

Vorstudie zum Monitoring von klimabedingten Veränderungen von Pinguinkolonien in der Antarktis mittels Satellitenbildern

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3711 85 199
UBA-FB 001611

Vorstudie zum Monitoring von klimabedingten Veränderungen von Pinguinkolonien in der Antarktis mittels Satellitenbildern

von

Osama Mustafa, Christian Pfeifer

THINK - Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz, Jena

Hans-Ulrich Peter, Matthias Kopp

AG Polar- & Ornitho-Ökologie, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Robert Metzig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – DLR,
Oberpfaffenhofen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4282.html> verfügbar. Hier finden Sie den Bericht in Englisch und eine Kurzfassung.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung
der Studie: THINK - Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz
Leutragraben 1
07743 Jena

Abschlussdatum: März 2012

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet I 3.5 Schutz der Antarktis
Fritz Hertel

Dessau-Roßlau, Mai 2012

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001611	2.	3.
4. Titel des Berichts Vorstudie zum Monitoring von klimabedingten Veränderungen von Pinguinkolonien in der Antarktis mittels Satellitenbildern		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Osama Mustafa, Matthias Kopp, Robert Metzsig, Hans-Ulrich Peter, Christian Pfeifer	8. Abschlussdatum März 2012	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) ThINK - Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz Leutragraben 1 (Jentower) D-07743 Jena	9. Veröffentlichungsdatum 11.05.2012	
	10. UFOPLAN-Nr. 3711 85 199	
	11. Seitenzahl 108	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	12. Literaturangaben 41	
	13. Tabellen 14	
	14. Abbildungen 104	
15. Zusätzliche Angaben		

16. Kurzbeschreibung

Die vorliegende Studie untersucht die Möglichkeiten der Durchführung eines antarktischen Monitorings von Pinguinkolonien mittels Satellitenfernerkundung. Dafür wurden sechs Testgebiete mit mehreren Pinguinkolonien ausgewählt, wobei der Fokus auf den Arten *Pygoscelis adeliae* (Adéliepinguin) und *Pygoscelis papua* (Eselpinguin) lag. Als Fernerkundungsplattformen wurden optische Systeme mittlerer (Landsat7) und hoher Auflösung (WorldView1/2, QuickBird2) sowie ein Radarsystem (TerraSAR-X) verwendet. Die Auswertungen der Aufnahmen während der Brutsaison 2011/2012 wurden mit den entsprechenden Vor-Ort-Zählungen verglichen. Zusätzlich konnte durch den Vergleich mit historischen Zählungen die Detektierbarkeit von Veränderungen untersucht sowie die Effizienz der jeweiligen Verfahren und die Möglichkeiten einer Automatisierung eingeschätzt werden.

Im Ergebnis dieser Betrachtungen wird ein aus drei zeitlich parallelen Untersuchungsebenen bestehendes Verfahren empfohlen. Ebene 1 beinhaltet eine flächendeckende Untersuchung aller eisfreien küstennahen Gebiete der Antarktis mittels automatisierter Auswertung von Landsat7-Aufnahmen. Um detaillierte Flächenänderungen zu detektieren, sollen unter Einsatz von hoch auflösenden Sensoren in Ebene 2 etwa 30 ausgewählte repräsentative Kolonien aufgenommen und manuell ausgewertet werden. Für jede dieser Kolonien sollte mindestens einmal während des Untersuchungszeitraums eine Bodenvalidierung durchgeführt werden. Für Ebene 3 sollen zehn Kolonien ausgewählt und mit hoch aufgelösten Aufnahmen während mehrerer Zeitpunkte innerhalb der Saisons im Detail analysiert und mit exakten Zählungen und Kartierungen vor Ort verglichen werden.

Im Ergebnis wird das vorgeschlagene Verfahren als geeignet angesehen, um ein aussagekräftiges antarktisches Monitoring von Pinguinkolonien mit hinreichender Genauigkeit bei vertretbarem Aufwand durchzuführen.

17. Schlagwörter

Antarktis, Landsat, QuickBird, WorldView, TerraSAR-X, Monitoring, Pinguine, Guano, Satellitenfernerkundung, Radar, Automatisierung

18.

19.

20.

Kurzfassung

Die vorliegende Studie untersucht die Möglichkeiten der Durchführung eines antarktischen Monitorings von Pinguinkolonien mittels Satellitenfernerkundung. Dafür wurden sechs Testgebiete mit mehreren Pinguinkolonien ausgewählt, wobei der Fokus auf den Arten *Pygoscelis adeliae* (Adéliepinguin) und *Pygoscelis papua* (Eselpinguin) lag. Als Fernerkundungsplattformen wurden optische Systeme mittlerer (Landsat7) und hoher Auflösung (WorldView1/2, QuickBird2) sowie ein Radarsystem (TerraSAR-X) verwendet. Die Auswertungen der Aufnahmen während der Brutsaison 2011/2012 wurden mit den entsprechenden Vor-Ort-Zählraten verglichen. Zusätzlich konnte durch den Vergleich mit historischen Zählraten die Detektierbarkeit von Veränderungen untersucht sowie die Effizienz der jeweiligen Verfahren und die Möglichkeiten einer Automatisierung eingeschätzt werden.

Im Ergebnis dieser Betrachtungen wird ein aus drei zeitlich parallelen Untersuchungsebenen bestehendes Verfahren empfohlen. *Ebene 1* beinhaltet eine flächendeckende Untersuchung aller eisfreien küstennahen Gebiete der Antarktis mittels automatisierter Auswertung von Landsat7-Aufnahmen. Um detaillierte Flächenänderungen zu detektieren, sollen unter Einsatz von hoch auflösenden Sensoren in *Ebene 2* etwa 30 ausgewählte repräsentative Kolonien aufgenommen und manuell ausgewertet werden. Für jede dieser Kolonien sollte mindestens einmal während des Untersuchungszeitraums eine Bodenvalidierung durchgeführt werden. Für *Ebene 3* sollen zehn Kolonien ausgewählt und mit hoch aufgelösten Aufnahmen während mehrerer Zeitpunkte innerhalb der Saisons im Detail analysiert und mit exakten Zählungen und Kartierungen vor Ort verglichen werden.

Im Ergebnis wird das vorgeschlagene Verfahren als geeignet angesehen, um ein aussagekräftiges antarktisches Monitoring von Pinguinkolonien mit hinreichender Genauigkeit bei vertretbarem Aufwand durchzuführen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1	Einführung.....	1
2	Methodik.....	2
2.1	Gewinnung von Daten zur Lage und Größe von Kolonien.....	2
2.2	Prüfung der Eignung, Verfügbarkeit und Interpretierbarkeit von Satellitenbildern.....	4
2.2.1	Aktuelle Fernerkundungssatelliten mit hochauflösenden Sensoren	4
2.2.2	Räumliche und spektrale Eigenschaften der Sensoren	6
2.2.3	Räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Daten	7
2.2.4	Kosten und Bezug der Satellitenbilder	12
2.3	Testgebiete.....	14
2.3.1	Ardley Island	14
2.3.2	Point Thomas	16
2.3.3	Torgersen Island	17
2.3.4	Cape Bird.....	18
2.3.5	Kopaitic.....	20
2.3.6	Adélie-Land.....	22
3	Ergebnisse	23
3.1	Fernerkundungsdaten und deren Aufbereitung.....	23
3.1.1	Optische Fernerkundungsdaten	23
3.1.1.1	Geometrische Korrektur	24
3.1.1.2	Radiometrische Korrektur	24
3.1.1.3	Pansharpening	25
3.1.1.4	Bildauswahl	26
3.1.2	Radar Fernerkundungsdaten.....	26
3.1.2.1	Geometrische und radiometrische Korrektur sowie Geokodierung	27
3.1.2.2	Bildbearbeitung	27
3.1.2.3	Bildauswahl	28
3.2	Detektierbarkeit der einzelnen Pinguinkolonien mit optischen Fernerkundungsdaten.....	28
3.2.1	Manuelle Bildinterpretation.....	28

3.2.2	Überwachte und unüberwachte Klassifizierung	36
3.2.3	Ratio-Ansatz.....	45
3.2.4	Subpixel-Analyse.....	51
3.3	Detektierbarkeit der einzelnen Pinguinkolonien mit Radardaten	52
3.4	Multitemporale Analyse optischer Fernerkundungsdaten.....	56
3.4.1	Manuelle Bildinterpretation.....	57
3.4.2	Überwachte Klassifizierung.....	61
3.4.3	Ratio-Ansatz.....	66
3.5	Multitemporale Analyse von Radardaten.....	72
3.6	Automatisierbarkeit der Analyseverfahren von optischen Fernerkundungsdaten.....	72
3.6.1	Überwachte Klassifizierung.....	72
3.6.2	Ratio-Ansatz.....	81
3.7	Automatisierbarkeit der Analyseverfahren von Radardaten	88
4	Synthese der Untersuchungen	89
4.1	Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Aufnahmesysteme	89
4.1.1	Verfügbarkeit.....	89
4.1.2	Detektierbarkeit.....	90
4.2	Einschätzung der Detektierbarkeit von Veränderungen der Kolonien.....	97
4.2.1	Flächenänderungen in einer Saison	97
4.2.2	Detektierbarkeit von Änderungen der Brutpaarzahl.....	98
4.3	Abschätzung der Effizienz des Verfahrens und der Möglichkeiten zur Automatisierung.....	99
5	Vorschläge zur Implementierung eines internationalen Monitoring Projektes.....	101
6	Ausblick.....	102
7	Quellenverzeichnis.....	105
8	Danksagung.....	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der Testgebiete	3
Abbildung 2: Übersicht über die multispektralen und räumlichen Auflösungen aktueller Fernerkundungssatelliten – rot markierte Satelliten wurden im Projekt verwendet.....	7
Abbildung 3: Verfügbarkeit aller historischen Satellitenbilder des jeweiligen Satelliten für die fünf ausgewählten Standorte, unterteilt nach Wolkenbedeckungsgrad.....	9
Abbildung 4: Verteilung der Sichtbarkeit für optische Fernerkundungssysteme in Abhängigkeit von Tageslänge (Giesen 2006) und Wolkenbedeckung (Jubier 2006) zwischen 60 und 90° S und zwischen November und Februar.....	12
Abbildung 5: Veränderung der räumlichen Ausdehnung der Pinguinnestgruppen auf Ardley Island während fünf verschiedener Saisons zwischen 1989 und 2006 (Peter et al. 2008).....	15
Abbildung 6: Strandbereich von Ardley Island mit Pinguinkolonien und Skuas im Vordergrund (Foto: Kopp)	16
Abbildung 7: Verteilung und Anzahl der Adéliepinguinnester in der Umgebung von Point Thomas am Penguin Ridge während der Brutsaison 2011/2012 (mit freundlicher Genehmigung von Korczak-Abshire, briefl.; Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012).....	17
Abbildung 8: Torgersen Island mit der Lage der Pinguinkolonien (dunkle Bereiche; aus: Management Plan Area No 7 (2010)) und einem Luftbild der Insel (Foto mit freundlicher Genehmigung von Fraser, briefl.).....	18
Abbildung 9: Cape Bird ist einer der wenigen eisfreien Küstenabschnitte der Ross Insel, die durch das das Ross-Schelfeis mit dem antarktischen Kontinent verbunden ist (Karte aus Cole und Ewart 1968).....	19
Abbildung 10: Verteilung der Pinguinnestgruppen in der nördlichen Cape Bird Kolonie (Foto mit freundlicher Genehmigung von Lyver).....	20
Abbildung 11: QuickBird2-Aufnahmen des Testgebietes Kopaitic (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012); Kopaitic Island und die Schmidt Peninsula sind benachbarte Brutgebiete am Cape Legoupil an der Westseite der Antarktischen Halbinsel.....	21
Abbildung 12: Pinguinbrutplätze auf Kopaitic Island (Foto: Metzsig).....	21
Abbildung 13: Die Kolonien im Bereich Adélie-Land (Ausschnitt aus Micol und Jouventin (2001))	22
Abbildung 14: Luftbild der Adéliepinguinkolonie in Adélie-Land (Foto mit freundlicher Genehmigung von Weimerskirch/Delord).....	23
Abbildung 15: Vergleich von original (links) und atmosphärenkorrigierter (rechts) Landsat7-Aufnahme (Kanäle 321) von Cape Bird (Aufnahme mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012).....	25

