Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften
Institut für Physische Geographie

Ermittlung von Gletscherparametern auf der Antarktischen Halbinsel mit MODIS-Daten

-

Konzeption und Umsetzung einer halbautomatischen Prozessierungskette

Magisterarbeit im Fach Geographie
Studiengang Magister Scientiarum (M.Sc.)

vorgelegt von

Moritz Mössner

Referent: Dr. Helmut Saurer

Koreferent: Prof. Dr. Rüdiger Glaser

Freiburg im Breisgau, September 2008

VORWORT

Auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Arbeit gab es Viele, die mich auf die unterschiedlichsten Art und Weisen unterstützt haben.

Allen voran möchte ich mich bei Dr. Steffen Vogt für die umfassende Betreuung dieser Arbeit bedanken. All die hilfreichen Gespräche, die praktische Unterstützung sowie die Ermutigungen in schwierigen Situationen waren entscheidend für das Gelingen dieser Arbeit. Mein Dank gilt genauso Herrn Dr. Helmut Saurer, für viele fruchtbare Vorschläge zur Umsetzung der Arbeit und Herrn Prof. Dr. Rüdiger Glaser als Koreferent.

Eine entscheidende Rolle für diese Arbeit wird Dr. Jorge Arigony Neto zuteil, der zum einen die Themenstellung ins Leben rief und mir zum anderen als freundschaftlicher Gesprächspartner jederzeit zur Seite stand. Zum anderen bin ich sehr dankbar für seine Einladung zu einem fünfwöchigen Auslandsaufenthalt am Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas (NUPAC) an der Universidade Federal do Rio Grande do Súl (UFRGS) in Porto Alegre, Brasilien zur gemeinsamen Diskussion meiner Arbeit. An dieser Stelle gebührt ein großer Dank Prof. Dr. Jefferson Simões, der als Leiter des NUPAC meine Arbeit dort ermöglicht hat. Der Aufenthalt Am NUPAC hat mich nicht nur in meiner Magisterarbeit vorwärts gebracht, sondern war darüber hinaus eine sehr große persönliche Bereicherung durch die vielen lieben Leute dort. Por isso quero também expressar o meu agradecimento para toda a gente do NUPAC, por a sua ajuda e amizade. Foi um tempo tri legal!

Der Auslandsaufenhalt in Porto Alegre wurde durch die freundliche, finanzielle Unterstützung des Baden-Württembergischen Brasilienzentrums gefördert.

Meinen beiden Kommiliton/Innen Christine Griebel und Christoph Baumann danke ich für die kritische Durchsicht der Magisterarbeit.

Ich bin sehr glücklich über die vielfältige Unterstüztung meiner lieben Eltern, Ingeborg und Jörg (und auch Barbara), wie etwa dafür dass sie mir auch in kniffligen Situationen Rückhalt gegeben haben.

Es gibt ebenso Einige, die indirekt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, diese sind: Meine „Dicke WG“ Isa, Sanne und Matze und Florian Götz aus der Ferne.

Einen ganz besonderen Beitrag zu dieser Arbeit hat meine Freundin Cristabel geleistet indem sie immer für mich da war. Vielen Dank für Deine Unterstüzung und die schönen Momente, die das Leben lebenswert machen! ☼

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT **2**
INHALTSVERZEICHNIS **3**
ABBILDUNGSVERZEICHNIS **5**
TABELLENVERZEICHNIS **7**
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS **9**
SYMBOLE **11**
1 EINLEITUNG **12**
1.1 Ziele der Magisterarbeit 13
1.2 Aufbau der Magisterarbeit 14
2 UNTERSUCHUNGSGEBIET ANTARKTISCHE HALBINSEL **15**
2.1 Anzeichen des Klimawandels auf der antarktischen Halbinsel 16
2.1.1 Signifikante Trends der Lufttemperatur 17
2.1.2 Veränderte Niederschlagsmuster 17
2.1.3 Rückgang der Meereisbedeckung 17
2.1.4 Zerfall von Schelfeis und Gletscherrückzug 18
2.1.5 Anstieg der Trockenschneelinie 18
2.1.6 Positiver Trend in der Dauer von Schmelzbedingungen 18
2.2 Zusammenfassung 19
3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN **20**
3.1 Definition der klassischen Gletscherzonen 20
3.1.1 Trockenschneezone 21
3.1.2 Perkolationszone 21
3.1.3 Nassschneezone 21
3.1.4 Überlagerte Eiszone 21
3.1.5 Ablationszone 22
3.2 Grenzen zwischen den Gletscherzonen als Indikatoren für klimatische Veränderungen 22
3.3 Der MODIS-Sensor als Teil übergeordneter Forschungsprojekte 23
3.3.1 Das Earth Observing System (EOS) und MODIS 23
3.3.2 Das Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 24
3.4 Zusammenfassung 30
4 VERWENDETE DATEN **31**
4.1 MODIS Level 1B Calibrated, Geolocated Radiances (MOD021km) 33
4.1.1 Störfaktoren im MOD021KM- Produkt 35
4.2 MODIS Cloud Mask (MOD35_L2) 35
4.3 MODIS Geolocation Data Set (MOD03) 38
4.4 Radarsat Antarctic Mapping Project Höhenmodell (RAMP DHM) 38

4.5 Antarctic Peninsula glacier database (AntPenDB) ... 39
5 METHODIK ... 43
5.1 Vorprozessierung von MODIS-Daten ... 43
5.1.1 Geometrische Korrektur ... 45
5.1.2 Aufbereitung des MODIS Cloud Mask Produkts ... 46
5.2 Reflexionsverhalten von Schnee- und Eisflächen ... 49
5.3 Klassifikation von Gletscherzonen mit MODIS-Daten ... 51
5.3.1 Das Klassifikationsverfahren ... 51
5.3.2 Das Klassifikationsmodell ... 52
5.3.3 Erkennung von Gletscherzonen in MODIS-Bildern ... 53
5.3.4 MODIS-Trockenschneezone ... 54
5.3.5 MODIS-Nassschneezone ... 54
5.3.6 MODIS-Blankeiszone ... 55
5.4 Der Centerline-Ansatz ... 55
5.4.1 Anpassung des Centerline-Ansatzes an MODIS-Daten ... 57
5.4.2 Potential und Grenzen des Centerline-Ansatzes ... 57
5.5 Statistische Tests ... 58
5.6 Zusammenfassung ... 59
6 KONZEPTION UND AUTOMATISIERUNG DER PROZESSIERUNGSKETTE FÜR MODIS-DATEN ... 60
6.1 Die Prozessierungskette ... 60
6.1.1 IceTools ... 62
6.1.2 Neuerungen in IceTools1.1 ... 62
6.1.3 Software zur Umsetzung der Prozessierungskette ... 63
6.1.4 Vorprozessierung der MODIS-Bilder ... 65
6.1.5 Klassifikation der Gletscherzonen ... 66
6.1.6 Extrahierung der Grenzen zwischen den Gletscherzonen ... 69
6.1.7 Validierung der Ergebnisse und Datenbankeingabe ... 70
6.2 Zusammenfassung ... 72
7 ÜBERPRÜFUNG DER PROZESSIERUNGSERGEBNISSE ... 73
7.1 Überprüfung der Konsistenz der MODIS-Klassifikation ... 73
7.2 Vergleich der MODIS-Klassifikation mit vorhandenen Daten aus der AntPenDB ... 76
7.3 Angaben zum Zeitaufwand für die Prozessierung von MODIS-Daten ... 80
7.4 Zusammenfassung ... 81
8 SCHLUSSBETRACHTUNGEN UND AUSBLICK ... 82
LITERATURVERZEICHNIS ... 85
ANHANG ... 93
A.1 MODIS-Daten ... 93
A.2 PHP-Quellcode ... 96

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Räumliche Verortung der Anzeichen für den Klimawandel auf der Antarktischen Halbinsel (ARIGONY NETO 2006, S. 2). 16

Abbildung 3.1: Klassische Gletscherzonen und mit Fernerkundungsverfahren oberflächlich detektierte optische Gletscherzonen. Verändert nach ARIGONY NETO (2006, S. 9) 20

Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des MODIS-Aufnahmeswaths und der cross-track Scanzeilen (TOLLER ET AL. 2006, S. 9). 25

Abbildung 3.3: Flussdiagramm der verschiedenen Verarbeitungslevels von MODIS Daten und generierter MODIS-Produkte, sowie die zuständigen Institutionen (KING ET AL. 2003, S. 40 f). 29

Abbildung 4.1: Das RAMP DHM (Liu et al. 2001) mit schattiertem Relief für die Antarktische Halbinsel nördlich 70° S (ARIGONY NETO 2006, S. 21). 39

Abbildung 4.2: Struktur der Antarctic Peninsula glacier database mit den Fremdschlüsseln als Verbindung zwischen den einzelnen Tabellen und den Tabellen, „cenline_point1000“ und „cloud_analysis_cenline“, die für die Prozessierung der MODIS-Daten hinzugefügt wurden. Die Längenangabe für character varying (VARCHAR) wurde auf 0 gesetzt, obwohl die Spalten in der AntPenDB unterschiedliche Längen haben. 42

Abbildung 5.1: Beleuchtungsverhältnisse in topographisch gegliedertem Gelände (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 532). 44

Abbildung 5.2: Bowtie-Effekt für drei aufeinander folgende MODIS-Scans (n-1, n, n+1). Der zweite Scan (n) ist hervorgehoben (LIU ET AL. 2008, S. 663). 45

Abbildung 5.3: Header-Datei (*.hdr), die von MRTSwath ausgegeben wird und Metadaten zu der bearbeiteten MOD35-Szene enthält, welche für den Import in ERDAS und die Anpassung der Notierung der Eckkoordinaten benötigt wird. 48

Abbildung 5.4: Dialogfenster für den Import des MOD35-Produkts in ERDAS mit den vorgenommenen Einstellungen. 49

Abbildung 5.5: Spektrale Reflektanzkurven für frischen Schnee, Firn und Eis nach ZENG ET AL. (1984, S. 454). 50

Abbildung 5.6: Spektrale Reflektanz von Schnee im Bereich 0,4-2,5 µm in Abhängigkeit von der Korngröße (NOLIN & DOZIER 1993, S. 233). Zu erkennen ist der starke Abfall der Reflektanz bei zunehmender Korngröße im Bereich von 0,7-1,3 µm. 51

Abbildung 5.7: Das Gletschereinzugsgebiet des Victory Gletschers in einer Landsat ETM+ Szene (a und b) und Ergebnisse einer unüberwachten Klassifikation auf demselben Gletscher (b und c). a und c zeigen das ganze Einzugsgebiet, b und d nur die Bereiche der Bufferzone um die Centerline (grüne Linie). Rote Pfeile zeigen aufgrund topographischer Effekte gesättigte Bereiche (a, b) und entsprechende Klassifikationsfehler (c, d) an. Blaue Pfeile zeigen Schattenbereiche (a) und daraus resultierende Fehlklassifikation (c). Magenta markiert Blankeispixel die als Felsen klassifiziert wurden (ARIGONY NETO 2006, S. 33). 56

Abbildung 5.8: Darstellung einer Punktcenterline mit einem Abstand von 1000 m zwischen den einzelnen Punkten im MODIS-Band 5 (a), im Ratiobild (b) und in einer klassifizierten MODIS-Szene (c). Band 5 weist für die Eisklasse niedrige und für Nassschnee ansteigende Werte auf, im Ratiobild

kehrt sich dieses Verhältnis um (Quellen: NASA; Antarctic Digital Database (URL 14); AntPenDB). 57

Abbildung 5.9: Das Vorgehen bei den statistischen Auswertungen und die angewandten Testverfahren. 59

Abbildung 6.1: Schematischer Ablauf der Prozessierungskette mit ihren Hauptarbeitsschritten, Vorprozessierung, Klassifikation, Extraktion der Grenzen und Evaluation/Datenbankeingabe (verändert nach ARIGONY NETO 2006). 61

Abbildung 6.2: Die einzelnen Prozessierungsschritte und die dafür verwendete Software (verändert nach ARIGONY NETO 2006). 64

Abbildung 6.3: Ansicht der graphischen Oberfläche von IceTools1.1 zur Eingabe der MODIS MOD02, MOD03 und MOD35 HDF Dateien und Auswahl des Zielordners 65

Abbildung 6.4: Ansicht der graphischen Oberfläche in IceTools1.1 zur Eingabe der vorprozessierten Daten und des DHM (DEM: Digital Elevation Model) für die Klassifikation 66

Abbildung 6.5: MODIS-Band 5 (a) und eine klassifizierte MODIS-Szene (b,) jeweils mit Punktcenterlines. In der klassifizierten Szene sind auch die Centerlinepunkte der Schneelinien (rot) markiert (Quellen: NASA; Antarctic Digital Database (URL 14); AntPenDB) 67

Abbildung 6.6: Detaillierter schematischer Ablauf des Klassifikationsprozesses und Erstellung von Shapefiles und Klassifikationsreport zur Validierung der Ergebnisse (verändert nach ARIGONY NETO 2006). 68

Abbildung 6.7: Schematische Darstellung der Festlegung der Grenzen zwischen den Gletscherzonen entlang der Centerline. Beginnend an der ersten Punkt–ID (point_seq) nahe der Gletscherfront werden die Klassen der Centerlinepunkte abgefragt und die Grenzen wie im Text beschrieben festgelegt. Verändert nach ARIGONY NETO (2006). 69

Abbildung 6.8: Bildschirmausdruck der visuellen Überprüfung der Klassifikation. An der Stelle (1), dem Gletscher mit der ID TPE_32, wurde vom Algorithmus eine fehlerhafte Schneelinie ausgegeben, wie aus dem Klassifikationsreport und anhand der Attributtabelle der GIS-Software zu erkennen ist (2). Diese kann im nächsten Schritt korrigiert werden. 70

Abbildung 6.9: Ansicht der graphischen Oberfläche in IceTools1.1 zur Eingabe der zu korrigierenden Ergebnisse von Schneelinie (Klasse: 2) und Trockenschneelinie (Klasse: 3) bezogen auf die entsprechenden Gletscher mittels deren lokalen Identifikatoren (local_id). 71

Abbildung 7.1: Lage der verwendeten bemannten Wetterstationen auf der AH. Quellen: LIMA (URL 15); ADD (URL 14). 74

Abbildung 7.2: Schematische Darstellung der Sensor Zenith Winkels und des Sonnen Zenithwinkels im Bezug auf einen Punkt auf der Erdoberfläche (CHAMBERS 2008). 75

Abbildung 7.3: Schematische Darstellung des solaren- und des Sensor Azimuts in einer horizontalen Bildebene und für einen Punkt auf der Erdoberfläche (CHAMBERS 2008). 75

Abbildung 7.4: Gegenüberstellung der mittleren Abweichung der Schneelinie zwischen MODIS- und ASTER-Klassifikationen und der Gletscherbreite. Es sind die unterschiedlichen Skalierungen der Achsen zu beachten. Die Werte stehen in Tabelle 7.5 79

Abbildung 7.5: Gegenüberstellung der mittleren Abweichung der Schneelinie zwischen MODIS- und SAR-Klassifikationen und der Gletscherbreite. Es

sind die unterschiedlichen Skalierungen der Achsen zu beachten. Werte in Tabelle 7.5. 79

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1: Die 36 MODIS-Bänder, ihr bevorzugter Anwendungsbereich, Bandbreite, spektrale Strahlung und Signal-to-noise ratio. [1] Bänder 1-19 sind in nm angegeben; Bänder 20-36 sind in µm angegeben, [2] Spectral Radiance Werte sind in (W/m2 -µm-sr), [3] SNR=Signal-to-noise ratio, [4] NE(delta)T=Noise-equivalent temperature difference (URL7). 26

Tabelle 4.1: Beispielhafte Erhebungswinkel für Terra und Aqua zur Mittagszeit aus dem „Satellite Overpass Predictor“, NASA (URL 13). 31

Tabelle 4.2: MODIS-Daten und Zeitpunkte, die für die Entwicklung der Prozessierungskette und ihrer Überprüfung verwendet wurden. Für jeden Aufnahmezeitpunkt wurde ein Set aus MOD021KM, MOD03 und MOD35L2 benutzt. 32

Tabelle 4.3: Auflistung der Scientific Data Sets (SDS) des MOD02-Produkts. „RefSB“ steht für reflektierte solare Bänder, „Emissive“ steht für die Bänder mit thermaler Ausstrahlung und nscans für number of scans (nach TOLLER ET AL. 2006, S. 20). 34

Tabelle 4.4: Ungefähre Dateigröße von Level1B Earth View Produkten aus 203 Scans (TOLLER ET AL. 2006, S. 22). 35

Tabelle 4.5: Belegung der einzelnen Bits des 48 Bit (6 Byte) großen Wolkenmasken-SDS. Das erste (Nummerierung beginnt bei 0) ist das für diese Arbeit relevante Byte. Bit 2 und 3 liefern die Bewölkungsklassen. (URL 3). 36

Tabelle 5.1: Beispiel der Ratiobildung zur Behebung von topographischen Einflüssen auf die Reflektanz am Beispiel von Laub- und Nadelwald; nach LILLESAND & KIEFER (2004, S. 532). 44

Tabelle 5.2: Belegung der einzelnen Bits des für die Anwendung der Wolkenmaske in dieser Arbeit relevanten Bytes (URL 3). 47

Tabelle 7.1: Anteile übereinstimmender und abweichender Höhenlagen der Schneelinie und mittlere Höhendifferenz für die Beobachtung von zwei MODIS-Aufnahmen an einem Tag. 73

Tabelle 7.2: Wetterbeobachtungen an den Stationen Esperanza (Es), Palmer (Pa), Rothera (Ro) nach CONNOLLEY (2004). 74

Tabelle 7.3: Mittlere Abweichung zwischen den Winkeln der Aufnahmegeometrie zweier MODIS-Szenen an einem Tag. 76

Tabelle 7.4: Durchgeführte statistische Tests, Signifikanzwert und die daraus resultierende Aussage zur Signifikanz der Unterschiede zwischen MODIS und ASTER/ SAR Analysen. SP steht für Stichprobe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde mit 0,05 festgelegt. 77

Tabelle 7.5: MODIS-, ASTER- und SAR-Höhen der Schneelinie (SL) und Trockenschneelinie (TSL) an Vergleichsterminen und deren Abweichungen mit Bezug auf die Gletscherbreite (schmalste Gletscher pro Analyse und stärkste Abweichungen sind grau hinterlegt. Bei positiven Werten liegt die MODIS-Grenze höher, bei negativen tiefer). 78

Tabelle 7.6: Durchschnittlicher Zeitbedarf zur Prozessierung MODIS-Szene (bei den oben genannten Systemvoraussetzungen) im Vergleich zu ASTER und Landsat TM/ETM+ (nach ARIGONY NETO, S. 96). 81

Tabelle A.0.1: Zur Konzeption der Prozessierungskette und deren Überprüfung verwendete Zeitpunkte des MOD02-Produkts (URL 4). 93

Tabelle A.0.2: Verwendete Zeitpunkte des MOD03-Produkts (URL 4). 93

Tabelle A.0.3: Verwendete Zeitpunkte des MOD35_L2-Produkts (URL 4). 94

Tabelle A.0.4: Verwendete Zeitpunkte der MODIS-Daten und Anzahl der darin enthaltenen und letztlich prozessierten Gletscher auf der AH. Anzahl korrigierter Werte für Schneelinie (SL) und Trockenschneelinie (DSL) und Bewölkungsanteil der Gletscher. 95

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADD	Antarctic Digital Database
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
AMSR/E	Advanced Microwave Scanning Radiometer- EOS
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
AntPenDB	Antarctic Peninsula glacier database
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BIP	band interleaved by pixel
CERES	Clouds and the Earth´s Radiant Energy System
CLI	Command Line Interface
DAAC	Distributed Active Archive Center
Envisat	Environmental Satellite
EOS	Earth Observing System
ERS-1/2	European Remote Sensing Satellite (1/ 2)
ESE	Earth Science Enterprise
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EV	Earth View
GCP	Ground Control Point
GLIMS	Global Land Ice Measurements from Space
GTK	GIMP Toolkit
GUI	Graphical User Interface
HDF	Hierarchical Data Format
HDR	Header Dateiformat
HDRF	Hemispherical- Directional Reflectance Factor
HSB	Humidity Sounder for Brazil
ID	Identifier
L0	Level 0
L1B	Level 1B

L2	Level 2
L2G	Level 2 Gridded
Landsat	Land Remote Sensing Satellite
LIMA	Landsat Image Mosaic of Antarctica
MAS	MODIS Airborne Simulator
MBZ	MODIS Blankeiszone
MISR	Multi- Angle Imaging Spectro- Radiometer
MNZ	MODIS Nassschneezone
MOD021KM	MODIS 02 Produkt in 1km Auflösung
MOD02HKM	MODIS 02 Produkt in 500 m Auflösung
MOD02QKM	MODIS 02 Produkt in 250 m Auflösung
MOD03	MODIS Geolocation Dataset
MOD35L2	MODIS Cloud Mask, Level2
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectro- Radiometer
MOPITT	Measuremenst fo Pollution in the Troposphere
MTZ	MODIS Trockenschneezone
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP/ NCAR	National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
Nscans	number of scans
PC	Personal Computer
PHP	rekursives Akronym für PHP: Hypertext Preprocessor
QuickSCAT	Quick Scatterometer
RAMP DHM	Radarsat Antarctic Mapping Project, Digitales Höhenmodell
RC	Regional Center
SAR	Synthetic Aperture Radar
SDS	Science Data Set
SGP CART	Southern Great Plains Cloud and Radiation Testbed
SML	Spatial Modeler Language
SMMR	Scanning Multichannel Microwave Radiometer
SQL	Structured Query Language

SSM/I	Special Sensor Microwave Imager
TIFF	Tagged Image File Format
TM	Thematic Mapper
URL	Uniform Resource Locator
USGS	United States Geological Survey
UTC	Universal Time Coordinated (Koordinierte Weltzeit)
V005	Version 5
WIST	Warehouse Inventory Search Tool
WMO	World Meteorological Organisation
WRS	World Reference System

SYMBOLE

ρ	bidirektionaler Reflektanzfaktor der Erde
$\cos(\theta)$	Sonneneinfallswinkel
$\rho_{EV} \cos(\theta_{EV})$	Earth View reflectance factor

1 EINLEITUNG

Die Polargebiete haben eine große Bedeutung für das globale Klima. Sie weisen einen stark negativen Strahlungshaushalt auf und bilden dadurch die großen Energiesenken der Erdoberfläche und des Klimasystems. Dieses Defizit wird durch Kreisläufe in den Ozeanen und der Atmosphäre und den damit verbundenen Energietransfer aus den niedrigen Breiten, ausgeglichen (RAU 2004, S. 1) und hat so eine abkühlende Wirkung auf das globale Klima. Die Antarktische Halbinsel (AH) liegt durch ihre große meridionale Ausdehnung teilweise in einer temperierten Klimazone, in der Temperaturen um den Gefrierpunkt herum vorkommen können. Veränderungen in der Mitteltemperatur sowie in der Andauer unterschiedlicher thermischer Phasen zeigen in solchen Gebieten den größten Effekt (RAU 2004, S. 1). Zum anderen liegt die AH im Übergangsbereich zwischen marinen und terrestrischen Geosystemen und steht unter Einfluss verschiedener atmosphärischer Zirkulationsmuster.

Über die letzten 100 Jahre (1906-2005) fand ein globaler Anstieg der bodennahen Lufttemperatur mit mittleren Werten von 0,76 °C statt (TRENBERTH ET AL. 2007, S. 252). Auf der AH lag diese Erwärmung mit 3,5 ± 1,0 °C im Verlauf des 20. Jahrhunderts (MORRIS & VAUGHAN 2003, S. 68) deutlich über dem globalen Durchschnitt. Dabei zeigen die letzten 50 Jahre den stärksten Temperaturanstieg (VAUGHAN ET AL. 2003, S. 243).

Diese klimatische Veränderung hatte drastische Auswirkungen auf die glazialen Systeme der AH (ARIGONY NETO ET AL. 2007, S. 55). Es kam im Zuge des Temperaturanstiegs zum Zerfall von Schelfeisen (DOAKE UND VAUGHAN 1991; LUCCHITTA & ROSANOVA 1998; SKVARCA ET AL. 1999; SCAMBOS ET AL. 2003; RACK & ROTT 2004), einem Rückzug der Gletscher (BRAUN & GOSSMANN 2002; SKVARCA & DE ANGELIS 2003; RAU ET AL. 2004; COOK ET AL. 2005), einer Aufwärtsverlagerung der Trockenschneelinie (RAU 2003) einhergehend mit einer Verlängerung der Schmelzperiode (TORINESI ET AL. 2003; VAUGHAN 2006), dem Rückgang von Meereisbedeckung (PARKINSON 2002; ZWALLY ET AL. 2002) und gleichzeitig der Zunahme von Niederschlagsereignissen (THOMPSON ET AL. 1994; TURNER ET AL. 1997; BRAUN 2001). In all diesen Auswirkungen drückt sich der enge Zusammenhang zwischen dem vorherrschenden Klima und den glazialen Systemen der AH aus. Oberflächliche Gletscherzonen, die demnach stark vom lokalen und regionalen Klimageschehen beeinflusst werden, können durch die Beobachtung ihrer Grenzen als gute Indikatoren für klimatische Veränderungen dienen (ARIGONY NETO ET AL. 2007, S. 55).

Die meiste Forschungsarbeit im Bezug auf die glazialen Systeme der AH wurde bisher in den Randbereichen durchgeführt (RAU 2004 S. 2), die Information aus dem Hinterland der AH ist noch lückenhaft und besteht nur aus vereinzelten Messungen, da es immer noch kompliziert und mit großem logistischen Aufwand verbunden ist in die

höher gelegenen Gebiete der AH vorzudringen (ARIGONY NETO 2006, S. 5). Aus diesem Grunde und um zeitlich fortlaufende Informationen über die glazialen Systeme der AH zu bekommen, hat ARIGONY NETO (2006) eine halbautomatische Prozessierungskette für optische- (Landsat TM/ ETM+, ASTER) und für Radardaten (SAR, ASAR) entwickelt, mit welcher es möglich ist, über die Ermittlung der Grenzen zwischen oberflächlichen Gletscherzonen (Gletscherfont, Schneelinie und Trockenschneelinie) Veränderungen in den glazialen Systemen für die komplette AH aufzuzeichnen und zu beobachten.

Die vorliegende Arbeit wird nun an das Prozessierungsschema für optische Daten anknüpfen und dem Vorschlag von ARIGONY NETO (2006, S. 114) nachgehen, die bestehende Methodik auch auf zeitlich höher auflösende Satellitensensoren anzuwenden. Die Vorgehensweise ARIGONY NETOS (2006) wird auf Daten des MODIS-Sensors angewandt werden, der die gesamte Erdoberfläche regelmäßig in einem Abstand von 1-2 Tagen abbildet (Kapitel 3.3.2). Damit wird ein Beitrag dahingehend geleistet, zukünftig die lückenlose Verfügbarkeit von Gletscherdaten zu ermöglichen. Durch die Automatisierung des Arbeitsablaufs wird es möglich sein, die große Vielfalt an Daten, die der MODIS-Sensor täglich liefert, zeitlich ökonomisch zu verarbeiten und so die Ermittlung von Gletscherparametern über längere Zeiträume zu vereinfachen.

1.1 Ziele der Magisterarbeit

Der Grundgedanke dieser Arbeit ist, die von ARIGONY NETO (2006, S. 42 ff) entwickelte Methodik zur Verarbeitung von optischen Daten (ASTER, Landsat TM/ETM+) und Radardaten (SAR, ASAR) zur Ermittlung von Gletscherparametern auf Daten des Moderate Resolution Imaging Spectro- Radiometer (MODIS) anzuwenden. Die Vorgehensweise bei der Prozessierung wird somit an die Erfordernisse des MODIS-Sensors angepasst.

Inhalt der vorliegenden Arbeit wird demnach sein,

> eine **Prozessierungskette**, d.h. ein Verarbeitungsschema, für Daten des MODIS-Sensors unter Verwendung des „Centerline-Ansatzes“ (SAURER & GOSSMANN 2002; ARIGONY NETO ET AL. 2006, ARIGONY NETO 2006) zu entwickeln,

> diese durch Erstellung der nötigen Computerroutinen in die Anwendung **„IceTools“** (ARIGONY NETO 2006, S. 44) zu integrieren und

> eine **Evaluation der Ergebnisse** durchzuführen.

1.2 Aufbau der Magisterarbeit

Die Arbeit ist in sechs größere Teile gegliedert. Kapitel 2 stellt das Untersuchungsgebiet, die Antarktische Halbinsel, vor und beschreibt, in welcher Form sich dort ein klimatischer Wandel bemerkbar macht. In Kapitel 3 werden die relevanten theoretischen Grundlagen vorgestellt, auf die sich die Arbeit im späteren Verlauf stützt. Hier wird das zugrunde gelegte glaziologische Konzept der Gletscherzonen erläutert, und es wird das Aufnahmesystem MODIS mit seinen Eigenschaften beschrieben. Ein Überblick über das verwendete Datenmaterial, welches für die Konzeption der Prozessierungskette zum Einsatz kommt und für die Durchführung der MODIS-Prozessierung benötigt wird, ist in Kapitel 4 gegeben. Kapitel 5 liefert die methodischen Vorgehensweisen und Konzepte, welche die Klassifikation, einen zentralen Teil der Prozessierungskette, der MODIS-Bilder ermöglichen. Daran schließt sich die Beschreibung der technischen Umsetzung der gesamten Prozessierungskette und ihre Implementierung in IceTools1.1 an (Kapitel 6). In Kapitel 7 wird die Evaluation der gewonnenen Ergebnisse vorgenommen und die Güte des MODIS-Algorithmus bewertet.

2 UNTERSUCHUNGSGEBIET ANTARKTISCHE HALBINSEL

Die Fläche des antarktischen Kontinents umfasst 14 * 10^6 km² und ist zu 98% von Eis bedeckt. Die saisonale Meereisbedeckung um die Antarktis beträgt im Durchschnitt etwa 17 * 10^6 km². Bezogen auf die gesamten antarktischen Eismassen macht das Meereis jedoch nur einen kleinen Teil aus; die größten Anteile der Eismassen befinden sich auf dem Festland und weisen auf dem ostantarktischen Eisschild bis zu 3000 m Mächtigkeit auf (WUNDERLE 1996, S. 1). Was die globale Verteilung der Eismassen angeht, macht das Eis der Antarktis etwa 90%, das grönländische Eisschild etwa 10% und alle übrigen Gletscher weniger als 1% aus (LORIUS & GENDRIN 2000, S. 57).

Die AH bildet einen Ausläufer des antarktischen Kontinents in Richtung der Südspitze Südamerikas, der sich zwischen 73° und 63° südlicher Breite, einer Länge von etwa 1000 km entsprechend, erstreckt (RAU 2004, S. 5). Westlich der AH erstreckt sich die Bellingshausensee, östlich das Weddellmeer. Die Eisbedeckung der AH hat am gesamten Eisvolumen der Antarktis nur einen Anteil von 0,7%. Dadurch, dass die Gletscher der AH relativ gering mächtig sind und die Lufttemperatur in den wärmsten Monaten knapp an die 0°C herankommt, ist ihre Sensibilität für geringe klimatische Veränderungen sehr hoch (WUNDERLE 1996, S. 2; RAU 2004, S.1). Die AH stellt durch ihre periphere Lage am Rande des antarktischen Kontinents eine Übergangszone zwischen verschiedenen Klimaten dar. Im Norden herrscht temperiertes, im Süden polar beeinflusstes Klima. Der Westen weist polar- maritimes Klima auf und hat eine um 5 K höhere Jahresmitteltemperatur als der Osten, der sich durch polares Kontinentalklima vom Westen unterscheidet. Westen und Osten weisen auch sehr unterschiedliche Hauptwindrichtungen von 220° (W) und 70° (O), gemessen bei 65°S auf (WUNDERLE 1996, S. 4). Daraus wird deutlich, welch große Barrierewirkung die AH auf troposphärische Zirkulationsmuster hat (WUNDERLE 1996, S. 4; BRAUN & GOSSMANN 2002, S. 75). Die starken klimatischen Gradienten auf der AH unterstreichen ihre hohe Sensibilität auf Veränderungen im Klimasystem (RAU ET AL. 2002, S. 27). Nur eine geringe Verschiebung dieser meridional und zonal starken Temperaturgradienten kann gravierende Änderungen der Lufttemperaturen zur Folge haben (WUNDERLE 1996, S. 2).

Routinemessungen der oberflächennahen meteorologischen Parameter finden auf der AH seit Mitte der 1940er Jahre an vielen bemannten sowie unbemannten Wetterstationen statt. Die verlässlichste 50 jahrige Temperaturzeitreihe stammt von der Station Faraday/Vernadsky (61°15’ S, 64°15’ W) an der Westseite der Halbinsel (MARSHALL ET AL. 2002, S. 291).

2.1 Anzeichen des Klimawandels auf der antarktischen Halbinsel

Das fragile klimatische Gefüge der AH unterliegt rezenten Veränderungen. Neuere Studien belegen ein sich veränderndes Klima (MARSHALL ET AL. 2002, S. 303 ff; VAUGHAN ET AL. 2003, S. 247 ff). Dafür spricht eine Reihe von Beobachtungen aus den letzten Jahrzehnten zu Vorgängen auf der AH, die eindeutig dem klimatischen Wandel zugeschrieben werden können. Sie werden im Folgenden beschrieben und sind in Abbildung 2.1 in ihrem räumlichen Auftreten dargestellt. Damit sollen die aktuellen Erkenntnisse der Betroffenheit der AH durch den Klimawandel verdeutlicht werden.

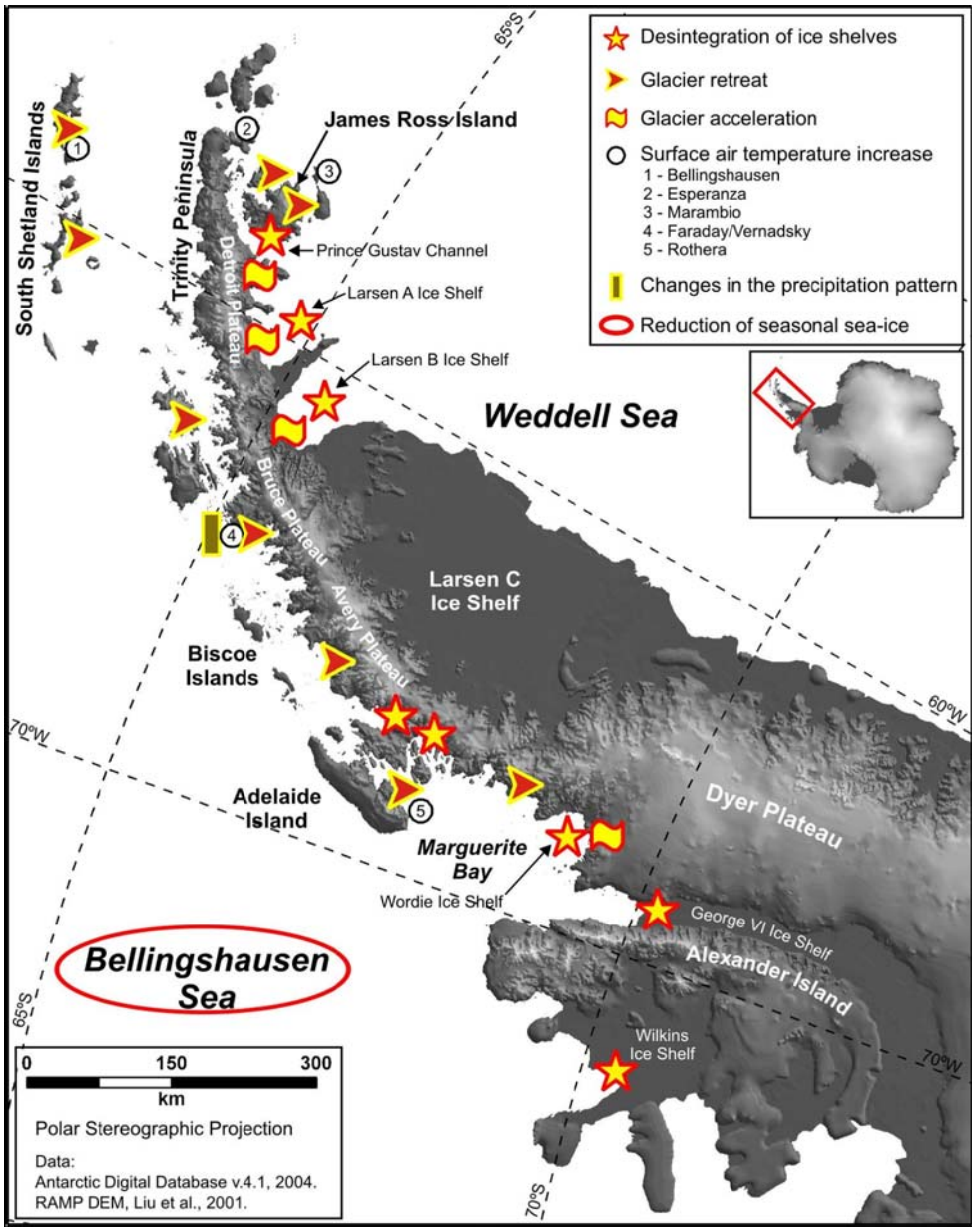


Abbildung 2.1: *Räumliche Verortung der Anzeichen für den Klimawandel auf der Antarktischen Halbinsel (ARIGONY NETO 2006, S. 2).*

2.1.1 Signifikante Trends der Lufttemperatur

Positive Trends der Lufttemperatur wurden von mehreren Autoren ermittelt. So hat KING (1994) durch die Analyse des monatlichen Mittels der Lufttemperatur und Aufzeichnungen des Luftdrucks auf Meereshöhe von 1957 bis 1994 an den Stationen, Rothera Point, Faraday/Vernadsky und Bellingshausen einen signifikanten Erwärmungstrend von 0,038-0,067 °C pro Jahr für die AH festgestellt (KING 1994, S. 360). Für die Station Faraday/Vernadsky wird für die Periode 1956-1999 eine mittlere jährliche troposphärische Erwärmung (bei 850-300 hPa) von 0,027 ± 0,022 °C pro Jahr berichtet, die auf der Grundlage der Kombination von Radiosondenmessungen und NCEP-NCAR Reanalysedaten ermittelt wurde (MARSHALL ET AL. 2002, S. 291). Durch den Aufbau einer Datenbank aus 534 Werten des Jahresmittels der Lufttemperatur, die aus der Schneetemperatur in 10 m Tiefe und der Lufttemperatur an meteorologischen Stationen gewonnen wurden, rekonstruierten MORRIS & VAUGHAN (2003, S. 68) einen positiven Temperaturtrend von 3,5 ± 1,0 °C für die letzten hundert Jahre.

2.1.2 Veränderte Niederschlagsmuster

Die Niederschlagsaufzeichnungen der Station Faraday/Vernadsky zeigen eine Zunahme der Niederschlagsereignisse von 37% in der Zeit von 1965-1993 (TURNER ET AL. 1997, S. 14,006). Eine Untersuchung von Eisbohrkernen aus geringer Tiefe von PEEL (1992, S. 11) weist einen Anstieg der Akkumulationsraten in den letzten Jahrzehnten nach. Die Rekonstruktion der Dicke von Eisschichten lässt jedoch schon seit Anfang des 19. Jahrhunderts einen Anstieg der Akkumulation erkennen (THOMPSON ET AL. 1994, S.420). In der Periode von 1956-1993 wurden ebenfalls die positiven Temperaturtrends beobachtet. Da jedoch nur ein sehr geringer Zusammenhang zwischen der Jahresschwankung des Niederschlags und der Lufttemperatur besteht, muss die Veränderung der Niederschlagsmuster aus anderen Quellen stammen (BRAUN 2001, S. 16). TURNER ET AL. (1997, S. 14,006) führen als möglichen Grund für den Niederschlagsanstieg eine beobachtete verstärkte zyklonale Aktivität über der AH an.

2.1.3 Rückgang der Meereisbedeckung

Zur Aufzeichnung der Dauer der Meereissaison im Zeitraum von 1979-1999 verwendete PARKINSON (2002, S. 439) Satellitendaten von passiven Mikrowellensensoren und eine für diese Sensoren entwickelte Methodik von CAVALIERI ET AL. (1999) und GLOERSEN ET AL. (1992). Die resultierende Erkenntnis war, dass eine Verkürzung der Meereissaison für beinahe den gesamten Bereich der Bellingshausensee zu verzeichnen ist. Auf der Ostseite der AH, im Weddelmeer wurde dagegen eine verlängerte Meereissaison beobachtet. Der Trend für die Meereisverbreitung wurde von ZWALLY ET AL. (2002, S. 16) für den Bereich der Bellingshausensee auf -9,7 ± 1,5% pro Dekade und für das Weddelmeer mit 1,4 ± 0,9% pro Dekade geschätzt.

2.1.4 Zerfall von Schelfeis und Gletscherrückzug

Das wohl prominenteste Anzeichen des Klimawandels, über das sogar in der öffentlichen Presse zu lesen war, ist der sukzessive Zerfall der Eisschelfe der AH. Ende der 1980er Jahre kam es zur ersten Eisschelfauflösung am Wordie Eisschelf (DOAKE & VAUGHAN 1991, S. 328), und wenig später wurde der beginnende Rückzug des George VI- und Wilkins-Eisschelfs registriert (LUCCHITTA & ROSANOVA 1998, S. 45). Auf der Ostseite setzte sich der Zerfall der Eisschelfe mit dem Prinz Gustav- und Larsen A-Eisschelf 1995 fort (ROTT ET AL. 1996, S. 788 f). Das Larsen B-Eisschelf war zu diesem Zeitpunkt bereits in Auflösung begriffen (SKVARCA ET AL. 1999, S. 259) und zerbrach 2002 vollständig (RACK & ROTT 2004, S. 509 f). Die Auflösung der Eisschelfe wird als Effekt des Lufttemperaturanstiegs gesehen, da dieser eine fortschreitende Abnahme der Mächtigkeit der Schelfeise bedingte (SKVARCA ET AL. 2004, S. 213), sich auf der Eisoberfläche Schmelzseen bildeten (SCAMBOS ET AL. 2003, S. 80 ff) und die Dauer der Schmelzperiode anstieg (FAHNENSTOCK ET AL. 2002, S. 132). MORRIS & VAUGHAN (2003, S. 61) legten als neue Verbreitungsgrenze der Eisschelfe die -9°C Isotherme der Jahresdurchschnittstemperatur fest, die vorher bei -5°C lag.

