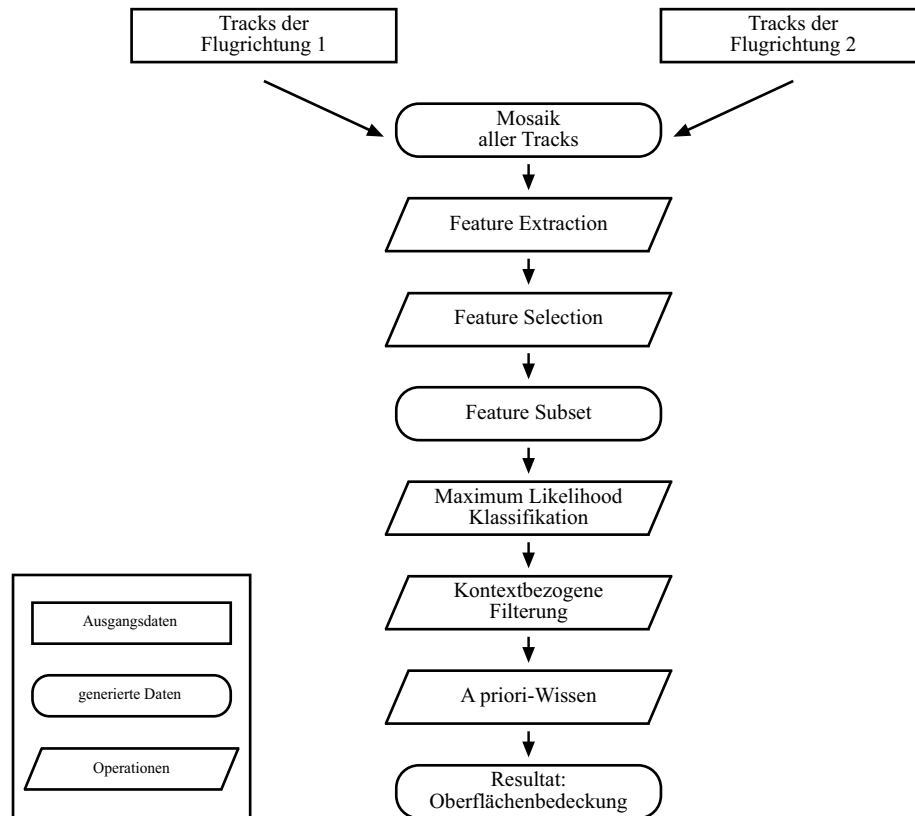


Abbildung 8-2. Klassifikationsalgorithmus Alternative 1.

Den Ausgangspunkt für die Klassifikation bilden die SAR-Bild-, DHM- bzw. Kohärenz-Mosaik aus allen zur Verfügung stehenden Tracks des jeweils entsprechenden Bildproduktes. Die Fusion zu einer Gesamtszene erfolgt hier also ausschließlich auf der InSAR-Datenebene. Im als Feature-Extraction (Merkmalsextraktion) bezeichneten Schritt wird aus dem SAR-Bild und der Kohärenz zusätzliche Information mit Hilfe von Texturanalysen abgeleitet. Durch eine Feature-Selection erfolgt darauf die Selektion derjenigen Informationsebenen, in denen die gewünschten Klassen statistisch am besten voneinander zu trennen sind, um diese Ebenen dann in einem Feature-Subset abzulegen. Im darauffolgenden Verarbeitungsschritt wird aus dem Feature-Subset mittels eines Maximum-Likelihood-Klassifikators für jedes Pixel angegeben, mit welchen Wahrscheinlichkeiten es zu einer bestimmten Klasse gehört, um es schließlich einer Objektklasse zuweisen zu können. Abschließend wird für alle Pixel sowohl der jeweilige Kontext als auch mittels a priori-Wissen der Bezug zur absoluten Höhe untersucht und gegebenenfalls deren Klassenzugehörigkeit geändert. Aus den genannten Arbeitsschritten ergibt sich das Klassifikationsresultat des ersten Lösungsvorschlages.

8.1.2 Übersicht Alternative 2

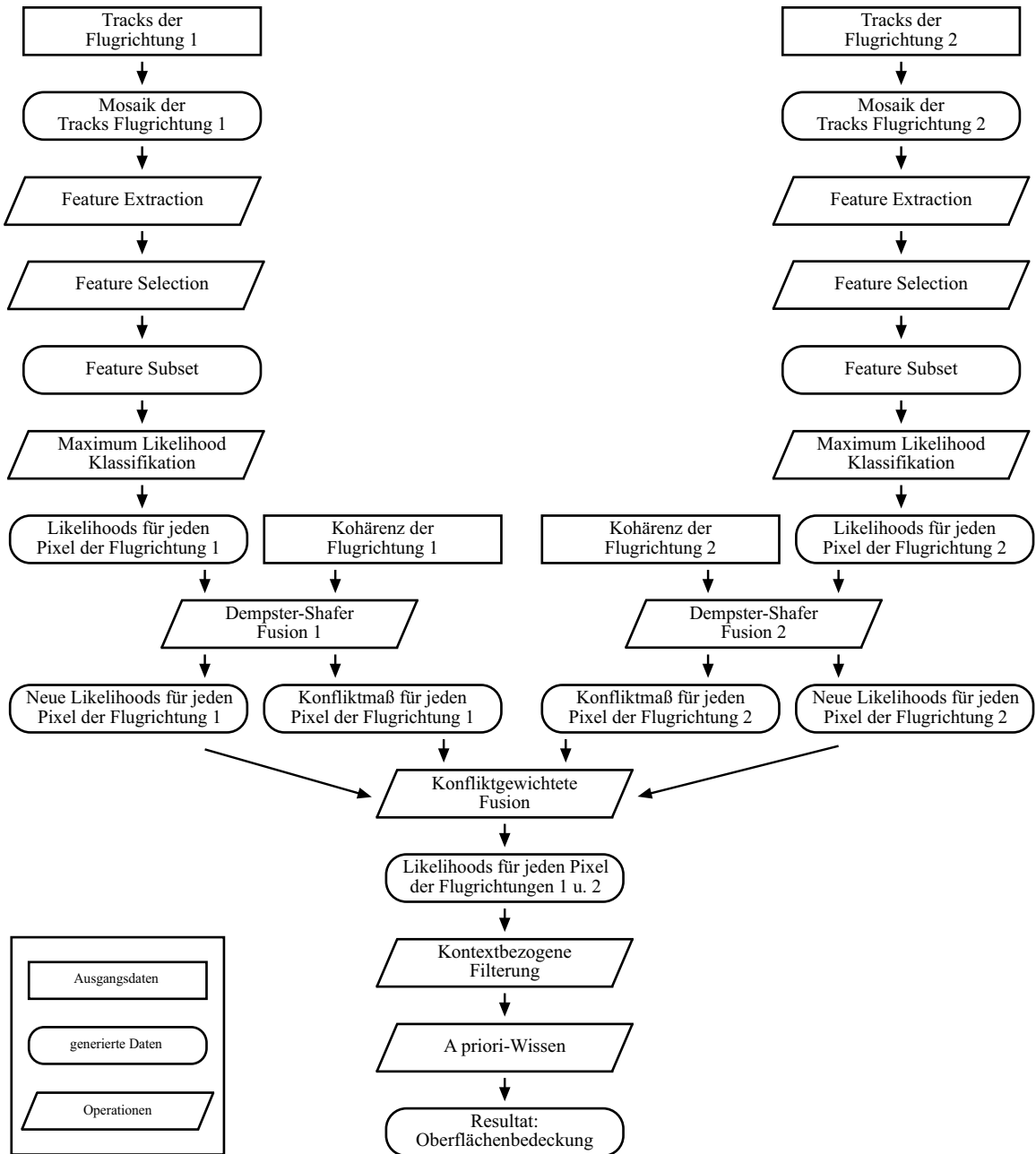


Abbildung 8-3. Klassifikationsalgorithmus Alternative 2.

Die Grundlage für Alternative 2 sind die auf der InSAR-Datenebene getrennt in beide Flugrichtungen erstellten Mosaik der entsprechenden Bildprodukte, wobei diese exakt dasselbe Gebiet abdecken. Wie für Alternative 1 beschrieben, folgen darauf für jede Flugrichtung die Schritte der Feature-Extraction bzw. -Selection, die in die jeweiligen Feature-Subsets münden, welche dann mittels dem Maximum-Likelihood-Algorithmus klassifiziert werden. Mittels des Dempster-Shafer-Algorithmus findet daraufhin die Fusion der

Klassenwahrscheinlichkeiten mit der dazugehörigen Kohärenz statt, was für jedes Pixel wiederum neue Evidenzen und ein Konfliktmaß zum Ergebnis hat. Aus diesen Informationsebenen beider Flugrichtungen wird dann eine Gesamtwahrscheinlichkeit für jedes Pixel errechnet. Der Zusammenschluss beider Flugrichtungen zu dieser Gesamtszene bzw.- aussage stützt sich nicht wie bei Alternative 1 auf die InSAR-Datenebene, sondern auf Kenntnisse aus den Maximum-Likelihood-Klassifikationen, dem Dempster-Shafer-Algorithmus und der konfliktgewichteten Fusion. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass mehr Informationsquellen für die Entscheidungsfindung der Klassenwahrscheinlichkeiten bzw. -zugehörigkeit eines jeden Pixel einbezogen werden. Analog zur Alternative 1 erfolgen die abschließenden Schritte der kontextbezogene Filterung sowie die Nutzung von a priori-Wissen.

8.2 Primäre Features

Nach der Datenaufbereitung stehen als Basis für die Weiterverarbeitung die jeweiligen SAR-Szenen-, Kohärenz- und DHM-Mosaik, im weiteren Primäre Features genannt, zur Verfügung. Die SAR-Szenen und die Kohärenz kommen dabei für die Methoden der Klassifikation bzw. die Wissensverschmelzung zur Anwendung, während das DHM nur in der letztgenannten Methode Verwendung findet.

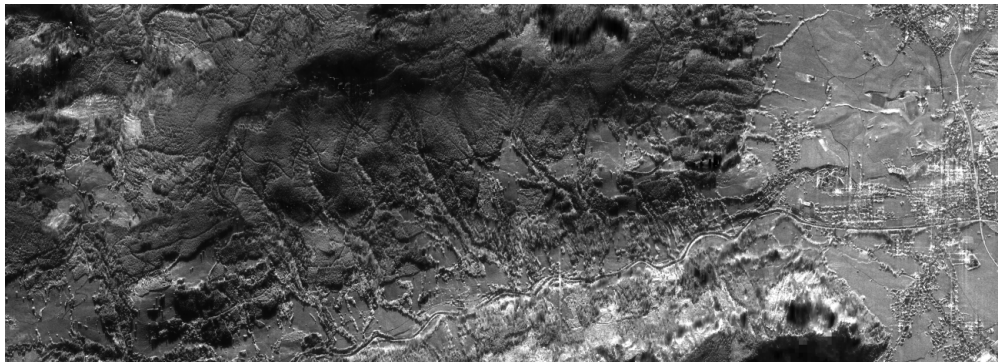


Abbildung 8-4. X-Band SAR-Szene des Edelsberggebietes als Beispiel eines Primären Features.



Abbildung 8-5. Kohärenz-Szene aus den X-Band-Daten der Abb. 8-4 als weiteres Primäres Feature.

8.3 Feature-Extraction

Die Generierung neuer Informationsebenen mittels einer Ableitung von Texturmerkmalen aus den primären Features wird als Feature-Extraction bezeichnet [Dutra99]. Diese Methode ist im Speziellen für SAR-Daten sinnvoll, da sich die Güte einer Interpretation erheblich steigert, wenn für die Klassifikation neben den primären Features zusätzlich textuelle Informationsebenen zur Verfügung stehen [SchistadSolberg97]. Die aus den primären Features bestehende Basis für die Modellgenerierung wird also um eine bestimmte Anzahl von verschiedenen Texturmerkmalen erweitert. Abbildung 8-6 stellt ein primäres Feature verschiedenen textuellen Informationsebenen gegenüber, die mit Hilfe unterschiedlicher texturanalytischer Verfahrensweisen abgeleitet wurden.

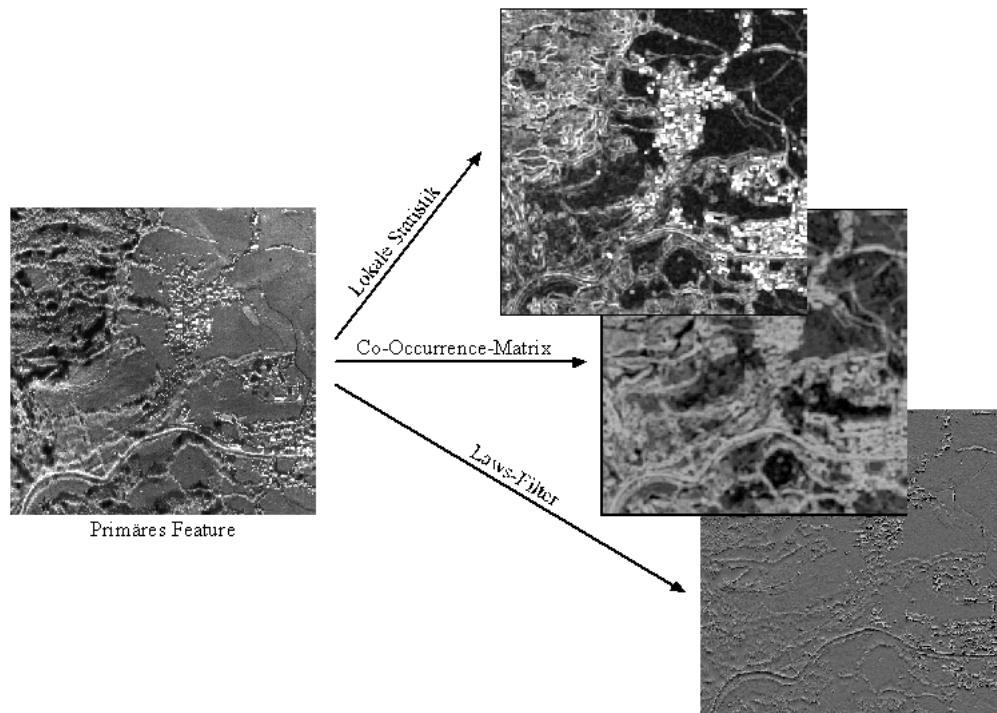


Abbildung 8-6. Primäres Feature und daraus abgeleitete textuelle Informationsebenen.

8.3.1 Texturanalyse

Jedes digitale Schwarzweiß-Bild ist zunächst aus endlich viel verschiedenen Grautönen zusammengesetzt, welche die tonalen Informationen des Bildes wiedergeben. Die Texturanalyse befasst sich nun mit den räumlichen bzw. statistischen Verteilungen dieser Grautöne. Tonale und textuelle Informationen bedingen sich gegenseitig und sind daher miteinander verbunden. Beide Ebenen sind in einem Bild immer präsent, obwohl eine Ebene die andere zeitweise dominieren kann [Haralick73]. Nach [Holecz93] weist eine lokale Fläche dann eine Textur auf, wenn die räumliche Anordnung ihrer Intensitätswerte eine bestimmte Regelmäßigkeit (z.B. fein, grob, glatt, körnig, linienhaft, uneinheitlich, scheckig, wellig) besitzt. Textuelle Informationen beinhalten generell wichtige Informationen über die Strukturierung von Formen und deren Beziehung zu ihrer Umgebung [Haralick73].

Die Ansätze zur Texturbeschreibung lassen sich im Ortsbereich in modellbasierte, statistische und strukturelle Modelle untergliedern [Huber99]. Aus diesen lässt sich letztendlich mittels zahlreicher Methoden, deren Beschreibungen sich u.a. in [Haralick79], [Holecz93], [Huber99] und [SchistadSolberg97] finden, die Textur analysieren. Im Folgenden wird auf die in dieser Arbeit verwandten Methoden der Lokalen Statistik und Co-Occurrence-Matrizen, die jeweils statistische Modelle repräsentieren, sowie die modellbasierten Laws-Filter näher eingegangen, da sich diese allesamt für SAR-Daten als sinnvoll erwiesen haben [Dutra98].

8.3.1.1 Lokale Statistik

Features der lokalen Statistik werden in einem $n \times n$ großen Fenster, das um ein Pixel p an der Position (x, y) zentriert ist, mittels verschiedener statistischer Parameter berechnet. Die Ableitung dieser Texturmerkmale erfolgt aus den lokalen Häufigkeitsverteilungen, so dass eine Aussage über die räumliche Verteilung der Grauwerte nicht möglich ist. Nachstehend sind die genutzten Parameter aufgelistet:

$$Is_1 - \text{Mittelwert } (x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i,j} p_{ij} = \bar{p} \quad (8-1)$$

$$Is_2 - \text{Median } (x, y) = \bar{x} \quad (8-2)$$

$$Is_3 - C_{var} (x, y) = s/\bar{p} \quad (8-3)$$

$$Is_4 - \text{Schiefe } (x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i,j} \left(\frac{p_{ij} - \bar{p}}{s} \right)^3 \quad (8-4)$$

$$Is_5 - \text{Kurtosis } (x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i,j} \left(\frac{p_{ij} - \bar{p}}{s} \right)^4 - 3 \quad (8-5)$$

$$Is_6 - \text{Kontrast } (x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i,j} \left(\frac{p_{xy} - p_{ij}}{\bar{p}} \right)^2 \quad (8-6)$$

$$Is_7 - \text{Homogenität } (x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i,j} \left(1 / \left(1 + \frac{p_{xy} - p_{ij}}{\bar{p}} \right)^2 \right) \quad (8-7)$$

$$Is_8 - \text{Spannweite } (x, y) = \max(p_{ij}) - \min(p_{ij}) \quad (8-8)$$

wobei s die lokale Standardabweichung ist. N steht für die Anzahl der Pixel im Berechnungsfenster, während (i, j) die relativen Koordinaten der Pixel in diesem repräsentieren.

Abbildung 8-7 zeigt von links nach rechts zuerst eine SAR-Szene, dann die Texturmerkmale Mittelwert, C_{var} und Homogenität, deren Ableitung in einem jeweils 7×7 Pixel großen Fenster erfolgte. Diese Fenstergröße wurde für die Generierung aller lokalen Statistik-Features in dieser Arbeit beibehalten.

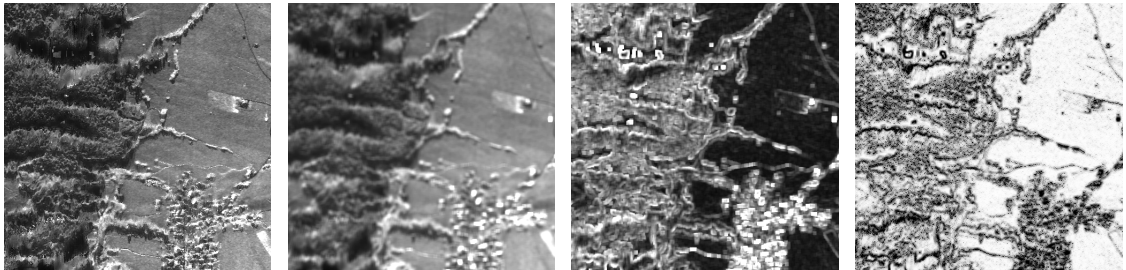


Abbildung 8-7. Feature-Extraction mittels lokaler Statistik. V. l. n. r.: SAR-Szene, Mittelwert, C_{var} und Homogenität.

8.3.1.2 Co-Occurrence-Matrix

Die Grauwert-Co-Occurrence-Matrizen (GLCM) [Haralick73] basieren auf der Schätzung der Verbundwahrscheinlichkeit zweiter Ordnung, welche eine Aussage über die räumliche Verteilung der Grauwerte ermöglicht, da die GLCM die Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens zweier Grauwerte an derselben bzw. nach Distanz und Richtung räumlich definierten benachbarten Pixelposition beschreiben. Jeder Eintrag $g(i, j|d, \alpha)$ in eine GLCM $G(d, \alpha)$ wird aus dem Originalgrauwertbild berechnet und bezeichnet die Anzahl der Pixelpaare mit den Grauwerten i und j , die einen bestimmten Abstand von d Pixel in einer Richtung α aufweisen. Eine GLCM-Matrix ist definiert als:

$$G(d, \alpha) = [g(i, j|d, \alpha)] \quad (8-9)$$

Abbildung 8-8 gibt ein Beispiel verschiedener Co-Occurrence-Matrizen, die aus den linken "Grauwerten" abgeleitet wurden.

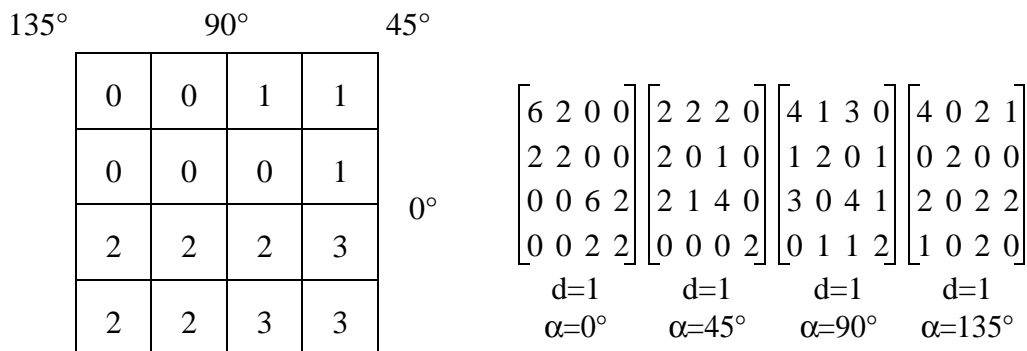


Abbildung 8-8. Co-Occurrence-Matrizen mit $d=1$ und unterschiedlichem α .

Um die beobachteten Häufigkeiten mit den empirischen Wahrscheinlichkeiten in Einklang zu bringen, werden die GLCMs zunächst normalisiert, um dann daraus die nachfolgend aufgeführten Texturmerkmale abzuleiten [Huber99], [DeKrueger94]:

$$co_1 - \text{Energy / Angular Second Moment } (x, y) = \sum_i \sum_j g_{ij}^2 \quad (8-10)$$

$$co_2 - \text{Entropy } (x, y) = \sum_i \sum_j -g_{ij} \log_2 g_{ij} \quad (8-11)$$

$$co_3 - \text{Maximum Probability } (x, y) = \max_{ij} \{g_{ij}\} \quad (8-12)$$

$$co_4 - \text{Contrast / Inertia } (x, y) = \sum_i \sum_j (i-j)^2 g_{ij} \quad (8-13)$$

$$co_5 - \text{Homogeneity / Inverse Difference Moment } (x, y) = \sum_i \sum_j \frac{1}{1+(i-j)^2} g_{ij} \quad (8-14)$$

$$co_6 - \text{Correlation } (x, y) = \frac{\sum_i \sum_j ij g_{ij} - \bar{i}\bar{j}}{\sigma_i \sigma_j} \quad (8-15)$$

$$co_7 - \text{Cluster Shade } (x, y) = \sum_i \sum_j ((i-\bar{i}) + (j-\bar{j}))^3 g_{ij} \quad (8-16)$$

$$co_8 - \text{Cluster Prominence } (x, y) = \sum_i \sum_j ((i-\bar{i}) + (j-\bar{j}))^4 g_{ij} \quad (8-17)$$

$$co_9 - \text{Inform. Correlation I } (x, y) = (\text{Entropy}(x, y) - H_1(x, y)) / (\max_{ij} \{H_i, H_j\}) \quad (8-18)$$

$$co_{10} - \text{Information Correlation II } (x, y) = \sqrt{1 - e^{-2(H_2(x, y) - \text{Entropy}(x, y))}} \quad (8-19)$$

wobei:

$$\text{Zeilenmittelwert } \bar{i} = \sum_i i \sum_j g_{ij} \quad (8-20)$$

$$\text{Spaltenmittelwert } \bar{j} = \sum_j j \sum_i g_{ij} \quad (8-21)$$

$$\text{Zeilenstandardabweichung } s_i = \sum_i (i - \bar{i})^2 \sum_j g_{ij} \quad (8-22)$$

$$\text{Spaltenstandardabweichung } s_j = \sum_j (j - \bar{j})^2 \sum_i g_{ij}$$

$$\text{Zeilensumme } g_i = \sum_j g(i, j) \quad (8-23)$$

$$\text{Spaltensumme } g_j = \sum_i g(i, j) \quad (8-24)$$

$$\text{Zeilenentropie } H_i = -g_i \log_2 g_i \quad (8-25)$$

$$\text{Spaltenentropie } H_j = -g_j \log_2 g_j \quad (8-26)$$

$$\text{Randentropie 1 } H_1(x, y) = -\sum_i \sum_j g(i, j) \log_2 g_i g_j \quad (8-27)$$

$$\text{Randentropie 2 } H_2(x, y) = -\sum_i \sum_j g_i g_j \log_2 g_i g_j \quad (8-28)$$

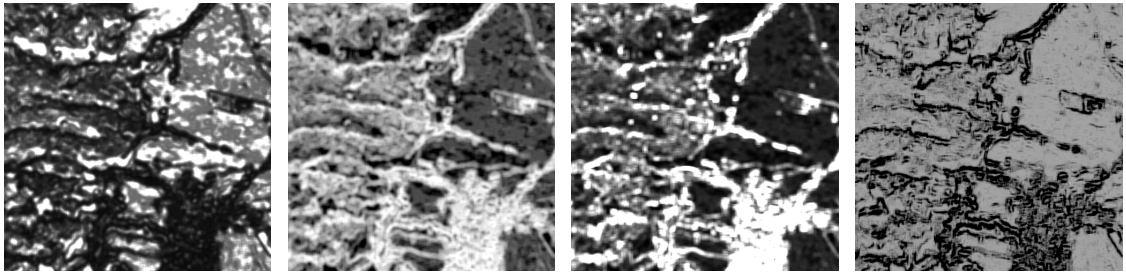


Abbildung 8-9. Feature-Extraction mittels Co-Occurrence-Matrizen. V. l. n. r.: Energy, Entropy, Contrast und Information Correlation I.

Obige Abbildung zeigt von links nach rechts die Co-Occurrence-Features Energy, Entropy, Contrast/Inertia und Information Correlation I. Wie für die gesamte Arbeit wurden diese mit $d=3$, einer Fenstergröße von 11×11 Pixel und dem Durchschnitt über die Winkel von 0° , 45° , 90° und 135° berechnet [Huber99].

8.3.1.3 Laws-Filter

Laws [Laws80] definiert als Grundlage für die Feature-Extraction verschiedene eindimensionale Filtersätze, die sowohl aus symmetrischen als auch asymmetrischen Filtern zusammengestellt sind. Abbildung 8-10 zeigt den für diese Arbeit angewandten Satz mit den fünf Filtern Level, Edge, Spot, Wave und Ripple.

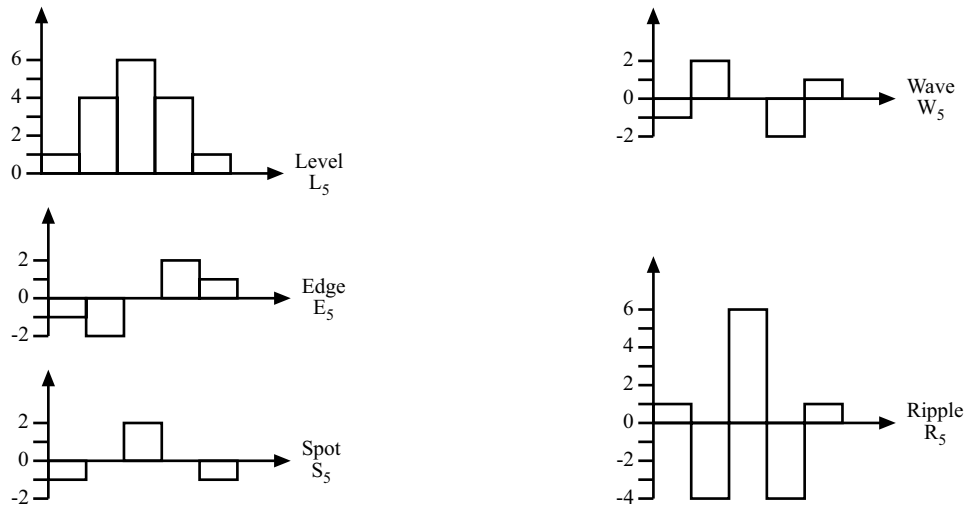


Abbildung 8-10. Laws-Filtersatz.

Mit Hilfe dieses in einem 5×5 Pixel großen Fenster operierenden Filtersatzes werden zunächst transformierte Bilder aus dem Originalbild abgeleitet. Hierbei folgt einer Faltung der Zeilen mit einem der eindimensionalen Filter die Faltung der Spalten mit dem transponierten des genutzten Filters. Es lassen sich somit eine Anzahl von 25 Bildern generieren, die in der Kombinationsmöglichkeit der Filter bezüglich der Spalten und der Zeilen begründet ist. Die eigentlichen Texturmerkmale werden dann aus den transformierten Bildern mit Hilfe der Messung der Texturenergie abgeleitet. Diese ist als die lokal aufsummierte absolute Filterantwort L definiert.

Das Beispiel $L_{L5 \times W5}$ zeigt die Notation der aus Laws-Filtern abgeleiteten Featur für diese Arbeit auf. In diesem Fall erfolgte die Faltung der Spalte mit dem Level- und die Faltung der Zeile mit dem transponierten Wave-Filter.

Abbildung 8-10 zeigt von links nach rechts die Laws-Filter-Texturmerkmale $L_{L5 \times L5}$, $L_{E5 \times E5}$, $L_{E5 \times W5}$ und $L_{S5 \times R5}$.

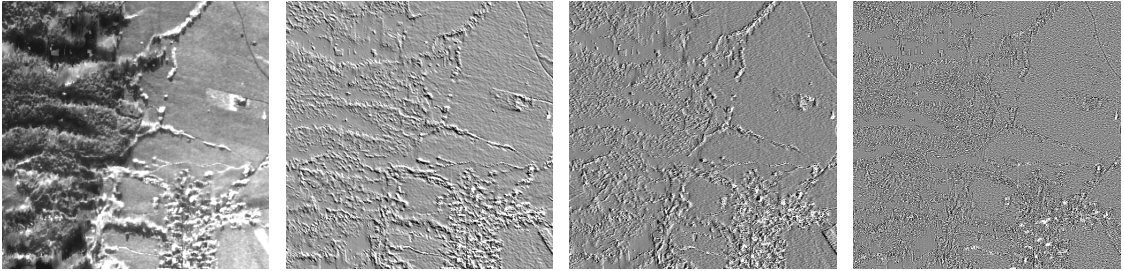


Abbildung 8-11. Feature-Extraction mittels Laws-Filter. V. l. n. r.: $L_{L5 \times L5}$, $L_{E5 \times E5}$, $L_{E5 \times W5}$ und $L_{S5 \times R5}$.

8.4 Feature-Selection

Nach der Feature-Extraction steht ein D -dimensionaler Feature-Set F , der sowohl die primären Features als auch die daraus abgeleiteten Texturmerkmale beinhaltet, für die Klassifikation zur Verfügung. Somit ist jede Stelle (x, y) der zu klassifizierenden Szene auf D verschiedene Arten beschrieben. Ist D im Verhältnis zu den Trainingspunkten jedoch zu hoch, nimmt die Güte der Klassifikation ab, da dann nur wenige Datenpunkte in einem hochdimensionalen Raum vorhanden sind und somit die Entscheidungsgrenzen unzuverlässig werden. Das kann bei der gewählten Anzahl von 300-500 Trainingspunkten bei $D \geq 9$ der Fall sein. Dieses Phänomen ist als “Curse of Dimensionality” bekannt [Bishop95] und wird in Abbildung 8-12 dargestellt. Auf der Abszisse ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Texturmerkmale und auf der Ordinate die dimensionslose statistische Trennbarkeit zwischen den Klassen aufgetragen. Vom 1. bis zum 9. Feature steigt die Klassentrennbarkeit kontinuierlich an, die dann allerdings durch das 10. Feature herabgesetzt wird. Das Mehr an Information führt hier also zu einer Verschlechterung der Klassentrennbarkeit, was letztendlich die Qualität der Klassifikation reduziert.

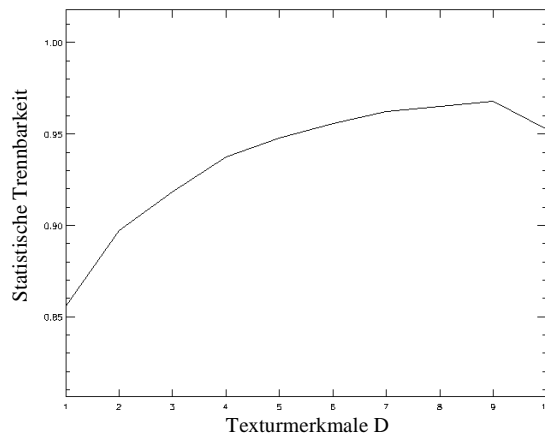


Abbildung 8-12. “Curse of Dimensionality”.

Aus dem Feature-Set F muss deshalb mittels Feature-Selection (Merkmalsauswahl) ein m -dimensionales Subset S gefunden werden, in dem $m < d$ gilt und das diejenigen Features zusammenstellt, welche die Separation der gewünschten Klassen möglichst optimal gewährleisten [Dutra99].

8.4.1 JM-Distance

Die Grundlage zur Lösung des oben beschriebenen Problems ist die Jeffreys-Matusita-Distanz (JMD) [Swain78], welche die statistische Trennbarkeit zwischen zwei Verteilungen misst. Für multivariate Gaußverteilungen ist die mittlere JMD zwischen den Klassen i und k gegeben durch:

$$\text{JMD} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{i-1} J_{ik} \quad (8-29)$$

$$J_{ik} = \sqrt{2(1 - e^{B_{ik}})} \quad (8-30)$$

mit der Anzahl von N -Klassen und der Battacharyya-Distanz B_{ik} :

$$B_{ik} = \frac{1}{8} (m_i - m_k)^t \Sigma^{-1} (m_i - m_k) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|\Sigma|}{|\Sigma_i|^{1/2} |\Sigma_k|^{1/2}} \right) \quad (8-31)$$

und

$$\Sigma = \frac{\Sigma_i + \Sigma_k}{2} \quad (8-32)$$

wobei m_i, m_k die Vektoren der Mittelwerte der Klassen und Σ_i, Σ_k die Kovarianzmatrizen der Klassen darstellen.

Die Höhe des durchschnittlichen JMD-Wertes eines Features gibt dann Auskunft darüber, wie gut sich die gewünschten Klassen voneinander trennen lassen, wobei gilt, dass ein höherer Wert eine bessere Separierung bedingt. Die JMD ist auch dann als Maß für die Trennbarkeit geeignet, wenn die Gaußverteilung nur approximiert ist, wie dies bei einigen Texturmerkmalen der Fall sein kann [Huber98b].

8.4.2 Ranking und Multistage-Selection

Die SAR-Szene, die daraus abgeleiteten 8 lokalen Statistik-, 10 Co-Occurrence- und 25 Laws-Texturmerkmale, sowie die Kohärenz-Szene und die daraus abgeleiteten 5 lokalen Statistik Features setzen den jeweiligen Feature-Set F mit $D = 50$ zusammen. Mit Hilfe eines Ranking-Verfahrens, das auf den Werten der JMD-Distanz beruht, bzw. einer Multistage-Selection wird dann aus diesem Feature-Set F das für die Klassifikation zu nutzende Subset S mit einer Dimensionalität von $8 \leq m \leq 12$ ausgewählt. Das noch näher zu beschreibende Ranking-Verfahren benötigt für eine direkte Ableitung von S aus F eine Anzahl von 2^D Vergleichsoperationen, die den möglichen Kombinationen der Features untereinander entsprechen. In diesem Fall sind das $2^{50} = 1\,25\,900\,000\,000\,000$ Vorgänge, welche eine effiziente Berechnung praktisch unmöglich machen. Um diese zu gewährleisten, sollte die Dimension eines auszuwertenden Feature-Sets $D=10$ nicht überschreiten

[Huber99]. Daher wird eine Multistage-Selection, die aus folgenden Schritten besteht, eingeführt:

1. F wird in 6 Subset $T_1 \dots T_6$ aufgeteilt, wobei:
 - T_1 : SAR – Szene \cup $ls_1 \dots ls_8$ aus der SAR-Szene
 - T_2 : $co_1 \dots co_{10}$ aus der SAR-Szene
 - T_3 : $L_{L5} \times L_{L5} \dots L_{L5} \times L_{R5} \cup L_{E5} \times L_{L5} \dots L_{E5} \times L_{R5}$ aus der SAR-Szene
 - T_4 : $L_{S5} \times L_{L5} \dots L_{S5} \times L_{R5} \cup L_{W5} \times L_{L5} \dots L_{W5} \times L_{R5}$ aus der SAR-Szene
 - T_5 : $L_{R5} \times L_{L5} \dots L_{R5} \times L_{R5}$ aus der SAR-Szene
 - T_6 : Kohärenz–Szene \cup $ls_2, ls_3, ls_4, ls_5, ls_7$ aus der Kohärenz-Szene
2. Selektion der 2-4 besten Features aus $T_1 \dots T_4$
3. Selektion des besten Feature aus T_5
4. Selektion der 2-4 besten Features aus T_6
5. Bildung des Subset TS aus den in Schritt 2-4 selektierten Features
6. Selektion der 8-12 besten Features aus TS, welche das gesuchte Subset S bilden.

Da S nicht direkt aus F abgeleitet ist, also nicht alle Features unmittelbar miteinander verglichen wurden, ist diese Lösung als nicht optimal anzusehen. Es besteht hier die Möglichkeit, dass zwei selektierte Features aus beispielsweise T_2 und T_6 die Klassentrennbarkeit wieder herabsetzen. Diese Methode, die die suboptimale Annahme der Verschmelzung guter Mengen zugrunde liegt, ist jedoch als gangbarer Kompromiss zwischen einer effizienten Berechnung und der Güte der Feature-Selection zu betrachten.

Das Ranking-Verfahren, welches die jeweils besten Features aus den Subsets $T_1 \dots T_6$ selektiert, setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Am Beispiel von T_2 wird erläutert, wie sich die Kombination der besten drei Features ermitteln lässt:

1. Für jedes Feature des Subsets wird die mittlere JMD berechnet und mit einem Wert zwischen $[0, \dots, 1]$ belegt [Huber98b]. Dieser Wert ist ein Indikator dafür, wie das jeweilige Feature, bezogen auf das gesamte Subset, die gewünschten Klassen voneinander trennt. Je höher der Wert dabei ist, desto besser ist die Klassentrennbarkeit.

Feature 1: 0.7619	Feature 6: 0.5333
Feature 2: 0.8599	Feature 7: 0.6986
Feature 3: 0.6940	Feature 8: 0.6134
Feature 4: 0.6222	Feature 9: 0.5721
Feature 5: 0.8675	Feature 10: 0.6071

2. In einer Matrix werden die 10 besten Kombinationsmöglichkeiten dargestellt.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Die Zeilen geben hier die Kombinationen 1-10 an und in der jeweiligen Spalte ist mit 1 bzw. 0 gekennzeichnet, ob ein Feature enthalten ist oder nicht.

3. Ferner wird ermittelt, wie oft jedes Feature in der Matrix enthalten ist.

Feature 1: 3	Feature 6: 0
Feature 2: 7	Feature 7: 3
Feature 3: 3	Feature 8: 1
Feature 4: 1	Feature 9: 1
Feature 5: 10	Feature 10: 1

4. Die mittlere JMD für jede der 10 besten Kombinationsmöglichkeiten wird sowohl numerisch als auch grafisch ausgegeben.

Kombination 1: 0.9712	Kombination 6: 0.9614
Kombination 2: 0.9648	Kombination 7: 0.9600
Kombination 3: 0.9643	Kombination 8: 0.9554
Kombination 4: 0.9628	Kombination 9: 0.9550
Kombination 5: 0.9621	Kombination 10: 0.9523

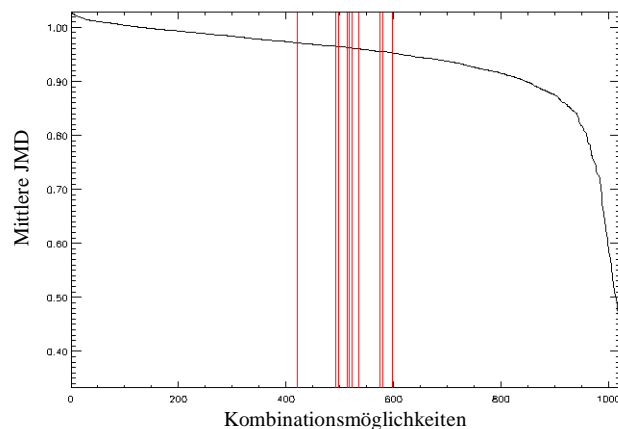


Abbildung 8-13. Grafische Ausgabe zum 4. Schritt des Ranking-Verfahrens (siehe dazu Seite 87).