Abbildung 16:Vergleich einer originalen (links) und einer mit HCS-Verfahren fusionierten (rechts) Landsat7-Aufnahme (Kanäle 321) von Adélie-Land (Aufnahme mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012).....	26
Abbildung 17:Landsat7 Cape Bird Methodenvergleich (v.l.n.r.): manuelle Bildinterpretation, unüberwachte Klassifizierung, überwachte Klassifizierung, Ratio-Ansatz, Subpixel-Analyse	28
Abbildung 18:Landsat7-Überblicksansichten von (a) Adélie-Land 04.02.2011 (Kanäle 753), (b) Kopaitic Island 07.01.2007 (Kanäle 753), (c) Cape Bird 09.12.2001 (Kanäle 312), (d) Point Thomas 21.02.2000 (Kanäle 312) und (e) Torgersen 09.02.2003 (Kanäle 312) (Aufnahmen mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012).....	30
Abbildung 19:Anhand von Landsat7-Aufnahmen manuell abgegrenzten Kolonief lächen - nach deren Durchschnittsgröße sortiert.....	31
Abbildung 20:WorldView1-Bildausschnitte (PAN) von Ardley Island (links) und Claude Bernard (rechts) – bei Ardley heben sich die Nestgruppen kaum von der Umgebung ab (links), während diese bei Claude Bernard gut sichtbar sind (rechts), siehe roter Pfeil, dunkelgraue Fläche vor der schwarzen Fläche (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012)	32
Abbildung 21:Anhand von QuickBird2-Aufnahmen manuell abgegrenzten Kolonief lächen - nach deren Durchschnittsgröße sortiert.....	33
Abbildung 22:Anhand von WorldView2-Aufnahmen manuell abgegrenzten Kolonief lächen - nach deren Durchschnittsgröße sortiert.....	33
Abbildung 23:QuickBird2-Aufnahmen (Kanäle 432) von Ardley Island vom 08.12.2005 (links) und vom 28.11.2009 (rechts) - Nestgruppen sind auf ebenen Geröllfeld genau (grüner Pfeil) und auf Felsen nur schwer abgrenzbar (roter Pfeil) – gelber Pfeil markiert vom Schnee verdeckte Nestgruppe (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012).....	34
Abbildung 24:Pieter J. Lenie Field Station: links georeferenzierte Karte nach Jablonski (1986), Mitte WorldView2-Aufnahme vom 27.12.2011 (Kanäle 532), rechts QuickBird2-Aufnahme vom 16.01.2006 (Kanäle 321) – in Karte Links: horizontal gestreift = Adéliepinguine, gepunktet = Eselpinguine – roter Pfeil markiert die selbe dunkle Flecken in östlichen Koloniestreifen, vermutlich Adéliepinguine in Eselpinguinkolonie (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012).....	34
Abbildung 25:Kopaitic Island (links) und Schmidt Peninsula (rechts) auf einer QuickBird2-Aufnahme vom 21.11.2011 (Kanäle 432) – mit rotem Pfeil sind Nestgruppen markiert (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012).....	35
Abbildung 26:Torgersen Island: Gegenüberstellung von Luftbild aus dem Jahr 1998 (links; Foto mit freundlicher Genehmigung von Fraser, briefl.), QuickBird2-Aufnahmen vom 15.12.2004 (Kanäle 312; Mitte) und vom 03.12.2007 (rechts) – in den QuickBird2-Aufnahmen sind die Nestgruppen nur schwer erkennbar - mit rotem Pfeil ist immer dieselbe Nestgruppe markiert (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012).....	35

Abbildung 27: Cape Bird N: QuickBird2-Aufnahme vom 18.12.2010 (Kanäle 432; links; Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012) und Photographie (Foto mit freundlicher Genehmigung von Lyver; rechts) zeigen ungefähr dieselben Nestgruppen - erkennbar sind dunkel gesprenkelte Bereiche, die eng mit besetzten Nestern bedeckt sind (weiße gestrichelte Linie zeigt zwei Beispiele).....	36
Abbildung 28: Adélie-Land Landsat7-Aufnahme vom 15.12.2009: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung (links) mit rot eingefärbten Kolonien und die unveränderte Aufnahme (Kanäle 753; rechts) (Aufnahme mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012).....	37
Abbildung 29: Gemittelte spektrale Signaturen der Trainingsgebiete von Cape Bird (links) und Adélie-Land (rechts) für Landsat7 - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Orange = Fels alt	39
Abbildung 30: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen	40
Abbildung 31: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen.....	41
Abbildung 32: Gemittelte spektrale Signatur von QuickBird2 Trainingsgebieten für Cape Bird (links), Ardley (Mitte) und Torgersen 2007 (rechts) - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Grün = Vegetation; Orange = Brandung.....	42
Abbildung 33: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten für einzelne QuickBird2-Aufnahmen	43
Abbildung 34: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für QuickBird2-Aufnahmen.....	43
Abbildung 35: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten für einzelne WorldView2-Aufnahmen.....	44
Abbildung 36: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen	44
Abbildung 37: Gemittelte Landsat7-Ratios der Landbedeckungsklassen von Cape Bird (links) und Adélie-Land (rechts) - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Grün = Vegetation	46
Abbildung 38: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen	47
Abbildung 39: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen.....	47
Abbildung 40: Gemittelte QuickBird2-Ratios für Adélie-Land (links) und Ardley (rechts) - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Grün = Vegetation	48
Abbildung 41: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten für einzelne QuickBird2-Aufnahmen	49

Abbildung 42: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für QuickBird2-Aufnahmen	49
Abbildung 43: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten für einzelne WorldView2-Aufnahmen	50
Abbildung 44: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen	50
Abbildung 45: Cape Bird N: QuickBird2-Aufnahme vom 18.12.2010 (Kanäle 432): Originalbild (links) mit Guano in hellbraunen Farbtönen und Ergebnis der Subpixel-Analyse (rechts), gelb und rot = klassifizierte Guanoflächen – mit Pfeilen wurden beispielhaft große fehlklassifizierte Bereiche markiert (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012)	52
Abbildung 46: Ardley Island - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 19.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)	53
Abbildung 47: Point Thomas - TerraSAR-X StripMap (Dual), Polarisation HH, 27.11.2010 (Aufnahme © DLR 2012)	53
Abbildung 48: Point Thomas - TerraSAR-X StripMap (Dual), Polarisation VV, 27.11.2010 (Aufnahme © DLR 2012)	54
Abbildung 49: Kopaitic Island & Schmidt Peninsula - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 20.11.2007 (Aufnahme © DLR 2012)	54
Abbildung 50: Torgersen Island - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 20.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)	55
Abbildung 51: Cape Bird - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 20.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)	55
Abbildung 52: Adélie-Land - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 19.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)	56
Abbildung 53: Prozentuale Änderung der Koloniefläche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Adélie-Land für Landsat7-Aufnahmen, durch manuelle Bildinterpretation bestimmt	58
Abbildung 54: Prozentuale Änderung der Koloniefläche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Cape Bird für Landsat7-Aufnahmen, durch manuelle Bildinterpretation bestimmt	58
Abbildung 55: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - manuelle Bildinterpretation, Landsat7	59
Abbildung 56: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - manuelle Bildinterpretation, QuickBird2	60
Abbildung 57: QuickBird2-Aufnahme 16.01.2006 (Kanäle 312; links) und WorldView2-Aufnahme 27.12.2011 (Kanäle 532; rechts) - deutlich sichtbare Abnahme der Koloniegrößen bei den Pfeilen (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012)	60

Abbildung 58: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen.....	62
Abbildung 59: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für Landsat7-Aufnahmen	62
Abbildung 60: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Adélie-Land - überwachte Klassifizierung, Landsat7.....	63
Abbildung 61: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Cape Bird - überwachte Klassifizierung, Landsat7.....	63
Abbildung 62: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - überwachte Klassifizierung, Landsat7.....	64
Abbildung 63: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne QuickBird2-Aufnahmen.....	65
Abbildung 64: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für QuickBird2-Aufnahmen.....	65
Abbildung 65: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - überwachte Klassifizierung, QuickBird2.....	66
Abbildung 66: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen.....	67
Abbildung 67: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für Landsat7-Aufnahmen	68
Abbildung 68: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Adélie-Land - Ratio-Analyse, Landsat7.....	68
Abbildung 69: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Cape Bird - Ratio-Analyse, Landsat7	69
Abbildung 70: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - Ratio-Analyse, Landsat7	69
Abbildung 71: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne QuickBird2-Aufnahmen.....	70
Abbildung 72: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für QuickBird2-Aufnahmen.....	71
Abbildung 73: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - Ratio-Analyse, QuickBird2	71
Abbildung 74: Spektrale Guanosignaturen von Cape Bird für Landsat7.....	73

Abbildung 75: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne Landsat7-Aufnahmen	74
Abbildung 76: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen	75
Abbildung 77: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne Landsat7-Aufnahmen	76
Abbildung 78: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen	76
Abbildung 79: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen	78
Abbildung 80: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für QuickBird2-Aufnahmen	78
Abbildung 81: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne WorldView2-Aufnahmen	79
Abbildung 82: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen	79
Abbildung 83: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen	80
Abbildung 84: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für QuickBird2-Aufnahmen	80
Abbildung 85: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne WorldView2-Aufnahmen	81
Abbildung 86: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen	81
Abbildung 87: Variabilität der durchschnittlichen Ratios für Guano in verschiedenen Aufnahmen von Cape Bird für Landsat7	82
Abbildung 88: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne Landsat7-Aufnahmen	83

Abbildung 89: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für Landsat7-Aufnahmen.....	83
Abbildung 90: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne Landsat7-Aufnahmen	84
Abbildung 91: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für Landsat7-Aufnahmen.....	84
Abbildung 92: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen	85
Abbildung 93: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für QuickBird2-Aufnahmen	86
Abbildung 94: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen	87
Abbildung 95: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für QuickBird2-Aufnahmen	87
Abbildung 96: Ergebnisse der Ratio-Analyse mit überregionalen Ratiokombinationen von Cape Bird und Adélie-Land im Vergleich zur manuellen Abgrenzung für WorldView2-Aufnahmen.....	88
Abbildung 97: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für WorldView2-Aufnahmen.....	88
Abbildung 98: Verhältnis der Koloniefäche zur Anzahl der besetzten Nester - Grün = sichtbar, Rot = nicht sichtbar und lineare Korrelationsgerade mit $R^2 = 0,693$	91
Abbildung 99: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche, für einzelne Landsat7-Aufnahmen	93
Abbildung 100: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für Landsat7-Aufnahmen.....	93
Abbildung 101: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, für einzelne QuickBird2-Aufnahmen.....	95
Abbildung 102: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der	

manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für QuickBird2-Aufnahmen.....	95
Abbildung 103:Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, für einzelne WorldView2-Aufnahmen.....	96
Abbildung 104:Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Allgemeine Übersicht aktueller Fernerkundungssatelliten.....5