Auf dem Festland findet ebenfalls ein Rückzug der Eismassen statt. Der allgemeine Gletscherrückzug wird von RAU ET AL. (2004, S. 527 ff) und COOK ET AL. (2005, S. 541 ff) auf der AH, auf James Ross Island von SKVARCA & DE ANGELIS (2003, S. 72) und auf den Südshetlandinseln von BRAUN & GOSSMANN (2002, S. 78 ff) beschrieben. COOK ET AL. (2005, S. 541) und VAUGHAN ET AL. (2003, S. 255 f) bringen den Gletscherrückzug mit dem Erwärmungstrend in Zusammenhang. Es ist jedoch aufgrund von verschiedenen anderen Einflüssen auf die Gletscher, wie Meeresströmungen und Meerestemperatur, nicht möglich einen eindeutigen Einfluss der Lufttemperatur auf den Gletscherrückgang auszumachen (RAU ET AL. 2004, S. 529).

2.1.5 Anstieg der Trockenschneelinie

RAU (2003, S. 113 ff) untersuchte mit Hilfe von Daten des ERS-1/2 Synthetic Aperture Radar (SAR) die Lage der Trockenschneelinie, die als Zeiger für extreme Schmelzereignisse dienen kann. Es wurde eine allgemeine Aufwärtsverlagerung der Trockenschneelinie auf dem Avery Plateau detektiert und als Auswirkung von starken Wärmeereignissen im Untersuchungszeitraum (1991-2000) interpretiert.

2.1.6 Positiver Trend in der Dauer von Schmelzbedingungen

Auf der AH wurde eine zunehmende Dauer der Schmelzperiode festgestellt. Zum einen wurde die Dauer der Schneeschmelze im Zeitraum von 1980-1999 von TORINESI ET AL. (2003, S. 1047 ff) untersucht. Anhand von Satellitendaten passiver Mikrowellensensoren, des Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) und des Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) ermittelten sie einen leichten Anstieg der mittleren Dauer der Schmelzperiode für die AH bei starker Variabilität. Für die

restlichen, kontinentalen Bereiche der Antarktis wurde im Beobachtungszeitraum ein rückläufiger Trend der kumulierten Schmelzoberfläche von 1,8% ± 1% pro Jahr und ein Rückgang der von Schmelzprozessen betroffenen Fläche beobachtet. Ein anderer Ansatz zur Abschätzung des Potentials für die Schneeschmelze wurde von VAUGHAN (2006, S. 147 ff) anhand der Anzahl positiver Gradtage verfolgt und ergab für den Zeitraum 1950-2000 einen signifikanten Anstieg dieser um 75% für die Station Faraday/Vernadsky. Die Zunahme der Schmelzrate innerhalb des Beobachtungszeitraums wird mit etwa 26 Gt/a angegeben.

Aus den bisherigen Forschungen zeichnet sich der Konsens ab, dass die glaziologischen Veränderungen auf der AH mit klimatischen Veränderungen in Zusammenhang stehen (VAUHGAN 2006; VAUGHAN ET AL. 2003; TORINESI ET AL. 2003; MARSHALL ET AL. 2002; SKVARCA UND DE ANGELIS 2003; SCAMBOS ET AL. 2003). Die glazialen Systeme verändern sich zudem innerhalb kurzer zeitlicher Maßstäbe (RIGNOT & THOMAS 2002, S. 1505). Die systematischen Beobachtungen auf der AH sind jedoch noch sehr lückenhaft, und dies erschwert die Modellierung von zukünftigen Reaktionen der Gletschersysteme auf Klimaänderungen (ALLEY ET AL. 2005, S. 457 f). Dies liegt unter anderem an der Unzugänglichkeit der hochgelegenen Bereiche der AH und daran, dass dort nur punktuelle Messungen unternommen wurden. Diese Tatsache legt die Ermittlung von für den Klimawandel relevanten Gletscherparametern mit Fernerkundungsmethoden nahe.

2.2 Zusammenfassung

Dieses Kapitel stellt den Untersuchungsraum Antarktische Halbinsel vor, für deren Kontext die vorliegende Prozessierungskette für MODIS-Daten, erarbeitet wurde. Konkrete Beispiele zeigen, wie sich der Klimawandel auf der AH bemerkbar macht. Ein signifikanter positiver Trend der Lufttemperatur auf der AH, längere Schmelzperioden, Aufwärtsverlagerung der Trockenschneelinie, Zerfall von Schelfeisen, Gletscherrückzug und ein Zunahme der Niederschlagsereignisse wurden nachgewiesen. Die Auswirkungen des Klimawandels sind auf der AH in drastischer Form zu beobachten.

3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden das glaziologische Konzept der Gletscherzonierung, das die Grundlage für die automatisierte Gewinnung von Gletscherparametern bietet, sowie die aufgezeichneten Parameter selbst vorgestellt. Darüber hinaus gibt es einen Überblick über den zur Erfassung der Parameter verwendeten Satellitensensor MODIS und seine Eigenschaften.

3.1 Definition der klassischen Gletscherzonen

In dieser Arbeit wird das Konzept der Gletscherzonen, das von BENSON (1960) und MÜLLER (1962) erstmals auf den Plan gebracht und von PATERSON (1994) weiterentwickelt wurde, zur Ableitung von oberflächlichen Gletscherfazies durch optische Satellitendaten nach ARIGONY NETO (2006) verwendet. Es ist in Abbildung 3.1 dargstellt.

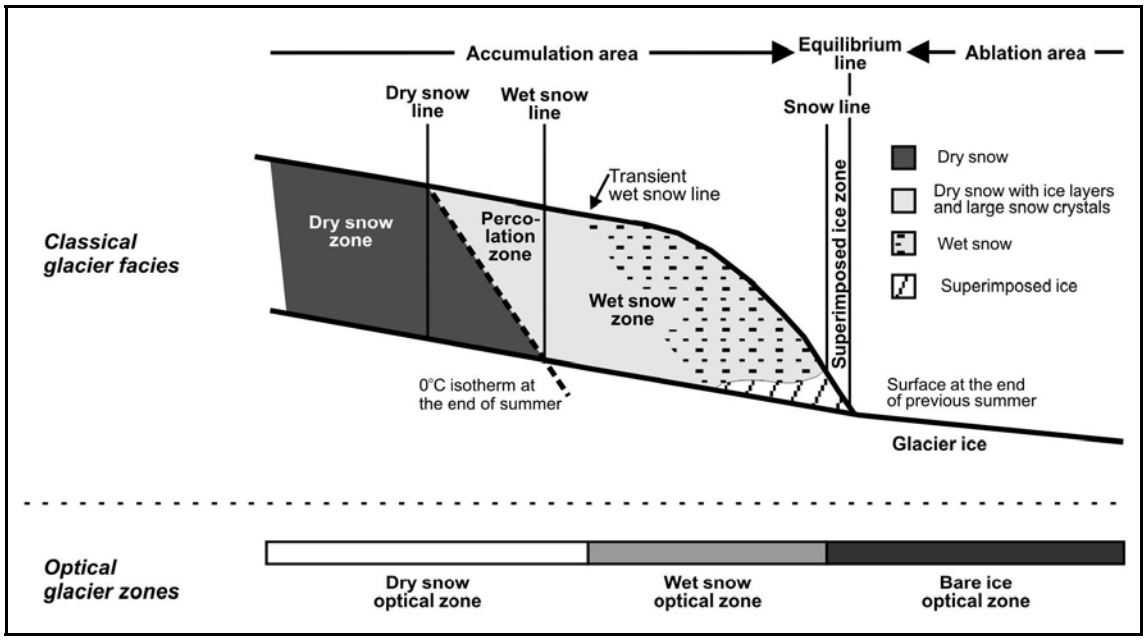


Abbildung 3.1: *Klassische Gletscherzonen und mit Fernerkundungsverfahren oberflächlich detektierte optische Gletscherzonen. Verändert nach ARIGONY NETO (2006, S. 9)*

PATERSON (1994) teilt, beginnend am höchsten Punkt, Gletscher in fünf Zonen, (1) Trockenschneezone, (2) Perkolationszone, (3) Nassschneezone, (4) überlagerte Eiszone („superimposed- ice zone“) und (5) Ablationsbereich, ein.

3.1.1 Trockenschneezone

In dieser Zone des Gletschers liegen die Temperaturen in der Schneedecke ganzjährig unter 0°C. Auch im Sommer finden keine Schmelzprozesse statt (PATERSON 1994, S. 10). Aufgrund der fehlenden Schmelzprozesse tritt hier überwiegend Trockenschneemetamorphose auf (RAU ET AL. 2001, S. 320). Sie beruht auf mechanischer Verdichtung der Schneekristalle unter ihrem eigenen Gewicht und der Deformation und Kompaktierung durch Windverlagerung (PATERSON 1994, S. 15 ff). Die Trockenschneezone ist charakterisiert durch kleine Schneekorngrößen (RAU ET AL. 2001, S. 320). Das Auftreten der Trockenschneezone beschränkt sich überwiegend auf die zentralen Gebiete des grönländischen- und weite Teile des antarktischen Eisschilds, kann jedoch auch auf hoch gelegenen Gletschern vorkommen, bei denen die Jahresdurchschnittstemperatur unter einem Schwellenwert von etwa -11°C liegt (REES 2006, S. 127). Die untere Grenze zur Perkolationszone bildet die Trockenschneelinie.

3.1.2 Perkolationszone

In der Perkolationszone kommen in gewissem Maße Schmelzprozesse während des Sommers vor. Das Schmelzwasser sickert in die Schneedecke ein und gefriert erneut, wobei es sich lateral an Sperrschichten ausbreiten und eisige Schichten, Linsen oder Röhren formen kann (PATERSON 1994, S. 10; REES 2006, S. 130). Die Schneedecke ist hier durch große Korngrößen gekennzeichnet, die durch die Metamorphose aufgrund zyklischen Tauens und Wiedergefrierens entstehen (COLBECK 1982, S. 56). Die untere Grenze der Perkolationszone ist die Nassschneelinie (PATERSON 1994, S. 11).

3.1.3 Nassschneezone

Der gesamte in der Nassschneezone seit dem Ende des vorangegangenen Sommers abgelagerte Schnee wird im Verlauf eines Sommers auf 0°C erwärmt. Teile des Schmelzwassers können in tiefere Schichten aus vorangegangenen Jahren vordringen (PATERSON 1994, S. 11). Das untere Ende der Nassschneezone markiert die Schneelinie, auch Firnlinie genannt.

3.1.4 Überlagerte Eiszone

In dieser Zone, von Paterson als „superimposed-ice zone“ bezeichnet (PATERSON 1994, S. 11), sind die oberflächlichen Schmelzprozesse so intensiv, dass sich aus gefrorenem Schmelzwasser ein massiver Eiskörper bildet (REES 2006, S. 130). Dieser Eiskörper setzt sich Gletscher aufwärts unter dem Nassschnee fort; es wird jedoch nur der äußerlich sichtbare Anteil der überlagerten Eiszone zugeordnet (PATERSON 1994, S. 11), wie aus Abbildung 3.1 ersichtlich ist. Als Untergrenze wird die Gleichgewichtslinie angegeben. Sie trennt das Akkumulationsgebiet, in welchem ein jährlicher netto Massenzuwachs des Gletschers stattfindet, vom Ablationsgebiet, das durch Nettoverlust an Masse gekennzeichnet ist (PATERSON 1994, S. 11).

3.1.5 Ablationszone

Das gesamte Gebiet unterhalb der Gleichgewichtslinie wird als Ablationszone bezeichnet (PATERSON 1994, S. 11). Obwohl hier ein Nettomassenverlust stattfindet, können trotzdem noch vereinzelt kleine Flecken von Firn oder Schnee vorkommen (ARIGONY NETO 2006, S. 11).

3.2 Grenzen zwischen den Gletscherzonen als Indikatoren für klimatische Veränderungen

Die Verbreitung der verschiedenen Zonen auf Gletschern (Eis- und Schneezonen), beruhend auf der Einteilung von PATERSON (1994, S. 9 ff) und WILLIAMS ET AL. (1991, S. 120 ff), steht wie die oben genannten glazialen Parameter in Zusammenhang mit den vorherrschenden klimatischen Bedingungen. Ihre flächenmäßigen Veränderungen und die Lage der Grenzen zwischen den Fazies (z.B. Schneelinie und Trockenschneelinie) werden als sensible Indikatoren des Klimawandels angesehen (RAU ET AL. 2001, S. 319).

(1) Die **Schneelinie** ist ein Indikator für das aktuelle Ausmaß von Ablations- und Akkumulationsgebiet (ARIGONY NETO 2006, S. 12). Die Schneelinie kann nach WILLIAMS ET AL. (1991, S. 122) und RAU ET AL. (2001, S. 326) auch als Proxy für die Gleichgewichtslinie betrachtet werden. Ihre Aufwärts- oder Abwärtsverlagerung gibt eine Aussage über negative oder positive Massenbilanz eines Gletschers.

(2) Die **dynamische Nassschneelinie** (transient wet snow line) kann ein Indikator für die 0°C-Isotherme auf einem Gletscher sein (WILLIAMS ET AL. 1991, S. 127).

(3) Über die **Trockenschneelinie** manifestieren sich klimatische Veränderungen oder extreme Warmereignisse (RAU ET AL. 2001, S. 317). Verlagert sie sich nach unten, so sind erhöhte Akkumulationsraten anzunehmen (RAU & BRAUN, 2002, S. 3).

Die Möglichkeit, die Grenzen zwischen den Gletscherzonen für Aussagen über Veränderungen an den glazialen Systemen zu nutzen, ist für die Antarktische Halbinsel von großer Bedeutung, denn durch ihre Aufzeichnung können Massenbilanzberechnungen gemacht werden, die bisher nur auf wenigen, gut zugänglichen Gletschern vorgenommen wurden (ARIGONY NETO 2006, S. 12). Die in dieser Arbeit ermittelten Grenzen beschränken sich auf die Schneelinie und die optische Trockenschneelinie (Kapitel 5.3.4 und 5.3.5).

Darüber hinaus haben etliche Autoren die Nutzbarkeit von optischen Fernerkundungsdaten für die Erfassung der Gletscherfazies unter Beweis gestellt (HALL ET AL. 1987; WILLIAMS ET AL. 1991; BORESJÖ-BRONGE UND BRONGE 1999; KÖNIG ET AL. 2001; HEISKANEN ET AL. 2003).

Die Vielzahl an unterschiedlichen aktuellen und älteren Satellitensensoren hat mittlerweile ein großes Archiv an Daten für die AH geschaffen, und die Qualität der Daten verbessert sich kontinuierlich. Die Datengrundlage für lückenlose längerfristige

Beobachtungen glazialer Systeme ist also vorhanden. Die große Herausforderung besteht nun darin, die große Datenfülle zu verwerten, und dafür bieten halbautomatische Verfahren eine enorme Zeitersparnis (ARIGONY NETO 2006, S. 6). Für die Verringerung der Interaktion des Bearbeiters bei der Auswertung von Satellitendaten hat ARIGONY NETO (2006) durch die Implementierung von Computerroutinen in einer Anwendung, genannt „IceTools“ (ARIGONY NETO 2006, S. 44 ff), ein Hilfsmittel entwickelt, das die Prozessierung der Daten zur Gewinnung von Gletscherparametern sehr vereinfacht.

3.3 Der MODIS-Sensor als Teil übergeordneter Forschungsprojekte

Bevor auf die Spezifikationen des MODIS-Sensors im Speziellen eingegangen wird, soll der weitere Forschungskontext, in den das MODIS-Projekt eingebunden ist, dargestellt werden. MODIS ist zusammen mit etlichen anderen Satellitensensoren ein Bestandteil des global agierenden Earth Observing System (EOS).

Das EOS wiederum ist ein Glied im übergeordneten, von der NASA initiierten Forschungskonzepts Earth Science Enterprise (ESE) (KING ET AL. 2003, S. 16f; LILLESAND & KIEFER 2004, S. 476). Dieses internationale Programm hat zum Ziel, die Datengrundlage und das Potential zur Modellierung und Bestimmung der anthropogenen Beeinflussung natürlicher Prozesse auf der Erde bereitzustellen und somit zu deren Verständnis beizutragen. Anfangs wurde spezielles Augenmerk auf den Klimawandel gelegt, mittlerweile geht es darum, den globalen Wandel im weiteren Kontext zu verstehen und zu dokumentieren. Messungen werden dafür vom Boden und von Satelliten aus durchgeführt (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 476).

3.3.1 Das Earth Observing System (EOS) und MODIS

Das EOS besteht aus einer Serie von Erdbeobachtungssatelliten, von denen die ersten Ende der 1990er Jahre in Betrieb genommen wurden (z.B. Landsat7, 1999). Die Beobachtungen zielen auf die globale Erfassung verschiedenster Teilbereiche auf der Erdoberfläche, in der Atmosphäre und den Ozeanen (KING ET AL. 2003, S. 16 f). Hier wird nur auf die beiden bedeutenden Satellitenplattformen Terra und Aqua eingegangen werden, da sie beide einen MODIS-Sensor an Bord haben.

Terra wird häufig als das „Flaggschiff“ (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 476) des EOS bezeichnet und wurde am 18. Dezember 1999 in seine Umlaufbahn gebracht. Die Aufgaben und Ziele der Mission sind (1) die Ermittlung globaler Daten hinsichtlich der biologischen Produktivität von Landoberfläche und Ozeanen, sowie die Erfassung von Schnee- und Eisbedeckung, Oberflächentemperatur, Wolken, Wasserdampf und Landbedeckung, (2) die Erkennung des menschlichen Einflusses auf Erde und Klima sowie Klimamodellierung, (3) die Entwicklung von Techniken zur Katastrophenvorhersage und ihrer Einstufung im Bezug auf Waldbrände, Vulkanausbrüche, Überschwemmungen und Dürren und (4) der Beginn eines

Langzeitmonitorings des Klimawandels sowie des globalen Wandels ganz allgemein (URL 11).

Aqua wurde am 4. Mai 2002 in seinen Orbit gebracht. Die Terra und Aqua Satelliten umkreisen die Erde in einem polnahen, sonnensynchronen Orbit in 705 km Höhe. Ihre Aufnahmesswaths sind jedoch zeitlich versetzt. Aqua bewegt sich auf der Tagseite der Erde in aufsteigender Richtung (ascending node) und überquert den Äquator nachmittags, um 13:30 Uhr lokaler Ortszeit. Der Terra Orbit ist auf der Tagseite absteigend (descending node) mit einer lokalen Äquatorübertrittszeit vormittags, um 10:30 Uhr.

Terra hat die fünf Instrumente,

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer),

CERES (Clouds and the Earth´s Radient Energy System),

MISR (Multi- Angle Imaging Spectro- Radiometer),

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro- Radiometer) und

MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere)

an Bord. Aqua trägt ebenso wie Terra

CERES (siehe oben) und

MODIS (siehe oben) und darüber hinaus noch

AMSR/E (Advanced Microwave Scanning Radiometer- EOS),

AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit),

AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) und

HSB (Humidity Sounder for Brazil).

3.3.2 Das Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

Der MODIS-Sensor ist ein zum Nadir ausgerichtetes Radiometer. Es zeichnet die von der Erde reflektierte oder emittierte Strahlung durch einen quer zur Flugrichtung rotierenden doppelseitigen Scan-Spiegel auf, der diese mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 20,3 rpm auf mehrere Detektorenfelder wirft (KING ET AL. 2003, S. 37). Eine Drehung des Scan-Spiegels deckt an der Erdoberfläche bei maximalen Aufnahmewinkeln von ± 55° ein Blickfeld (Swath) von 2330 km quer zur Flugrichtung (cross track) und 10 km in Flugrichtung ab (Abbildung 3.2). Die zeitliche Wiederholrate liegt bei einem bis zwei Tagen, so dass MODIS einen Punkt auf der Erde alle ein bis zwei Tage aufzeichnet. In Polnähe können auch mehrere MODIS-Aufnahmen an einem Tag möglich sein.

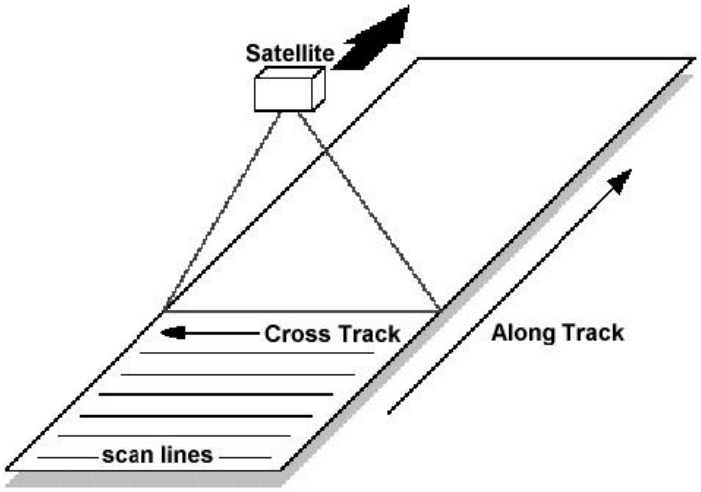


Abbildung 3.2: *Schematische Darstellung des MODIS-Aufnahmeswaths und der cross-track Scanzeilen (TOLLER ET AL. 2006, S. 9).*

Auf diese Weise nimmt MODIS 36 diskrete spektrale Bänder in einem Wellenlängenbereich von 0,4-14,5 µm auf (Tabelle 3.1). Zwei Bänder (Band 1 und 2) weisen eine räumliche Auflösung von 250 m im Nadir auf, fünf Bänder (Band 3-7) werden mit 500 m Nadir-Auflösung aufgezeichnet und die restlichen Bänder (Band 8-36) sind in einer Nadir-Auflösung von 1 km. Die Bänder 1-19 und 26 liegen im Wellenlängenbereich, welcher der reflektierten solaren Strahlung zuzuordnen ist, die Bänder 20-25 und 27-36 liegen im thermal emittierten Wellenlängenbereich (TOLLER ET AL. 2006, S. 17). Dabei werden die reflektierten Bänder nur bei Tageslicht aufgezeichnet, die thermal emittierten Bänder dagegen kontinuierlich, auch nachts (KING ET AL. 2003, S. 37).

Die geometrische Genauigkeit der MODIS Daten liegt, als Band-zu-Band-Referenzierung angegeben, bei 0,1 Pixel oder besser für alle 36 MODIS Bänder. Die 20 reflektierten Bänder sind radiometrisch absolut korrigiert mit einer Genauigkeit von 5% oder besser. Die Kalibrierungsgenauigkeit der thermalen Bänder liegt bei 1% oder besser (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 479).

MODIS stellt gegenüber vorherigen Radiometern wie dem Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) eine enorme Verbesserung dar; nicht nur was die zeitliche und räumliche Auflösung der Daten angeht, sondern auch im Bezug auf die hohe spektrale Auflösung mit 36 Kanälen (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 478; URL 12). Auch die geometrische und radiometrische Genauigkeit wurde gegenüber AVHRR verbessert.

Tabelle 3.1: *Die 36 MODIS-Bänder, ihr bevorzugter Anwendungsbereich, Bandbreite, spektrale Strahlung und Signal-to-noise ratio.* [1] *Bänder 1-19 sind in nm angegeben; Bänder 20-36 sind in µm angegeben,* [2] *Spectral Radiance Werte sind in (W/m2 -µm-sr),* [3] *SNR=Signal-to-noise ratio,* [4] *NE(delta)T=Noise-equivalent temperature difference (URL7).*

Primary Use	Band	Bandwidth[1]	Spectral Radiance[2]	Required SNR[3]
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Ocean Color/ Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Atmospheric Water Vapor	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250
Primary Use	**Band**	**Bandwidth[1]**	**Spectral Radiance[2]**	**Required NE[delta]T(K)[4]**
Surface/Cloud Temperature	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
Atmospheric Temperature	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1.360 - 1.390	6.00	150 (SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
Cloud Properties	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
Cloud Top Altitude	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

Aus den MODIS Level 0-Rohdaten werden zahlreiche Datenprodukte abgeleitet, die auf höheren Verarbeitungslevels von 1-4 von drei verschiedenen Institutionen für Atmosphäre, Land und Meere hergestellt werden. Die verfügbaren MODIS-Produkte

und die jeweils zuständige Institution sind in Abbildung 3.3 im Zusammenhang dargestellt. Es sind MODIS-Produkte für folgende Parameter global verfügbar:

(1) Oberflächentemperatur in 1 km Auflösung, tags und nachts mit einer absoluten Genauigkeit von 0,2 K für die Meere und 1 K für die Erdoberfläche.

(2) Meeresfarbe, definiert als vom Meer ausgehende spektrale Strahlung im Bereich 415-653 nm, einschließlich atmosphärischer Korrektur durch Kanäle im nahen Infrarot.

(3) Chlorophyllfluoreszenz im Rahmen von 50% bei Konzentrationen im Oberflächenwasser von 0.5 mg m^{-3}.

(4) Chlorophyllkonzentration im Rahmen von 35%.

(5) Tägliche und jährliche Primärproduktivität der Meere.

(6) Zustände und Produktivität der Vegetation und Landbedeckung, darunter

- Netto Primärproduktivität, Leaf- Area Index und photosynthetisch aktive Strahlung;
- Typ der Landbedeckung mit Change Detection;
- Vegetationsindizes.

(7) Schneebedeckung und Meereisbedeckung.

(8) Reflektanz der Landoberfläche (atmosphärisch korrigiert) mit bidirektionaler Reflektanz und Albedo.

(9) Wolkenbedeckung in 250 m Auflösung tags und 1000 m nachts.

(10) Wolkeneigenschaften wie den Phasenzustand der Wassertröpfchen, optische Dicke, Größe der Wassertröpfchen, Luftdruck an der Wolkenobergrenze und Emissivität.

(11) Aerosoleigenschaften, bestimmt in optischer Dicke, Partikelgröße, und Massentransport.

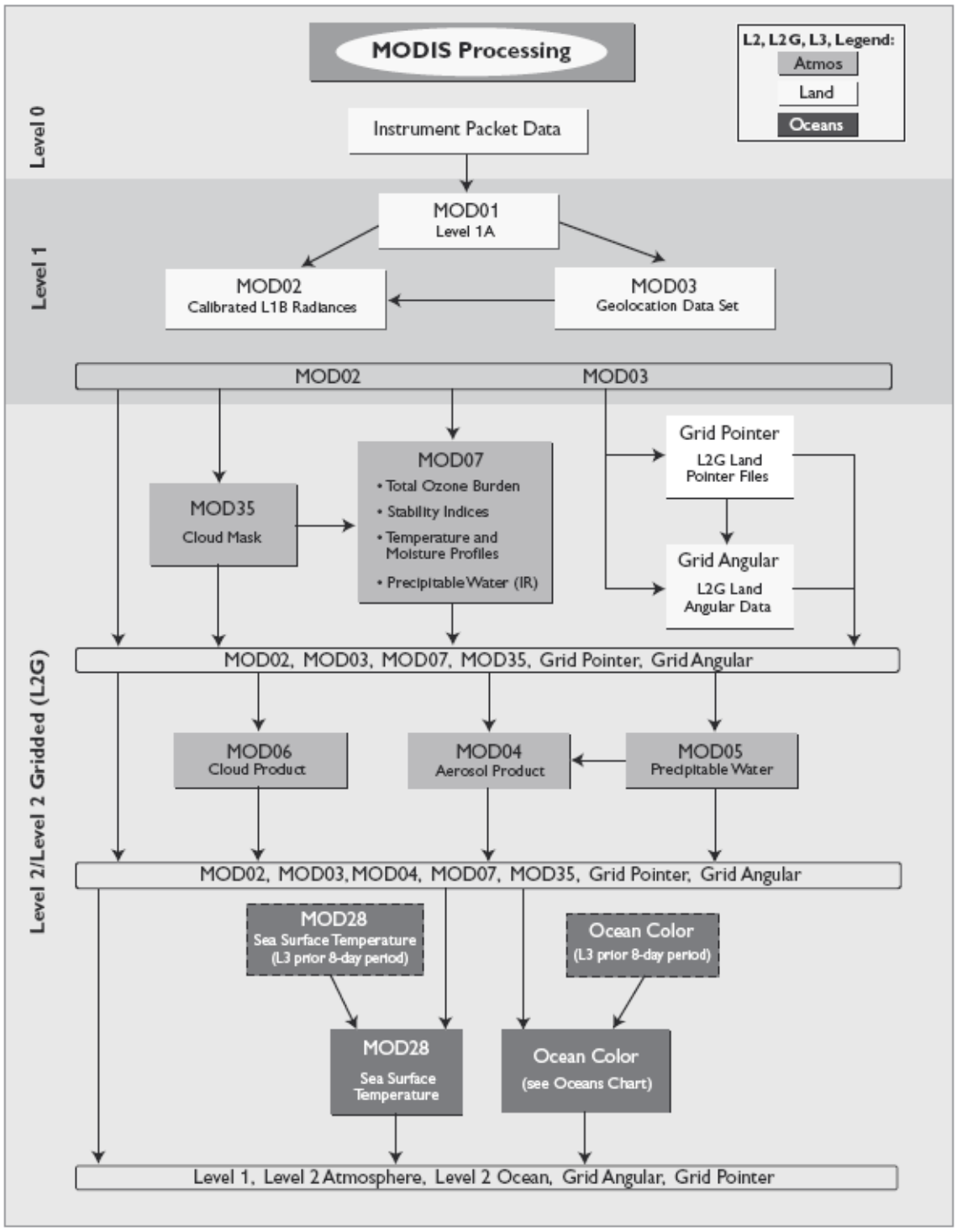
(12) Auftreten von Bränden, deren Ausmaß und Temperatur.

(13) Globale Verteilung von niederschlagfähigem Wasser in der Atmosphäre.

(14) Cirrus- Wolkenbedeckung (KING ET AL. 2003, S. 37).

Diese Datenprodukte werden über unterschiedliche Datenportale über das Internet zur Verfügung gestellt. MODIS-Daten können von Distributed Active Archive Centern (DAAC) entweder zentral vom EOS durch das Warehouse Inventory Search Tool (WIST) oder über Seiten der einzelnen Disziplinen Atmosphäre (URL 4), Land (URL 5), Kryosphäre und Ozean (URL 6) abgerufen werden.

Die hohe zeitliche Auflösung des MODIS-Sensors macht seine Eignung als Instrument zur kontinuierlichen Beobachtung von Prozessen oder kurzfristigen Veränderungen in der Atmosphäre, auf der Erde und in den Meeren aus. Bei der Beobachtung von Gletschern spielen ebendiese Eigenschaften eine Rolle, wenn es darum geht, Veränderungen zu detektieren und kontinuierliche Beobachtungen zu betreiben. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit MODIS Daten zur automatisierten Ermittlung von Gletscherparametern verwendet.



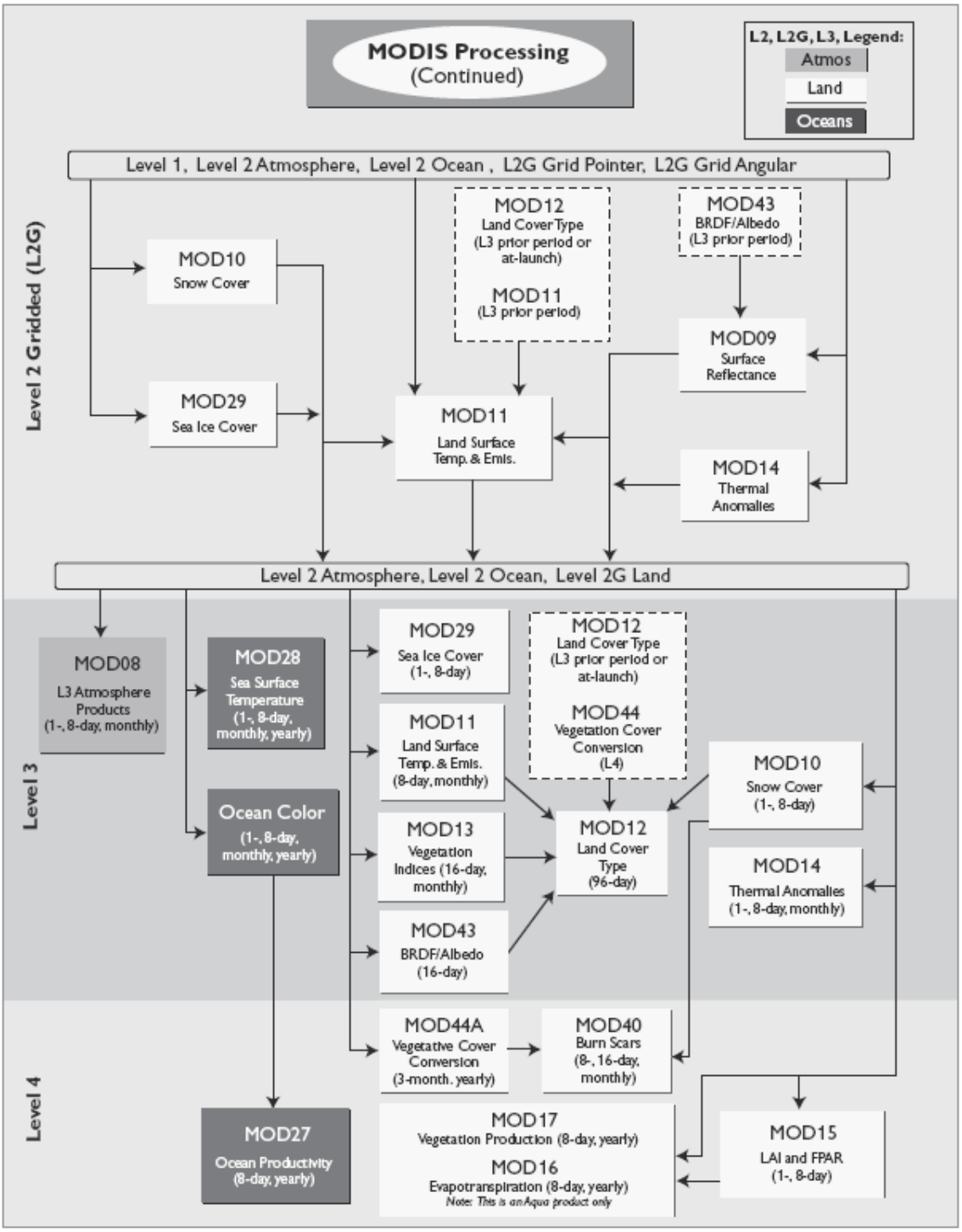


Abbildung 3.3: *Flussdiagramm der verschiedenen Verarbeitungslevels von MODIS Daten und generierter MODIS-Produkte, sowie die zuständigen Institutionen (KING ET AL. 2003, S. 40 f).*

3.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel stellt das Konzept der klassischen Gletscherzonen vor, wie es von PATERSON (1994) aufgestellt wurde und welches allgemeine Anerkennung gefunden hat. Es werden die Charakteristika, über welche sich die Zonen abgrenzen lassen und ihre potentielle Nutzung in der Fernerkundung beschrieben. Das Kapitel gibt außerdem einen Überblick über die Einbindung des MODIS-Sensors in übergeordneten Forschungsprogrammen und behandelt seine Spezifikationen, die im Weiteren für die Bearbeitung der Aufgabenstellung eine Rolle spielen.

4 VERWENDETE DATEN

In diesem Kapitel werden die Daten, die für die Prozessierung verwendet wurden, beschrieben. Für die Entwicklung und die Testdurchläufe der halbautomatischen Prozessierungskette wurden ausschließlich MODIS-Daten von Terra verwendet (Tabelle 4.2). Die Entscheidung fiel zugunsten des Terra-MODIS aus, da dieser zur Mittagszeit (zwischen 12:00 und 15:00 Uhr, UTC) die größeren Erhebungswinkel zur Horizontalen aufweist (Tabelle 4.1); Aqua dagegen hat große Erhebungswinkel am frühen Abend. Bei Aufnahme durch Terra-MODIS liegt die Antarktische Halbinsel in den MODIS-Szenen in einer nadirnahen Position und es ergeben sich besser geeignete Beleuchtungsverhältnisse auch durch steilere Sonneneinfallswinkel und weniger spiegelnde Reflexion. Terra-MODIS liefert zudem zeitlich weiter zurückreichende Aufnahmen (seit 2000, siehe Kapitel 3.2). In dieser Arbeit werden ausschließlich MODIS-Daten der neuesten Produktionsstufe V005 verwendet die gegenüber der Version V004 verbessert wurden (URL 2).

Tabelle 4.1: *Beispielhafte Erhebungswinkel für Terra und Aqua zur Mittagszeit aus dem „Satellite Overpass Predictor", NASA (URL 13).*

Datum	Zeit UTC +00:00 Terra / Aqua	peak elevation [°] Terra / Aqua
20.01.2008	12:10 / 14:29	50,7 / 2,5
21.01.2008	12:53 / 15:13	84,4 / 7,2
22.01.2008	14:17 / 13:36	1,4 / 56,5
23.01.2008	12:41 / 15:01	73,1 / 5,7

Alle MODIS-Daten sind in einer erweiterten Version des Hierarchical Data Format (HDF) für das Earth Observing System (EOS), im EOS-HDF, abgespeichert, dieses wird deshalb auch in aller Kürze erläutert.

Das HDF ist im weitesten Sinne ein Format, das es ermöglicht, selbsterklärende Dateien auf verschiedensten Computerplattformen, die unterschiedliche binäre Strukturen besitzen können, zu benutzen. Dabei bedeutet „selbsterklärend", dass ein Datensatz, wie zum Beispiel ein multidimensionales Array aus Zahlen, zusätzliche Metadaten logisch assoziiert bekommen kann, welche dann verschiedene Eigenschaften der Datei näher beschreiben (TOLLER ET AL. 2006, S. 4). Eine HDF-Datei kann multidimensionale Arrays, Tabellen und Bilder gleichzeitig enthalten, die alle als eigenständige Objekte zugänglich sind und nicht wie eine fortlaufende Bit-Struktur zu verstehen sind. Nutzer einer HDF-Datei haben auf deren Objekte über die Abfrage eines HDF-Archivs Zugriff. Um mit HDF-Dateien umzugehen ist es demnach wichtig, deren Inhalt in Form ihrer Objekttypen zu kennen (TOLLER ET AL. 2006, S. 4). MODIS Level 1B-Daten im HDF beinhalten folgende Datenobjekte, um wissenschaftliche-,

Kalibrierungs- und Metadaten zu speichern: (1) Scientific Data Sets als multidimensionales Array (SDS), (2) Fixed Length Data und (3) File Attributes.

Die Erweiterungen des HDF zum HDF-EOS umfassen systemweite Suchfunktionen ohne die Datei selbst lesen zu müssen und die Speicherung georeferenzierter Daten. Für letztere Erweiterung wurden die neuen Datentypen Grid, Point und Swath entwickelt. Der Swath Datentyp speichert die zeitlich geordneten Zeilen des MODIS-Abtastspiegels (Abbildung 3.2) in der entsprechenden Reihenfolge. Der Level 1B-Algorithmus speichert die aufgezeichneten Daten im Swath-Datentyp ab (TOLLER ET AL. 2006, S. 8).

Tabelle 4.2: *MODIS-Daten und Zeitpunkte, die für die Entwicklung der Prozessierungskette und ihrer Überprüfung verwendet wurden. Für jeden Aufnahmezeitpunkt wurde ein Set aus MOD021KM, MOD03 und MOD35L2 benutzt.*

Plattform/ Sensor	Aufnahmezeitpunkt	MODIS- Produkt
Terra MODIS	26.02.2000 13:45	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	19.03.2000 13:10	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	03.10.2000 12:30	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	03.10.2000 14:10	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	25.02.2001 11:35	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	25.02.2001 13:10	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	18.01.2002 13:10	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	12.01.2004 12:45	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	15.10.2004 13:00	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	30.10.2004 13:55	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	03.11.2004 13:30	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	12.01.2005 12:55	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	06.10.2005 12:35	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	06.10.2005 14:15	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	15.11.2006 12:55	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	15.11.2006 14:30	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	15.11.2006 14:35	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	01.12.2006 12:55	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	01.12.2006 14:35	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	20.12.2006 13:25	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	20.12.2006 15:05	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	05.01.2007 13:25	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	05.01.2007 15:05	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	24.01.2007 12:15	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	24.01.2007 12:20	MOD021KM; MOD03; MOD35L2
Terra MODIS	24.01.2007 13:55	MOD021KM; MOD03; MOD35L2

4.1 MODIS Level 1B Calibrated, Geolocated Radiances (MOD021km)

MODIS Level 1B-Produkte werden dadurch erzeugt, dass durch einen Level 1A-Code ein zweistündiger Level 0-Datensatz in mehrere Szenen von ca. 5 Minuten aufgeteilt wird. Ein MODIS-Scan (eine Rotation des Abtastspiegels) dauert 1,4771 Sekunden, dadurch hat eine Level 1B-Szene meist 203 volle Zeilen. Ein Georeferenzierungscode berechnet die Koordinaten für einzelne bestimmte Pixel am Boden, sowie Informationen zum Sonnenstand und die Position des Sensors im Bezug auf das aufgenommene Pixel (TOLLER ET AL. 2006, S. 2).

Das MOD02-Datenprodukt beinhaltet georeferenzierte und am Sensor kalibrierte Rückstreuwerte aller 36 spektralen Bänder des MODIS, erzeugt aus Level 1A-Daten (MOD01). Das Produkt der reflektierten solaren Bänder (Band 1-19 und 26, Tabelle 4.3) wird als „Earth View (EV) reflectance factor", $\rho_{EV} \cos(\theta_{EV})$ (KING ET AL. 2003, S. 67) angegeben, wobei ρ der bidirektionale Reflektanzfaktor der Erde und cos(θ) der solare Einfallswinkel im Bezug auf die betrachtete Fläche auf der Erdoberfläche ist (TOLLER ET AL. 2006, S. 43). Das Produkt für die Bänder im thermalen Ausstrahlungsbereich (Band 20-25 und 27-36, Tabelle 4.3) wird in spektraler Strahlung angegeben. Die Einheit für die Strahlung ist W/(m² µm sr). Durch Einbeziehung der solaren Einstrahlung könnte für die reflektierten solaren Bänder auch die spektrale Strahlung berechnet werden (KING ET AL. 2003, S. 67).