In Abbildung 8-13 ist auf der Abszisse die Reihenfolge der 2^{10} Kombinationsmöglichkeiten bzgl. ihrer Wertigkeit eingetragen; wobei die erste Stelle beispielsweise mit der Kombination der besten 9 Features erreicht wird. Der Ordinate ist die mittlere JMD zu entnehmen. Die rot markierten Striche geben demnach die mittlere JMD an der jeweils vorgeschlagenen Kombinationsmöglichkeit an.

Die Entscheidung für die drei geeignetsten Features wird dann vom Nutzer unter Einbeziehung aller Schritte des Ranking-Verfahrens getroffen. In diesem Fall sind es die Features 1, 2 und 4.

8.5 Klassifikation

Für jedes Mosaik aus Tabelle 6-4 steht nun das entsprechende m-dimensionale Subset S, wie beispielsweise $S_{\text{Edelsberg1}}$, für eine Klassifikation der Oberflächenbedeckung zur Verfügung. Für die Kategorisierung der Daten werden der parametrische Maximum-Likelihood-Klassifikator (MLK), Methoden zur Wissensverschmelzung, wie der Dempster-Shafer-Algorithmus, eine kontextbezogene Klassifikation bzw. eine konfliktgewichtete Fusion und das Einbringen von a priori-Wissen als Vertreter von Experten-Systemen genutzt. Im Anschluss findet die nähere Betrachtung dieser Methoden statt.

8.5.1 Maximum-Likelihood-Klassifikator



Abbildung 8-14. Prozesskette vom Subset S zu MLK-Resultaten.

Abbildung 8-14 zeigt schematisch den vereinfachten Verlauf einer Maximum-Likelihood-Klassifikation. Jedes Pixel der zu kategorisierenden SAR-Szene ist zunächst an der Position (x, y) m-mal durch das Feature-Subset S beschrieben. Aufgrund dessen kann die Szene an der jeweiligen Position durch einen m-dimensionalen Vektor \vec{X} wie folgt repräsentiert werden:

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}, \text{ wobei } x_m \text{ mit dem } m\text{'ten Feature des Subsets S korrespondiert.}$$

Der MLK ordnet dann, mittels der aus den Vektoren gewonnenen Informationen, jedes Pixel einer von mehreren vorher ausgesuchten Klassen zu oder gibt an, mit welchen Wahrscheinlichkeiten das Pixel zu den entsprechenden Klassen gehört.

Die Ergebnisfindung des MLK ist demzufolge in zwei Schritte, die auch für andere Klassifikationsalgorithmen Gültigkeit besitzen, unterteilt [Swain78]:

1. Die Charakterisierung der Klassen durch eine Datenanalyse der Klassenrepräsentanten.
2. Die verbleibenden Daten werden nach numerischen Regeln, welche die Charakteristik der Klassen unterstützen, klassifiziert.

Bezüglich Punkt eins erfolgt zunächst die Definition von Trainingsgebieten, indem für die jeweilige Klasse charakteristische Pixel bzw. Vektoren selektiert werden. Die m -dimensionalen Vektoren \vec{X} bilden nun einen ebenfalls m -dimensionalen Merkmalsraum. Die Abbildung 8-15 zeigt einen zweidimensionalen Merkmalsraum, welcher die repräsentativen Messwerte dreier Klassen aus den zwei Features x_1 und x_2 des Subsets S darstellt. Die Werte der einzelnen Objektklassen liegen dabei in verschiedenen Bereichen des Merkmalsraumes. Die verschiedenen Einzelmessungen jeder Klasse fallen jedoch nicht in einem Punkt zusammen, sondern bilden aufgrund natürlicher, individueller Unterschiede bzw. systemimmanentem Rauschens einen Punkthaufen, der die entsprechende Objektklasse charakterisiert. Klassen sind grundsätzlich nur dann voneinander diskriminierbar, wenn sie einen mehr oder weniger deutlich ausgeprägten Punkthaufen bilden. Schließlich werden mittels der Vektoren der Klassenrepräsentanten Diskriminanzfunktionen gefunden [Swain78], die den Merkmalsraum in Entscheidungsgrenzen bzw. -regionen, die jeweils einer diskriminierbaren Klasse entsprechen, aufteilen (Abbildung 8-16) [Albertz01].

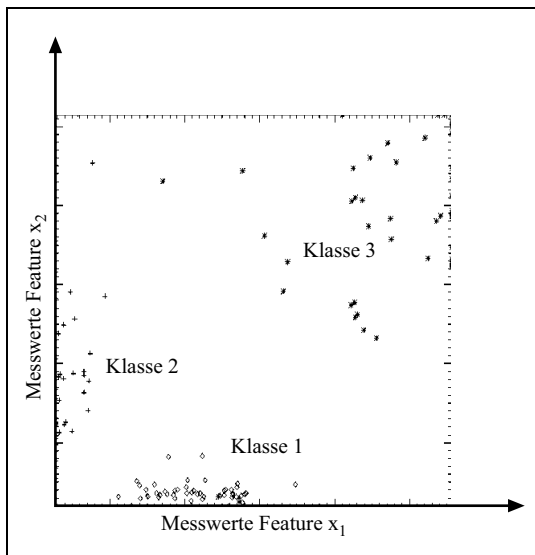


Abbildung 8-15. Klassenrepräsentanten.

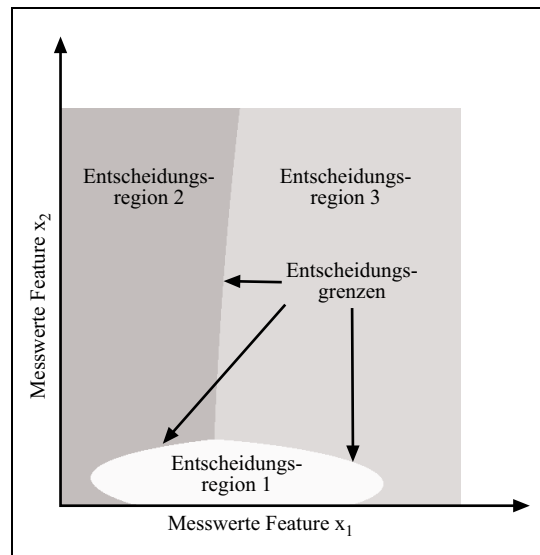


Abbildung 8-16. Entscheidungsregionen.

Im 2. Schritt berechnet der MLK aufgrund statistischer Kenngrößen aus den n vorgegebenen Objektklassen die Zugehörigkeit der verbleibenden Daten zu einer dieser Klassen. Dabei wird jedes Pixel mit seinem entsprechendem Vektor \vec{X} der Klasse Θ_j wie folgt zugeordnet:

$$\vec{X} \in \Theta_j, \text{ wenn } g_j(\vec{X}) > g_k(\vec{X}) \text{ für alle } j \neq k \quad (8-33)$$

wobei $j, k = 1, \dots, n$ und g_j, g_k Diskriminanzfunktionen für multivariate Gaußverteilungen beschreiben.

Des Weiteren kann der MLK auch die Wahrscheinlichkeiten L_1 für jedes Pixel p angeben, mit der es zu den verschiedenen Klassen gehört. Für eine ausführliche statistische Beschreibung des Verfahrens sei u.a. auf [Swain78] und [Huber99] verwiesen.

8.5.2 Dempster-Shafer-Evidenztheorie

Die Dempster-Shafer-Evidenztheorie (DSET) [Dempster68], [Shafer76] und [Klein93] basiert im Wesentlichen zunächst darauf, verschiedene Daten, die zur Lösung einer Problemstellung beitragen, zusammenzutragen, ihnen dann Evidenzwerte zuzuordnen, um sie schließlich zu einer Gesamtevidenz zu kombinieren.

In der DSET sind dabei alle möglichen Antworten bezüglich der Problemstellung im Diskursbereich Ω zusammengefasst. Jeder Teilmenge aus dem Diskursbereich ist eine Bewertungsfunktion m zugeordnet, welche in ihrer Wertigkeit die jeweilige Hypothese mehr oder weniger stark unterstützt. Die Bewertungsfunktion $m(A)$ einer Teilmenge $A \subset \Omega$ ist gegeben mit:

$$2^\Omega \rightarrow [0, 1], \text{ wobei } m(\emptyset) = 0 \text{ und } \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1 \quad (8-34)$$

Die Kombination von n Bewertungsfunktionen wird wie folgt durch die Bildung der orthogonalen Summe durchgeführt:

$$m(\emptyset) = 0, m(C) = \frac{1}{1-k} \sum_{B_1 \cap B_2 \dots \cap B_n = C} m_1(B_1)m_2(B_2)\dots m_n(B_n) \quad (8-35)$$

wobei $A, B_1, B_2, \dots, B_n \in \Omega$. Das Konfliktmaß k , welches den Konflikt zwischen den Bewertungsfunktionen misst, ist definiert durch:

$$k = \sum_{B_1 \cap B_2 \dots \cap B_n = \emptyset} m_1(B_1)m_2(B_2)\dots m_n(B_n) \quad (8-36)$$

mit $k < 1$, da der Fall $k = 1$ den totalen Konflikt zwischen den Bewertungsfunktionen bedeutet und eine Kombination dieser unmöglich macht.

Die DSET kommt in dieser Arbeit zur Anwendung, um die Wahrscheinlichkeiten bzw. Evidenzen L_1 mit der Kohärenz zu neuen Evidenzen L_2 zu kombinieren. Die Kohärenz wird dabei als Expertenwissen dahingehend genutzt, dass die Entsprechung von bestimmten Kohärenzbereichen zu bestimmten Oberflächenbedeckungen bekannt ist. Hohe bzw. stabile Kohärenzbereiche repräsentieren Objekte wie Siedlung, Bahnschienen oder offene Flächen, während niedrige bzw. un stabile Kohärenzbereiche für Objekte wie Wald, Gewässer, Schnee, Straßen oder auch Shadow- und Layoverflächen stehen. Die Kohärenz

kann somit die Wahrscheinlichkeiten bzw. Evidenzen L_1 der verschiedenen Klassen entweder unterstützen oder abschwächen und somit zu exakteren Evidenzen L_2 beitragen.

Mit einer konfliktgewichteten Methode werden schließlich die Evidenzen L_2 sowie das Konfliktmaß k aus jeder Befliegungsrichtung zu einer neuen Gesamtaussage für jedes Pixel p fusioniert, die sich dabei aus dem Maximum folgender Werte ergibt:

$$(m_3 \text{Edelsberg}_1 \cdot (1 - k \text{Edelsberg}_1); m_3 \text{Edelsberg}_2 (1 - k \text{Edelsberg}_2)) \quad (8-37)$$

Das Pixel p wird also der Objektklasse, die den maximalen Wert aufweist, zugewiesen. Die für eine spätere kontextbezogene Filterung benötigten Wahrscheinlichkeiten L_3 sind hierbei aus den beiden L_2 zusammengesetzt. An Stelle (x, y) wird das Ergebnis desjenigen L_2 übernommen, in dem der ermittelte maximale Wert enthalten ist. Die Summe der einzelnen Evidenzen ergibt sich an jeder Stelle somit wieder zu 1.

Mit der DSET und der konfliktgewichteten Fusion sind Methoden gegeben, zwei Befliegungsrichtungen auf der Wahrscheinlichkeitsebene unter der Zuhilfenahme von Expertenwissen zu fusionieren. Dies dient sowohl dazu, verbleibende Reliefeinflüsse auf die Aufnahmegeometrie zu minimieren als auch unsicheres Wissen zu reduzieren und somit zu einer möglichst zuverlässigen Gesamtwahrscheinlichkeit zu gelangen.

Zu den oben genannten Ausführungen ist im Folgenden ein Beispiel gegeben, wie die Klassenzugehörigkeit eines Pixels p an der Stelle (x, y) aus den Informationsebenen der zwei Flugrichtungen ermittelt wird.

Im Diskursbereich $\Omega = \{\text{Wald, offene Fläche, Siedlung}\}$ sind zunächst die drei zur Auswahl stehenden Klassen definiert. Die ML-Klassifikation ergibt für diese Flugrichtung, dass es sich relativ sicher um eine offene Fläche handelt, und auch die Kohärenz weist das Pixel klar dem stabilen Bereich offene Fläche bzw. Siedlung zu.

$$\begin{aligned} m_1 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Wald}\}) &= 0.10 & m_2 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Wald}\}) &= 0.10 \\ m_1 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Fläche}\}) &= 0.55 & m_2 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Fläche, Siedlung}\}) &= 0.90 \\ m_1 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Siedlung}\}) &= 0.35 \end{aligned}$$

Daraus ergeben sich nach der Anwendung der DSET die neue Masse $m_3 \text{Edelsberg}_1$ und das dazugehörige Konfliktmaß $k \text{Edelsberg}_1$, wobei die Entscheidung für die offene Fläche bei einem geringen k aufgewertet wird.

$$\begin{aligned} m_3 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Wald}\}) &= 0.012195 \\ m_3 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Fläche}\}) &= 0.603659 \\ m_3 \text{Edelsberg}_1 (\{\text{Siedlung}\}) &= 0.384146 \\ \text{mit } k \text{Edelsberg}_1 &= 0.18 \end{aligned}$$

Bei der zweiten Flugrichtung ist die Entscheidung weder bei der ML-Klassifikation noch bei der Kohärenz-Information eindeutig.

$$\begin{aligned} m_1 \text{Edelsberg}_2 (\{\text{Wald}\}) &= 0.35 & m_2 \text{Edelsberg}_2 (\{\text{Wald}\}) &= 0.40 \\ m_1 \text{Edelsberg}_2 (\{\text{Fläche}\}) &= 0.20 & m_2 \text{Edelsberg}_2 (\{\text{Fläche, Siedlung}\}) &= 0.60 \\ m_1 \text{Edelsberg}_2 (\{\text{Siedlung}\}) &= 0.45 \end{aligned}$$

Mittels der DSET ergibt sich dann, allerdings bei einem hohen Konfliktmaß, eine Aussage für die Siedlung als Klassenzugehörigkeit.

$$m3 \text{ Edelsberg}_2 (\{\text{Wald}\}) = 0.264151$$

$$m3 \text{ Edelsberg}_2 (\{\text{Fläche}\}) = 0.226415$$

$$m3 \text{ Edelsberg}_2 (\{\text{Siedlung}\}) = 0.509434$$

$$\text{mit } k \text{ Edelsberg}_2 = 0.47$$

Die Fusion der Informationsebenen $m3 \text{ Edelsberg}_1$, $k \text{ Edelsberg}_1$, $m3 \text{ Edelsberg}_2$ und $k \text{ Edelsberg}_2$ nach Gleichung 7-38 ergibt zunächst neue Wahrscheinlichkeiten, wobei das Pixel abschließend der Klasse mit der maximalen Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird.

$$\text{Edelsberg}_1 (\{\text{Wald}\}) = 0.140$$

$$\text{Edelsberg}_2 (\{\text{Wald}\}) = 0.010$$

$$\text{Edelsberg}_1 (\{\text{Fläche}\}) = 0.120$$

$$\text{Edelsberg}_2 (\{\text{Fläche}\}) = 0.495$$

$$\text{Edelsberg}_1 (\{\text{Siedlung}\}) = 0.270$$

$$\text{Edelsberg}_2 (\{\text{Siedlung}\}) = 0.315$$

In diesem Beispiel wird das Pixel schließlich der Objektklasse offene Fläche zugeordnet.

Die Abbildungen 8-17 und 8-18 zeigen für die jeweilige Befliegungsrichtung die SAR-Szene, das daraus gewonnene Klassifikationsergebnis L_1 sowie die Kohärenz bzw. die inverse Kohärenz. Die beiden letztgenannten Datensätze unterstützen dabei die Wahrscheinlichkeiten der mit den jeweiligen stabilen bzw. unstabilen Kohärenzbereichen korrespondierenden Klassen. Da eine Visualisierung der Wahrscheinlichkeiten L_1 nicht anschaulich ist, sind stattdessen die Klassenzugehörigkeiten dargestellt.

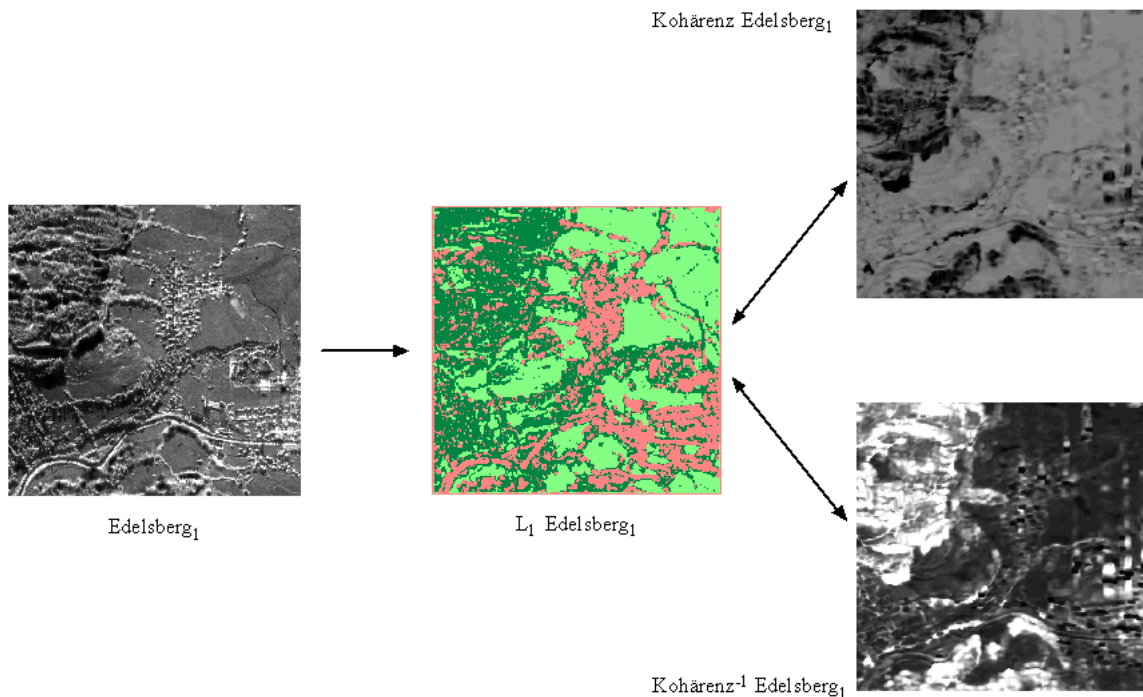


Abbildung 8-17. Ausschnitt Edelsberg, Flugrichtung West-Ost.

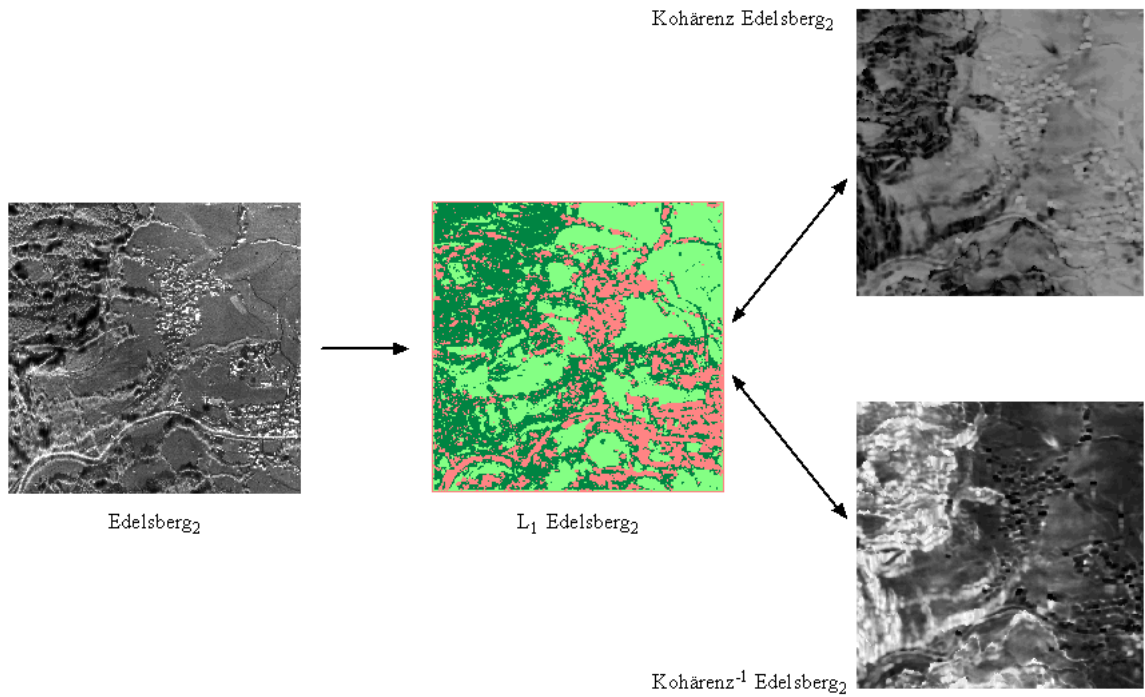


Abbildung 8-18. Ausschnitt Edelsberg, Flugrichtung Ost-West.

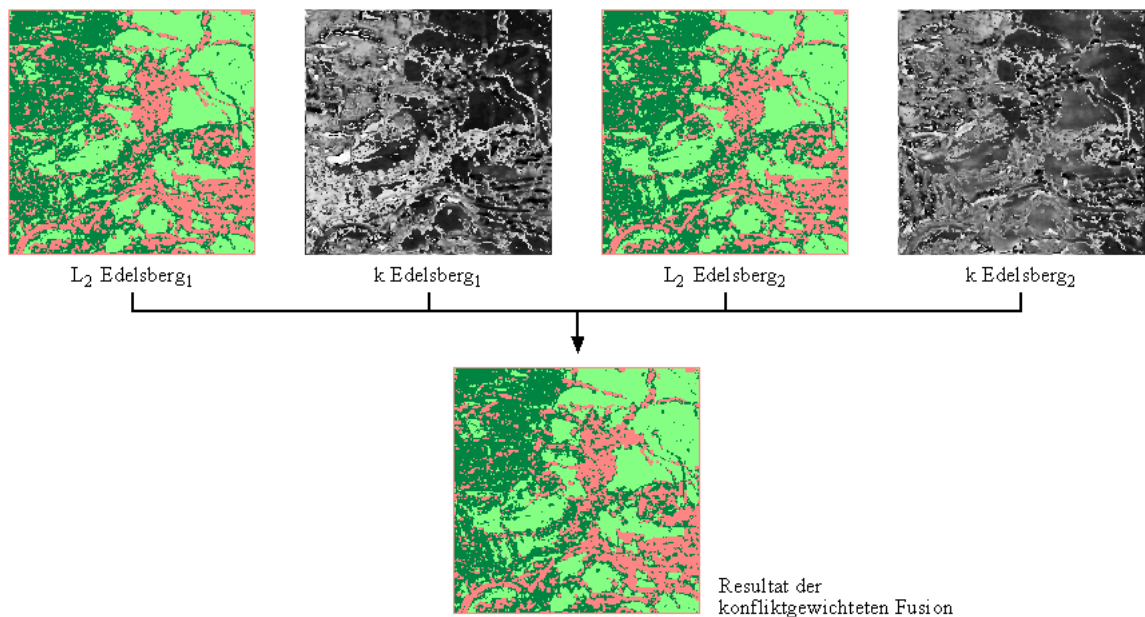


Abbildung 8-19. Ergebnisse der DSET und der konfliktgewichteten Fusion.

Abbildung 8-19 zeigt zunächst die den Befliegungsrichtungen entsprechenden L₂ bzw. k als Ergebnisse der DSET und schließlich das Resultat der konfliktgewichteten Fusion.

8.5.3 Kontextbezogene Filterung

Eine weitere Verbesserung des Klassifikationsresultats lässt sich erreichen, wenn der räumliche Kontext des jeweils in Frage kommenden Pixels in einem Fenster bestimmter Größe betrachtet wird. Die in dieser Arbeit verwendete kontextbezogene Filterung setzt sich aus folgenden Schritten zusammen [Huber98a]:

1. Klassifikation mit einer der diskutierten Methoden und Ausgabe der:

1a. Klassenwahrscheinlichkeiten für jedes Pixel p an Stelle (x, y) mit:

$$p(\vec{X}|\Theta_j)$$

1b. Klassenzugehörigkeiten für jedes Pixel mit:

$$p(\Theta_j)$$

2. Reklassifikation mit der Bayeschen Formel unter Einbeziehung des Potts-Modells, welches die Klassenwahrscheinlichkeiten und -zugehörigkeiten in einem 5×5 Pixel großen Fenster nach folgendem Prinzip miteinander kombiniert [Besag86]:

$$p(\Theta_j|\vec{X}) = p(\vec{X}|\Theta_j)p(\Theta_j) \quad (8-38)$$

3. Wiederholung von Punkt 2 mit den jeweils neuen Klassenzugehörigkeiten, bis die gewünschte Anzahl von Iterationen bzw. ein exakteres Klassifikationsergebnis erreicht ist.

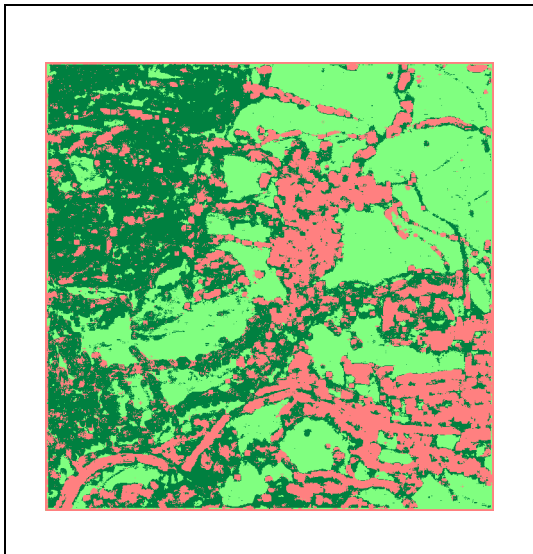


Abbildung 8-20. Konfliktgewichtete Fusion.

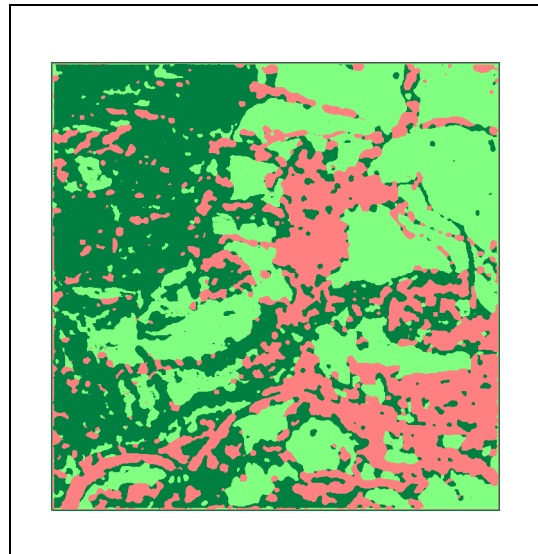


Abbildung 8-21. Kontextbezogene Filterung.

Die vorhergehenden Abbildungen stellen das Ergebnis einer konfliktgewichteten Fusion dem einer kontextbezogenen Filterung gegenüber. Dabei ist zu erkennen, dass es durch die Filterung zur Eliminierung kontextuell unwahrscheinlicher Pixel kommt, was somit zu einem homogeneren bzw. exakteren Ergebnis führt.

8.5.4 A priori-Wissen

Abschließend erfolgt unter Einbringung von a priori-Wissen (= Geländekenntnis) und unter Verwendung des DHMs die Untersuchung des Klassifikationsergebnisses in Bezug zur absoluten Höhe. Das a priori-Wissen äußert sich hier in der Kenntnis des Nutzers darüber, dass bestimmte Objektklassen in bestimmten Höhenstufen der Testgebiete nicht vorkommen können. So existieren beispielsweise in der alpinen Stufe der Ostalpen keine Bäume oder Gruppensiedlungen. Treten dahingehend Fehlklassifikationen auf, wie das aufgrund der spektralen Ähnlichkeit von steilen Felswänden mit Häusern der Fall sein kann, so wird das unrichtig kategorisierte Pixel entweder als falsch ausgewiesen oder einer dem Kontext entsprechenden Klasse zugewiesen.

9 Einsatzmöglichkeiten des InSAR-Modells in der Gebirgskartographie

Nachdem vorangehend die Erstellung des InSAR-Modells abgehandelt wurde, setzt sich dieses Kapitel sowohl mit der singulären als auch mit der zusammenhängenden Betrachtung der Modelleigenschaften Höhe, Relief und Oberflächenbedeckung sowie mit den daraus erstellten Karten in Relation zur Gebirgskartographie auseinander. Für jedes Testgebiet erfolgt dabei zunächst die qualitative Beurteilung des InSAR- gegenüber dem jeweiligen Referenzmodell mittels Klassifikations- und DHM-Analysen, unter Einbeziehung der im Anhang diskutierten Geländeprofile und DHM-Betrachtungen an geomorphologisch charakteristischen Gebieten. Im weiteren werden dann Inhalt und daraus folgende Darstellungskriterien der aus dem Modell abgeleiteten topographischen, Expositions- und Neigungskarten erörtert. Anhand der genannten Aspekte wird resümiert, inwieweit das Modell bzw. die Karten das Wesen des jeweiligen Landschaftstyps wiedergeben und somit die Fragestellung dieser Arbeit gelöst ist. Die gewonnenen Kenntnisse aus allen drei Testgebieten münden abschließend in einem Fazit für den Einsatz von InSAR-Daten in der Gebirgskartographie.

9.1 Edelsberg

Für die nachfolgenden Betrachtungen stehen die DHMs Edelsberg₁, Edelsberg₂ und Edelsberg₃ sowie die Resultate der Klassifikationsalgorithmen eins und zwei, im weiteren Edelsberg_{Klass1} bzw. Edelsberg_{Klass2} genannt, zur Verfügung. Als Grundlage für die Bodenreferenz dienen ATKIS 25 (Vorstufe)- und DGM 25-Daten [AdV89] des Bayerischen Landesvermessungsamtes aus dem Jahr 1998. Aus diesen Grundlagendaten entstand zum einen ein Datensatz mit den Klassen Wald, offene Fläche, Verkehrswege und Siedlung. Zum anderen wurde das 50 Meter Messpunktgitter des DGM 25 auf die Rasterweite der InSAR-Daten von 2×2 Metern mit der in Arc/View implementierten Spline-Methode interpoliert. Die aus der Interpolation zwischen den Messpunkten gewonnenen Höheninformationen stellen Schätzwerte dar, deren Höhengenaugigkeit im Regelfall sicherlich schlechter ist als die der eigentlichen Messpunkte. Diese Qualitätsminderung des Referenz-Modells wird jedoch in Kauf genommen, um einen flächen- bzw. linienhaften Vergleich mit den InSAR-Daten zu ermöglichen. Des Weiteren steht für den visuellen Vergleich noch die Kartenprobe "Formen im Flysch, begrenzt von schärferen Formen im Kalk, Edelsberg, westlich Pfronten im Allgäu" [Hofmann70] zur Verfügung.

9.1.1 Modellanalyse

Die Analyse der Modelleigenschaften erfolgt getrennt nach den Aspekten Relief und kartographische Situation.

9.1.1.1 Relief

Der erste Schritt der Modellanalyse befasst sich nun mit der Beurteilung der keinen Post-processing-Schritten unterzogenen InSAR-DHMs Edelsberg₁, Edelsberg₂ und Edelsberg₃ gegenüber den Referenzdaten. Dabei ist zum einem die bereits beschriebene Methode der Generierung der Bodenreferenz und zum anderen die Tatsache, dass es sich bei dieser um ein in Kapitel 7.1 definiertes DGM handelt, zu berücksichtigen. Die Tabelle 9-1 gibt zunächst Auskunft über die minimalen bzw. maximalen Abweichungen des jeweiligen InSAR- gegenüber dem Referenz-DHM. Des Weiteren findet sich darin die Information, zu wieviel Prozent sich die Höhen des InSAR-DHM unter oder über denen der Referenz bewegen. Sowohl für den negativen als auch den positiven Bereich ist abschließend der Mittelwert der Differenz in Meter und die dazugehörige Standardabweichung angegeben. Da die Höhen der nicht-reliefbezogenen Objekte bei dem Vergleich eines DOMs mit einem DGM in die Statistik mit eingehen, ist diese Unterscheidung für eine Aussage bezüglich der Qualität des InSAR-Modells sinnvoll.

Tabelle 9-1. Differenzmodellanalyse Gebiet Edelsberg.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Edelsberg ₁ -Ref.	-63, 3 / 75, 5	39, 3 / 60, 7	-1, 84 / 5, 15	3, 49 / 6, 37
Edelsberg ₂ -Ref.	-79, 7 / 73, 1	33, 9 / 66, 1	-1, 25 / 4, 16	4, 64 / 8, 18
Edelsberg ₃ -Ref.	-68, 3 / 65, 7	33, 9 / 66,1	-0, 94 / 2, 77	3, 25 / 5, 55

Aus oben stehender Tabelle geht hervor, dass sich die Differenzmodelle untereinander hinsichtlich der ersten beiden Ergebnisspalten nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Die weiteren Resultate zeigen dann jedoch einen Unterschied des DHMs Edelsberg₃ gegenüber den DHMs aus nur jeweils einer Befliegungsrichtung insofern auf, als in diesem die jeweiligen mittleren Fehler ebenso wie die damit korrespondierenden Standardabweichungen geringer sind. Das aus der Fusion aller zur Verfügung stehenden Tracks erstellte DHM Edelsberg₃ weist demnach gegenüber der Referenz die geringsten Abweichungen und homogensten Eigenschaften auf und ist deshalb den anderen qualitativ vorzuziehen. Daher beziehen sich die im Anhang diskutierten Analysen, mit Ausnahme der visuellen Profilvergleiche, auf dieses InSAR-DHM. Die größere mittlere Abweichung im positiven gegenüber dem negativen Bereich ist in der Erfassung der nicht-reliefbezogenen Objekte begründet und liegt auf die ganze Szene bezogen in einem akzeptablen Bereich. Abbildung 9-1 zeigt das Edelsberg₃-Bodenreferenz-Differenzmodell, in dem zum Ausdruck kommt, dass sich die höchsten Abweichungen in Gebieten mit hohen nicht-reliefbezogenen Objekten, in Shadow- bzw. Layoverflächen, in Randbereichen der Aufnahme oder teilweise in steilem Gelände befinden. Die größten Übereinstimmungen finden sich hingegen in flachen Geländeabschnitten, die ohne nicht-reliefbezogene Objekte sind.

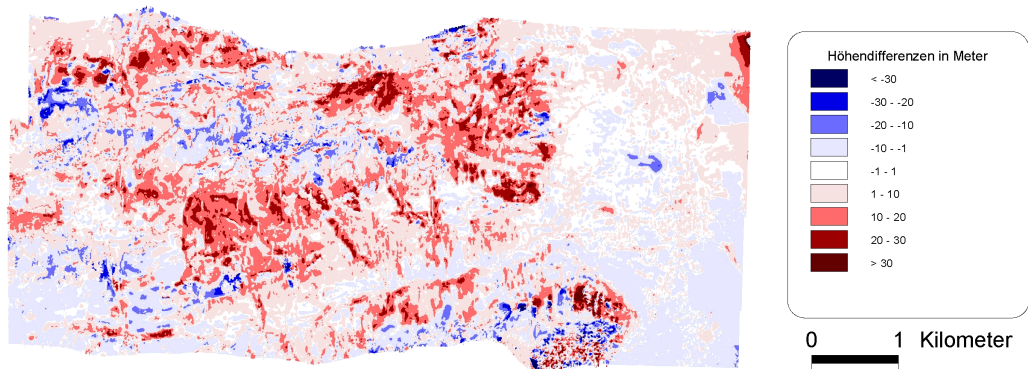


Abbildung 9-1. Differenz zwischen dem DHM Edelsberg₃ und dem Referenz-DGM.

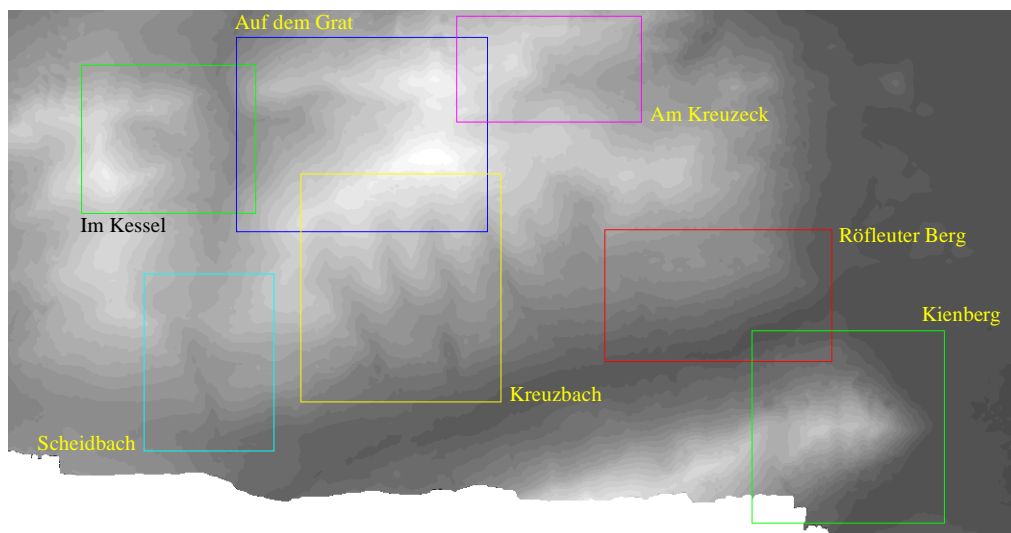


Abbildung 9-2. DHM Edelsberg₃ mit geomorphologisch charakteristischen Gebieten.

Die Abbildung 9-2 illustriert das DHM Edelsberg₃ und die darin vorkommenden verschiedenen geomorphologisch charakteristischen Gebiete. Eine ausführliche Betrachtung dieser Gebiete, die zur weiteren Validierung in Form von Differenzmodellanalysen und von Vergleichen ausgewählter Profile dienen sollen, findet sich im Anhang (Kapitel 12). Ob dabei die durch den mittleren Höhenfehler m_h bestimmte geometrische Genauigkeit der ausgewählten Profilausschnitte, die weitestgehend keine nicht-reliefbezogenen Objekte beinhalten, den kartographischen Anforderungen genügt, wird nach folgender, von Koppe angegebener Formel untersucht [Hake95]:

$$m_h = \pm(a + b \cdot \tan \alpha) \quad (9-1)$$

Wobei α die mittlere Geländeneigung des Referenzabschnitts angibt; a und b sind nach [Imhof65] für den Maßstab 1:25 000 mit 1, 5 und 3 gewählt.