Tabelle 2: Übersicht über allgemeine räumliche Abdeckung in der Antarktis und zeitliche Verfügbarkeit der Archive8

Tabelle 3: Sichtbarkeit der Testgebiete für optische Fernerkundungssysteme in Abhängigkeit von Tageslänge (Giesen 2006) und Wolkenbedeckung (Jubier 2006) zwischen 60 und 90° S..... 11

Tabelle 4: Kostenübersicht für Satellitenbilder13

Tabelle 5: Verwendete optische Satellitenaufnahmen24

Tabelle 6: Verwendete TerraSAR-X SAR-Aufnahmen27

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse für die manuelle Bildinterpretation von Pinguinkolonien – gut sichtbare Kolonien (grün), schlecht sichtbare Kolonien (orange), nicht sichtbare Kolonien (rot).....29

Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse für die unüberwachte Klassifizierung mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün), noch verwertbaren Klassifizierungsergebnissen (gelb) und nicht oder schlecht klassifizierbaren Kolonien (rot).....37

Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse für die überwachte Klassifizierung mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün), schlecht klassifizierbaren Kolonien (orange) und nicht klassifizierbaren Kolonien (rot)39

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse für den Ratio-Ansatz – mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün), schlecht klassifizierbaren Kolonien (orange) und nicht klassifizierbaren Kolonien (rot)45

Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Subpixel-Analyse von Pinguinkolonien mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün) und nicht bzw. schlecht klassifizierbaren Kolonien (rot).....51

Tabelle 12: Aufnahmedaten von auswertbaren Satellitenaufnahmen, für die Zählraten vorliegen: aus einer Saison (orange) oder mehreren Saisons (grün).....57

Tabelle 13: Dichte in besetzten Nestern pro m² des Kolonieareals für die Koloniefläche für Landsat7 - Grün = sichtbar, Rot = nicht sichtbar91

Tabelle 14: Maximale gemessene Flächenänderung innerhalb einer Saison für Landsat7.....98

1 Einführung

Der globale Klimawandel macht sich auch in der Antarktis, besonders an der westlichen Antarktischen Halbinsel im Winter bemerkbar. Meteorologische Daten von der Faraday/Vernadsky Station zeigen im Monat Juni einen Temperaturanstieg um 6°C während der vergangenen 50 Jahre (Smith et al. 2003). Diese Temperaturentwicklung hat weitreichende Auswirkungen auf das marine Ökosystem und setzt eine Kaskade von Veränderungen in Gang. Nach Satellitenaufnahmen der vergangenen zwei Jahrzehnte ist die Fläche des Meereises rückläufig (Smith et al. 2003, Turner et al. 2009). Das Meereis spielt für den Antarktischen Krill (*Euphausia superba*), der eine zentrale Position im Nahrungsnetz des antarktischen Ökosystems einnimmt, eine wichtige Rolle. Verbreitung und Dichte von Krill haben wiederum Einfluss auf das Vorkommen und die Reproduktionsrate ihrer Prädatoren, so auch auf Pinguinbestände.

Bestandsveränderungen und Verschiebungen von Pinguinbrutplätzen (insbesondere von Esels (*Pygoscelis papua*), Zügel- (*Pygoscelis antarctica*) und Adéliepinguinen (*Pygoscelis adeliae*)) im Bereich der Antarktischen Halbinsel sind die Folge derartiger Veränderungen und werden in verschiedenen Gebieten der Antarktis beobachtet (Fraser und Patterson 1997, Woehler et al. 2001, Sander et al. 2006, Ainley et al. 2005, 2010, Ballard et al. 2010, Trivelpiece et al. 2011). Diese Studien zeigen, dass die Bestände von Adélie- und teilweise auch Zügelpinguin in nördlich gelegenen Bereichen der Antarktischen Halbinsel tendenziell abnehmen, in südlicheren Bereichen sind hingegen positive Bestandstrends nachgewiesen.

Bisherige Untersuchungen zur Bestandsentwicklung von Pinguinkolonien werden in der Regel mit Zählungen und Kartierungen am Boden (Peter et al. 2008) oder mit punktuellen Luftbildaufnahmen von Flugzeugen und Helikoptern (Wilson et al. 2001) durchgeführt. Diese Methoden sind vergleichsweise aufwendig und sehr kostenintensiv. Die damit erzielten kleinräumigen Bestandsaufnahmen dienen meist der Fortführung wertvoller Langzeitdatensätze (z.B. Peter et al. 2008). Aufgrund der Vielzahl der Kolonien (es ist davon auszugehen das eine große Zahl noch unentdeckt ist) und der in der Regel schwierigen Zugänglichkeit der Gebiete erscheint ein weitestgehend vollständiges Monitoring objektiv nur auf der Basis von Satellitenfernerkundungsdaten möglich. In diesem Kontext wird durch das vorliegende Projekt die Realisierbarkeit eines möglichst flächendeckenden repräsentativen Pinguinmonitorings geprüft.

Um die Realisierbarkeit eines Monitoringprogramms festzustellen, sollen die verfügbaren satellitenbasierten Fernerkundungssysteme auf ihre Detektierbarkeit hinsichtlich verschiedener Fragestellungen (z.B. Ausdehnung, Individuenzahl, zeitliche Dynamik, Artabgrenzung) überprüft werden. Außerdem werden Möglichkeiten der Automatisierung ausgelotet sowie ansatzweise Vorschläge zum internationalen Vorgehen für ein umfassendes Monitoringprojekt unterbreitet.

Im Zuge des Projektes sollen sechs Testgebiete ausgewählt werden, durch die sowohl das notwendige Artenspektrum (Zielgröße: alle fünf antarktischen Pinguinarten) als auch die naturräumliche Vielfalt abgebildet wird und in denen während der Saison 2011/2012 Bestandszählungen durchgeführt wurden. Zwei der Testgebiete (Cape Bird und Kopaitic) verfügen über je zwei Kolonien, ein weiteres über fünf (Adélie-Land). In fünf Testgebieten existieren Zählungen aus Vorjahren, die für multitemporale Analysen (Kap. 3.4) genutzt wurden.

Die Auswertung der entsprechenden Aufnahmen sowie die Erstellung von Vorschlägen für ein Monitoringkonzept stellen die weitere Phase der Untersuchung dar. Davon zeitlich abgekoppelt

sollen während der Südsommersaison 2011/2012 Zählungen von erst dann brütenden Kaiserpinguinen durchgeführt und die entsprechenden Satellitenaufnahmen getätigt und ausgewertet werden.

2 Methodik

2.1 Gewinnung von Daten zur Lage und Größe von Kolonien

Im Vorfeld des Projektes wurden sowohl durch den Auftragnehmer als auch durch das Umweltbundesamt eine Vielzahl von Wissenschaftlern, wissenschaftlichen Institutionen sowie CEP-Vertretern des Umweltausschusses der Antarktis-Konsultativstaaten (CEP – Committee for Environmental Protection) kontaktiert und um Kooperation gebeten. Durch entsprechende Literaturstudien und durch gute Kontakte mit den entsprechenden Wissenschaftlern konnten folgende sechs Standorte als Testgebiete festgelegt werden, für die die entsprechenden Bestandsdaten vorliegen:

- Ardley Island
- Point Thomas
- Torgersen Island
- Cape Bird (2 Kolonien)
- Kopaitic (2 Kolonien)
- Adélie-Land (5 Kolonien)

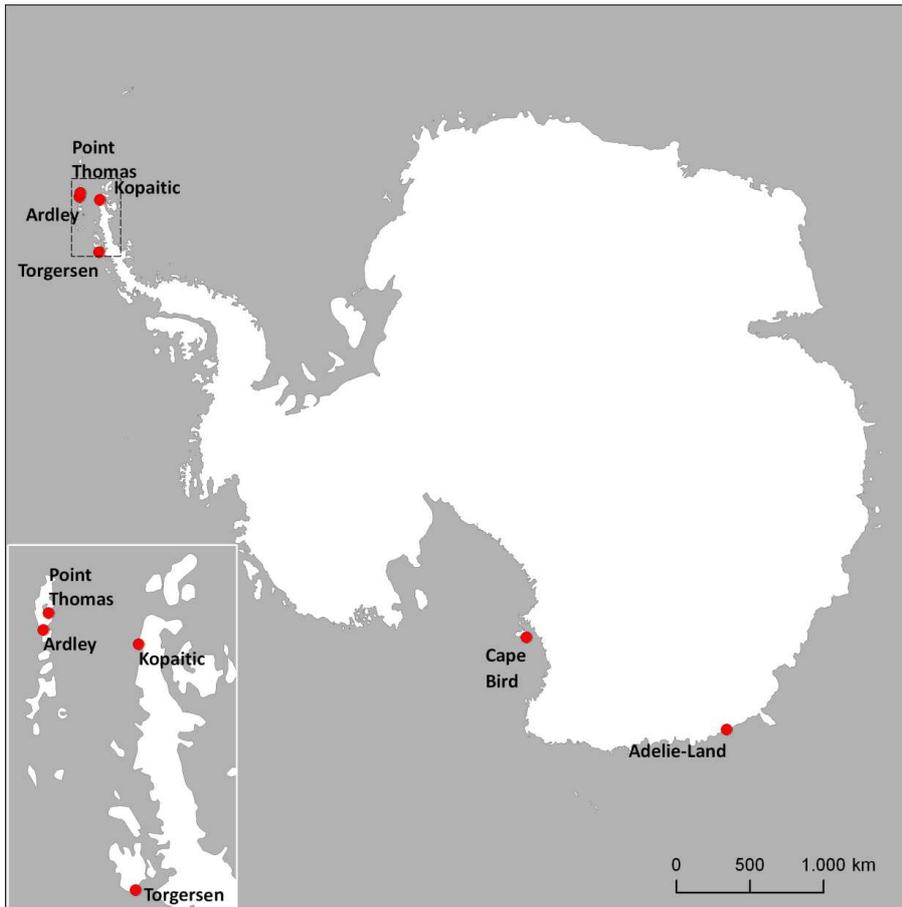


Abbildung 1: Lage der Testgebiete

Die Lage und eine Kurzübersicht der Testgebiete sind in Abbildung 1 zu finden. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kap. 2.3.

In jedem dieser Gebiete wurden Anfang Dezember 2011 Zählungen der Arten *P. papua*, *P. antarctica* und *P. adeliae* (Esels-, Zügel-, und Adéliepinguin) von verschiedenen Wissenschaftlern durchgeführt. Allerdings konnten die Zählungen des Testgebietes Cape Bird durch die dortigen Mitarbeiter nicht rechtzeitig fertig gestellt und übermittelt werden. Desweiteren liegen für alle Gebiete (außer Kopaitic) historische Zählungen vor. Eine genaue Dokumentation dieser Standorte befindet sich in Kap. 2.3. Während die genannten Arten im Südsommer brüten, ist dies bei *Aptenodytes forsteri* (Kaiserpinguin) im Südwinter der Fall. Hierzu wurde im Rahmen der Kooperation zwischen Deutschem Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) und Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) vereinbart, entsprechende Zählungen der nahe der Station Neumayer III gelegenen Kaiserpinguinkolonie im Südwinter 2012 durchzuführen. Die Auswertung und Einspeisung dieser Ergebnisse erfolgt voraussichtlich bis Oktober 2012.