Das MOD02-Produkt enthält zusätzlich zu den Strahlungswerten Information zur Qualität der Aufnahme und zur Abschätzung der Fehler sowie Kalibrierungsdaten (Tabelle 4.3). Im sichtbaren und nahen Infrarot-Wellenlängenbereich wird nur tagsüber aufgezeichnet, im thermischen Infrarot jedoch finden die Aufnahmen fortlaufend, auch nachts, statt. Nur Band 1 und 2 haben eine räumliche Auflösung von 250 m. Die Bänder 3-7 haben eine Auflösung von 500 m und die restlichen haben eine Auflösung von 1 km. Im MOD021km-Produkt werden die Bänder 1-7 in die 1 km-Auflösung umgerechnet (KING ET AL. 2003, S. 67).

Tabelle 4.3: *Auflistung der Scientific Data Sets (SDS) des MOD02-Produkts. „RefSB“ steht für reflektierte solare Bänder, „Emissive“ steht für die Bänder mit thermaler Ausstrahlung und nscans für number of scans (nach TOLLER ET AL. 2006, S. 20).*

SDS Name and Description	**dim. 1 #bands**	**dimension 2 nscans* ndetectors**	**dimension 3 nframes* nsamples**
250m product			
EV_250_RefSB *250m Earth View Science data*	**2**	**nscans*40**	**1354*4**
EV_250_RefSB_Uncert_Indexes *Uncertainty Indices for 250m EV reflectance product*	**2**	**nscans*40**	**1354*4**
500m product			
EV_250_Aggr500_RefSB *250m Earth View Science data aggregated to 500 m*	**2**	**nscans*20**	**1354*2**
EV_250_Aggr500_RefSB_Uncert_Indexes *Uncertainty Indices for 250m EV reflectance product aggregated to 500 m*	**2**	**nscans*20**	**1354*2**
EV_250_Aggr500_RefSB_Samples_Used *Number of samples used to aggregate 250m Science data to 500m resolution*	**2**	**nscans*20**	**1354*2**
EV_500_RefSB *500m Earth View Science data*	**5**	**nscans*20**	**1354*2**
EV_500_RefSB_Uncert_Indexes *Uncertainty Indices for 500m EV reflectance product*	**5**	**nscans*20**	**1354*2**
1km product			
EV_250_Aggr1km_RefSB *250m EV Science data aggregated to 1 km*	**2**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_250_Aggr1km_RefSB *Uncertainty Indices for 250m EV reflectance product aggregated to 1 km*	**2**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_250_Aggr1km_RefSB_Samples_Used *Number of samples used to aggregate 250m Science data to 1km resolution*	**2**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_500_Aggr1km_RefSB *500m Earth View Science data aggregated to 1 km*	**5**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_500_Aggr1km_RefSB_Uncert_Indexes *Uncertainty Indices for 500m EV reflectance product aggregated to 1 km*	**5**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_500_Aggr1km_RefSB_Samples_Used *Number of samples used to aggregate 500m Science data to 1km resolution*	**5**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_1KM_RefSB *1km EV Science data for Reflective Solar Bands*	**15**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_1KM_RefSB_Uncert_Indexes *Uncertainty Indices for 1km EV reflectance product*	**15**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_1KM_Emissive *1km EV Science data for Thermal Emissive Bands*	**16**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_1KM_Emissive_Uncert_Indexes *Uncertainty Indices for 1km EV thermal emissive radiances*	**16**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_Band26 *1km EV Science data for band 26*	**1**	**nscans*10**	**1354*1**
EV_Band26_Uncert_Indices *Uncertainty Indices for Band 26 EV reflectance product*	**1**	**nscans*10**	**1354*1**

Die ungefähre Dateigröße der MOD02-Produkte in unterschiedlicher Auflösung können Tabelle 4.4 entnommen werden. Unterschiede in den Tag- und Nachtaufnahmen entstehen dadurch, dass nachts nur die thermalen Bänder aufgezeichnet werden. Die MOD02 Produkte liegen als kalibrierte Rohdaten im Swath-Format vor und benötigen vor der Weiterverarbeitung die Zuweisung eines räumlichen Bezugs (Kapitel 5.1.1).

Tabelle 4.4: *Ungefähre Dateigröße von Level1B Earth View Produkten aus 203 Scans (TOLLER ET AL. 2006, S. 22).*

Produktname	Tagszene aus 203 Scans (MB)	Nachtszene aus 203 Scans (MB)
MOD02QKM	286,06	22,19
MOD02HKM	275,07	22,19
MOD021KM	343,36	142,71

4.1.1 Störfaktoren im MOD021KM- Produkt

Einzelne Bänder des MODIS-Sensors weisen systematische Fehler auf (RAKWATIN ET AL. 2007; ANTONELLI ET AL. 2004). Von den beiden Bändern, die in dieser Arbeit verwendet werden, weist Band 5 so genannten „stripe noise“ (regelmäßige Streifen über die ganze Szene) auf. Dieser Fehler wurde beim Aufbau der Prozessierungskette nicht berücksichtigt, denn durch die vom Bearbeiter nach der Klassifikation durchgeführte Validierung können die eventuell fehlklassifizierten Grenzen zwischen den Gletscherzonen erkannt und korrigiert werden.

Das MODIS-Band 10, das ebenfalls bei der Klassifikation der Gletscherzonen mit einfließt, ist in vielen Bereichen gesättigt. Aufgrund dessen wird durch das angewandte Band-Ratio an diesen Stellen ein extrem niedriger Wert klassifiziert, der dann in die entsprechende Klasse (Trockenschnee) fällt (C. MAYER, persönlicher Schriftwechsel). Dieser Störfaktor wurde deshalb ebenfalls nicht berücksichtigt.

Um jedoch einwandfreie Ergebnisse der Klassifikation mit MODIS-Daten zu erzielen sollten die genannten Störfaktoren umgangen oder im Fall des stripe noise rechnerisch entfernt werden. RAKWATIN ET AL. (2007) und auch ANTONELLI ET AL. (2004) bieten dafür methodische Ansätze.

4.2 MODIS Cloud Mask (MOD35_L2)

Das MODIS-Wolkenmaskenprodukt wird täglich und global in der räumlichen Auflösung im Nadir von 1 km und 250 m erzeugt. Das bedeutet, dass täglich 288 einzelne Szenen für die gesamte Erdoberfläche produziert werden. Der verwendete Cloud Mask-Algorithmus wendet eine Reihe von Schwellenwerten im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich sowie Konsistenztests an, um die Sicherheit anzugeben, mit der der Blick des Sensors auf die Erde wolkenfrei ist (KING ET AL. 2003, S. 134). Die Angaben in 250 m Auflösung beruhen auf Daten aus dem optischen Wellenlängenbereich.

Die MODIS-Wolkenmaske wird im HDF erzeugt und enthält neun Objekte, oder Scientific Data Sets (SDS). Die Zuordnung der einzelnen SDS sieht folgendermaßen aus: (1) „Latitude“ (2) „Longitude“ (3) „Scan_Start_Time“ (4) „Solar_Zenith“ (5) „Solar_Azimuth“ (6) „Sensor_Zenith“ (7) „Sensor_Azimuth“ (8) „Cloud_Mask“ (9) „Quality Assurance“. Sieben dieser SDS werden aus dem MODIS Geolocation-Produkt (MOD03) abgeleitet und dienen hauptsächlich dem Zweck der Visualisierung. Das Wolkenmasken-SDS enthält das eigentliche Wolkenmaskenprodukt in Form eines 6 Byte (48 Bit) umfassenden Arrays. Das neunte SDS umfasst 10 Byte und stellt Qualitätsparameter zur Verfügung (STRABALA 1999, S. 4 f).

Abgesehen von der Angabe der Bewölkung werden noch andere ergänzende Angaben von Parametern zur Wolkenbestimmung oder der Oberflächenbeschaffenheit gemacht.

Maßgebend für die Bestimmung der wolkenfreien Pixel in dieser Arbeit ist ausschließlich das 48 Bit große Wolkenmasken-SDS, und davon werden aus dem ersten Byte lediglich Bit 2 und 3 benötigt. Durch die Stellung dieses Bitschalters werden die verschiedenen Konfidenz-Klassen angezeigt, die durch die spektralen Tests des MODIS Cloud Mask-Algorithmus für jedes Pixel ermittelt wurden. Diese sind: (1) confident cloudy (2) probably cloudy (3) probably clear (4) confident clear (Tabelle 4.5). Wenn die Ergebnisse nicht aussagekräftig genug sind, werden räumliche und zeitliche Variabilitätstest ausgeführt, die auf Schwellenwerten der Strahlung im Infrarotbereich und Schwellenwerten der Reflektanz im sichtbaren und nahen Infrarotwellenlängenbereich beruhen. Diese Schwellen werden je nach Oberflächenart, atmosphärischen Bedingungen, wie Wasserdampfgehalt oder Aerosolgehalt, und der Aufnahmegeometrie angepasst. Eingangsdaten für die Berechnung des Wolkenmaskenprodukts sind MOD02-Daten, eine Land/Wasser-Maske in 1 km Auflösung, ein DHM, Ökosystemanalysen und Schnee/Eisbedeckungskarten. Die Validierung der Wolkenmaske wird anhand von Daten des MODIS Airborne Simulator (MAS) aus Feldaufenthalten, Radar- und Lidar-Beobachtungen des Southern Great Plains Cloud and Radiation Testbed Site (SGP CART site) und Vergleiche mit Wolkenprodukten der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ausgeführt (KING ET AL. 2003, S. 134). Die maximale Dateigröße einer Szene des Wolkenmaskenprodukts liegt bei 47,42 MB.

Tabelle 4.5: *Belegung der einzelnen Bits des 48 Bit (6 Byte) großen Wolkenmasken-SDS. Das erste (Nummerierung beginnt bei 0) ist das für diese Arbeit relevante Byte. Bit 2 und 3 liefern die Bewölkungsklassen. (URL 3).*

Cloud_Mask Bit-Field Interpretation		
Byte #0 (1km Cloud Mask & Processing Path Flags)		
Bits	Field Description	Bit Interpretation Key
0	Cloud Mask Flag	0 = Not Determined 1 = Determined
1-2	Unobstructed FOV Quality Flag	0 = Confident Cloudy 1 = Probably Cloudy 2 = Probably Clear 3 = Confident Clear
3	Day/Night Flag	0 = Night 1 = Day
4	Sunglint Flag	0 = Yes 1 = No

5	Snow/Ice Background Flag	0 = Yes 1 = No
6-7	Land/Water Background Flag	0=Water 1=Coastal 2=Desert 3=Land
Byte #1 (Additional 1km Flags)		
Bits	Field Description	Bit Interpretation Key
0	Non-Cloud Obstruction Flag	0 = Yes 1 = No
1	Thin Cirrus Detected (Solar Test)	0 = Yes 1 = No
2	Shadow Flag	0 = Yes 1 = No
3	Thin Cirrus Detected (Infrared Test)	0 = Yes 1 = No
4	Adjacent Cloud Detected (within surrounding 1 km pixels)	0 = Yes 1 = No
5	Cloud Flag (IR Threshold Test)	0 = Yes 1 = No
6	High Cloud Flag (CO2 Test)	0 = Yes 1 = No
7	High Cloud Flag (6.7 micron Test)	0 = Yes 1 = No
Byte #2 (Additional 1km Flags)		
Bits	Field Description	Bit Interpretation Key
0	High Cloud Flag (1.38 micron Test)	0 = Yes 1 = No
1	High Cloud Flag (3.7-12 micron Test)	0 = Yes 1 = No
2	Cloud Flag (IR Temperature Difference Test)	0 = Yes 1 = No
3	Cloud Flag (3.7-11 micron Test)	0 = Yes 1 = No
4	Cloud Flag (Visible Reflectance Test)	0 = Yes 1 = No
5	Cloud Flag (Visible Reflectance Ratio Test)	0 = Yes 1 = No
6	Cloud Flag (.935/.87 Reflectance Test)	0 = Yes 1 = No
7	Cloud Flag (3.7-3.9 micron Test)	0 = Yes 1 = No
Byte #3 (Additional 1km Flags)		
Bits	Field Description	Bit Interpretation Key
0	Cloud Flag (Temporal Consistency)	0 = Yes 1 = No
1	Cloud Flag (Spatial Variability)	0 = Yes 1 = No
2-7	(spares)	n/a
Byte #4 (250m Flags)		
Bits	Field Description	Bit Interpretation Key
0	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(1,1)	0 = Yes 1 = No
1	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(1,2)	0 = Yes 1 = No
2	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(1,3)	0 = Yes 1 = No
3	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(1,4)	0 = Yes 1 = No
4	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(2,1)	0 = Yes 1 = No
5	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(2,2)	0 = Yes 1 = No
6	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(2,3)	0 = Yes 1 = No
7	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(2,4)	0 = Yes 1 = No
Byte #5 (250m Flags)		
Bits	Field Description	Bit Interpretation Key
0	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(3,1)	0 = Yes 1 = No
1	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(3,2)	0 = Yes 1 = No
2	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(3,3)	0 = Yes 1 = No
3	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(3,4)	0 = Yes 1 = No
4	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(4,1)	0 = Yes 1 = No
5	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(4,2)	0 = Yes 1 = No
6	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(4,3)	0 = Yes 1 = No
7	250-m Cloud Flag (Visible Test) element(4,4)	0 = Yes 1 = No

4.3 MODIS Geolocation Data Set (MOD03)

Das MODIS Geolocation-Produkt ist ein ergänzender Datensatz für Level 1B MOD02-Produkte und für Level 2-Produkte zur weiteren Prozessierung. Für jedes 1 km große MODIS Pixel werden geodätische Koordinaten, Geländehöhe, eine Land/Meer-Maske, Satelliten-Range und Informationen zur Aufnahmegeometrie wie den solaren und den sensorbezogenen Zenit- und Azimutwinkel aufgezeichnet. Die Daten des Geolocation-Produkts werden über die Fluglage der Trägersatelliten (Terra und Aqua) und deren Orbit, über Telemetrie des Sensors und anhand eines digitalen Höhenmodells ermittelt. Zusätzlich zu den genannten Parametern werden im Produkt Qualitäts- und Fehlerabschätzung als Informationen abgespeichert (KING ET AL. 2003, S. 68).

MOD03 Dateien haben eine maximale Größe von 60 MB.

Der Fehler in der Georeferenzierung, die durch das Geolocation-Produkt berechnet wurde, wird mit 0,1 MODIS-Pixel für die Nadir-Pixel angenommen, d.h. er liegt bei 100 m (ZHOU UND LI 2002, S. 5020).

Das MOD03-Produkt wird in dieser Arbeit zur Georeferenzierung der MOD02-Daten verwendet. Der große Vorteil besteht darin, dass sich mit der Verwendung dieses Datensatzes die Interaktion des Bearbeiters der Klassifikation verringert, denn es müssen keine manuellen Passpunkte zur Georeferenzierung der Szenen gesetzt werden. Die im Produkt gespeicherten Referenzpunkte referenzieren die Szenen einwandfrei.

4.4 Radarsat Antarctic Mapping Project Höhenmodell (RAMP DHM)

Zur Abfrage der topographischen Lage der Grenzen zwischen den Gletscherzonen und zur Korrektur von fehlklassifizierten Pixeln wird Höheninformation benötigt. Verwendet wird dazu das digitale Höhenmodell des „Radarsat Antarctic Mapping Project“ (RAMP DHM) in der Version 2.

Das RAMP wurde in zwei verschiedenen Aufnahmephasen 1997 und 2000 mit dem Ziel, die erste hoch aufgelöste Satellitenbildkarte des gesamten antarktischen Kontinents zu erzeugen, vom kanadischen Satelliten Radarsat-1 durchgeführt (JEZEK 2008, S. 5). Auf diesen Radarsat-1 SAR (Synthetic Aperture Radar) Daten und zusätzlichen Daten wie Flugzeugradaraufnahmen, Datenmaterial aus der Antarctic Digital Database (Version 2, URL 14) und großmaßstäbigen topographischen Karten des U.S. Geological Survey (USGS) und der Australian Antarctic Division gründet das RAMP DHM. Es hat eine räumliche Auflösung von 200 m und ist online verfügbar (URL 8). Für die vorliegende Arbeit wurde das RAMP DHM mittels bilinearer Interpolation in eine 1000 m Auflösung, entsprechend der MODIS-Auflösung, umgerechnet.

Die horizontale Positionsgenauigkeit des RAMP DHM beträgt 200 m (LIU ET AL. 1999, S. 199). Die vertikale Genauigkeit des RAMP DHM wird mit 100-130 m über felsigem, bergigem Terrain, besser als 2 m für die flachen Eisschelfbereiche, besser als 15 m für das zentrale Innlandeis der Antarktis und 35 m für steilere Bereiche des Inlandeises angegeben (LIU ET AL. 1999, S. 199; LIU ET AL. 2001).

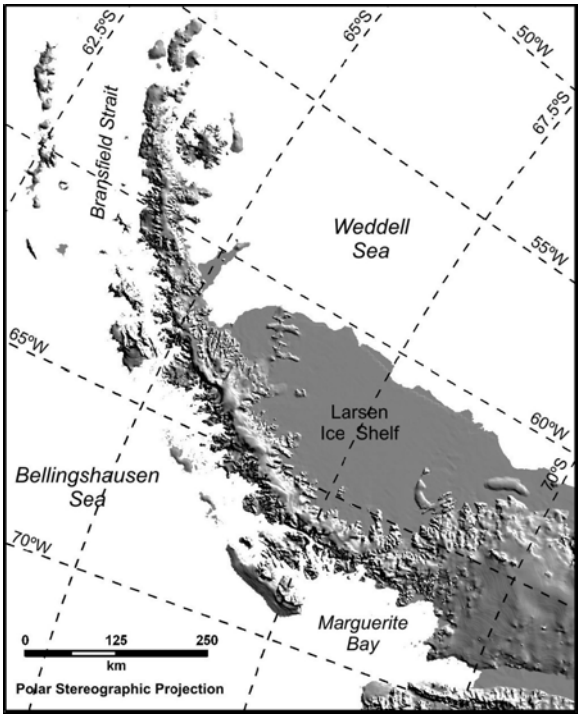


Abbildung 4.1: *Das RAMP DHM (Liu et al. 2001) mit schattiertem Relief für die Antarktische Halbinsel nördlich 70° S (ARIGONY NETO 2006, S. 21).*

4.5 Antarctic Peninsula glacier database (AntPenDB)

Die AntPenDB wird vom Institut für Physische Geographie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Rahmen seiner Funktion als regionales Center (RC) des GLIMS-Projektes (Global Land Ice Measurements from Space) unterhalten. Sie wird bei der Durchführung der Prozessierung abgefragt, es werden temporäre Tabellen angelegt, welche nach Beendigung der Analyse wieder gelöscht werden, und es werden die Ergebnisse in die bestehenden Tabellen geschrieben. Bei der AntPenDB handelt sich um ein relationales Datenbanksystem nach den Standards von GLIMS auf der Basis der Open Source Software PostgreSQL zusammen mit der GIS-Erweiterung PostGIS. Die relationale Struktur der Datenbank wurde unter dem Gesichtspunkt der Erweiterbarkeit um zukünftige Projekte gewählt (ARIGONY NETO 2006, S. 24), und nicht zuletzt profitiert auch die vorliegende Arbeit von diesen Vorteilen.

Die Datenbank besteht bisher aus 11 Tabellen (ARIGONY NETO 2006, S. 24), die im Folgenden beschrieben werden:

glacier_static: In dieser Tabelle sind Informationen über die Gletscher wie Gletschername, GLIMS Gletscheridentifikator (ID), die für jeden Gletscher existierende lokale Gletscher ID, welche die Gletscher bei allen Analysen kennzeichnet und vergleichbar macht mit Zusatzdaten wie z.B. den Centerlines der Gletscher. Die einzelnen Gletscher sind als Punkt-Features gespeichert.

analysis: Diese Tabelle beinhaltet Informationen zu allen durchgeführten Prozessierungen, wie Analysezeitpunkt, Anzahl bearbeiteter Gletscher oder

Korrekturen. Sie bildet ein Verbindungsglied über die image_id zu den zur Prozessierung verwendeten Bildern aus der Tabelle images.

ancilliary: Weiterführende Informationen zu verwendetem Material (z.B. Papers, meteorologische Daten, Bodendaten) werden hier gespeichert.

glacier dynamic: Hier werden die ermittelten zeitlich veränderlichen Gletscherdaten wie Ausmaße des Gletschers oder Fliessgeschwindigkeit abgelegt. Sie werden als Polygone, Linien oder Punkte gespeichert. Für MODIS-Bilder finden dort noch keine Einträge statt.

images: Dies ist eine Tabelle mit allgemeinen Metadaten zu den prozessierten Bildern. Die Abmessungen der Szenen (footprints) sind als Polygone gespeichert.

cenline: In dieser Tabelle sind die von ARIGONY NETO (2006) digitalisierten Centerlines als Linienvektoren abgespeichert, die auch für diese Arbeit als Grundlage gedient haben.

cenline_point1000: Zusätzlich zu den schon bestehenden Tabellen cenline_point15 und cenline_point30 wurde diese Tabelle erzeugt. Entsprechend der MODIS-Auflösung wurden alle 1000 m Punkte auf der Centerline gesetzt. Diesen Punkten ist eine fortlaufende Nummer (point_seq) zugeordnet, beginnend an der Gletscherfront.

sar_thresholds: Diese Tabelle enthält durchschnittliche Höhengrenzwerte der Schneelinie und Trockenschneelinie; zum einen für eine mögliche Klassifikation mit SAR-Daten, zum anderen zur automatischen Validierung der Klassifikationsergebnisse für alle Sensoren.

img_glaciers: In dieser Tabelle ist eine Liste prozessierter Gletscher, die in vorhandenem Satellitenbildmaterial (mit Positionsangabe der Szene von path/ row oder track/frame) verfügbar sind, enthalten. Außerdem wird die Art der durchgeführten Analyse angezeigt (z.B. komplette Analyse, nur Gletscherfront, nur Gletscherzonen). Für MODIS-Daten wurden hier keine Einträge gemacht.

glacier_zones: Diese Tabelle enthält die Klassen für die einzelnen Gletscherzonen an allen Punkten auf der Centerline aus Tabelle cenline_point1000 für MODIS oder cenline_point15 und cenline_point30 für andere Sensoren.

glacier_zones_limits: Die endgültigen Ergebnisse für die Grenzen zwischen den Gletscherzonen auf der Centerline werden in dieser Tabelle als Punkte gespeichert. Jeder Punkt ist einer bestimmten Analyse zugeordnet und gibt Information über die Art der Grenze (MODIS-Schneelinie=2, MODIS-Trockenschneelinie=3) und ihre Höhenlage, wie sie aus dem RAMP DHM entnommen wurde.

cloud_analysis_cenline: Diese Tabelle wurde für die MODIS-Prozessierung neu angelegt und enthält den lokalen Identifikator (local_id) aller wolkenfreien Gletscher (alle Punkte auf der Centerline müssen unbewölkt sein), gekoppelt an den

Identifikator (ID) der für die entsprechende MODIS-Szene durchgeführten Analyse (analy_id).

Bei der Prozessierung von MODIS-Daten wird nicht auf alle Tabellen der Datenbank zugegriffen. Die frequentierten Tabellen sind analysis, images, cenline, cenline_point1000, sar_thresholds, glacier_zones, glacier_zones_limits und cloud_analysis_cenline.

Die in dieser Arbeit untersuchten 240 Gletscher auf der Antarktischen Halbinsel nördlich von 70° S stellen eine Auswahl aus dem GLIMS Antarctic Peninsula glacier inventory mit 950 Gletschern dar (ARIGONY NETO 2006, S. 22).

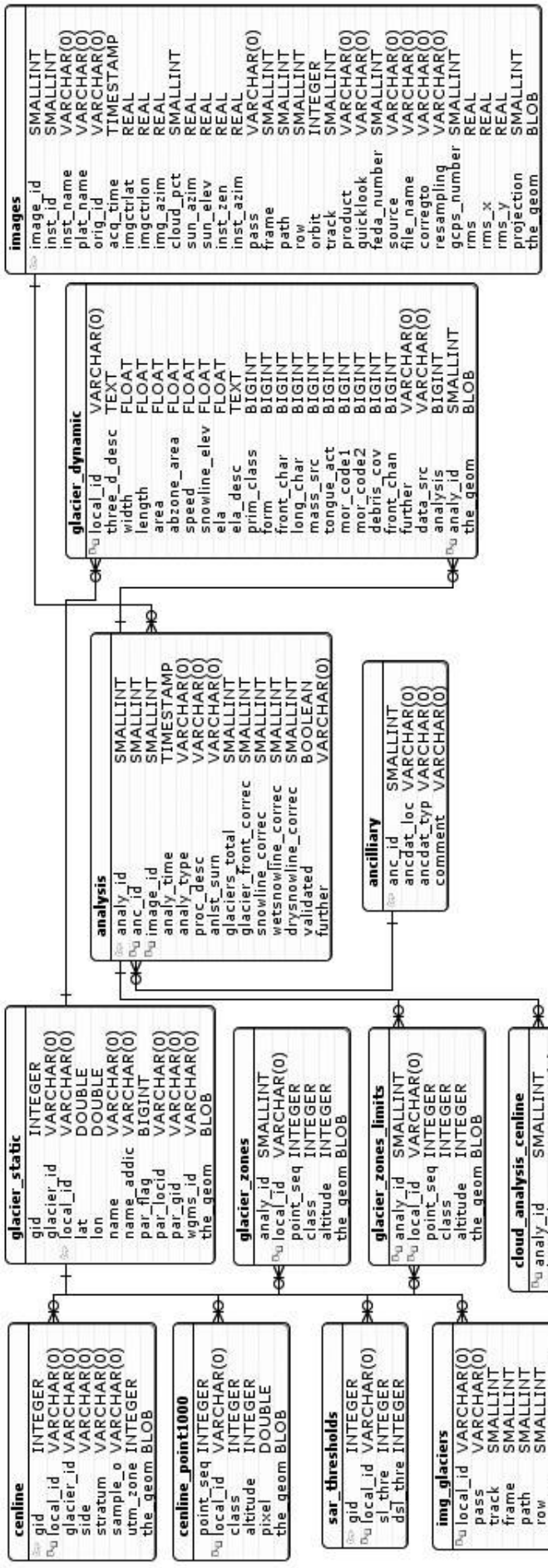


Abbildung 4.2: *Struktur der Antarctic Peninsula glacier database mit den Fremdschlüsseln als Verbindung zwischen den einzelnen Tabellen und den Tabellen, „cenline_point1000" und „cloud_analysis_cenline", die für die Prozessierung der MODIS-Daten hinzugefügt wurden. Die Längenangabe für character varying (VARCHAR) wurde auf 0 gesetzt, obwohl die Spalten in der AntPenDB unterschiedliche Längen haben.*

5 METHODIK

Zur Analyse von Gletscheroberflächen mit MODIS Daten kommen zwei grundlegende Methoden zum Einsatz: Zum einen ein Algorithmus zur überwachten multispektralen Klassifikation nach FAUSTO ET AL. (2007), zum anderen der „Centerline- Ansatz“ (SAURER & GOSSMANN 2002; ARIGONY NETO 2006), der die automatisierte Prozessierung der MODIS Daten vereinfacht. Darüber hinaus werden die Verarbeitungsschritte des Satellitenbildmaterials hier detailliert beschrieben.

5.1 Vorprozessierung von MODIS-Daten

Rohe Satellitendaten enthalten geometrische Verzerrungen, die dem Aufnahmesensor zuzuschreiben sind (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 492). Die sensorbedingten Ungenauigkeiten werden für MODIS-Daten direkt nach ihrer Aufzeichnung schon durch einen Kalibrierungsalgorithmus ausgeglichen (TOLLER ET AL. 2006, S. 2), trotzdem müssen die MODIS-Szenen noch entzerrt werden, um beispielsweise die Lagegenauigkeit der Pixel für nachfolgende Operationen garantieren zu können.

Die Wahrscheinlichkeit von Verzerrungen, welche durch die Topographie des Geländes verursacht werden, nimmt generell mit der Entfernung zum Nadir eines Sensors zu. Die Orthorektifizierung der MODIS-Szenen kann trotzdem vernachlässigt werden, da topographisch stark gegliedertes Gelände von der 1000 m-Auflösung ausgeglichen wird. Der Vergleich von zwei MODIS-Aufnahmen von unterschiedlichen Zeitpunkten ergab eine maximale Abweichung um etwa einen halben MODIS-Pixel (500 m).

Neben Oberflächenparametern üben zwei weitere Faktoren, topographische und atmosphärische Effekte, Einfluss auf die Reflektanz aus. Die Reflektanz wird als das Verhältnis zwischen der Intensität der von einem Körper zurückgestrahlten Lichtmenge und der Intensität der Quelle, die vom Satellitensensor aufgezeichnet wird, definiert (ARIGONY NETO 2006, S. 86). Topographische Effekte treten in bergigem Gelände auf, wo die Beleuchtungsverhältnisse schon kleinräumig stark unterschiedlich sein können. Es kann auch zu einem Strahlungsplus kommen, indem von angrenzenden Hängen Licht diffus gestreut wird (LI ET AL. 2002). Dieses Problem wird dadurch behoben, dass für die Klassifikation der MODIS Daten das Ratio aus zwei Kanälen gebildet wird. Die Ratiobildung hat den Vorteil, dass die spektralen Charakteristika eines Körpers erhalten bleiben, die Frage der direkten oder der indirekten Beleuchtung aber keine Rolle mehr spielt (LILLESAND & KIEFER, 2004, S. 531). Beispielrechnungen finden sich in Tabelle 5.1, die schematische Darstellung der Beleuchtungsverhältnisse befindet sich in Abbildung 5.1.

Tabelle 5.1: *Beispiel der Ratiobildung zur Behebung von topographischen Einflüssen auf die Reflektanz am Beispiel von Laub- und Nadelwald; nach LILLESAND & KIEFER (2004, S. 532).*

	Rückstreuwerte		
Objekt/ Art d. Beleuchtung	**Band a**	**Band b**	**Ratio a/b**
Laubwald			
direkte Sonneneinstrahlung	48	50	0,96
indirekte Beleuchtung	18	19	0,95
Nadelwald			
direkte Sonneneinstrahlung	31	45	0,69
indirekte Beleuchtung	11	16	0,69

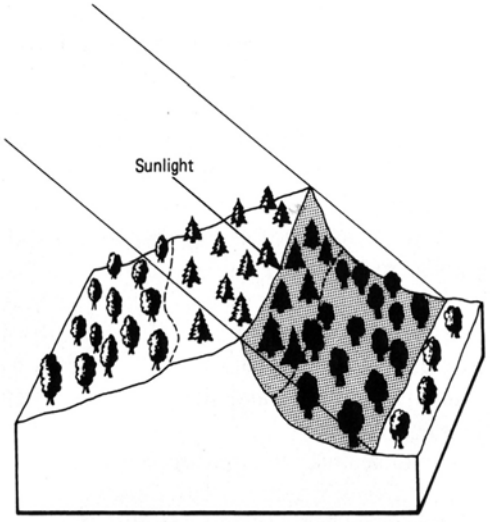


Abbildung 5.1: *Beleuchtungsverhältnisse in topographisch gegliedertem Gelände (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 532).*

Einflüsse der Atmosphäre sind Streuung und Absorption der Strahlung an Luftmolekülen oder Aerosolen auf dem Weg von der Sonne durch die Atmosphäre zur Oberfläche und zurück zum Satellitensensor (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 354). Zur Atmosphärenkorrektur sind zusätzliche Parameter, wie z.B. Intensität der direkten solaren Einstrahlung oder Oberflächenbedeckung, notwendig (SANDMEIER & ITTEN 1997, S. 708 f), die jedoch für die Antarktische Halbinsel nicht verfügbar sind. Zum einen reduziert sich durch die Anwendung des Centerline-Ansatzes die Anzahl der Fehlerquellen, zum anderen zeigten HALL ET AL. (1995, S. 133 f) und PAUL (2001, S. 44 ff), dass man bei der Kartierung der Schneebedeckung oder von Gletscheroberflächen auch ohne die Durchführung einer Atmosphärenkorrektur zu zufrieden stellenden Resultaten kommen kann. Im Vergleich zu atmosphärisch korrigierten Daten oder Feldmessungen kommt es hierbei jedoch zur Unterschätzung der Reflektanzwerte (HALL ET AL. 1990, S. 493 ff).

Die Antarktische Halbinsel liegt unter ständigem Einfluss der Polarfront mit ihrem hohen Aufkommen von Zyklonen, dadurch herrscht ein ganzjähriger starker Bewölkungsgrad vor. Passive Satellitensensoren, die im sichtbaren Bereich, im nahen oder thermalen Infrarot des elektromagnetischen Wellenlängenbereichs aufzeichnen, unterliegen dem Einfluss der Bewölkung (ALBERTZ 2007, S. 16). Es ist daher wichtig für

die Beobachtung von Oberflächenparametern, dass die Bewölkung detektiert und ausmaskiert wird und damit nur wolkenfreie Flächen untersucht werden. Zu diesem Zweck wird in der vorliegenden Arbeit das MODIS Cloud Mask-Produkt (MOD 35 L2) verwendet (Kapitel 4.2).

5.1.1 Geometrische Korrektur

Der Erste Schritt der geometrischen Korrektur von MODIS-Daten ist die Korrektur des **„Bowtie-Effekts“**. Er wird für das MOD02-, wie auch für das MOD35 L2-Produkt korrigiert. Durch die große Breite des MODIS Aufnahme-Swaths mit einer Breite von 2330 m (oder: ± 55° geographischer Länge) kommt es in den Randbereichen der Szenen zu großen perspektivischen Verzerrungen und redundanter Bildinformation durch Überlagerung der einzelnen, perspektivisch verzerrten, Scanzeilen des MODIS-Sensors (Abbildung 5.2). Der Bowtie-Effekt nimmt mit dem Abstand vom Nadir zu. An der Nadirposition des Sensors hat der MODIS-Scan eine Länge von 10 km, an den Rändern etwa 20 km. Erkennbar wird der Effekt ab einem Scanwinkel von 15° (LIU ET AL. 2008, S. 663).

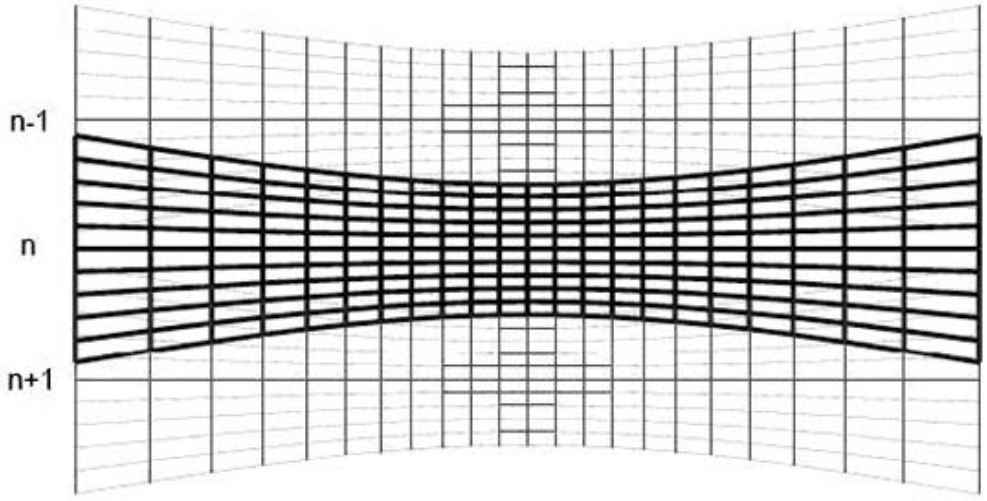


Abbildung 5.2: *Bowtie-Effekt für drei aufeinander folgende MODIS-Scans (n-1, n, n+1). Der zweite Scan (n) ist hervorgehoben (LIU ET AL. 2008, S. 663).*

Der Bowtie-Effekt wird mit dem MRTSwath-Tool für alle in dieser Arbeit verwendeten Bildprodukte ausgeglichen indem die perspektivische Verbreiterung der Scan-Zeile zum Rand der Aufnahme hin als eine Funktion des zunehmenden off-nadir-Scanwinkels angenommen und so die redundante Bildinformation herausgerechnet wird (URL 1).

Der zweite notwendige Schritt der Vorprozessierung von MODIS-Daten, die **Georeferenzierung**, muss nicht wie beispielsweise für Radardaten bisher in IceTools manuell vorgenommen werden, sondern läuft in IceTools1.1 für MODIS-Daten automatisch durch die Ausführung des MODIS-Imports ab. Sie wird für alle

verwendeten MODIS-Bildprodukte durchgeführt und wird in MRTSwath unter Verwendung einer MODIS Geolocation-Datei, die zum selben Zeitpunkt wie die zu prozessierende MODIS Szene aufgenommen sein muss, umgesetzt. Die Geolocation Datei ist als ergänzender Datensatz zum L 1B calibrated radiances Produkt (MOD02) entwickelt worden und enthält für jedes 1000 m MODIS Pixel geodätische Koordinaten, Höhenlage, eine Land/Meer-Maske sowie Zenith- und Azimutwinkel der Sonne und des Satelliten (KING ET AL. 2003, S. 68). Sie dient hier ebenfalls zur Georeferenzierung des MOD 35 L2 Produkts.

Als Resampling-Methode wird das Nearest Neighbor-Verfahren verwendet, da es die ursprünglichen Grauwerte aus dem Eingabebild beibehält und dies für die multispektrale Klassifikation der Szene Voraussetzung für ein exaktes Ergebnis ist (ALBERTZ 2007, S. 102). Es wird aus diesem Grunde ein visuell weniger scharfes Ausgabebild in Kauf genommen.

Die MODIS-Daten müssen aus dem HDF-Format (Hierarchical Data Format) in ein für die Bildbearbeitungssoftware kompatibles Format gespeichert werden. Die Radianzbilder (MOD02) werden in MRTSwath im GeoTiff-Format, das direkt in ERDAS-Imagine gelesen werden kann, abgespeichert. Die Wolkenmaske dagegen zur weiteren Vorprozessierung im Raw Binary-Format (*.hdr).

Für multitemporale Analysen von Satellitendaten sowie für GIS-Anwendungen, bei denen das Bildmaterial vergleichbar sein sollte, müssen alle Szenen in der gleichen Kartenprojektion vorliegen (PAUL 2003, S. 41). Aus diesem Grunde und zur besseren visuellen Interpretierbarkeit werden alle verwendeten MODIS-Produkte in MRTSwath in die Antarktische Polar Stereographische Projektion projiziert.

Die einzelnen Schritte der Vorprozessierung werden zur Automatisierung in MRTSwath-Parameterfiles und ERDAS-Batchfiles geschrieben, die im späteren Ablauf auch automatisch mit Bezug auf die aktuell zu prozessierende MODIS-Szene angepasst werden.

5.1.2 Aufbereitung des MODIS Cloud Mask Produkts

Das Cloud Mask Produkt besteht aus den in Kapitel 4.2 beschriebenen neun Scientifc Data Sets (SDS), von denen das Cloud Mask SDS die Wolkeninformation mit 48 Bit enthält.

Dieses 48 Bit große Array gliedert sich in sechs Bytes. Das erste Byte ist für diese Arbeit das wichtigste. Es enthält Information darüber, ob Wolkeninformation vorliegt, und wie stark das Blickfeld des Sensors von Wolken bedeckt ist. Zusätzlich enthält es Angaben über Tag- oder Nachtaufnahme, spiegelnde Reflexion, Schnee- oder Eis Untergrund sowie verschiedene Oberflächentypen (Tabelle 5.2). Von den restlichen fünf Bytes enthalten drei zusätzliche Informationen in 1 km Auflösung und zwei in 250 m Auflösung (Tabelle 4.5).

Tabelle 5.2: *Belegung der einzelnen Bits des für die Anwendung der Wolkenmaske in dieser Arbeit relevanten Bytes (URL 3).*

Cloud_Mask Bit-Field Interpretation		
Byte #0 (1km Cloud Mask & Processing Path Flags)		
Bits	Field Description	Bit Interpretation Key
0	Cloud Mask Flag	0 = Not Determined 1 = Determined
1-2	Unobstructed FOV Quality Flag	0= Confident Cloudy 1 = Probably Cloudy 2 = Probably Clear 3 = Confident Clear
3	Day/Night Flag	0 = Night 1 = Day
4	Sunglint Flag	0 = Yes 1 = No
5	Snow/Ice Background Flag	0 = Yes 1 = No
6-7	Land/Water Background Flag	0=Water 1=Coastal 2=Desert 3=Land

Um unter den verfügbaren Parametern an die benötigte Information im Cloud Mask Bitfeld zu gelangen, die Aufschluss über die Bewölkung in verschiedenen Bewölkungsklassen gibt, wird nur das erste Byte des Cloud Mask-Bitfelds in ERDAS-Imagine importiert und weiter prozessiert.

(1) Der **Import in ERDAS Imagine** läuft über das Import- Modul und dort über den Generic Binary Import-Dialog (Abbildung 5.4). Da die Wolkenmaske vorher im Binären Format gespeichert wurde, stehen für den Import nun die notwendigen Optionen zur Verfügung. Das im Generic Binary Import-Dialog zu wählende Datenformat ist „Band interleaved by Pixel“ (BIP). Dies bedeutet, dass die Spektralinformation aller Bänder in je einem neuen Pixel gespeichert und diese Pixel dann wieder in der ursprünglichen Zeilenabfolge angeordnet werden (LEICA GEOSYSTEMS 2005, S. 19). Der Datentyp wird als ‚1 bit unsigned’ angegeben, damit für die weiteren Operationen auf die einzelnen Bits zugegriffen werden kann.

    Die Anzahl der Zeilen und Spalten der aktuellen MODIS-Szene wird aus der Header-Datei (.hdr), welche in MRTSwath erzeugt wurde, entnommen (Abbildung 5.3). Es werden acht Ausgabebänder gewählt, damit jedem Bit des importierten Bytes ein eigener Kanal zugeordnet wird und man später auf jeden einzeln zugreifen kann. In dieser Arbeit sollen nur komplett wolkenfreie Pixel für die Klassifikation verwendet werden, also werden aus dem importierten Byte nur Bit 2 und 3 benötigt. Wenn Bit 2 und Bit 3 beide auf ‚true’ oder ‚1’ stehen, liegt ein

wolkenfreies Pixel mit der Angabe „Confident Clear“ vor (Tabelle 5.2). Dieser Vorgang wird zur Automatisierung in ein ERDAS-Batchfile geschrieben.