Für eine Beurteilung der InSAR-DHMs anhand der Ergebnisse sind zusammenfassend folgende Punkte festzuhalten:

- Die geomorphologischen Grobstrukturen der für das Testgebiet Edelsberg charakteristischen Gebiete kommen in allen drei InSAR-DHMs zum Ausdruck [Damoiseaux00d] .
- Die Mosaikerstellung beider Befliegungsrichtungen, also die Nutzung aller zur Verfügung stehenden Informationen, führt gegenüber einer nach Flugrichtung getrennten Aufbereitung, wie die Differenzmodellanalyse des gesamten Gebietes und die einzelnen Profilverläufe belegen, zur Qualitätssteigerung des InSAR-DHMs.
- In hinreichend erfassten, sowie layover- und shadow-freien Gebieten liegen die Profilverläufe von Edelsberg₃ mit mittleren Neigungen zwischen 0° und 49° innerhalb der geforderten geometrischen Genauigkeit, wenn diese weitgehend frei von nicht-reliefbezogenen Objekten sind. Ist dies nicht der Fall, weist die Vegetation eine für diese Regionen plausible Höhe auf. Des Weiteren zeigen sich die Profilverläufe detailreicher als die der Referenz.
- Die Qualität der InSAR-DHMs verschlechtert sich in Shadow- bzw. Layover-Regionen oder wenn die Gebiete nur im Far Range-Bereich beleuchtet sind.
- Die zum Teil hohen minimalen und maximalen Differenzen sind auf Unwrapping-Fehler zurückzuführen und als Ausreißer zu betrachten, da sie sich nicht signifikant auf die weiteren statistischen Werte auswirken.
- Eine Verbesserung der InSAR-DHMs ist sicherlich durch die Minimierung der Layover- bzw. Shadowflächen und durch die Hinzunahme zusätzlicher Informationen, in Form weiterer Befliegungsrichtungen oder einem höheren Überlappungsbereich der Tracks, zu erzielen.
- Mittels einer Weiterentwicklung der Phase-Unwrapping- bzw. Mosaikerstellungsalgorithmen könnten hier aufgetretene Fehler korrigiert und so könnte die Qualität des InSAR-DHMs weiter gesteigert werden.
- Resümierend lässt sich über das Höhenmodell Edelsberg₃ sagen, dass die geomorphologische Formerkennung gegeben ist und dass das Modell in layover- und shadow-freien Bereichen, die zudem hinreichend erfasst sind und keine nicht-reliefbezogenen Objekte aufweisen, den kartographischen Anforderungen entspricht. Auch die mit nicht-reliefbezogenen Objekten bestandenen Gebiete haben überwiegend sinnvolle Abweichungen zur Referenz und sprechen so für die Qualität des Modells, das jedoch durch die dargelegten Fehler eine Qualitätsminderung erfährt. Das X-Band-Modell beschreibt das Testgebiet gut bis befriedigend, ist jedoch, wie in Kapitel 7.1 diskutiert, für die topographische Kartographie in dieser Form nur eingeschränkt anwendbar.

9.1.1.2 Kartographische Situation

Die Basis für die Klassifikation der Alternative eins bilden nun die SAR- und Kohärenz-Szene Edelsberg₃. Für die Kategorisierung der Daten in die gewünschten Klassen Straße, Wald, Shadow, Layover, Siedlung, offene Fläche und Bahn fanden die mit Hilfe der Feature-Selection ermittelten und in Tabelle 9-2 aufgelisteten Features Verwendung.

Tabelle 9-2. Feature-Selection Szene Edelsberg₃.

	Features
SAR-Szene Edel ₃	ls ₁ , ls ₃ , co ₁ , co ₂ , co ₅ , L _{L5×S5} , L _{S5×L5} , L _{S5×S5}
Kohärenz Edel ₃	ls ₂ , ls ₃

Die Klassifikation nach Alternative eins führt zu dem in Abbildung 9-5 gezeigten Ergebnis, hierbei sind die Klassen Bahn und Straße zur Klasse Verkehrswege zusammengefasst. Um einen visuellen Vergleich zu ermöglichen, ist dem Resultat in den Abbildungen 9-3 bzw. 9-4 die SAR-Szene Edelsberg₃ bzw. die Bodenreferenz gegenübergestellt. Die in Edelsberg_{Klass1} als Shadow oder Layover ausgewiesenen Klassen wurden, um die Vergleichbarkeit zu wahren, als solche auch in die Referenz übernommen.

Aus Tabelle 9-3 ist nun zu entnehmen zu wieviel Prozent die Referenzklassen, welche mit (R) gekennzeichnet sind, den mit (K) versehenen Klassen von Edelsberg_{Klass1} zuzuordnen sind. Der Prozentsatz der richtig zugewiesenen Klassen beläuft sich dabei insgesamt auf 68,3%.

Tabelle 9-3. Vergleich Bodenreferenz-Klassifikation Edelsberg_{Klass1}.

	Wald (K)	Off. Fl. (K)	Verk. (K)	Siedl. (K)	Gesamt Σ
Wald (R)	83,4 %	15,0 %	0,5 %	0,5 %	
Offene Fläche (R)	34,6 %	52,9 %	6,6 %	5,6 %	
Verkehrswege (R)	38,4 %	31,0 %	19,0 %	11,6 %	
Siedlung (R)	26,6 %	3,3 %	8,0 %	62,0 %	
					68,3 %

Die Erörterung zur Auswahl der Klassen und eine Interpretation der Ergebnisse erfolgen im Anschluss an die Vorstellung der Resultate der zweiten Alternative.

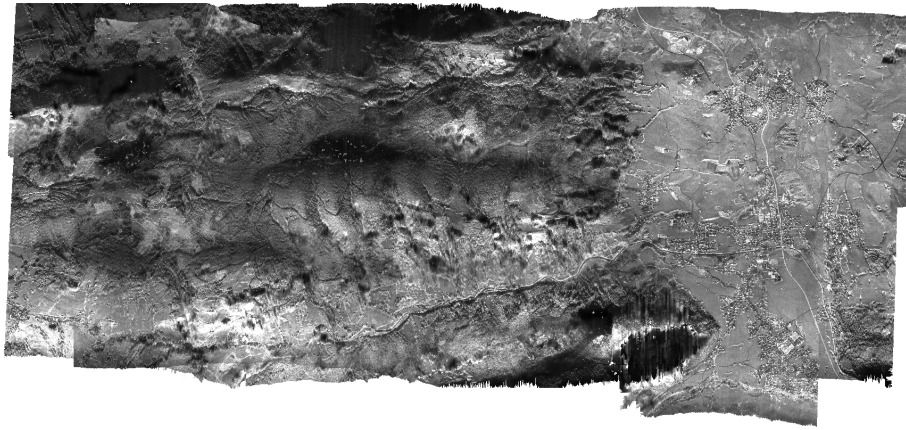


Abbildung 9-3. SAR-Szene Edelsberg₃.

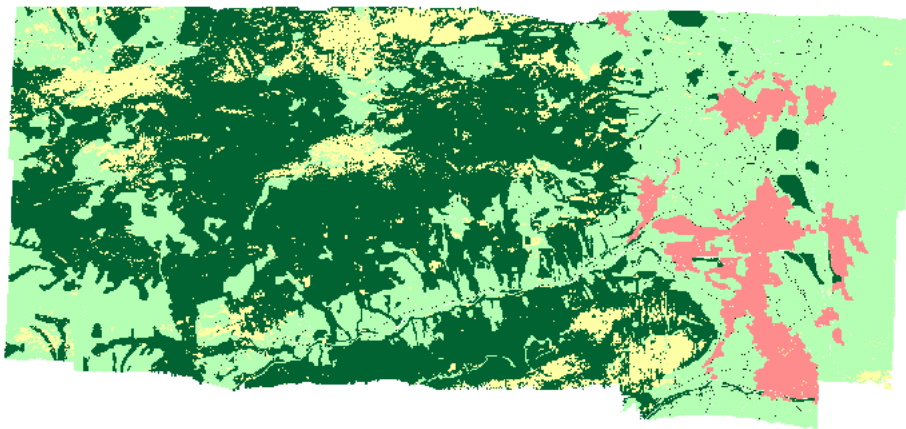


Abbildung 9-4. Bodenreferenz Edelsberg.

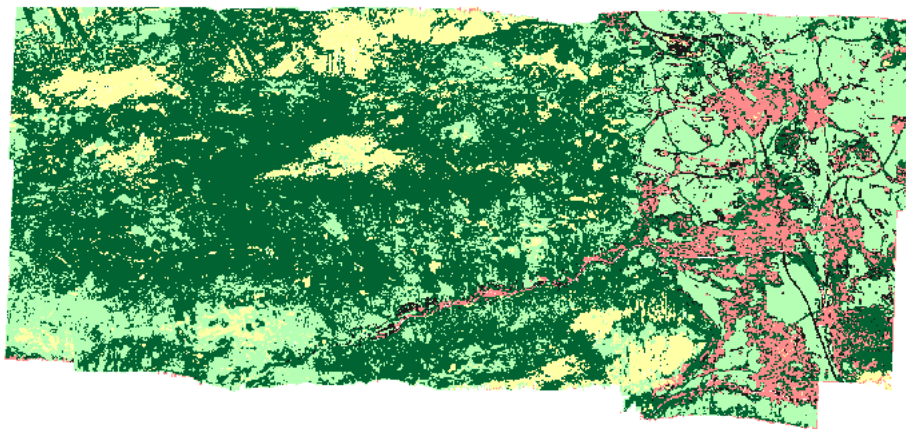


Abbildung 9-5. Klassifikation Edelsberg_{Klass1}.

Die Auswahl der Klassen und die Aufbereitung sowohl des Ergebnisses als auch der Referenz bei der Alternative zwei erfolgt für die Vergleichbarkeit beider Methoden in Entsprechung zur ersten Alternative. Ausgangspunkt für die Kategorisierung sind hier die SAR- und Kohärenz-Szenen Edelsberg₁ und Edelsberg₂, deren errechnete Features in den Tabellen 9-4 und 9-5 zusammengefasst sind.

Tabelle 9-4. Feature-Selection Szene Edelsberg₁.

	Features
SAR-Szene Edel ₁	ls ₁ , ls ₃ , co ₂ , co ₃ , co ₅ , L _{L5×L5} , L _{E5×L5}
Kohärenz Edel ₁	Kohärenz, ls ₃ , ls ₇

Tabelle 9-5. Feature-Selection Szene Edelsberg₂.

	Features
SAR-Szene Edel ₂	ls ₁ , ls ₃ , co ₁ , co ₂ , co ₅ , L _{L5×S5} , W _{5×L5}
Kohärenz Edel ₂	Kohärenz, ls ₂ , ls ₃

Die Zwischenergebnisse der Maximum-Likelihood Klassifikation getrennt nach den unterschiedlichen Flugrichtungen finden sich in den Tabellen 9-6 und 9-7. Die Summe der in den jeweiligen Klassifikationen korrekt zugeteilten Klassen ergibt für Edelsberg₁ 68,9 % und für Edelsberg₂ 68,3 %.

Tabelle 9-6. Zwischenergebnis Bodenreferenz-Maximum-Likelihood Klassifikation Edelsberg₁.

	Wald (K)	Off. Fl. (K)	Verk. (K)	Siedl. (K)	Gesamt Σ
Wald (R)	82,1 %	15,5 %	1,2 %	0,8 %	
Offene Fläche (R)	31,3 %	52,7 %	11,3 %	4,5 %	
Verkehrswege (R)	25,2 %	48,2 %	19,8 %	6,7 %	
Siedlung (R)	26,7 %	6,3 %	12,6 %	54,3 %	
					68,9 %

Tabelle 9-7. Zwischenergebnis Bodenreferenz-Maximum-Likelihood-Klassifikation Edelsberg₂.

	Wald (K)	Off. Fl. (K)	Verk. (K)	Siedl. (K)	Gesamt Σ
Wald (R)	80,8 %	17,4 %	0,7 %	0,3 %	
Offene Fläche (R)	30,9 %	55,8 %	8,7 %	4,3 %	
Verkehrswege (R)	25,2 %	50,2 %	17,1 %	7,4 %	
Siedlung (R)	37,1 %	7,9 %	9,1 %	45,8 %	
					68,3 %

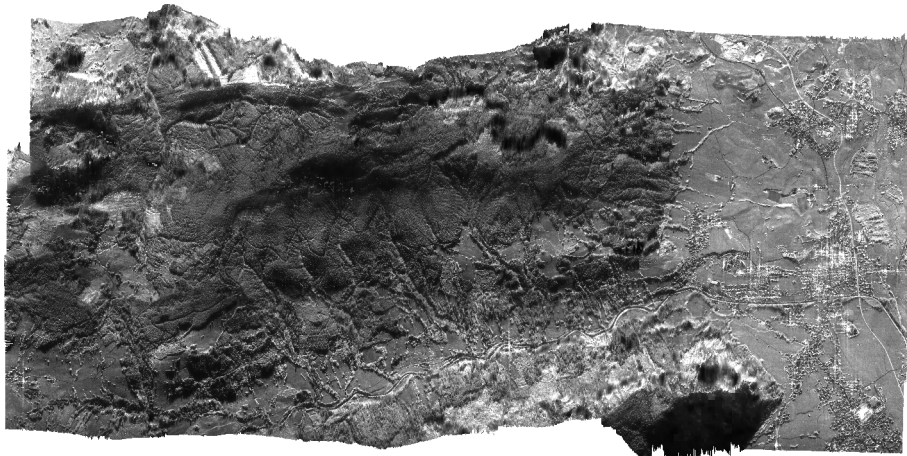


Abbildung 9-6. SAR-Szene Edelsberg₁.

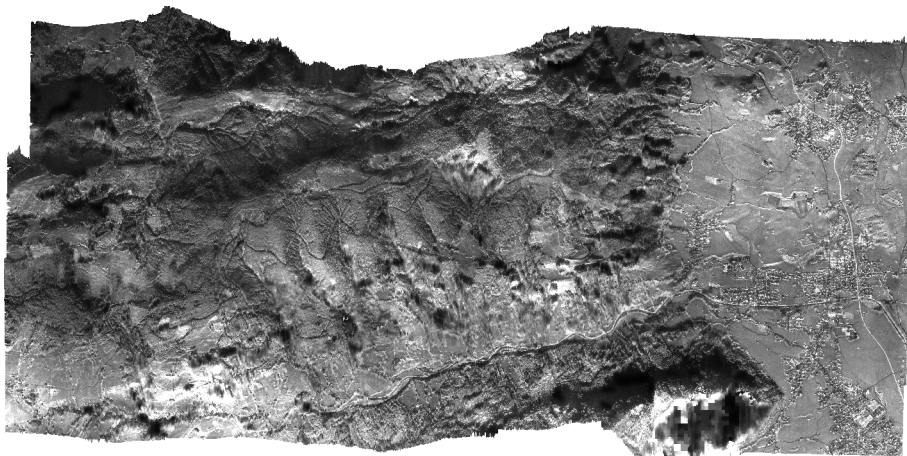


Abbildung 9-7. SAR-Szene Edelsberg₂.

Die Abbildungen 9-6 und 9-7 zeigen das zu kategorisierende Gebiet aus den zwei zur Verfügung stehenden Befliegungsrichtungen, deren getrennte Klassifizierungsergebnisse mittels in Kap. 8.1.2 genannter Weiterverarbeitungsschritte zu dem in Tabelle 9-8 ersichtlichen Endergebnis führen. Hier beträgt die Summe der richtig zugewiesenen Klassen 70,2 %.

Tabelle 9-8. Vergleich Bodenreferenz-Klassifikation Edelsberg_{Klass2}.

	Wald (K)	Off. Fl. (K)	Verk. (K)	Siedl. (K)	Gesamt Σ
Wald (R)	76,0 %	20,6 %	1,6 %	1,3 %	
Offene Fläche (R)	20,7 %	63,2 %	9,1 %	6,8 %	
Verkehrswege (R)	16,5 %	56,5 %	16,1 %	10,9 %	
Siedlung (R)	15,0 %	9,0 %	7,1 %	68,8 %	
					70,2 %

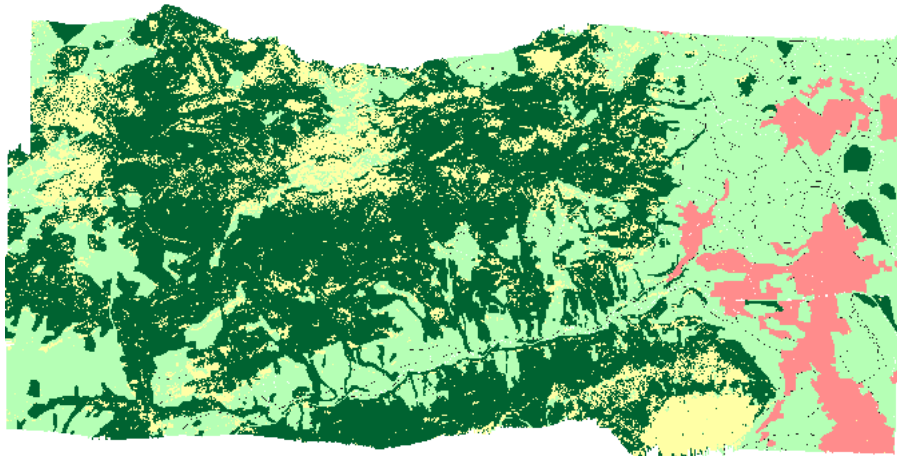


Abbildung 9-8. Bodenreferenz Edelsberg.

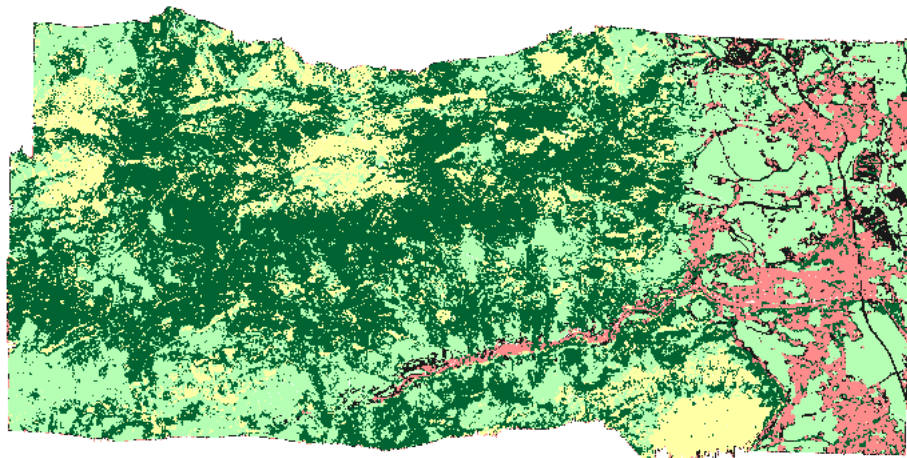


Abbildung 9-9. Klassifikation Edelsberg_{Klass2}.

Die Abbildungen 9-8 und 9-9 stellen zum optischen Vergleich die Bodenreferenz und Edelsberg_{Klass2} gegenüber.

Die Auswahl der Klassen richtet sich im Testgebiet Edelsberg zum einem nach der in [Hake95] beschriebenen Situationsdarstellung für topographische Karten und zum anderen nach der spezifischen Abbildungscharakteristik des Radarsystems. Die Situationsdarstellung enthält nach [Hake95] die Sammelbegriffe Siedlungen, Verkehrswege, Gewässer, Bodenbedeckung und Einzelzeichen. Die Klassen Siedlungen und Verkehrswege fassen dabei alle jeweils darin enthaltenen Objekte zusammen, da keine Unterscheidung nach beispielsweise der Verkehrsbedeutung der Straßen möglich ist. Die Bodenbedeckung ist in zwei Klassen unterteilt, wobei die Klasse Wald alle Waldarten und die Klasse offene Fläche Objekte wie Wiese, Weide, Garten, Ödland (ohne höhere Sträucher und Bäume), Moor oder Heide mit einbezieht. Im Testgebiet existieren nur Fließgewässer, deren Detektion sich im Verlauf der Arbeit als unzureichend erwies [Damoiseaux00a]. Es zeigte sich, dass die Erfassung vieler kleiner Flüsse und Bäche, die teilweise durch Wald hindurch verlaufen, nicht zu realisieren ist. Die Vils als breiter Fluss im Gebiet konnte zwar stellenweise kategorisiert werden, jedoch führte die spektrale Ähnlichkeit dieser Gewässerklasse, insbesondere in Shadowbereichen, zu zahlreichen Fehlklassifikationen. Aus genannten Gründen fanden die Gewässer keine Berücksichtigung bei der Klassifikation der Daten. Topographische Einzelzeichen, wie einzelstehende Bäume, Hecken oder Kirchen sind nicht mit einer Signatur versehen, sondern fallen, falls erkannt, in die Kontinuumsdarstellungen einer der zur Verfügung stehenden Klassen. Die Detektion anderer, nicht in eine der erwähnten Klassen fallender Objekte ist entweder nicht untersucht, oder, wie im Falle administrativer Grenzen, aus einer Fernerkundungsaufnahme fast nie eruierbar. Shadow- und Layoverflächen kommen als radar-charakteristische Klassen hinzu, da eine Vermeidung dieser Effekte durch die Anzahl der geflogenen Tracks und Befliegungsrichtungen nicht gänzlich gegeben war. Diese in einer Klasse ausgewiesenen Flächen zeigen an, wo keine für die Situationsdarstellung nutzbringenden Informationen extrahiert werden konnten.

Für die Validierung der Klassifikationsergebnisse mit der Bodenreferenz sei auf folgende **Sachverhalte bezüglich der ATKIS 25-Daten** hingewiesen:

- Die Siedlungsdarstellung ist flächenhaft und verglichen mit dem SAR-Bild stark generalisiert und des Weiteren unvollständig.
- Gegenüber der Radaraufnahme sind in den Waldgebieten nicht alle Lichtung angegeben andererseits ist die Aufnahme von Waldflächen lückenhaft.
- Bei einer Überlagerung von SAR-Szene und Referenz zeigen sich bei den Verkehrswegen Lageabweichungen.
- Die gesamte Situationsdarstellung der Bodenreferenz ist stark vereinfacht dargestellt, während die Klassifikationsergebnisse nicht kartographisch generalisiert sind.

Aufgrund der Ergebnismatrizen und allgemeiner Erfahrungswerte lassen sich über die **Klassifikationsresultate** die nachfolgend aufgeführten **Schlussfolgerungen** ziehen:

- Grundsätzlich ist ein Abgrenzung der Klassen Wald, offene Fläche, Siedlungen, Shadow und Layover voneinander gut möglich.
- Mit Ausnahme der Bahnschienen, die aufgrund ihrer Materialbeschaffenheit leicht zu detektieren sind, erweist sich die Erkennung der Verkehrswege als schwierig. Die Straßen werden teilweise als Wald und hauptsächlich als offene Fläche klassifiziert. Dies

hängt zum einen damit zusammen, dass sich diese Verkehrswege im Wald befinden, ist aber hauptsächlich auf die Komplexität der Detektion schmaler und spiegelnd reflektierender linearer Elemente aus SAR-Szenen zurückzuführen [Huber01].

- Die Ähnlichkeit spektraler Signaturen unterschiedlicher Klassen führt zu Fehlklassifikationen. Als ein Beispiel hierfür sind Siedlungsflächen mit Layover bzw. stark überstrahlten Gebieten anzuführen, die im Bereich der Vils die Kategorisierung der Uferböschungen als Siedlung zur Folge haben. Ein weiteres Beispiel dazu sind die fehlerhaften Verkehrsflächen im Siedlungsbereich, die in den oben genannten Entsprechungen der Bahn mit hohen Intensitätswerten der offenen Fläche ihren Ursprung finden.
- Die Gesamtsumme der mit der Referenz übereinstimmenden Klassen erreicht bei Edelsberg_{Klass2} den höchsten Wert, der bei den nahezu identischen Resultaten von Edelsberg_{Klass1} und den Zwischenergebnissen der Klassifikationen von Edelsberg₁ und Edelsberg₂ etwas niedriger liegt.
- Der Vergleich der beiden Algorithmen zeigt eine deutliche Verbesserung der Zuordnung der offenen Fläche und der Siedlung, bei gleichzeitiger Verschlechterung der Erkennung von Wald und Verkehrswegen bei Alternative zwei. Aufgrund der angeführten Gesamtsumme und der Ergebnismatrix sowie des visuellen Eindrucks ist insgesamt gesehen dieser Methode jedoch ein deutlicher Vorrang einzuräumen.
- Daraus ergibt sich, dass es sinnvoll ist, die Flugrichtungen zunächst getrennt voneinander zu klassifizieren, um diese dann mittels der D-S-Evidenztheorie und der konfliktgewichteten Methode zu fusionieren. Das Mehr an Informationen führt letztlich auch zu einem besseren Klassifikationsergebnis.
- Eine weitere Minimierung der in beiden Methoden verbleibenden Layover- und Shadowflächen könnte durch die Hinzunahme weiterer Befliegungsrichtungen oder auch durch eine höhere Anzahl von Tracks mit größeren Überlappungsbereichen zu realisieren sein.
- Insgesamt gesehen ist das Klassifikationsergebnis in Anbetracht der durch das System zur Verfügung stehenden Informationen und der Diversität des Testgebiet als gut einzustufen. Verglichen mit der SAR-Szene und den angesprochenen problematischen Aspekten hinsichtlich des Vergleiches mit der zur Verfügung stehenden Bodenreferenz ist das Ergebnis in seiner Qualität eher nach oben als nach unten zu korrigieren.
- Es bleibt dennoch festzuhalten, dass gerade in Gebirgslandschaft die angesprochenen Problemfelder selbst mit besseren Klassifikationsmethoden nicht wirklich lückenlos gelöst werden können, da diese größtenteils durch das Aufnahmesystem gegeben sind. Eine richtige Erkennung von 90 % oder mehr wäre, wenn überhaupt, nur durch die Verbindung komplexer Erkennungssysteme möglich.
- Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zumindest vier für die Kartenerstellung sinnvolle Klassen, und zwar Wald, offene Fläche, Verkehrswege sowie Siedlung, extrahiert werden können. Der erreichte Prozentsatz sowie die geringen verbleibenden Shadow- bzw. Layoverflächen lassen den Schluss zu, dass das Testgebiet befriedigend beschrieben und so eine brauchbare Basisstruktur für die Erstellung topographischer Karten gegeben ist.

9.1.2 Ableitung kartographischer Produkte

Nach der Analyse des geometrischen Modells erfolgt nun die Ableitung kartographischer Produkte aus diesem. Dafür wird das DOM Edelsberg₃ und das Klassifikationsergebnis Edelsberg_{Klass2} herangezogen, da diese sowohl im Vergleich zur Referenz als auch zu den übrigen Resultaten die plausibelsten Werte beinhalten. Aus dem gewählten Kartenmaßstab von 1:25 000 ist für das DOM Edelsberg₃ eine, wie in Kap. 7.2 diskutierte, Mittelwertfilterung in einem 15 × 15 Pixel großen Fenster sinnvoll.

Bei den generierten Karten handelt es sich um zwei “topographische” Karten (mit oder ohne Beleuchtungsmodell) sowie um eine Neigungs-, Expositions- und Höhenstufenkarte.

Die Äquidistanz A der Höhenlinien lässt sich für den gewählten Maßstab bei einer ungefähren maximalen Geländeneigung von $\alpha_{\max} = 45^\circ$ nach [Hake95] wie folgt ermitteln:

$$A = n \cdot \log(n) \cdot \tan \alpha_{\max} \quad (9-2)$$

$$\text{mit: } n = \sqrt{\frac{m_k}{100} + 1}$$

und m_k als Maßstabsfaktor.

Demnach errechnet sich eine Äquidistanz von 19.01 Metern, die sinnvollerweise auf 20 Meter aufgerundet wird. Neigungen über 45° , wie in der Neigungskarte ausgewiesen, sind größtenteils durch nicht-reliefbezogene Objekte induziert.

Die Farbwahl der Situationselemente und Höhenlinien der topographischen Karte der Abbildung 9-10 ist entweder assoziativ oder lehnt sich an gängige kartographische Darstellungsformen an. Aufgrund der in Arc/View visualisierten Höheninformation ist für die Geländedarstellung zum einen keine automatisierte, den kartographischen Anforderungen genügende Beschriftung der Höhenlinien und zum anderen keine Darstellung von Höhenkoten möglich. Trotzdem wird auf das Höhenlinienbild nicht verzichtet, da dieses die Wahrnehmung des Reliefs ermöglicht. Zur verbesserten Anschaulichkeit der Geländeformen ist in der topographischen Karte in Abbildung 9-11 eine Schräglichtschummerung mit Beleuchtungsrichtung aus Nord-West und einem Horizontalwinkel von 45° integriert. Auf Schrift als weiteres erläuterndes Element wird aufgrund der Beeinträchtigung der letztlich kartographisch zu beurteilenden Situations- und Geländedarstellung verzichtet.

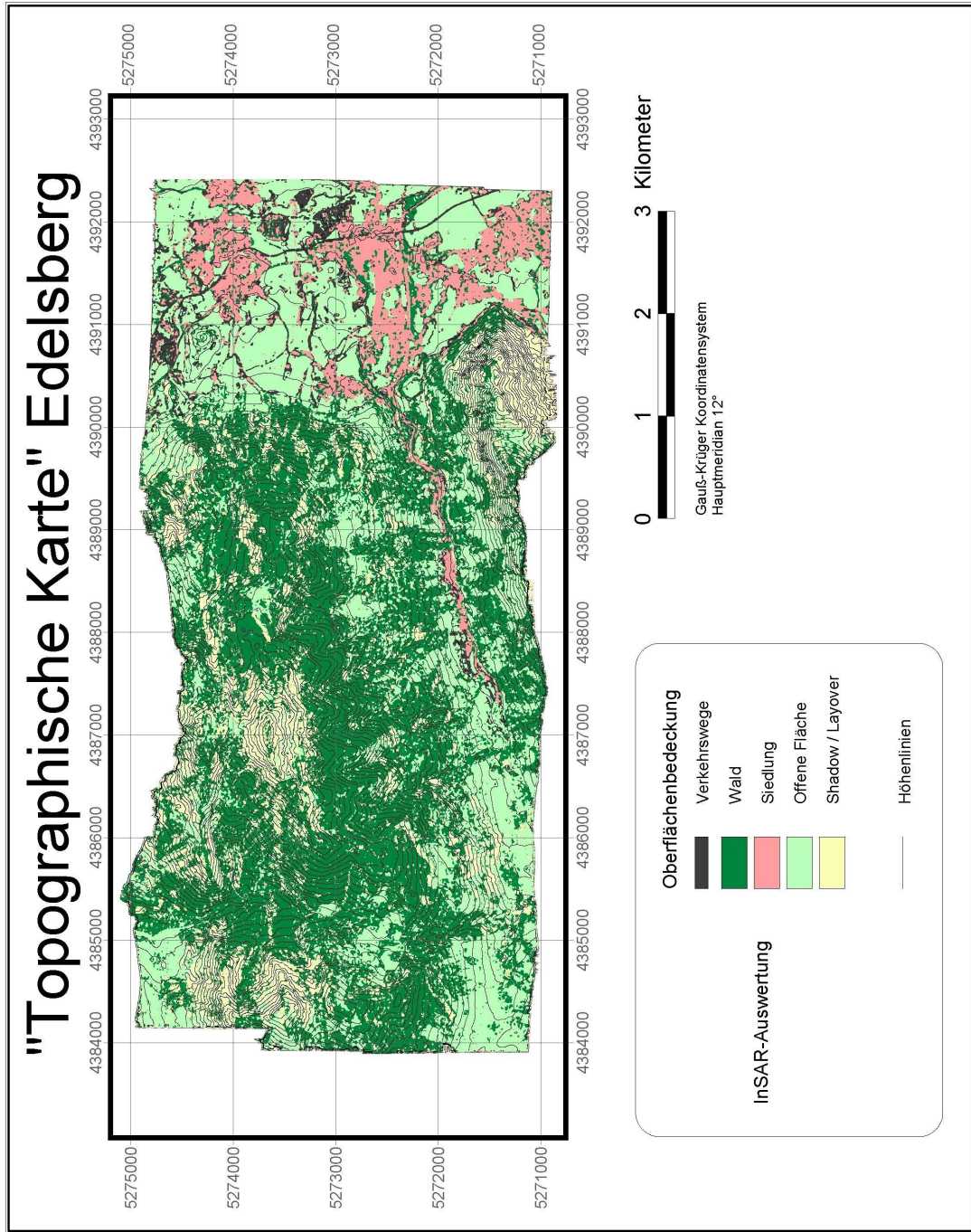


Abbildung 9-10. "Topographische" Karte Edelsberg.

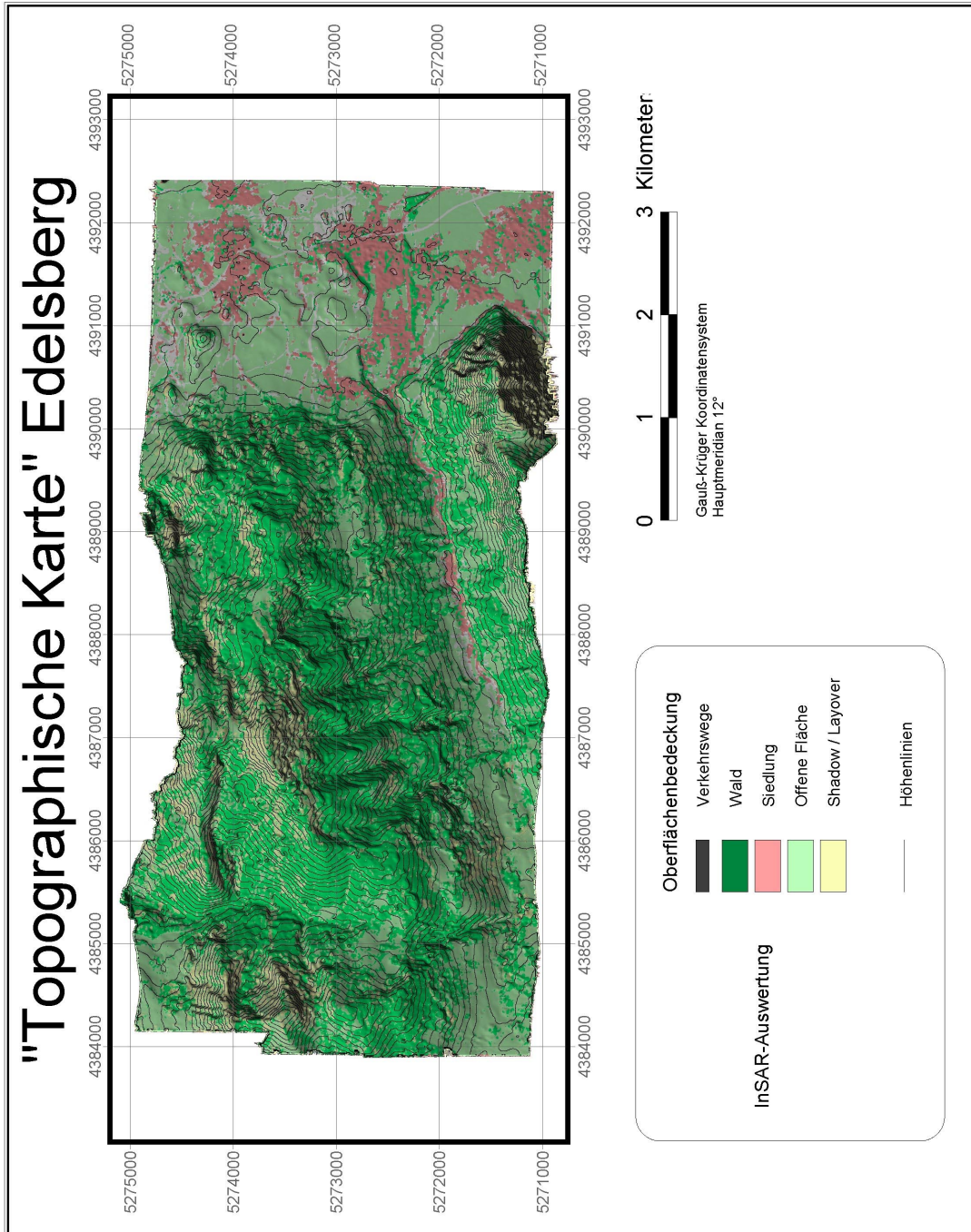


Abbildung 9-11. "Topographische" Karte Edelsberg mit integriertem Beleuchtungsmodell.

Die reliefbeschreibenden Neigungs-, Expositions- und Höhenstufenkarten der Abbildungen 9-12 bis 9-14 repräsentieren allesamt Kontinua, die kartographisch u.a. durch Isolinien und/oder Flächenfarben dargestellt werden können. Die Farbwahl erfolgt dabei nach folgenden Kriterien [Imhof72]:

- Die Kontinuumsdarstellung erfolgt gestuft mit dem Sachverhalt angepassten Wertebereichen. Um jeder Stufe die gleiche Bedeutung zuzumessen, wurden die Farben möglichst gleichabständig gewählt.
- Die Farbfolge assoziiert dabei eine wertebedingte Reihenfolge.
- Für die Farbwahl der Expositionsdarstellung gilt zusätzlich, dass benachbarte Expositionen auch farblich ähnlich sind und eine in sich geschlossene Farbabfolge darstellen, um so zu einem plastischem Geländeeindruck beizutragen [Damoiseaux97].

Die Wertebereiche der Neigungs- und Höhenstufenkarten sind so gewählt, dass die Farben im gewählten Farbverlauf den oben genannten Forderungen entsprechen. Die Farbdarstellungen der Kontinua der Neigungs- und Expositionskarte sind zum besseren Verständnis der jeweiligen Aussagen noch durch das Höhenlinienbild ergänzt.

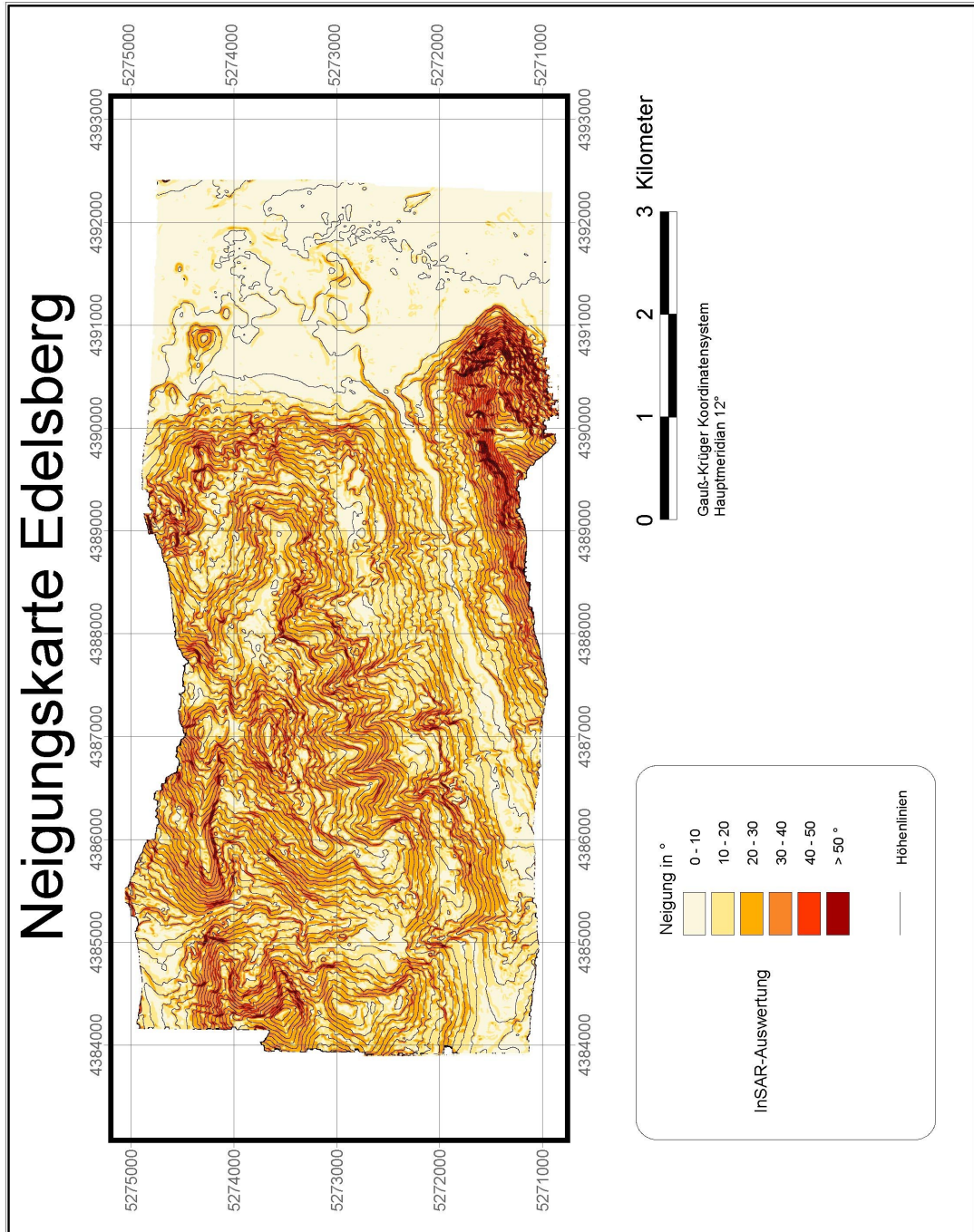


Abbildung 9-12. Neigungskarte Edelsberg.