2.2 Prüfung der Eignung, Verfügbarkeit und Interpretierbarkeit von Satellitenbildern

Für die Auswahl geeigneter Satelliten zur Detektierung von Pinguinkolonien bzw. von Pinguinbrutpaaren müssen verschiedenste Faktoren betrachtet werden. Zuerst wurde eine möglichst komplette Übersicht über alle zivil nutzbaren und aktuell operierenden Fernerkundungssatelliten zusammengestellt. Von diesen Satelliten wurden die räumlichen und spektralen Eigenschaften ihrer Sensoren untersucht und die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Daten in der Antarktis betrachtet. Zuletzt fand eine Zusammenstellung der möglichen Kosten für den Bezug archivierter und neuer Satellitenbilder statt.

2.2.1 Aktuelle Fernerkundungssatelliten mit hochauflösenden Sensoren

Tabelle 1 zeigt die aktuell operierenden Fernerkundungssatelliten, die zivil genutzt werden können und mit einem hoch auflösenden optischen Sensor ausgestattet sind. Bei der Angabe der Missionsdauer wurde, wenn vorhanden, auch die geplante Missionsdauer aufgeführt. Die räumliche Auflösung ist bei vielen Sensoren je nach verwendeter Wellenlänge unterschiedlich groß. Die Kanäle der Sensoren werden unterschieden in PAN (Panchromatisch), VNIR (Visible Near Infrared), SWIR (Short Wave Infrared), TIR (Thermisches Infrarot) und Hyperspektralkanäle (HS). So liegt die höchste räumliche Auflösung im PAN bei 0,5 m, im TIR hingegen bei 60 m. Die Angaben zur räumlichen Auflösung im PAN richten sich nach den tatsächlich zivil erhältlichen Bildprodukten. So zeichnet beispielsweise WorldView2 zwar in 0,4 m Auflösung auf, muss diese aber für die zivile Weitergabe auf 0,5 m reduzieren. Die Wiederholungsrate des Satelliten gibt an, in welchen Zeitabständen eine Aufnahme desselben Ortes möglich ist. Abhängig ist diese von der geographischen Breite des Aufnahmeortes und davon, ob der Satellit einen schwenkbaren oder nicht schwenkbaren Sensor verwendet. So haben Satelliten ohne Schwenkmechanismus, wie Landsat7 und Terra-Aster, relativ lange Wiederholungsraten. Die Streifenbreite definiert die Breite einer Aufnahme am Boden. Für die Überwachung von Pinguinkolonien ist diese insofern relevant, da mit kleinen Streifenbreiten die Chance sinkt, zwei benachbarte Kolonien kostengünstig auf einer Szene aufzunehmen.

Tabelle 1: Allgemeine Übersicht aktueller Fernerkundungssatelliten

Satellit	Missionsdauer	Räumliche Auflösung im Nadir [m]					Spektrale Auflösung [Kanäle]	Wiederholungsrate [Tagen]	Streifenbreite im Nadir [km]
		PAN	VNIR	SWIR	TIR	HS			
CARTOSAT1	seit 2007 + mind. 5 J.	2,5	-	-	-	-	PAN	5	27
CARTOSAT2	seit 2007 + mind. 5 J.	1	-	-	-	-	PAN	4	10
DEIMOS1	seit 2009 + mind. 5 J.	-	22	-	-	-	Grün, Rot, NIR	2 - 3	600
E01	seit 2000 - heute	10	30	-	-	30	PAN, 7MS, 22OHS	16	7 - 37
EROSB	seit 2006 + mind. 10 J.	0,82	3,28	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR	3	7
FORMOSAT2	seit 1999 - heute	2	8	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR	1	24
GeoEye1	seit 2008 + mind. 10 J.	0,5	2	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR	3	15
IKONOS2	seit 1999 + mind. 8 J.	1	4	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR	1,5 - 3	12
KOMPSAT2	seit 2006 - heute	1	4	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR	3	15
Landsat7	seit 1999 - heute	15	30	30	60	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR, SWIR, TIR	16	180
Pléiades	seit 2011	0,5	2	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR	1	20
Proba1	seit 2001 - heute	5	18	-	-	-	19 VNIR	7	4 - 14
QuickBird2	seit 2001 - heute	0,6	2,4	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot	3 - 6	16
RapidEye	seit 2009 - heute	-	5	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, RedEdge, NIR	1 - 5	77
Resourcesat1	seit 2003 + mind. 5 J.	5,8	6 - 24 - 56	23,5 - 56	-	-	PAN, Grün, Rot, NIR, SWIR	5	23 - 141 - 740
Resourcesat2	seit 2011 + mind. 5 J.	5,8	6 - 24 - 56	23,5 - 56	-	-	PAN, Grün, Rot, NIR, SWIR	5	70 - 141 - 740
SPOT4	seit 1998 - heute	10	20	20	-	-	PAN, Grün, Rot, NIR, SWIR	2 - 3	60
SPOT5	seit 2002 - heute	2,5-5	10	20	-	-	PAN, Grün, Rot, NIR, SWIR	2 - 3	60
Terra-ASTER	seit 2000 + mind. 6 J.	-	15	30	90	-	Grün, Rot, NIR, 6 SWIR(bis 2007), 4 TIR	16	60
UK-DMC2	seit 2009 - heute	-	22	-	-	-	Grün, Rot, NIR	2 - 3	80
WorldView1	seit 2007 - heute	0,5	-	-	-	-	PAN	2 - 6	17
WorldView2	seit 2009 + mind. 7 J.	0,5	2	-	-	-	PAN, 2 Blau, Grün, Gelb, Rot, 3 NIR	1 - 4	16
KOMPSAT3	Start 2012	0,7	2,8	-	-	-	PAN, Blau, Grün, Rot, NIR	k.A.	k.A.

2.2.2 Räumliche und spektrale Eigenschaften der Sensoren

Die Sensoren der aufgeführten Satelliten decken unterschiedliche Spektralbereiche ab. In Abbildung 2 ist die Verteilung der Spektralbereiche graphisch dargestellt. Ersichtlich wird, dass die für dieses Projekt ausgewählten Satelliten (in Abbildung 2 in Rot dargestellt) alle Spektralbereiche abdecken. WorldView2 kann z. B. sehr kurzwelliges Licht und große Bereiche im NIR mit hoher räumlicher Auflösung detektieren, während Landsat7 auch den SWIR und TIR mit einbezieht.

Die Auswahl der in diesem Projekt verwendeten Satelliten wurde so gewählt, dass ein breites Spektrum an räumlichen und spektralen Eigenschaften abgedeckt wird. Landsat7 hat mit 30 m im Multispektralbereich eine eher grobe räumliche Auflösung, deckt aber große spektrale Bereiche im mittleren und fernen Infrarot ab. Für den mittleren räumlichen Auflösungsbereich wurde RapidEye ausgewählt, der multispektrale Daten mit 5 m Bodenauflösung aufnimmt und als einziger Sensor dieses Auflösungsbereiches fünf Multispektralkanäle besitzt. Im hoch auflösenden Bereich wurden zwei Plattformen gewählt, zum einen QuickBird2, der 0,6 m im PAN besitzt und für den bereits seit 2002 Bilder für die Antarktis vorliegen und zum anderen WorldView2, der als einziger hoch auflösender Sensor acht Multispektralkanäle besitzt.

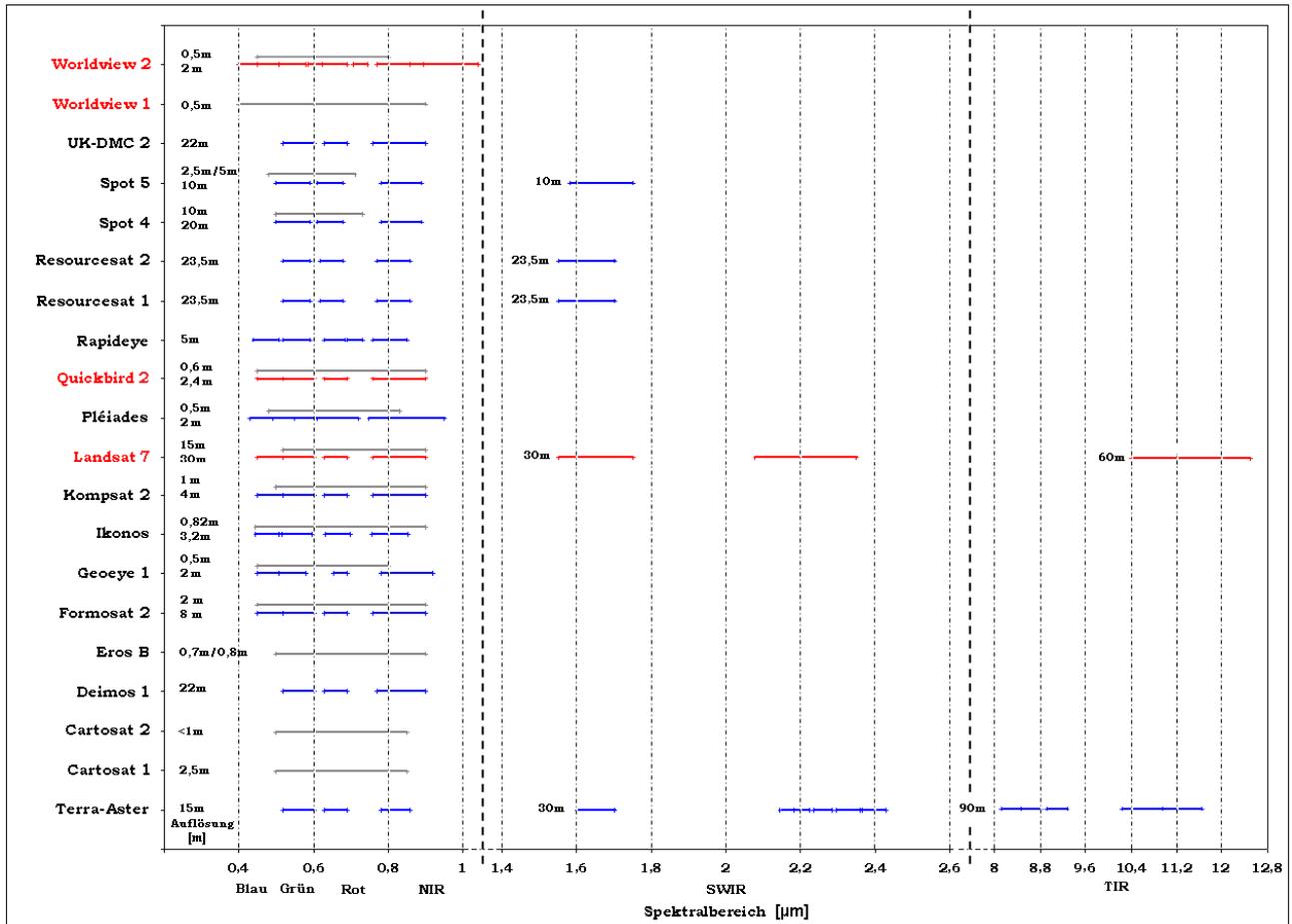


Abbildung 2: Übersicht über die multispektralen und räumlichen Auflösungen aktueller Fernerkundungssatelliten - rot markierte Satelliten wurden im Projekt verwendet