(2) Es ist eine **Anpassung des Kartenmodells** notwendig, denn in ERDAS- Imagine werden, um die genaue geographische Lage der Pixel festzulegen, jeweils die Koordinaten des oberen linken Eckpixels des Datensatzes benötigt. Da die Schreibweise in den einzelnen Dateiformaten unterschiedlich ist, müssen diese für die Verarbeitung in ERDAS-Imagine angepasst werden. ERDAS-Imagine und GeoTiff haben die gleiche Notation, nämlich die Koordinaten der Mitte des Eckpixels. Für die Wolkemaske müssen die Koordinaten angepasst werden, denn im binären Rohformat wird die obere linke Ecke des Eckpixels angegeben. Die Anpassung der Koordinaten wird in ERDAS-Imagine im „Image Command Tool“ durchgeführt. Die Koordinaten Informationen liefert die HDR-Datei der Wolkenmaske. Der Prozess wird für die automatisierte Prozessierung ebenfalls in ein ERDAS-Batchfiles geschrieben.

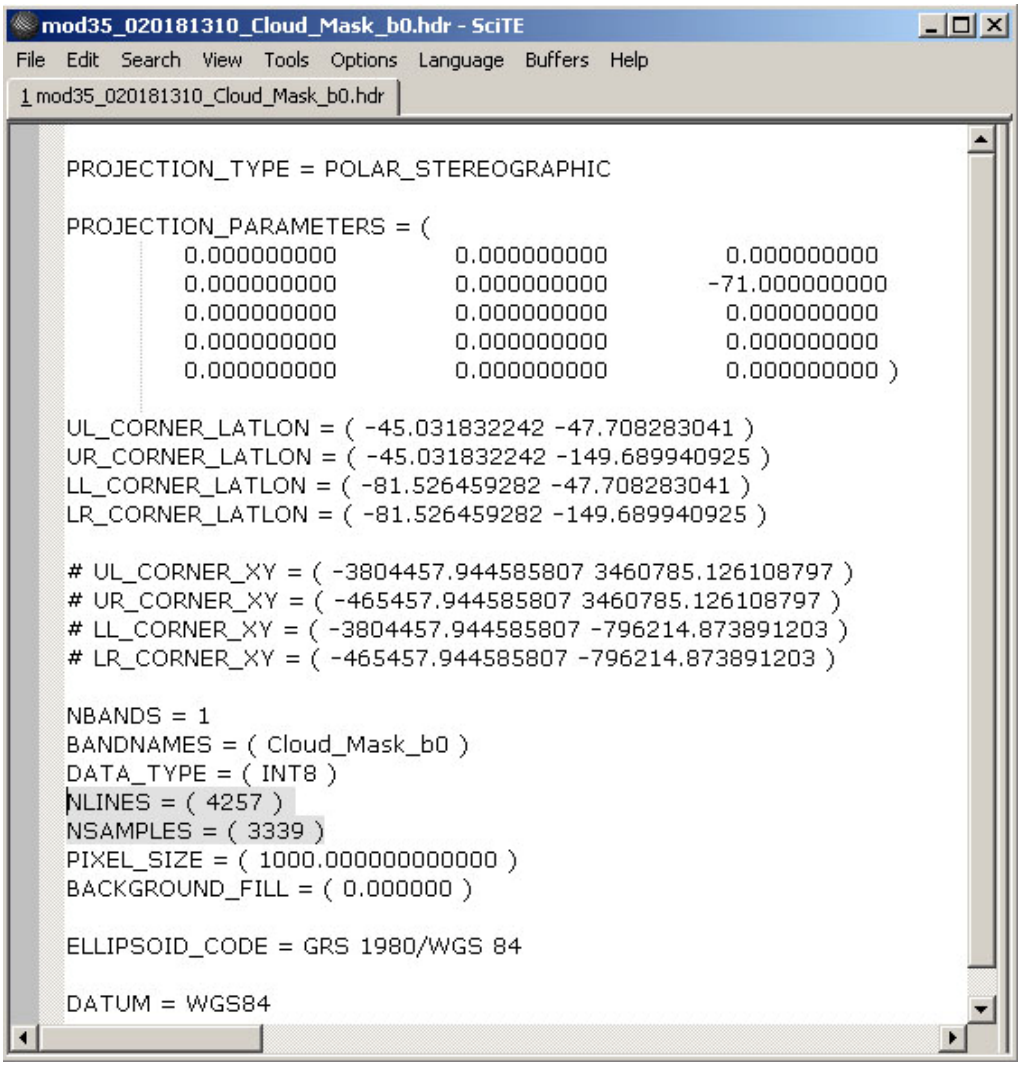


Abbildung 5.3: *Header-Datei (*.hdr), die von MRTSwath ausgegeben wird und Metadaten zu der bearbeiteten MOD35-Szene enthält, welche für den Import in ERDAS und die Anpassung der Notierung der Eckkoordinaten benötigt wird.*

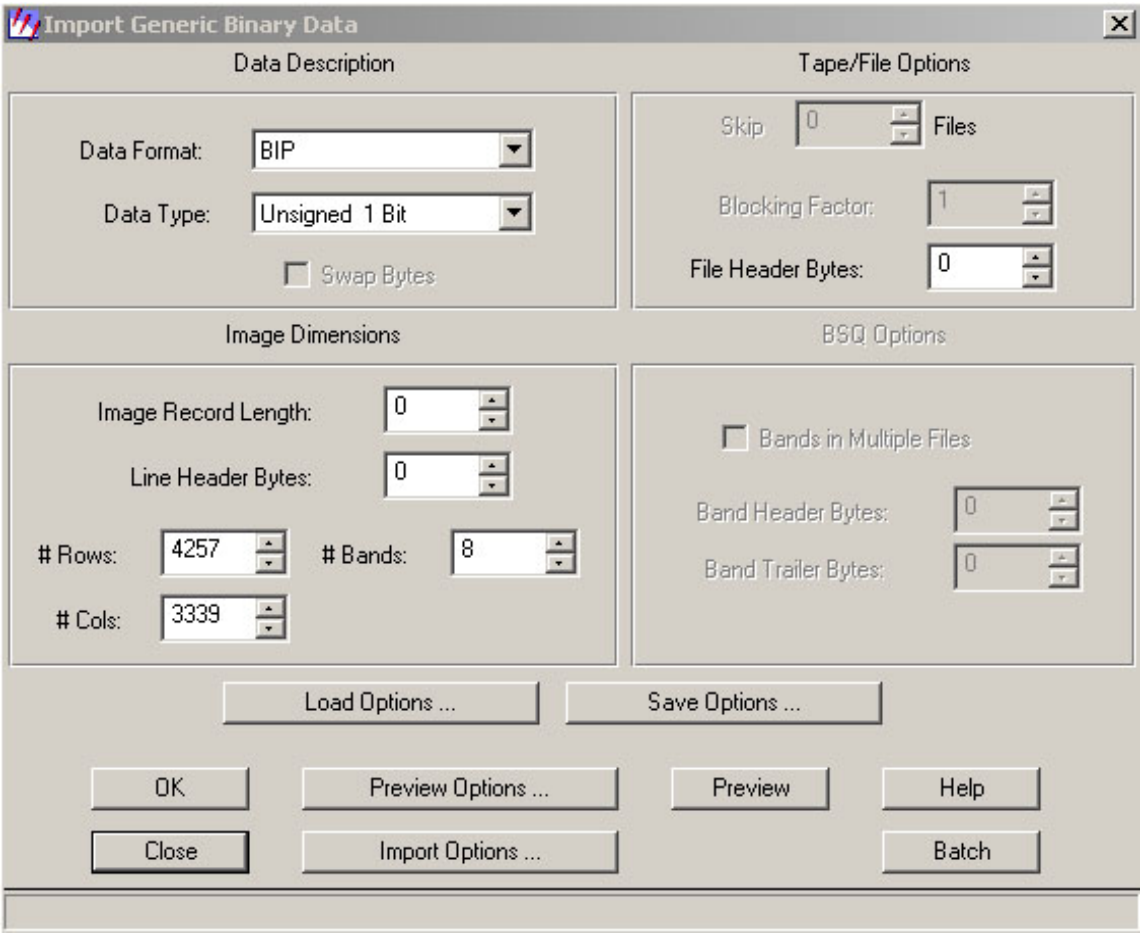


Abbildung 5.4: *Dialogfenster für den Import des MOD35-Produkts in ERDAS mit den vorgenommenen Einstellungen.*

5.2 Reflexionsverhalten von Schnee- und Eisflächen

Schneeflächen weisen sehr hohe Rückstreuwerte im sichtbaren Wellenlängenbereich (0,4-0,65 µm) auf. Das lässt sich auf die große Absorptionslänge von elektromagnetischer Strahlung in diesen Wellenlängenbereichen von 10 m zurückführen. Beim Durchgang durch eine zwei Meter mächtige Schneedecke besteht demnach eine vernachlässigbar geringe Chance für ein Photon absorbiert zu werden. Es wird an den häufigen Eis-Luft- und Luft-Eis-Übergängen in der Schneedecke dagegen aus ihr nahezu vollständig und über das ganze sichtbare Spektrum heraus reflektiert, da sich die Reflexionseigenschaften von Eis im sichtbaren Bereich nicht signifikant unterscheiden (REES 2006, S. 105). Im sichtbaren Wellenlängenbereich können Unreinheiten in der Schneedecke wie Gesteinsmehl oder vulkanische Asche die Rückstreuung abschwächen. Im nahen und mittleren Infrarot (0,7-3,0 µm) dagegen bestimmt die Korngröße der Schneekristalle die Rückstreuung (KÖNIG ET AL. 2001, S. 3; HALL & MARTINEC 1985, S. 1), denn dort hat Eis einen hohen Absorptionsgrad und die Reflektanz von Schnee hängt fast ausschließlich von der Schneekorngröße ab (WISCOMBE & WARREN 1980, S. 2721).

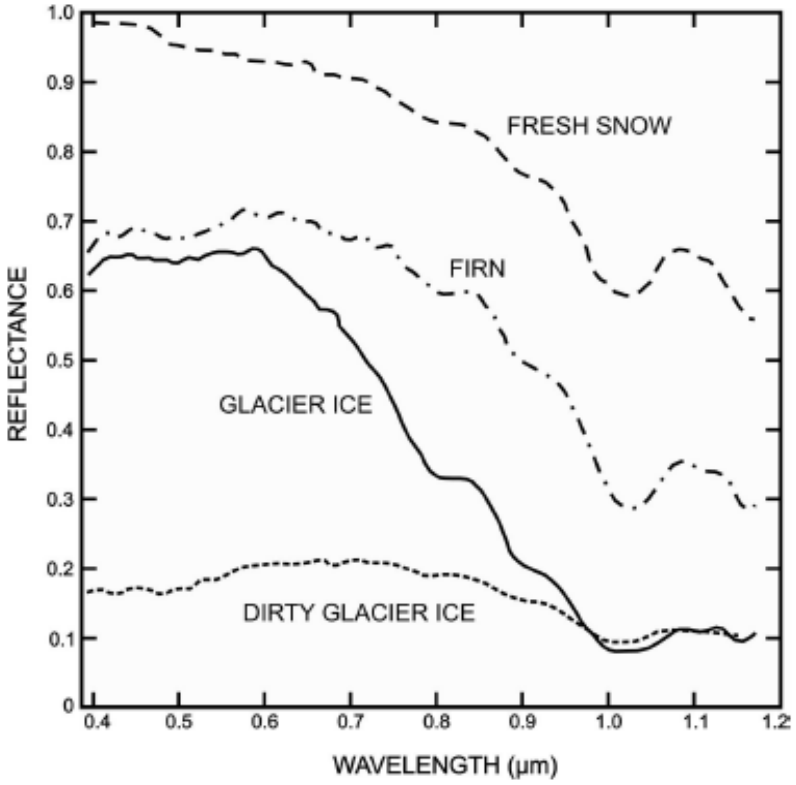


Abbildung 5.5: *Spektrale Reflektanzkurven für frischen Schnee, Firn und Eis nach ZENG ET AL. (1984, S. 454).*

Mit zunehmendem Alter der Schneedecke und durch einsetzende Metamorphose, nimmt die Rückstreuung durch das Wachstum der Schneekristalle aufgrund von Schmelz-Gefrierprozessen ab (KÖNIG ET AL. 2001, S. 3). Flüssigwassergehalt in der Schneedecke senkt die Albedo dieser, da Hohlräume zwischen den Schneekristallen ausgefüllt werden und Wasser für Wellenlängen unter 5µm einen ähnlichen Brechungsindex besitzt wie Eis. Wasser in der Schneedecke vergrößert die effektive Korngröße der Schneekristalle und senkt dadurch ebenfalls die Albedo (WINTHER & HALL 1999, S. 3003). Die größte Abhängigkeit der Reflektanz einer Schneedecke von der Korngröße tritt bei Wellenlängen zwischen 1,0 - 1,3 µm (DOZIER 1989B, S. 210) auf. Außerdem gilt, dass die Rückstreuung mit zunehmender Korngröße abnimmt (Abbildung 5.6).

Schnee- und Eisflächen sind anisotrope Reflektoren (WISCOMBE & WARREN 1980, S. 2712; KNAP & REIJMER 1998, S. 93), d.h. die reflektierte Strahlung ist nicht in alle Richtungen gleich und abhängig von der eingehenden Strahlung. Daraus entsteht in der Satellitenfernerkundung das Problem, dass die am Sensor aufgezeichnete Strahlung nur einem Teil der reflektierten entspricht und die ankommende Strahlung je nach Sonnenstand und Position des Sensors unterschiedlich ausfällt. Der Effekt der Anisotropie von Schnee und Eis ist im nahen Infrarot stärker, mit einem Peak der Streuung in Vorwärtsrichtung (KNAP & REIJMER 1998, S. 102). DOZIER & PAINTER (2004, S. 485) haben gezeigt, dass die Variabilität des hemispherical-directional

reflection factor (HDRF) für Sensoren mit nadirnahen Scanwinkeln (near-nadir Sensoren) vernachlässigbar ist. Es ist auch bei MODIS-Daten möglich die Korrektur für die Anisotropie zu vernachlässigen, wenn die Beobachtungen sich in einem nadirnahen Bereich mit Scanwinkeln von 0-20° off nadir befinden (MASAHIRO ET AL. 2008, S. 53). Diese Bedingung wird in der vorliegenden Arbeit, dadurch erfüllt, dass nur MODIS-Szenen mit einer nadirnahen Lage der Antarktischen Halbinsel verwendet werden (Kapitel 4).

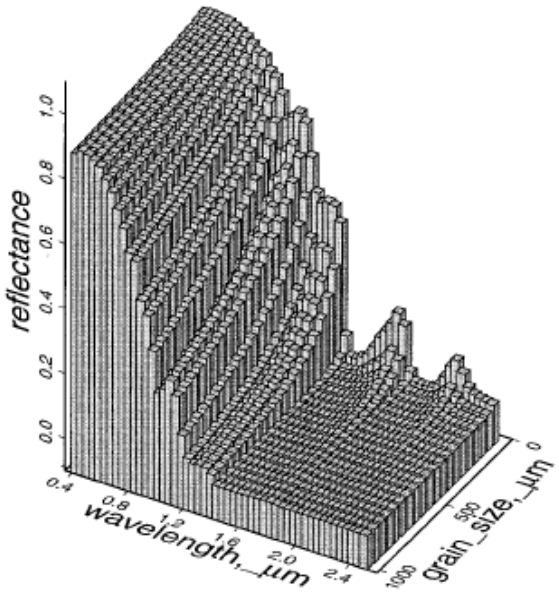


Abbildung 5.6: *Spektrale Reflektanz von Schnee im Bereich 0,4-2,5 µm in Abhängigkeit von der Korngröße (NOLIN & DOZIER 1993, S. 233). Zu erkennen ist der starke Abfall der Reflektanz bei zunehmender Korngröße im Bereich von 0,7-1,3 µm.*

5.3 Klassifikation von Gletscherzonen mit MODIS-Daten

In diesem Kapitel werden das Vorgehen bei der Abgrenzung von Gletscherzonen mit Daten des MODIS Sensors und die Charakteristika dieser Zonen behandelt.

5.3.1 Das Klassifikationsverfahren

Zur Ermittlung der MODIS-Gletscherzonen wird ein normalisierter Index von 2 Bändern verwendet, der einen Teilschritt des Klassifikationsmodells darstellt. Normalisierte Indizes haben den Vorteil gegenüber einkanaligen Rückstreuwerten, dass sie physikalische Parameter in der Szene wie Beleuchtungsverhältnisse oder Hangneigung ausgleichen (LILLESAND & KIEFER 2004, S. 531 f). Die Grenzen zwischen den einzelnen Fazies werden über Schwellenwerte für jede Klasse, d.h. mit einem überwachten Klassifikationsverfahren, nach FAUSTO ET AL. (2007, S. 36) ermittelt. Diese Schwellenwerte sind auf Grönland zur Klassifikation mit MODIS-Daten angewandt und durch visuellen Vergleich zwischen MODIS-, ASTER- und QuikSCAT-

Daten und Feldmessungen validiert worden (FAUSTO ET AL., 2007, S. 36 f). Zur Klassifikation werden die MODIS-Produkte MOD021KM, MOD03 und MOD35_L2 verwendet. Da die Abhängigkeit der Reflektanz von der Korngröße im Wellenlängenbereich 1,0-1,3 µm (NOLIN & DOZIER 1993, S. 232 f) am größten ist, wird für die Unterscheidung der Gletscherzonen das MODIS-Band 5 (1,23-1,25 µm) im nahem Infrarot und das MODIS-Band 10 (0,483-0,493 µm) im sichtbaren Wellenlängenbereich für die Bildung des normalisierten Indexes verwendet (FAUSTO ET AL. 2007, S. 36), der wie folgt errechnet wird:

$$T = \frac{\text{band } 10 - \text{band } 5}{\text{band } 5 + \text{band } 10}$$

Das Ratio *T* kann Werte von -1 bis +1 annehmen. Um Fehlwerte des Ratios zu vermeiden wird im Klassifikationsmodell das zu klassifizierende Pixel, falls der Nenner des Ratios Null ist, als Fehlpixel gewertet und geht nicht in die Klassifikation ein.

Die Schwellenwerte nach FAUSTO ET AL. (2007, S. 36) sind wie folgt gegeben:

$T(1) < 0{,}8$ = Trockenschnee

$0{,}8 < T(2) < 0{,}88$ = Nassschnee

$T(3) > 0{,}88$ = Blankeis

Durch Anwendung der MODIS-Wolkenmaske werden wolkenfreie Flächen eindeutig identifiziert, und es werden nur wolkenfreie Bereiche klassifiziert.

5.3.2 Das Klassifikationsmodell

Das Modell zur Klassifikation von Gletscherzonen mit MODIS-Daten wurde im ERDAS-Modeler erstellt und zur Einbindung in den Klassifikationsalgorithmus in der Spatial Modeler Language (SML) als Skript-Modell abgefasst.

Es gliedert sich in die folgenden Schritte:

(1) Berechnung des Ratiobildes aus den MODIS-Bändern 5 und 10 anhand des normalisierten Indexes nach FAUSTO ET AL. (2007, S. 36). Wenn der Nenner des Ratios gleich Null ist, wird ein Fehlwert ausgegeben.

(2) Ermittlung der Klassen der Gletscherzonen über die Schwellenwerte nach FAUSTO ET AL. (2007, S. 36). Unter Verwendung des RAMP DHM werden Pixel der Blankeisklasse über 500 m ü. NN, da schattige Pixel, verursacht von Bewölkung oder der Topographie, auf Schneeoberflächen zu einer Falschklassifikation als Blankeis führen können (BÖRESJO-BRONGE & BRONGE 1999, S. 237 ff).

(3) Elimination der bewölkten Pixel über die MODIS-Wolkenmaske (MOD35_L2) durch Zuordnung eines Fehlwerts für bewölkte Pixel und Ausgabe des klassifizierten Bildes.

5.3.3 Erkennung von Gletscherzonen in MODIS-Bildern

Mit Daten des MODIS-Sensors können grundsätzlich dieselben Zonen auf Gletschern ermittelt werden wie sie ARIGONY NETO (2006, S. 80 ff) mit Landsat TM/ ETM+ oder Terra ASTER-Daten klassifiziert hat, da MODIS ebenfalls ein optischer Sensor ist. Unterschiede ergeben sich lediglich in der räumlichen und zeitlichen Auflösung (Kapitel 3.3.2). Für die Klassifikation von Gletscherzonen sind Aufnahmen im sichtbaren und infraroten Bereich der elektromagnetischen Strahlung geeignet (HALL ET AL. 1987, S. 107 f und 1988, S. 311 ff; KÖNIG ET AL. 2001, S. 2 ff; HEISKANEN ET AL. 2003, S. 34 ff; FAUSTO ET AL. 2007, 36 ff; WILLIAMS ET AL 1991, S. 123). Sie können in drei Hauptzonen unterteilt werden. Dabei wird die Benennung als MODIS-Gletscherzonen für diese Arbeit verwendet. Sie stützt sich auf die optischen Gletscherzonen nach ARIGONY NETO (2006, S. 80 ff):

(1) MODIS-Trockenschneezone (MTZ),

(2) MODIS-Nassschneezone (MNZ) und

(3) MODIS-Blankeiszone (MBZ).

Es muss hier festgehalten werden, dass sich die Gletscherzonen, wie sie mit MODIS oder auch mit anderen optischen Sensoren klassifiziert werden, anders als die klassischen Gletscherzonen nach PATERSON (1994, S. 10) definieren. Die Gletscherzonen im klassischen Sinne beziehen sich auf das gesamte Volumen der Schneedecke am Ende der Ablationsperiode, wohingegen die MODIS-Gletscherzonen aufgrund der optischen Eigenschaften der Eiskristalle nur eine oberflächliche Klassifikation der obersten 10 bis 20 cm der Schneedecke darstellen (WISCOMBE & WARREN 1980, S. 2714) darstellen. Aufgrund dieser Tatsache unterliegen die MODIS-Gletscherzonen jahreszeitlichen Schwankungen, welche durch örtliche Wetterbedingungen verursacht sind. Durch Neuschneefall können beispielsweise die realen Ausmaße der Gletscherfazies kurzfristig verfälscht werden (KÖNIG ET AL. 2001, S. 12 f). Dies ist ein generelles Problem in der optischen Fernerkundung, da es das jahreszeitliche Beobachtungsfenster zur Bestimmung der Ausmaße von Gletscherzonen und deren Grenzen an einen engen Zeitraum am Ende des Sommers bindet (KÖNIG ET AL. 2001, S. 13).

Die Lage der Grenzen zwischen optischen Gletscherzonen kann trotz alledem als Proxy für die Massenbilanz eines Gletschers und die aktuellen meteorologischen Bedingungen zum Aufnahmezeitpunkt heran gezogen werden (WILLIAMS ET AL. 1991, S. 120).

5.3.4 MODIS-Trockenschneezone

Die MTZ ist das Gebiet auf einem Gletscher, das zum Aufnahmezeitpunkt von frisch gefallenem Schnee oder schwach metamorphosiertem Schnee bedeckt ist (ARIGONY NETO 2006, S. 81). Sie ist charakterisiert durch hohe Rückstreuwerte im sichtbaren und nahen infraroten Wellenlängenbereich. Im mittleren Infrarot treten in dieser Zone, verursacht durch den hohen Absorptionsgrad von Eis in diesen Wellenlängenbereichen (DOZIER 1989A, S. 14 f), niedrige Rückstreuwerte auf. Das Ratio aus den MODIS-Bändern 5 und 10 weist in der Trockenschneezone aufgrund der relativ kleinen Spanne zwischen der Rückstreuung von Trockenschnee im sichtbaren- und nahen Infrarotbereich (Abbildung 5.5), die geringsten Werte von $T < 0{,}8$ auf (FAUSTO ET AL. 2007, S. 36).

Die Trockenschneelinie kann mit Daten des MODIS-Sensors und anderer optischer Sensoren nicht ermittelt werden, denn ihre Festlegung geht aus dem Zustand des kompletten Volumens der Schneedecke hervor und setzt die Erkennung von Vorhandensein oder Fehlen geringfügiger Schmelzvorgänge innerhalb dieser voraus (WILLIAMS ET AL. 1991, S. 126). Die hier als Grenze zwischen Nass- und Trockenschnee ermittelte „optische Trockenschneelinie“ entspricht der dynamischen Nassschneelinie (Abbildung 3.1).

5.3.5 MODIS-Nassschneezone

Die MNZ umfasst nach ARIGONY NETO (2006) die Bereiche des Gletschers, in denen die Schneedecke durch regelmäßige Schmelz- und Wiedergefrierprozesse stark metamorphosiert ist. Sie schließt Firn und die „Slush-Zone“ (HALL ET AL. 1987, S. 106), welche den wassergesättigten Übergangsbereich zwischen Blankeis und Nassschnee darstellt mit ein. Hier ist flüssiges Wasser in der Schneedecke vorhanden. Wasser hat zwar keinen direkten Einfluss auf die Rückstreuung, trägt jedoch zum Wachstum der Eiskristalle bei und verursacht dadurch geringere Rückstreuwerte (WISCOMBE & WARREN 1980, S. 2713; PAINTER ET AL. 1998, S. 321). Der Bestimmung der Nassschneelinie nach PATERSON (1994), wird die komplette Schneedecke des vorangegangenen Winters und ihr Durchfeuchtungszustand zugrunde gelegt. Diese Nassschneelinie markiert in Gletscherfließrichtung das untere Ende der Perkolationszone (Abbildung 3.1), die mit optischen Sensoren nicht erkannt werden kann. Mit optischen Daten kann jedoch oberflächlich eine dynamische Nassschneelinie (transient wet-snow line) detektiert werden, die sich aus dem Rückstreusignal der oberen 10-20 cm der Schneedecke ableitet (WISCOMBE & WARREN 1980, S. 2714) und sich deswegen von der Nassschneelinie nach PATERSON (1994) unterscheidet (WILLIAMS ET AL. 1991, S. 125). Sie bildet die Grenze zur MTZ. Das berechnete Ratio (Abschnitt 5.3.1) weist in dieser Zone mittlere Werte zwischen $T = 0{,}8$ und 0,88 auf (FAUSTO ET AL. 2007, S. 36) auf.

5.3.6 MODIS-Blankeiszone

Die MBZ schließt die, von PATERSON (1994) definierte Blankeiszone und die überlagerte Eiszone ein, die zusammen das Ablationsgebiet des Gletschers bilden. In dieser Zone können noch kleine Firnfelder oder Bereiche nassen Schnees sowie schuttbedeckte Eisbereiche vorkommen (HALL ET AL. 1988, S. 316). Die Grenze dieser Zone zur MNZ wird durch die Schneelinie gebildet (Abbildung 3.1). Die Rückstreuwerte in der MBZ sind im sichtbaren Wellenlängenbereich geringfügig niedriger als in der Nassschneezone, im nahen Infrarot liegen sie jedoch deutlich niedriger (Abbildung 5.5). Dadurch bedingt liegen die Werte des Ratios hier bei $T > 0{,}88$.

5.4 Der Centerline-Ansatz

Auf der Antarktischen Halbinsel nördlich von 70° S liegen insgesamt 560 Gletscher. Momentan sind aber nur wenige davon, aufgrund des damit verbundenen hohen logistischen Aufwands, glaziologisch erforscht. Zudem sind diese Studien regional ungleich verteilt. Dem gegenüber steht, dass eine große Anzahl verschiedener Satellitendaten für die Antarktische Halbinsel vorliegt (ARIGONY NETO 2006, S. 27) und nicht zuletzt bietet das MODIS-Projekt kostenlosen Zugang zu zeitlich hoch aufgelösten Daten. Um die Informationen zu glaziologischen Parametern auf den Gletschern der AH zu erschließen, wurde von SAURER & GOSSMANN (2002) und ARIGONY NETO ET AL. (2006) eine neue Methode zur Prozessierung von Satellitendaten und der Ermittlung von Gletscherparametern, der „Centerline-Ansatz“, eingeführt. Optische Daten weisen zum einen geometrische Verzerrungen auf, die bei Nadir orientierten Sensoren (MODIS) durch die Entfernung von der Nadirlinie vor allem in den Randbereichen der Szene auftreten. Zum anderen kommt es zu unterschiedlichen Rückstreuwerten durch die Topographie, Bereiche in denen Übersättigung auftritt oder schattige Bereiche mit geringer Rückstrahlung, da die von optischen Sensoren aufgezeichnete Strahlung stark von der Geometrie zwischen Sonne, Oberfläche und Satellit abhängt (DOZIER & PAINTER 2004, S. 484 f). Diese Fehlerquellen erschweren die Klassifikation eines gesamten Gletschereinzugsgebiets, deshalb ist eine Reduzierung der zu klassifizierenden Fläche für die automatische Prozessierung von Vorteil (ARIGONY NETO 2006, S. 27 f).

Zur Klassifikation von Gletscherzonen wird beim Centerline-Ansatz nicht das ganze Gletschereinzugsgebiet herangezogen, sondern man beschränkt sich auf die zentralsten Bereiche des Gletschers. Um die so genannte Centerline, eine zentrale Fließlinie des Gletschers, wird eine Bufferzone von 600 m erzeugt, die sich Centerlinebild nennt. Anstelle der ganzen Szene wird nur noch das Centerlinebild prozessiert, was für hoch auflösende Sensoren den Zeitaufwand der Bearbeitung reduziert. Die Centerlines werden im Weiteren zur Extraktion der Grenzen zwischen den Gletscherfazies genutzt. Die gewonnene Verteilung der einzelnen Gletscherzonen wird als repräsentativ für den gesamten Gletscher angenommen und in die AntPenDB

eingespeist (ARIGONY NETO 2006, S. 28). Indem das Centerlinebild zur Klassifikation benutzt wird, werden die Randbereiche des Gletschers, die durch starke Topographie und Schattenwurf Fehlwerte liefern könnten, nicht mit in die Analyse einbezogen, und die Güte der Klassifikation wird erhöht. ARIGONY NETO (2006, S. 32) ermittelte bei der Prozessierung einer Landsat ETM+ Szene einen Anteil von Fehlklassifikationen durch die Analyse des gesamten Gletschereinzugsgebiets von 26,18 % (Abbildung 5.7 c) und nur 9,12% bei Analyse der Centerline (Abbildung 5.7 d).

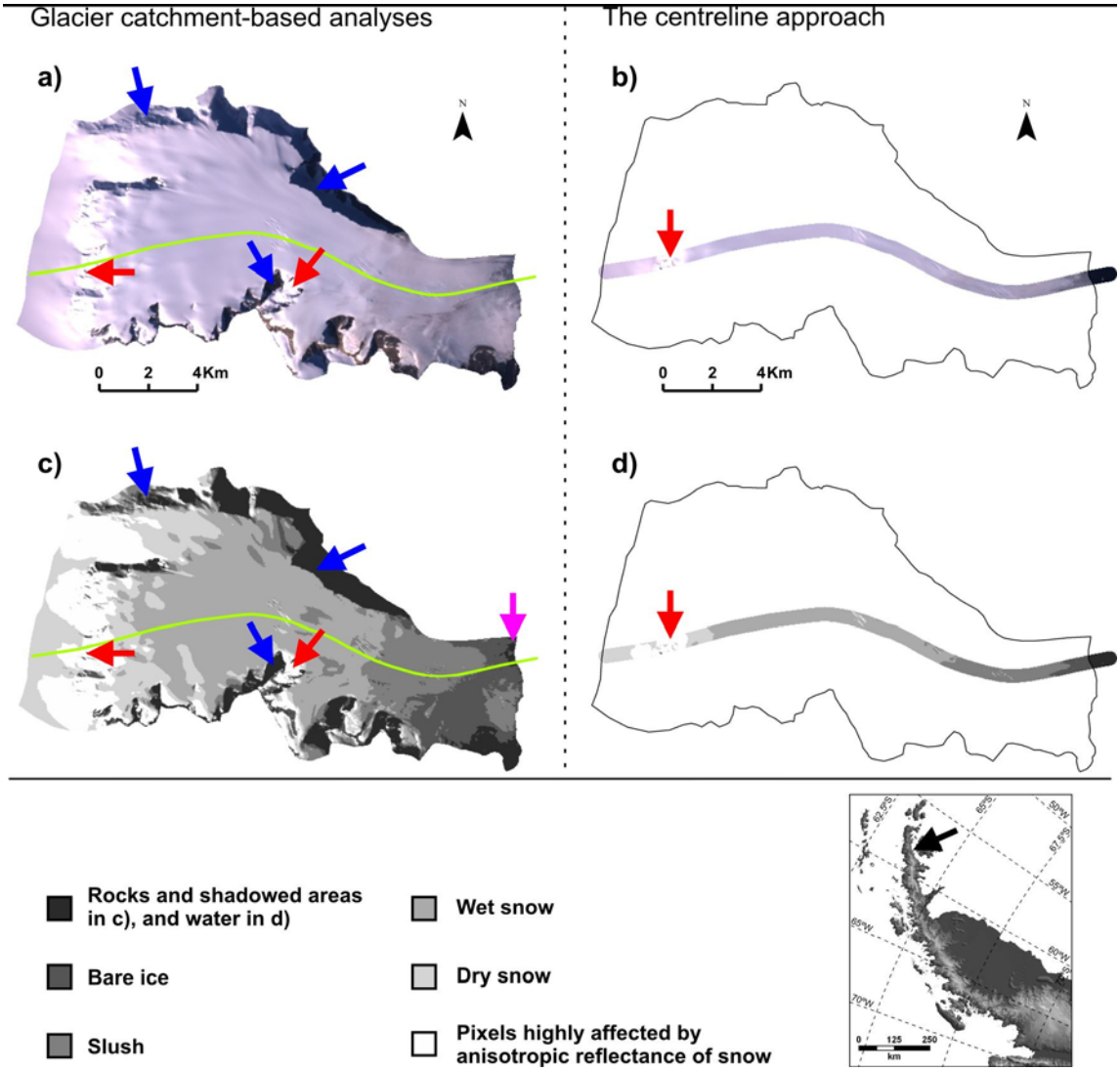


Abbildung 5.7: *Das Gletschereinzugsgebiet des Victory Gletschers in einer Landsat ETM+ Szene (a und b) und Ergebnisse einer unüberwachten Klassifikation auf demselben Gletscher (b und c). a und c zeigen das ganze Einzugsgebiet, b und d nur die Bereiche der Bufferzone um die Centerline (grüne Linie). Rote Pfeile zeigen aufgrund topographischer Effekte gesättigte Bereiche (a, b) und entsprechende Klassifikationsfehler (c, d) an. Blaue Pfeile zeigen Schatten-bereiche (a) und daraus resultierende Fehlklassifikation (c). Magenta markiert Blankeispixel die als Felsen klassifiziert wurden (ARIGONY NETO 2006, S. 33).*

5.4.1 Anpassung des Centerline-Ansatzes an MODIS-Daten

Zur Prozessierung von MODIS-Daten wurde der Centerline-Ansatz nach SAURER & GOSSMANN (2002) in den Grundlagen übernommen und geringfügig angepasst. Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der verwendeten MODIS-Daten von 1000 m wird keine Bufferzone um die Centerline herum berechnet; es wird statt dessen nur mit der einfachen Centerline gerechnet. Ausserdem wird kein Centerlinebild erzeugt, sondern eine Punktcenterline, die entsprechend der MODIS-Auflösung aus Punkten auf der Centerline im Abstand von 1000 m besteht (Abbildung 5.8). Alle Pixel der MODIS Szene werden klassifiziert, was einen Rechenaufwand von nur wenigen Minuten bedeutet. Anschliessend werden an den Punkten der Punktcenterline die Klassen abgegriffen und die Grenzen zwischen diesen festgelegt. Beide Ergebnisse werden in der AntPenDB gespeichert.

Momentan liegt in der AntPenDB (IPG, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg) ein Set von 240 digitalisierten Centerlines (Arigony Neto 2006) für die Antarktische Halbinsel vor. Dieses wird für diese Arbeit zur Erstellung der Punktcenterlines herangezogen.

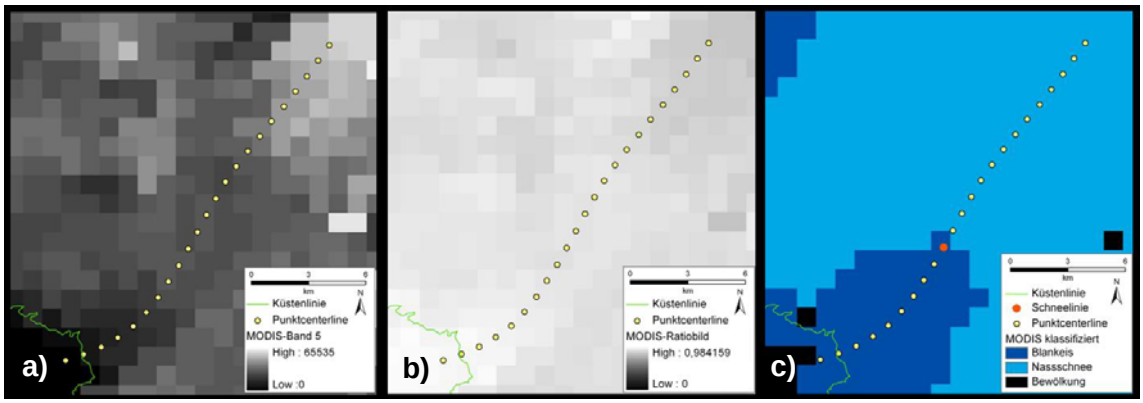


Abbildung 5.8: *Darstellung einer Punktcenterline mit einem Abstand von 1000 m zwischen den einzelnen Punkten im MODIS-Band 5 (a), im Ratiobild (b) und in einer klassifizierten MODIS-Szene (c). Band 5 weist für die Eisklasse niedrige und für Nassschnee ansteigende Werte auf, im Ratiobild kehrt sich dieses Verhältnis um (Quellen: NASA; Antarctic Digital Database (URL 14); AntPenDB).*

5.4.2 Potential und Grenzen des Centerline-Ansatzes

Der große Vorteil des Centerline-Ansatzes ist, dass die zu klassifizierenden Bereiche des Gletschers kleinräumig auf die Centerline eingegrenzt werden und damit die Einflüsse der Topographie auf die Rückstrahlung von Schnee- und Eisflächen minimiert werden. Damit umgeht man auch weitgehend den Einsatz eines hoch aufgelösten DHM zur Orthorektifizierung der Satellitenbilder. Die Vorprozessierung der Satellitendaten und die Klassifikation werden dadurch stark vereinfacht.

Schmale Talgletscher mit einer Breite unter 1000 m werden nicht analysiert, da sonst die geometrischen Verzerrungen durch das Gelände mit hinzukommen. Dies bedeutet jedoch auch, dass eine große Anzahl von rund 57 % aller Gletschern auf der Antarktischen Halbinsel nördlich von 70° S mit dem Centerline-Ansatz nicht analysiert werden kann und dass mögliche statistischen Analysen dadurch verfälscht werden (ARIGONY NETO 2006, S. 37).

Die mit dem Centerline-Ansatz ermittelten Gletscherzonen beschränken sich auf einen schmalen Bereich auf dem Gletscher und genügen damit nicht den Anforderungen internationaler Projekte zur Gletscherinventarisierung, wie etwa dem Projekt Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS), das auf Daten des gesamten Gletschereinzugsgebiets basiert.

5.5 Statistische Tests

Um die Abweichung der MODIS-Ergebnisse von den Ergebnissen aus der AntPenDB statistisch zu erfassen, wurden folgende statistische Tests mit der Statistik-Software SPSS, Version 15 durchgeführt (Abbildung 5.9). Die vorliegenden Daten sind metrisch und intervallskaliert.

(1) Mit dem **Shapiro-Wilk-Test** wurde auf eine bestimmte theoretische Verteilung, d.h. auf Normalverteilung, geprüft. Die Nullhypothese lautet: Die vorliegenden Stichprobenwerte stammen aus einer normal verteilten Grundgesamtheit. Dieser Test eignet sich für den vorliegenden Fall mit einer geringen Anzahl von Stichprobenwerten (6 und 7 Wertepaare pro Test).

(2) Bei Normalverteilung wurde ein **t-Test für gepaarte Stichproben** durchgeführt (BÜHL & ZÖFEL 2002, S. 110), denn die Stichproben (Höhen von MODIS und Höhen von ASTER) sind abhängig voneinander. Dabei wurde untersucht, ob die Höhen von Schneelinie und Trockenschneelinie für *einen* Gletscher und zwei unterschiedliche Aufnahmesysteme signifikant voneinander abweichen.

(3) Bei Fehlen einer Normalverteilung wurde der **Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test** (BÜHL & ZÖFEL 2002, S. 110) als nicht parametrischer Test angewandt, um die Signifikanz der Abweichung zwischen Schnee- und Trockenschneelinie bei unterschiedlichen Aufnahmesystemen zu überprüfen.

Eine Korrelation für die Ergebnisse des MODIS-Sensors und die von ASTER und SAR wurde nicht durchgeführt, da zu wenige Stichproben vorliegen um zu einer stichfesten Aussage zu kommen. Auch die Aussage die mit den Signifikanztests gemacht wird, ist aus dem oben genannten Grunde relativ schwach.