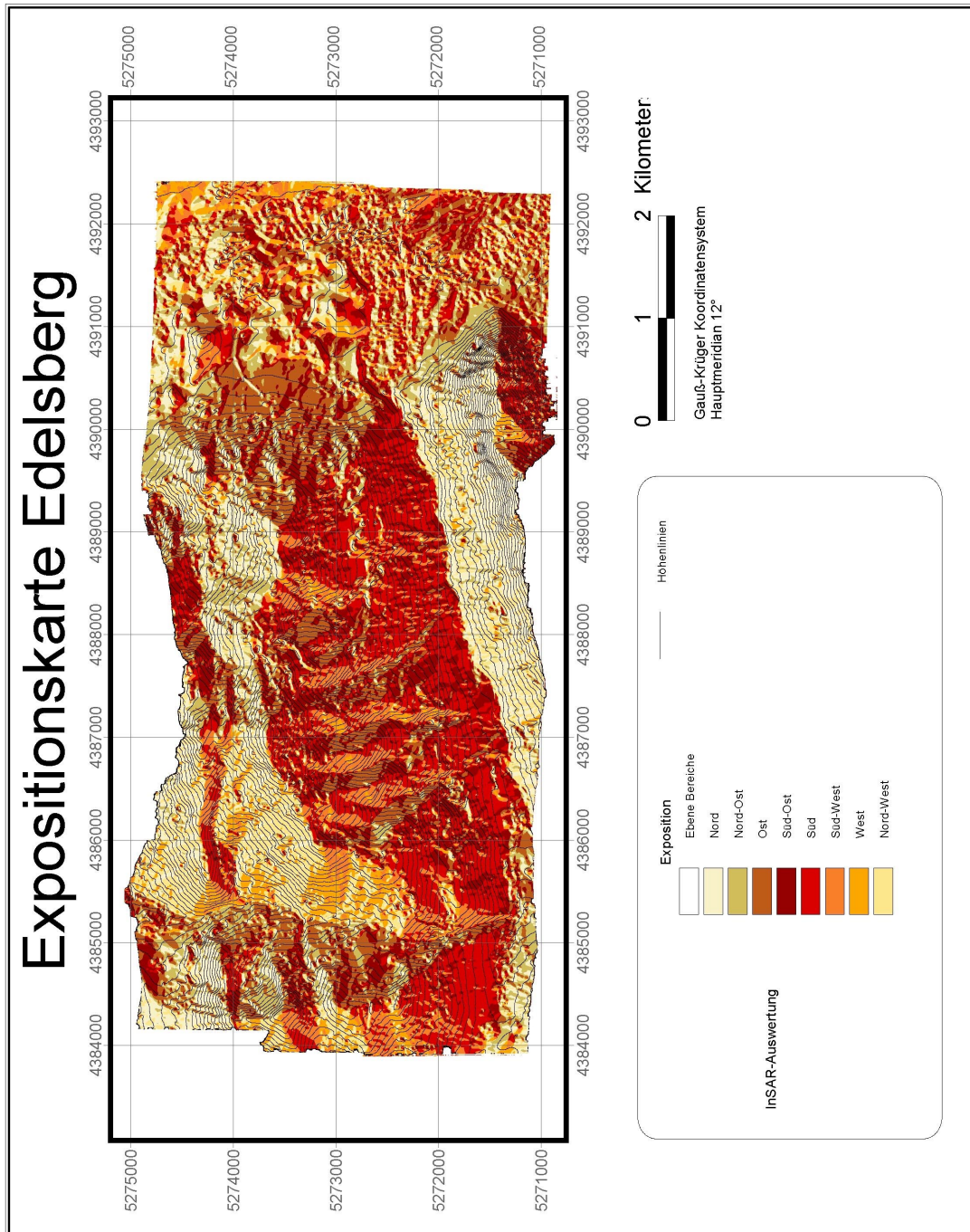


Abbildung 9-13. Expositionskarte Edelsberg.

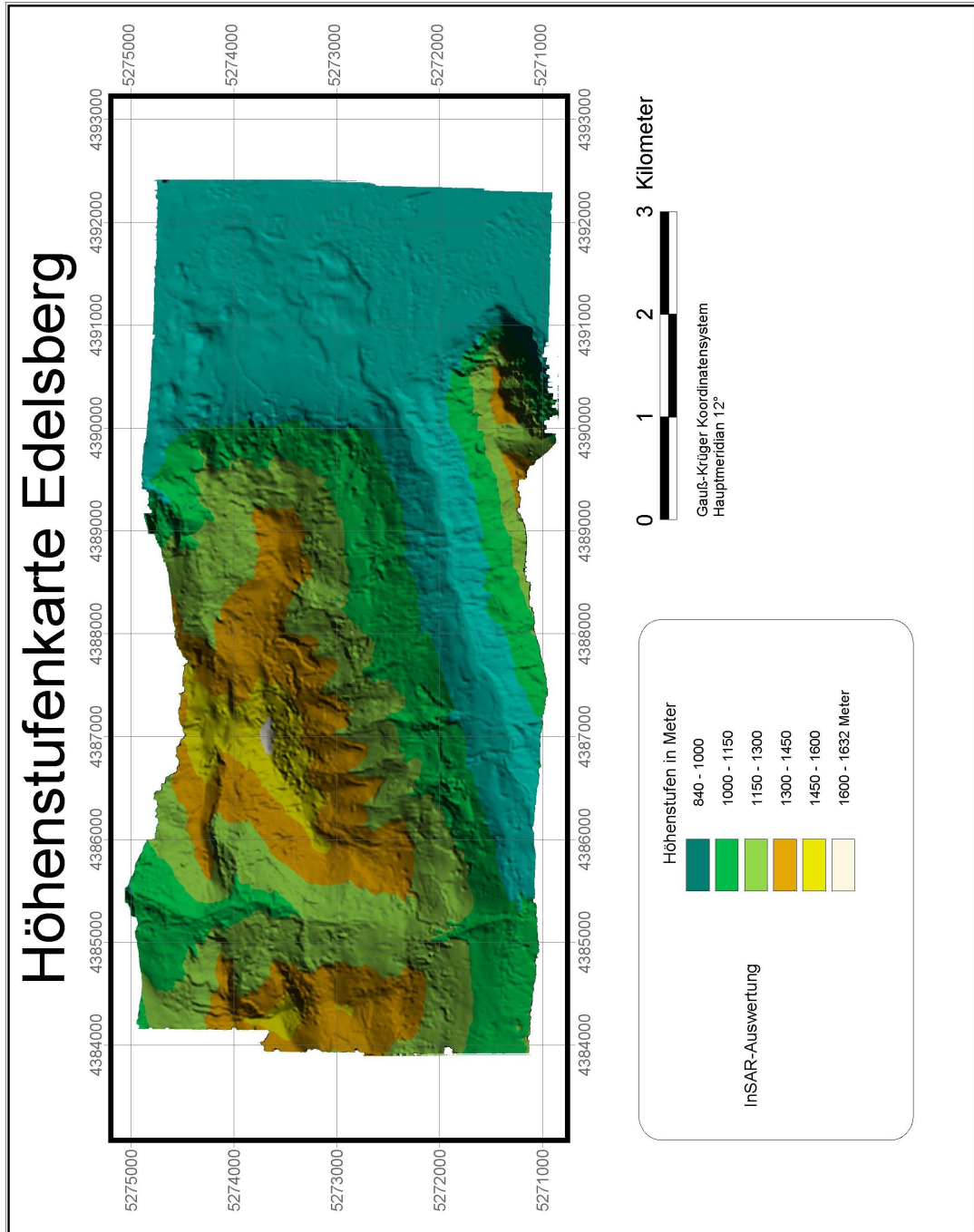


Abbildung 9-14. Höhenstufenkarte Edelsberg.

9.1.3 Zusammenfassende Bewertung

Das Testgebiet Edelsberg ist durch die jeweiligen geomorphologischen Merkmale der darin vorkommenden tektonischen Einheiten des Flysch, des Helvetikums und der nördlichen Kalkalpen charakterisiert. Sowohl die Modellanalyse als auch der visuelle Vergleich der erstellten Karten mit der Kartenprobe lässt den Schluss zu, dass alle geomorphologischen Großformen erfasst werden und in diesen Karten zum Ausdruck kommen. Nachteilig auf die Gesamtsituation wirken sich jedoch die verbliebenen Shadow- und Layoverflächen aus, die keine kartographisch nutzbringenden Informationen beinhalten. Da Gebirgslandschaften stark durch fluviale Prozesse geprägt sind, liegt ein weiteres Manko in der Nichterfassung der Fließgewässer.

Im Detail betrachtet hängt die Qualität des Modells, die insgesamt als gut anzusehen ist, von dem zur Verfügung stehenden InSAR-Informationsgehalt ab. Je mehr systembedingt sinnvolle Daten zur Anwendung gelangen, desto besser ist die Ableitung der Oberflächenbedeckung bzw. desto detailreicher und plausibler ist die Erfassung des geomorphologischen Formenschatzes.

Die aus dem InSAR-DOM generierten Reliefinformationen Neigung und Exposition runden diese Aussagen ab, da sie in Modellbereichen mit hoher Qualität Werte aufweisen, die verglichen mit der Kartenprobe als adäquat einzustufen sind.

9.2 Verwall- und Silvretta-Gruppe

Die Abhandlung der Verwall- und Silvretta-Gruppe erfolgt gemeinsam, da beide Testgebiete in wichtigen Flug- und Radarparametern gleich sind bzw. denselben geologischen Aufbau und somit einen ähnlichen geomorphologischen Formenschatz aufweisen. Für die Untersuchungen stehen die DHMs Verwall₁, Verwall₂, Verwall₃, Silvretta₁ und Silvretta₂, sowie die Klassifikationsergebnisse Verwall_{Klass1} und Verwall_{Klass2} aus den Algorithmen eins und zwei bereit. Das DHM Silvretta₂ ist wegen einer inkorrekten Bewegungskompensation größtenteils unbrauchbar und führte daher bei der Mosaikerstellung mit den Süd-Nord Tracks ebenfalls zu einem stark fehlerhaften DHM Silvretta₃, das daher keine weitere Betrachtung findet. Eine Klassifikation des Silvretta-gebietes erfolgte aufgrund der fast vollständigen Schneebedeckung des Gebietes sowie ausgedehnter Layover- bzw. Shadowflächen indessen nicht.

Die Grundlage der Bodenreferenzhöhenmodelle sind zum einen Daten aus der Digitalisierung der Höhenlinien der Alpenvereinskarten Nr: 28/2 Verwall-Gruppe, Mittleres Blatt, und Nr: 26 Silvretta-Gruppe für die Verwall-Gruppe und zum anderen DHM25-Level2-Daten des Schweizer Bundesamtes für Landestopographie [Landestopo] für die Silvretta-Gruppe. Die Hinzunahme einer Referenz für die Oberflächenbedeckung der Verwall-Gruppe ist angesichts der großflächigen Schneebedeckung des Gebietes zum Aufnahmezeitpunkt hier ebenfalls nicht sinnvoll.

Die Referenzdaten der Verwall-Gruppe lagen zunächst als zwei Arc/View Shape-Files im Linien-Format vor. Nach dem Zusammensetzen der Daten erfolgte die Umwandlung in das Arc/View Punkt-Format, um diesen Datensatz schließlich mittels der Inverse Distance Weighted-Methode auf die Rasterweite der InSAR-Daten von 2×2 Metern zu interpolieren. Um eine Vergleichbarkeit mit den InSAR-Daten der Silvretta-Gruppe mit einer Pixelgröße von 3×3 Metern zu erreichen, sind die DHM25-Level2-Daten ebenfalls dahingehend aufbereitet worden. Für den visuellen Vergleich standen des Weiteren die bereits oben genannten Alpenvereinskarten zur Verfügung.

9.2.1 Modellanalyse

Für beide Gebiete erfolgt die Analyse der Modelleigenschaften wiederum getrennt nach den Aspekten Relief und kartographische Situation.

9.2.1.1 Relief

Die Tabelle 9-9 vergleicht die zur Verfügung stehenden InSAR-Oberflächenmodelle mit ihren jeweiligen Referenzgeländemodellen, wobei die genutzten Parameter denen der Edelsberg-Differenzmodellanalyse gleich sind.

Tabelle 9-9. Differenzmodellanalyse Gebiet Verwall- und Silvrettagruppe.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Verwall ₁ -Referenz	-132, 4/160, 9	44, 4 / 55, 6	-2, 46 / 6, 63	3, 68 / 8, 55
Verwall ₂ -Referenz	-140, 6/135, 4	36, 8 / 63, 2	-1, 86 / 5, 04	5, 32 / 9, 19
Verwall ₃ -Referenz	-128, 1/138, 8	37, 2 / 62, 8	-1, 83 / 5, 05	4, 44 / 8, 07
Silvretta ₁ -Referenz	-445, 6/207, 6	34, 0 / 66, 0	-5, 12 / 16, 6	4, 57 / 9, 84
Silvretta ₂ -Referenz	-219, 3/192, 1	31, 7 / 68, 3	-7, 02 / 16, 3	12, 4 / 17, 3

Die Ergebnisse zeigen, dass das DOM Verwall₃ und Silvretta₁, gemessen an der entsprechenden Bodenreferenz, die für ihr Gebiet jeweils plausibelsten Werte aufweisen und sich somit die im Anhang (Kapitel 12) befindlichen Analysen auf diese DOMs beziehen. Die Ausnahme hiervon bilden die visuellen Profilvergleiche, in denen auch die anderen InSAR-Modelle Berücksichtigung finden. Für das Verwallgebiet sind die mittleren bzw. Standard-Abweichungen im negativen Bereich für Verwall₂ und Verwall₃ nahezu identisch, wohingegen Verwall₁ die schlechtesten Werte aufweist. Im positiven Bereich ergeben sich wiederum für Verwall₃ geringere Abweichungen als für Verwall₂. Obwohl Verwall₁ hier ähnlich gute Werte beinhaltet, fällt die Entscheidung auch hier auf Verwall₃, da dieses InSAR-DHM prozentual gesehen weitaus häufiger über der Referenz liegt als Verwall₁. Dies ist folgerichtig, da in beiden Testgebieten viele nicht-reliefbedingte Objekte, wie etwa Vegetation oder auch Schnee, zu den gemessenen Höhenwerten beitragen. Dadurch erklärt sich auch die höhere mittlere Abweichung im positiven gegenüber dem negativen Bereich.

Wie bereits erwähnt ist Silvretta₂ fehlerhaft, was sich auch in deutlich schlechteren Statistikwerten gegenüber Silvretta₁ ausdrückt, dem daher trotz der weiter hinten aufgeführten Fehler der Vorrang einzuräumen ist. Das Differenzmodell in Abbildung 9-15 zeigt für das gesamte Verwall-Testgebiet vor allem Abweichungen in den jeweils nur im Far Range erfassten Nord- bzw. Südrändern des Gebietes, auf ausgedehnten Schneeflächen in hohen Lagen sowie an steilen Hängen, die Layover- oder Shadowflächen bedingen. Des Weiteren ist eine schwache Kippung, die von Süd nach Nord ansteigt, anzunehmen. Auffällig sind die starken Höhendifferenzen für das Silvrettagebiet (Abb. 9-17) in den östlich exponierten Hanglagen, die aufgrund nur einer Befliegungsrichtung großteils Shadow-Bereiche darstellen, wie auch im Bereich des Silvretta-Stausees. Für diese Flächen liegen nur sehr veräuschte Phaseninformationen vor, die sich in den unkorrekten Höhenmessungen und demzufolge auch in der Statistik des DHM Silvretta₁ widerspiegeln.

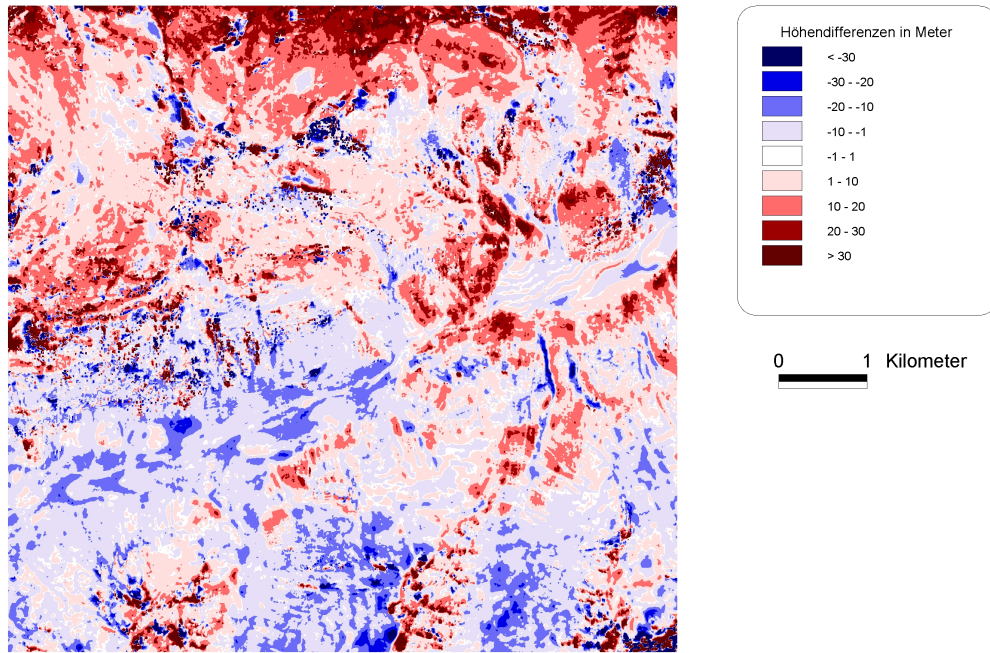


Abbildung 9-15. Differenz zwischen dem DTM Verwall₃ und dem Referenz-DGM.

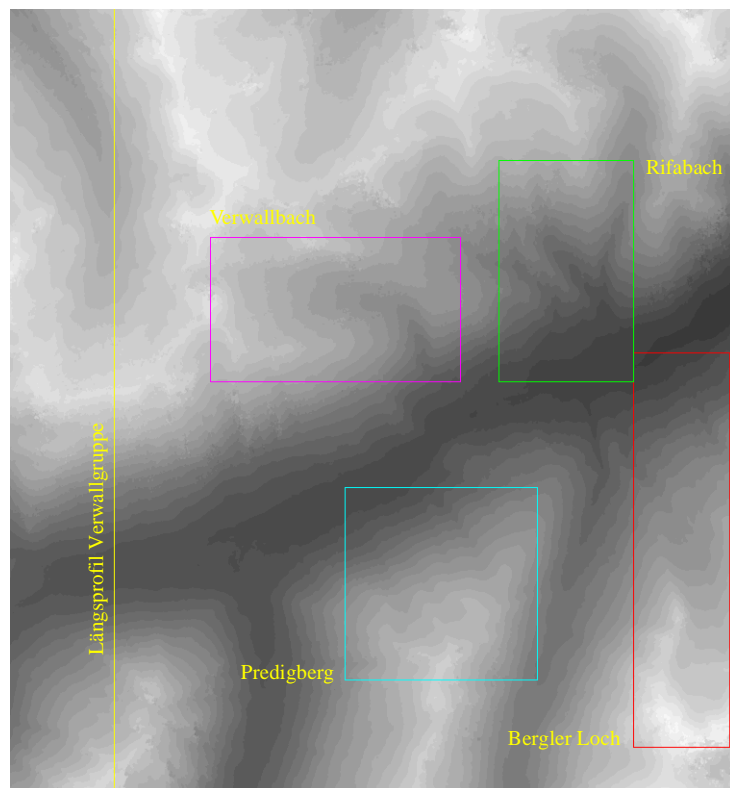


Abbildung 9-16. DTM Verwall₃ mit geomorphologisch charakteristischen Gebieten.

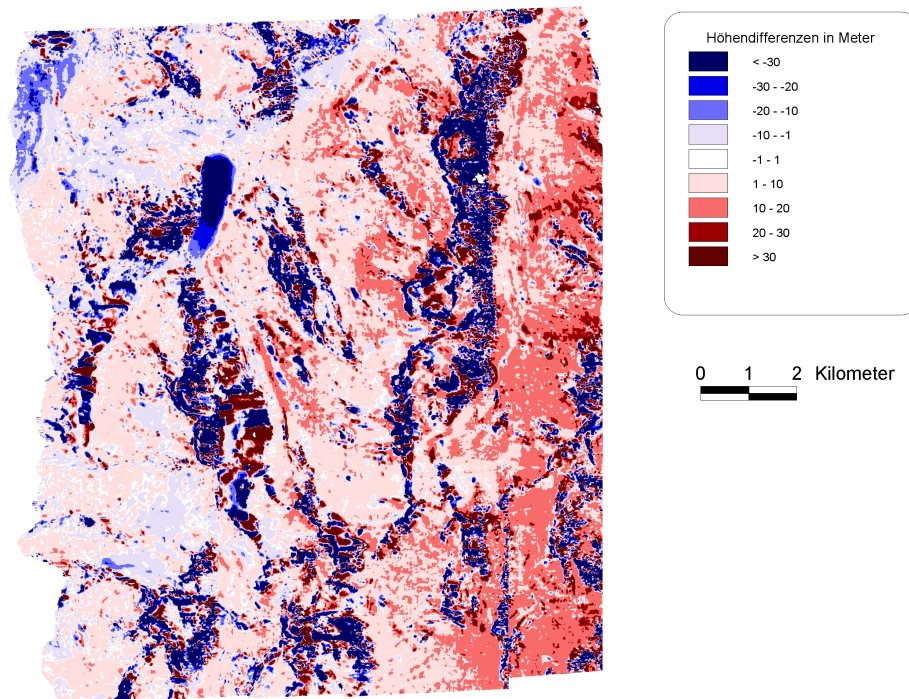


Abbildung 9-17. Differenz zwischen dem DHM Silvretta₁ und dem Referenz-DGM.

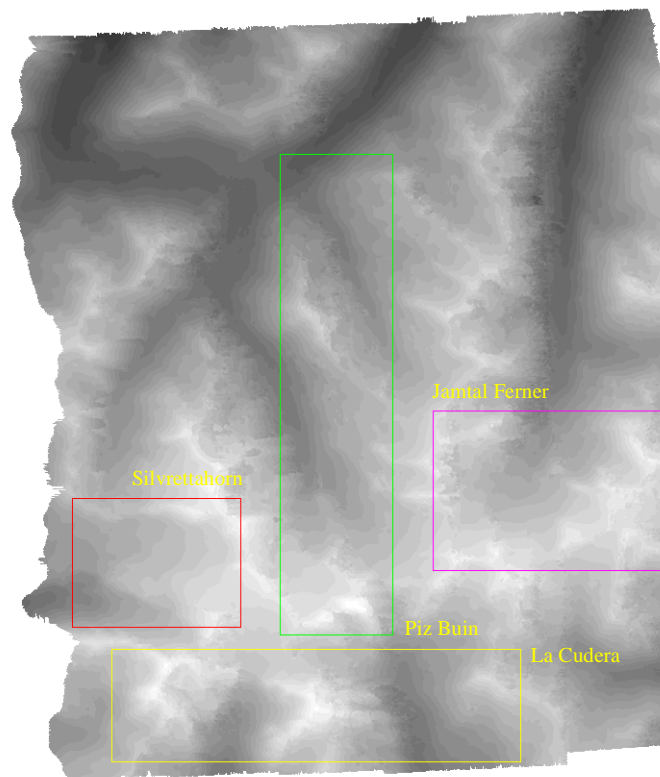


Abbildung 9-18. DHM Silvretta₁ mit geomorphologisch charakteristischen Gebieten.

Die Modelldetailanalyse ausgewählter geomorphologisch charakteristischer Gebiete beider Gebirgsgruppen (siehe dazu die Abbildungen 9-16 bzw. 9-18) ist im Anhang (Kapitel 12) diskutiert. Für die Profilanalyse ist dabei die Formel 9-1 auf den Maßstab 1:50 000 erweitert worden; wobei dazu a und b nach [Imhof65] mit 2, 5 und 6 gewählt sind.

Zusammenfassend lassen sich für die DHMs von Verwall und Silvretta folgende vom Gebiet Edelsberg abweichende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die geomorphologischen Grobstrukturen sind bei der Verwallgruppe von allen drei InSAR-Modellen richtig erfasst. Für das Silvrettagebiet ist dies nicht der Fall, da das DHM Silvretta₂ teilweise gänzlich unbrauchbar ist und das DHM Silvretta₁ zwar in layover- und shadowfreien, sowie hinreichend beleuchteten Gebieten sinnvolle Ergebnisse liefert, sonst aber ebenfalls unbrauchbar ist.
- Die durch Schnee verursachten Höhenfehler sind nicht zu verifizieren, da keine Information über die Beschaffenheit des Schnees und somit die Eindringtiefe der Radarwellen in das Medium vorliegt. Es können darüber, wie im Anhang diskutiert (siehe dazu Seite 167), nur Vermutungen angestellt werden, die jedoch darauf hindeuten, dass es sich um Naßschnee, der nur eine geringe Eindringtiefe der Wellen ermöglicht, handelt.
- Da das Gebiet nur an wenigen Flächen frei von nicht-reliefbezogenen Objekten ist, sind für den Maßstab 1:25 000 kaum Stellen zu finden, die dem geforderten Qualitätskriterium (Formel nach Koppe) entsprechen. Für den Maßstab 1:50 000 ist, aufgrund der geringeren Genauigkeitsanforderung, das Kriterium oftmals gegeben. Das InSAR-DHM liegt häufig mehrere Meter über der Referenz. Dies lässt, bei der vorhandenen mächtigen Schneedecke, wiederum auf die oben gemachte Annahme über die Schneequalität und des Weiteren positiv auf die Modellqualität schließen.
- Insgesamt gesehen sind die im Vergleich zur jeweiligen Referenz erhobenen statistischen Merkmale schlechter, als dies beim Edelsberggebietes der Fall war. Hierfür kommen die im folgenden angeführten Gründe als mögliche Ursachen in Frage:
 - Die wegen der Gebietsgrößen und der damit zu erwartenden Datenmenge gewählte Bandbreite von 200 MHz bedingt eine zweifache Verschlechterung der Entfernungsauflösung und beinhaltet somit nur die Hälfte der Information einer Bandbreite von 400 MHz.
 - Verbleibende Unwrapping-Fehler wirken sich hinsichtlich der höheren durchschnittlichen Phase-zu-Höhe-Werte bei der Geokodierung folglich in größeren Fehlern der entsprechenden Geländeabschnitte aus.
 - Die Geländeformen von Hochgebirgsregionen sind für ein SAR systembedingt generell schwierig zu erfassen. Die Reliefeinflüsse wirken sich negativ auf die Phasemessung und somit auf die Geländemodellerstellung aus.
- Die genannten Punkte führen zu dem Fazit, dass das Verwallgebiet befriedigend beschrieben ist und in ausgewählten Bereichen den kartographischen Anforderungen entspricht. Dies gilt, allerdings mit besagten Einschränkungen, ebenfalls für die Silvrettagruppe, die jedoch außerhalb der layover- und shadowfreien, sowie hinreichend beleuchteten Bereiche nur unzureichend abgebildet ist.

9.2.1.2 Kartographische Situation

Die SAR- und die Kohärenz-Szene Verwall₃ bilden die Grundlage für die Kategorisierung der Alternative eins in die Klassen Schnee1, Schnee2, Wald, Layover, Shadow, offene Fläche und Siedlung. In Tabelle 9-10 sind die dazu genutzten und mit Hilfe der Feature-Selection eruierten Merkmale aufgelistet.

Tabelle 9-10. Feature-Selection Szene Verwall₃.

	Features
SAR-Szene Verwall ₃	$ls_1, ls_3, ls_4, co_1, co_2, L_{E5 \times L5}, w_{5 \times L5}$
Kohärenz Verwall ₃	Kohärenz, ls_3

Abbildung 9-20 zeigt das Resultat der Kategorisierung, wobei hier die in den SAR-Szenen unterschiedlich reflektierenden Klassen Schnee1 und Schnee2, bzw. Shadow und Layover als jeweils eine Klasse ausgewiesen sind. Gleich dem Edelsberggebiet fasst die Klasse "Offene Fläche" Oberflächenbedeckungen wie Wiese, Weide, Garten, Ödland (ohne höhere Sträucher und Bäume) oder alpine Matten zusammen. Zum visuellen Vergleich steht dem Ergebnis die SAR-Szene Verwall₃ der Abbildung 9-19 gegenüber. Nach der Betrachtung der Resultate der zweiten Alternative folgt die Diskussion zur Klassenauswahl und eine Interpretation der Ergebnisse.

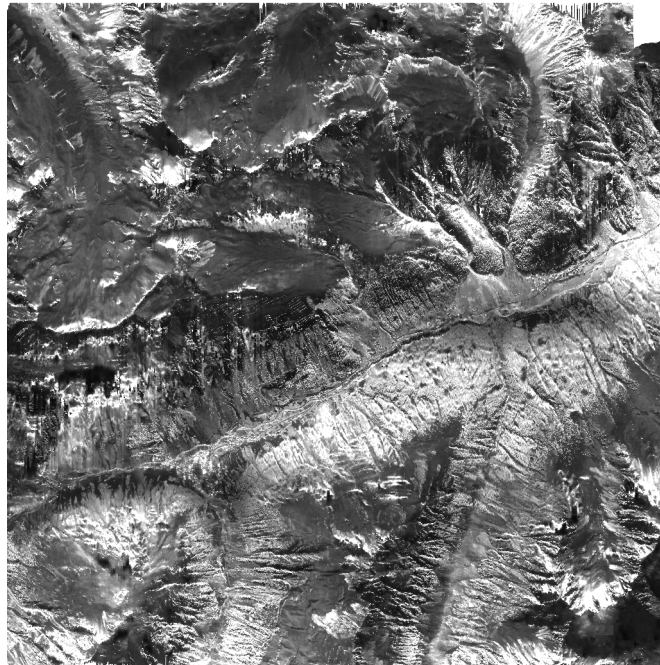


Abbildung 9-19. SAR-Szene Verwall₃.

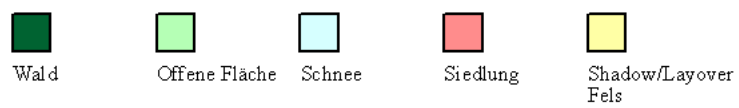
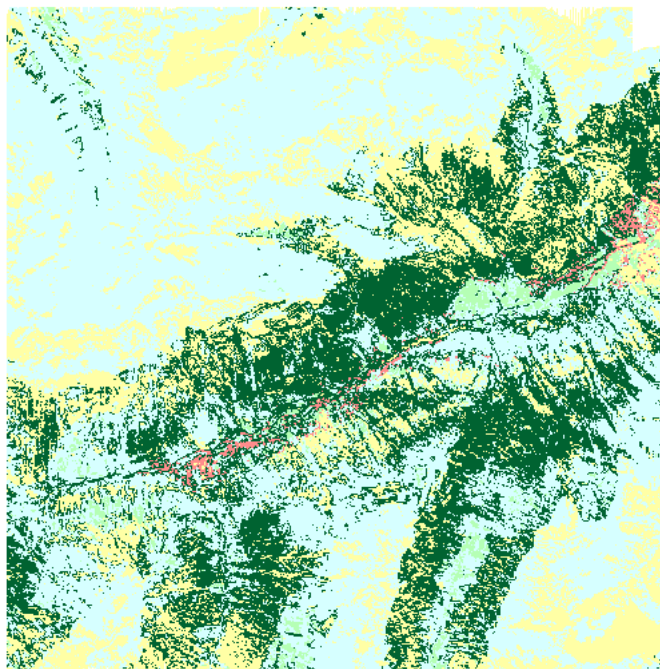


Abbildung 9-20. Klassifikation Verwall_{Klass1}.

Um die Vergleichbarkeit beider Methoden zu wahren, wurde die Klassenauswahl und die Aufbereitung des Ergebnisses der Alternative zwei analog zur ersten Alternative gehalten. Als Klassifikationsbasis dienen hier die SAR- und Kohärenz-Szenen $Verwall_1$ und $Verwall_2$, deren ermittelte Features in den Tabellen 9-11 und 9-12 genannt sind.

Tabelle 9-11. Feature-Selection Szene $Verwall_1$.

	Features
SAR-Szene $Verwall_1$	$ls_1, ls_3, ls_6, co_1, co_2, co_5, L_{E5 \times L5}, L_{S5 \times S5}$
Kohärenz $Verwall_1$	Kohärenz

Tabelle 9-12. Feature-Selection Szene $Verwall_2$.

	Features
SAR-Szene $Verwall_2$	$ls_1, ls_3, co_1, co_2, co_5, W_{5 \times L5}, L_{R5 \times L5}$
Kohärenz $Verwall_2$	ls_2, ls_3

Während die Abbildungen 9-21 bis 9-23 die SAR- und Kohärenz-Szenen der West-Ost Befliegung sowie das erzielte Zwischenergebnis der Maximum-Likelihood Klassifikation zeigen, stellen die Abbildungen 9-24 bis 9-26 die entsprechenden Produkte der Ost-West Befliegung dar. In Abbildung 9-27 gibt schließlich $Verwall_{Klass2}$ das Endergebnis des zweiten Klassifikationsalgorithmus wieder.

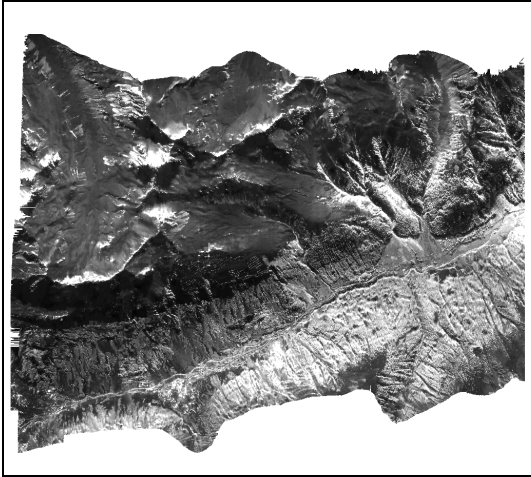


Abbildung 9-21. SAR-Szene Verwall₁.

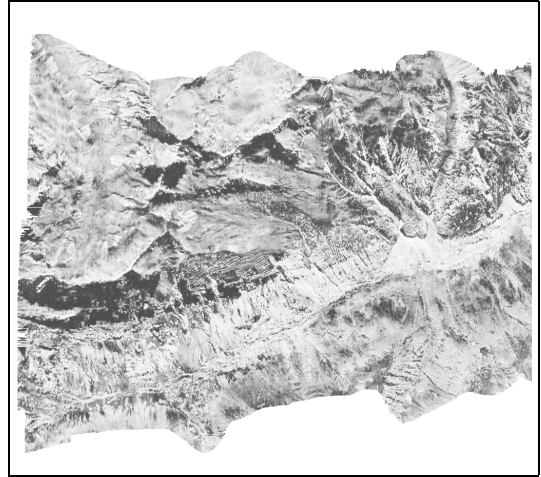


Abbildung 9-22. Kohärenz-Szene Verwall₁.

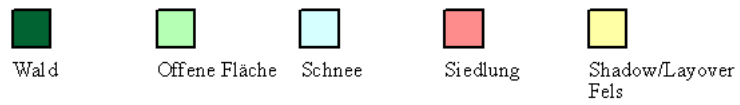
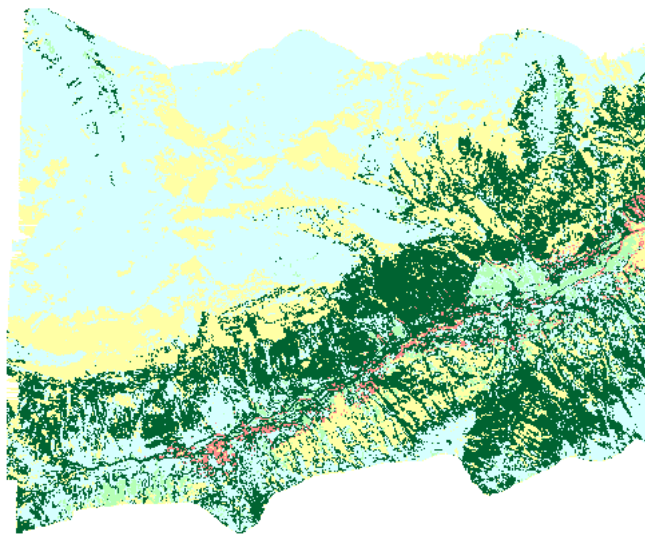


Abbildung 9-23. Maximum-Likelihood Klassifikation Verwall₁.

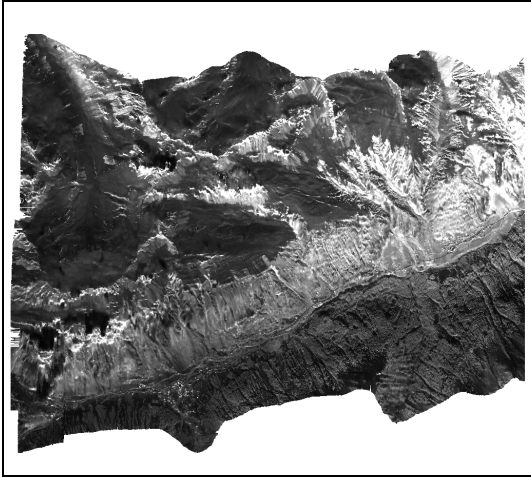


Abbildung 9-24. SAR-Szene Verwall₂.

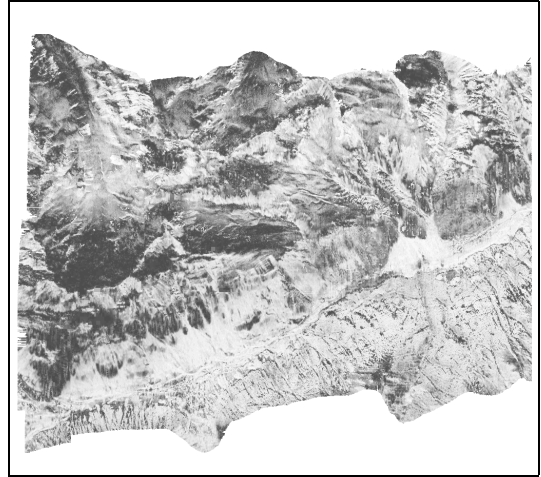


Abbildung 9-25. Kohärenz-Szene Verwall₂.

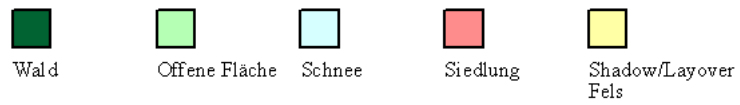
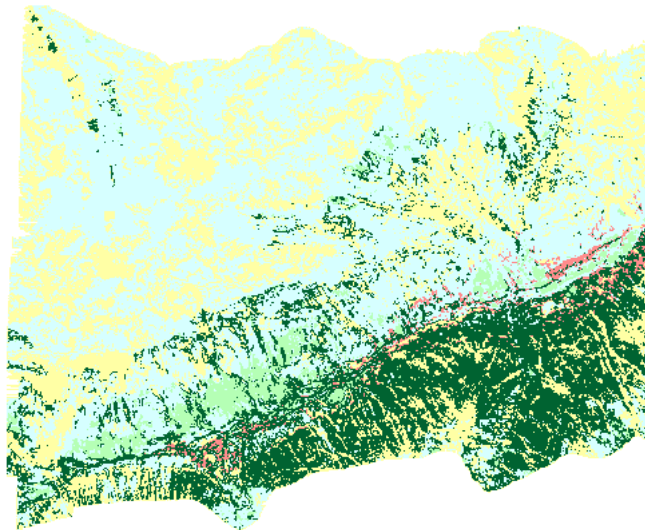


Abbildung 9-26. Maximum-Likelihood Klassifikation Verwall₂.

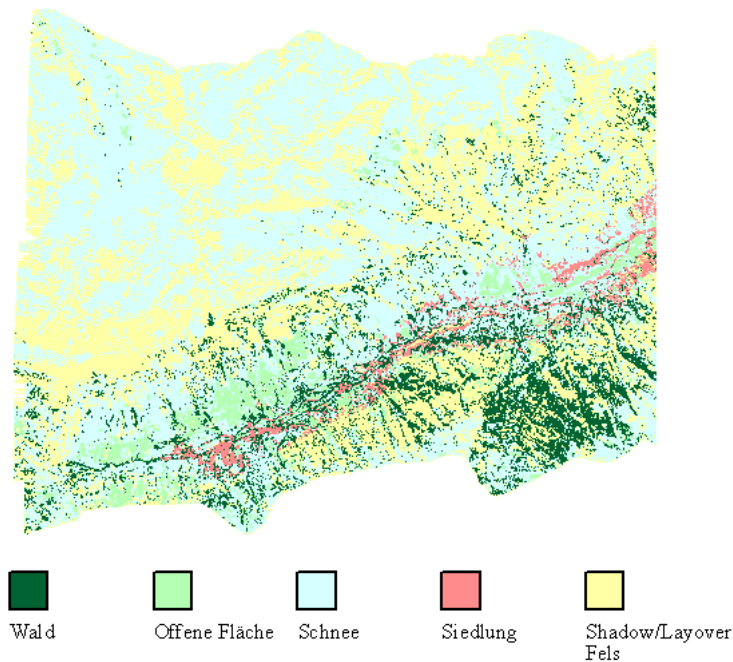


Abbildung 9-27. Klassifikation Verwall_{Klass2}.