2.2.3 Räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Daten

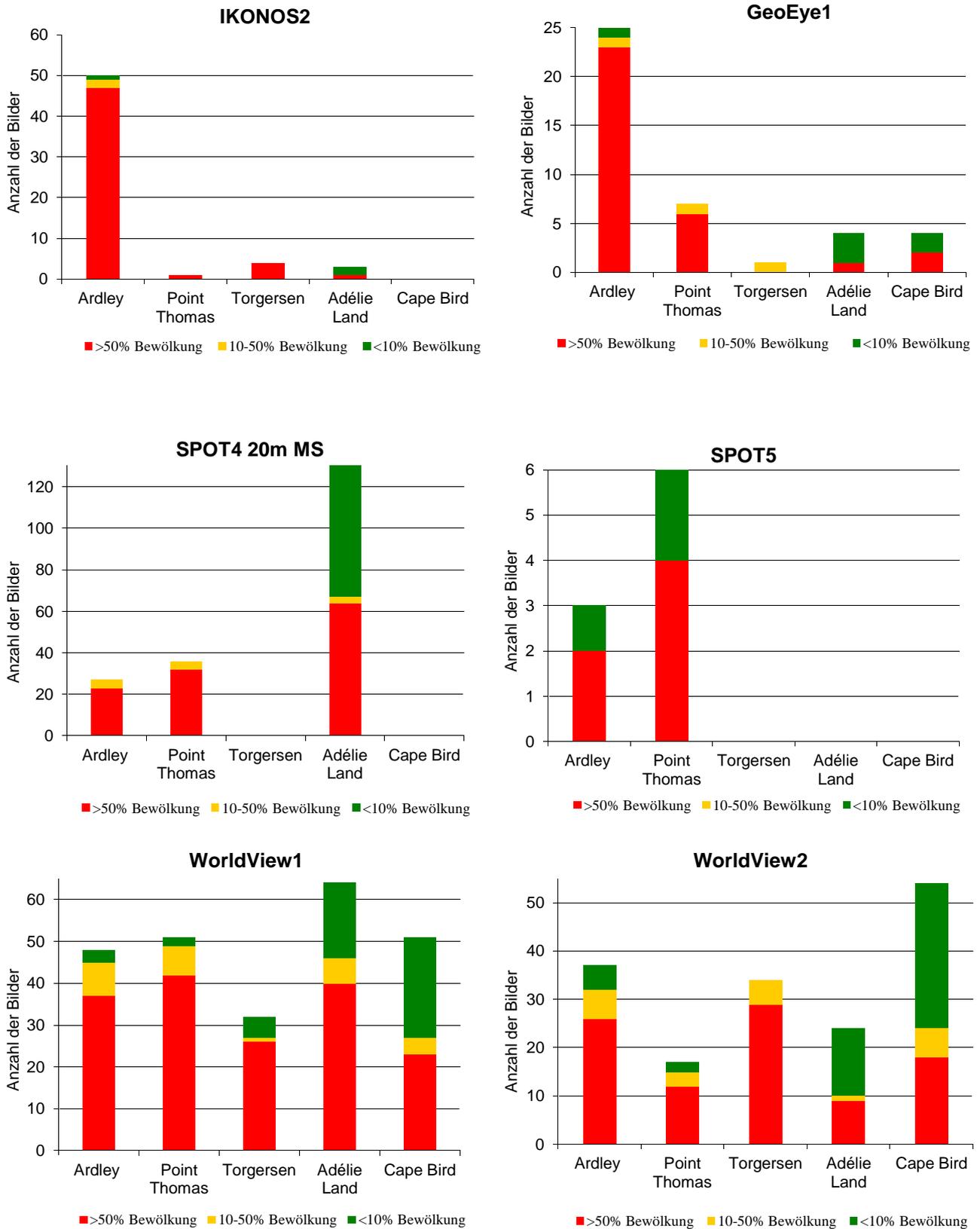
Die räumliche Abdeckung der Antarktis durch archivierte Aufnahmen ist nur schwierig zu bestimmen. Die meisten Online-Archive lassen sich nur nach einer relativ kleinen Fläche durchsuchen und zeigen nur eine relativ kleine Trefferliste an, wodurch ein großflächiges Abschätzen der Verfügbarkeit nahezu unmöglich gemacht wird. Durch Stichproben wurde trotzdem versucht, eine grobe Einschätzung der großflächigen Verfügbarkeit, wie sie in Tabelle 2 zu finden ist, durchzuführen. Für die indischen IRS-Satelliten (Cartosat1/2 und Resourcesat1/2) sowie für EROS B konnten keine Daten zur Antarktis gefunden werden, weshalb hierzu keine Angaben (k.A.) gemacht werden können. Für Formosat2 wurde lediglich eine grafische Übersicht für die weltweite Abdeckung bis zum Jahr 2007 gefunden, weshalb keine Angaben zum Alter des Bildarchivs aufgeführt werden können. Auffällig ist, dass die Abdeckung in der Regel sehr punktuell und besonders an Orten in der Nähe von Antarktisstationen konzentriert ist. Die Ursache für diese unregelmäßige Abdeckung liegt darin, dass die besonders hoch auflösenden Satelliten aufgrund der großen Datenmengen und kleinen Streifenbreiten nicht kontinuierlich aufnehmen können, sondern nur nach Anfrage bestimmte Ziele abbilden.

Tabelle 2: Übersicht über allgemeine räumliche Abdeckung in der Antarktis und zeitliche Verfügbarkeit der Archive

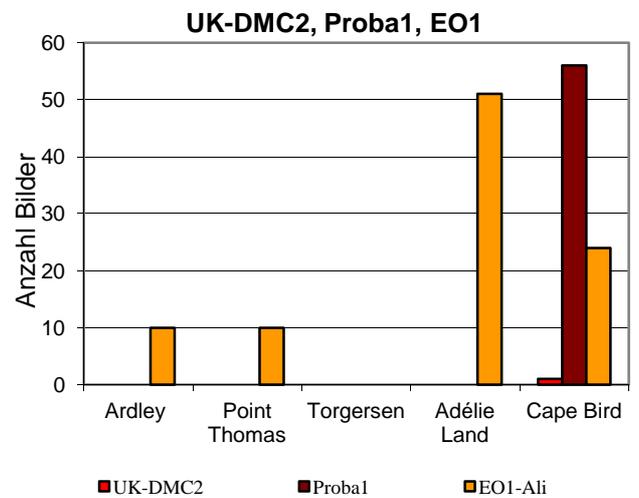
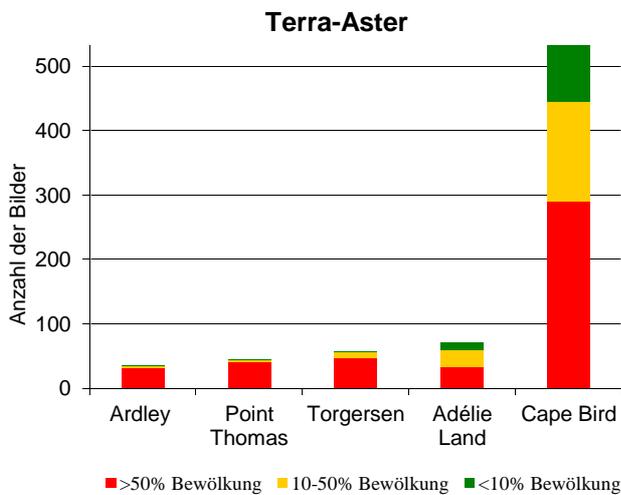
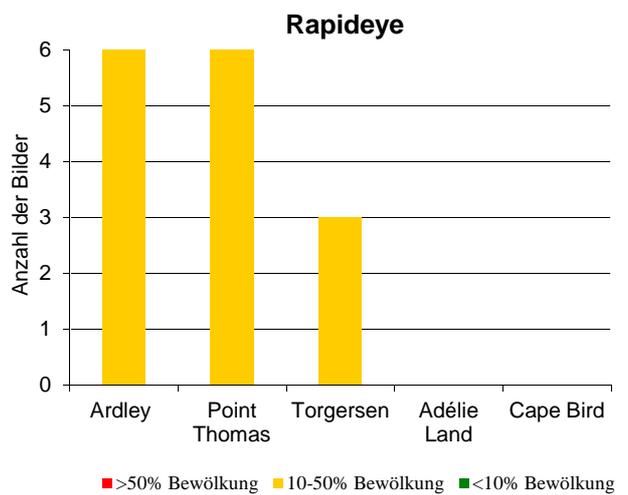
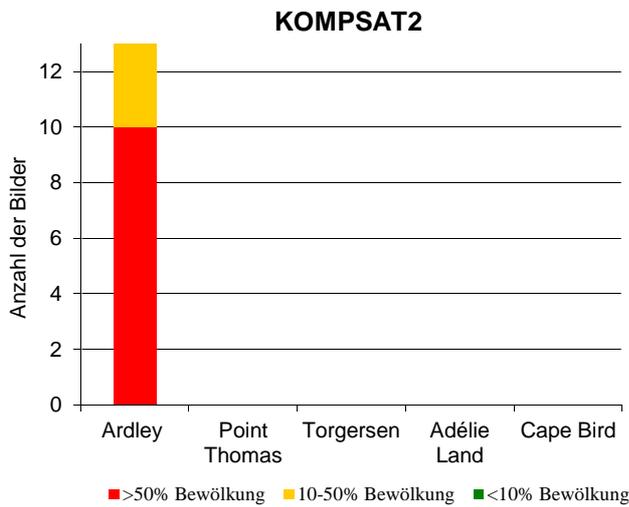
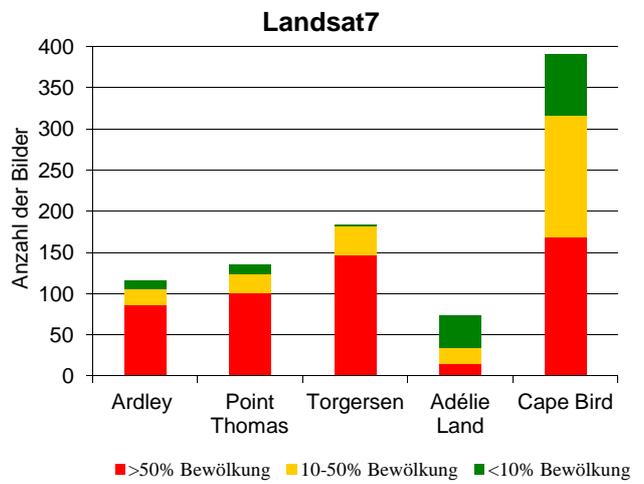
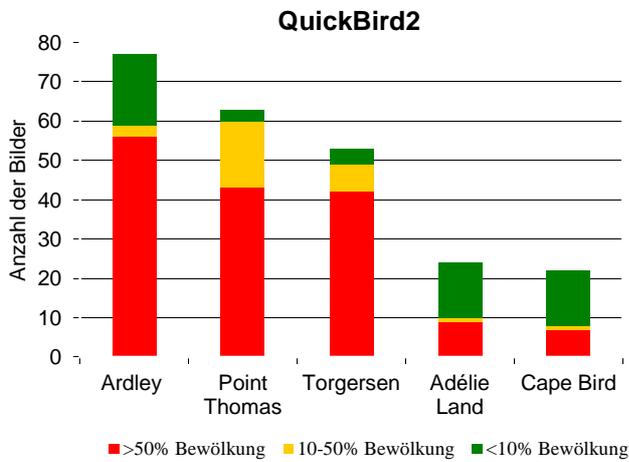
Satellit	Abdeckung Archivdaten Antarktis geschätzt	Archivdaten in Antarktis Verfügbarkeit seit
CARTOSAT1	k.A.	k.A.
CARTOSAT2	k.A.	k.A.
DEIMOS1	sehr gering (37 Bilder in gesamten Antarktis)	2009
EO1-Ali	gut	2003
EROS B	keine im Jahr 2010, in anderen Jahren k.A.	k.A.
FORMOSAT2	sehr gering	k.A.
GeoEye1	gut	2009
IKONOS2	mittel	2001
KOMPSAT2	sehr gering	2008
Landsat7	vollständig	1999
Proba1	sehr gering (23 Bilder in gesamten Antarktis)	2005
QuickBird2	gut	2002
RapidEye	gering	2009
Resourcesat1	k.A.	k.A.
Resourcesat2	k.A.	k.A.
SPOT4	Punktuell gut, sonst gering	2002
SPOT5	Punktuell gut, sonst gering	2002
Terra-Aster	vollständig	2000
UKD-MC2	sehr gering	2009
WorldView1	gut	2008
WorldView2	mittel	2009