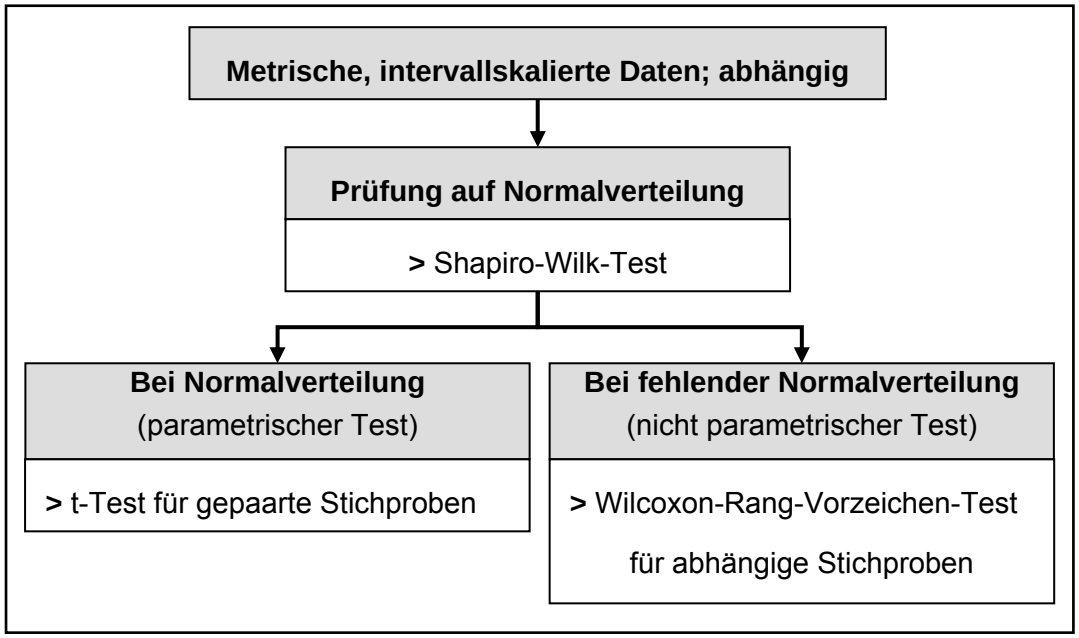


Abbildung 5.9: *Das Vorgehen bei den statistischen Auswertungen und die angewandten Testverfahren.*

5.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel stellt die, zur Klassifikation von Gletscherzonen mit MODIS-Daten verwendeten methodischen Grundlagen und Vorgehensweisen vor. Es wird gezeigt welche Vorprozessierungsschritte zur Verarbeitung von MODIS-Daten durchgeführt wurden und warum diese notwendig sind. Ausserdem wird auf die Charakteristika der Reflexion von Schnee- und Eisflächen eingegangen, welche die Erkennung von Gletscherzonen möglich machen. Das Verfahren der Klassifikation und das zentrale Klassifikationsmodell, über das die MODIS-Gletscherzonen definiert werden, sind ein wichtiger Teil dieses Kapitels. Zur halbautomatischen Prozessierung der MODIS-Daten kommt der leicht abgewandelte Centerline-Ansatz zum Einsatz. Schließlich werden die statistischen Methoden, die zur Auswertung der Klassifikationsergebnisse dienen, beschrieben.

6 KONZEPTION UND AUTOMATISIERUNG DER PROZESSIERUNGSKETTE FÜR MODIS-DATEN

In diesem Kapitel wird der Aufbau der Prozessierungskette, sowie die Automatisierung dieser beschrieben. Zur Prozessierung der MODIS-Daten wurde die Grundstruktur von IceTools beibehalten, jedoch um MODIS-spezifische Arbeitsschritte erweitert.

6.1 Die Prozessierungskette

Im Folgenden soll eine Übersicht über den Aufbau der Prozessierungskette gegeben und erläutert werden, wie die einzelnen Prozessierungsschritte in IceTools verknüpft werden. Bislang besteht das Programm IceTools aus den fünf großen Arbeitsschritten,

(1) Vorprozessierung der Satellitenbilder,

(2) Erstellung von Centerline-Bildern,

(3) Klassifikation von Gletscherfront und Gletscherfazies,

(4) Extraktion der Lage von Gletscherfront und Grenzen der Gletscherzonen und

(5) Evaluation der Klassifikationsergebnisse und Eingabe in die „Antarctic Peninsula glacier database“ (AntPenDB) (ARIGONY NETO 2006, S. 42).

Da MODIS-Bilder eine andere Bearbeitung benötigen, müssen für ihre Prozessierung nicht alle der oben genannten Arbeitsschritte durchgeführt werden.

So wird die Erstellung von Centerline-Bildern, anhand einer Bufferzone um die Centerline ausmaskierte Bildausschnitte, nicht durchgeführt. Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung des Sensors von 250-1000 m würde man dabei zu großflächige Bereiche ausmaskieren und damit die Vorteile des Centerline-Ansatzes der Datenreduktion und der Verringerung von Störfaktoren, wie die von Felsen in den Gletscherrandbereichen, zunichte machen. Bei der genannten Auflösung genügt es, ausschließlich mit der Centerline zu rechnen, da so schon eine genügend breite Fläche des Gletschers von 1000 m abgedeckt wird. Eine weitere Änderung betrifft die Klassifikation und Extraktion der Gletscherfront. Dieser Schritt wird ebenfalls ausgelassen, da die Festlegung der Gletscherfront bei einer 1000 m-Auflösung unzureichend genau wäre.

Die Prozessierung von MODIS-Bildern gliedert sich in folgende Hauptschritte:

(1) Vorprozessierung der MODIS-Bilder

(2) Klassifikation der Gletscherfazies auf der gesamten Fläche

(3) Extraktion der Lage der Grenzen zwischen den Gletscherzonen und

(4) Evaluation der Klassifikationsergebnisse und Eingabe in die AntPenDB.

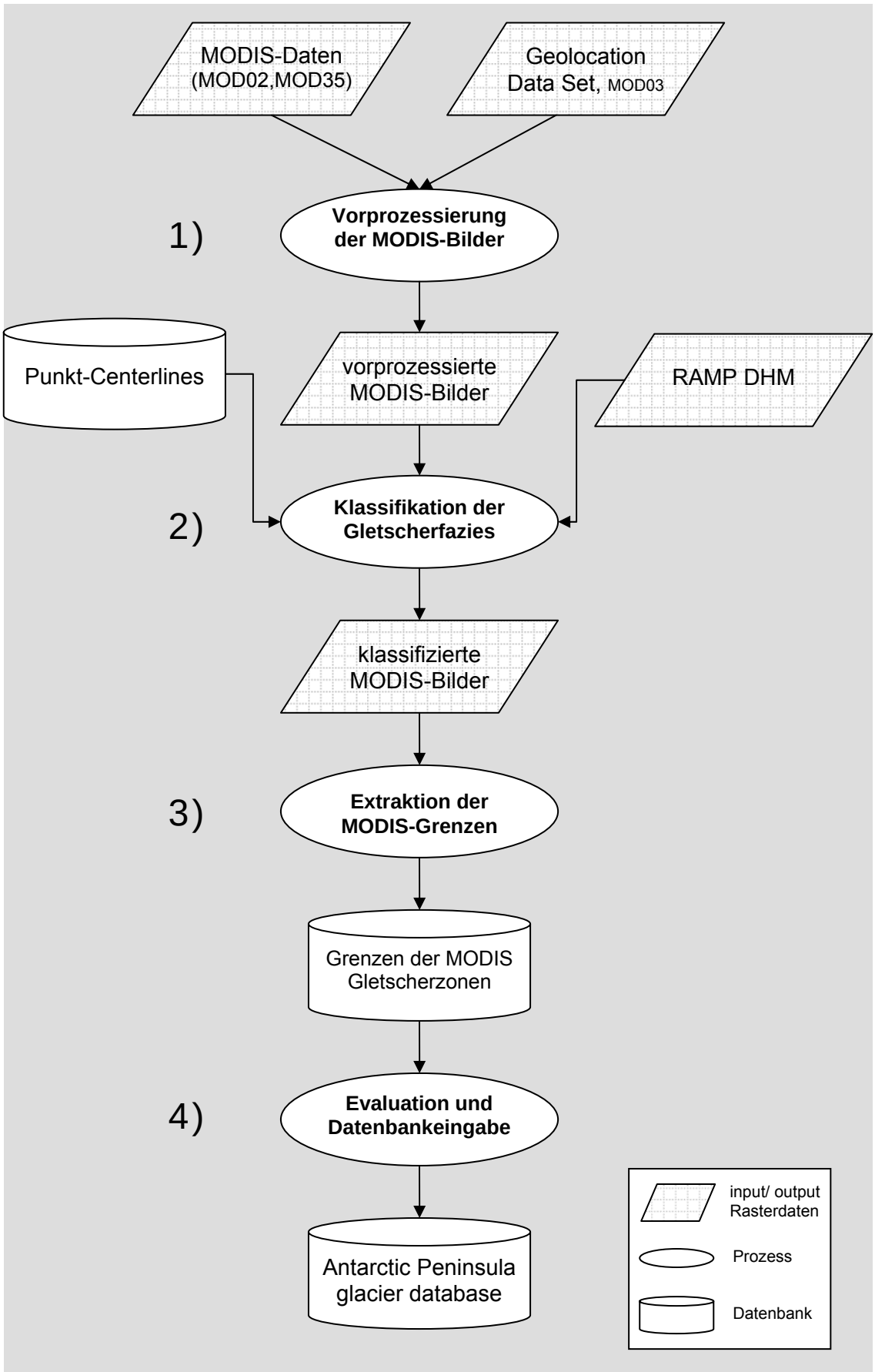


Abbildung 6.1: *Schematischer Ablauf der Prozessierungskette mit ihren Hauptarbeitsschritten, Vorprozessierung, Klassifikation, Extraktion der Grenzen und Evaluation/Datenbankeingabe (verändert nach* ARIGONY NETO *2006).*

6.1.1 IceTools

IceTools (ARIGONY NETO 2006, S. 44) ist eine modular aufgebaute Anwendung die es ermöglicht, Daten unterschiedlicher Satellitensensoren zu prozessieren, d. h. diese zu klassifizieren. Momentan umfasst die Funktionalität des Programms die Klassifikation von Radarfernerkundungsdaten von ERS-1 und ERS-2 SAR und ENVISAT ASAR, sowie von optischen Satellitendaten des Landsat TM/ETM+ und Terra ASTER.

IceTools ermöglicht die Ansprache der nötigen Softwareanwendungen zur Prozessierung der Daten und damit eine Automatisierung der einzelnen Teilprozesse, die so zusammengefasst sind, dass die Interaktion des Bearbeiters möglichst gering gehalten wird (ARIGONY NETO 2006, S. 44). Zur Umsetzung der Automatisierung wurde die Programmiersprache PHP (rekursive Abkürzung für **P**HP: **H**ypertext **P**reprocessor; URL 9) verwendet. PHP ist eine weit verbreitete Skriptsprache für Webanwendungen, die im hiesigen Kontext jedoch nur in der Kommandozeilenversion (CLI) genutzt wird.

Die graphische Benutzeroberfläche (GUI) wird mit der PHP-Erweiterung **PHP-GTK2** (URL 10) erzeugt und dient zur einfachen und benutzerfreundlichen Eingabe der Daten und der erforderlichen Parameter für die Prozessierung. Über sie werden PHP-Skripte ausgeführt, die zum einen Batchprozesse in der Bildbearbeitungssoftware anstoßen und zum anderen SQL (Structured Query Language) Datenbankabfragen tätigen. Die graphische Benutzeroberfläche zusammen mit den PHP-Skripten bilden die Kernfunktionalitäten von IceTools.

6.1.2 Neuerungen in IceTools1.1

Die Idee bei der Anpassung von IceTools an die Prozessierung von MODIS Daten ist, die Grundstruktur von IceTools weitestgehend beizubehalten, jedoch so um einige PHP-Skripte und Modelle zu erweitern, dass diese Daten in IceTools zusätzlich zu den bisherigen Sensoren prozessiert werden können. **IceTools1.1** steht demnach für die erweiterte Version der IceTools mit zusätzlichen, ebenfalls in der GUI integrierten, PHP-Skripten zur Prozessierung von MODIS-Daten. Die grundlegendsten Neuerungen sind ein MODIS-spezifisches Vorprozessierungsmenü und der „MODIS-Classifier“ für Klassifikation und Datenbankprozesse. Außerdem wurden der Schritt der Validierung der Ergebnisse und die Datenbankeingabe MODIS-spezifisch verändert (Quellcode der wichtigsten PHP-Skripte im Anhang. Die komplette IceTools1.1 Version befindet sich auf der beiliegenden CD-ROM).

Die Interaktion des Bearbeiters bei der Prozessierung von MODIS Daten in IceTools1.1 ist an drei Stellen notwendig:

(1) Zu Beginn der Prozessierung bei der Eingabe der MODIS-Rohdaten für die Vorprozessierung und zur Angabe des Verzeichnisses, in welches die vorprozessierten Daten abgelegt werden sollen.

(2) Bei der Eingabe der vorprozessierten MODIS-Daten und des Digitalen Höhenmodells im „MODIS-Classifier“ und zur

(3) Validierung der gewonnenen Grenzen der Gletscherzonen und zum Start der endgültigen Datenbankeingabe.

6.1.3 Software zur Umsetzung der Prozessierungskette

Zur Umsetzung der Prozessierungsschritte kommen drei Softwarepakete zum Einsatz. Zum einen wird das „**MODIS Swath Reprojection Tool**“ (MRTSwath) genutzt, welches die Transformation von MODIS Level 1B- oder Level 2-Daten aus dem HDF-EOS Swath Format (Kapitel 4.1) in ein georeferenziertes und projiziertes Bild ermöglicht (URL 1). Zum andern wurde die Bildbearbeitungssoftware **ERDAS-Imagine 9.1** verwendet. Die AntPenDB ist ein relationales Datenbanksystem, basierend auf der open source Software **PostgreSQL 8.3.1**. Sie wird für die Berechnung georäumlicher Datensätze zusammen mit der Erweiterung **PostGIS 1.3.3** betrieben. Zur Evaluation der klassifizierten Daten kann eine beliebige GIS-Software verwendet werden. Im Fall dieser Arbeit wurde sie mit ESRI **ArcGIS 9.1** durchgeführt.

ERDAS-Imagine und MRTSwath müssen lokal auf dem Computer des Bearbeiters installiert sein, wohingegen PostgreSQL und PostGIS entweder lokal oder auf einem Server laufen können.

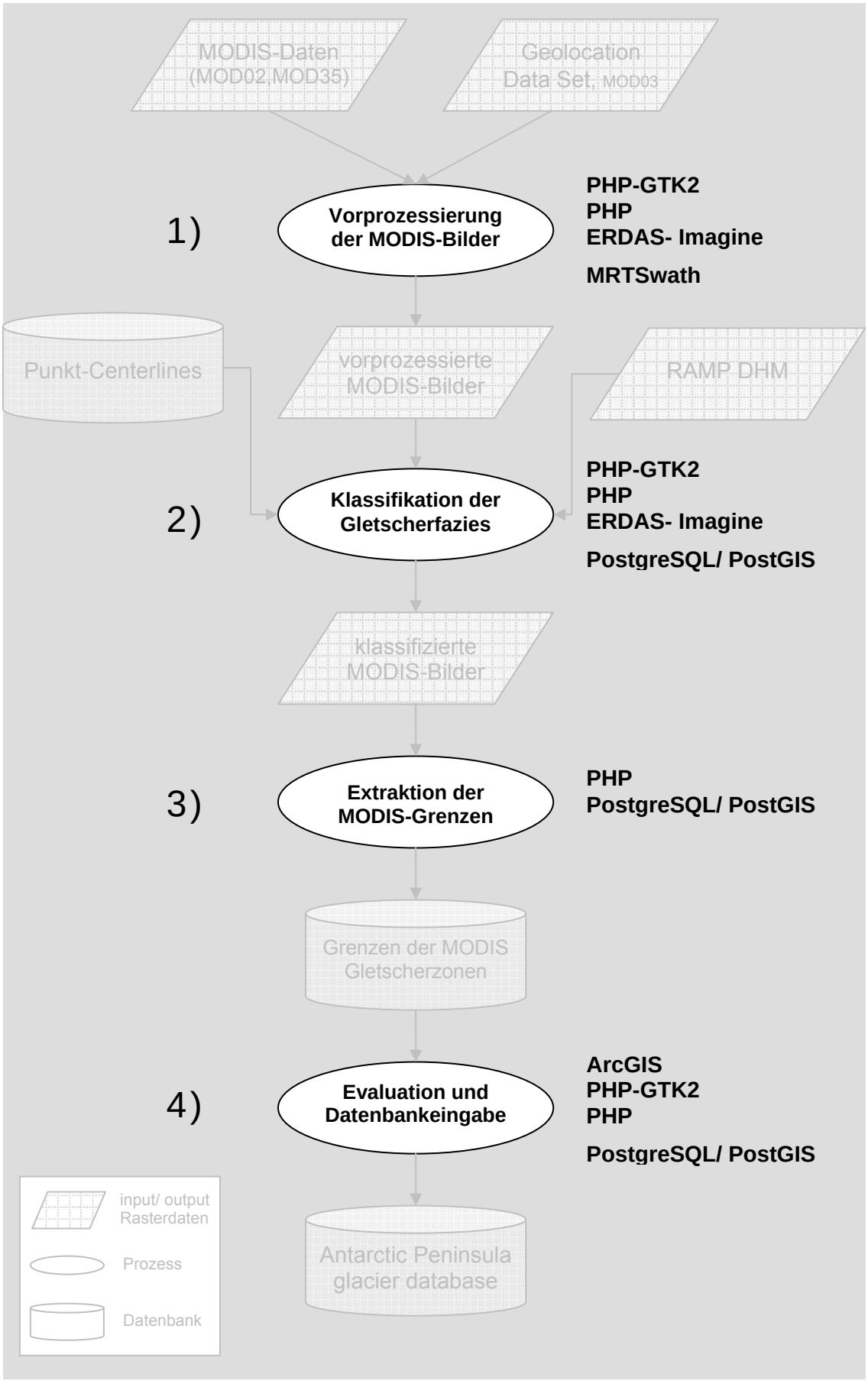


Abbildung 6.2: *Die einzelnen Prozessierungsschritte und die dafür verwendete Software (verändert nach ARIGONY NETO 2006).*

6.1.4 Vorprozessierung der MODIS-Bilder

Der erste Schritt in der Prozessierungskette (Abbildung 6.1), die Vorprozessierung wird in IceTools 1.1 wie in der Vorgängerversion im Menü ‚Preprocessing' ausgeführt (Abbildung 6.3).

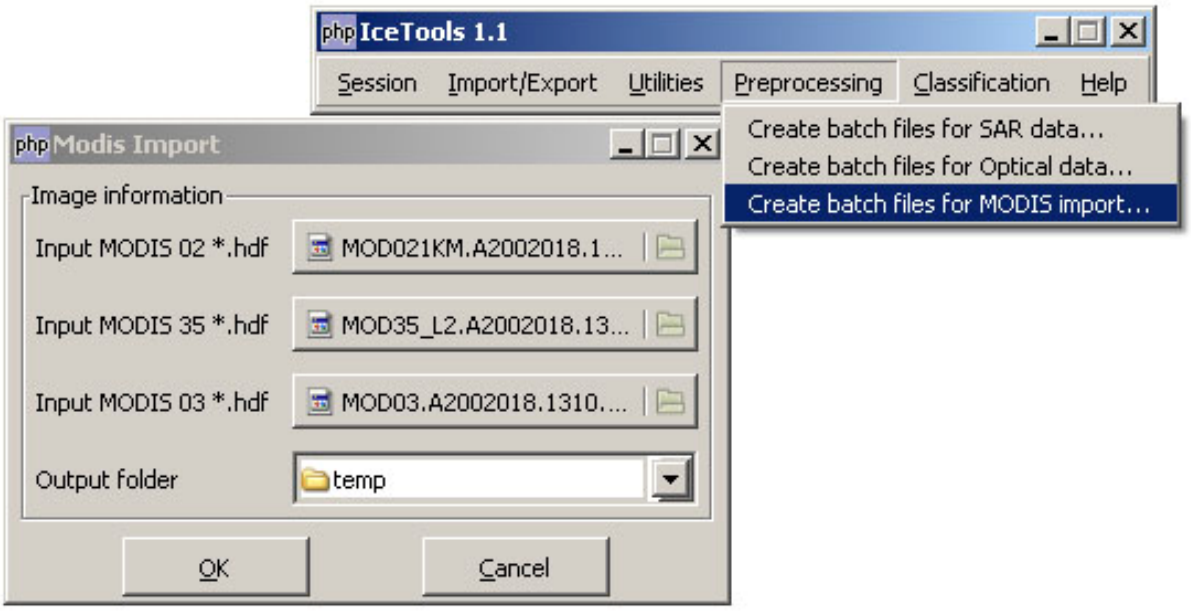


Abbildung 6.3: *Ansicht der graphischen Oberfläche von IceTools1.1 zur Eingabe der MODIS MOD02, MOD03 und MOD35 HDF Dateien und Auswahl des Zielordners.*

Nach Eingabe der MODIS-Rohdaten im HDF-Format werden zwei Parameterfiles in MRTSwath und zwei Batchfiles in ERDAS-Imagine ausgeführt. Durch einen ersten SQL-Befehl werden Informationen zu den Bildern wie eine fortlaufende Nummer, Name des Aufnahmesensors und des Trägersatelliten, Aufnahmezeitpunkt sowie die Bildgeometrie der zu prozessierenden MODIS-Szene in die Tabelle „images" in der AntPenDB geschrieben. Die Vorprozessierung läuft weitgehend in MRTSwath (Schritt 1 bis 3) und teilweise in ERDAS-Imagine (Schritt 4) ab. Sie besteht aus der notwendigen Aufbereitung der MODIS-Szenen für die anschließende Klassifikation in IceTools1.1 und umfasst folgende Arbeitsschritte:

(1) Zu allererst wird die **Auswahl der zu prozessierenden MODIS Bänder** aus dem MOD02-Produkt getroffen. Dies sind, wie in Abschnitt 5.3.1 näher erläutert, Band 5 und Band 10, die später zur Ratiobildung genutzt werden. Diese Bänder sind Bestandteil des ersten Parameterfiles, werden im GeoTIFF Format gespeichert und sind so direkt in ERDAS-Imagine lesbar. Die Bänderauswahl im zweiten Parameterfile betrifft das MODIS Cloudmask-Produkt. Hier wird lediglich Band 1 ausgewählt und im Raw Binary Format (*.hdr) abgespeichert.

(2) Die **geometrische Korrektur** wird nun in beiden Parameterfiles gleich durchgeführt und beinhaltet die Elimination des Bowtie-Effekts in den

Randbereichen der Szenen (Abschnitt 5.1.1), sowie die Georeferenzierung. Zur Georeferenzierung wird das MODIS Geolocation-Dataset benutzt.

(3) In beiden Parameterfiles wird eine **Umprojektion** der MODIS-Szenen vom MODIS Swath-Format in die Antarktische Polarstereographische Projektion durchgeführt. Das Resampling Verfahren ist hier, ebenso wie für die Georeferenzierung, das Nearest Neighbor Verfahren.

(4) Für die Aufbereitung des MODIS Cloudmask-Produkts (MOD35) laufen durch Ausführen des ‚Preprocessing-Skripts' zwei ERDAS-Imagine Batchfiles ab. Zum einen für den ERDAS Generic Binary-Import, zum anderen für die Anpassung des Kartenmodells an die ERDAS-Schreibweise (Abschnitt 5.1.2).

Die Ausgabedateien der Vorprozessierung werden temporär gespeichert und stehen so später für die Klassifikation zur Verfügung.

6.1.5 Klassifikation der Gletscherzonen

Der zweite Schritt in der Prozessierungskette (Abbildung 6.1) ist der Klassifikationsprozess der MODIS-Bilder. Dieser wird in IceTools1.1 im Menü ‚Classification' über den ‚MODIS-Classifier' ausgeführt (Abbildung 6.4). Die notwendigen Eingabedaten sind die vorprozessierten MODIS-Bänder des MOD02-Produkts (Band 5 und 10), aus denen das Ratio für die Klassifikation gebildet wird und welche die vorverarbeitete Wolkenmaske (MOD35-Produkt) enthalten. Diese wurden beim Schritt der Vorprozessierung temporär gespeichert. An dieser Stelle wird auch das Digitale Höhenmodell (RAMP DHM) eingegeben.

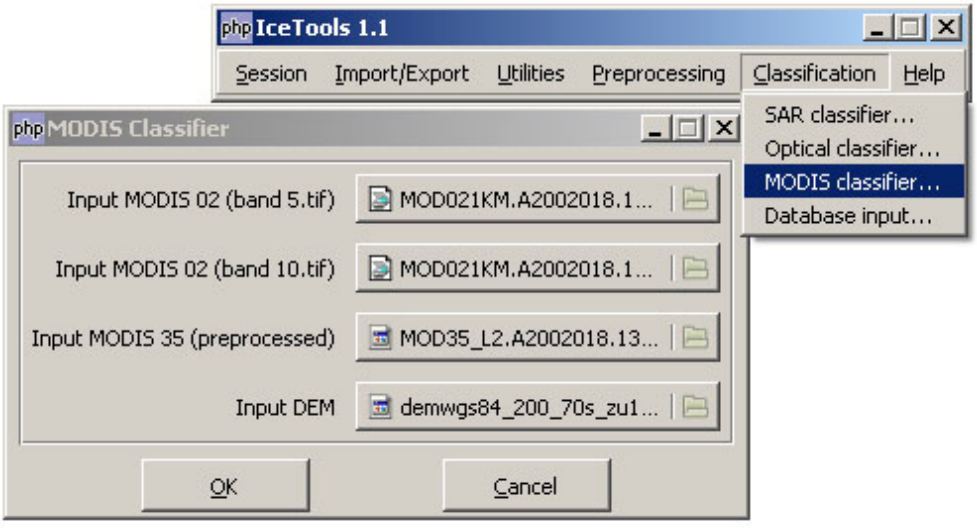


Abbildung 6.4: *Ansicht der graphischen Oberfläche in IceTools1.1 zur Eingabe der vorprozessierten Daten und des DHM (DEM: Digital Elevation Model) für die Klassifikation.*

Durch starten des MODIS-Classifiers wird ein PHP-Skript ausgeführt, welches alle weiteren Prozesse automatisch initiiert. Alle Klassifikationsschritte, auch

Postklassifikation und Rastertransformation der Shapefiles wurden mit, in ERDAS-Imagine verfügbaren Tools umgesetzt. Die Abfolge der einzelnen Prozessierungsschritte ist folgendermaßen (Abbildung 6.6):

(1) Zu Beginn werden durch eine PostgreSQL/PostGIS-Abfrage an die AntPenDB alle Centerlines zu den Gletschern, die in der zu prozessierenden MODIS-Szene vollständig enthalten sind ermittelt und in einer temporären Tabelle gespeichert.

(2) Für diese Gletscher werden anhand ihres Identifikators (local_id) durch eine SQL-Abfrage die entsprechenden Punktcenterlines aus der Postgres-Tabelle ‚cenline_point1000' importiert. Die Punkte auf diesen Centerlines haben, der MODIS-Auflösung entsprechend, einen Abstand zwischen den Punkten von 1000 m.

(3) Da es nicht möglich ist die Inhalte der AntPenDB direkt in ERDAS-Imagine zu verarbeiten, werden diese mit Hilfe der Postgres-Transformationssoftware ‚pgsql2shp' in das Shapefile Format überführt und schließlich durch ein Modell in ERDAS-Imagine gerastert.

(4) Nun wird die gesamte Fläche der MODIS-Szene mit einem Modell in ERDAS-Imagine klassifiziert (Abbildung 6.5; Abschnitt 5.3.2); bewölkten Pixels wird ein Fehlwert zugeordnet. Der Zeitaufwand für diese Operation beläuft sich aufgrund der geringen MODIS-Auflösung auf nur wenige Minuten (Kapitel 7.3).

(5) Die darauf folgende Postklassifikation besteht aus einem Modell, welches isolierte Pixelgruppen aller Klassen, die kleiner als 9 MODIS-Pixel sind, in die umgebende Klasse überführt. Falls die Blankeisklasse über 500 m Höhe auftritt wird sie als Fehlpixel klassifiziert.

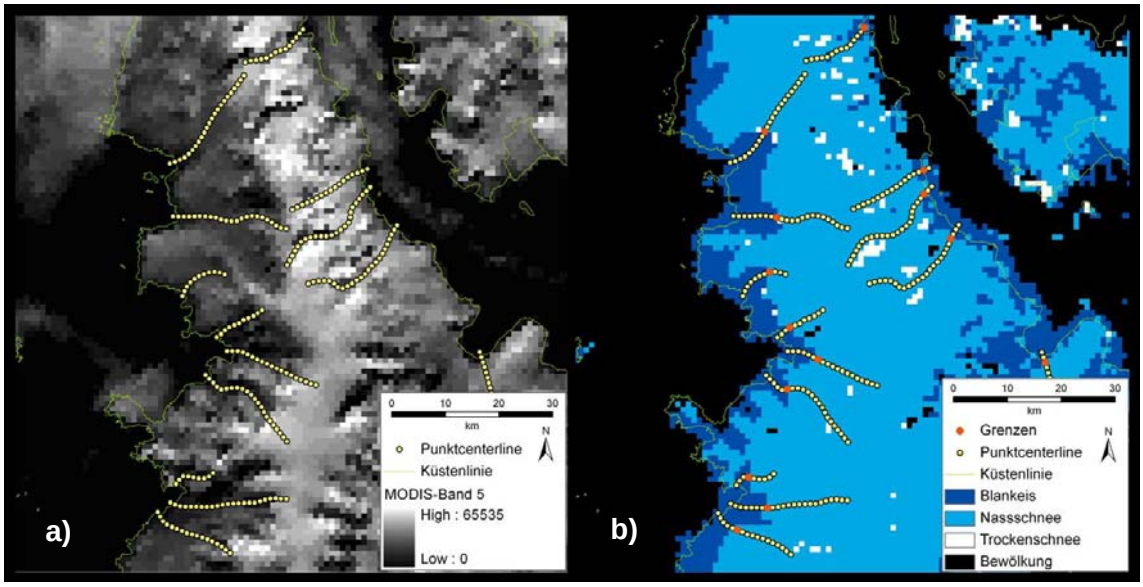


***Abbildung 6.5**: MODIS-Band 5 (a) und eine klassifizierte MODIS-Szene (b,) jeweils mit Punkt-centerlines. In der klassifizierten Szene sind auch die Centerlinepunkte der Schneelinien (rot) markiert (Quellen: NASA; Antarctic Digital Database (URL 14); AntPenDB).*

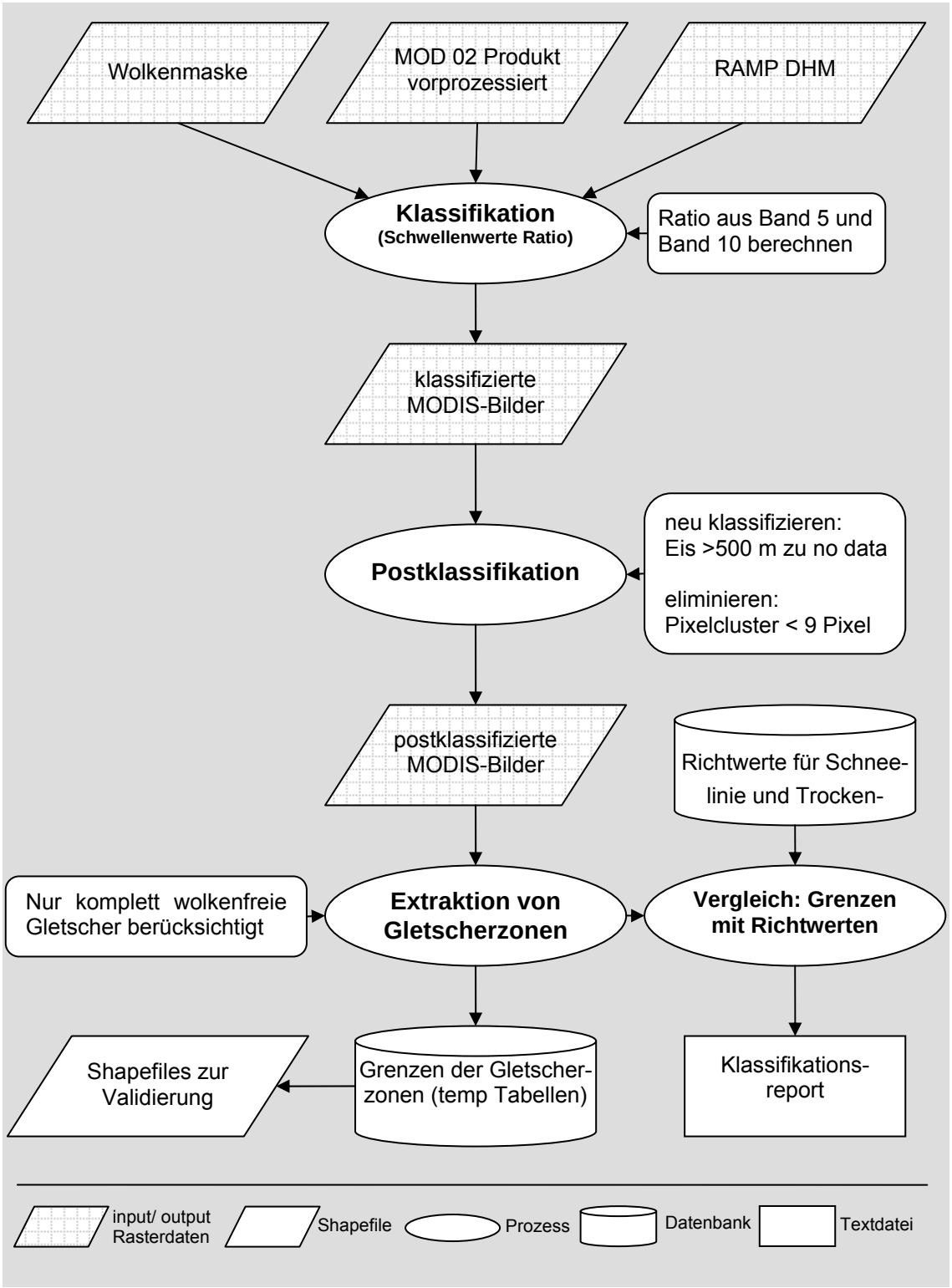


Abbildung 6.6: *Detaillierter schematischer Ablauf des Klassifikationsprozesses und Erstellung von Shapefiles und Klassifikationsreport zur Validierung der Ergebnisse (verändert nach* ARIGONY NETO *2006).*

6.1.6 Extrahierung der Grenzen zwischen den Gletscherzonen

Der dritte Schritt der Prozessierungskette (Abbildung 6.1) ist die Extrahierung der Grenzen zwischen den Gletscherfazies. Ihr Ablauf ist derselbe wie in den Vorgänger-IceTools. Es wurden lediglich Anpassungen, verbunden mit der geringeren räumlichen Auflösung des MODIS-Sensors vorgenommen.

Die Extrahierung der Grenzen umfasst in IceTools1.1 wie in der ersten Version vier Arbeitsschritte (ARIGONY NETO 2006, S. 50):

(1) Aus der klassifizierten MODIS-Szene werden durch ein ERDAS-Modell an den Punkten auf der Centerline (Tabelle cenline_point1000) die Klassenwerte und respektive aus dem Höhenmodell die Höhenwerte abgegriffen. Die Punktcenterlines mit den Klassen- und Höheninformationen werden in ERDAS-Imagine in das Shapefile Format zurück transformiert und mit „shp2pgsql“ zurück in die AntPenDB in eine temporäre Tabelle geschrieben.

(2) Die Grenzen zwischen den Gletscherfazies (Schneelinie und optische Trockenschneelinie) und die dazugehörige Höhe werden in zwei SQL-Abfragen in der Datenbank ermittelt und dort ebenfalls in eine temporäre Tabelle gespeichert. Die Erste wählt die Gletscher aus, die komplett wolkenfrei sind. Die Zweite legt die Grenzen fest. Da die Centerlinepunkte alle durch eine ID, beginnend an der Küste nummeriert sind, kann der Algorithmus die Klassen aller Centerlinepunkte von der ersten Punkt-ID (point_seq = 1) an, also von der Küste her in die höheren Lagen des Gletschers, abfragen. Der erste Punkt auf der Centerline nach der Blankeiszone wird als Schneelinie und entsprechend auch der erste Punkt nach der Nassschneezone als Trockenschneelinie festgelegt (Abbildung 6.7).

(3) Die ermittelten Grenzen (Schneelinie und Trockenschneelinie) werden in der Datenbank mit Höhenrichtwerten dieser beiden Grenzen aus der Tabelle ‚sar_thresholds'

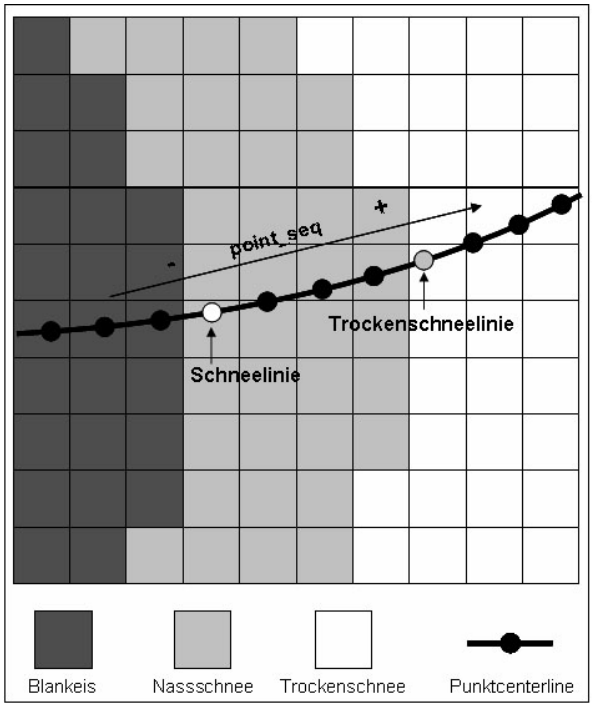


Abbildung 6.7: *Schematische Darstellung der Festlegung der Grenzen zwischen den Gletscherzonen entlang der Centerline. Beginnend an der ersten Punkt–ID (point_seq) nahe der Gletscherfront werden die Klassen der Centerlinepunkte abgefragt und die Grenzen wie im Text beschrieben festgelegt. Verändert nach ARIGONY NETO (2006).*

verglichen. Wenn der, mit der MODIS-Prozessierungskette ermittelte, Höhenwert stärker als +/- 150 m vom Richtwert abweicht, wird dies im Klassifikationsreport vermerkt und man sollte den betroffenen Gletscher noch visuell überprüfen und evtl. die Lage der Grenze anpassen.

(4) Die ermittelten Gletscherzonen und die zugehörigen Grenzen werden aus der AntPenDB in Shapefiles exportiert, um sie zur Überprüfung der Ergebnisse verwenden zu können.

6.1.7 Validierung der Ergebnisse und Datenbankeingabe

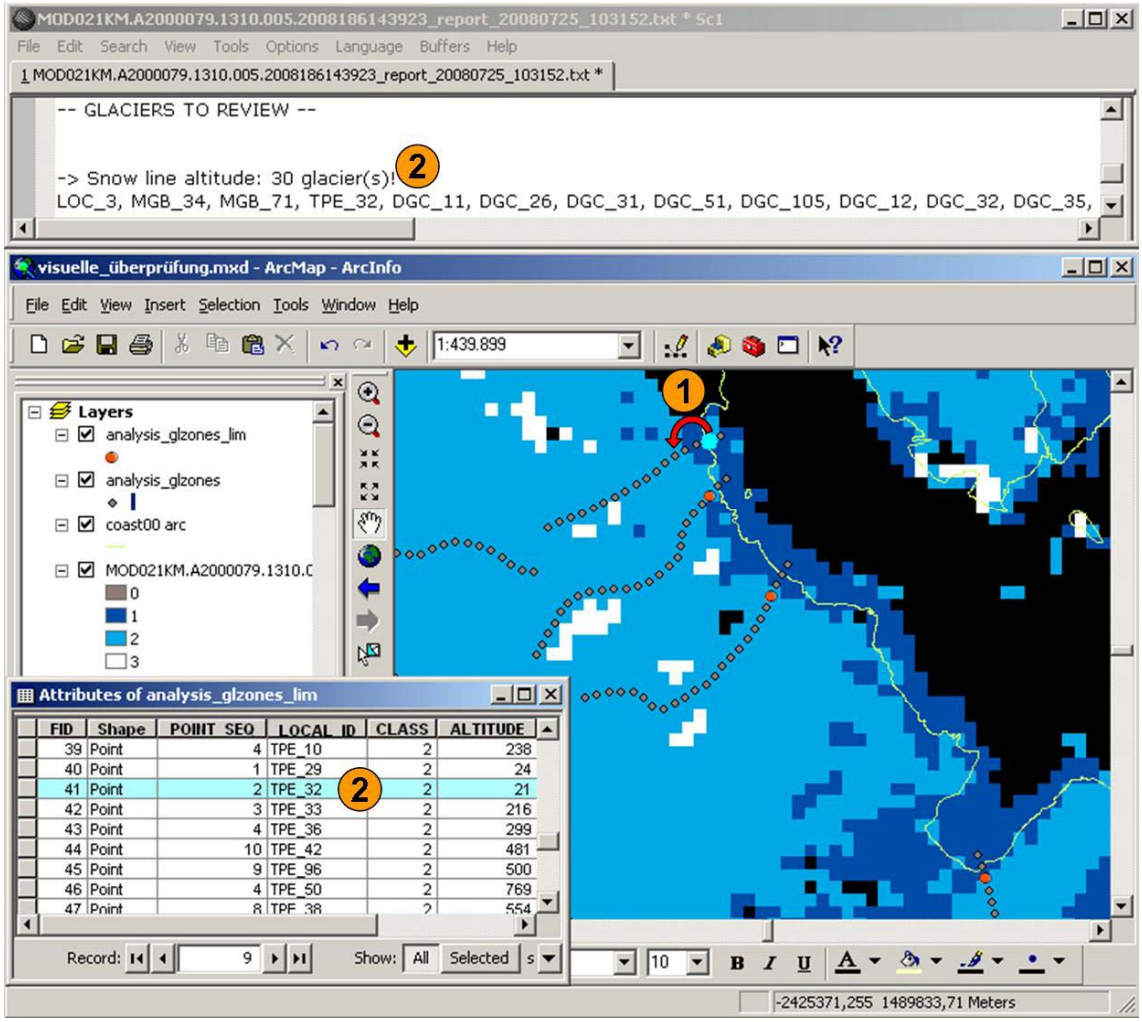


Abbildung 6.8: *Bildschirmausdruck der visuellen Überprüfung der Klassifikation. An der Stelle (1), dem Gletscher mit der ID TPE_32, wurde vom Algorithmus eine fehlerhafte Schneelinie ausgegeben, wie aus dem Klassifikationsreport und anhand der Attributtabelle der GIS-Software zu erkennen ist (2). Diese kann im nächsten Schritt korrigiert werden.*

Im vierten Schritt der Prozessierungskette (Abbildung 6.1) wird die Validierung und Datenbankeingabe der Ergebnisse durchgeführt. Der nach der Klassifikation erzeugte Klassifikationsreport zeigt die Anzahl und den Identifikator (local_id) des zu korrigierenden Gletschers, geordnet nach Korrektur der Schneelinie und der

Trockenschneelinie an. In einer GIS-Software nach Wahl können nun die Shapefiles der Gletscherzonen und der Grenzen zusammen mit dem klassifizierten Bild zur Überprüfung angezeigt werden (Abbildung 6.8). Die geringe räumliche Auflösung der verwendeten MODIS-Produkte macht die rohen MOD02-Szenen als Grundlage für die Überprüfung der Klassifikation wenig nützlich, da die Grenzen zwischen den Gletscherzonen auf diesen Bildern visuell nicht eindeutig unterscheidbar sind. Bei Verwendung von klassifizierten Szenen kann durch die Korrektur der fehlerhaften Grenzen eine in sich schlüssige Klassifikation erreicht werden.