Die Kriterien zur Klassenauswahl für die Verwallgruppe sind eng an die des Edelsberggebietes angelehnt. So bleiben die Klassen Wald, offene Fläche, Shadow, Layover und Siedlung bestehen. Unterschiede ergeben sich jedoch in der Nichtberücksichtigung der Klassen Bahn und Straße und durch die jahreszeitlich bedingte Hinzunahme von Schnee1 und Schnee2. Die Wegnahme der Straßenklasse ist darin begründet, dass eine Detektion der Verbindungsstraße zwischen Ischgl und Galtür zwar teilweise möglich war, aber aufgrund spektraler Ähnlichkeiten, insbesondere in Wald- und Shadowbereichen, zu vielen Fehlklassifikationen führte. Die übrigen Straßen sind für eine Erfassung zu schmal; des Weiteren befinden sich keine Eisenbahnschienen im Testgebiet, so dass auf die Kategorien Verkehrswege bzw. Bahn verzichtet wurde. Da unterschiedlich dichter Schnee verschiedene Reflexionen verursacht, erweist sich eine Unterscheidung in zwei visuell erkennbare verschiedene Schneeklassen als sinnvoll. Eine Detektion der kleineren Flüsse wie auch der breiteren Trisanna war aus denselben Gründen wie beim Gebiet Edelsberg nicht möglich. Die im Gebiet vorkommenden stehenden Gewässer waren zum Aufnahmezeitpunkt aufgrund ihrer Höhenlage und der herrschenden Wetterbedingungen sehr wahrscheinlich schneebedeckt und werden daher der Kategorie Schnee zugeordnet. Die im Gebiet vorkommenden Felsregionen bilden keine eigene Klasse, da sie spektral entweder den Layover- oder den Shadowgebieten zuzuordnen sind.

Gegenüber dem Edelsberggebiet beinhaltet die Interpretation der Klassifikationsergebnisse der Verwallgruppe folgende neue oder vom ersten Testgebiet abweichende Erkenntnisse:

- Siedlungs- und Felsregionen sind sich spektral sehr ähnlich und lassen sich großteils erst durch das Einbringen von a priori-Wissen trennen. Falsch klassifizierte Siedlungsflächen in Felsgebieten sind mittels der DHM-Informationen der Shadow/Layover-Klasse zugeordnet, da, wie erwähnt, keine eigene Felsklasse existiert.
- Aus demselben Grund kommt es teilweise zu Fehlklassifikationen von unterschiedlich dichtem Schnee bzw. bestimmten Flächen, die eine enge räumliche Abfolge zwischen Layover- und Shadowgebieten aufweisen, in die Klasse offene Fläche oder Wald.
- Für eine Bewertung der beiden Algorithmen sind zunächst die Zwischenergebnisse der M-L-Klassifikation der Szenen Verwall₁ und Verwall₂ sowie die Mosaikerstellung der Szene Verwall₃ zu diskutieren.
- Aufgrund von Reliefeinflüssen sind die Waldgebiete in der SAR-Szene Verwall₂ an den Hängen nördlich der Trisanna sehr schlecht zu identifizieren. Die Klassifikation weist diese Regionen deshalb fälschlicherweise größtenteils als Schnee aus. Dabei kommt es angesichts der Kohärenzinformationen bei der D-S-Fusion für die Schneeflächen nur zu einem geringen Konflikt. Die Waldflächen an den Hängen südlich der Trisanna sind in der Szene gut wahrzunehmen und werden auch richtig klassifiziert. Durchschnittlich weisen die Waldgebiete jedoch ein höheres Konfliktmaß als die Schneeflächen auf.
- Aus den oben genannten Gründen sind bei der SAR-Szene Verwall₁ die Hänge südlich der Trisanna ebenfalls nicht optimal wiedergegeben. Viele Waldflächen erscheinen bereits in der SAR-Szene unklar, werden als Schnee kategorisiert und erhalten bei der D-S-Fusion ebenfalls ein niedriges Konfliktmaß. Bei den richtig erkannten Waldflächen liegt im Durchschnitt wiederum ein höherer Konflikt vor.
- Bei der konfliktgewichteten Fusion werden die Schneeflächen mit dem niedrigeren Konfliktmaß dann fälschlicherweise den Waldflächen vorgezogen.
- Die Mosaikerstellung der SAR-Szene Verwall₃ hat auch Schwächen. Hier wird südlich der Trisanna ebenfalls die Verwall₁-Information genutzt, so dass der Wald nicht klar erkennbar ist. Die Kategorisierung hat hier vermehrt Schneeflächen zum Ergebnis und ist gemessen an der in diesen Bereichen plausibelsten SAR-Szene Verwall₂ als falsch einzustufen.
- Der Klassifikation Verwall_{Klass1} ist infolge der glaubhafteren Walddarstellung nördlich der Trisanna jedoch ein Vorteil gegenüber der Kategorisierung Verwall_{Klass2} einzuräumen, obgleich beide Lösungen nicht optimal sind.
- Eine Optimierung der Resultate ist zum einen durch eine verbesserte Mosaikerstellung zum anderen durch eine weitere Befliegungsrichtung bzw. einen höheren Überlappungsbereich zu erzielen, da eine korrektere Erfassung sehr wahrscheinlich die im D-S-Algorithmus auftretenden Fehler einschränken würde.
- Abschließend lässt sich sagen, dass das Gebiet hauptsächlich aufgrund der Probleme in der Erfassung von Wald- und Felsflächen nur befriedigend bis ausreichend beschrieben und so eine allenfalls eingeschränkt brauchbare Basisstruktur für die Kartenerstellung gegeben ist.

9.2.2 Ableitung kartographischer Produkte

Für die Ableitung kartographischer Produkte werden die Höhenmodelle Silvretta₁ und Verwall₃ sowie das Klassifikationsresultat Verwall_{Klass1} berücksichtigt, da sich diese, wie in den vorangehenden Abschnitten diskutiert, hinsichtlich der Bodenreferenz bzw. der visuellen Interpretation der InSAR-Daten als die plausibelsten erweisen. Als Postprocessing Schritt erfolgt dazu für das DHM Silvretta₁ bzw. Verwall₃ für einen Maßstab von 1:25 000 jeweils eine Mittelwertfilterung in einem 11 × 11 Pixel bzw. 15 × 15 Pixel großen Fenster.

Die generierten Kartenprodukte der Verwallgruppe sind denen des Edelsbergtestgebietes gleich. Für die Silvrettagruppe fand aus genannten Gründen keine Klassifikation der Daten statt, so dass keine aus InSAR-Daten hergeleiteten topographischen Karten zur Verfügung stehen. Aufgrund der diskutierten Fehler im Höhenmodell erscheint auch die Ableitung einer Neigungs- und Expositionskarte oder auch die Erstellung eines Höhenlinienbildes nicht als sinnvoll. Um dennoch einen Eindruck des Testgebietes zu erhalten, sei auf die Höhenstufenkarte verwiesen, welche die genannten Fehler in den nach Osten exponierten Hängen verdeutlicht und somit nochmals den Verzicht auf die Extraktion weiterer Reliefinformationen begründet.

Die Äquidistanz des Höhenlinienbildes der Verwallgruppe errechnet sich nach der in Kapitel 9.1.2 angegebenen Formel 9-2 für eine maximale topographische Geländeneigung von 50° und dem Maßstab von 1:25 000 mit einem Wert von 22,6 Metern. Da die im Anschluss präsentierten Karten aufgrund der Gebietsausdehnung jedoch in einem kleineren Maßstab dargestellt sind, ist hier angesichts graphischer Gesichtspunkte eine Äquidistanz von 50 Metern gewählt.

Sowohl die “topographischen Karten” der Abbildungen 9-28 und 9-29 als auch die Karten zur Reliefbetrachtung der Abbildungen 9-30 und 9-33 der Verwall- bzw. der Silvrettagruppe folgen bezüglich der kartographischen Darstellungskriterien den in Abschnitt 9.1.2. vorgestellten Grundsätzen.

"Topographische Karte" Verwallgruppe

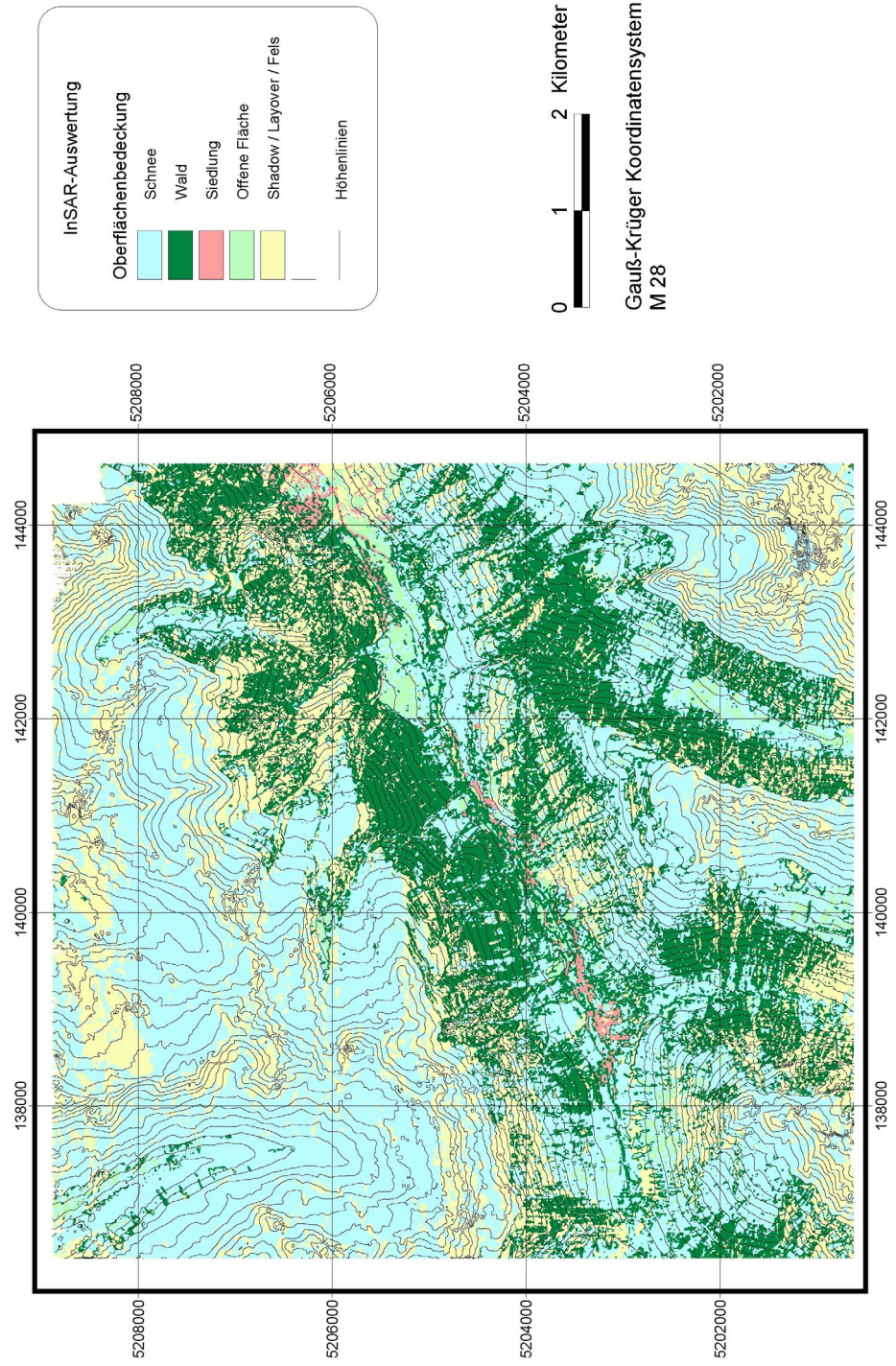


Abbildung 9-28. "Topographische Karte" Verwallgruppe.

"Topographische Karte" Verwallgruppe

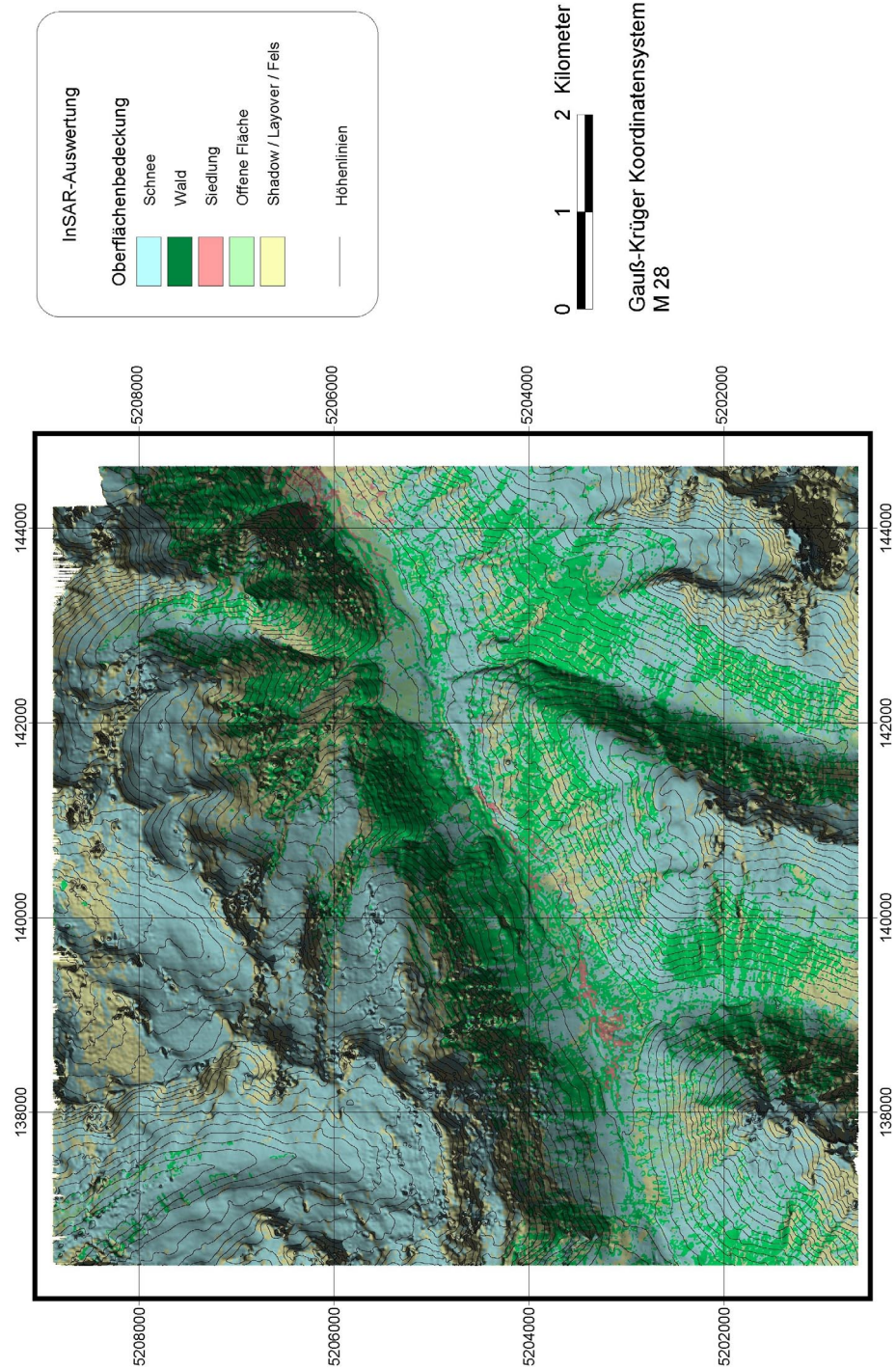


Abbildung 9-29. "Topographische Karte" der Verwallgruppe mit integriertem Beleuchtungsmodell.

Neigungskarte Verwallgruppe

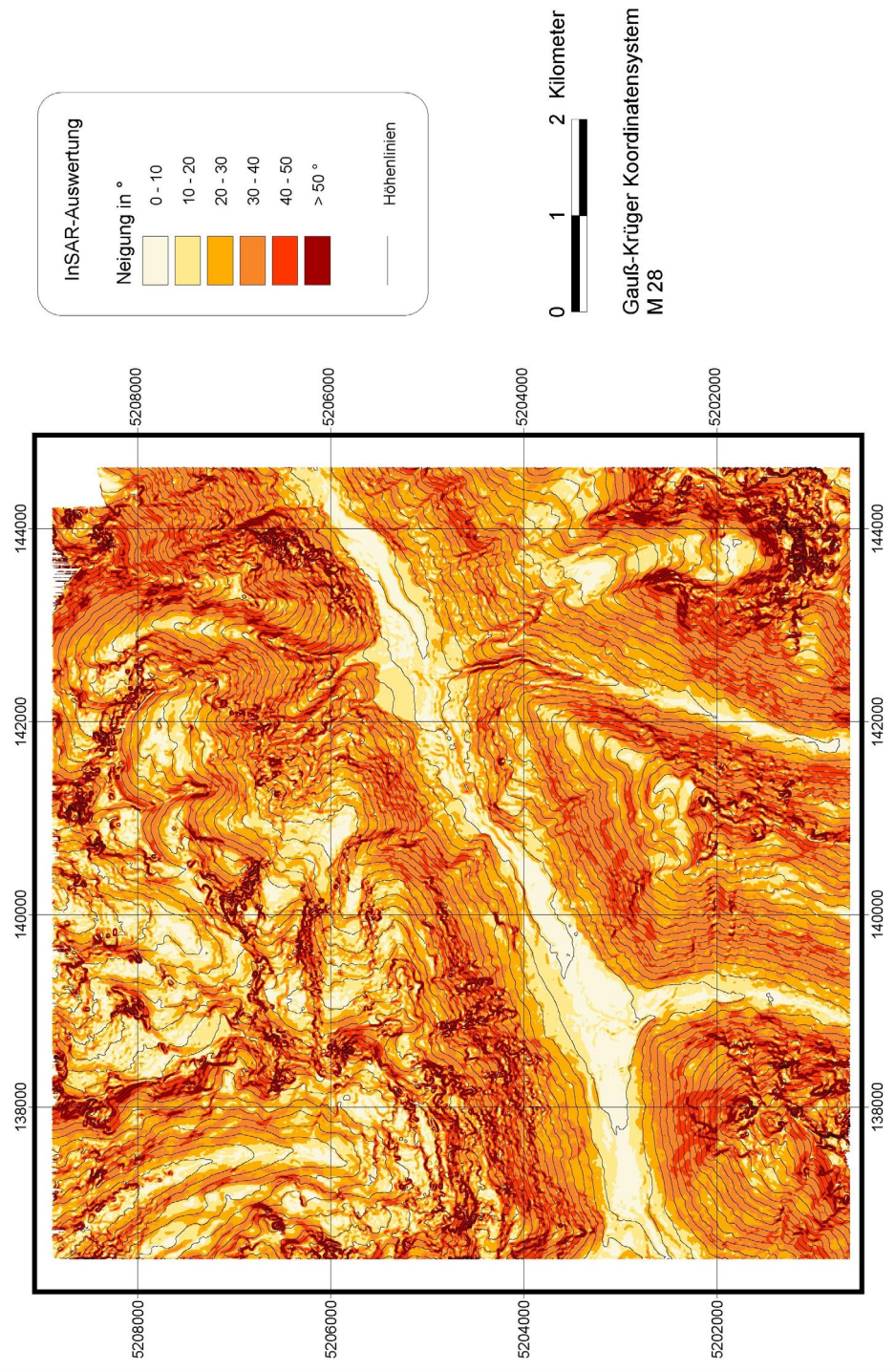


Abbildung 9-30. Neigungskarte Verwallgruppe.

Expositionskarte Verwallgruppe

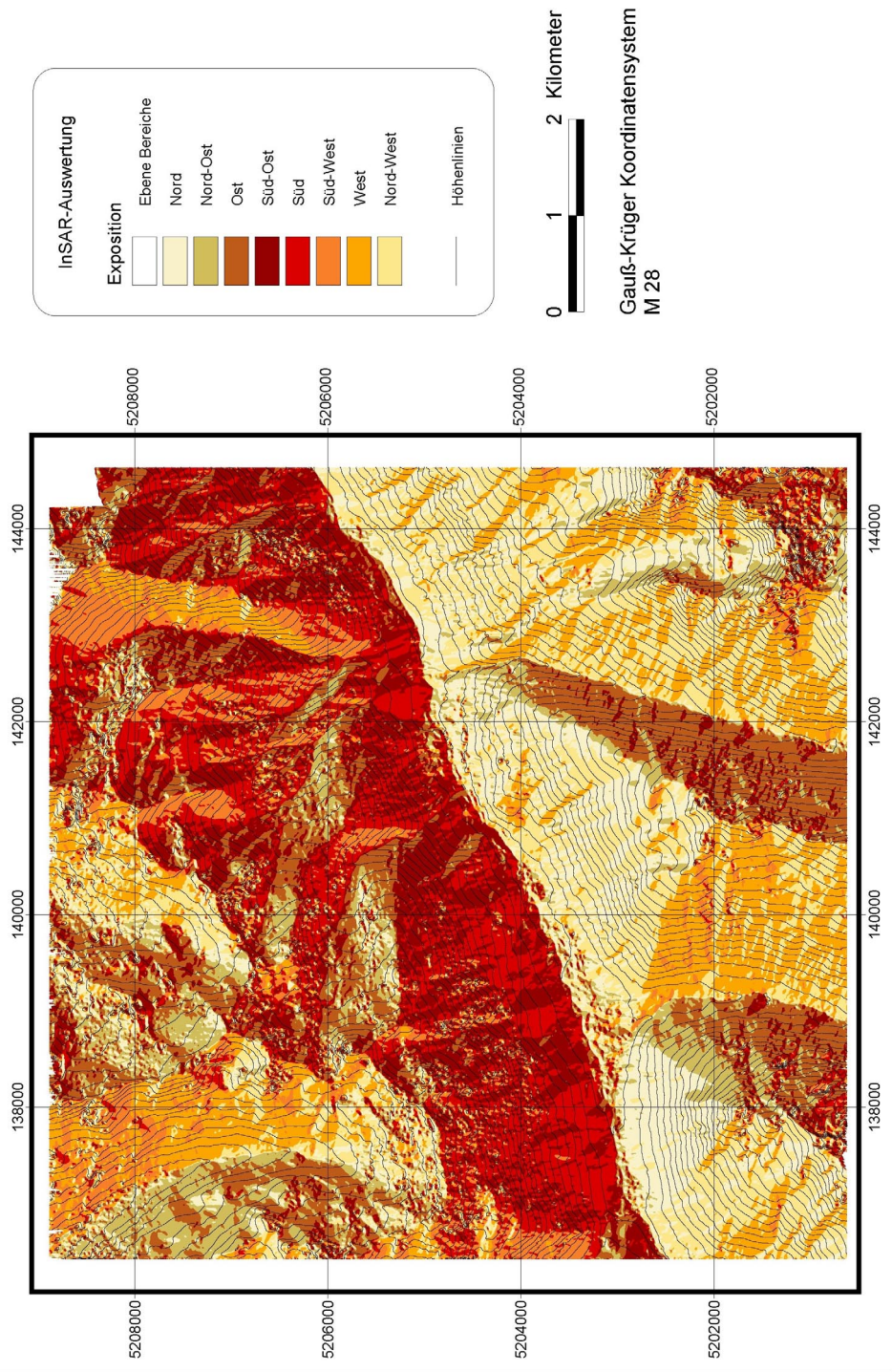


Abbildung 9-31. Expositionskarte Verwallgruppe.

Höhenstufenkarte Verwallgruppe

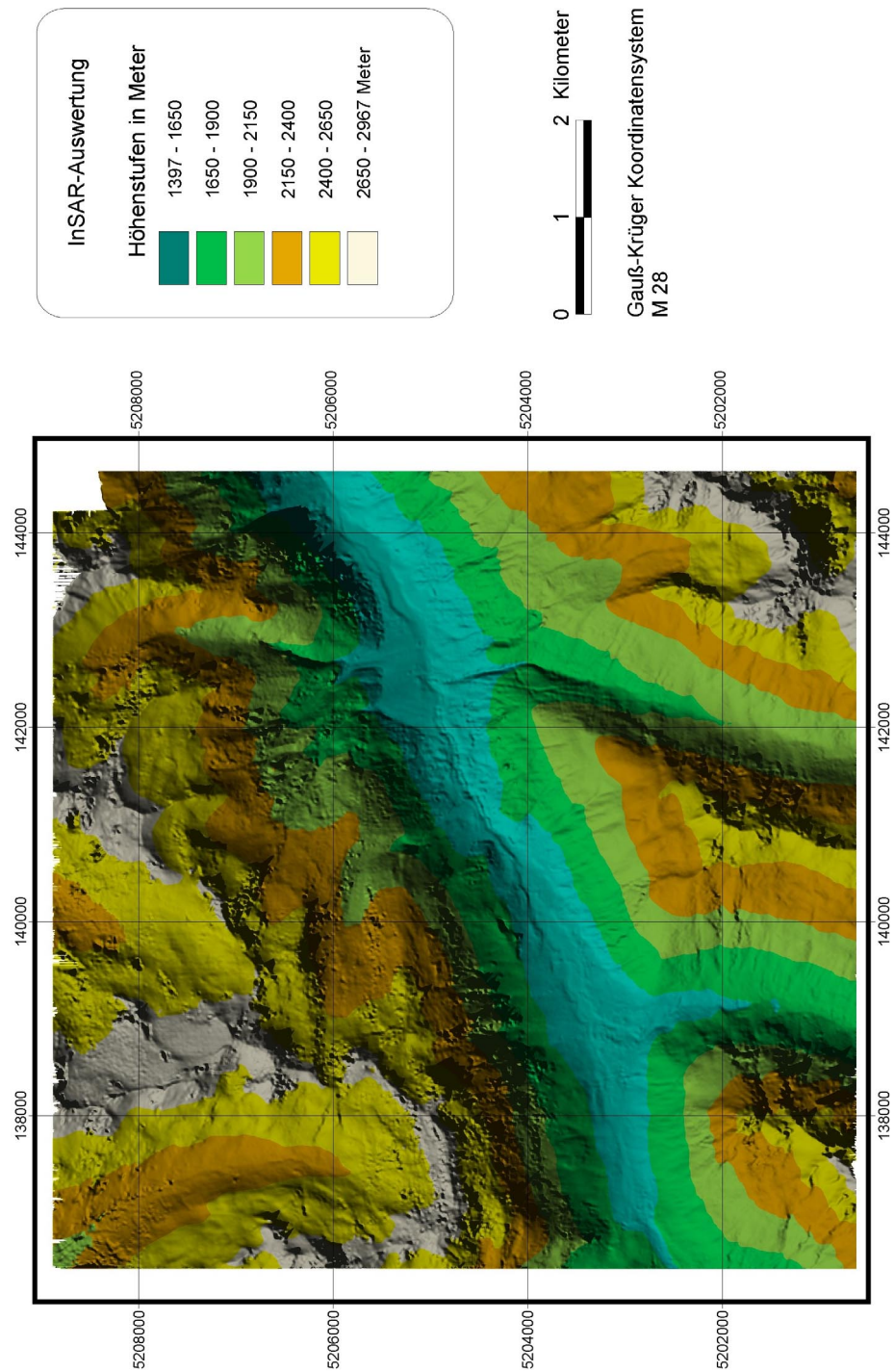


Abbildung 9-32. Höhenstufenkarte Verwallgruppe.

Höhenstufenkarte Silvrettagruppe

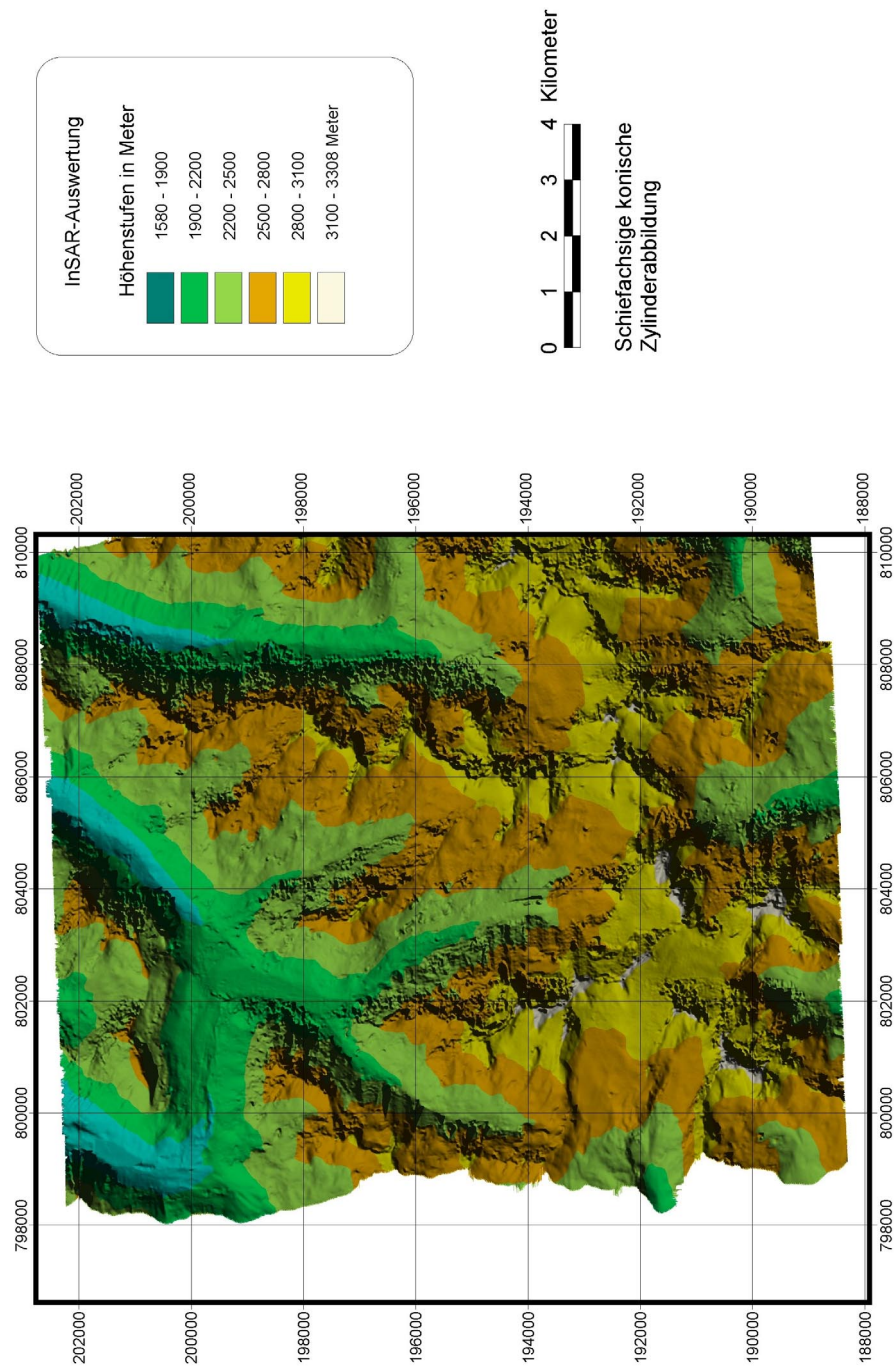


Abbildung 9-33. Höhenstufenkarte Silvrettagruppe.

9.2.3 Zusammenfassende Bewertung

Die geomorphologischen Merkmale beider Testgebiete sind durch den hochalpinen Formenschatz gekennzeichnet. Für das Verwallgebiet ergibt zum einen die Modellanalyse und zum anderen der visuelle Vergleich der erstellten Karten mit den AV-Karten, dass alle geomorphologischen Großformen erfasst wurden und in den aus den InSAR-Daten abgeleiteten Karten deutlich erkennbar sind. Auf die Gesamtsituation gesehen weist dieses Testgebiet die schon in Kap. 9.1.3 für das Edelsberggebiet besprochenen Nachteile verbliebener Shadow- und Layoverflächen sowie der Nichterfassung der Fließgewässer auf. Hinzu kommen die ausgedehnten Schneeflächen, die Höhenfehler induzieren. Außerdem sind im X-Band-Oberflächenmodell und in den daraus abgeleiteten Reliefinformationen einige fehlerhafte Kleinformen zu bemängeln, die durch das DOM-Postprocessing nicht eliminiert sind. Eine gänzliche Beseitigung ist mit einem größerem Fenster bei der Filtrierung zwar möglich, hat aber auch eine weitere unerwünschte Glättung des Höhenmodells zur Folge.

Wie bereits für das Edelsberggebiet kann für die Verwallgruppe festgestellt werden, dass im Detail betrachtet die Qualität des Modells, die insgesamt als befriedigend einzustufen ist, mit den zur Verfügung stehenden InSAR-Informationen gekoppelt ist. Je mehr systembedingt sinnvolle Daten zu verarbeiten sind, desto besser kann die Ableitung der Oberflächenbedeckung bzw. desto detailreicher und plausibler die Erfassung des geomorphologischen Formenschatzes erfolgen.

Die aus dem InSAR-DOM generierten Reliefinformationen stützen die gemachten Aussagen, da sie gegenüber den Referenzkarten im Rahmen der erörterten Aspekte als adäquat anzusehen sind.

Für die Silvretta-Gruppe ist, wie diskutiert, nur eine eingeschränkte Modellanalyse und Ableitung kartographischer Produkte möglich. Die Höhenmodellanalyse zeigt in hinreichend abgebildeten Bereichen sowohl für die Erfassung der geomorphologischen Großformen als auch im Detail betrachtet ebenfalls befriedigende Ergebnisse, die jedoch in allen anderen Regionen mangelhaft ausfallen. Dies kommt auch in der abgeleiteten Höhenstufenkarte zum Ausdruck.

9.3 Fazit

In der vorliegenden Arbeit ist in Gebirgsregionen erstmals das Potential von flugzeuggetragenen InSAR-Daten für die Ableitung kartographischer Produkte untersucht worden. Darin wird die Problematik erörtert, ob die Erstellung eines Modells der realen Welt, das dieser in ausgewählten Attributen so genau wie maßstabsbedingt möglich entspricht, mit den zur Verfügung stehenden Methoden realisierbar ist. Des Weiteren ist diskutiert, ob die aus dem Modell abgeleiteten topographischen Karten bzw. Karten zur geomorphologischen Reliefbetrachtung die charakteristischen Landschaftselemente möglichst formtreu und anschaulich abbilden, so dass das Wesen der Landschaft aus dem Kartenbild spricht. Nach Auswertung der drei Hochgebirgsregionen wird die eingangs gestellte Frage, ob, bzw. wie weit die Radarfernerkundung als originäre und alleinige Erfassungsmethode, gemessen an den Anforderungen der Gebirgskartographie, zur Kartenerstellung in Gebirgslandschaften dienen kann, zusammenfassend betrachtet:

- **Geländemodellerstellung:**

- Die charakteristischen geomorphologischen Grobstrukturen der Testgebiete kommen in hinreichend erfassten, sowie layover- und shadowfreien Gebieten der InSAR-DHM gut zum Ausdruck.
- Die Qualität der InSAR-DHMs verschlechtert sich demnach in Shadow- bzw. Layover-Regionen oder wenn die Gebiete nur im Far Range-Bereich beleuchtet sind.
- Die Nutzung aller zur Verfügung stehenden Informationen, also die Mosaikerstellung beider Befliegungsrichtungen, führt gegenüber einer nach Flugrichtung getrennten Aufbereitung zu einer Qualitätssteigerung der InSAR-DHMs.
- Das X-Band-Modell weist in Gebieten, die mit nicht-reliefbezogenen Objekten bestanden sind, Höhenfehler auf, da dieses Frequenz-Band die Oberfläche und nicht das reliefbezogene Gelände abbildet.
- Die detaillierte geomorphologische Formbetrachtung ergibt, dass hinreichend gut abgebildete Gebiete ohne nicht-reliefbezogene Objekte zumeist innerhalb der geforderten geometrischen Genauigkeit liegen und sich die Profilverläufe nuancierter als die der Referenz zeigen, so dass das Modell in ausgewählten Bereichen den kartographischen Anforderungen entspricht. Die mit nicht-reliefbezogenen Objekten bestandenen Gebiete weisen überwiegend sinnvoll erklärbar Abweichungen zur Referenz auf.
- Die genannten Punkte führen zu der Schlussfolgerung, dass das X-Band-Höhenmodell, mit Ausnahme der für die Silvrettagruppe diskutierten Aspekte, die Testgebiete gut bis befriedigend beschreibt, jedoch aufgrund der Oberflächenabbildung für die topographische Kartographie in dieser Form nur eingeschränkt anwendbar ist.

- **Klassifikation:**

- Eine Abgrenzung der Klassen Wald, offene Fläche, Siedlungen sowie der systemimmanenten Klassen Shadow und Layover ist grundsätzlich gut möglich.
- Die Detektion linearer Elemente wie Verkehrswege oder Fließgewässer ist ebenso wie die von Felsflächen schwierig. Eine Ausnahme bilden hier Bahnschienen, die aufgrund ihrer Materialbeschaffenheit gut zu erfassen sind.
- Spektral ähnliche Signaturen unterschiedlicher Klassen sind teilweise nicht zu trennen und führen somit zu Fehlklassifikationen, die jedoch gebietsweise durch das Einbringen von a priori-Wissen zu korrigieren sind. Dies trifft hauptsächlich auf stark überstrahlte Gebiete zu.
- Das Auftreten von Schnee führt bei der Klassifikationsalternative 2 zu Fehlern, da bei der konfliktgewichteten Fusion Schneeflächen oftmals fälschlicherweise den Waldflächen vorgezogen werden und somit falsch klassifiziert sind.
- Je mehr sinnvoll nutzbare Informationen zur Verfügung stehen, desto besser ist das Klassifikationsergebnis.
- Die Klassifikationsergebnisse sind insgesamt gesehen als befriedigend einzustufen. Zusammenfassend lässt sich für die Kategorisierung der InSAR-Daten daher sagen, dass zumindest vier für die Kartenerstellung sinnvolle Klassen extrahiert werden können und dass die Testgebiete trotz verbleibender Shadow- bzw. Layoverflächen befriedigend beschrieben sind und so eine brauchbare Basisstruktur für die Erstellung topographischer Karten gegeben ist.

- **Kartographische Produkte:**

- Die aus den InSAR-Daten generierten kartographischen Produkte geben insgesamt das Wesen der jeweiligen Landschaft wieder. Die Karten weisen jedoch im Detail die diskutierten positiven und negativen Modell Aspekte auf und werden somit den Anforderungen der Gebirgskartographie nur teilweise gerecht.

Die vorliegende Arbeit hat aufgezeigt, dass die Radarfernerkundung ein sinnvolles und nutzbringendes, wenn auch sicherlich verbesserungswürdiges Werkzeug in der Gebirgskartographie darstellt. Als alleinige Erfassungsmethode kommt sie für eine kartographisch korrekte flächendeckende Aufnahme eines Hochgebirgsgebietes mit den zur Verfügung stehenden Daten und genutzten Methoden jedoch derzeit nicht in Frage. Mögliche Verbesserungsvorschläge, die zum einen die Datenqualität und zum anderen die Methodik betreffen, werden im folgenden abschließenden Kapitel vorgestellt.

10 Ausblick

Stichwortartig sollen im folgenden Vorschläge unterbreitet werden, wie die flugzeuggetragene Radarfernerkundung dem Ziel der alleinigen Erfassungsmethode in Gebirgsregionen sowie einer nachfolgend korrekten kartographischen Umsetzung der Daten vermutlich ein Stück näher gebracht werden kann:

- Die Datenerfassung soll, wenn möglich, mit einer Bandbreite von 400 MHz erfolgen, da hier der Informationsgehalt der Daten am größten ist. Außerdem hat sich gezeigt, dass die Abbildung eines stark reliefierten Gebietes aus mehr als zwei Richtungen zweckdienlich ist. Die Hinzunahme mindestens zweier zusätzlicher Befliegungsrichtungen erscheint für Gebirgsregionen daher grundsätzlich angebracht.
- Eine Verbesserung der Mosaikerstellung, die eine Qualitätssteigerung sowohl der SAR-Bild- als auch der Geländemodell-Endprodukte zur Folge hat, ist durch eine verstärkte Einbindung der Kohärenz sowie von Informationen über Datenqualität, wie z.B. dem "root mean square error", und Gelände denkbar.
- Eine Weiterentwicklung der Klassifikation von InSAR-Daten in Gebirgsregionen bietet ein ausgedehntes Betätigungsfeld. Die Erkennung linearer Elemente, wie Straßen und Flüsse, oder die Detektion von Felsregionen ist hier als Beispiel zu nennen. Dazu ist das erst nach der Beendigung dieser Arbeit zur Verfügung stehende vollpolarimetrische P-Band als zusätzliche Informationsquelle sicherlich von großem Nutzen.
- Eine Qualitätssteigerung bei der Generierung von Höhenmodellen ist durch den Einsatz der nun ebenfalls operationell arbeitenden drei Antennen X-Band-Konfiguration, die zur Verminderung von Phase Unwrapping-Fehlern und zu einer verfeinerten Datenprozessierung beiträgt, wahrscheinlich. Die Reduktion des Oberflächenmodells zum Geländemodell ist sowohl durch die interferometrische Nutzung des P-Bandes, das in vegetationsbestandenen Gebieten größtenteils Informationen über die eigentliche Geländeoberfläche anbietet, als auch durch die Entwicklung neuer Algorithmen vorstellbar.