Die folgenden Graphiken der Abbildung 3 zeigen die Verfügbarkeit von archivierten Satellitenbildern des jeweiligen Satelliten für die fünf Testgebiete, für die historische Zählraten vorliegen. Dies sind Ardley Island, Point Thomas, Torgersen Island, Adélie-Land und die zwei nördlichen Kolonien auf Cape Bird. Gezählt wurden jeweils die Bilder mit einem Wolkenbedeckungsgrad unter 10 %, dem Bereich von 10 % bis 50 % und für den Bereich größer 50 % Wolkenbedeckung. Für UK-DMC2, Proba1 und EO1 lagen keine Daten zum Wolkenbedeckungsgrad vor, so dass für diese Satelliten keine entsprechende Klassifizierung gemacht werden konnten. Für DEIMOS1 gibt es keine archivierten Daten für die genannten Stationen. Zu Satelliten ohne Online-Archive (Cartosat1/2, Resourcesat1/2, EROS B) konnten keine Angaben gemacht werden. Auffällig ist, dass die in der Ostantarktis gelegenen Kolonien bei Adélie-Land und Cape Bird, relativ zur Gesamtzahl der Aufnahmen gesehen, eine geringere Wolkenbedeckung haben als die weiter nördlich gelegenen auf der Antarktischen Halbinsel (vgl. Abbildung 4 und Tabelle 3).

Abbildung 3: Verfügbarkeit aller historischen Satellitenbilder des jeweiligen Satelliten für die fünf ausgewählten Standorte, unterteilt nach Wolkenbedeckungsgrad



Fortführung der Abbildung 3: Verfügbarkeit aller historischen Satellitenbilder des jeweiligen Satelliten für die fünf ausgewählten Standorte, unterteilt nach Wolkenbedeckungsgrad



Die für optische Fernerkundungssysteme nutzbare Aufnahmezeit wird durch Tageslänge und Wolkenbedeckung begrenzt. Um die Wahrscheinlichkeit einer auswertbaren Aufnahme während der Brutsaison zu beschreiben, zeigt Abbildung 4 die mittlere tägliche Sichtbarkeit für die Monate November bis Februar. Die Tageslänge wurde mit einem internet-basierten Tool zur Berechnung der Sonnenscheindauer (Giesen 2006) in fünf Schritten berechnet. Die so ermittelte Stundenzahl wurde mit den durch Jubier (2006) ermittelten mittleren monatlichen Bewölkungsgraden (räumliche Auflösung: 2,5° geographischer Breite bzw. Länge) verrechnet. Während in der zentralen kontinentalen Ostantarktis Sichtbarkeitszeiten von bis zu 21 Stunden ermittelt wurden, reduziert sich die tägliche Sichtbarkeit zur nördlicheren Küstenzone auf bis zu drei Stunden. So zeigen auch die beiden kontinentaler gelegenen Testgebiete (Cape Bird, Adélie-Land) deutlich höhere Sichtbarkeiten als die maritimeren, nördlicher und näher an der niederschlagsreichen Polarfront gelegenen Gebiete (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Sichtbarkeit der Testgebiete für optische Fernerkundungssysteme in Abhängigkeit von Tageslänge (Giesen 2006) und Wolkenbedeckung (Jubier 2006) zwischen 60 und 90° S

Testgebiet	Sichtbarkeit [h/Tag]
Ardley	3
Point Thomas	3
Kopaitic	4
Torgersen	3
Cape Bird	7
Adélie-Land	8

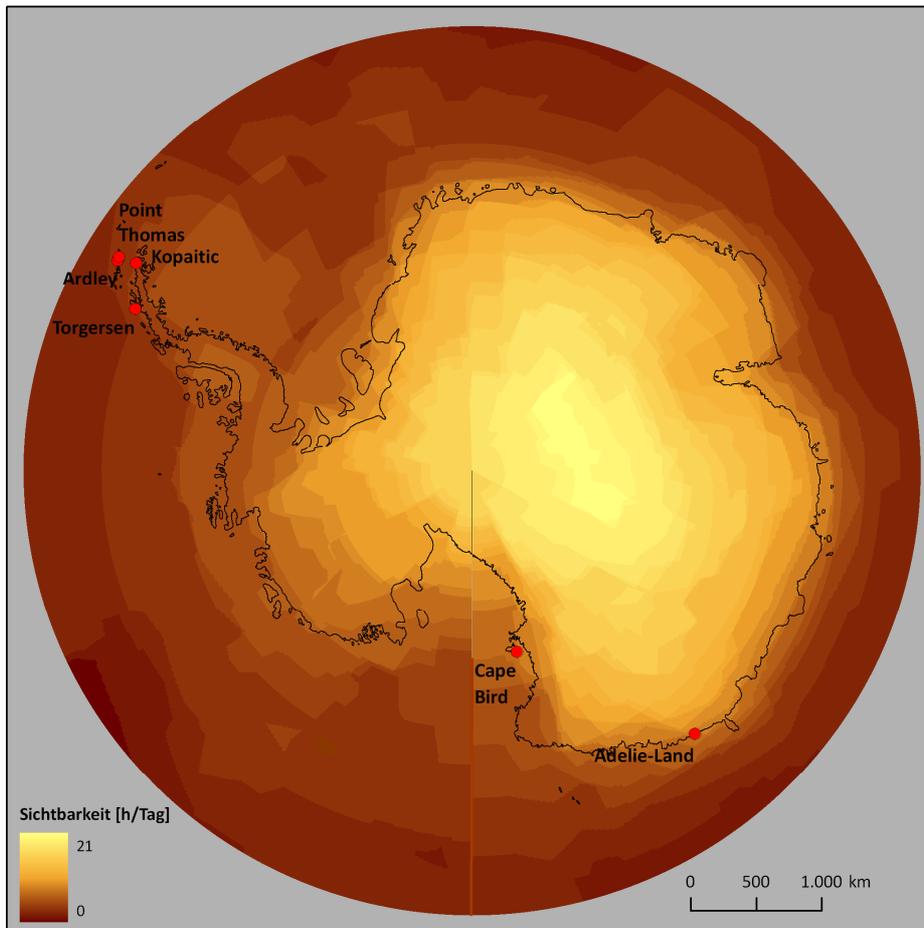


Abbildung 4: Verteilung der Sichtbarkeit für optische Fernerkundungssysteme in Abhängigkeit von Tageslänge (Giesen 2006) und Wolkenbedeckung (Jubier 2006) zwischen 60 und 90° S und zwischen November und Februar.

2.2.4 Kosten und Bezug der Satellitenbilder

Die Kosten für gegenwärtig verfügbare Satellitenbilder sind in Tabelle 4 aufgeführt. Je nach Anbieter ist es möglich, Daten pro km und/oder pro Szene zu kaufen. Wenn eine Bestellung pro km möglich ist, wurde auch die zu bestellende Mindestfläche mit angegeben. Die Angaben für Neuaufnahmen beziehen sich immer auf das Produkt mit den höchst möglichen räumlichen und spektralen Eigenschaften des Sensors. Für EOS1 und Proba1 besteht die Möglichkeit, Aufnahmen kostenlos zu bekommen, wenn ein entsprechender Antrag vom United States Geological Survey (USGS) bzw. European Space Agency (ESA) genehmigt wird. Zum besseren Vergleich wurden konkret die Kosten berechnet, die für ein Bild des Testgebietes Ardley Island mit 4 km anfallen.

Tabelle 4: Kostenübersicht für Satellitenbilder

Satellit	Bezug	Kosten Archivbilder pro Szene	Kosten Archivbilder pro km ² (minimal)	Kosten Neuaufnahme (minimal)	Beispielkosten für Ardley	
					Archiv [€]	Neuaufnahme [€]
CARTOSAT1	Antrix/Euromap	1.145\$	-	1.800 €	851	1.800
CARTOSAT2	Antrix	470 US\$ (älter 1 Jahr)	-	7.80 US\$	349	579
DEIMOS1	Spot Image	-	0,06€(6.000 km ²)	0,15€pro km ² (10.000 km ²)	360	1.500
E01	USGS	kostenlos	-	Registrierung	kostenlos	k.A.
EROS B	ImageSat intl.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
FORMOSAT2	Spot Image	1.500€(älter 1 Jahr)	-	4.000 €	1.500	4.000
GeoEye1	e-Geos	-	12,5 US\$ (25 km ²)	25 US\$ pro km ² (100 km ²)	232	1.857
IKONOS2	e-Geos	-	10 US\$ (25 km ²)	20 US\$ pro km ² (100 km ²)	186	1.486
KOMPSAT2	Spot Image	-	7,5 US\$ (50 km ²)	15 US\$ pro km ² (100 km ²)	279	1.114
Landsat 7	USGS	kostenlos	-	-	kostenlos	-
Proba1	ESA	Registrierung	-	-	k.A.	k.A.
QuickBird2	EUSI	4.625 US\$	17 US\$ (25 km ²)	23 US\$ pro km ² (1.800 US\$)	316	1.337
RapidEye	RapidEye	-	0,95€(1.000 km ²)	0,95€pro km ² (5.000 km ²)	706	3.528
Resourcesat1	Antrix/Euromap	1.070 US\$	-	4.500 €	795	4.500
Resourcesat2	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
SPOT4	Spot Image	1.090 €	-	1.890 €	1.090	1.890
SPOT5	Spot Image	3.060 €	-	3.860 €	3.060	3.860
Terra-Aster	ASTER GDS	9.800Yen (95€)	-	k.A.	95	k.A.
UK-DMC2	DMCii	-	0,058€(2.5600 km ²)	0,144€pro km ² (25.600 km ²)	1.485	3.686
WorldView1	EUSI	4.625 US\$	17 US\$ (25 km ²)	23 US\$ pro km ² (1.800 US\$)	316	1.337
WorldView2 8 Kanäle	EUSI	8.704 US\$	32 US\$ (25 km ²)	38 US\$ pro km ² (1.800 US\$)	594	1.337
WorldView2 4 Kanäle	EUSI	4.625 US\$	17 US\$ (25 km ²)	23 US\$ pro km ² (1.800 US\$)	316	1.337

2.3 Testgebiete

2.3.1 Ardley Island

Position: 62,2°S/ 58,9°W

Der geologische Untergrund von Ardley Island ist vulkanischer Herkunft (verwitterte Olivin-Basalte und basaltische Andesite; seltener Pyroxen-Andesite und Dazite; siehe Smellie et al. 1984). Der Untergrund der Brutplätze ist allerdings sehr variabel. Die Pinguine brüten auf leicht abgesetzten Rücken, da diese zeitig im Frühjahr schneefrei werden, aber auch auf schroffen Felsen weiter im Inland. In Strandnähe und auch bis weit ins Inland besteht der Untergrund meist aus grobem, grau-schwarzem Kies; die Felsen weisen eine dunkle Farbe auf (Abbildung 6). Die Grünalge *Prasiola crispa* kommt aufgrund des hohen Nährstoffangebotes in der Nähe der Pinguinkolonien flächig vor und ist mit ihrer grünen Farbe sehr auffällig. Bei länger anhaltender Trockenheit (und Wind) wird sie allerdings verdriftet und bei feuchter Witterung wird sie aufgrund von Guanoabfluss (bergab) und durch Pinguintritte unter die Oberfläche befördert und ist zumindest in Koloniennähe stellenweise nicht mehr sichtbar. Esels-, Zügel- und auch Adéliepinguine brüten dort nebeneinander.