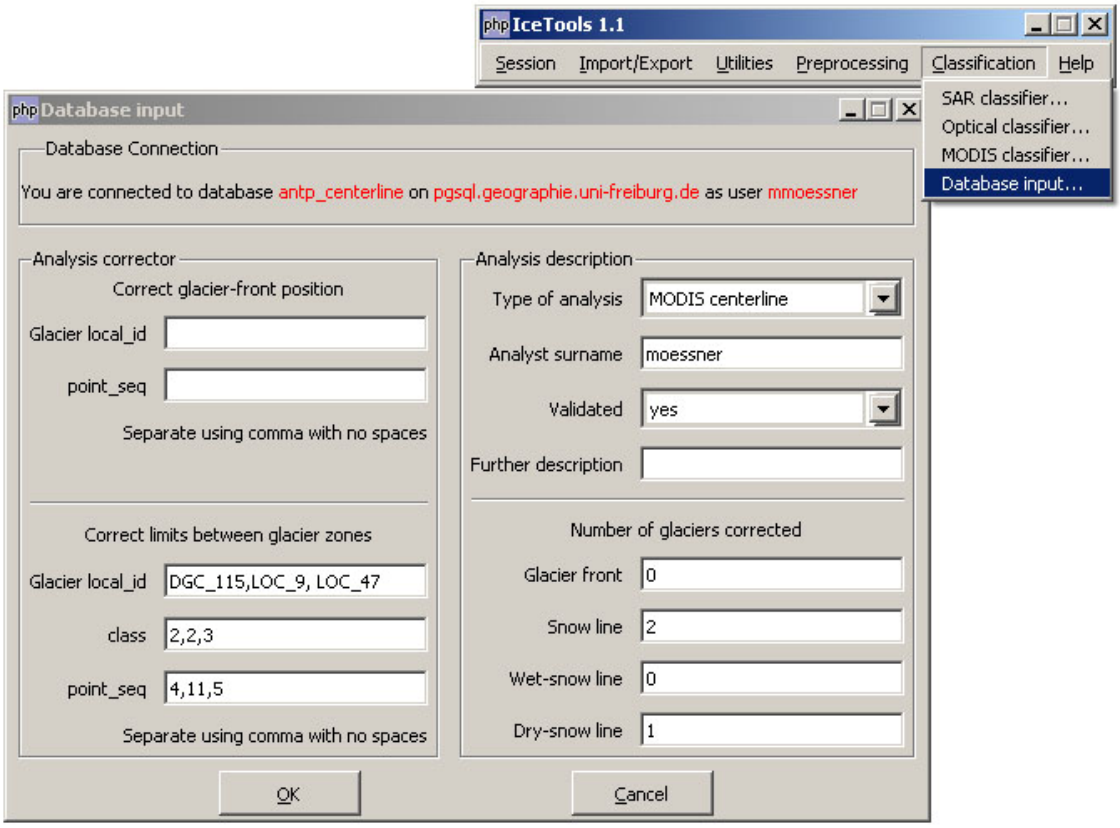


Abbildung 6.9: *Ansicht der graphischen Oberfläche in IceTools1.1 zur Eingabe der zu korrigierenden Ergebnisse von Schneelinie (Klasse: 2) und Trockenschneelinie (Klasse: 3) bezogen auf die entsprechenden Gletscher mittels deren lokalen Identifikatoren (local_id).*

Der letzte Schritt in der Prozessierung der MODIS-Bilder besteht in der Eingabe der korrigierten Daten (Abbildung 6.9) in endgültige Tabellen in der Datenbank. Dies geschieht über den Menüpunkt Classification in IceTools1.1, im Dialog ‚Database input'. Dort werden die local_id des veränderten Gletschers, die Klasse der veränderten Grenze (2 = Schneelinie und 3 = Trockenschneelinie), und die neue Lage der Grenze in Form der neuen point_seq eingetragen. Es müssen die Art der Analyse (hier: MODIS-centerline) und ein paar zusätzliche Informationen für den Datenbankeintrag angegeben werden. Durch Ausführen des Dialogs wird ein PHP-Skript ausgeführt, welches die entsprechenden Einträge in den temporären Tabellen

korrigiert und die korrekten Tabellen dann in die endgültigen Tabellen in der AntPenDB einspeist. Dabei wird auch der damit abgeschlossenen Analyse eine Identifikationsnummer (analy_id) in der Tabelle ‚analysis' zugeordnet, damit später eindeutig nachvollzogen werden kann, welche Ergebnisse zu welcher Analyse gehören. Die temporären Tabellen werden nach dem Übertrag der Ergebnisse in die endgültigen Tabellen gelöscht.

6.2 Zusammenfassung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Darstellung der Funktionsweise von IceTools1.1, der erweiterten Version von IceTools für die Prozessierung von MODIS-Daten. Es wird ein Überblick darüber gegeben, welches die notwendigen Verarbeitungsschritte für MODIS-Daten sind, mit welcher Software sie ausgeführt und schließlich wie sie durch IceTools1.1 miteinander verknüpft und umgesetzt werden.

7 ÜBERPRÜFUNG DER PROZESSIERUNGSERGEBNISSE

Zur Prüfung der Funktion der erarbeiteten Prozessierungskette und ihrer Umsetzung in IceTools1.1 wurden mehrere Testdurchläufe mit MODIS-Daten mit der Anwendung durchgeführt. Anhand der dadurch gewonnenen Ergebnisse wird versucht, zum einen durch visuellen Vergleich der Ergebnisse und zum anderen mit der Durchführung geeigneter statistischer Testverfahren (Kapitel 5.5), Aussagen über die Güte der Klassifikation von MODIS-Daten in IceTools1.1 zu treffen. Um die Belastbarkeit der Prozessierungsergebnisse zu untersuchen, wurden diese von jeweils zwei Zeitpunkten an mehreren Tagen verglichen. Der Vergleich der MODIS-Klassifikation mit ASTER und SAR Daten dient als Anhaltspunkt für die Qualität der mit MODIS erzielten Ergebnisse, im Bezug auf vorhandene validierte Daten.

7.1 Überprüfung der Konsistenz der MODIS-Klassifikation

Durch die polnahe Lage der Antarktischen Halbinsel wird sie mehrmals täglich durch den MODIS-Sensor aufgenommen. Durch den Vergleich von zwei in IceTools1.1 klassifizierten MODIS-Szenen an einem Tag können Aussagen über die Zuverlässigkeit des Klassifikationsalgorithmus oder eventuelle Fehlerquellen gemacht werden. Zu diesem Zweck werden hier die Klassifikationsergebnisse von fünf Tagen aus 2005, 2006 und 2007 untersucht (Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: *Anteile übereinstimmender und abweichender Höhenlagen der Schneelinie und mittlere Höhendifferenz für die Beobachtung von zwei MODIS-Aufnahmen an einem Tag.*

Aufnahmedatum	Uhrzeit (UTC)	SL mittlere Höhendifferenz [m]	SL korrekt	Anzahl SL Fehler	SL Gesamt	% richtig
06.10.2005	12:35 / 14:15	149,00	0	1	1	0
01.12.2006	12:55 / 14:35	268,80	2	23	25	8
20.12.2006	13:25 / 15:05	119,27	4	7	11	36
05.01.2007	13:25 / 15:05	89,30	7	13	20	35
24.01.2007	12:15 / 13:55	0,00	15	0	15	100

In Tabelle 7.1 sind die durchschnittliche Abweichung der MODIS-Schneelinien (SL) zwischen zwei Analysen am selben Tag und die relativen Anteile der exakt übereinstimmenden Schneelinien aufgelistet. Die mittlere Abweichung ist das arithmetische Mittel aus der Abweichung zwischen beiden Zeitpunkten, es handelt sich um den reinen Betrag der Abweichung ungeachtet des Vorzeichens. Ein korrektes Ergebnis in der Tabelle entspricht genau übereinstimmenden Höhen der SL, ein Fehlergebnis wird angegeben, wenn die Höhen abweichen. Die relativen Werte ergeben sich aus korrekt und fehlerhaft verglichenen Höhen der SL. In den meisten Fällen weichen die Schneelinien voneinander ab. Der Abgleich der MODIS-Analyse mit synoptischen Wetterdaten

(Tabelle 7.2) der drei Stationen auf der AH, Esperanza (63,4° S, 57° W), Palmer (64,77° S, 64,08° W) und Rothera (67,57° S, 68,13° W; Abbildung 7.1) ist lückenhaft, lässt jedoch die Aussage zu, dass es zum Zeitpunkt kurz vor den Aufnahmen der MODIS-Szenen lediglich am 20.12.2008 leichten Schneefall (Esperanza) und am 06.10.2005 (Palmer) und 24.01.2007 (Rothera) Regenniederschlag gegeben hatte, was nicht der Grund für die starken Abweichungen sein kann.

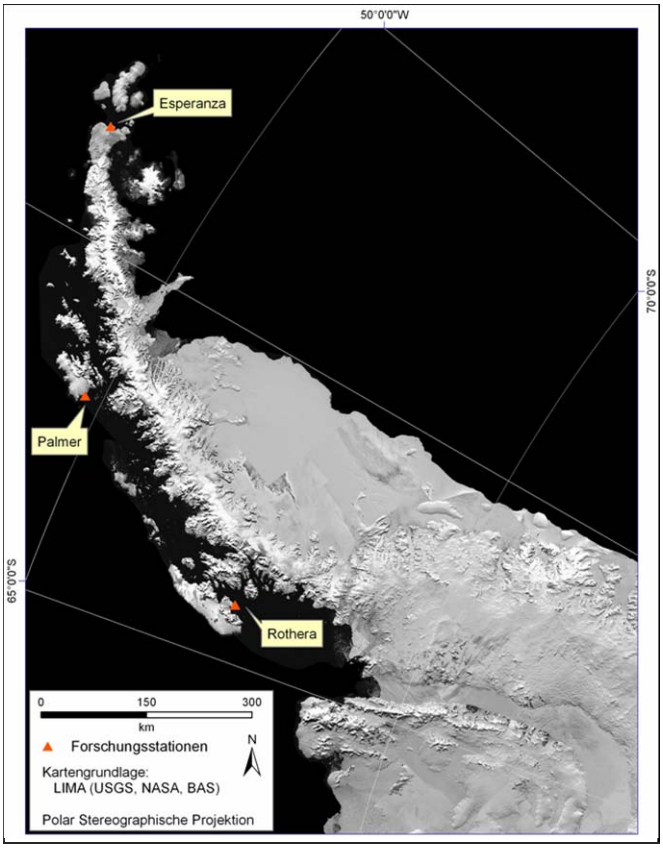


***Abbildung 7.1**: Lage der verwendeten bemannten Wetterstationen auf der AH. Quellen: LIMA (URL 15); ADD (URL 14).*

***Tabelle 7.2:** Wetterbeobachtungen an den Stationen Esperanza (Es), Palmer (Pa), Rothera (Ro) nach CONNOLLEY (2004).*

		Wetterbeobachtung Es/ Pa/ Ro (in GMT)		
Aufnahmedatum	**Uhrzeit (UTC)**	**12:00**	**13:00 (nur Ro)**	**15:00**
06.10.2005	12:35 / 14:15	10/ 61/ 2	k.A.	---
01.12.2006	12:55 / 14:35	k.A./ k.A./ k.A.	k.A.	---
20.12.2006	13:25 / 15:05	70/ 0/ k.A.	k.A.	k.A./ k.A./ k.A.
05.01.2007	13:25 / 15:05	k.A./ k.A./ k.A.	k.A.	k.A./ k.A./ k.A.
24.01.2007	12:15 / 13:55	28/ 0/ 15	k.A.	---

K.a. = keine Angaben. Wettercodes der World Meteorological Organisation (WMO): 0 - Cloud development not observed or not observable; 02 - State of sky on the whole unchanged; 10 – Mist; 15 - Precipitation within sight, reaching the ground or the surface of the sea, but distant, i.e. > 5 km from the station; 28 - Fog or ice fog during the preceding hour but not at the time of observation; 61 - Rain, not freezing, continuous, slight at time of ob.; 70 - Intermittent fall of snowflakes, slight at time of ob. (WMO 1995).

Es ist daher wahrscheinlich, dass die Unterschiede in den Klassifikationsergebnissen nicht durch Schneefall, d.h. durch kurzfristige Überdeckung der wahren Grenzen der Gletscherzonen, oder durch Regen und die damit verbundene Veränderung der Konsistenz der Schneedecke verursacht wurden, sondern aus einer anderen Fehlerquelle stammen.

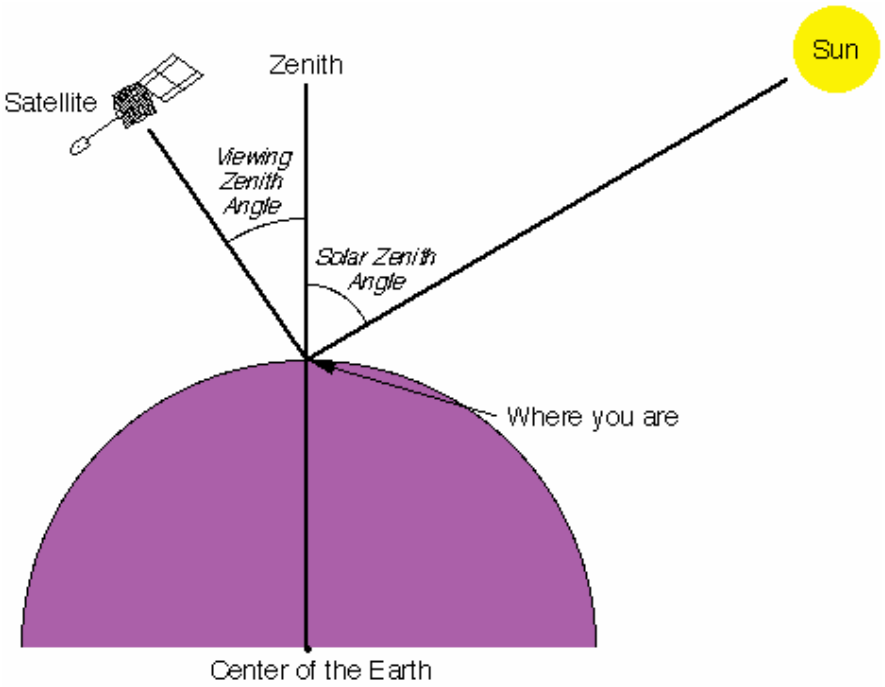


Abbildung 7.2: *Schematische Darstellung der Sensor Zenith Winkels und des Sonnen Zenithwinkels im Bezug auf einen Punkt auf der Erdoberfläche (CHAMBERS 2008).*

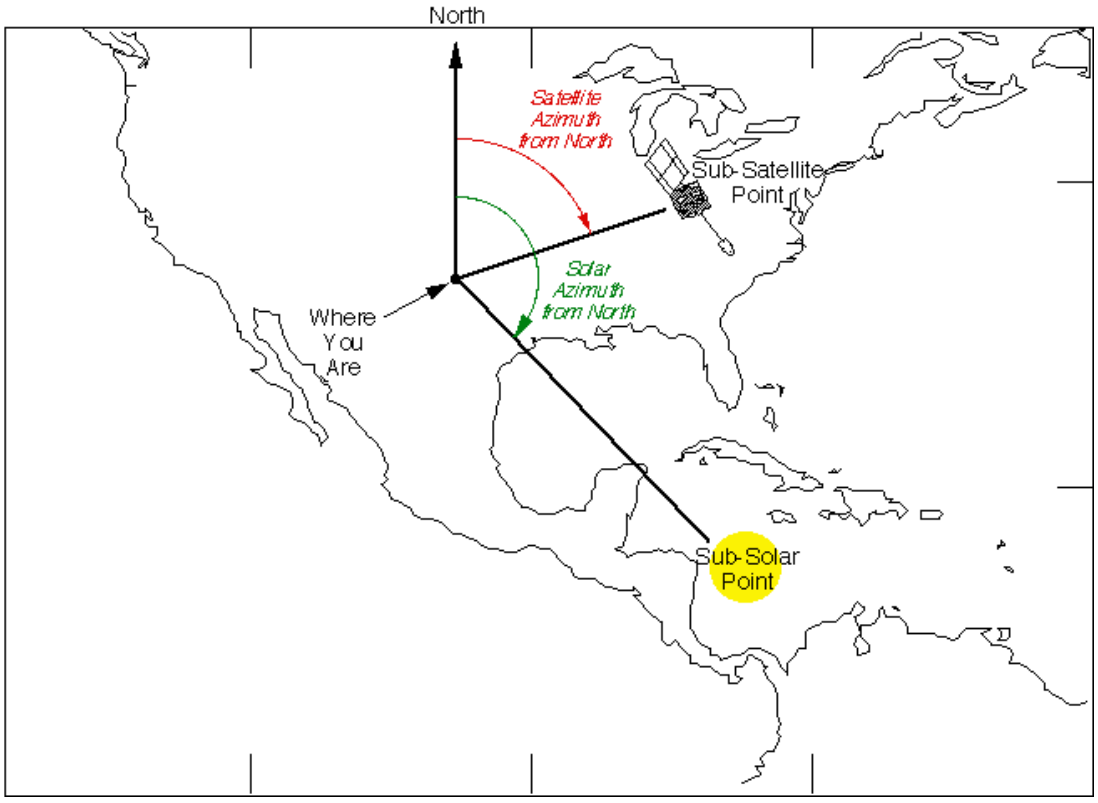


Abbildung 7.3: *Schematische Darstellung des solaren- und des Sensor Azimuts in einer horizontalen Bildebene und für einen Punkt auf der Erdoberfläche (CHAMBERS 2008).*

Die Untersuchung der Aufnahmegeometrie des Sensors (Winkel von: Sensor Zenith, Sensor Azimut, Solar Zenith und Solar Azimut) wurde anhand des MOD03-Geolocation Datensatzes für zwei Aufnahmetage durchgeführt. Die größten Unterschiede in der Aufnahmegeometrie ergeben sich für den Winkel des Sensor-Azimuts (Abbildung 7.2 und 7.3), der Unterschied im Solaren Zenit-Winkel (Sonneneinfallswinkel) dagegen ist bei beiden Aufnahmen relativ gering. Man kann demnach davon ausgehen, dass der Sonneneinfallswinkel bei dem angewandten Klassifikationsschema einen untergeordneten Einfluss auf die Güte der Ergebnisse hat. Vielmehr spielt der Azimut des Sensors, d.h. die Stellung des Sensors zur Sonne, eine Rolle. Beim größten negativen Sensor-Azimut wurde die größte Abweichung zwischen den Höhen der Schneelinien der beiden Analysen beobachtet. Die höchste Zuverlässigkeit der Klassifikation wurde zum Aufnahmedatum 24.01.2008 mit einer Übereinstimmung der beiden Zeitpunkte von 100 % festgestellt. Eine Erklärung hierfür kann die ebenfalls sehr hohe Übereinstimmung in den Aufnahmewinkeln und des Sonneneinfallswinkels für die Pixel der Schneelinie liefern (Tabelle 7.3).

Tabelle 7.3: *Mittlere Abweichung zwischen den Winkeln der Aufnahmegeometrie zweier MODIS-Szenen an einem Tag.*

Aufnahmezeitpunkt	Anzahl SL Gesamt	mittlere Abweichungen A-B [°] Sensor-azimut	Sensor-zenith	Solar-azimut	Solar-zenith
05.01.2007 **A**: 13:25 / **B**: 15:05 (UTC)	21	192,83	50,33	28,97	3,14
24.01.2007 **A**: 12:15 / **B**: 13:55 (UTC)	15	0,02	0,02	0,00	0,00

7.2 Vergleich der MODIS-Klassifikation mit vorhandenen Daten aus der AntPenDB

Um eine Aussage bezüglich der Eigenschaften der, in IceTools1.1 durchgeführten, MODIS-Klassifikation machen zu können, wurden die gewonnenen Klassifikationsergebnisse hinsichtlich der Höhenlage von Schneelinie und Trockenschneelinie für zehn Gletscher der AH nördlich 70° S mit in der AntPenDB vorhandenen Werten derselben Gletscher aus Terra-ASTER und ERS-1/2-SAR Klassifikationen verglichen. Die Trockenschneelinie wurde nur mit ASTER- und nicht mit SAR- Klassifikationen verglichen, da durch das aktive Aufnahmeverfahren des SAR und die damit verbundene Datengewinnung aus einem größeren Volumen der Schneedecke die Trockenschneegrenze grundsätzlich anders abgebildet wird (siehe REES 2006, S. 212 ff). Die Terra MODIS-Daten wurden gezielt für die Tage, an denen Material in der AntPenDB vorhanden ist, ausgesucht. Die MODIS-Daten wurden ab dem frühesten verfügbaren Termin nach dem Start des Terra Satelliten für vergleichbare Termine der AntPenDB in IceTools1.1 prozessiert (erste Aufnahmen von Terra: 24.02.2000).

Für die Festlegung der Höhenlage der Grenzen zwischen den Gletscherzonen wurde von ARIGONY NETO (2006, S. 22) eine in 100 m Auflösung umgerechnete Version des RAMP DHM genutzt. Für die Verwendung in dieser Arbeit wurde das RAMP DHM in 1000 m Auflösung umgerechnet, um die Auflösung an die des MODIS-Sensors anzupassen (Kapitel 4.4). Damit die Höhenwerte zwischen MODIS-Analysen und ASTER- sowie SAR- Analysen vergleichbar sind, wurden die Höhenwerte von ARIGONY NETO (2006) (AntPenDB) mit einem „shape to raster"-Modell in ERDAS für eine 1000 m Auflösung neu berechnet und in einer temporären Tabelle gespeichert. Diese wurde für den Vergleich der MODIS-Ergebnisse für Schneelinie und Trockenschneelinie verwendet.

Der visuelle Vergleich der Höhenlage der **Schneelinien** zeigt, dass alle mit MODIS Daten gewonnene Klassifikationsergebnisse ausnahmslos von den Ergebnissen des ASTER und SAR abweichen. Die MODIS- Schneelinien liegen dabei beim ASTER-Vergleich in 86 % der Fälle, beim SAR- Vergleich in 83 % der Fälle höher. Der Betrag der Abweichung liegt im Mittel (arithmetisches Mittel) bei 181 m verglichen mit ASTER Daten und 302 m verglichen mit SAR Daten.

Die Annahme, die Unterschiede der Höhenwerte der Schneelinien zwischen MODIS und ASTER seien nicht signifikant (Kapitel 5.5), wurde bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 verworfen, die Mittelwerte der mit MODIS klassifizierten Höhen der Schneelinie weichen signifikant (p= 0,025) von der Höhe der Schneelinie von ASTER ab (Tabelle 7.4).

Die Annahme die Unterschiede der Höhenwerte der Schneelinien zwischen MODIS und SAR seien nicht signifikant, konnte bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 angenommen werden (p= 0,06). Da der Signifikanzwert (p-Wert) des t-Tests mit 0,06 nur sehr knapp im Bereich des Konfidenzintervalls lag, sollte (auch aufgrund der geringen Stichprobenanzahl) das Ergebnis hinterfragt werden. Die genutzten Stichprobenwerte sind in Tabelle 7.5 enthalten.

Tabelle 7.4: *Durchgeführte statistische Tests, Signifikanzwert und die daraus resultierende Aussage zur Signifikanz der Unterschiede zwischen MODIS und ASTER/ SAR Analysen. SP steht für Stichprobe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde mit 0,05 festgelegt.*

Art der Höhe	normal verteilt	Testverfahren	p- Wert	Signifikanz Aussage
SL Höhe MODIS	ja	t- Test für gepaarte SP	0,025	signifikant versch.
SL Höhe ASTER	ja			
SL Höhe MODIS	ja	t- Test für gepaarte SP	0,06	nicht signif. versch.
SL Höhe SAR	ja			
TSL Höhe MODIS	nein	Wilcoxon- Vorzeichen-Rang-Test	0,028	signifikant versch.
TSL Höhe ASTER	nein	für abhängige SP		

Darüber hinaus wurde untersucht, ob die Abweichungen der Höhenlage der Schneelinien mit der Breite der untersuchten Gletscher zusammenhängen. Es wurden jedoch keine statistischen Verfahren angewandt, da eine Korrelation mit der geringen Stichprobenanzahl (6-7 Wertepaare) keine stichhaltige Aussage zulässt. Durch visuellen Vergleich mit ASTER wurde demnach festgestellt, dass die größte Abweichung am schmalsten Gletscher (gemessen an der Position der Schneelinie) auftritt. Diese Zusammenhänge sind grafisch in Abbildung 7.4 dargestellt und mit Werten in Tabelle 7.5 belegt. Die starke Abweichung kann bei der verwendeten groben MODIS-Auflösung von 1 km durch Einflüsse von Felsen im Gletscherrandbereich auf die Reflektanz der einzelnen Pixel verursacht worden sein.

Tabelle 7.5: *MODIS-, ASTER- und SAR-Höhen der Schneelinie (SL) und Trockenschneelinie (TSL) an Vergleichsterminen und deren Abweichungen mit Bezug auf die Gletscherbreite (schmalste Gletscher pro Analyse und stärkste Abweichungen sind grau hinterlegt. Bei positiven Werten liegt die MODIS-Grenze höher, bei negativen tiefer).*

	Gletscher local_id	Höhe [m] MODIS	Höhe [m] ASTER/ SAR	Abweichung [m] MODIS- Andere	Gletscherbreite [m] an SL oder TSL
ASTER					
18.01.2002 **SL**	TPE_127	313	145	168	4888
	TPE_28	505	203	302	4196
	TPE_13	285	317	-32	4098
	TPE_20	371	310	61	3792
	TPE_122	415	368	47	3011
	TPE_130	490	212	278	1988
	TPE_36	512	133	379	1801
18.01.2002 **TSL**	TPE_122	467	492	-25	12536
	TPE_13	384	466	-82	6796
	TPE_20	494	524	-30	3241
	TPE_28	634	678	-44	3061
	TPE_36	1520	1536	-16	2693
	TPE_130	771	784	-13	1746
SAR					
18.01.2002 **SL**	TPE_13	285	170	115	4098
	TPE_20	371	101	270	3792
	TPE_122	415	289	126	3011
26.02.2000 **SL**	DGC_58	630	23	607	8986
	DGC_112	635	10	625	5978
19.03.2000 **SL**	LOC_26	456	523	-67	6045

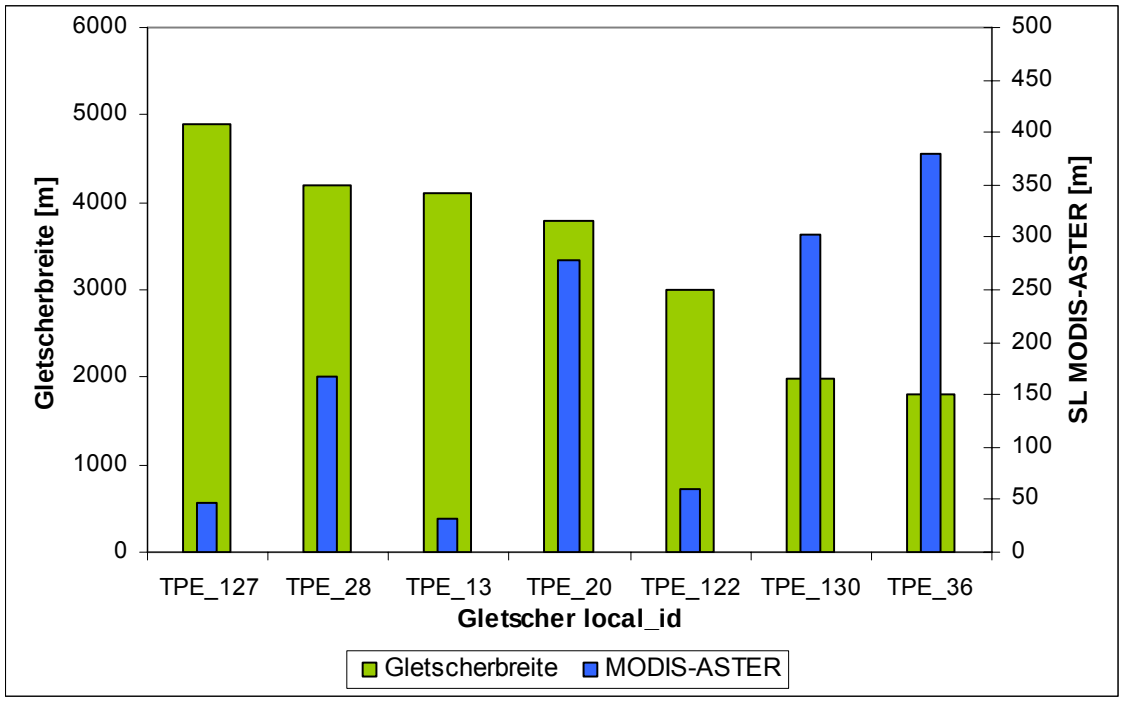


Abbildung 7.4: *Gegenüberstellung der mittleren Abweichung der Schneelinie zwischen MODIS- und ASTER-Klassifikationen und der Gletscherbreite. Es sind die unterschiedlichen Skalierungen der Achsen zu beachten. Die Werte stehen in Tabelle 7.5.*

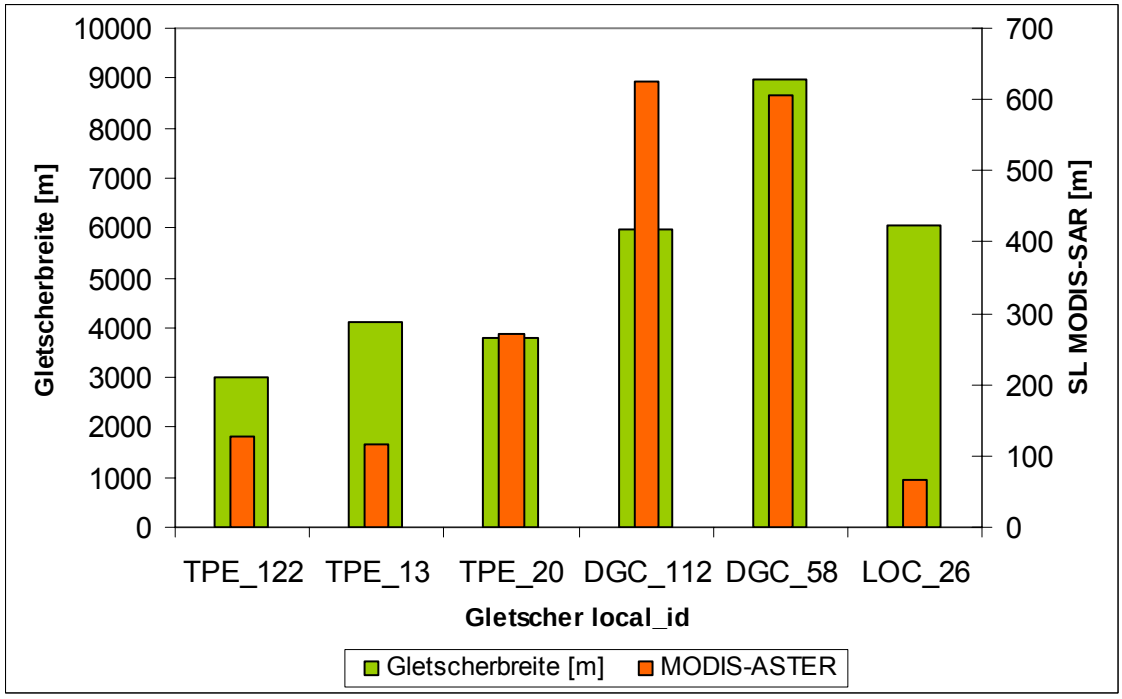


Abbildung 7.5: *Gegenüberstellung der mittleren Abweichung der Schneelinie zwischen MODIS- und SAR-Klassifikationen und der Gletscherbreite. Es sind die unterschiedlichen Skalierungen der Achsen zu beachten. Werte in Tabelle 7.5.*

Für die **Trockenschneelinien** aus MODIS- und ASTER-Daten ergibt sich beim visuellen Vergleich ein konträres Bild zu den Schneelinien. Die mit MODIS-Daten ermittelten Trockenschneelinien liegen im Vergleich zu ASTER-Klassifikationen im Mittel um 35 m niedriger und nicht wie die Schneelinien höher. Die geringste Abweichung zwischen beiden Sensoren wurde am schmalsten Gletscher, gemessen am Punkt der Trockenschneelinie, beobachtet, und die die stärkste Abweichung fällt auf den zweitbreitesten Gletscher (siehe Tabelle 7.5).

Die statistische Annahme, die Unterschiede der Höhenwerte der Trockenschneelinien zwischen MODIS und ASTER seien nicht signifikant (siehe Kapitel 5.5), wurde bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 verworfen (siehe Tabelle 7.4). Die Mittelwerte, der mit MODIS klassifizierten Höhen der Trockenschneelinie, weichen signifikant ($p= 0,028$) von der Höhe der Trockenschneelinie von ASTER ab.

Der erarbeitete Klassifikationsalgorithmus für den MODIS-Sensor erweist sich im Vergleich zu ASTER- und SAR-Daten als überwiegend Nassschnee reduzierend und Trockenschnee begünstigend. Dies bedeutet, dass er (wie aus den obigen Beobachtungen hervorgeht) durch die relativ höhere Lage der Schneelinie weniger Nassschnee, sowie durch die relativ niedrigere Lage der Trockenschneelinie mehr Trockenschnee klassifiziert. Um diese Tatsache auszugleichen, könnten die Schwellenwerte des Ratios in der Form angepasst werden, dass die Wertespanne des Ratios für Nassschnee vergrößert wird (Kapitel 5.3.1).

7.3 Angaben zum Zeitaufwand für die Prozessierung von MODIS-Daten

Die Erarbeitung und Umsetzung der Prozessierungskette in IceTools1.1 wurde mit einem PC unter Windows XP Professional mit Hardwarevoraussetzungen von 3,0 GHz Prozessortaktung und 1 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

Um eine Angabe zum durchschnittlichen Zeitbedarf, der für die Durchführung einzelner Arbeitsschritte (z.B. nur Vorprozessierung) oder der gesamten Analyse einer MODIS-Szene, einschließlich Vorprozessierung, Klassifikation und Validierung, notwendig ist, tätigen zu können, wird eine Anzahl von 34 Gletschern pro MODIS-Szene angenommen, was dem Mittel aller prozessierten Szenen entspricht. Alle Zeitangaben für die Arbeitsschritte sind gemittelte Werte (arithmetische Mittel).

Die Vorprozessierung der MODIS-Daten und die Klassifikation weisen einen sehr konstanten Zeitbedarf auf, wohingegen der Arbeitsschritt der Validierung und Datenbankeingabe zeitlich stark von der Anzahl zu korrigierender Grenzen beeinflusst wird.

Tabelle 7.6: *Durchschnittlicher Zeitbedarf zur Prozessierung MODIS-Szene (bei den oben genannten Systemvoraussetzungen) im Vergleich zu ASTER und Landsat TM/ETM+ (nach ARIGONY NETO, S. 96).*

Prozessierungsschritt	durchschnittlicher Zeitbedarf pro Szene in Minuten		
	MODIS	**ASTER**	**Landsat TM/ETM+**
Auswahl von GCPs (nur ASTER, TM/ETM+)		30	20
Vorprozessierung	3	40	30
Klassifikation (MODIS)	8		
Erstellung von Centerline Bildern und deren Klassifikation (ASTER, TM/ETM+)		35	15
Ergebnisvalidierung und Datenbankeingabe	20	25	15
komplette Analyse	32	130	80

MODIS-Daten benötigen aufgrund ihrer geringen räumlichen Auflösung verglichen mit ASTER- und Landsat TM/ETM+-Daten, wie aus Tabelle 7.6 hervorgeht, deutlich weniger Zeit für die automatisierten Prozesse. Der Schritt der manuellen Georeferenzierung durch das Setzen von Passpunkten (GCP), entfällt bei MODIS-Daten durch die Verwendung des Geolocation Datensatzes (MOD03) ganz, wie auch die Erzeugung von Centerlinebildern. Für die Validierung und Datenbankeingabe wird jedoch wegen der Interaktion des Bearbeiters ähnlich viel Zeit benötigt.

7.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel enthält die Ergebnisse der Probedurchläufe der Prozessierung in IceTools1.1 sowie die Beobachtungen und statistischen Analysen zur Überprüfung des Klassifikationsalgorithmus. Des Weiteren gibt es Aufschluss über den Zeitbedarf für die Durchführung einer Analyse in IceTools1.1, relativ zur Analyse einer ASTER oder Landsat TM/ETM+ Szene.

8 SCHLUSSBETRACHTUNGEN UND AUSBLICK

Die Automatisierung von Arbeitsabläufen birgt gerade im Bereich der Fernerkundung großes Potenzial, denn die einzelnen Teilarbeitsschritte sind weniger komplex als vielzählig. Dies bedeutet, dass die Bearbeitung einer Themenstellung, wie der längerfristigen Beobachtung von Gletschern mit multitemporalen Satellitenbildern, dadurch sehr erleichtert werden kann. Sich oft wiederholende, gleiche Arbeitsschritte in der Software müssen nicht immer wieder aufs Neue vom Bearbeiter selbst ausgeführt werden, sondern werden durch den einmalig entstehenden Programmieraufwand im weiteren Verlauf automatisch verknüpft und ausgeführt. Verringert wird dadurch zum einen die zur Bearbeitung benötigte Zeit und zum anderen das Fehlerrisiko, das sich bei gleichförmigen Arbeiten allzu schnell einschleicht. Unter diesen Gesichtspunkten ist es nahezu unumgänglich, bei Langzeitstudien im Fernerkundungsbereich Prozesse zu automatisieren.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag dazu geleistet, die Gletscherbeobachtung auf der Antarktischen Halbinsel zu erleichtern. Sie leistet der „Aufforderung“ von ARIGONY NETO (2006) Folge, die bestehenden Methoden zur automatisierten Gewinnung von Gletscherparametern um Algorithmen für Satellitendaten mit höherer zeitlicher Auflösung (in diesem Falle MODIS) zu erweitern, um beispielsweise die statistische Modellierung der Schneeschmelze zu ermöglichen (ARIGONY NETO 2006, S. 114). Die Arbeit bietet somit eine Ergänzung der multisensoralen Beobachtung von glazialen Systemen auf der AH.

Das Resultat der eingangs formulierten Ziele sei hier zusammenfassend wiedergegeben:

(1) Es wurde eine Prozessierungskette im Hinblick auf die halbautomatische Prozessierung von MODIS-Daten konzipiert. Sie umfasst die Vorprozessierung der MODIS-Daten, die Klassifikation von Gletscherzonen und Grenzen zwischen diesen und die Überprüfung der Klassifikationsergebnisse und deren Speicherung in der AntPenDB. Die Ermittlung von Grenzen beschränkt sich hier auf die Schneelinie und die Trockenschneelinie, die Gletscherfront wurde nicht berücksichtigt. Zur Klassifikation wurde ein Schwellenwert-Ansatz eines normalisierten Indexes von FAUSTO ET AL. (2007) genutzt, der mit MODIS-Daten auf Grönland entwickelt worden war. Die Gewinnung der relevanten Gletscherparameter, die Höhenlage der Schneelinie und der Trockenschneelinie stützt sich auf den Centerline-Ansatz nach SAURER & GOSSMANN (2002) und ARIGONY NETO (2006). Zur Durchführung der Prozessierung wurde teilweise Open Source Software (MRTSwath, PostgreSQL) und auch kostenpflichtige Software (ERDAS-Imagine, ArcGIS) genutzt.

(2) Diese Prozessierungskette wurde mit Hilfe der Skriptsprache PHP automatisiert. Zur Erweiterung der graphischen Benutzeroberfläche diente die PHP-Erweiterung PHP-GTK. Die Automatisierung schließt die Integration des neu entwickelten Algorithmus zur Prozessierung von MODIS-Daten in den IceTools1.1 mit ein. IceTools1.1 stellt die erweiterte Version der bisherigen IceTools dar, mit der nun auch MODIS-Daten bearbeitet werden können. Die Funktionalitäten zur Prozessierung von SAR-, ASAR-, ASTER- oder TM/ETM+-Daten bleiben dabei unverändert und voll funktionsfähig.

(3) Die Homogenität der Ergebnisse für Schneelinie und Trockenschneelinie wurden durch den Vergleich zweier MODIS-Szenen, die zu unterschiedlichen Tageszeiten desselben Tages in engem Abstand zueinander aufgenommen wurden überprüft. Es wird angenommen, dass die Unterschiede von der Aufnahmegeometrie des MODIS-Sensors und nicht von Schneefall oder Regen verursacht werden.

Zur Ermittlung der absoluten Genauigkeit der MODIS-Ergebnisse für Schnee- und Trockenschneelinie, wurden diese mit Ergebnissen aus ASTER- und SAR- Analysen von ARIGONY NETO (2006), die in der AntPenDB gespeichert sind, verglichen. Es wurden die, in Kapitel 5.5 angegebenen statistischen Methoden angewandt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Mittelwerte der Höhenwerte von MODIS Schneelinien und Trockenschneelinien im Bezug auf ASTER signifikante Unterschiede aufweisen. Der Schneelinienvergleich zwischen MODIS und SAR ergab durch eine sehr knappe Entscheidung keine signifikanten Unterschiede. Dieses Ergebnis sollte jedoch auch wegen der Unterschiede der Aufnahmesysteme (optisch und Radar) hinterfragt werden.

Ziel dieser Arbeit war, einen Algorithmus zur Ermittlung von Gletscherparametern für MODIS-Daten zu entwickeln. Aufgrund der zeitlichen Grenzen dieser Magisterarbeit war nicht geplant, die erweiterte Version IceTools1.1 für eine multitemporale Analyse der Gletscherparameter auch anzuwenden. Der nächste konsequente Schritt wäre nun, MODIS-Daten einer längeren Periode mit der vorliegenden Prozessierungskette zu bearbeiten, um Aussagen über die Veränderung der Schneelinie und Trockenschneelinie auf der Antarktischen Halbinsel zu treffen.

Es soll angemerkt werden, dass die Prozessierungskette ein fertiges, in sich geschlossenes Werkzeug zur Gletscherbeobachtung bietet, dennoch ist es noch möglich und im Bezug auf die Störfaktoren (Kapitel 4.1.1) in den MODIS-Bildern sinnvoll, die Prozessierung und die Handhabung in einzelnen Teilen weiter zu verfeinern.