11 Literaturverzeichnis

- [AdV89] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland AdV (Ed.). (1989). Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS), Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn.
- [Ahmed90] Ahmed, S. Warren, H. R. Symonds, D. und Cox, R. P. (1990). The Radarsat System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, pp. 598-602.
- [AVa] Alpenvereinskarte Silvretta-Gruppe. Nr:26 (1991). Alpenvereinskartographie des Deutschen Alpenvereins.
- [AVb] Alpenvereinskarte Verwallgruppe. Mittleres Blatt. Nr:28/2. (1990). Alpenvereinskartographie des Deutschen Alpenvereins.
- [Albertz01] Albertz, J. (2001). Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- [AlNakib96] Al Nakib, N. (1996). Interpretation und digitale Bearbeitung von Kartenobjekten aus SAR-Daten für die Kartenherstellung der Maßstäbe 1:25.000 und 1:100.000. Diplomarbeit, Studiengang Kartographie, Fachbereich 08 Geoinformationswesen, Fachhochschule München.
- [Bammler98] Bammler, R. und Hartl, P. (1998). Synthetic Aperture Radar Interferometry. Inverse problems, Vol. 14, pp. R1-R54.
- [Bammler93] Bammler, R. und Schättler, B. (1993). SAR Data Acquisition and Image Formation, pp. 53-102. Wichmann, Karlsruhe.
- [Besag86] Besag, J. (1986). On the Statistical Analysis of Dirty Pictures. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 48, No. 3, pp. 259-302.
- [Bishop95] Bishop, C. (1995). Neural Networks for Pattern Recognition. Clarendon Press, Oxford.

- [Bloch96] Bloch, I. (1996). Information Combination Operators for Data Fusion: A Comparative Review with Classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 26, No. 1, pp. 52-67.
- [Breiman84] Breiman, L. Friedman, J. Olshen, R. und Stone, C. J. (1984). Classification and Regression Trees, Chapman and Hall, New York.
- [Brown92] Brown, R.J. Manore, M.J. und Poirier, S. (1992). Correlations between X-, C-, and L-band imagery within an agricultural environment. International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, No. 9, pp. 1645-1661.
- [Buchroithner92] Buchroithner, M.F. (1992). Polarimetric Multi-Frequency SAR-Data Applied to High-Alpine Geological Mapping. EARSeL-Report "Radar in Geology", Spec. Meeting, Graz, Juli 1991; pp.29-39.
- [Buchroithner93] Buchroithner, M.F. (1993). Cartographic Information Extraction from SAR Images Using Filtering and Textural Analysis. In: Schreier, G. (Ed.) SAR Geocoding: Data and Systems. pp. 353-372, Wichmann, Karlsruhe.
- [Buchroithner95] Buchroithner, M.F. und Granica, K. (1995). Applications of Imaging Radar in Hydro-Geological Disaster Management: A Review. Remote Sensing Reviews, Vol. 16. pp. 1-134, Harwood Academic Publishers.
- [Buchroithner00] Buchroithner, M.F., Kraetzschmer, E. und Hellmann, M. (2000). Advanced Polarimetric SAR Data Classification for Cartographic Information Extraction. J.-L. Casanova (Ed.): Remote Sensing in the 21st Century: Economic and Environmental Applications. pp. 533-539.
- [Bullock97] Bullock, M., Lawrence, G. und Tennant, K. (1997). Commercial Application of the Intermap IFSARE System. Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference, pp. 34-41.
- [Landestopo] Bundesamt für Landestopographie, Wabern, Schweiz. <http://www.swisstopo.ch/>
- [Carpenter89] Carpenter, G.A. (1989). Neural Network Models for Pattern Recognition and Associative Memory. Neural Networks, Vol. 2, pp. 243-257.
- [Coltelli96] Coltelli, M., Dutra, L., Fornaro G., Franceschetti, G., Lanari, R., Migliaccio, M., Moreira, J., Papathanassiou, K., Puglisi, G., Riccio, D. und Schwäbisch, M.

- (1996) SIR-C/X-SAR Interferometry over Mt. Etna: DEM Generation, Accuracy Assessment and Data Interpretation. DLR-Forschungsbericht DLR-FB 95-48
- [Curlander91] Curlander, J.C. und Mc Donough, R.N. (1991). Synthetic Aperture Radar, System & Signal Processing. John Wiley & Sons.
- [Damoiseaux97] Damoiseaux, T. (1997). Kartenerstellung mit Arc/Info. Diplomarbeit, Studiengang Kartographie, Fachbereich 08 Geoinformationswesen, Fachhochschule München.
- [Damoiseaux99] Damoiseaux, T. (1999). Production of topographical maps of low- and high-mountain terrain by means of high-resolution InSAR-Data. Proceedings of the 19th International Cartographic Conference, Ottawa, Canada, 14 - 21. 8. 1999.
- [Damoiseaux00a] Damoiseaux, T. (2000). Information extraction from interferometric SAR data for cartographic applications. Proceedings of the 20th EARSeL Symposium, Dresden, Germany, 14 - 16. 6. 2000. pp. 167-174.
- [Damoiseaux00b] Damoiseaux, T. (2000). Using InSAR Data to generate topographical maps in high mountain areas. Proceedings of the ASPRS 2000 Annual Convention, Washington DC.
- [Damoiseaux00c] Damoiseaux, T. (2000). Topographic map generation in high mountainous areas by means of InSAR data. Proceedings of the XIX ISPRS Congress, Amsterdam 2000.
- [Damoiseaux00d] Damoiseaux, T. (2000). Possible uses of InSAR data in high mountain cartography. In: Buchroithner, M.F. (Ed.) High Mountain Cartography 2000. Kartographische Bausteine, Band 18, Dresden 2000. pp.17-28.
- [Dempster68] Dempster, A.P. (1968). A Generalization of Bayesian Inference. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, No. 30, pp. 205-247.
- [Detlefsen89] Detlefsen, J. (1989). Radartechnik. Springer - Verlag, Berlin.
- [Domik85] Domik, G. (1985). Verfahrensentwicklung zur Analyse von digitalen Seitsicht-Radarbildern gebirgigen Geländes mittels digitaler Höhenmodelle und Bildsimulationen. Dissertation Technische Universität Graz. Institute for Image Processing and Computer Graphics Report No. 21, Joanneum Research, Graz, Austria.

- [Dutra99] Dutra, L.V. und Huber, R. (1999). Feature Extraction and Selection for ERS-1/2 InSAR Classification. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No. 5, pp. 993-1016.
- [Dutra98] Dutra, L.V., Huber, R., und Hernandez, P. F. (1998). Primary Forest and Land Cover Classification using JERS-1 Data in Amazonia, Brazil. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seattle, WA, USA.
- [Ebeling80] Ebeling, K.J. (1980). K-distributed spatial intensity derivatives in monochromatic speckle pattern. *Optics Communications*, Vol. 35, No. 3, pp. 323-326.
- [Elachi88] Elachi, C. (1988). *Spaceborn Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Press, New York.
- [Ender96] Ender, J. (1996). The Airborne Experimental Multi Channel SAR System AER-II. *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR' 96)*, pp. 49-52.
- [Faller95] Faller, N. und Meier, E. (1995). First Results With the Airborne Single Pass DO-SAR Interferometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No. 33, pp. 1230-1237.
- [Ford88] Ford, J.P. und Casey, D.J. (1988). Shuttle radar mapping with diverse incidence angles in the rainforest of Borneo. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, pp. 927-943.
- [Fried76] Fried, D.L. (1976). Statistics of the laser radar cross section of a randomly rough target. *Journal of Opt. Soc. Am.*, Vol. 66, No. 11, pp. 1150-1160.
- [Frost82] Frost, V. S. Stile, J. A., Shanmugan, K. S. und Holtzmanm, J.C. (1982). A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-4, No .2, pp. 157-166.
- [Gabriel88] Gabriel, A. und Goldstein, R. (1988). Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, No. 9, pp. 857-872.
- [Gens96] Gens, R. und van Genderen, J.L. (1996). Review Article SAR interferometry issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 10, pp. 1803-1835.

- [Geudner95] Geudner, D. (1995). Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1, Dissertation Universität Stuttgart.
- [Ghiglia98] Ghiglia, D.C. und Pritt, M.D. (1998). Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. Wiley and Sons, New York.
- [Goldstein88] Goldstein, R., Zebker, H. und Werner, C. (1988). Satellite Radar Interferometry: Two dimensional Phase Unwrapping. Radio Science, Vol. 23, No. 4, pp. 713-720.
- [Goodman76] Goodman, J.W. (1976). Some fundamental properties of speckle. Journal of Opt. Soc. Am., Vol. 66, No. 11, pp. 1145-1152.
- [Gustavsson97] Gustavsson, A., Flood, B., Fröling, P.-O., Hellsten, H., Jonsson, T., Larsson, B., Stenström, G. und Ulander, L.M.H. (1997). First Airborne Tests with the new VHF SAR CARABAS II. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 97), Singapur.
- [Hake82] Hake, G. (1982). Kartographie I. Walter de Gruyter, Berlin - New York.
- [Hake95] Hake, G. und Grünreich, D. (1994). Kartographie (7.Auflage) . Walter de Gruyter, Berlin - New York.
- [Haralick79] Haralick, R.M. (1979). Statistical and Structural Approaches to Texture. Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 5, pp. 786 -804.
- [Haralick73] Haralick, R.M., Shanmugan, K. und Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, pp. 610-621.
- [Hein98] Hein, A. (1998). Verarbeitung von SAR-Daten unter besonderer Berücksichtigung interferometrischer Anwendungen. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen.
- [Hellmann99] Hellmann, M. (1999). Classification of Full Polarimetric SAR-Data for Cartographic Applications. Dissertation Technische Universität Dresden.
- [HGEX97] Kartographische Hochgebirgsexkursion Computerkartographie Uni Wien Silvretta, Bieler Höhe 27.2.-6.3.1997. <http://www.gis.univie.ac.at/karto/lehr/exkursion/hgex97/hgex-home.htm>

- [Hofmann70] Hofmann, W. und Louis, H. (Ed.) (1970). Alpen Nördliche Flysch- und Kalkalpen Kartenprobe 1: Formen im Flysch, begrenzt von schärferen Formen im Kalk, Edelsberg, westlich Pfronten im Allgäu. Georg Westermann Verlag
- [Hofmann99] Hofmann, C., Schwäbisch, M., Och, S., Wimmer, C. und Moreira, J. (1999). Multipath P-Band Interferometry - First Results. Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Band 2, pp. 732-737.
- [Holecz93] Holecz F. (1993). Postprocessing von SAR-Satellitenbilddaten. Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich.
- [Holecz98] Holecz, F., Pasquali, P., Moreira, J. und Nüesch, D. (1998). Rigorous radiometric calibration of airborne AES-1 InSAR Data. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, WA, USA.
- [Huber98a] Huber, R. (1998). Information extraction for land-cover inventory and change detection from air- and spaceborn interferometric SAR sensors. Proceedings of the 2nd International Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, Noordwijk, pp. 79-85.
- [Huber99] Huber, R. (1999). Pattern Recognition for SAR Thematic Mapping. Dissertation Universität Salzburg.
- [Huber98b] Huber, R. und Dutra, L.V. (1998). Feature Selection For ERS-1/2 InSAR Classification: High Dimensionality Case. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, WA, USA.
- [Huber01] Huber, R. und Lang, K. (2001). Road Extraction from High-Resolution Airborne SAR using Operator Fusion. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia.
- [Imhof65] Imhof, E. (1965). Kartographische Geländedarstellung. Walter de Gruyter & Co. Berlin.
- [Imhof72] Imhof, E. (1972). Thematische Kartographie. Walter de Gruyter, Berlin, New-York.
- [Jain89] Jain, A.K. (1989). Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice-Hall International.

- [Just94] Just, D. und Bammler, R. (1994). Phase Statistics of Interferograms with Applications to Synthetic Aperture Radar. *Appl. Opt.*, Vol. 3, No. 20, pp. 4361-4368.
- [Kenyi95] Kenyi, L. W. (1995). Approaches for Enhancement of Information Content of Polarimetric SAR and Optical Satellite Data for Thematic Mapping. Dissertation Technische Universität Graz.
- [Kittler98] Kittler, J. (1998). Combining Classifiers: A Theoretical Framework. *Pattern Analysis & Applications*, Vol. 1, No. 1, pp. 18-27.
- [Klein93] Klein, L. (1993). Sensor data fusion concepts & applications. SPIE, Bellingham, WA, USA.
- [Kramer02] Kramer, H. (2002). Observation of the Earth and its Environment - Survey of Missions and Sensors. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg - New York.
- [Kronberg85] Kronberg, P. (1985). Fernerkundung der Erde. Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [DeKrueger94] De Krueger, D. und Hunt, B.R. (1994). Image processing and neural networks for recognition of cartographic area features. *Pattern Recognition*, Vol. 27, No. 4, pp. 461-483.
- [Laws80] Laws, K.I. (1980). Textured image segmentation. USCIP Report 940, Image Processing Institute University of Southern California
- [Lee81] Lee, J.S. (1981). Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics. *Computer Graphics and Image Processing* 15, pp. 380-389.
- [Lee91] Lee, J. S., Grunes, M. R. und Mango, S. A. (1991). Speckle reduction in multi-polarization, multi-frequency SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 29, No. 4, pp. 535-544.
- [Lee94] Lee, J. S. und Jurkevich, I. (1994). Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 8, pp. 313-340.
- [Leser93a] Leser, H., Haas, H.-D., Mosimann, T. und Paesler, R. (1993). DIERCKE-Wörterbuch der Allgemeinen Geographie, Band 1: A-M, dtv/Westermann, München und Braunschweig.

- [Leser93b] Leser, H., Haas, H.-D., Mosimann, T. und Paesler, R. (1993). DIERCCKE-Wörterbuch der Allgemeinen Geographie, Band 2: N-Z, dtv/Westermann, München und Braunschweig.
- [Lin92] Lin, Q., Vesecky J.F. und Zebker, H. A. (1992). New Approaches in Interferometric SAR Data Processing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30 , No. 3, pp. 560-567.
- [Livingstone95] Livingstone, C., Gray, A., Hawkinsm, R., Vachon, P., Lukowski, T. und Lalonde, M. (1995). The CCRS Airborne SAR System: Radar for Remote Sensing Research. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 21. pp. 468-491.
- [Long83] Long, M.W. (1983). Radar reflectivity of land and sea. Artech House, Dedham.
- [Lopes93] Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R. und Laur H. (1993). Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. International Journal of Remote Sensing, Vol. 14. No. 9, pp. 1735-1758
- [Madsen97] Madsen, S., Christensen, E., Dall, J., Grindler-Pedere, J., Granholm, J., Mohr, J., Skou, N. und Woelders, K. (1997). Elevation Mapping with the Danish Airborne Interferometric SAR System. Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference, p. 33.
- [Massonnet93] Massonnet, D. und Rabaute, T. (1993). Radar Interferometry: Limits and Potential. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 2, pp. 455-464.
- [Meier01] Meier, E. und Nüesch, D. (2001). Genauigkeitsanalyse von hochauflösenden Gelände- und Oberflächenmodellen. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Jahrgang 2001, Heft 6, pp. 405-416. E'Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- [Moreira90] Moreira, A. (1990). An improved multi-look technique to produce SAR imagery. IEEE International Radar Conference, pp. 57-63.
- [Moreira92] Moreira, J. (1992). Bewegungsextraktionsverfahren für Radar mit Synthetischer Apertur. Dissertation, Technische Universität München. DLR-Forschungsbericht 92-31, Oberpfaffenhofen.

- [Novak90] Novak, L. M. und Burl, M. C. (1990). Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. 26 No. 2, pp. 293-305.
- [Oliver98] Oliver, C. und Quegan, S. (1998). *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Artech House, Boston & London.
- [Papathanassiou93] Papathanassiou, K. P. und Buchroithner, M.F. (1993). Signature Analysis of Multifrequency Polarimetric NASA DC-8 AIRSAR Data for Alpine Geo-Applications. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 2, 1; pp. 287-299.
- [Papathanassiou99] Papathanassiou, K. P. (1999). *Polarimetric SAR Interferometry*. Dissertation Technische Universität Graz. DLR-Forschungsbericht 99-07, Oberpfaffenhofen.
- [Prati90] Prati, C. und Rocca, F. (1990). Limits to the Resolution of Elevation Maps from Stereo SAR Images. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, No. 12, pp. 2215-2235.
- [Pritt94] Pritt, M. und Shipman, J. (1994). Least-Squares Two Dimensional Phase Unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, pp. 706-708.
- [Raney82] Raney, K. (1982). Processing Synthetic Aperture Radar Data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 3, pp. 243-257.
- [Reigber97] Reigber, A. und Moreira, J. (1997). Phase Unwrapping by Fusion of Local and Global Methods. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 97)*, Singapur.
- [Richter78] Richter, M. (1978). *Sammlung Geologischer Führer 49: Voralberger Alpen*, Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- [Rott01] Rott, H. (2001). *Persönliche Mitteilungen*.
- [Rumelhart86] Rumelhart, D., Hinton, G. und Williams, R. (1986). Learning Internal Representations by Error Propagation. In Rumelhart, D. und McClelland, J. editors, *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume I: Foundations*, pp. 318-362. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

- [Sabins87] Sabins , F. F. (1987). Remote Sensing. Principles and Interpretation. W. H. Freeman, New York, Second Edition.
- [Schalkoff92] Schalkoff, R. J. (1992). Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches. John Wiley & Sons.
- [Schanda86] Schanda, E. (1986). Physical Fundamentals of Remote Sensing. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- [Scheiber98] Scheiber, R. (1998). Single Pass Interferometry with the E-SAR System of DLR. Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR' 98).
- [Shafer76] Shafer, G. (1976). A mathematical theory of evidence. Princeton, University Press.
- [Shi94] Shi, Z. und Fung, K. B. (1994). A Comparison of digital Speckle Filters. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '94), Pasadena, USA.
- [SchistadSolberg97] Schistad Solberg, A.H. und Jain, A.K. (1997). Texture Fusion and Feature Selection Applied to SAR Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, No. 2.
- [Schmieder97] Schmieder, A. (1997). Gewinnung von Höhendaten aus InSAR-Daten durch automatische Klassifikation zur Geländemodellbearbeitung. Diplomarbeit, Studiengang Kartographie, Fachbereich 08 Geoinformationswesen, Fachhochschule München.
- [Schmullius99] Schmullius, C. und Evans, D.L. (1999). Synthetic Aperture Radar (SAR) Frequency and Polarization Requirements for Applications in Ecology, Geology, Hydrology and Oceanography: A tabular Status Quo after SIR-C / X-SAR. International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, pp. 2713-2722.
- [Schreier93] Schreier, G. (Ed.) (1993). SAR Geocoding: Data and Systems. Wichmann, Karlsruhe.
- [Schulz95] Schulz, G. (1995). Lexikon zur Bestimmung der Geländeformen in Karten. Berliner geographische Studien Band 28, Herausgeber: Hofmeister, B. und Voss, F.

- [Schwäbisch95] Schwäbisch, M. (1995). Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. Dissertation Universität Stuttgart. DLR-Forschungsbericht 95-25, Oberpfaffenhofen.
- [Schwäbisch99a] Schwäbisch, M. und Moreira, J. (1999). The High Resolution Airborne Interferometric SAR AES-1. Proceedings of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference, Ottawa, Canada, pp. 540-547.
- [Schwäbisch99b] Schwäbisch, M., Hofmann, C., Moreira, J., Wimmer, C. und Och, S. (1999). Operational Processing of Airborne P-Band InSAR Data for Ground Topography Estimation. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 99), Hamburg, Germany.
- [Sicard96] Sicard, D. (1996). RAMSES Airborne SAR Development Status and Experiments. Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR' 96), pp. 45-47.
- [Siedlecki88] Siedlecki, W., und Sklansky, J. (1988). On automatic feature selection. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 197-220.
- [Siegmond01] Siegmund, R. (2001). Bestimmung von topographischen und hydrologischen Parametern im Wattenmeergebiet mittels SAR-Interferometrie. Dissertation Universität Kiel, vorgelegt.
- [Small93] Small, D., Werner, C. und Nüesch, D. (1993). Registration of ERS-1 SLC Products for Interferometry. Proceedings of 4th GEOSAR Workshop, Loipersdorf.
- [Staub71] Staub, R. (1971). Neue Wege zum Verständnis des Ostalpen-Baues. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [Sties00] Sties, M., Krüger, S., Mercer, J. und Schnick, S. (2000). Comparison of Digital Elevation Data from Laser and Interferometric SAR Systems. Proceedings of the ISPRS, Amsterdam, Band 33.
- [Swain78] Swain, P.H. und Davis, M. (1978). Fundamentals of Pattern Recognition in Remote Sensing. McGraw-Hill.
- [Thompson97] Thompson, T., van Zyl, J., Hensekey, S., Wheeler, K., Bartman, R., Diddle, G., Seib, J., Burton, J., Yoha, R. und Gardner, M. (1997). GeoSAR: A New

Radar Terrain Mapping System for the New Millennium. Technical Report, Montreal, Canada.

- [Tsilibaris91] Tsilibaris, X. (1991). Evaluation of Image Processing Techniques Applied to Spaceborne SAR Images Towards Cartographic Information Extraction. Dissertation Technische Universität Graz. Institute for Image Processing and Computer Graphics Report No. 52, Joanneum Research, Graz, Austria.
- [Ulaby81] Ulaby, F.T., Moore, R.K. und Fung, A.K. (1981). Microwave remote sensing: active und passive. Volume I. Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Band I, Addison Wesley, London.
- [Ulaby82] Ulaby, F.T., Moore, R.K. und Fung, A.K. (1982). Microwave remote sensing: active und passive. Volume II. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, Band II, Addison Wesley, London.
- [Ulaby86] Ulaby, F.T., Moore, R.K. und Fung, A.K. (1986). Microwave remote sensing: active and passive. Volume III. From Theory to Applications, Band III, Addison Wesley, London.
- [Ulaby89] Ulaby, F.T., und Dobson, M.C. (1989). Handbook of radar scattering statistics for terrain. Artech House, Norwood.
- [Werner00] Werner, M., Klein, K. und Häusler, M. (2000). Performance of the Shuttle Radar Topographic Mission, X-Band Radar System. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 00), Honolulu, Hawaii.
- [Wimmer99] Wimmer, C., Siegmund, R. und Moreira, J. (1999). Derivation and Validation of High Precision Topographic Models in the Wadden Sea with Airborne SAR-Interferometry. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 99), Hamburg, Germany, pp. 2167-2169.
- [Wimmer00] Wimmer, C., Siegmund, R., Schwäbisch, M. und Moreira, J. (2000). Generation of High Precision DEMs of the Wadden Sea with Airborne Interferometric SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5, pp. 2234-2245.
- [Winston93] Winston, P.H. (1993). Artificial Intelligence. Addison Wesley, Third Edition.

- [White96] White, R., Blake, A., Horne, A. und Young, S. (1996). Very High Resolution SAR Data. Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR' 96), pp. 19-24.
- [Zebker86] Zebker, H. und Goldstein, M. (1986). Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B5, pp. 4993-4999.
- [Zebker92a] Zebker, H., Madsen, S., Martin, J., Alberti, G., Vetrella, S. und Cucci, A. The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '92), Houston, Texas, USA.
- [Zebker92b] Zebker, H. und Villasenor, J. (1992). Decorrelation in Interferometric Radar Echoes, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, No. 5, pp. 950-959.
- [Zebker91] Zebker, H. und van Zyl, J. (1991). Imaging radar polarimetry: A review. Proceedings of the IEEE, Vol. 79, No. 11.

12 Anhang

In diesen Appendices werden nun die geomorphologisch charakteristischen Bereiche aller Testgebiete in Form von Differenzmodellanalysen und von Vergleichen ausgewählter Profile, die weitestgehend keine nicht-reliefbezogene Objekte beinhalten, ausführlich betrachtet.

Die durch den mittleren Höhenfehler m_h bestimmte geometrische Genauigkeit wird, wie bereits erörtert, mit der von Koppe angegebenen Formel [Hake95] untersucht:

$$m_h = \pm(a + b \cdot \tan \alpha) \quad (12-1)$$

Wobei α die mittlere Geländeneigung des Referenzabschnitts angibt; a und b sind nach [Imhof65] für den Maßstab 1:25 000 mit 1, 5 und 3 sowie für den Maßstab 1:50 000 mit 2, 5 und 6 gewählt.

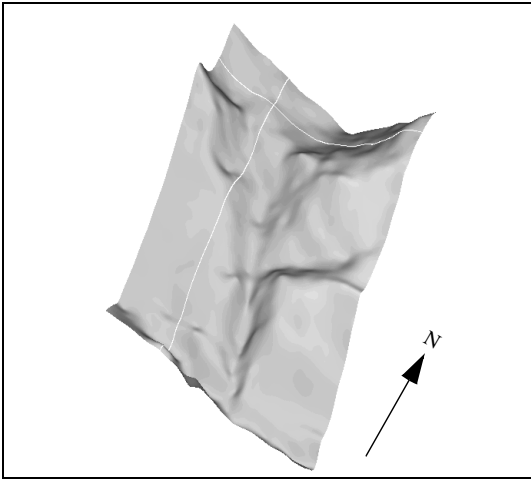


Abbildung 12-1. Referenz-DGM Gebiet Scheidbach (1,5 km x 1,1 km, Überhöhungsfaktor 1).

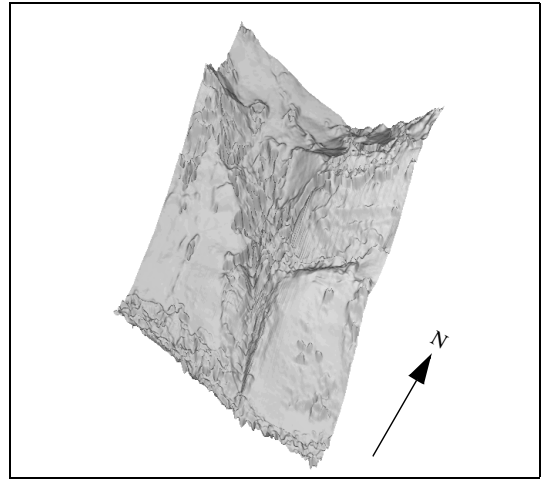


Abbildung 12-2. DOM Edelsberg₃ Gebiet Scheidbach (1,5 km x 1,1 km, Überhöhungsf. 1).

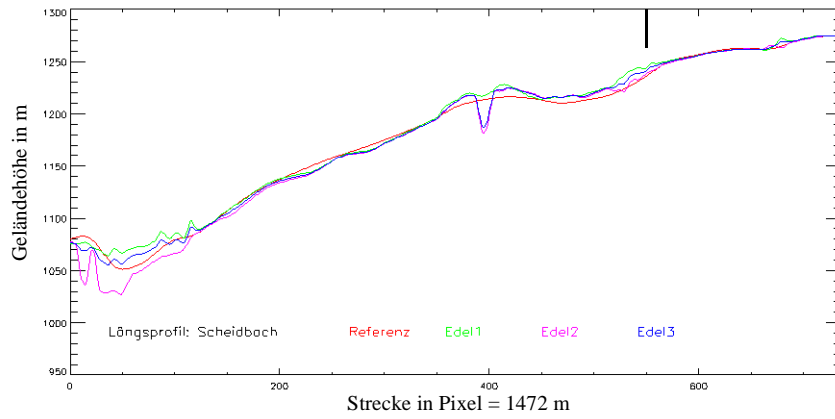


Abbildung 12-3. Längsprofil Gebiet Scheidbach.

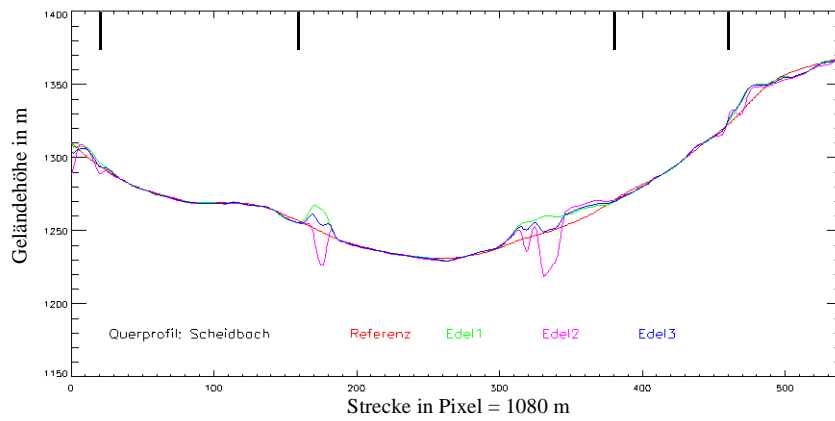


Abbildung 12-4. Querprofil Gebiet Scheidbach.

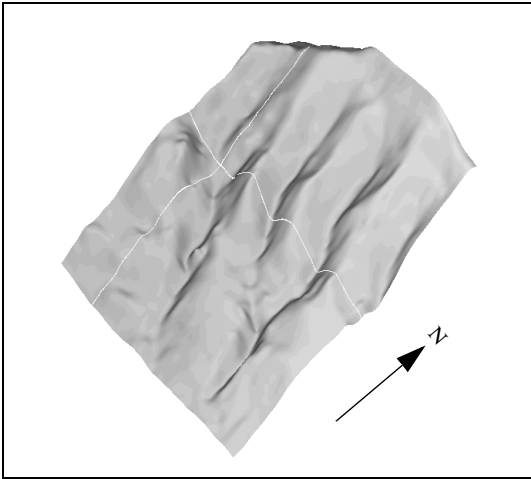


Abbildung 12-5. Referenz-DGM Gebiet Kreuzbach (1,9 km x 1,7 km, Überhöhungsfaktor 1).

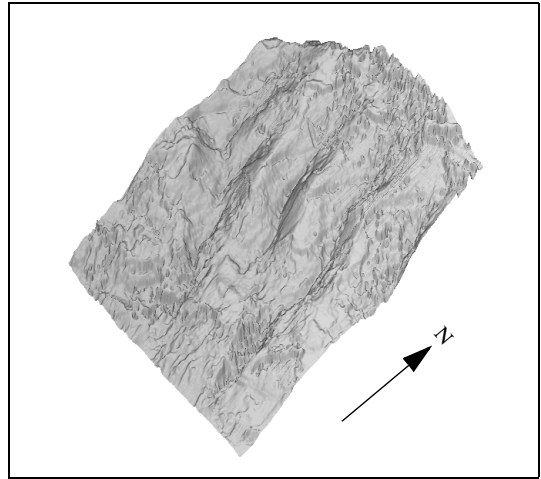


Abbildung 12-6. DOM Edelsberg₃ Gebiet Kreuzbach (1,9 km x 1,7 km, Überhöhungsf. 1).

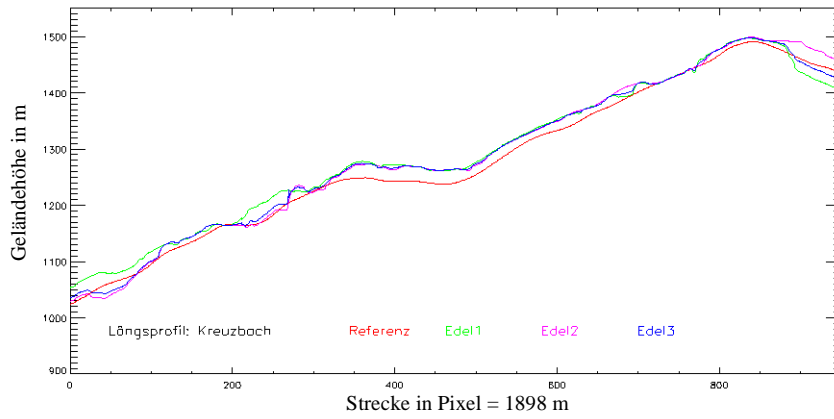


Abbildung 12-7. Längsprofil Gebiet Kreuzbach.

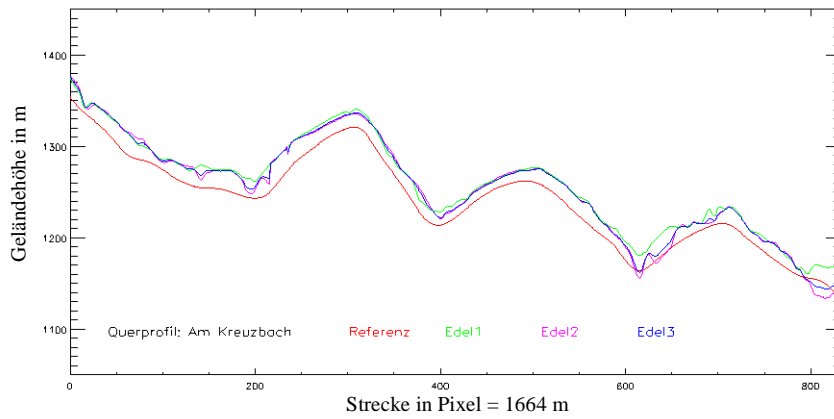


Abbildung 12-8. Querprofil Gebiet Kreuzbach.

Die Abbildungen 12-1 und 12-2 sowie 12-5 und 12-6 zeigen jeweils Perspektiv-Ansichten des Referenz-DGMs und des DOMs Edelsberg₃ der Gebiete des Scheid- und des Kreuzbaches. Im jeweiligen Referenz-DGM sind die Verläufe der Längs- und Querprofile, der Abbildungen 12-3 und 12-4 als auch 12-7 und 12-8 weiß hervorgehoben; die Profile laufen dabei grundsätzlich für alle Testgebiete von Nord nach Süd bzw. West nach Ost. (Die Angaben über die Gebietsausdehnung in den Perspektiv-Abbildungen entsprechen jeweils dieser Reihenfolge.) Während beide Regionen durch die tief eingeschnittenen Erosionsschluchten gekennzeichnet sind, unterscheiden sie sich in der Bewaldung, die in den InSAR-DOMs durch die heterogene Struktur sichtbar wird. Im Gegensatz zu der nahezu vollständig bewaldeten Kreuzbachregion ist das Scheidbachgebiet hauptsächlich im Bereich der Schlucht sowie im oberen östlichen Teil bewaldet. Die unterschiedliche Bewaldungsdichte findet auch durch die in Tabelle 12-1 aufgeführten Werte ihre Bestätigung. Das InSAR-DOM des Kreuzbaches liegt weitaus häufiger über der Referenz als das Scheidbach-DOM. Auch ist in ersterem Gebiet eine sehr viel höhere mittlere Abweichung im positiven Bereich zu verzeichnen.

Tabelle 12-1. Differenzmodellanalyse Gebiet Scheid- und Kreuzbach.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Edelsberg ₃ -Ref. Scheidbach	-30,3 / 35,0	49,9 / 50,1	-2,45 / 4,08	2,91 / 4,61
Edelsberg ₃ -Ref. Kreuzbach	-36,4 / 32,2	20,1 / 79,9	-1,42 / 3,99	8,51 / 7,06

Die angesprochenen Aspekte werden außerdem durch die Profile und durch die in den Tabellen 12-2 und 12-3 genannten Zahlen der Profilanalysen bekräftigt. Die Formel von Koppe kommt dabei für das gesamte Testgebiet Edelsberg ausschließlich für den Maßstab 1:25 000 zur Anwendung.

Tabelle 12-2. Profilanalyse Gebiet Scheidbach.

	Längsprofil	Ausschnitt Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt 1 Querprofil	Ausschnitt 2 Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	550 - 735	-	20 - 160	380 - 460
Profillänge	1472 m	370 m	1080 m	280 m	160 m
min. / max. Abweichung	0, 00 - 26, 2 m	0, 00 - 5, 89 m	0, 00 - 10, 08 m	0, 00 - 2, 00 m	0, 00 - 2, 49 m
Mittel./Stdv. Abweichung	4, 00 3, 63	1, 16 1, 26	1, 99 2, 51	0, 56 0, 50	0, 92 0, 70
unter/über	53,2/46,8 %	54,3/45,7 %	53,2/46,8 %	68,8/31,2 %	53,1/46,9 %
Hang- neigung	-	5, 86°	-	7, 28°	17, 36°
Wert nach Koppe	-	1, 81 erfüllt	-	1, 88 erfüllt	2, 44 erfüllt

Tabelle 12-3. Profilanalyse Gebiet Kreuzbach.

	Längsprofil	Querprofil
Profillänge	1898 m	1664 m
min. / max. Abweichung	0, 01 - 27, 42 m	0, 13 - 30, 14 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	10, 04 7, 20	14, 97 5, 77
unter / über	28, 5 / 71, 5 %	3, 8 / 96, 2 %

Der visuelle Vergleich der Profile zeigt, dass alle InSAR-DOMs generell den geomorphologischen Formen der Referenz folgen, aber detailreicher als diese sind. Des Weiteren erscheinen die Verläufe der Profile Edelsberg₃, mit Ausnahme der fehlerhaften Vertiefung um Pixelposition 400 in Abb.12-3, am schlüssigsten. Die mittlere Abweichung im bewaldeten Kreuzbachgebiet mit 10-15 Metern entspricht einer für Höhe und Landschaftstyp plausiblen Baumhöhe. Alle gewählten Profilausschnitte des Scheidbachs, die jeweils verschiedene mittlere Neigungen haben und durch die Markierungen am oberen Rand der Abbildung gekennzeichnet sind, weisen nur sehr geringe Abweichungen zur Referenz auf und erfüllen das von Koppe geforderte Genauigkeitskriterium.

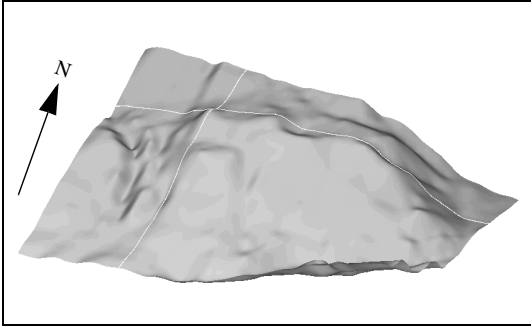


Abbildung 12-9. Referenz-DGM Gebiet Rößleuter Berg (1,1 km x 1,9 km, Überhöhungsfaktor 1).

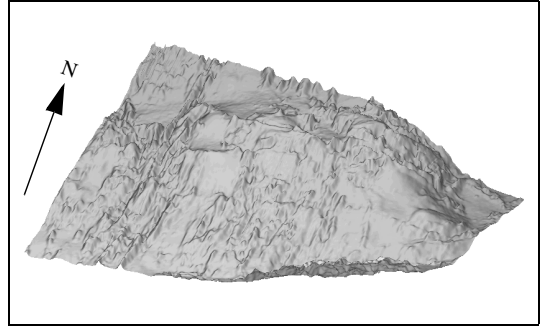


Abbildung 12-10. DOM Edelsberg₃ Gebiet Rößleuter Berg (1,1 km x 1,9 km, Überhöhungsfaktor 1).

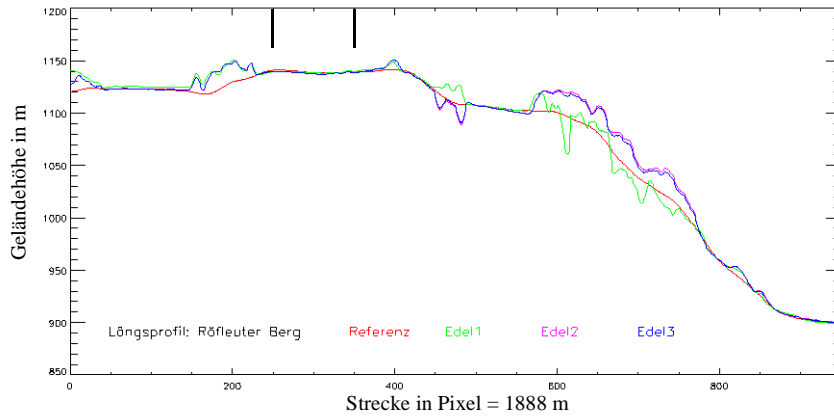


Abbildung 12-11. Längsprofil Gebiet Rößleuter Berg.