Eine detaillierte Kartierung aller Brutkolonien auf Ardley Island erfolgte durch die Arbeitsgruppe Polar- und Ornitho-Ökologie/Friedrich-Schiller-Universität Jena während der Brutsaisons 2003/2004, 2004/2005 und 2005/2006 (Abbildung 5).

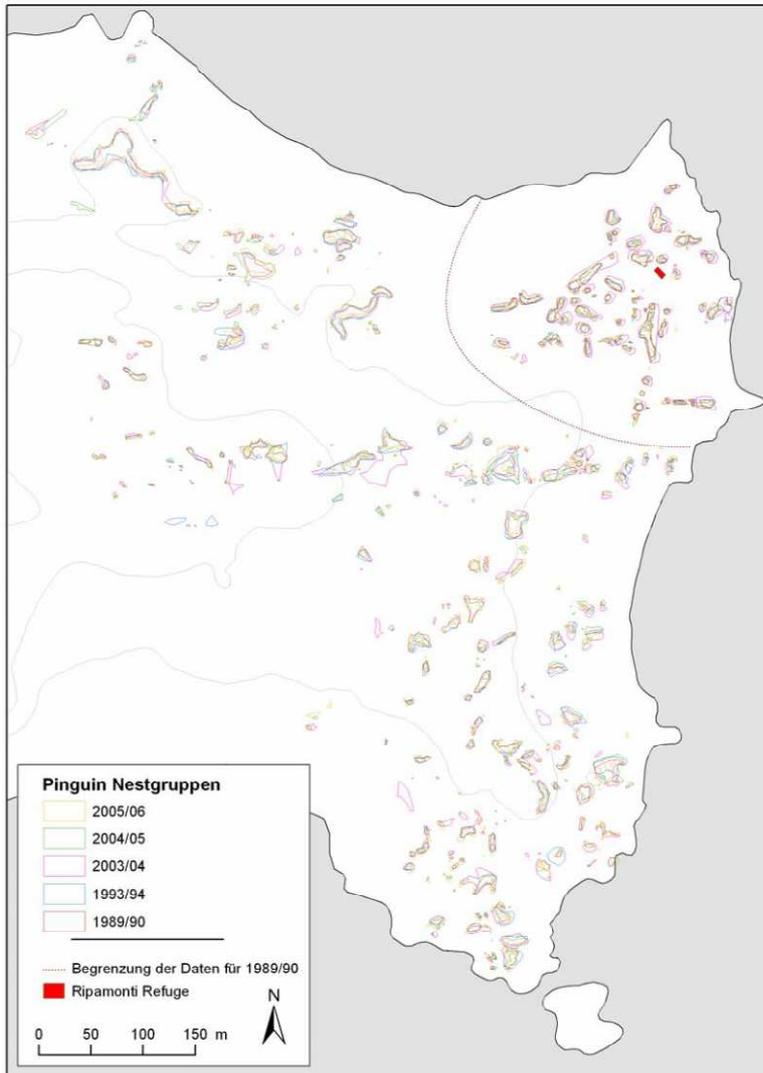


Abbildung 5: Veränderung der räumlichen Ausdehnung der Pinguinestgruppen auf Ardley Island während fünf verschiedener Saisons zwischen 1989 und 2006 (Peter et al. 2008).



Abbildung 6: Strandbereich von Ardley Island mit Pinguinkolonien und Skuas im Vordergrund (Foto: Kopp)

2.3.2 Point Thomas

Position: 62,2°S/ 58,5°W

Der Untergrund dieser Landspitze wird von Jablonski (1986) als vulkanisches Gestein beschrieben – vergleichbar mit dem von Ardley Island (siehe Kap. 2.3.1).

Auf Basis eines hoch aufgelösten Satellitenbildes konnten durch polnischen Kollegen (Artur Body und Malgorzata Korczak-Abshire, Polish Academy of Sciences, Department of Antarctic Biology in Warsaw) die Adéliepinguinnestgruppen den detaillierten Zählraten zugeordnet werden (Abbildung 7).



Abbildung 7: Verteilung und Anzahl der Adéliepinguinnester in der Umgebung von Point Thomas am Penguin Ridge während der Brutsaison 2011/2012 (mit freundlicher Genehmigung von Korczak-Abshire, briefl.; Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012)

2.3.3 Torgersen Island

Position: 64,8°S/ 64,1°W

Diese Insel repräsentiert das südlichste Testgebiet des Projektes im Bereich der Antarktischen Halbinsel. Der Untergrund ist geprägt von dunklem, granitisch-vulkanischen Gestein und deren Verwitterungsprodukten. Die Felsen sind teilweise großflächig von rötlichen Krustenflechten bewachsen.

Torgersen Island ist in eine Besucherzone im Nordosten und einen geschützten Bereich geteilt, dessen Zugang beschränkt ist (Abbildung 8).

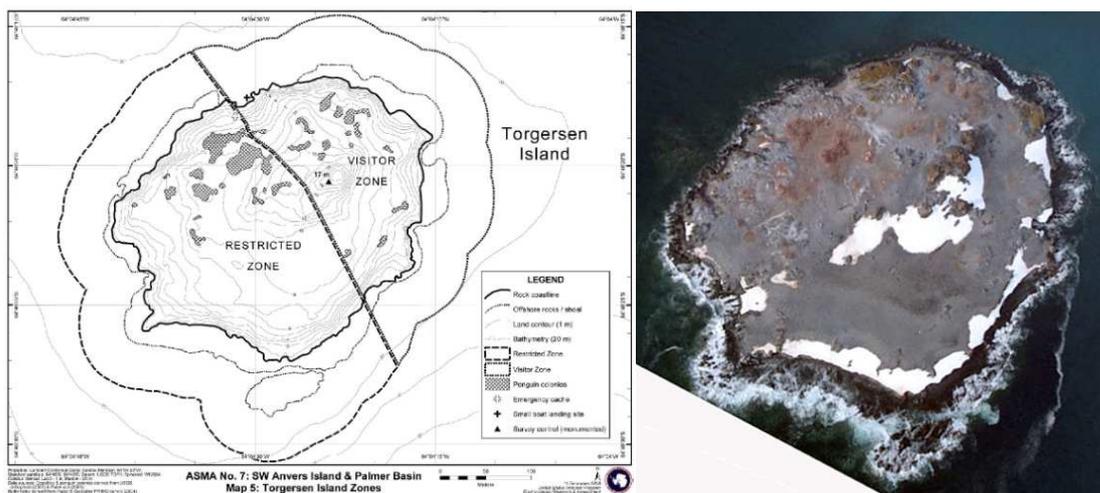


Abbildung 8: Torgersen Island mit der Lage der Pinguinkolonien (dunkle Bereiche; aus: Management Plan Area No 7 (2010)) und einem Luftbild der Insel (Foto mit freundlicher Genehmigung von Fraser, briefl.)

Die Zählung der Pinguinbrutpaare erfolgte jährlich seit 1975, jeweils zwischen 20. November und 7. Dezember (die Zähldaten wurden von William Fraser (Polar Oceans Research Group, USA) zur Verfügung gestellt). Abbildung 8 zeigt die Lage der Nestgruppen (Stand Saison 2008/2009) sowie ein Luftbild der Insel. Dort brüten ausschließlich Adéliepinguine.

2.3.4 Cape Bird

Position: 77,2°S/ 166,4°E

Das Untersuchungsgebiet „Cape Bird“ ist ein eisfreier Küstenbereich unterhalb des Mt. Bird-Vulkans im Rossmeer/ McMurdo-Sound (siehe Abbildung 9). Das Testgebiet umfasst die nördliche (genannt Cape Bird N) und die mittlere (von drei; genannt Cape Bird M) Pinguinkolonie. Cape Bird besteht aus dunklem Lavagestein (Cole und Ewart 1968; Abbildung 10). Es ist kontinental gelegen und auch im Sommer durch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt gekennzeichnet.

Die Datenerfassungen in den Kolonien erfolgen indirekt mit Hilfe von Befliegungen und Luftbilddauswertung. Historische Zähldaten stehen zur Auswertung zur Verfügung, wo hingegen die Prozessierung der Daten aus der Saison 2011/2012 während der Projektlaufzeit noch nicht abgeschlossen war (Phillip Lyver, Landcare Research - Manaaki Whenua, New Zealand).

Vorstudie zum Monitoring von Pinguinkolonien mittels Satellitenbildern

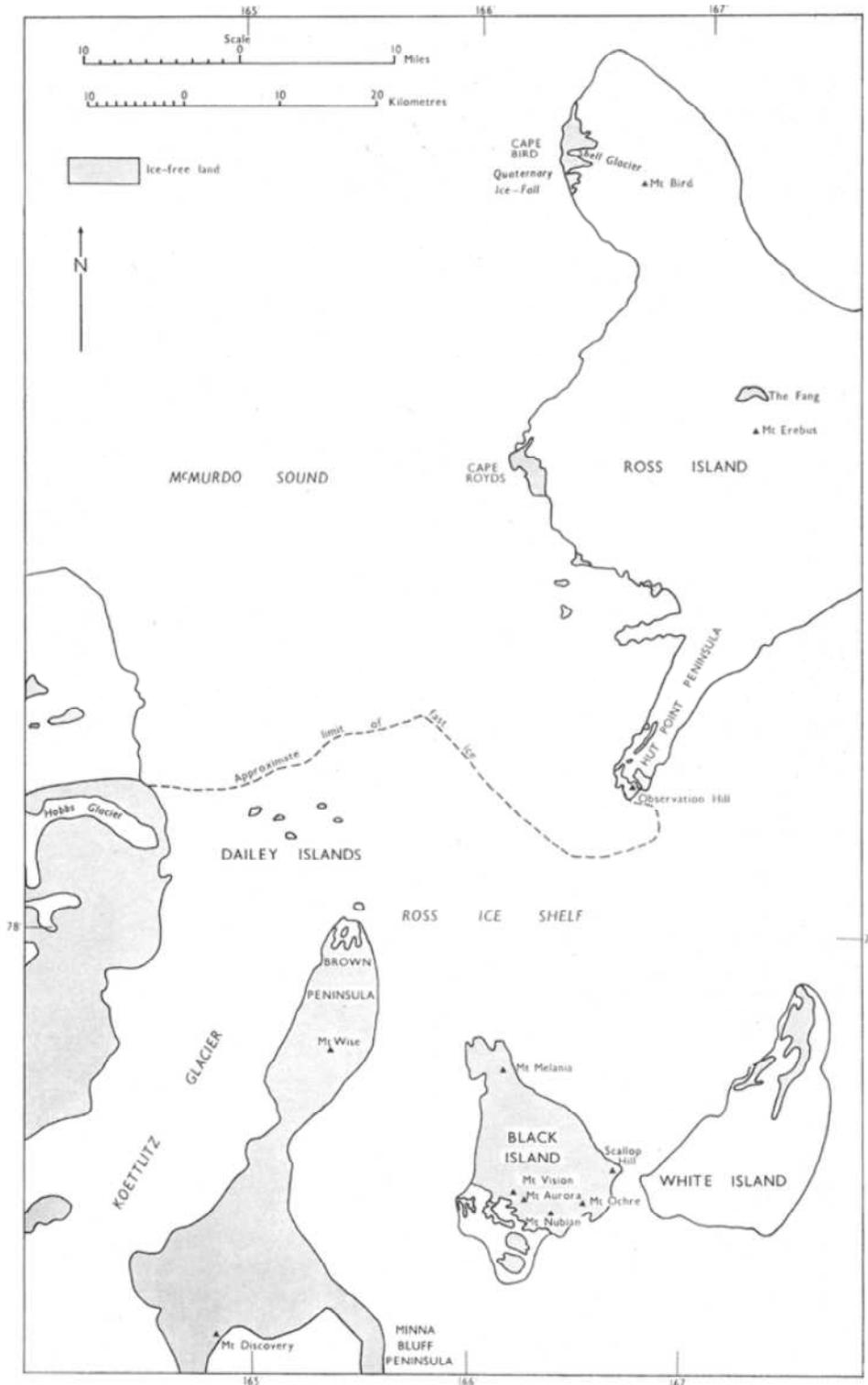


Abbildung 9: Cape Bird ist einer der wenigen eisfreien Küstenabschnitte der Ross Insel, die durch das das Ross-Schelfeis mit dem antarktischen Kontinent verbunden ist (Karte aus Cole und Ewart 1968)



Abbildung 10: Verteilung der Pinguinnestgruppen in der nördlichen Cape Bird Kolonie (Foto mit freundlicher Genehmigung von Lyver).