Bezogen auf IceTools1.1 wäre es z.B. eine sinnvolle Veränderung den Validierungsschritt soweit unabhängig von der Klassifikation der Daten zu gestalten, dass es möglich ist einen kompletten Datensatz vorzuprozessieren und zu klassifizieren und erst zu einem späteren Zeitpunkt endgültig zu validieren. Momentan muss im Anschluss an jede klassifizierte Szene sofort die Validierung erfolgen um die korrekte Zuordnung zur Analyse zu gewährleisten.

Zur Auswahl geeigneter MODIS-Szenen wurde in dieser Arbeit der Erhebungswinkel des Satelliten (Terra/Aqua) genutzt. Es besteht jedoch für MODIS-Daten auch eine Path/Row Systematik des „worldwide reference system“ (WRS), das für Landsat entwickelt wurde und über die man durch Auswahl von gleichen Path und Row-Paaren, Szenen aussuchen könnte, die dann immer die gleiche Aufnahmegeometrie besäßen.

In dieser Arbeit wurde ein Klassifikationsansatz nach FAUSTO ET AL. (2007) verfolgt, welcher kalibrierte Rückstreuwerte von MODIS Level1-Daten verwendet. Eine nützliche Weiterentwicklung der Prozessierungskette könnte nun noch sein, ein MODIS-Produkt aus einem höheren Vorverarbeitungslevel seitens der NASA in IceTools1.1 zu nutzen. Unter den MODIS L2G-Daten (Level 2 Gridded) würde sich das MOD09 Surface Reflectance-Produkt, das täglich als MOD09GHK in 500 m Auflösung und als MOD09GQK in 250 m Auflösung vorliegt, anbieten. Es wird aus Produkten niedrigerer Levels gebildet und beinhaltet eine Näherung der Reflektanz am Boden, d.h. das Produkt ist atmosphärisch (für Streuung und Reflexion an Aerosolen) korrigiert (siehe KING ET AL. 2003, S. 162).

Darüber hinaus war eine Anregung seitens ARIGONY NETO (persönliches Gespräch), die Aufzeichnung der flächenhaften Ausdehnung der einzelnen Gletscherzonen in einen Algorithmus aufzunehmen. Der Gedanke dabei ist, die gewonnene Information für Modellierungen zu nutzen. Da durch den hier entwickelten Algorithmus die AH schon flächenhaft klassifiziert wird, wäre es nur notwendig, an entsprechender Stelle die Klassenwerte für die gesamten Pixel der AH in der Datenbank zu speichern.

LITERATURVERZEICHNIS

ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3. Auflage, 254 Seiten. Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

ALLEY, R.B., P.U. CLARK, P. HUYBRECHTS UND I. JOUGHIN (2005): Ice-Sheet and Sea-Level Changes. In: *Science* 310 (5747), S. 456-460.

ANTONELLI, P., M. DI BISCEGLIE R. EPISCOPO UND C. GALDI (2004): Destriping MODIS data using IFOV overlapping. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International* 7, S. 4568-4571.

ARIGONY NETO, J. (2006): Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula. A centreline-approach combining satellite and GIS data. Dissertation, 136 Seiten. URL: http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2889/pdf/Arigony_Neto_PhD_thesis_2007.pdf

ARIGONY NETO, J., F. RAU, H. SAURER, R. JAÑA, J.C. SIMÕES UND S. VOGT (2007): A time Series of SAR data for monitoring changes in boundaries of glacier zones on the Antarctic Peninsula. In: *Annals of Glaciology* 46, S. 55-60.

ARIGONY NETO, J., H. SAURER, R. JAÑA, F. RAU, J.C. SIMÕES UND H. GOSSMANN (2006): Monitoring snow parameters on the Antarctic Peninsula: A new methodological approach. In: *EARSeL eProceedings* 5 (1), S. 100-110.

BENSON, C.S. (1960): Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland ice sheet. Dissertation, 228 Seiten. URL: http://etd.caltech.edu/etd/available/etd-03232006-104828/, Stand: 25.08.2008.

BORESJÖ-BRONGE, L. UND C. BRONGE (1999): Ice and snow-type classification in the Vestfold Hills, East Antarctica, using Landsat-TM data and ground radiometer measurements. In: *International Journal of Remote Sensing* 20, S. 225-240.

BRAUN, M. (2001): Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica). An approach from field measurements, modelling and remote sensing. Dissertation. 191 Seiten. URL: http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/223/, Stand: 27.08.2008.

BRAUN, M. UND H. GOSSMANN (2002): Glacial changes in the areas of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, Maritime Antarctica. In: Beyer, L. UND M. BÖLTER (Hrsg.): *Geoecology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*. Springer Verlag, S. 75-89.

BÜHL, A. UND P. ZÖFEL (2002): SPSS 11. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. 8. überarbeitete und erweiterte Auflage, 757 Seiten. Pearson Studium.

CAVALIERI, D.J., C.L. PARKINSON, P. GLOERSEN, J.C. COMISO UND H.J. ZWALLY (1999): Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive microwave multisensor data sets. In: *Journal of Geophysical Research* 104, S. 15803-15814.

CHAMBERS, L.H. (2008): S´COOL Definitions. NASA. URL: http://asd-www.larc.nasa.gov/SCOOL/definition.html, Stand: 25.08.2008.

COLBECK, S.C. (1982): Overview of seasonal snow metamorphism. In: *Reviews of Geophysics and Space Physics* 20 (1), S. 45-61.

CONNOLLEY, W. (2004): Metlog Comprehensible User Interface. URL: http://www.antarctica.ac.uk/met/metlog/cui.html, Stand: 26.08.2008.

COOK, A.J., A.J. FOX, D.G. VAUGHAN UND J.G. FERRIGNO (2005): Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. In: *Science* 308 (5721), S. 541-544.

DOAKE, C.S.M. UND D.G. VAUGHAN (1991): Rapid disintegration of Wordie Ice Shelf in response to atmospheric warming. In: *Nature* 350, S. 328-330.

DOZIER, J. (1989A): Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. In: *Remote Sensing of Environment* 28, S. 9-22.

DOZIER, J. (1989B): Estimation of properties of alpine snow from Landsat Thematic Mapper. In: *Advances in Space Research* 9 (1), S. 207-215.

DOZIER, J. UND T. H. PAINTER (2004): Multispectral and hyperspectral remote sensing of alpine snow properties. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 32, S. 465-494.

FAHNESTOCK, M.A., W. ABDALATI UND C.A. SHUMAN (2002): Long melt seasons on ice shelves of the Antarctic Peninsula: an analysis using satellite-based microwave emission measurements. In: *Annals of Glaciology* 34, S. 127-133.

FAUSTO, R.S., C. MAYER UND A. AHLSTRØM (2007): Satellite-derived surface type and melt area of the Greenland ice sheet using MODIS data from 2000 to 2005. In: *Annals of Glaciology* 46, S. 35-42.

GLOERSEN, P., W.J. CAMPBELL, D.J. CAVALIERI, J.C. COMISO, C.L. PARKINSON UND H.J. ZWALLY (1992): Arctic and Antarctic sea ice, 1978–1987: In: *Satellite passive-microwave observations and analysis*. NASA Special Publication 511. 290 Seiten.

HALL D.K., G.A. RIGGS UND V.V. SALOMONSON (1995): Development of Methods for Mapping Global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. In: *Remote Sensing of Environment* 54, S. 127-140.

HALL, D. K. UND J. MARTINEC (1985): Remote sensing of ice and snow. Chapman and Hall, 189 Seiten.

HALL, D.K., A.T.C. CHANG UND H. SIDDALINGAIAH (1988): Reflectances of glaciers as calculated using Landsat-5 Thematic Mapper data. In: *Remote Sensing of Environment* 25, S. 311-321.

HALL, D.K., J.P. ORMSBY, R.A. BINDSCHADLER UND H. SIDDALINGAIAH (1987): Characterization of snow and ice zones on glaciers using Landsat Thematic Mapper data. In: *Annals of Glaciology* 9, S. 104-108.

HALL, D.K., R.A. BINDSCHADLER, J.L. FOSTER, A.T.C. CHANG UND H. SIDDALINGAIAH (1990): Comparison of in situ and satellite derived reflectances of Forbindels Glacier, Greenland. In: *International Journal of Remote Sensing* 11 (3), S. 493-504.

HEISKANEN, J., K. KAJUUTTI, M. JACKSON, H. ELVEHØY UND P. PELLIKKA (2003): Assessment of glaciological parame-ters using Landsat satellite data in Svartisen, northern Norway. In: *EARSeL eProceedings* 2 (1), S. 34-42.

JEZEK, K.C. (2008): *The RADARSAT-1 Antarctic Mapping Project.* BPRC Report No. 22, Byrd Polar Research Center, The Ohio State University, Columbus, Ohio. 64 Seiten.

KING, J.C. (1994): Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. In: *International Journal of Climatology* 14, S. 357-369.

KING, M.D., J. CLOSS, S. SPANGLER, R. GREENSTONE, S. WHARTON UND M. MYERS (2003): EOS Data Products Handbook, Vol. 1. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Maryland. 261 Seiten.

KNAP, W.H. UND C.H. REIJMER (1998): Anisotropy of the reflected radiation field over melting glacier ice: Measurements in Landsat TM Bands 2 and 4. In: *Remote Sensing of Environment* 65, S. 93-104.

KÖNIG, M., J.G. WINTHER UND E. ISAKSSON (2001): Measuring snow and glacier ice properties from satellite. In: *Reviews of Geophysics* 39 (1), S. 1-27.

LEICA GEOSYSTEMS GEOSPATIAL IMAGING (2005): ERDAS Field Guide. Norcross, Georgia, 207 Seiten.

LI, X., T. KOIKE UND G. CHENG (2002): Retrieval of snow reflectance from Landsat data in rugged terrain. In: *Annals of Glaciology* 34, 31-37.

LILLESAND, T.M., R.W. KIEFER, J.W. CHIPMAN (2004): Remote sensing and image interpretation. 5. Auflage. Wiley and Sons, 763 Seiten.

LIU, H., K. JEZEK, B. LI UND Z. ZHAO (2001): *Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2*. National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO. URL: http://nsidc.org/data/nsidc-0082.html, Stand: 19.08.2008.

LIU, H., K.C. JEZEK UND B. LI (1999): Development of Antarctic digital elevation model by integrating cartographic and remotely sensed data: A geographic information

system based approach. In: *Journal of Geophysical Research* 104, S. 23199-23213.

LIU, L., X. WEN, X. DONG UND Q. DAI (2008): A New Prompt Algorithm for Removing Bowtie Effect of MODIS L1B Data. *Congress on Image and Signal Processing, IEEE 2008*, S. 663-667.

LORIUS, C. UND R. GENDRIN (2000): Antarktis. BLT, 124 Seiten. BLT.

LUCCHITA, B.K. UND C.E. ROSANOVA (1998): Retreat of northern margins of George VI and Wilkins Ice Shelves, Antarctic Peninsula. In: *Annals of Glaciology* 27, S. 41-46.

MARSHALL, G.J., V. LAGUN UND T.A. LACHLAN-COPE (2002): Changes in Antarctic Peninsula tropospheric temperatures from 1956 to 1999: A synthesis of observations and reanalysis data. In: *International Journal of Climatology* 22 (3), S. 291-310.

MASAHIRO, T., R.G. ALLEN UND R. TREZZA (2008): At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. In: *Journal of Hydrologic Engineering.* 13 (2), S. 51-63.

MORRIS, E.M. UND D.G. VAUGHAN (2003): Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of viability of ice shelves. In: DOMACK, E., A. LEVENTER, A. BURNETT, R. BINDSCHADLER, P. CONVEY UND M. KIRBY (Hrsg.): *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*. Antarctic Research Series Volume 79, American Geophysical Union, S. 61-68.

MÜLLER, F. (1962): Zonation in the accumulation area of the glaciers of Axel Heiberg Island, N.W.T., Canada. In: *Journal of Glaciology* 4 (33), S. 302-311.

NOLIN, A. UND J. DOZIER (1993): Estimating Snow Grain Size Using AVIRIS Data. In: *Remote Sensing of Environment*. 44. S. 231-238.

PAINTER, T.H., D.A. ROBERTS, R.O. GREEN UND J. DOZIER (1998): The Effect of Grain Size on Spectral Mixture Analysis of Snow-Covered Area from AVIRIS Data. In: *Remote Sensing of Environment*. 65. S. 320-332

PARKINSON, C.L. (2002): Trends in the length of the Southern Ocean sea-ice season, 1979–99. In: *Annals of Glaciology* 34, S. 435-440.

PATERSON, W.S.B. (1994): The Physics of Glaciers. 3. Auflage, 480 Seiten. Elsevier Science Ltd.

PAUL, F. (2001): Evaluation of different methods for glacier mapping using Landsat TM. In: *EARSeL eProceedings* 1 (1), S. 239-245.

PAUL, F. (2003): The new Swiss glacier inventory 2000: application of remote sensing an GIS. Unveröffentlichte Dissertation, Universität Zürich, 194 Seiten.

PEEL, D.A. (1992): Spatial temperature and accumulation rate variations in the Antarctic Peninsula. In: MORRIS, E. M. (Hrsg.): *The contribution of Antarctic Peninsula ice to sea level rise*. British Antarctic Survey Ice & Climate Special Report 1, S. 11-15.

RACK, W. UND H. ROTT (2004): Pattern of retreat and disintegration of Larsen B Ice Shelf, Antarctic Peninsula. In: *Annals of Glaciology* 39, S. 505-510.

RAKWATIN, P., W. TAKEUCHI UND Y. YASUOKA (2007): Stripe Noise Reduction in MODIS Data by Combining Histogram Matching With Facet Filter. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (6), S. 1844-1856.

RAU, F. (2003): The upward shift of the dry snow line on the northern Antarctic Peninsula. In: *EARSeL eProceedings* 2 (1), S. 113-121.

RAU, F. (2004): Schneeeigenschaften und Gletscherzonen der Antarktischen Halbinsel im Radarbild. Dissertation. URL: http://www.freidok.uni-Freiburg.de/volltexte/1370/pdf/Rau_Dissertation_06-07-04.pdf, Stand: 13.08.2008.

RAU, F. UND M. BRAUN (2002): The regional distribution of the dry snow zone on the Antarctic Peninsula north of 70º South. In: *Annals of Glaciology* 34, S. 95-100.

RAU, F., F. MAUZ, H. DE ANGELIS, R. JAÑA, J. ARIGONY-NETO, P. SKVARCA, S. VOGT, H. SAURER UND H. GOSSMANN (2004): Variations of glacier frontal positions on the Northern Antarctic Peninsula. In: *Annals of Glaciology* 39, S. 525-530.

RAU, F., M. BRAUN, H. SAURER, H. GOSSMANN, G. KOTHE, F. WEBER, M. EBEL UND D. BEPPLER (2002): Monitoring Multi-Year Snow Cover Dynamics on the Antarctic Peninsula Using SAR Imagery. In*: Polarforschung* 67 (1/2), S. 27-40.

RAU, F., M. BRAUN, M. FRIEDRICH, F. WEBER UND H. GOSSMANN (2001): Radar glacier zones and its boundaries as indicators of glacier mass balance and climatic variability. *EARSeL eProceedings* 1 (1), S. 317-327.

REES, W.G. (2006): Remote Sensing of Snow and Ice. Taylor and Francis, 285 Seiten.

RIGNOT, E. UND R.H. THOMAS (2002): Mass balance of polar ice sheets. In: *Science* 297 (5586), S. 1502-1506.

ROTT, H., P. SKVARCA UND T. NAGLER (1996): Rapid collapse of northern Larsen Ice Shelf, Antarctica. In: *Science* 271 (5250), S. 788-792.

SANDMEIER, S. UND K.I. ITTEN (1997): A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35 (3), S. 708-717.

SAURER, H. UND H. GOSSMANN (2002): Quantification and detection of regional disparities of glacial phenomena on the Antarctic Peninsula, QuaDA. Förderungsantrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 34 Seiten.

SCAMBOS, T.A., C. HULBE UND M. FAHNESTOCK (2003): Climate-induced ice shelf disintegration in the Antarctic Peninsula. In: DOMACK, E., A. LEVENTER, A. BURNETT, R. BINDSCHADLER, P. CONVEY UND M. KIRBY (Hrsg.): *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*. Antarctic Research Series Volume 79, American Geophysical Union, S. 77-92.

SCAR, SCIENTIFIC COMMITTEE ON ANTARCTIC RESEARCH (1992): The Role of the Antarctic in Global Change. An international Plan for a Regional Research Programme. URL: http://www.scar.org/publications/list/, Stand: 27.08.2008.

SKVARCA, P. UND H. DE ANGELIS (2003): Impact assessment of regional climatic warming on glaciers and ice shelves of the northeastern Antarctic Peninsula. In: DOMACK, E., A. LEVENTER, A. BURNETT, R. BINDSCHADLER, P. CONVEY UND M. KIRBY (Hrsg.): *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*. Antarctic Research Series Vol. 79, American Geophysical Union, S. 69-78.

SKVARCA, P., H. DE ANGELIS UND E. ERMOLIN (2004): Mass balance of 'Glaciar Bahía del Diablo', Vega Island, Antarctic Peninsula. In: *Annals of Glaciology* 39, S. 209-213.

SKVARCA, P., W. RACK UND H. ROTT (1999): 34 year satellite time series to monitor characteristics, extent and dynamics of Larsen B Ice Shelf, Antarctic Peninsula. In: *Annals of Glaciology* 29, S. 255-260.

STRABALA, K. (1999): MODIS Cloud Mask User's Guide. Cooperative Institute of Meteorological Satellite Studies (CIMSS). University of Wisconsin, Madison. URL: http://cimss.ssec.wisc.edu/modis1/pdf/CMUSERSGUIDE.PDF, Stand: 25.08.2008.

THOMPSON, L.G., D.A. PEEL, E. MOSLEY-THOMPSON, R. MULVANEY, J. DAI, P.N. LIN, M.E. DAVIS UND C.F. RAYMOND (1994): Climate since AD 1510 on Dyer Plateau, Antarctic Peninsula: evidence for recent climate change. In: *Annals of Glaciology* 20, S. 420-426.

TOLLER, G.N., A. ISAACMAN UND J. KUYPER (2006): MODIS Level 1B Product User's Guide. NASA/Goddard Space flight Center. URL: http://www.mcst.ssai.biz/mcstweb/L1B/product.html, Stand: 14.08.2008.

TORINESI, O., M. FILY UND C. GENTHON (2003): Interannual variability and trend of the Antarctic Ice Sheet summer melting period from 20 years of spaceborne microwave data. In: J*ournal of Climate* 16, S.1047-1060.

TRENBERTH, K.E., P.D. JONES, P. AMBENJE, R. BOJARIU, D. EASTERLING, A. KLEIN TANK, D. PARKER, F. RAHIMZADEH, J.A. RENWICK, M. RUSTICUCCI, B. SODEN UND P. ZHAI (2007): Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR UND H.L. MILLER (Hrsg.)]. Cambridge University Press.

TURNER, J., S.R. COLWELL UND S. HARANGOZO (1997): Variability of precipitation over the coastal western Antarctic Peninsula from synoptic observations. In: *Journal of Geophysical Research* 102 (D12), S. 13999-14007.

VAUGHAN, D.G. (2006): Recent trends in melting conditions on the Antarctic Peninsula and their implications for ice-sheet mass balance and sea level. In: *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 38 (1), S. 147-152.

VAUGHAN, D.G., G.J. MARSHALL, W.M. CONNOLLEY, C. PARKINSON, R. MULVANEY, D.A. HODGSON, J.C. KING, C.J. PULDSEY UND J. TURNER (2003): Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. In: *Climatic Change* **60**, S. 243-274.

WILLIAMS, R.S., D.K. HALL UND C.S. BENSON (1991): Analysis of glacier facies using satellite techniques. In: *Journal of Glaciology* 37 (125), S. 120-128.

WINTHER, J.-G. UND D.K. HALL (1999): Satellite-derived snow coverage related to hydropower production in Norway: present and future. In: *International Journal of Remote Sensing* 20 (15/16), S. 2991-3008.

Wiscombe, W.J. und S.G. Warren (1980): A model for the spectral albedo of snow. I. Pure snow. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 37 (12), S. 2712-2733.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANISATION (1995): Manual on Codes, International Codes. Vol. I.1. Part A. Alphanumeric Codes. WMO-No. 306, 503 Seiten.

WUNDERLE, S. (1996): Die Schneedeckendynamik der Antarktischen Halbinsel und ihre Erfassung mit aktiven und passiven Fernerkundungsverfahren. In: *Freiburger Geographische Hefte* 48. Hrsg. H. GOSSMANN. 172 Seiten. Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

ZENG, Q., M. CAO, X. FENG, F. LIANG, X. CHEN UND W. SHENG (1984): A study of spectral reflection characteristics for snow, ice and water in the north of China. In: GOODISON, B.E. (Hrsg.): *Proceedings of Hydrological Aplications of Remote Sensing and Remote Data Transmission*. IAHS Publication Nr. 145, S. 451-462.

ZHOU, X. UND S. LI (2002): Comparison between in situ and MODIS-derived spectral reflectances of snow and sea ice in the Ammundsen, Antarctica. In: *International Journal of Remote Sensing* 24 (24), S. 5011-5032.

ZWALLY, H.J., J.C. COMISO, C.L. PARKINSON, D.J. CAVALIERI UND P. GLOERSEN (2002): Variability of Antarctic sea ice 1979–1998. In: *Journal of Geophysical Research* 107 (C5), 3041, doi:10.1029/2000JC000733.

Internet-Quellen:

URL 1: MODIS Swath Reprojection Tool Distribution Page.
http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/mrtswath/index.asp (11.02.2008).

URL 2: Collection 5 Updates auf MODIS Atmosphere.
http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products_C005update.html (07.08.2008).

URL 3: MODIS Atmosphere Website.
http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD35_L2/index.html (21.08.2008).

URL 4: Website des Level1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS).
http://ladsweb.nascom.nasa.gov/ (05.06.2008).

URL 5: Website des Land Distributed Active Archive Center.
http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp (17.08.2008).

URL 6: Website des Distributed Active Archive Center für MODIS Kryosphären- und Ozean-Produkte.
http://nsidc.org/daac/projects/visible_infrared/modis.html (01.03.2008).

URL 7: MODIS Website.
http://modis.gsfc.nasa.gov/. (23.08.08)

URL 8: Website, Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2.
http://nsidc.org/data/nsidc-0082.html. (22.08.2008)

URL 9: PHP Website.
http://de.php.net (10.04.2008).

URL 10: PHP-GTK Website.
http://gtk.php.net (10.04.2008).

URL 11: Earth Observing System. Mission Profiles- Terra. NASA.
http://eospso.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/mission_profiles/show_mission.php?id=35 (22.08.2008).

URL 12: NASA: Terra (EOS AM-1), about Terra.
http://terra.nasa.gov/About/MODIS/index.php (22.08.2008).

URL 13: Satellite Overpass Predictor, NASA Earth Observatory.
http://earthobservatory.nasa.gov/MissionControl/overpass.html (20.08.2008).

URL 14: Antarctic Digital Database (ADD).
http://www.add.scar.org (05.09.2008).

URL 15: Landsat Image Mosaic of Antarctica (LIMA).
http://lima.usgs.gov/ (11.09.2008).

ANHANG

A.1 MODIS-Daten

Tabelle A.0.1: *Zur Konzeption der Prozessierungskette und deren Überprüfung verwendete Zeitpunkte des MOD02-Produkts (URL 4).*

Plattform/ Sensor	Dateiname	Aufnahmezeitpunkt
Terra MODIS	MOD021KM.A2000057.1345.005	26.02.2000 13:45
Terra MODIS	MOD021KM.A2000079.1310.005	19.03.2000 13:10
Terra MODIS	MOD021KM.A2000277.1230.005	03.10.2000 12:30
Terra MODIS	MOD021KM.A2000277.1410.005	03.10.2000 14:10
Terra MODIS	MOD021KM.A2001056.1135.005	25.02.2001 11:35
Terra MODIS	MOD021KM.A2001056.1310.005	25.02.2001 13:10
Terra MODIS	MOD021KM.A2002018.1310.005	18.01.2002 13:10
Terra MODIS	MOD021KM.A2004012.1245.005	12.01.2004 12:45
Terra MODIS	MOD021KM.A2004289.1300.005	15.10.2004 13:00
Terra MODIS	MOD021KM.A2004304.1355.005	30.10.2004 13:55
Terra MODIS	MOD021KM.A2004308.1330.005	03.11.2004 13:30
Terra MODIS	MOD021KM.A2005012.1255.005	12.01.2005 12:55
Terra MODIS	MOD021KM.A2005279.1235.005	06.10.2005 12:35
Terra MODIS	MOD021KM.A2005279.1415.005	06.10.2005 14:15
Terra MODIS	MOD021KM.A2006319.1255.005	15.11.2006 12:55
Terra MODIS	MOD021KM.A2006319.1430.005	15.11.2006 14:30
Terra MODIS	MOD021KM.A2006319.1435.005	15.11.2006 14:35
Terra MODIS	MOD021KM.A2006335.1255.005	01.12.2006 12:55
Terra MODIS	MOD021KM.A2006335.1435.005	01.12.2006 14:35
Terra MODIS	MOD021KM.A2006354.1325.005	20.12.2006 13:25
Terra MODIS	MOD021KM.A2006354.1505.005	20.12.2006 15:05
Terra MODIS	MOD021KM.A2007005.1325.005	05.01.2007 13:25
Terra MODIS	MOD021KM.A2007005.1505.005	05.01.2007 15:05
Terra MODIS	MOD021KM.A2007024.1215.005	24.01.2007 12:15
Terra MODIS	MOD021KM.A2007024.1220.005	24.01.2007 12:20
Terra MODIS	MOD021KM.A2007024.1355.005	24.01.2007 13:55

Tabelle A.0.2: *Verwendete Zeitpunkte des MOD03-Produkts (URL 4).*

Plattform/ Sensor	Dateiname	Aufnahmezeitpunkt
Terra MODIS	MOD03.A2000057.1345.005	26.02.2000 13:45
Terra MODIS	MOD03.A2000079.1310.005	19.03.2000 13:10
Terra MODIS	MOD03.A2000277.1230.005	03.10.2000 12:30
Terra MODIS	MOD03.A2000277.1410.005	03.10.2000 14:10
Terra MODIS	MOD03.A2001056.1135.005	25.02.2001 11:35
Terra MODIS	MOD03.A2001056.1310.005	25.02.2001 13:10
Terra MODIS	MOD03.A2002018.1310.005	18.01.2002 13:10
Terra MODIS	MOD03.A2004012.1245.005	12.01.2004 12:45

Terra MODIS	MOD03.A2004289.1300.005	15.10.2004 13:00
Terra MODIS	MOD03.A2004304.1355.005	30.10.2004 13:55
Terra MODIS	MOD03.A2004308.1330.005	03.11.2004 13:30
Terra MODIS	MOD03.A2005012.1255.005	12.01.2005 12:55
Terra MODIS	MOD03.A2005279.1235.005	06.10.2005 12:35
Terra MODIS	MOD03.A2005279.1415.005	06.10.2005 14:15
Terra MODIS	MOD03.A2006319.1255.005	15.11.2006 12:55
Terra MODIS	MOD03.A2006319.1430.005	15.11.2006 14:30
Terra MODIS	MOD03.A2006319.1435.005	15.11.2006 14:35
Terra MODIS	MOD03.A2006335.1255.005	01.12.2006 12:55
Terra MODIS	MOD03.A2006335.1435.005	01.12.2006 14:35
Terra MODIS	MOD03.A2006354.1325.005	20.12.2006 13:25
Terra MODIS	MOD03.A2006354.1505.005	20.12.2006 15:05
Terra MODIS	MOD03.A2007005.1325.005	05.01.2007 13:25
Terra MODIS	MOD03.A2007005.1505.005	05.01.2007 15:05
Terra MODIS	MOD03.A2007024.1215.005	24.01.2007 12:15
Terra MODIS	MOD03.A2007024.1220.005	24.01.2007 12:20
Terra MODIS	MOD03.A2007024.1355.005	24.01.2007 13:55

Tabelle A.0.3: *Verwendete Zeitpunkte des MOD35_L2-Produkts (URL 4).*

Plattform/ Sensor	**Dateiname**	**Aufnahmezeitpunkt**
Terra MODIS	MOD35_L2.A2000057.1345.005	26.02.2000 13:45
Terra MODIS	MOD35_L2.A2000079.1310.005	19.03.2000 13:10
Terra MODIS	MOD35_L2.A2000277.1230.005	03.10.2000 12:30
Terra MODIS	MOD35_L2.A2000277.1410.005	03.10.2000 14:10
Terra MODIS	MOD35_L2.A2001056.1135.005	25.02.2001 11:35
Terra MODIS	MOD35_L2.A2001056.1310.005	25.02.2001 13:10
Terra MODIS	MOD35_L2.A2002018.1310.005	18.01.2002 13:10
Terra MODIS	MOD35_L2.A2004012.1245.005	12.01.2004 12:45
Terra MODIS	MOD35_L2.A2004289.1300.005	15.10.2004 13:00
Terra MODIS	MOD35_L2.A2004304.1355.005	30.10.2004 13:55
Terra MODIS	MOD35_L2.A2004308.1330.005	03.11.2004 13:30
Terra MODIS	MOD35_L2.A2005012.1255.005	12.01.2005 12:55
Terra MODIS	MOD35_L2.A2005279.1235.005	06.10.2005 12:35
Terra MODIS	MOD35_L2.A2005279.1415.005	06.10.2005 14:15
Terra MODIS	MOD35_L2.A2006319.1255.005	15.11.2006 12:55
Terra MODIS	MOD35_L2.A2006319.1430.005	15.11.2006 14:30
Terra MODIS	MOD35_L2.A2006319.1435.005	15.11.2006 14:35
Terra MODIS	MOD35_L2.A2006335.1255.005	01.12.2006 12:55
Terra MODIS	MOD35_L2.A2006335.1435.005	01.12.2006 14:35
Terra MODIS	MOD35_L2.A2006354.1325.005	20.12.2006 13:25
Terra MODIS	MOD35_L2.A2006354.1505.005	20.12.2006 15:05
Terra MODIS	MOD35_L2.A2007005.1325.005	05.01.2007 13:25
Terra MODIS	MOD35_L2.A2007005.1505.005	05.01.2007 15:05
Terra MODIS	MOD35_L2.A2007024.1215.005	24.01.2007 12:15
Terra MODIS	MOD35_L2.A2007024.1220.005	24.01.2007 12:20
Terra MODIS	MOD35_L2.A2007024.1355.005	24.01.2007 13:55

Tabelle A.0.4: *Verwendete Zeitpunkte der MODIS-Daten und Anzahl der darin enthaltenen und letztlich prozessierten Gletscher auf der AH. Anzahl korrigierter Werte für Schneelinie (SL) und Trockenschneelinie (DSL) und Bewölkungsanteil der Gletscher.*

Aufnahmezeitpunkt	Gletscher i. d. Szene	Gletscher prozessiert	SL korrigiert	DSL korrigiert	Anteil bewölkter Gletscher %
26.02.2000 13:45	240	40	4	1	83,33
19.03.2000 13:10	240	60	11	3	75,00
03.10.2000 12:30	240	24	7	10	90,00
03.10.2000 14:10	240	46	1	8	80,83
25.02.2001 11:35	240	16	7	0	93,33
25.02.2001 13:10	240	23	11	10	90,42
18.01.2002 13:10	240	14	0	1	94,17
12.01.2004 12:45	240	69	0	0	71,25
15.10.2004 13:00	240	18	6	16	92,50
30.10.2004 13:55	240	59	29	31	75,42
03.11.2004 13:30	240	7	6	1	97,08
12.01.2005 12:55	240	33	2	3	86,25
06.10.2005 12:35	240	30	19	2	87,50
06.10.2005 14:15	240	7	1	0	97,08
15.11.2006 12:55	240	26	16	11	89,17
15.11.2006 14:30	235	17	9	11	92,77
15.11.2006 14:35	240	4	3	2	98,33
01.12.2006 12:55	240	56	10	11	76,67
01.12.2006 14:35	240	41	16	6	82,92
20.12.2006 13:25	240	21	1	4	91,25
20.12.2006 15:05	240	34	11	11	85,83
05.01.2007 13:25	240	40	7	12	83,33
05.01.2007 15:05	240	37	10	7	84,58
24.01.2007 12:15	227	29	0	0	87,22
24.01.2007 12:20	240	49	2	2	79,58
24.01.2007 13:55	240	91	1	8	62,08

A.2 PHP-Quellcode

Im Folgenden die beiden zentralen PHP-Skripte die zur Prozessierung von MODIS-Daten angefertigt bzw. verändert wurden. Die komplette IceTools1.1-Version mit allen Skripten, batchfiles, Modellen, und sonstigen Dateien befindet sich auf der beiliegenden CD-ROM.

PHP-Quellcode der Vorprozessierung von MODIS-Daten:

Datei ‚batch_list_preprocess_modisimport_button_version.php'.

```
    1 <?php
    2
    3 function batch_list_preprocess_modisimport(GtkWindow $wnd,
$root_icetools) {
    4
    5 // Create the window
    6 $wnd_batch_preprocess_modisimport = new GtkWindow();
    7 $wnd_batch_preprocess_modisimport->set_title('Modis Import');
    8 $wnd_batch_preprocess_modisimport->set_resizable(false);
    9
   10 //Close the main loop when the window is destroyed
   11 $wnd_batch_preprocess_modisimport->connect_simple('destroy',
array('gtk', 'main_quit'));
   12
   13 // Set up all the widgets we need
   14
   15 //first table with file chooser button
   16 ////////////////////////////////////
   17 // Enter the input files
   18 $filefilter = new GtkFileFilter();
   19 $filefilter->add_pattern('*.hdf');
   20 //$filefilter_b = new GtkFileFilter();
   21 //$filefilter_b->add_pattern('*.tif');
   22
   23 //enter mod02
   24 $btnImage_mod02 = new GtkFileChooserButton('Select MOD02 hdf-
file', Gtk::FILE_CHOOSER_ACTION_OPEN);
   25 $btnImage_mod02->set_filter($filefilter);
   26 $btnImage_mod02->set_width_chars(22);
   27 $lblImage_mod02 = new GtkLabel('Input MODIS 02 *.hdf');
   28 $lblImage_mod02->set_alignment(1, 0.5);
   29
   30 //enter mod35
   31 $btnImage_mod35 = new GtkFileChooserButton('Select MOD35 hdf-
file', Gtk::FILE_CHOOSER_ACTION_OPEN);
   32 $btnImage_mod35->set_filter($filefilter);
   33 $btnImage_mod35->set_width_chars(22);
   34 $lblImage_mod35 = new GtkLabel('Input MODIS 35 *.hdf');
   35 $lblImage_mod35->set_alignment(1, 0.5);
   36
   37 //enter mod03
   38 $btnImage_mod03 = new GtkFileChooserButton('Select MOD03 hdf-
file', Gtk::FILE_CHOOSER_ACTION_OPEN);
   39 $btnImage_mod03->set_filter($filefilter);
   40 $btnImage_mod03->set_width_chars(22);
   41 $lblImage_mod03 = new GtkLabel('Input MODIS 03 *.hdf');
   42 $lblImage_mod03->set_alignment(1, 0.5);
```

```
   43
   44 // Second Table
   45 $lbloutdir = new GtkLabel('Output folder');
   46 $lbloutdir->set_alignment(0, 0.5);
   47 $btnoutdir = new GtkFileChooserButton('Select the Output
folder', Gtk::FILE_CHOOSER_ACTION_SELECT_FOLDER);
   48 $btnoutdir->set_width_chars(22);
   49
   50 // Call the function when the user clicks on run
   51 $btnRun = new GtkButton('_OK');
   52 $btnRun ->connect_simple('clicked',
'create_batch_list_modisimport', $wnd_batch_preprocess_modisimport,
$root_icetools,
   53 $btnImage_mod02, $btnImage_mod35, $btnImage_mod03, $btnoutdir);
   54 $btnRun->connect_simple('clicked',
array($wnd_batch_preprocess_modisimport, 'destroy'));
   55
   56 // Destroy the window when the user clicks Cancel
   57 $btnCancel   = new GtkButton('_Cancel');
   58 $btnCancel->connect_simple('clicked',
array($wnd_batch_preprocess_modisimport, 'destroy'));
   59
   60 // Lay out the file choosers in a table
   61 $tbl_files = new GtkTable(4,4);
   62 $tbl_files->attach($lblImage_mod02, 0, 1, 0, 1);
   63 $tbl_files->attach($btnImage_mod02, 1, 2, 0, 1);
   64
   65 $tbl_files->attach($lblImage_mod35, 0, 1, 1, 2);
   66 $tbl_files->attach($btnImage_mod35, 1, 2, 1, 2);
   67
   68 $tbl_files->attach($lblImage_mod03, 0, 1, 2, 3);
   69 $tbl_files->attach($btnImage_mod03, 1, 2, 2, 3);
   70
   71 //layout output file chooser
   72 $tbl_files->attach($lbloutdir, 0, 1, 3, 4);
   73 $tbl_files->attach($btnoutdir, 1, 2, 3, 4);
   74
   75 // Add the buttons to a button box
   76 $bbox = new GtkHButtonBox();
   77 $bbox->set_layout(Gtk::BUTTONBOX_SPREAD);
   78 $bbox->add($btnRun);
   79 $bbox->add($btnCancel);
   80
   81 // Add the table and the button box to a vbox
   82 $vbox2 = new GtkVBox();
   83 $frame2 = new GtkFrame();
   84 $frame2->set_border_width(5);
   85 $frame2->add($tbl_files);
   86 $frame2->set_label('Image information');
   87 $vbox2->pack_start($frame2);
   88 $vbox2->pack_start($bbox);
   89
   90
////////////////////////////////////////////////////////////////
   91
   92 // Add the vbox1 to the window
   93 $wnd_batch_preprocess_modisimport->add($vbox2);
   94
   95 // Show all widgets
   96 $wnd_batch_preprocess_modisimport->show_all();
   97
   98 // Start the main loop
   99 Gtk::main();
```

```
  100
  101 } // end function window
  102
  103 function create_batch_list_modisimport(GtkWindow
$wnd_batch_preprocess_modisimport, $root_icetools,
  104     GtkFileChooserButton $btnImage_mod02, GtkFileChooserButton
$btnImage_mod35,
  105     GtkFileChooserButton $btnImage_mod03, GtkFileChooserButton
$btnoutdir){
  106
  107
  108 //                  GtkEntry $txtoutdir){
  109
  110
  111 // make file names globally availiable
  112 global $mrts_out_mod02, $erdas_mod35_img;
  113
  114 // make connection paramters available to all functions
  115 global $strServer, $strPort, $strDatabase, $strUsername,
$strPassword;
  116
  117 //make aquisition time globally available
  118 global $acq_time;
  119
  120 // Get variables
  121 $path1_mod02 = $btnImage_mod02->get_filename();
  122 $path1_mod35 = $btnImage_mod35->get_filename();
  123 $path1_mod03 = $btnImage_mod03->get_filename();
  124
  125 $outdir1 = $btnoutdir->get_filename();
  126
  127 $path = explode(",", $path1);
  128
  129 $outdir2 = $outdir1."/";
  130 $outdir = str_replace("/","\\", $outdir2);
  131 $outdir_erdas = str_replace("\\","/", $outdir2);
  132
  133
  134 // Define names of batchfiles to start MRTSwath for Modis02 and
Modis35 data
  135 $filename_mod02 = basename($path1_mod02, ".hdf");
  136 $filename_mod35 = basename($path1_mod35, ".hdf");
  137
  138 $modis_batch02 = $outdir."/".$filename_mod02.".bat";
  139 $modis_batch35 = $outdir."/".$filename_mod35.".bat";
  140
  141
  142 // Zeichenkette konstruieren
  143
  144 // $modis_prm02/ 35 sind die parameterfiles und liegen momentan
in \icetools_modis\include\
  145 $modis_prm02 = $root_icetools."/include/hdf2tif.prm";
  146 $modis_prm35 = $root_icetools."/include/hdf2hdr.prm";
  147
  148 // swath2grid -if=inputfile -of outputfile -pf parameterfile -gf
mod03_file (i.e. geolocation file) //pfad zu mrts muss angepasst
werden!
  149 //pfad  zu mrts exe für iller
  150 $mod02_mrts_cmd = "C:\Programme\MRTS\MRTSwath\bin\swath2grid -
if=" . $path1_mod02 . " -of=" . $outdir.$filename_mod02 . ".tif -gf="
. $path1_mod03 . " -pf=" . $modis_prm02;
  151 $mod35_mrts_cmd = "C:\Programme\MRTS\MRTSwath\bin\swath2grid -
if=" . $path1_mod35 . " -of=" . $outdir.$filename_mod35 . ".hdr -gf="
```

```
. $path1_mod03 . " -pf=" . $modis_prm35;
  152
  153 //namen für ausgabedatei aus mrts
  154 $mrts_out_mod02 = $outdir."/".$filename_mod02.".tif";
  155 $mrts_out_mod35_dat =
$outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0.dat";
  156 $mrts_out_mod35_hdr = $outdir.$filename_mod35 .
"_Cloud_Mask_b0.hdr";
  157
  158 //name für erdas impgen output
  159 $erdas_mod35_img = $outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0.img";
  160
  161
  162 // execute $open_modis_batch02 und ..._batch_35 batch files
  163 exec($mod02_mrts_cmd);
  164 exec($mod35_mrts_cmd);
  165
  166
  167 //Beginn lesen von hdr file und schreiben von ERDAS batchfile
für impgen
  168
//////////////////////////////////////////////////////////////////
  169
  170 //hdr file lesen
  171 $open_hdr_file = fopen($mrts_out_mod35_hdr, "rb");
  172 $contents = fread($open_hdr_file,
filesize($mrts_out_mod35_hdr));
  173 fclose ($open_hdr_file);
  174
  175 // suche nach anzahl der zeilen der modis-szene in hdr file
  176 $searchtext_rows = 'NLINES = ( ';
  177 $searchtext_rows_end = ' )';
  178
  179 $length_searchtext_rows =  strlen ($searchtext_rows);
  180 $startpos_rows = strpos($contents, $searchtext_rows) +
$length_searchtext_rows;
  181
  182 $substring_contents_rows = substr($contents, $startpos_rows);
  183 $endpos_rows = strpos($substring_contents_rows,
$searchtext_rows_end);
  184 $number_rows = substr($contents, $startpos_rows, $endpos_rows);
  185
  186 // suche nach anzahl der spalten der modis -szene in hdr file
(von mod35)
  187 $searchtext_cols = 'NSAMPLES = ( ';
  188 $searchtext_cols_end = ' )';
  189
  190 $length_searchtext_cols =  strlen ($searchtext_cols);
  191 $startpos_cols = strpos($contents, $searchtext_cols) +
$length_searchtext_cols;
  192
  193 $substring_contents_cols = substr($contents, $startpos_cols);
  194 $endpos_cols = strpos($substring_contents_cols,
$searchtext_cols_end);
  195 $number_cols = substr($contents, $startpos_cols, $endpos_cols);
  196
  197 $Input = str_replace("\\","/", $mrts_out_mod35_dat);
  198 $Output = str_replace("\\","/", $erdas_mod35_img);
  199
  200
  201
  202  // ERDAS bcf batchfile impgen schreiben
  203  ////////////////////////////////////
```

```
  204 $batch_command_part1="
  205 /*
  206 ** IMAGINE Version 9.1 Batch Commands File
  207 */
  208 variable Input Auto \"".$Input."\";
  209
  210 variable Output Auto \"".$Output."\" Delete_Before;
  211
  212 importgen -inputfilename '$(Input)' -outputfilename '$(Output)'
-imagesize ";
  213
  214 $batch_command_part2= " ";
  215
  216  $batch_command_part3= " -sourcebandscount 8 -pixeltype u1 -
format bip -inputpixeltype u1";
  217
  218 $batch_command_complete = $batch_command_part1. $number_cols .
$batch_command_part2 . $number_rows . $batch_command_part3;
  219
  220
  221 //create ERADS bcf file
  222 ////////////////////////
  223 $modis_impgen_bcf =
$outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0_impgen.bcf";
  224 $create_bcffile_impgen = fopen($modis_impgen_bcf, 'wb');
  225 fwrite($create_bcffile_impgen, $batch_command_complete);
  226 fclose($create_bcffile_impgen);
  227
  228 //create ERDAS bls file (needs to present in order for
batchprocess.exe to run properly, file might be empty)
  229 $bls_dummy = "";
  230 $modis_impgen_bls =
$outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0_impgen.bls";
  231 $create_blsfile_impgen = fopen($modis_impgen_bls, 'wb');
  232 fwrite($create_blsfile_impgen, $bls_dummy);
  233 fclose($create_blsfile_impgen);
  234
  235
  236 // batch file (.bat) mit ERDAS initialisierung und
batchprocess.exe command zum ausführen des bcf files erzeugen
  237
////////////////////////////////////////////////////////////////////
  238 // ERDAS environment initialisierung einlesen
  239
  240 //batch_ini für iller
  241 $batchfile_ini =
$root_icetools."/include/batch_ini_mmoessner_iller.bat";
  242 $open_batchfile_ini = fopen($batchfile_ini , 'rb');
  243 $body_batchfile_ini = fread($open_batchfile_ini,
filesize($batchfile_ini));
  244 fclose($open_batchfile_ini);
  245
  246 // batchfile schreiben
  247 //pfad erdas iller
  248 $command_process_bcf_modis_impgen = "\"C:\Programme\Leica
Geosystems\Geospatial Imaging 9.1\bin\NTx86\batchprocess.exe\" -
bcffile \"".$modis_impgen_bcf."\"  -blsfile \"".$modis_impgen_bls."\"
-logfile \"".$modis_impgen_bcf.".log\""; //pfad immer anpassen!!
  249
  250 $body_batchfile_impgen =
$body_batchfile_ini.$command_process_bcf_modis_impgen;
  251
  252 $batchfile_impgen =
```

```
$outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0_impgen.bat";
  253 $create_batchfile_impgen = fopen($batchfile_impgen, 'wb');
  254 fwrite($create_batchfile_impgen, $body_batchfile_impgen);
  255 fclose($create_batchfile_impgen);
  256
  257 exec($batchfile_impgen);
  258 //exec($command_process_bcf_modis_impgen); //cmd direkt
ausführen
  259
  260
  261 echo "\n >> MODIS import done! \n";
  262
  263
  264
  265 //Anpassen des mapmodels mod35 file an ERDAS-format mit ERDAS
command-tool
  266
////////////////////////////////////////////////////////////////////
  267
  268 // suche nach X-Wert der UL corner der modis-szene in hdr file
  269 $searchtext_ULX = '# UL_CORNER_XY = ( ';
  270 $searchtext_ULX_end = ' ';
  271
  272 $length_searchtext_ULX =  strlen ($searchtext_ULX);
  273 $startpos_ULX = strpos($contents, $searchtext_ULX) +
$length_searchtext_ULX; //dateizeiger von anfang suchbegriff auf
dessen ende setzen
  274
  275 $substring_contents_ULX = substr($contents, $startpos_ULX);
//durchsucht hdr file und startet nach dem suchstring
  276 $endpos_ULX = strpos($substring_contents_ULX,
$searchtext_ULX_end);
  277 $value_ULX = substr($contents, $startpos_ULX, $endpos_ULX);
  278
  279 //suche nach Y-Wert der UL corner der modis-szene in hdr file
  280 $searchtext_ULY = '# UL_CORNER_XY = ( ';
  281 $searchtext_ULY_end = ' )';
  282
  283 $length_xvalue = strlen($value_ULX);
  284
  285 $length_searchtext_ULY =  strlen ($searchtext_ULY);
  286 $startpos_ULY = strpos($contents, $searchtext_ULY) +
$length_searchtext_ULY + $length_xvalue; //muss noch um ein
leerzeichen nach rechts verschoben werden
  287
  288 $substring_contents_ULY = substr($contents, $startpos_ULY);
  289 $endpos_ULY = strpos($substring_contents_ULY,
$searchtext_ULY_end);
  290 $value_ULY_0 = substr($contents, $startpos_ULY, $endpos_ULY);
  291
  292 //getrimmter wert ohne leerzeichen vorne
  293 $value_ULY = trim($value_ULY_0);
  294
  295 //berechnen der neuen eckkordinaten des mod35 files
  296 $value_ULX_corrected = $value_ULX + "500";
  297 $value_ULY_corrected = $value_ULY - "500";
  298
  299  // ERDAS bcf batchfile und bls-file für chmap schreiben und
erzeugen
  300  ////////////////////////////////////////////////////////////
  301
  302 $input_chmapmod = $erdas_mod35_img;  //$erdas_mod35_img ist
ausgabe datei von ERDAS impgen
```

```
  303
  304
  305 $batch_cmd_chmapmod_part1 = "
  306 /*
  307 ** IMAGINE Version 9.1 Batch Commands File
  308 */
  309 variable Input Auto \"".$input_chmapmod."\"
  310
  311 imagecommand '$input_chmapmod' -map ";
  312 $batch_cmd_chmapmod_part2= " ";
  313 //pfad iller
  314 $batch_cmd_chmapmod_part3= " 1.0000000000000000e+003
1.0000000000000000e+003 meters 'Polar Stereographic' -projection
'".$root_icetools."/include/antarctica.plb' 'SCAR Antarctic Polar
Stereographic' -meter imagecommand";
  315
  316 $batch_cmd_chmapmod_complete = $batch_cmd_chmapmod_part1.
str_replace(",", ".", $value_ULX_corrected)  .
$batch_cmd_chmapmod_part2 . str_replace(",", ".",
$value_ULY_corrected) . $batch_cmd_chmapmod_part3;
  317
  318 //create ERADS bcf file
  319 $modis_chmapmod_bcf =
$outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0_chmapmod.bcf";
  320 $create_bcffile_chmapmod = fopen($modis_chmapmod_bcf, 'wb');
  321 fwrite($create_bcffile_chmapmod, $batch_cmd_chmapmod_complete);
  322 fclose($create_bcffile_chmapmod);
  323
  324 //create ERDAS bls file (needs to present in order for
batchprocess.exe to run properly, file might be empty)
  325 $bls_dummy_chmapmod = "";
  326 $modis_chmapmod_bls =
$outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0_chmapmod.bls";
  327 $create_blsfile_chmapmod = fopen($modis_chmapmod_bls, 'wb');
  328 fwrite($create_blsfile_chmapmod, $bls_dummy);
  329 fclose($create_blsfile_chmapmod);
  330
  331 // batch file (.bat) mit ERDAS initialisierung und
batchprocess.exe command zum ausführen des bcf files erzeugen
  332
////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////
  333 // ERDAS environment initialisierung einlesen
  334 //batch_ini iller
  335 $batchfile_ini =
$root_icetools."/include/batch_ini_mmoessner_iller.bat";
  336 $open_batchfile_ini = fopen($batchfile_ini , 'rb');
  337 $body_batchfile_ini = fread($open_batchfile_ini,
filesize($batchfile_ini));
  338 fclose($open_batchfile_ini);
  339
  340 // batchfile schreiben
  341 //pfad erdas iller
  342 $cmd_process_bcf_modis_chmapmod = "\"C:\Programme\Leica
Geosystems\Geospatial Imaging 9.1\bin\NTx86\batchprocess.exe\" -
bcffile \"".$modis_chmapmod_bcf."\"  -blsfile
\"".$modis_chmapmod_bls."\" -logfile \"".$modis_chmapmod_bcf.".log\"";
  343
  344 $body_batchfile_chmapmod =
$body_batchfile_ini.$cmd_process_bcf_modis_chmapmod;
  345
  346 $batchfile_chmapmod =
$outdir.$filename_mod35."_Cloud_Mask_b0_chmapmod.bat";
```

```
  347 $create_batchfile_chmapmod = fopen($batchfile_chmapmod, 'wb');
  348 fwrite($create_batchfile_chmapmod, $body_batchfile_chmapmod);
  349 fclose($create_batchfile_chmapmod);
  350
  351 exec($batchfile_chmapmod);
  352
  353 echo "\n >> change map model done! \n";
  354
  355 //read coordinates for polygon and database input
  356 ////////////////////////////////////////////
  357
  358 //get ulx-coordinate
  359 $searchstring_ULX = "# UL_CORNER_XY = ( ";
  360 $search_end_ULX = " ";
  361
  362 $length_searchstring_ULX = strlen($searchstring_ULX);
  363 $start_ULX = strpos($contents, $searchstring_ULX) +
$length_searchstring_ULX;
  364 $length_ULX = substr($contents, $start_ULX);
  365 $end_ULX = strpos($length_ULX, $search_end_ULX);
  366 $ULX = substr($contents, $start_ULX, $end_ULX);
  367
  368 //get uly-coordinate
  369 $search_end_ULY = ' )';
  370
  371 $length_ULX_value = strlen($ULX);
  372 $start_ULY = strpos($contents,
$searchstring_ULX)+$length_searchstring_ULX+$length_ULX_value;
  373 $substr_ULY = substr($contents, $start_ULY);
  374 $end_ULY = strpos($substr_ULY, $search_end_ULY);
  375 $ULY_0 = substr($contents, $start_ULY, $end_ULY);
  376 $ULY = trim($ULY_0 );
  377
  378 //get urx-coordinate
  379 $searchstring_URX = "# UR_CORNER_XY = ( ";
  380 $search_end_URX = " ";
  381
  382 $length_searchstring_URX = strlen($searchstring_URX);
  383 $start_URX = strpos($contents, $searchstring_URX) +
$length_searchstring_URX;
  384 $length_URX = substr($contents, $start_URX);
  385 $end_URX = strpos($length_URX, $search_end_URX);
  386 $URX = substr($contents, $start_URX, $end_URX);
  387
  388 //get ury-coordinate
  389 $search_end_URY = ' )';
  390
  391 $length_URX_value = strlen($URX);
  392 $start_URY = strpos($contents,
$searchstring_URX)+$length_searchstring_URX+$length_URX_value;
  393 $substr_URY = substr($contents, $start_URY);
  394 $end_URY = strpos($substr_URY, $search_end_URY);
  395 $URY_0 = substr($contents, $start_URY, $end_URY);
  396 $URY = trim($URY_0 );
  397
  398 //get llx-coordinate
  399 $searchstring_LLX = "# LL_CORNER_XY = ( ";
  400 $search_end_LLX = " ";
  401
  402 $length_searchstring_LLX = strlen($searchstring_LLX);
  403 $start_LLX = strpos($contents, $searchstring_LLX) +
$length_searchstring_LLX;
  404 $length_LLX = substr($contents, $start_LLX);
```

```
  405 $end_LLX = strpos($length_LLX, $search_end_LLX);
  406 $LLX = substr($contents, $start_LLX, $end_LLX);
  407
  408 //get lly-coordinate
  409 $search_end_LLY = ' )';
  410
  411 $length_LLX_value = strlen($LLX);
  412 $start_LLY = strpos($contents,
$searchstring_LLX)+$length_searchstring_LLX+$length_LLX_value;
  413 $substr_LLY = substr($contents, $start_LLY);
  414 $end_LLY = strpos($substr_LLY, $search_end_LLY);
  415 $LLY_0 = substr($contents, $start_LLY, $end_LLY);
  416 $LLY = trim($LLY_0 );
  417
  418 //get lrx-coordinate
  419 $searchstring_LRX = "# LR_CORNER_XY = ( ";
  420 $search_end_LRX = " ";
  421
  422 $length_searchstring_LRX = strlen($searchstring_LRX);
  423 $start_LRX = strpos($contents, $searchstring_LRX) +
$length_searchstring_LRX;
  424 $length_LRX = substr($contents, $start_LRX);
  425 $end_LRX = strpos($length_LRX, $search_end_LRX);
  426 $LRX = substr($contents, $start_LRX, $end_LRX);
  427
  428 //get lry-coordinate
  429 $search_end_LRY = ' )';
  430
  431 $length_LRX_value = strlen($LRX);
  432 $start_LRY = strpos($contents,
$searchstring_LRX)+$length_searchstring_LRX+$length_LRX_value;
  433 $substr_LRY = substr($contents, $start_LRY);
  434 $end_LRY = strpos($substr_LRY, $search_end_LRY);
  435 $LRY_0 = substr($contents, $start_LRY, $end_LRY);
  436 $LRY = trim($LRY_0 );
  437
  438 // round coordinate values to integer to avoid conflict decimal
point specification, precision to meters is suffcient anyway
  439 $ul_x= round($ULX,0);
  440 $ul_y= round($ULY,0);
  441 $ur_x= round($URX,0);
  442 $ur_y= round($URY,0);
  443 $lr_x= round($LRX,0);
  444 $lr_y= round($LRY,0);
  445 $ll_x= round($LLX,0);
  446 $ll_y= round($LLY ,0);
  447
  448 //column entries for 'images' table
  449 //instrument name
  450 $inst_name='MODIS';
  451
  452 //instrument platform (when MOD > Terra, when MYD > Aqua)
  453 $plat_name_base = substr($filename_mod02, 0, 3);
  454 //$plat_name_base = substr($mrts_out_mod02, 0, 3);
  455
  456 if ($plat_name_base == 'MOD') {$plat_name = 'Terra';}
  457 elseif ($plat_name_base == 'MYD') {$plat_name = 'Aqua';}
  458
  459 //product name
  460 $prod_base = substr($filename_mod02, 0, 3);
  461 $prod_radiance = ($prod_base.'021KM');
  462 $prod_geoloc = ($prod_base.'03');
  463 $prod_cloudmask = ($prod_base.'35');
```

```
  464 $prod_all = $prod_radiance.",".$prod_geoloc.",".$prod_cloudmask;
  465
  466 $file_name = $filename_mod02;
  467
  468 //get date and acquisition time from filename
  469 $year_day = substr($filename_mod02, 10, 7);
  470 $time = substr($filename_mod02, 18, 4);
  471 $year_day_time = $year_day.$time;
  472 $conv_to_date = strtotime($year_day_time);
  473 $date2 = date("c", $conv_to_date);
  474 $date1 = str_replace("T", " ", $date2);
  475
  476 // date and time
  477 $acq_time = substr($date1, 0, 19);
  478
  479 //connect to database
  480 $link = pg_connect(" host=".$strServer." user=".$strUsername."
password=".$strPassword." dbname=".$strDatabase." port=".$strPort) or
die("Could not connect: ".pg_result_error($link));
  481
  482 //insert values, the_geom  polygon is constructed from a line
which is constructed from points which are constructed from coordinate
pairs
  483 $result1_query = "INSERT INTO images (inst_name, plat_name,
acq_time, file_name, product, the_geom) VALUES('$inst_name',
'$plat_name', '$acq_time', '$file_name', '$prod_all',
st_setsrid(st_makepolygon(st_addpoint(st_addpoint(st_addpoint(st_makel
ine(st_makepoint($ul_x, $ul_y), st_makepoint($ur_x, $ur_y)),
st_makepoint($lr_x, $lr_y)), st_makepoint($ll_x, $ll_y)),
st_makepoint($ul_x, $ul_y))), 3031))";
  484
  485 // just to show the query ...
  486 //echo "\n".$result1_query."\n\n";
  487
  488 // do the query that inserts the values into the table images
  489 $result1 = pg_query($link, $result1_query);
  490
  491
  492
  493 // just to show the results of the insert ...
  494 $result2 = pg_query($link, "SELECT image_id, inst_name,
plat_name, acq_time, file_name FROM images WHERE inst_name ILIKE
'MODIS'");
  495
  496 //show message window at end of preprocessing
  497 $msg1 = 'preprocessing done!';
  498 $dialog = new GtkMessageDialog($wnd_MODclassif,
Gtk::DIALOG_MODAL, Gtk::MESSAGE_INFO, Gtk::BUTTONS_OK);
  499 $dialog->set_markup("<span foreground='red'>$msg1</span>");
  500 $dialog->run();
  501 $dialog->destroy();
  502
  503
  504 } // end function create_batch_list_modisimport
  505
  506 ?>
```

PHP-Quellcode der Klassifikation für MODIS-Daten: Datei ‚MOD_classif.php'.

```
    1 <?php
    2
    3
    4 function MOD_classif(GtkWindow $wnd_MODclassif, $root_icetools,
GtkFileChooserButton $btnImage_mod5, GtkFileChooserButton
$btnImage_mod10, GtkFileChooserButton $btnImage_mod35,
GtkFileChooserButton $btnDEM) {
    5
    6
    7 //start model for classification (abgewandelt aus datei
opt_classif.php)
    8
////////////////////////////////////////////////////////////////
///////////
    9
   10 //get variables
   11 $Modimage_tif5_b = $btnImage_mod5->get_filename();
   12 $Modimage_tif10_b = $btnImage_mod10->get_filename();
   13 $Modimage_clm_img_b = $btnImage_mod35->get_filename();
   14 $dem_b = $btnDEM->get_filename();
   15
   16 $Modimage_tif5 = str_replace("\\","/", $Modimage_tif5_b);
   17 $Modimage_tif10 = str_replace("\\","/", $Modimage_tif10_b);
   18 $Modimage_clm_img = str_replace("\\","/", $Modimage_clm_img_b);
   19 $dem = str_replace("\\","/", $dem_b);
   20
   21 $Modimage_tif5_basename = basename($Modimage_tif5, ".tif");
   22 $Modimage_tif10_basename = basename($Modimage_tif10, ".tif");
   23 $Modimage_clm_img_basename = basename($Modimage_clm_img,
".img");
   24 $dem_basename = basename($dem, ".img");
   25
   26 //cut out just the name of the used modis- scene for use in
filenames and report
   27 $Modimage = substr($Modimage_tif10_basename, 0, -16);
   28
   29
   30
////////////////////////////////////////////////////////////////
//////////////////
   31 // use global connection paramters for database connection
   32     global $strServer, $strPort, $strDatabase, $strUsername,
$strPassword;
   33 //make acquisition time globally available
   34     //global $acq_time;
   35     global $acq_time2;
   36
   37
   38     $link = pg_connect(" host=".$strServer."
user=".$strUsername." password=".$strPassword."
dbname=".$strDatabase." port=".$strPort) or die("Could not connect:
".pg_result_error($link));
   39
////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////
   40
   41
   42 // Create the parameters list for batchfile
   43 $batchlist_modis_all_10 =
$root_icetools."/temp/".$Modimage."_classif.bls";
```

```
   44 $body_batchlist_modis = "_root_icetools Input_tif5 Input_tif10
dem  Input_cloudmask  cenline_mask sl_threshold dsl_threshold \r\n";
//mit grenzwerten
   45 $open_batchlist_modis_all = fopen($batchlist_modis_all_10, 'x');
   46 fwrite($open_batchlist_modis_all, $body_batchlist_modis);
   47 fclose($open_batchlist_modis_all);
   48
   49 // Read old batchfile
   50 $batchfile1 =
$root_icetools."/include/batch_ini_mmoessner_iller.bat";
   51 $open_batchfile1 = fopen($batchfile1, 'rb');
   52 $body_batchfile1 = fread($open_batchfile1,
filesize($batchfile1));
   53 fclose($open_batchfile1);
   54
   55 // Create new batchfiles
   56 $batchfile_modis_all =
$root_icetools."/temp/".$Modimage."_classif.bat";
   57 //$batchfile_front =
$root_icetools."/temp/".$Modimage_basename."_front.bat";
   58 //$batchfile_zones =
$root_icetools."/temp/".Modimage_basename."_zones.bat";
   59
   60 $body_batchfile2_modis_all = "\"C:/Programme/Leica
Geosystems/Geospatial Imaging 9.1/bin/NTx86/batchprocess.exe\" -
bcffile \"$root_icetools/include/batch_modis_classif_all.bcf\" -
blsfile \"$batchlist_modis_all_10\"";
   61
   62 $open_batchfile_modis_all = fopen($batchfile_modis_all, 'x');
   63 $body_batchfile_modis_all =
$body_batchfile1.$body_batchfile2_modis_all;
   64 fwrite($open_batchfile_modis_all, $body_batchfile_modis_all);
   65 fclose($open_batchfile_modis_all);
   66
   67 // Read the original projection file
   68 $prj_ps_orig = $root_icetools."/include/antarctic_ps.prj";
   69
   70 $open_prj_ps_orig = fopen($prj_ps_orig, 'rb');
   71 $body_prj_ps_orig = fread($open_prj_ps_orig,
filesize($prj_ps_orig));
   72 fclose($open_prj_ps_orig);
   73
   74
   75 // SQL Query
   76 ////////////////
   77
   78 //Selektiere alle Centerlines die komplett vom Bildpolygon
überdeckt werden und schreibe deren local_id in eine Tabelle
   79 $result = pg_query($link, "CREATE TABLE temp_cenline_modis AS
SELECT local_id FROM cenline AS c, images as i WHERE
ST_CoveredBY(c.the_geom, i.the_geom) AND image_id = (SELECT image_id
FROM images WHERE inst_name = 'MODIS' ORDER BY image_id DESC LIMIT 1)
");
   80
   81 //Selektiere aus der Tabelle mit den Cenline1000Punkte alle
Punkte die zu den local_ids (also zu den Gletschern)
   82 //aus der obigen Tabelle gehören und schreibe die Koordinaten
der Punkte (the_geom) und die Attribute point_seq und local_id in eine
neue Tabelle
   83 //$result2 = pg_query($link, "CREATE TABLE
temp_cenline_point1000_modis AS SELECT cp.the_geom, cp.point_seq,
tcm.local_id FROM cenline_point1000 AS cp, temp_cenline_modis AS tcm
WHERE tcm.local_id = cp.local_id ORDER BY tcm.local_id, cp.point_seq"
```

```
);
   84 $result2 = pg_query($link, "CREATE TABLE
temp_cenline_point1000_modis AS SELECT cp.the_geom, cp.point_seq,
cp.class, cp.altitude, cp.pixel, tcm.local_id FROM cenline_point1000
AS cp, temp_cenline_modis AS tcm WHERE tcm.local_id = cp.local_id
ORDER BY tcm.local_id, cp.point_seq" );
   85
   86
   87
   88 // Create table temp_image_id
   89 //pg_query($link,"CREATE TABLE temp_image_id_modis AS SELECT
image_id FROM images WHERE acq_time ILIKE '$acq_time2%' AND inst_name
ILIKE 'MODIS' ");
   90 pg_query($link,"CREATE TABLE temp_image_id_modis AS SELECT
image_id FROM images WHERE inst_name ILIKE 'MODIS' ");
   91
   92
   93 //Retrive the local IDs
   94 $result3 = pg_query($link, "SELECT local_id FROM
temp_cenline_modis");
   95 $result4 = pg_query($link, "SELECT local_id FROM
temp_cenline_modis");
   96 $result5 = pg_query($link, "SELECT local_id FROM
temp_cenline_modis");
   97
   98 // Give names to new shapefiles
   99 $shp_cenline_modis =
$root_icetools."/temp/".$Modimage."_cenline.shp"; //entfällt bei
schleifen
  100
  101 // Retrieve the thresholds for snow/firn line and dry snow line
  102 $thresholds = pg_query($link, "SELECT sl_thre FROM
sar_thresholds AS a, temp_cenline_modis AS b WHERE a.local_id ILIKE
b.local_id");
  103 $thre = pg_fetch_array($thresholds);
  104 $sl_thre = $thre[0];
  105 $dsl_thre = $thre[1];
  106
  107 // Define list of data for batchfile
  108 $body_batchlist2_modis = " $root_icetools $Modimage_tif5
$Modimage_tif10  $dem  $Modimage_clm_img  $shp_cenline_modis $sl_thre
$dsl_thre \r\n";
  109
  110 $open_batchlist2_modis = fopen($batchlist_modis_all_10, 'a');
  111 fwrite($open_batchlist2_modis, $body_batchlist2_modis);
  112 fclose($open_batchlist2_modis);
  113
  114 // Create shapefile projection file
  115 $prj_shp_cenline_modis =
$root_icetools."/temp/".$Modimage."_cenline.prj";
  116 $open_prj_shp_cenline_modis = fopen($prj_shp_cenline_modis,
'x');
  117 fwrite($open_prj_shp_cenline_modis, $body_prj_ps_orig);
  118 fclose($open_prj_shp_cenline_modis);
  119
  120
  121 // Export PostgreSQL to shapefile
  122 exec("$root_icetools/include/pgutils/pgsql2shp -f
$shp_cenline_modis -h $strServer -p $strPort -u $strUsername -P
$strPassword $strDatabase temp_cenline_point1000_modis ");
  123
  124 // Execute raster analysis and raster to point
  125 exec($batchfile_modis_all);
```

```
  126
  127 //EPSG code for antarctic polar stereographic projection
  128 $prj_ant_ps = "3031";
  129
  130 // Create new PostgreSQL tables for shape data and analyses
  131 pg_query($link, "CREATE TABLE temp_glacier_zones_modis (gid
int4, point_seq int4, local_id varchar, class int4, altitude int4,
pixel float8, the_geom geometry,
  132 CONSTRAINT enforce_dims_the_geom CHECK (ST_Ndims(the_geom) = 2),
  133 CONSTRAINT enforce_geotype_the_geom CHECK
(Geometrytype(the_geom) = 'POINT'::text OR the_geom IS NULL),
  134 CONSTRAINT enforce_srid_the_geom CHECK (ST_Srid(the_geom) =
$prj_ant_ps)) WITH OIDS");
  135
  136 pg_query($link, "CREATE TABLE temp_glacier_zones_modis2 (gid
int4, point_seq int4, local_id varchar, class int4, altitude int4,
pixel float8, the_geom geometry,
  137 CONSTRAINT enforce_dims_the_geom CHECK (ST_Ndims(the_geom) = 2),
  138 CONSTRAINT enforce_geotype_the_geom CHECK
(Geometrytype(the_geom) = 'POINT'::text OR the_geom IS NULL),
  139 CONSTRAINT enforce_srid_the_geom CHECK (ST_Srid(the_geom) =
$prj_ant_ps)) WITH OIDS");
  140
  141 pg_query($link, "CREATE TABLE temp_glacier_zones_limits_modis
(gid int4, point_seq int4, local_id varchar, class int4, altitude
int4, pixel float8, the_geom geometry,
  142 CONSTRAINT enforce_dims_the_geom CHECK (ST_Ndims(the_geom) = 2),
  143 CONSTRAINT enforce_geotype_the_geom CHECK
(Geometrytype(the_geom) = 'POINT'::text OR the_geom IS NULL),
  144 CONSTRAINT enforce_srid_the_geom CHECK (ST_Srid(the_geom) =
$prj_ant_ps)) WITH OIDS");
  145
  146 //// Import shapefile to PostgreSQL tables and load data into
the database
  147 exec("$root_icetools/include/pgutils/shp2pgsql -a -s $prj_ant_ps
$shp_cenline_modis temp_glacier_zones_modis >
$root_icetools/temp/temp_glacier_zones_modis_$Modimage");
  148 //exec("$root_icetools/include/pgutils/shp2pgsql -a -s
$prj_ant_ps $shp_cenline temp_glacier_zones_modis >
$root_icetools/temp/temp_glacier_zones_modis_$local_id2");
  149
  150 $open_glacier_zones_txt = fopen
($root_icetools."/temp/temp_glacier_zones_modis_".$Modimage, 'r');
  151 $read_glacier_zones_txt = fread ($open_glacier_zones_txt,
filesize($root_icetools."/temp/temp_glacier_zones_modis_".$Modimage));
  152 fclose($open_glacier_zones_txt);
  153 pg_query($link, "$read_glacier_zones_txt");
  154
  155
  156 ///////delete clouded glaciers ////(delete glaciers which
contain at least one cenline point with class=99)//////
  157
////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////
  158 //create table with analy_id, local_id, count of cloudpixels on
the centerline
  159 //pg_query($link,"CREATE TABLE cloud_analysis_cenline (analy_id
smallint, local_id varchar, cloud_points int4)");
  160 pg_query($link,"CREATE TABLE temp_cloud_analysis_cenline
(analy_id smallint, local_id varchar, cloud_points int4)");
  161
  162 //klasse=99 abfragen für jede local_id und in tabelle
'cloud_analysis_cenline' schreiben
```

```
  163 while ($row3= pg_fetch_row($result3))   {
  164     foreach ($row3 as $local_id3) {
  165
  166     //cenline points which hold class=99
  167     $test_if99 = pg_query($link, "SELECT local_id FROM
temp_glacier_zones_modis WHERE local_id ILIKE '$local_id3' AND
class=99");
  168
  169     //wieviele zeilen (cenline punkte) mit klasse 99?
  170     $rows99 = pg_num_rows($test_if99);
  171
  172     pg_query($link, "INSERT INTO temp_cloud_analysis_cenline
(local_id, cloud_points) VALUES ('$local_id3', '$rows99')");
  173
  174     }} //end foreach and while
  175
  176 //delete glaciers with class=99 from cloud_analysis_cenline
(only cloudfree glaciers remaining)
  177 pg_query($link, "DELETE FROM temp_cloud_analysis_cenline WHERE
cloud_points > 0");
  178
  179 $cenline_cloudfree = pg_query($link, " SELECT * FROM
temp_cloud_analysis_cenline WHERE cloud_points = 0");
  180
  181 // Select the final snow line, and dry-snow line
  182 ////////////////////////////////////////
  183 //get altitude
  184 pg_query($link, "UPDATE temp_glacier_zones_modis SET altitude =
pixel");
  185
  186 //get rid of null values
  187 pg_query($link, "UPDATE temp_glacier_zones_modis SET class=1
WHERE class=0"); //null werte rausschmeissen??? tauchen später wieder
auf wo klasse 1 über 500 m!
  188 //weg damit leer und nur grenzen eingetragen werden
//pg_query($link, "INSERT INTO temp_glacier_zones_limits_modis SELECT
* FROM temp_glacier_zones_modis"); //temp_front_var2  gleiche spalten
wie temp_glacier_zones_modis
  189
  190 //fehlwerte für klasse 1 über 500 m auf klasse 2 setzen
  191 pg_query($link, "UPDATE temp_glacier_zones_modis SET class=2
WHERE class=9");
  192
  193 //copy temp_glacier_zones_modis into temp_glacier_zones_modis2
  194 pg_query($link, "INSERT INTO temp_glacier_zones_modis2 SELECT *
FROM temp_glacier_zones_modis");
  195
  196 //delete  clouded glaciers from temp_glacier_zones_modis2
  197 pg_query($link,"DELETE FROM temp_glacier_zones_modis2 WHERE
local_id NOT IN (SELECT local_id FROM temp_cloud_analysis_cenline)");
  198
  199 while ($row4 = pg_fetch_row($result5))  {
  200     foreach ($row4 as $local_id4) {
  201
  202     //$test_if1 = pg_query($link, "SELECT local_id FROM
temp_glacier_zones_modis2 WHERE local_id ILIKE '$local_id4' AND
class=1");
  203     //if (pg_num_rows($test_if1)>0){
  204     //pg_query($link, "INSERT INTO
temp_glacier_zones_limits_modis SELECT * FROM
temp_glacier_zones_modis2 WHERE local_id ILIKE '$local_id4'
  205     //AND class = 1 ORDER BY point_seq DESC LIMIT 1");}
  206     //else {
```

```
  207     //pg_query($link, "INSERT INTO
temp_glacier_zones_limits_modis SELECT * FROM temp_glacier_zones_modis
WHERE local_id ILIKE '$local_id4'");
  208     //pg_query($link, "UPDATE temp_glacier_zones_limits_modis
SET class=1 WHERE class=0");}
  209
  210     $test_if2 = pg_query($link, "SELECT local_id FROM
temp_glacier_zones_modis2 WHERE local_id ILIKE '$local_id4' AND
class=2" );
  211     if (pg_num_rows($test_if2)>0){
  212     pg_query($link, "INSERT INTO temp_glacier_zones_limits_modis
SELECT * FROM temp_glacier_zones_modis2 WHERE local_id ILIKE
'$local_id4'
  213     AND class = 2 ORDER BY point_seq ASC LIMIT 1");} //ASC statt
DESC = erster punkt von zone 2
  214
  215     $test_if3 = pg_query($link, "SELECT local_id FROM
temp_glacier_zones_modis2 WHERE local_id ILIKE '$local_id4' AND
class=3");
  216     if (pg_num_rows($test_if3)>0){
  217     pg_query($link, "INSERT INTO temp_glacier_zones_limits_modis
SELECT * FROM temp_glacier_zones_modis2 WHERE local_id ILIKE
'$local_id4'
  218     AND class = 3 ORDER BY point_seq ASC LIMIT 1");}
  219
  220 // Delete false limits
  221 pg_query($link, "DELETE FROM temp_glacier_zones_limits_modis
WHERE local_id ILIKE '$local_id4' AND class=1
  222 AND (point_seq > (SELECT point_seq FROM
temp_glacier_zones_limits_modis WHERE local_id ILIKE '$local_id4' AND
class=2)
  223 OR point_seq > (SELECT point_seq FROM
temp_glacier_zones_limits_modis WHERE local_id ILIKE '$local_id4' AND
class=3))"); //point_seq > klasse2 oder point_seq > klasse3
  224
  225 pg_query($link, "DELETE FROM temp_glacier_zones_limits_modis
WHERE local_id ILIKE '$local_id4' AND (class=2 OR class=1)
  226 AND point_seq = (SELECT point_seq FROM temp_glacier_zones_modis
WHERE local_id ILIKE '$local_id4' ORDER BY point_seq DESC LIMIT 1)");
//längster gletscher, grösste point_seq
  227
  228 }} //end while and foreach $row4
  229
  230 // Compare snow line altitude with respective thresholds, select
where differences < 50 m
  231 $snowline_review = pg_query($link, "SELECT a.local_id FROM
sar_thresholds AS a, temp_glacier_zones_limits_modis AS b
  232 WHERE a.local_id ILIKE b.local_id AND b.class=2 AND
abs(a.sl_thre - b.altitude) > 150"); //alle differnzen von +/- 50 um
threshold werden angezeigt und die die stärker abweichen???
  233 $wetdrylimit_review = pg_query($link, "SELECT a.local_id FROM
sar_thresholds AS a, temp_glacier_zones_limits_modis AS b
  234 WHERE a.local_id ILIKE b.local_id AND b.class=3 AND
abs(a.dsl_thre - b.altitude) > 150"); //jorge hat <50!
  235
  236
  237 // Create classification report
  238     $date_analysis = date('Ymd_His');
  239     $opt_classif_report =
$root_icetools."/include/mod_classif_report.txt";
  240     $open_opt_classif_report = fopen($opt_classif_report, 'rb');
  241     $head_opt_classif_report = fread($open_opt_classif_report,
filesize($opt_classif_report));
```

```
  242     fclose($open_opt_classif_report);
  243     $opt_classif_report2 =
$root_icetools."/reports/".$Modimage."_report_".$date_analysis.".txt";
  244     $open_opt_classif_report2 = fopen($opt_classif_report2,
'x');
  245
  246     $num_snowline_review = pg_num_rows($snowline_review); //wie
oft klasse 2 in tgzlm
  247     fwrite($open_opt_classif_report2,
$head_opt_classif_report."Image: ".$Modimage."\n\n\n-- GLACIERS TO
REVIEW -- \n\n\n-> Snow line altitude: ".$num_snowline_review."
glacier(s)!\n");
  248     while ($row5 = pg_fetch_row($snowline_review))  {
  249         foreach ($row5 as $local_id4) {
  250         fwrite($open_opt_classif_report2, "$local_id4, ");
  251         }}
  252
  253     $num_wetdrylimit_review = pg_num_rows($wetdrylimit_review);
  254     fwrite($open_opt_classif_report2, "\n\n-> Wet-/ Drysnow line
altitude: ".$num_wetdrylimit_review." glacier(s)!\n");
  255     while ($row6 = pg_fetch_row($wetdrylimit_review))   {
  256         foreach ($row6 as $local_id4) {
  257         fwrite($open_opt_classif_report2, "$local_id4, ");
  258         }}
  259         fclose($open_opt_classif_report2);
  260
  261     // Create shapes for analysis inspection
  262     $analysis_cenline =
$root_icetools."/temp/analysis_cenline.shp";
  263     $analysis_glzones =
$root_icetools."/temp/analysis_glzones.shp";
  264     $analysis_glzones_lim =
$root_icetools."/temp/analysis_glzones_lim.shp";
  265
  266     $query_analysis_cenline = "SELECT * FROM
temp_cenline_point1000_modis";
  267     $query_analysis_glzones = "SELECT * FROM
temp_glacier_zones_modis2";
  268     $query_analysis_glzones_lim = "SELECT * FROM
temp_glacier_zones_limits_modis";
  269
  270     $prj_analysis_cenline =
$root_icetools."/temp/analysis_cenline.prj";
  271     $open_prj_analysis_cenline = fopen($prj_analysis_cenline,
'x');
  272     fwrite($open_prj_analysis_cenline, $body_prj_ps_orig);
  273     fclose($open_prj_analysis_cenline);
  274
  275     $prj_analysis_glzones =
$root_icetools."/temp/analysis_glzones.prj";
  276     $open_prj_analysis_glzones = fopen($prj_analysis_glzones,
'x');
  277     fwrite($open_prj_analysis_glzones, $body_prj_ps_orig);
  278     fclose($open_prj_analysis_glzones);
  279
  280     $prj_analysis_glzones_lim =
$root_icetools."/temp/analysis_glzones_lim.prj";
  281     $open_prj_analysis_glzones_lim =
fopen($prj_analysis_glzones_lim, 'x');
  282     fwrite($open_prj_analysis_glzones_lim, $body_prj_ps_orig);
  283     fclose($open_prj_analysis_glzones_lim);
  284
  285     exec("$root_icetools/include/pgutils/pgsql2shp -f
```

```
$analysis_cenline -h $strServer -p $strPort -u $strUsername -P
$strPassword $strDatabase \"$query_analysis_cenline\" ");
  286     exec("$root_icetools/include/pgutils/pgsql2shp -f
$analysis_glzones -h $strServer -p $strPort -u $strUsername -P
$strPassword $strDatabase \"$query_analysis_glzones\" ");
  287     exec("$root_icetools/include/pgutils/pgsql2shp -f
$analysis_glzones_lim -h $strServer -p $strPort -u $strUsername -P
$strPassword $strDatabase \"$query_analysis_glzones_lim\" ");
  288     //exec("$root_icetools/include/pgutils/pgsql2shp -f
$analysis_front_iso -h $strServer -p $strPort -u $strUsername -P
$strPassword $strDatabase \"$query_analysis_front_iso\" ");
  289     //exec("$root_icetools/include/pgutils/pgsql2shp -f
$analysis_front_var -h $strServer -p $strPort -u $strUsername -P
$strPassword $strDatabase \"$query_analysis_front_var\" ");
  290
  291 //delete temp files//////////////funktioniert nicht, nur
teilweise!
  292 //unlink ($batchlist_modis_all_10); //classif.bls
  293 //unlink ($batchfile_modis_all);//classif.bat
  294 //unlink ($shp_cenline_modis);//cenline.shp
  295 //unlink ($prj_shp_cenline_modis);//cenline.prj
  296 //unlink ($mrts_out_mod35_hdr);//hdr file
  297 //unlink ($mrts_out_mod35_dat);//dat file
  298 //unlink ($modis_impgen_bcf); //Cloud_Mask_b0_impgen.bcf
  299 //unlink ($modis_impgen_bls);//Cloud_Mask_b0_impgen.bls
  300 //unlink ($batchfile_impgen);//Cloud_Mask_b0_impgen.bat
  301 //unlink ($modis_chmapmod_bcf); //Cloud_Mask_b0_chmapmod.bcf
  302 //unlink ($modis_chmapmod_bls);//Cloud_Mask_b0_chmapmod.bls
  303 //unlink ($batchfile_chmapmod);//Cloud_Mask_b0_chmapmod.bat
  304
  305
  306 //dialogfenster als bescheid, dass classification zuende
  307 $msg = 'classification done!';
  308 $dialog = new GtkMessageDialog($wnd_MODclassif,
Gtk::DIALOG_MODAL, Gtk::MESSAGE_INFO, Gtk::BUTTONS_OK);
  309 $dialog->set_markup("<span foreground='red'>$msg</span>");
  310 $dialog->run();
  311 $dialog->destroy();
  312
  313 //falls keine wolkenfreien gletscher...
  314 if (pg_num_rows ($cenline_cloudfree)==0){
  315     $msg2 = 'image contains no cloudfree glaciers!';
  316     $dialog2 = new GtkMessageDialog($wnd_MODclassif,
Gtk::DIALOG_MODAL, Gtk::MESSAGE_INFO, Gtk::BUTTONS_OK);
  317     $dialog2->set_markup("<span foreground='red'>$msg</span>");
  318     $dialog2->run();
  319     $dialog2->destroy();
  320     } //end if
  321
  322 } // end function MOD_classif
  323
  324 ?>
```

ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Magisterarbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel verfasst habe.

Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen sind, wurden durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht.

Freiburg i. Br., den _____ _____

Ort, Datum Unterschrift