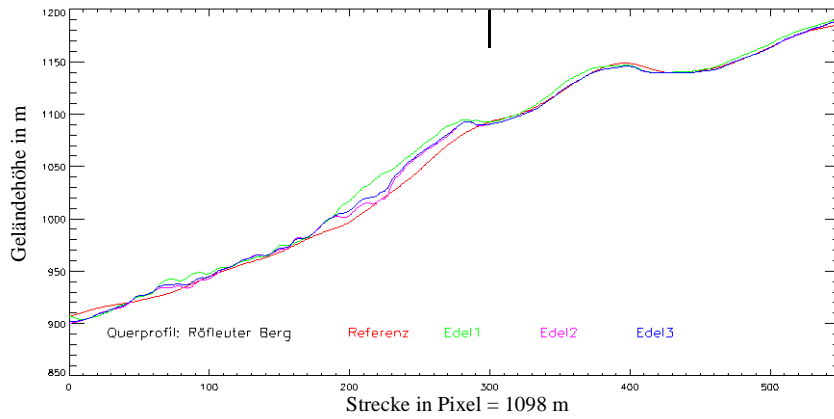


Abbildung 12-12. Querprofil Gebiet Rößleuter Berg.

Eine Trogschulter, die in den Perspektiv-Darstellungen des Referenz- und InSAR-DHMs der Abbildungen 12-9 und 12-10 sowie in den Querprofilen der Abbildung 12-12 gut zu erkennen ist, bildet das Charakteristikum der Region des Rölfleuter Berges. Das Gebiet ist zu weiten Teilen mit Wald bestanden, was auch durch die Resultate der Tabelle 12-4 bestätigt wird.

Tabelle 12-4. Differenzmodellanalyse Gebiet Rölfleuter Berg.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Edelsberg ₃ -Ref.	-25, 1 / 36, 2	31, 4 / 68, 6	-0, 66 / 1, 49	5, 01 / 6, 42

Tabelle 12-5. Profilanalyse Gebiet Rölfleuter Berg.

	Längsprofil	Ausschnitt Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	250 - 350	-	300 - 549
Profillänge	1888 m	200 m	1098 m	498 m
min. / max. Abweichung	0, 01 - 27, 02 m	0, 05 - 1, 70 m	0, 00 - 16, 3 m	0, 00 - 4, 32 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	6, 44 7, 62	1, 09 0, 49	4, 20 4, 25	1, 36 1, 16
unter / über	36, 0 / 64, 0 %	97, 0 / 3, 0 %	39, 3 / 60, 7 %	65, 2 / 34, 8 %
Hangneigung	-	0, 48°	-	10, 64°
Wert nach Koppe	-	1, 52 erfüllt	-	2, 06 erfüllt

Den Profilen sind nahezu die gleichen Eigenschaften wie bereits den beiden vorangegangenen beschriebenen Gebiete zu eigen. Im Längsprofil (Abb. 12-11) ist der Unterschied zwischen Wald- und freien Flächen am positiven Versatz deutlich ersichtlich. Weiterhin ist zu bemerken, dass die geometrische Genauigkeit auch in einem sehr flachen Bereich eingehalten wird (siehe dazu Tab. 12-5).

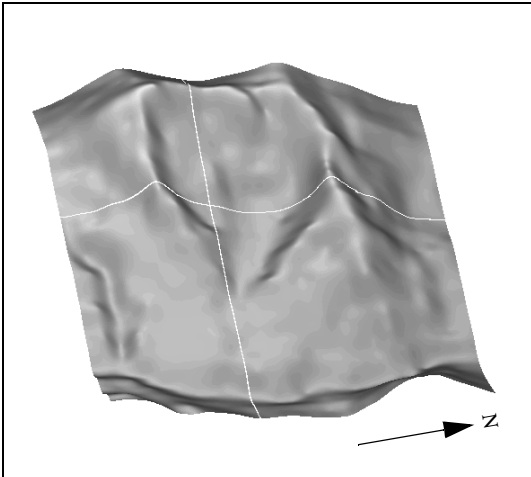


Abbildung 12-13. Referenz-DGM Gebiet Im Kessel (1,2 km x 1,5 km, Überhöhungsfaktor 1).

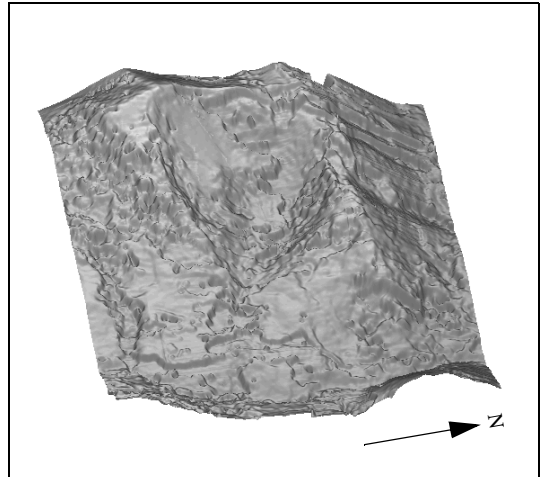


Abbildung 12-14. DOM Edelsberg₃ Gebiet Im Kessel (1,2 km x 1,5 km, Überhöhungsfaktor 1).

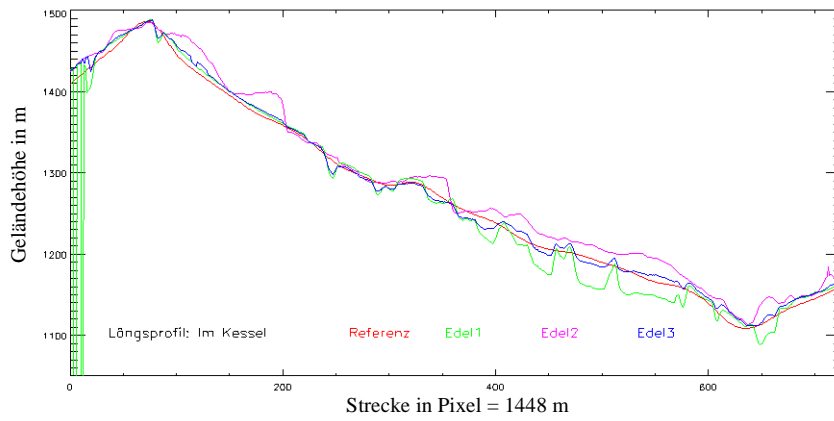


Abbildung 12-15. Längsprofil Gebiet Im Kessel.

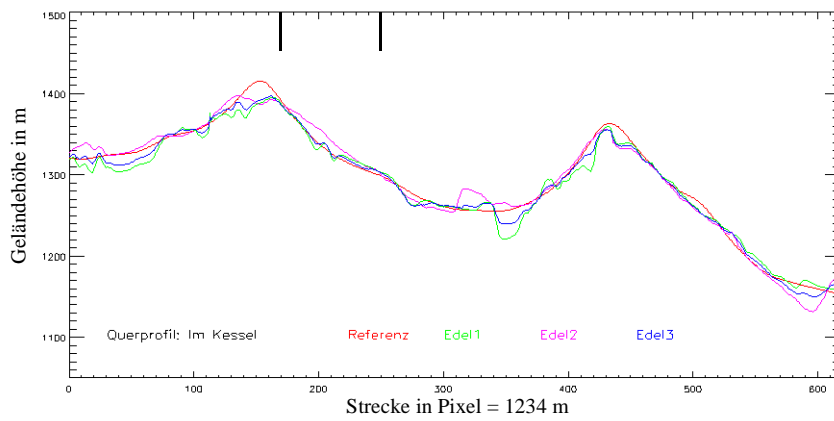


Abbildung 12-16. Querprofil Gebiet Im Kessel.

Abbildung 12-13 zeigt das Kar der Felsnische “Im Kessel”. In Abbildung 12-14 des InSAR-DOMs sind in den mittleren und rechten Bildpartien Unstetigkeitsstellen festzustellen, die auf nicht korrigierbare Unwrapping-Fehler zurückzuführen sind. Diese drücken sich auch in der hohen minimalen und maximalen Differenz zur Referenz aus (siehe Tabelle 12-6).

Tabelle 12-6. Differenzmodellanalyse Gebiet Im Kessel.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Edelsberg ₃ -Ref.	-43, 1 / 40, 8	33, 3 / 66, 7	-2, 66 / 5, 50	5, 53 / 6, 35

Der Verlauf der InSAR-Profile (Abb. 12-15 und 12-16) ist im Gegensatz zu allen vorherigen Gebieten weitaus weniger dem Referenzprofil gleich und wirkt insgesamt unruhiger, obschon auch hier noch die geomorphologischen Formverläufe sichtbar sind. An Pixelposition 340 des Querprofils ist ein Sprung des DOMs Edelsberg₁ von ca. 40 Metern auffallend, der einem 2π -Phasensprung entspricht (siehe Kap.6.5). Dieser wird durch den korrekteren Verlauf des DOMs Edelsberg₂ in der Erstellung von Edelsberg₃ nicht hinreichend ausgeglichen.

Tabelle 12-7. Profilanalyse Gebiet Im Kessel.

	Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	-	170 - 250
Profillänge	1448 m	1234 m	160 m
min. / max. Abweichung	0, 00 - 18, 50 m	0, 00 - 25, 40 m	0, 08 - 6, 26 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	6, 13 3, 75	6, 41 5, 43	2, 96 1, 41
unter / über	33, 2 / 66, 8 %	57, 6 / 42, 4 %	25, 9 / 74, 1 %
Hangneigung	-	-	30, 13°
Wert nach Koppe	-	-	3, 24 erfüllt

Wie aus Tabelle 12-7 ersichtlich, ist in dem teilweise bewaldeten Gebiet nur ein kurzer Streckenabschnitt zu finden, der die kartographisch geforderte geometrische Genauigkeit erreicht. Insgesamt gesehen ist die im Gegensatz zu den bisher betrachteten Gebieten geringere Qualität dieser InSAR-DOMs auf die in geringer räumlicher Distanz auftretenden steilen Hänge zurückzuführen. Diese bedingen Layover- und Shadowflächen, die aufgrund der Exposition der Hänge zum Radar durch die zwei Befliegungsrichtungen nicht ausgeglichen werden konnten. Eine mögliche Verbesserung ist durch die Hinzunahme weiterer Flugrichtungen, wie Nord-Süd oder Süd-Nord, zu erwarten.

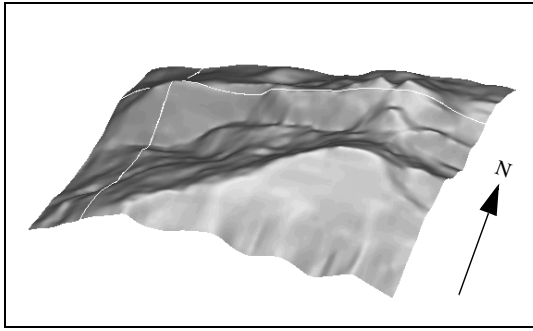


Abbildung 12-17. Referenz-DGM Gebiet Auf dem Grat (1,6 km x 2,1 km, Überhöhungsf. 1).

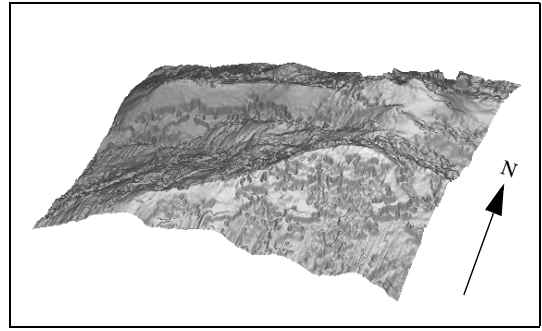


Abbildung 12-18. DOM Edelsberg₃ Gebiet Auf dem Grat (1,6 km x 2,1 km, Überhöhungsfaktor 1).

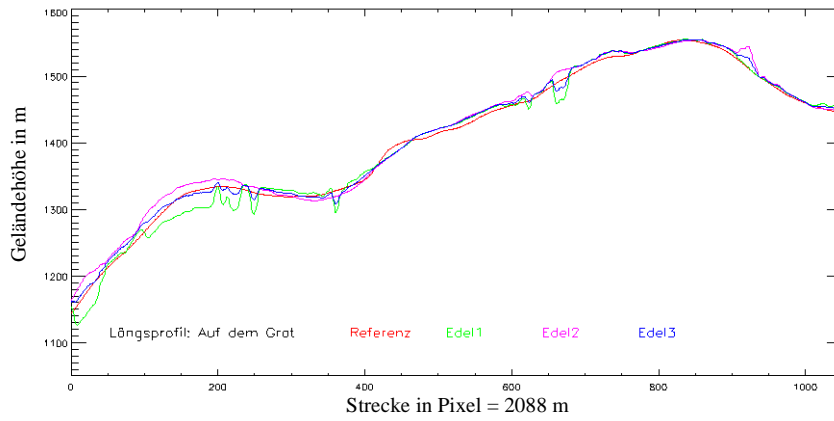


Abbildung 12-19. Längsprofil Gebiet Auf dem Grat.

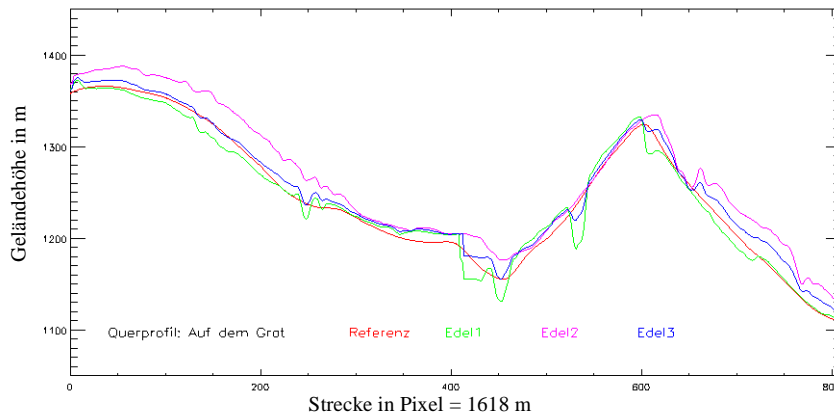


Abbildung 12-20. Querprofil Gebiet Auf dem Grat.

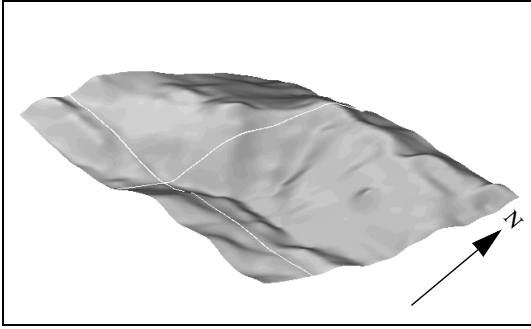


Abbildung 12-21. Referenz-DGM Gebiet Am Kreuzeck (0,9 km x 1,5 km, Überhöhungsf. 1).

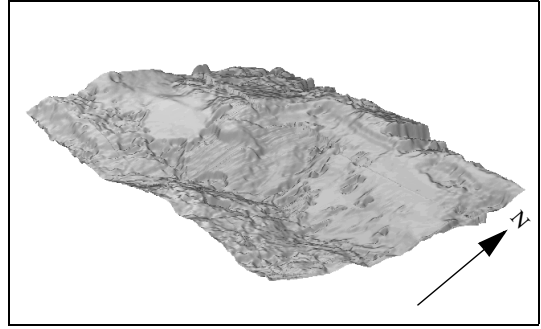


Abbildung 12-22. DOM Edelsberg₃ Gebiet Am Kreuzeck (0,9 km x 1,5 km, Überhöhungsfaktor 1).

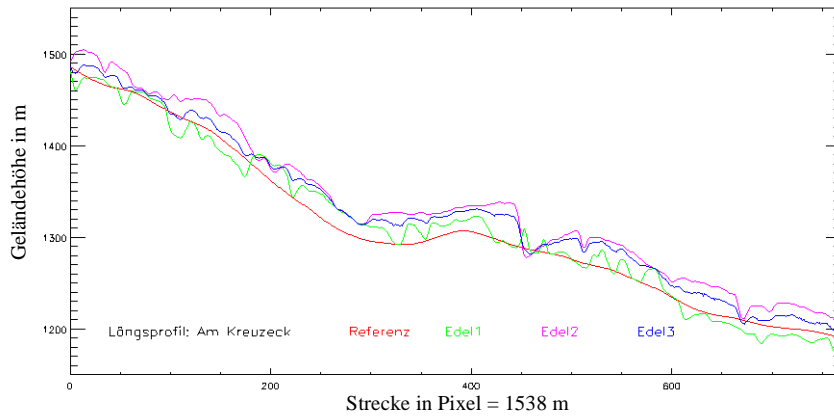


Abbildung 12-23. Längsprofil Gebiet Am Kreuzeck.

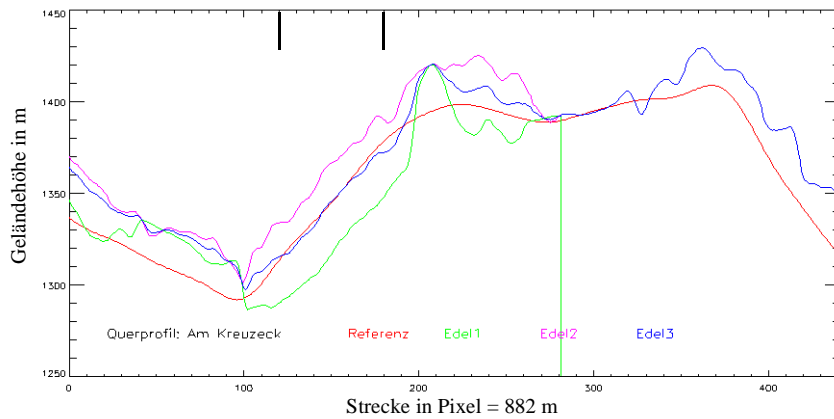


Abbildung 12-24. Querprofil Gebiet Am Kreuzeck.

Das Helvetikum ist durch die Gebiete “Auf dem Grat” bzw. “Am Kreuzeck” repräsentiert, deren Perspektiv-Illustrationen ihrer Referenz- bzw. InSAR-DHMs auf den Abbildungen 12-17 und 12-18 bzw. 12-21 und 12-22 zu sehen sind. Aus den heterogenen Strukturen der InSAR-DHMs ist zu entnehmen, dass beide Gebiete über große Teile bewaldet sind. Dies stimmt auch mit den Informationen der Tabelle 12-8 überein, aus deren hohen minimalen und maximalen Differenzwerten sich wiederum Unwrapping-Fehler ableiten lassen, die stellenweise auch in den Profilen (Abb. 12-19 und 12-20 bzw. 12-23 und 12-24) sichtbar sind.

Tabelle 12-8. Differenzmodellanalyse Gebiet Auf dem Grat und Am Kreuzeck.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Edelsberg ₃ -Ref. Auf dem Grat	-40, 4 / 53, 5	32, 3 / 67, 7	-2, 05 / 4, 26	5, 85 / 6, 59
Edelsberg ₃ -Ref. Am Kreuzeck	-40, 1 / 56, 3	10, 4 / 89, 6	-0, 44 / 2, 05	12, 19 / 10, 69

Der visuelle Profilvergleich und auch die Resultate aus Tabelle 12-9 zeigen für die Region “Auf dem Grat” zufriedenstellende Ergebnisse.

Tabelle 12-9. Profilanalyse Gebiet Auf dem Grat.

	Längsprofil	Querprofil
Profillänge	2088 m	1618 m
min. / max. Abweichung	0, 01 - 20, 63 m	0, 01 - 23, 52 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	5, 43 3, 50	8, 52 5, 20
unter / über	28, 9 / 71, 1 %	8, 8 / 91, 2 %

Im Gegensatz zur Region “Auf dem Grat” ist das Kreuzeck-Gebiet, anhand der Profile und Werte der Tabelle 12-10 betrachtet, weitaus schlechter erfasst. Die geomorphologischen Leitlinien werden im groben zwar eingehalten, doch kommt es vor allem im Querprofil zu stärkeren Abweichungen. Dies ist damit zu begründen, dass das Gebiet am Rande der Gesamtszenen liegt und von Edelsberg₁ nicht vollständig bzw. von Edelsberg₂ nur im Far Range-Bereich beleuchtet ist.

Tabelle 12-10. Profilanalyse Gebiet Am Kreuzeck.

	Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelpostion Ausschnitt	-	-	120 - 180
Profillänge	1538 m	882 m	120 m
min. / max. Abweichung	0, 11 - 31, 58 m	0, 03 - 35, 50 m	0, 10- 6, 11 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	15, 85 8, 15	12, 24 9, 08	2, 07 1, 43
unter / über	5, 3 / 94, 7 %	18, 3 / 81, 7 %	77, 0 / 23, 0 %
Hangneigung	-	-	28, 45°
Wert nach Koppe	-	-	3, 13 erfüllt

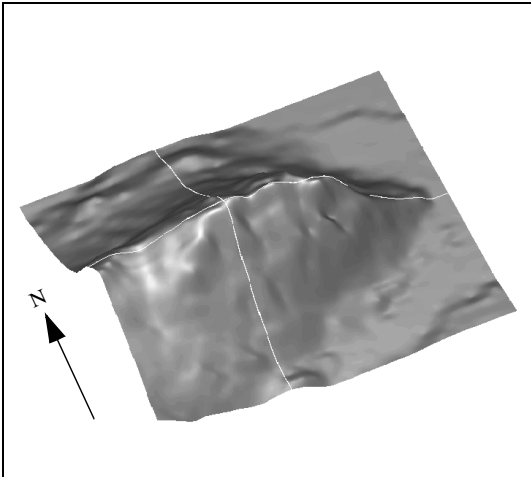


Abbildung 12-25. Referenz-DGM Gebiet Kienberg (1,6 km x 1,6 km, Überhöhungsfaktor 1).

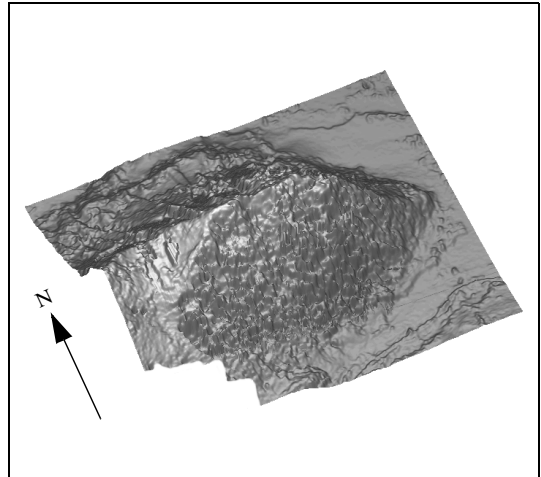


Abbildung 12-26. DOM Edelsberg₃ Gebiet Kienberg (1,6 km x 1,6 km, Überhöhungsf. 1).

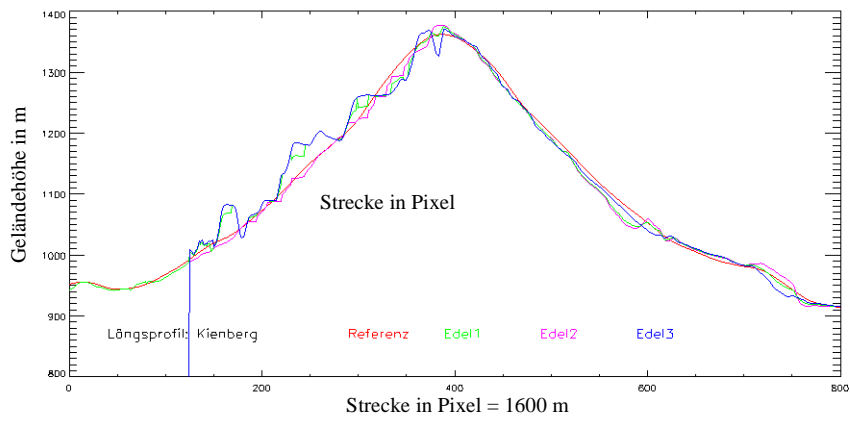


Abbildung 12-27. Längsprofil Gebiet Kienberg.

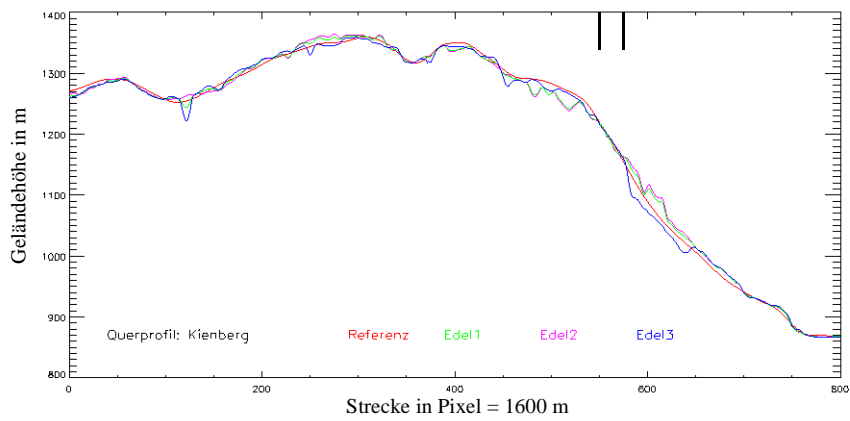


Abbildung 12-28. Querprofil Gebiet Kienberg.

Tabelle 12-11. Differenzmodellanalyse Gebiet Kienberg.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Edel ₃ -Ref.	-60, 6 / 65, 7	53, 4 / 46, 6	-2, 66 / 5, 35	4, 08 / 7, 28

Der Kienberg, der in den Abbildungen 12-25 und 12-26 mittels des Referenz- und des InSAR-DHMs perspektiv dargestellt ist, gehört zu den nördlichen Kalkalpen und vertritt somit neben dem Flysch und Helvetikum die dritte tektonische Einheit des Edelsberg-Testgebietes. Der auf der Südseite stark bewaldete Berg wird von Edelsberg₂ nicht mehr vollständig erfasst und liegt für Edelsberg₁ im Far Range-Bereich, in dem sich ausgedehnte Layoverflächen befinden. Daraus resultieren einerseits die hohen Differenzen aus Tabelle 12-11 und andererseits der sehr unruhige und zum Teil stark abweichende Längsprofilverlauf der InSAR-DHMs gegenüber der Referenz (Abb. 12-27). Der hinreichend abgebildete Nordhang und auch die Querprofile der Abbildung 12-28 zeigen ein weitaus besseres Ergebnis. Aus Tabelle 12-12 geht hervor, dass ein kurzer Streckenabschnitt in sehr steilem Gelände den kartographischen Genauigkeitskriterien gerecht wird, da in diesem das von Koppe geforderte Genauigkeitskriterium erfüllt wird.

Tabelle 12-12. Profilanalyse Gebiet Kienberg.

	Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	-	550 - 575
Profillänge	1600 m	1600 m	50
min. / max. Abweichung	0, 00 - 48, 96 m	0, 00 - 29, 69 m	0, 20 - 6, 90 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	9, 51 10, 00	6, 46 5, 62	3, 07 1, 86
unter / über	54, 6 / 45, 4 %	52, 4 / 47, 6 %	84, 6 / 15, 4 %
Hangneigung	-	-	48, 9°
Wert nach Koppe	-	-	4, 95 erfüllt

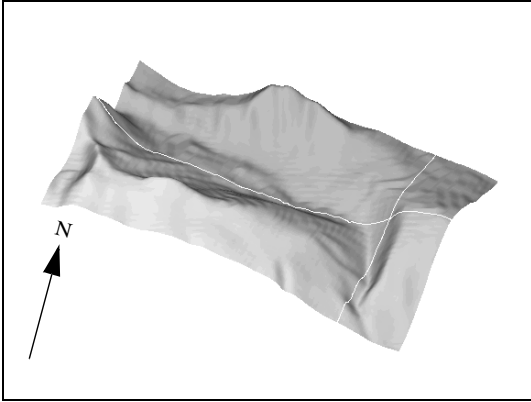


Abbildung 12-29. Referenz-DGM Gebiet Verwallbach (1,5 km x 2,6 km, Überhöhungsf. 1).

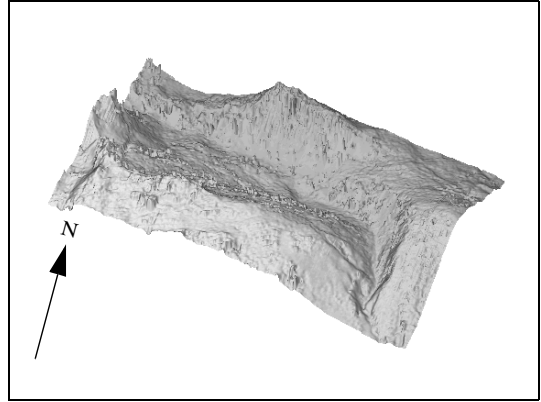


Abbildung 12-30. DOM Verwall₃ Gebiet Verwallbach (1,5 km x 2,6 km, Überhöhungsf. 1).

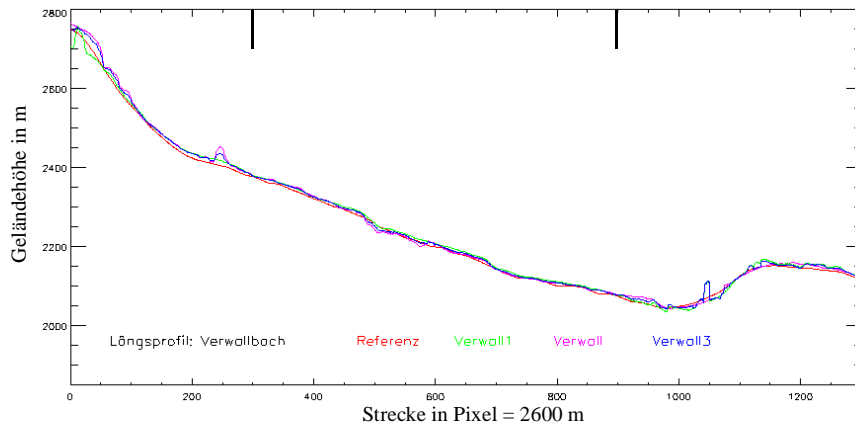


Abbildung 12-31. Längsprofil Gebiet Verwallbach.

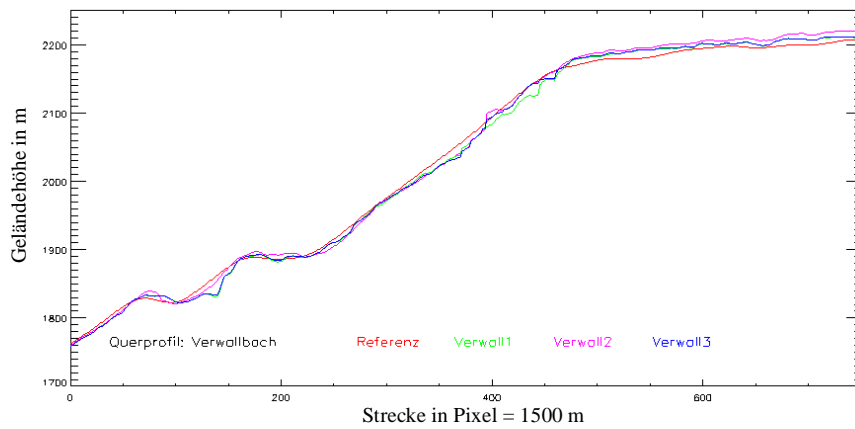


Abbildung 12-32. Querprofil Gebiet Verwallbach.

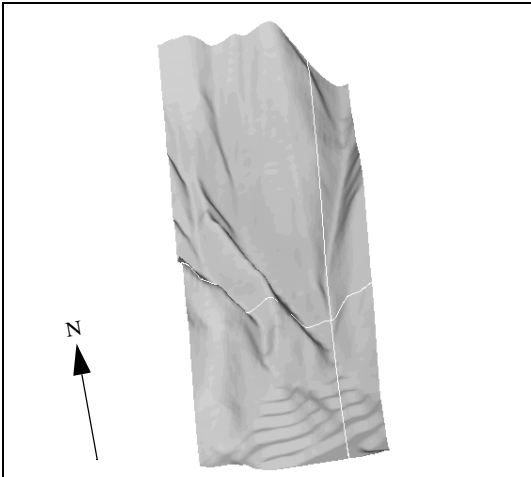


Abbildung 12-33. Referenz-DGM Gebiet Rifabach (2,3 km x 1,4 km, Überhöhungsfaktor 1).

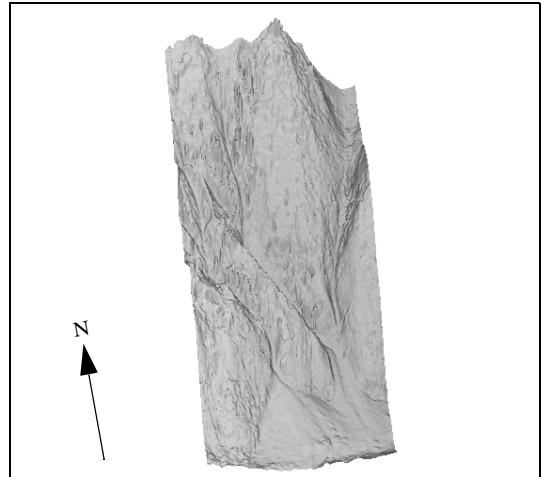


Abbildung 12-34. DOM Verwall₃ Gebiet Rifabach (2,3 km x 1,4 km, Überhöhungsfaktor 1).

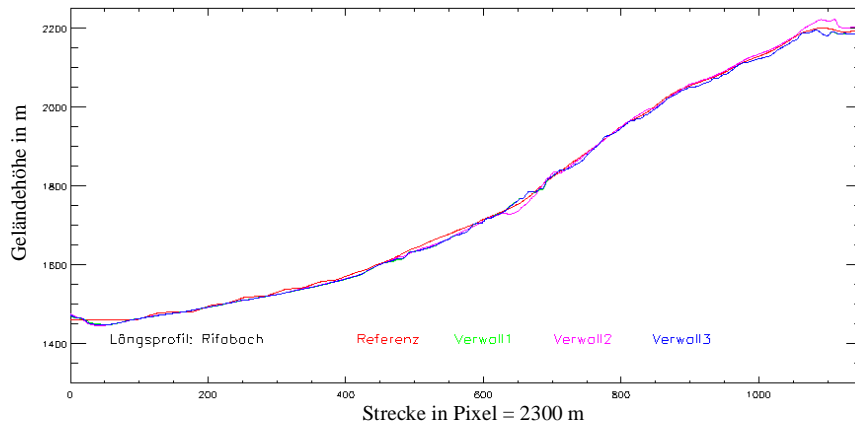


Abbildung 12-35. Längsprofil Gebiet Rifabach.

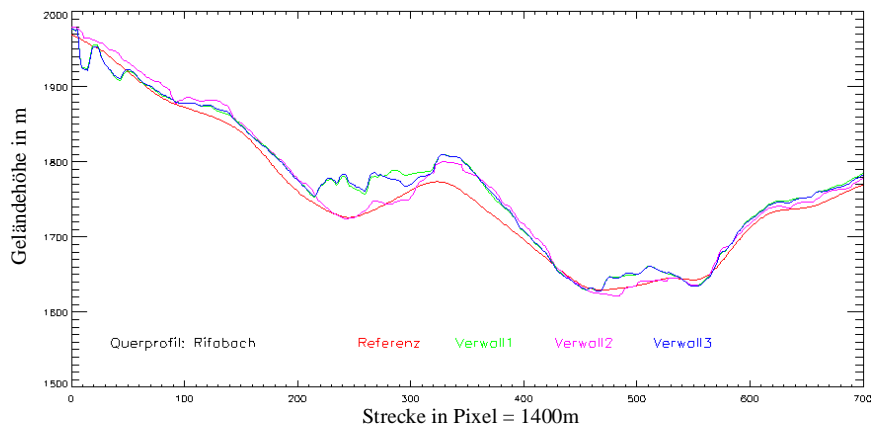


Abbildung 12-36. Querprofil Gebiet Rifabach.

Die Perspektiv-Ansichten der Referenz-DGM und der DOM Verwall₃ der Abbildungen 12-29 und 12-30 bzw. 12-33 und 12-34 zeigen u.a. fluviale Erosionsformen der Regionen des Verwall- bzw. Rifabaches. Während ersteres Gebiet nur gering bewaldet ist, weist letzteres eine starke Bewaldung auf. Beide Gebiete sind jedoch ganz oder teilweise schneebedeckt. Die Eindringtiefe des X-Bandes in Schnee variiert von mehreren Metern bei trockenem Schnee bis hin zu wenigen cm bei Nassschnee [Rott01]. Aufgrund der Insolation beim Befliegungszeitpunkt und auch der mittleren positiven Abweichung des Verwallbaches aus Tab. 12-13 ist hier von nassem Schnee auszugehen. Die höhere mittlere Abweichung des Rifabach- gegenüber dem Verwallbachgebiet unterstützt die Aussage, dass dieses Gebiet zudem verstärkt mit Baum- und Strauchvegetation bestanden ist.

Tabelle 12-13. Differenzmodellanalyse Gebiet Verwall- und Rifabach.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Verwall ₃ -Referenz Verwallbach	-110, 5 / 118, 8	27, 5 / 72, 5	-1, 78 / 5, 47	6, 01 / 7, 72
Verwall ₃ -Referenz Rifabach	-114, 3 / 102, 7	31, 2 / 68, 8	-1, 67 / 4, 28	8, 31 / 10, 68

Sowohl die Profilverläufe der InSAR-DOM der Abbildungen 12-31 und 12-32, die weitestgehend den geomorphologischen Formen der Referenz folgen und mehr Details als diese beinhalten, als auch die Statistik aus Tabelle 12-14 bestätigen nochmals die oben gemachten Annahmen für die Region um den Verwallbach. Die Formel von Koppe kommt in beiden Testgebieten für die Maßstäbe 1:25 000 und 1:50 000 zur Anwendung und ist, je nach Nutzung, in den Tabellen mit Koppe 25 bzw. Koppe 50 gekennzeichnet.

Tabelle 12-14. Profilanalyse Gebiet Verwallbach.

	Längsprofil	Ausschnitt Längsprofil	Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	300 - 900	-
Profillänge	2600 m	1200 m	1500 m
min. / max. Abweichung	0, 02 - 41, 21 m	0, 03 - 9, 95 m	0, 01 - 27, 97 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	7, 03 5, 90	4, 59 2, 57	6, 38 4, 18
unter / über	14, 4 / 85, 6 %	12, 8 / 87, 2 %	47, 9 / 52, 1 %
Hangneigung	-	14, 08°	-
Wert nach Koppe 50	-	4, 00 nicht erfüllt	-

Das Längsprofil des DOM Verwall₃ im Rifabachgebiet (Abb. 12-35) verläuft über weite Strecken unter dem der Referenz. Obwohl hier der Formverlauf, wie ebenfalls über weite Strecken des Querprofils, korrekt wiedergegeben ist, ist ein Fehler in Gestalt eines Offset gegenüber der Referenz festzustellen. Das DOM weist dann im Querprofil (Abb. 12-36) an den Pixelpositionen 0 bis 50 Unwrapping-Fehler auf. Die weiteren Abweichungen zur Referenz entsprechen nun einer plausiblen Vegetationshöhe, was stellenweise jedoch nicht für die Pixelpositionen 220 bis 380 zutrifft, da hier die Differenzen infolge nicht zu bereinigender Unwrapping-Fehler zu groß sind. Dies ist außerdem durch den maximalen Höhenunterschied zur Bodenreferenz von 57 Metern belegt (Tab. 12-15).

Tabelle 12-15. Profilanalyse Gebiet Rifabach.

	Längsprofil	Querprofil
Profillänge	2300 m	1400 m
min. / max. Abweichung	0,02 - 18,63 m	0,05 - 56,94 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	5,84 3,61	15,59 12,31
unter / über	86,2 / 13,8 %	15,1 / 84,9 %

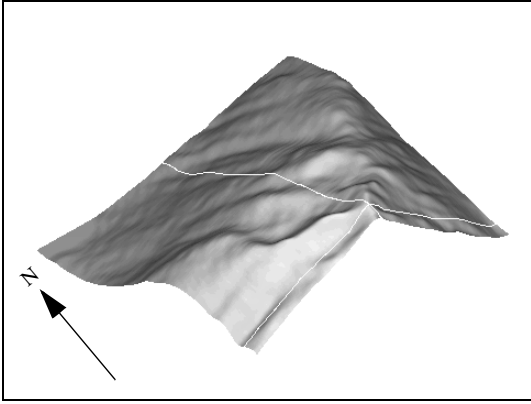


Abbildung 12-37. Referenz-DGM Gebiet Predigberg (2,0 km x 2,0 km, Überhöhungsf. 1,1).

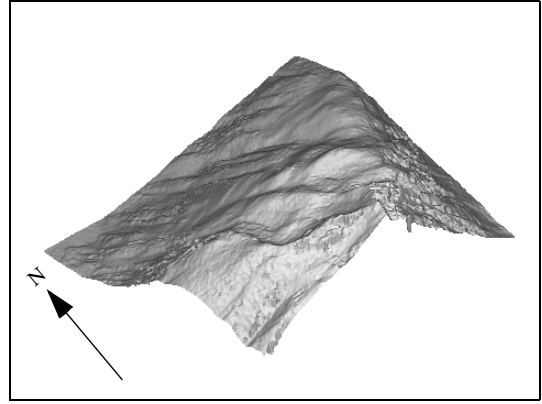


Abbildung 12-38. DOM Verwall₃ Gebiet Predigberg (2,0 km x 2,0 km, Überhöhungsf. 1,1).

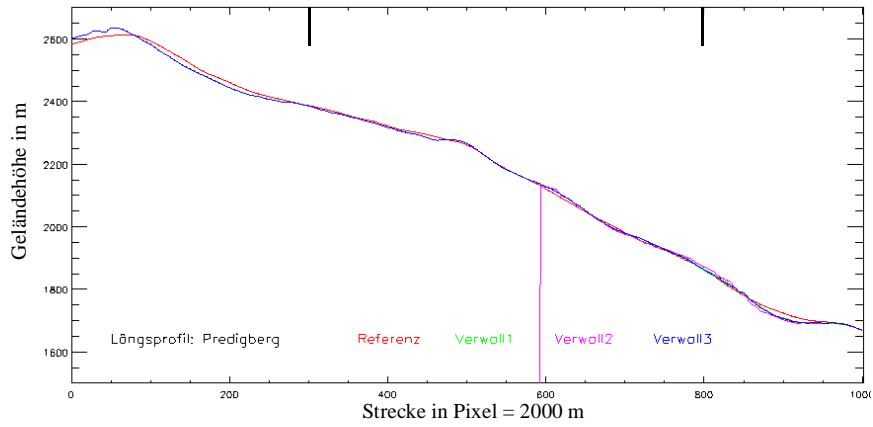


Abbildung 12-39. Längsprofil Gebiet Predigberg.

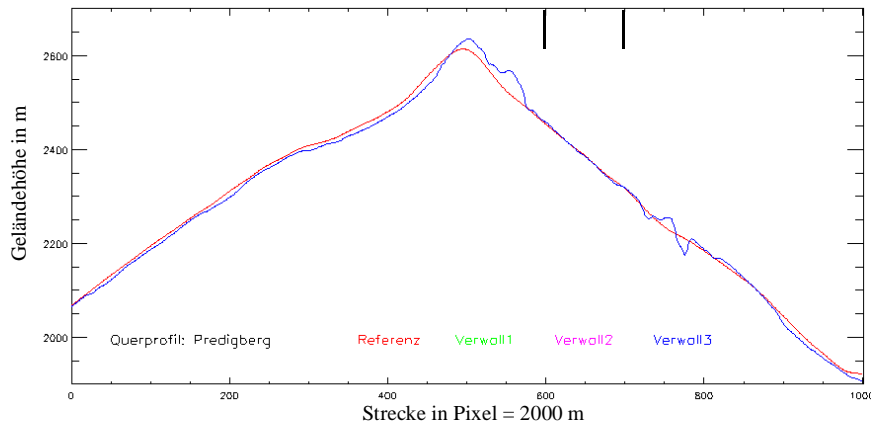


Abbildung 12-40. Querprofil Gebiet Predigberg.

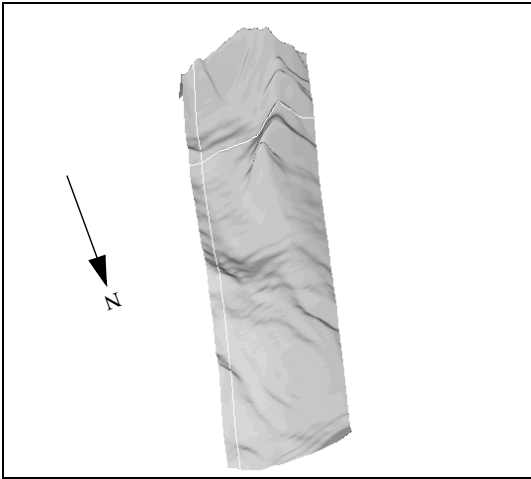


Abbildung 12-41. Referenz-DGM Gebiet Bergler Loch (4,1 x 1,0 km, Überhöhungsfaktor 1).

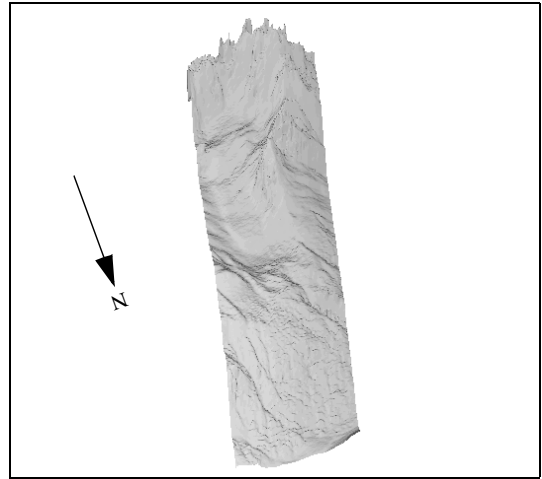


Abbildung 12-42. DOM Verwall₃ Gebiet Bergler Loch (4,1 x 1,0 km, Überhöhungsfak. 1).

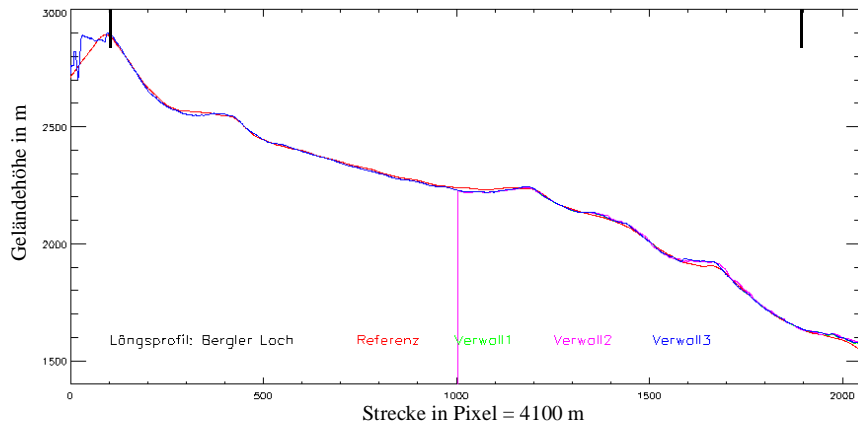


Abbildung 12-43. Längsprofil Gebiet Bergler Loch.

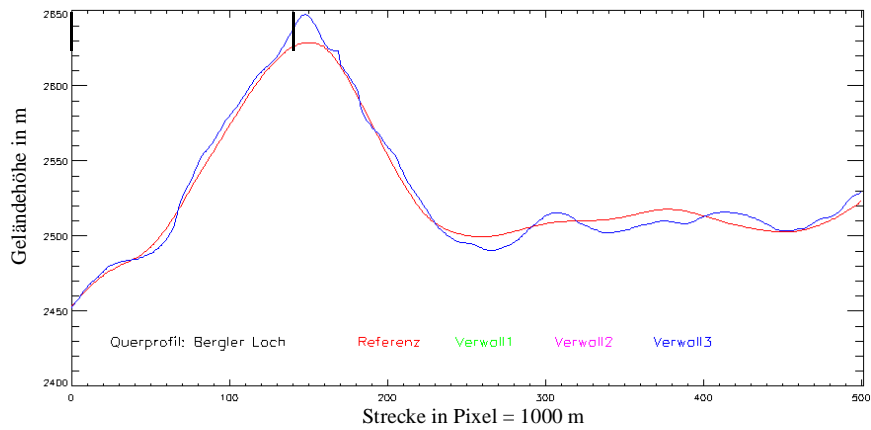


Abbildung 12-44. Querprofil Gebiet Bergler Loch.

Südlich des Paznauntals befinden sich der Predigberg und über dem Bergler Loch die Dreiköpfer-Gipfel, deren Referenz- und Verwall₃-Modelldarstellungen den Abbildungen 12-37 und 12-38 bzw. 12-41 und 12-42 zu entnehmen sind. Beide Gebiete sind in den unteren Höhenlagen mit Vegetation bestanden und weisen eine weitflächige, in höheren Lagen mindestens zwei Meter mächtige Schneedecke auf. Aus der Differenzmodellanalyse der Tabelle 12-16 ist dieser Sachverhalt jedoch nicht klar zu erkennen, da zum einen beide InSAR-Modelle häufig unter der Referenz liegen und zum anderen die Mittelwertabweichungen im positiven Bereich gering sind. So ist von einem leicht negativen Versatz der InSAR-Daten gegenüber der Referenz auszugehen. Die Ursache dieses Versatzes kann darin begründet sein, dass sich beide Regionen am südlichen Rand des Testgebietes befinden und hauptsächlich im Far Range-Bereich der Aufnahme Verwall₁ erfasst wurden.

Tabelle 12-16. Differenzmodellanalyse Gebiet Predigberg und Bergler Loch.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Verwall ₃ -Referenz Predigberg	-105, 7 / 90, 3	57, 7 / 42, 3	-3, 98 / 6, 15	2, 65 / 5, 36
Verwall ₃ -Referenz Bergler Loch	-158, 6 / 135, 7	47, 3 / 52, 7	-3, 69 / 8, 64	4, 47 / 8, 96

Der Versatz wird auch durch die Profilanalyse (Tab. 12-17) bestätigt, in der sich die Profilverläufe von Verwall₃ mehrheitlich unter denen der Referenz befinden.

Tabelle 12-17. Profilanalyse Gebiet Predigberg.

	Längsprofil	Ausschnitt Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	300 - 800	-	600 - 700
Profillänge	2000 m	1000 m	2000 m	200 m
min. / max. Abweichung	0, 02 - 24, 94 m	0, 02 - 11, 65 m	0, 04 - 51, 76 m	0, 04 - 5, 80 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	7, 55 6, 02	4, 35 2, 77	9, 70 8, 21	2, 18 1, 44
unter / über	59, 2 / 40, 8 %	50, 3 / 49, 7 %	71, 5 / 28, 5 %	60, 4 / 39, 6 %
Hangneigung	-	27, 65°	-	33, 58°
Wert nach Koppe 25	-	3, 07 n. erfüllt	-	3, 49 erfüllt
Koppe 50	-	5, 64 erfüllt	-	6, 48 erfüllt

Die Morphologie des Predigberges ist jedoch sowohl im Längs- als auch im Querprofil (siehe dazu Abb. 12-39 und 12-40) gegenüber der Referenz richtig wiedergegeben. Ausnahmen bilden hier lediglich der steile und felsige Gipfelbereich sowie ein weiterer Fehler im Querprofil an den Pixelpositionen 700 bis 800, die mit nicht korrigierten Unwrapping-Fehlern in Shadow- bzw. nicht ausreichend erfassten Gebieten zu begründen sind. Dies ist ebenfalls die Ursache für den Fehler im Längsprofil des Bergler Loches (Abb. 12-43) an den Pixelpositionen 0 bis 100, welches ansonsten dem durch die Referenz vorgegebenen Formverlauf sehr gut folgt. Dies wird auch am 3600 Meter langen Ausschnitt des Längsprofils deutlich, bei welchem das Kriterium von Koppe im Maßstab 1:50 000 nur sehr knapp nicht erfüllt ist (Tabelle 12-18), wobei hier natürlich der diskutierte negative Versatz berücksichtigt werden muss.

Tabelle 12-18. Profilanalyse Gebiet Bergler Loch.

	Längsprofil	Ausschnitt Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelpostion Ausschnitt	-	100 - 1900	-	0 - 140
Profillänge	4100 m	3600 m	1000 m	280 m
min. / max. Abweichung	0, 00 - 108, 91 m	0, 00 - 25, 85 m	0, 09 - 18, 77 m	0, 09 - 11, 31 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	8, 23 11, 41	6, 16 4, 77	5, 24 3, 29	4, 19 2, 56
unter / über	56, 0 / 44, 0 %	62, 2 / 37, 8 %	37, 1 / 62, 9 %	24, 1 / 75, 9 %
Hangneigung	-	19, 26°	-	31, 17°
Wert nach Koppe 25	-	2, 55 n. erfüllt	-	3, 31 n. erfüllt
Koppe 50	-	4, 60 n. erfüllt	-	6, 13 erfüllt

Angesichts der ausschließlich in der Far Range und deshalb unzureichend erfolgten Erfassung der komplizierten Form des Querprofils der Abbildung 12-44 ist der Verlauf zwar in den Leitlinien, jedoch nicht im Detail richtig wiedergegeben.

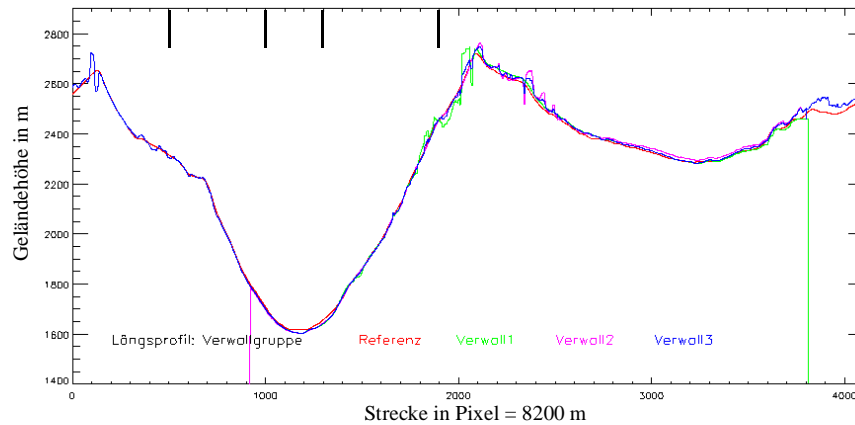


Abbildung 12-45. Längsprofil Gebiet Verwallgruppe.

Den Abschluss der Verwall-Höhenmodellanalyse bildet nun ein Längsprofil, welches über die gesamte Gebirgs-Gruppe, angefangen von der Gorfen Spitze hinunter zum Paznauntal und wieder hinauf zur Gipfflur zwischen der Fädner Spitz und dem Grieskogel bis in das Ochsental, verläuft.

Tabelle 12-19. Profilanalyse Gebiet Verwallgruppe.

	Längsprofil	Ausschnitt 1 Längsprofil	Ausschnitt 2 Längsprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	500 - 1000	1300 - 1900
Profil länge	8200 m	2000 m	1200 m
min. / max. Abweichung	0, 00 - 87, 76 m	0, 01 - 16, 48 m	0, 01 - 19, 25 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	10, 73 12, 02	5, 75 3, 38	6, 37 4, 31
unter / über	40, 3 / 59, 7 %	78, 2 / 21, 8 %	75, 0 / 25, 0 %
Hangneigung	-	31, 23°	33, 61°
Wert nach Koppe 25 Koppe 50	- -	3, 32 n. erfüllt 6, 14 erfüllt	3, 49 n. erfüllt 6, 49 erfüllt

Sowohl die Profilverläufe der Abbildung 12-45 als auch die Statistik der Tabelle 12-19 bekräftigen die bereits bei der Betrachtung der Teilgebiete getroffenen Aussagen. Abweichungen vom insgesamt korrekt wiedergegeben geomorphologischen Formverlauf sind vor allem bei steilen Hängen, die Layover- oder Shadow-Effekte bedingen, sowie aus nur einer Flugrichtung beleuchteten oder ausschließlich im Far Range erfassten Flächen zu finden.

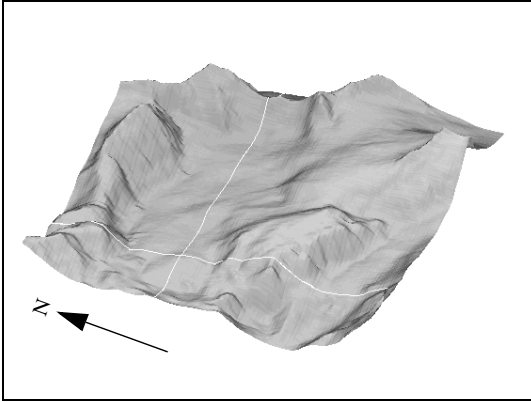


Abbildung 12-46. Referenz-DGM Gebiet Silvrettahorn (2,4 km x 3,6 km, Überhöhungsf. 1).

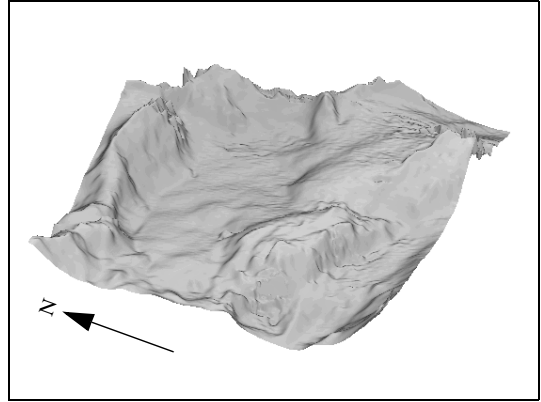


Abbildung 12-47. DOM Silvretta₁ Gebiet Silvrettahorn (2,4 km x 3,6 km, Überhöhungsf. 1).

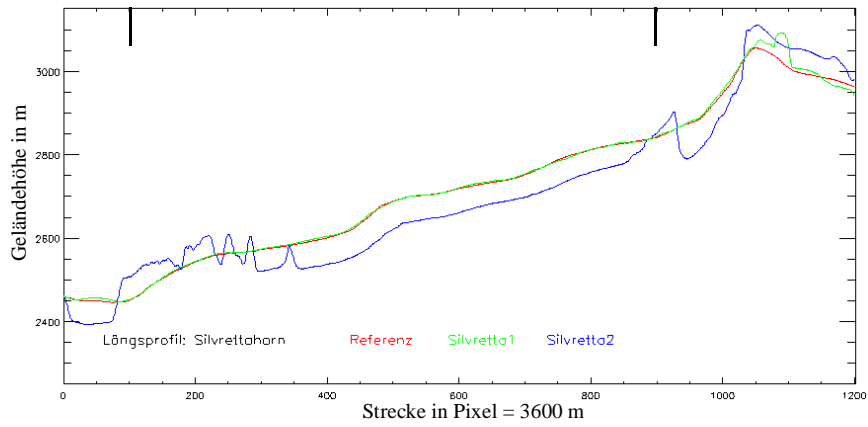


Abbildung 12-48. Längsprofil Gebiet Silvrettahorn.

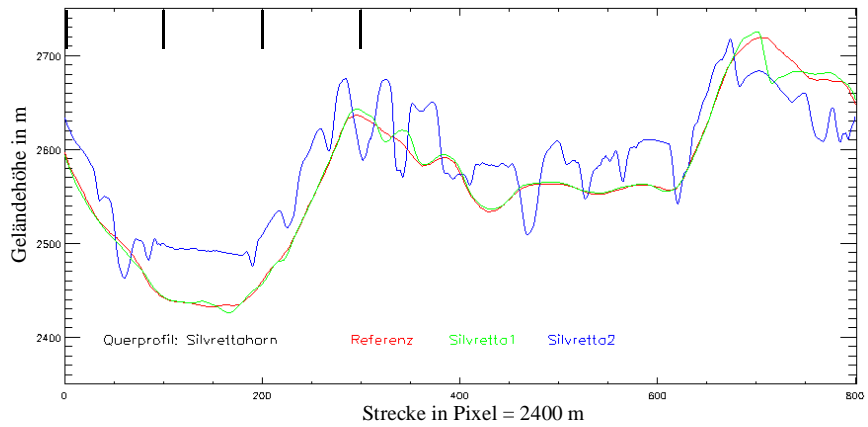


Abbildung 12-49. Querprofil Gebiet Silvrettahorn.

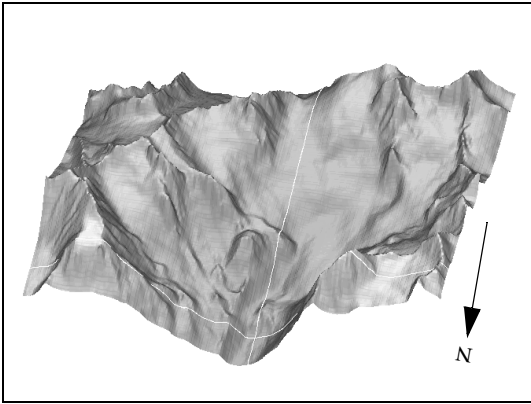


Abbildung 12-50. Referenz-DGM Gebiet Jamtal Ferner (3,0 km x 4,4 km, Überhöhungsfaktor 1).

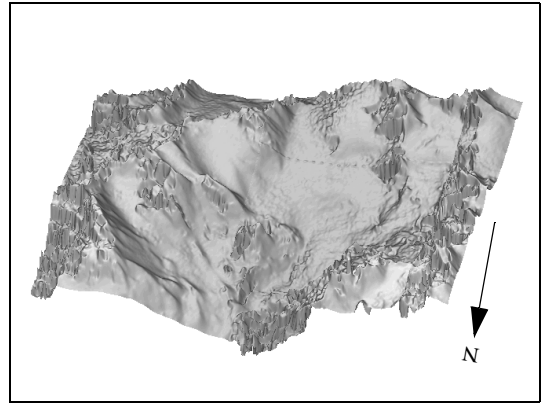


Abbildung 12-51. DOM Silvretta₁ Gebiet Jamtal Ferner (3,0 km x 4,4 km, Überhöhungsf. 1).

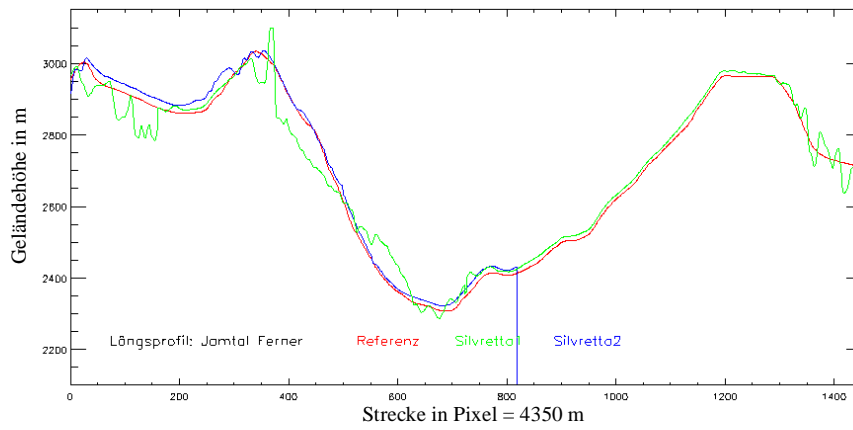


Abbildung 12-52. Längsprofil Gebiet Jamtal Ferner.

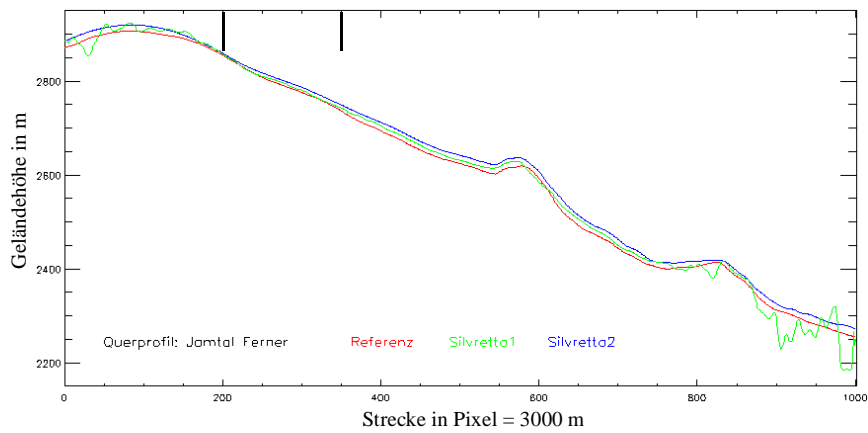


Abbildung 12-53. Querprofil Gebiet Jamtal Ferner.

Die Abbildungen 12-46 und 12-47 bzw. 12-50 und 12-51 zeigen perspektiv die Referenz-DGMs sowie die DOMs Silvretta₁ von Teilen des Silvretta Gletschers, respektive des Jamtal Ferners mit ihren umliegenden Gipfeln. Wie bereits diskutiert weist das DOM Silvretta₁ in den östlich exponierten Hängen ausgeprägte Höhendifferenzen gegenüber der Referenz auf. Da nach Osten exponierte Hanglagen im Silvrettahorngebiet weitaus weniger oft auftreten als in der Region des Jamtal-Ferners, drückt sich dieser Sachverhalt auch in den weitaus besseren, Tabelle 12-20 zu entnehmenden, Mittel- und Standardabweichungen des erstgenannten Gebietes gegenüber der Referenz aus.

Tabelle 12-20. Differenzmodellanalyse Gebiet Silvrettahorn und Jamtal Ferner.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Silvretta ₁ -Referenz Silvrettahorn	-169, 6 / 187, 3	40, 2 / 59, 8	-3, 29 / 10, 7	3, 58 / 7, 83
Silvretta ₁ -Referenz Jamtal Ferner	-161, 7 / 134, 0	22, 1 / 77, 9	-8, 10 / 21, 4	11, 4 / 14, 0

Die Profile der Abbildungen 12-48 und 12-49 zeigen, dass das DOM Silvretta₂ für dieses Teilgebiet größtenteils unbrauchbar ist, während das DOM Silvretta₁ über weite Strecken der Referenz folgt (siehe dazu auch Tabelle 12-21). Ausnahmen bilden dabei in beiden Profilen diejenigen Abschnitte, die im Shadowbereich verlaufen.

Tabelle 12-21. Profilanalyse Gebiet Silvrettahorn.

	Längsprofil	Ausschnitt 1 Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt 1 Querprofil	Ausschnitt 2 Querprofil
Pixelpostion Ausschnitt	-	100 - 900	-	0 - 100	200 - 300
Profillänge	3600 m	2400 m	2400 m	300 m	300 m
min. / max. Abweichung	0, 00 - 74, 0 m	0, 00 - 5, 17m	0, 00 - 43, 86 m	0, 52 - 6, 20 m	0, 01 - 6, 86 m
Mittel./Stdv. Abweichung	4, 61 9, 02	1, 91 1, 27	3, 89 5, 84	3, 33 1, 76	2, 33 2, 00
unter/über	26,6/73,4 %	29,6/70,4 %	34,1/65,9 %	78,2/21,8 %	50,5/49,5 %
Hang- neigung	-	9, 19°	-	27, 25°	30, 29°
Wert nach Koppe 25	-	1, 99 erfüllt	-	3, 05 n. erf.	3, 25 erfüllt
Koppe 50	-	3, 47 erfüllt	-	5, 59 erfüllt	6, 00 erfüllt

Tabelle 12-22. Profilanalyse Gebiet Jamtal Ferner.

	Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	-	200 - 350
Profillänge	4350 m	3000 m	450 m
min. / max. Abweichung	0, 00 - 130, 34m	0, 05 - 80, 56 m	0, 06 - 6, 66 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	30, 06 30, 11	11, 47 12, 83	2, 79 1, 79
unter / über	31, 6 / 68, 4 %	22, 9 / 77, 1 %	13, 2 / 86, 8 %
Hangneigung	-	-	14, 80°
Wert nach Koppe 50	-	-	4, 09 erfüllt

Für die Region um den Jamtal Ferner liefern, wie aus den Abbildungen 12-52 und 12-53 ersichtlich, die Profile des Höhenmodells Silvretta₂ insgesamt die plausibleren Ergebnisse. In den shadowfreien Bereichen, in denen das Modell Silvretta₁ vertrauenswürdig ist, zeigt es im Detail hingegen die besseren Resultate. Diese Diskrepanz zwischen shadow- und shadowfreien Bereichen geht auch aus den Vergleichswerten in Tabelle 12-22 hervor, die für das Längs- bzw. das Querprofil auf die gesamten Strecken bezogen sehr schlecht, im shadowfreien Detailausschnitt dagegen gut ausfallen.

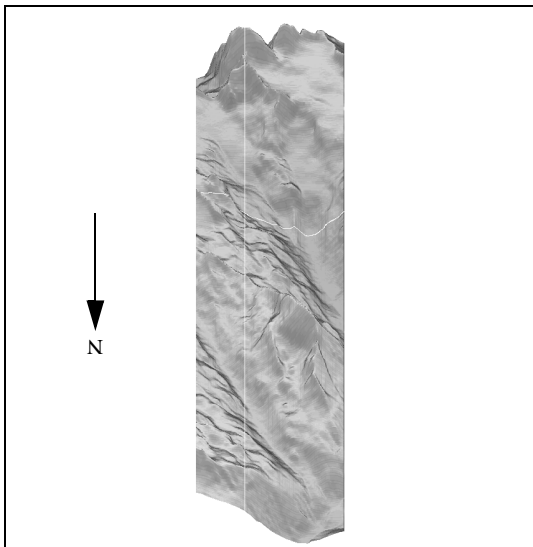


Abbildung 12-54. Referenz-DGM Gebiet Piz Buin (9,0 km x 2,1 km, Überhöhungsfaktor 1).

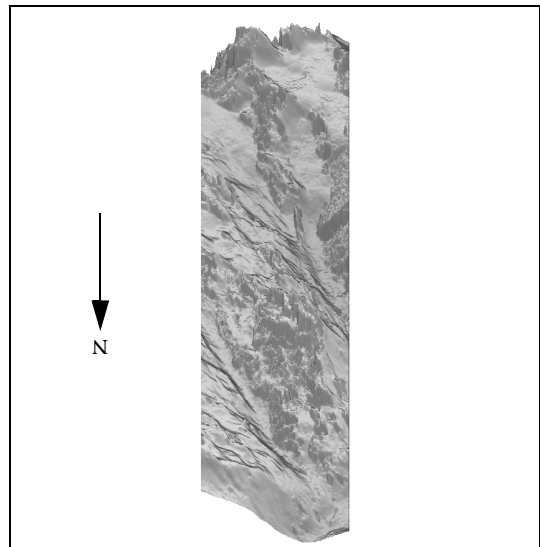


Abbildung 12-55. DOM Silvretta₁ Gebiet Piz Buin (9,0 km x 2,1 km, Überhöhungsfaktor 1).

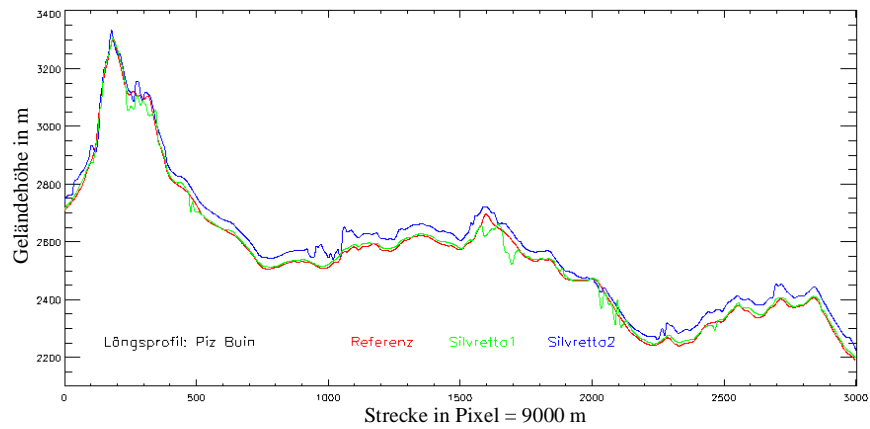


Abbildung 12-56. Längsprofil Gebiet Piz Buin.

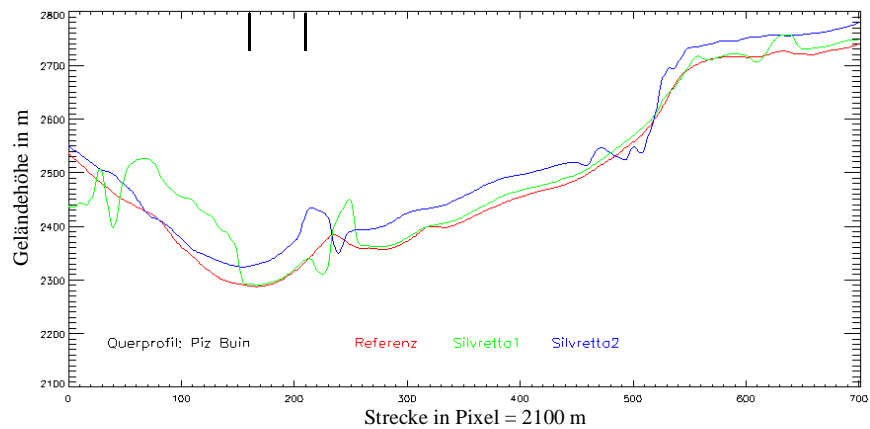


Abbildung 12-57. Querprofil Gebiet Piz Buin.

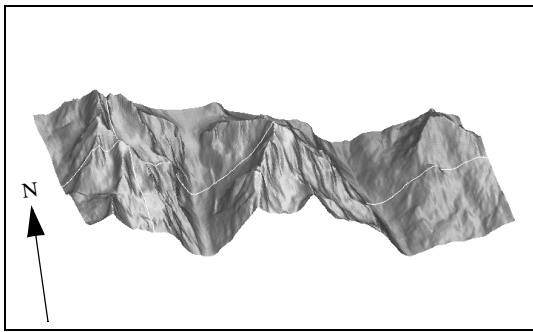


Abbildung 12-58. Referenz-DGM Gebiet La Cudera (7,7 km x 2,1 km, Überhöhungsfaktor 1).

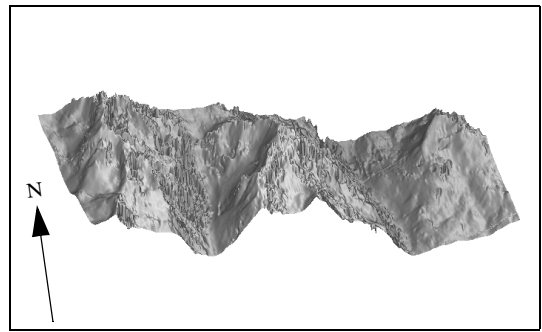


Abbildung 12-59. DOM Silvretta₁ Gebiet La Cudera (7,7 km x 2,1 km, Überhöhungsfaktor 1).

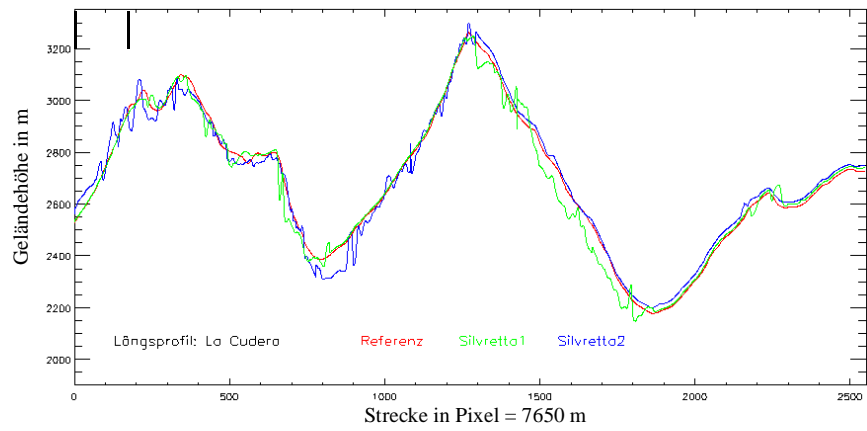


Abbildung 12-60. Längsprofil Gebiet La Cudera.

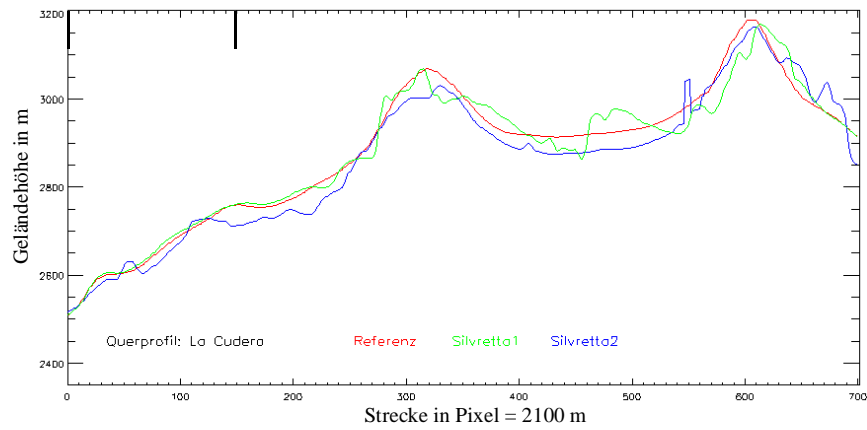


Abbildung 12-61. Querprofil Gebiet La Cudera.

Die Höhenmodellanalyse wird mit zwei großflächigen Gebieten, die weite Teil des im Testgebiet vorkommenden Hochgebirgsformenschatzes repräsentieren, abgeschlossen. Die Perspektiv-Ansichten der Referenz und der InSAR-Daten sind in den Abbildungen 12-54 und 12-55 bzw. 12-58 und 12-59 zu sehen. Die Darstellungen der DOM Silvretta₁ zeigen dabei eindrücklich die genannten Schwachstellen auf, die sich auch in den Vergleichswerten zur Referenz in der Tabelle 12-23 niederschlagen.

Tabelle 12-23. Differenzmodellanalyse Gebiet Piz Buin und La Cudera.

Differenzmodell	Min./Max. der Differenz (m)	InSAR unter/über Referenz (%)	Mittel./Stdv. neg. Bereich	Mittel./Stdv. pos. Bereich
Silvretta ₁ -Referenz Piz Buin	-218,5 / 145,2	24,5 / 75,5	-6,48 / 19,0	8,54 / 13,4
Silvretta ₁ -Referenz La Cudera	-237,9 / 131,0	32,0 / 68,0	-9,66 / 22,4	7,41 / 11,3

Die bereits für die übrigen Gebiete der Silvrettagruppe getroffenen Aussagen finden sowohl in den Profilen der Abbildungen 12-56 und 12-57 bzw. 12-60 und 12-61 als auch in den Statistiken der Tabellen 12-24 und 12-25 ihre Bestätigung.

Tabelle 12-24. Profilanalyse Gebiet Piz Buin.

	Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	-	160 - 210
Profillänge	9000 m	2100 m	150 m
min. / max. Abweichung	0,00 - 84,21 m	0,02 - 150,55 m	2,30 - 5,74 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	10,80 12,91	25,57 31,80	3,37 0,80
unter / über	19,7 / 80,3%	13,1 / 86,9%	0,0 / 100,0%
Hangneigung	-	-	16,93°
Wert nach Koppe 50	-	-	4,33 erfüllt

Tabelle 12-25. Profilanalyse Gebiet La Cudera.

	Längsprofil	Ausschnitt Längsprofil	Querprofil	Ausschnitt Querprofil
Pixelposition Ausschnitt	-	0 - 175	-	0 - 150
Profillänge	7650 m	525 m	2100 m	450 m
min. / max. Abweichung	0,02 - 158,12 m	0,03 - 19,29m	0,00 - 86,55 m	0,00 - 11,96 m
Mittel. / Stdv. Abweichung	25,29 28,62	3,32 2,87	20,04 19,75	4,85 3,16
unter / über	38,9 / 61,1 %	43,7 / 56,3 %	40,4 / 59,6 %	9,9 / 90,1 %
Hangneigung	-	39,74°	-	29,08°
Wert nach Koppe 25 Koppe 50	- -	3,99 erfüllt 7,49 erfüllt	- -	3,17 n. erfüllt 5,84 erfüllt