2.3.5 Kopaitic

Position: 63,3°S/ 57,9°W

Das im folgenden Kopaitic genannte Testgebiet umfasst Kopaitic Island und die Schmidt Peninsula (siehe Abbildung 11). Die Gesteine Andestit und Diorit des Gebietes haben überwiegend eine grau-schwarze Färbung (Halpern 1965; siehe Abbildung 12). Die Pinguine brüten auf leicht abgesetzten Rücken, teilweise auch auf schroffen Felsen weiter im Inland.

Aus der Saison 2011/2012 gibt es Zählraten zu den Pinguinbrutpaaren von der Schmidt Peninsula und eines Teiles der Kolonie auf Kopaitic Island (Abbildung 11, bereit gestellt von Robert Metzger, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR, Oberpfaffenhofen, Deutschland). Historische Zählraten sind nicht verfügbar. Auf Kopaitic Island brüten Esels-, Zügel- und auch Adéliepinguine nebeneinander. Auf der Schmidt Peninsula brüten ausschließlich Eselspinguine.

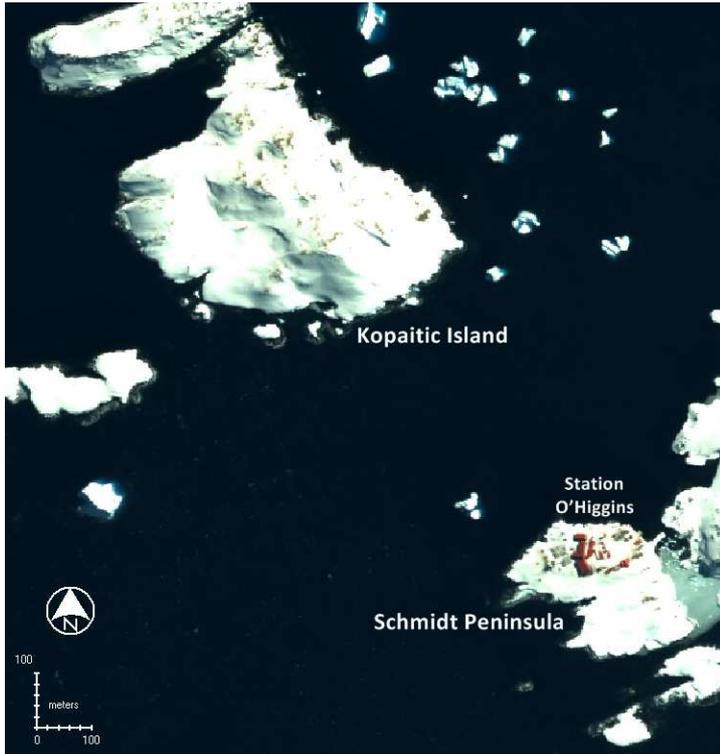


Abbildung 11: QuickBird2-Aufnahmen des Testgebietes Kopaitic (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012); Kopaitic Island und die Schmidt Peninsula sind benachbarte Brutgebiete am Cape Legoupil an der Westseite der Antarktischen Halbinsel



Abbildung 12: Pinguinbrutplätze auf Kopaitic Island (Foto: Metzиг)

2.3.6 Adélie-Land

Position: 66,7°S/ 140,0°W

Adélie-Land ist die Bezeichnung für einen Küstenabschnitt, der in der Ostantarktis gelegen ist. Das Gebiet ist gekennzeichnet durch die Gesteinsart Gneis mit überwiegend grauer Farbe (siehe Abbildung 14), der mit Kanälen von grobkörnigen rosafarbenen Granit durchzogen ist (Peucat et al. 1999).

Die Zählung der Pinguinnester erfolgt überwiegend indirekt durch Befliegung und Luftbildauswertung (unter der Leitung von Henri Weimerskirch, Chizé Centre of Biological Studies (CNRS), Villiers en Bois, France). Neben den Adéliepinguinen kommen im Gebiet auch Kaiserpinguine vor. Die Zählung der Kaiserpinguine erfolgt während der Polarnacht (Sonne immer unterhalb des Horizontes) ca. Mitte Juni, wenn die Männchen eng beieinander stehen.

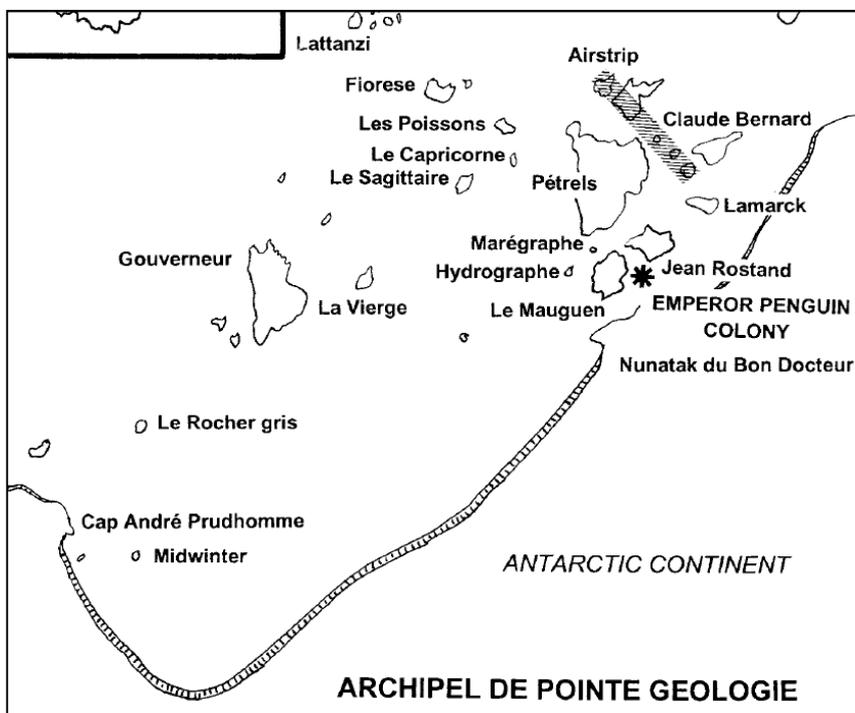


Abbildung 13: Die Kolonien im Bereich Adélie-Land (Ausschnitt aus Micol und Jouventin (2001))

Folgende Kolonien bei Adélie-Land fließen in die Auswertung ein (Abbildung 13):

- Le Mauguén Island: 66,66238°S, 140,02223°W
- Jean Rostand Island: 66,66859°S, 140,00943°W
- Claude Bernard Island: 66,67037°S, 140,00421°W
- Petrels Island: 66,66481°S, 140,00330°W
- Lamarck Island: 66,66618°S, 140,02005°W



Abbildung 14: Luftbild der Adéliepinguinkolonie in Adélie-Land (Foto mit freundlicher Genehmigung von Weimerskirch/Delord).

3 Ergebnisse

3.1 Fernerkundungsdaten und deren Aufbereitung

3.1.1 Optische Fernerkundungsdaten

Tabelle 5 zeigt die zur Verfügung stehenden optischen Fernerkundungsaufnahmen. Von European Space Imaging (EUSI) wurden insgesamt 17 Aufnahmen von QuickBird2, WorldView2 und WorldView1 neu akquiriert bzw. aus dem Archiv bereitgestellt. Im Auftrag von EUSI hat DigitalGlobe mehrfach versucht, auch Ardley und Torgersen in der Brutsaison 2011/2012 mit QuickBird2 und WorldView2 aufzunehmen, jedoch war dies infolge der nahezu permanenten Bewölkung nicht möglich. Dafür gibt es aber geeignete historische QuickBird2- oder WorldView2-Aufnahmen dieser Gebiete. RapidEye-Archivdaten konnten aufgrund ihrer nicht rechtzeitigen Verfügbarkeit im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht ausgewertet werden.

Tabelle 5: Verwendete optische Satellitenaufnahmen

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic	Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
Landsat7	12.01.2012	12.01.2012	07.01.2007	14.11.2011	03.12.2011	28.11.2011
	09.02.2005	22.11.2010	20.01.2006	12.03.2011	28.01.2011	04.02.2011
	06.12.2001	28.01.2003		15.12.2010	01.01.2011	15.12.2009
		03.01.2003		15.11.2006	09.12.2010	29.01.2009
		31.12.2001		09.02.2003	05.11.2010	28.12.2008
		22.11.2001			08.12.2007	12.12.2008
		21.02.2000			09.12.2001	
QuickBird2	28.11.2009	03.12.2011	21.11.2011	03.12.2007	03.12.2011	07.01.2012
	08.12.2005	16.01.2006		15.12.2004	16.12.2007	03.12.2007
WorldView2	08.01.2010	27.12.2011			18.12.2010	04.12.2011
WorldView1	10.12.2011					04.12.2011

3.1.1.1 Geometrische Korrektur

Bei der Georeferenzierung werden jedem Pixel geographische Koordinaten zugewiesen. Bei den in diesem Projekt verwendeten Bilddaten handelt es sich um bereits georeferenzierte Produkte. Die Landsat7-Aufnahmen sind vom Produkt-Typ "Level 1Gt" mit einer absoluten geodätischen Genauigkeit von mindestens 250 m (NASA 2011). Bei den QuickBird2- und WorldView1-Aufnahmen handelt es sich um den Produkt-Typ "Standard". Die Genauigkeit liegt hier bei 23 m CE90 für QuickBird2 und 5 m CE90 für WorldView1 und WorldView2, bei weniger als 30° „Off-Nadir“-Winkel (Betrachtungswinkel; DigitalGlobe 2012).

Eine nachträgliche Georeferenzierung mit Ground Control Points wurde nicht durchgeführt, da für die Gebiete entweder keine, zu wenige oder zu ungenaue Ground Control Points vorlagen. Auch eine Orthorektifizierung (Georeferenzierung unter Zuhilfenahme eines Digitalen Geländemodells) war nicht möglich, da kein Digitales Geländemodell in erforderlicher Auflösung zu Verfügung stand.

Wenn Lageveränderungen der Kolonien detektiert werden sollen, müssen die Satellitenaufnahmen vor der Auswertung georeferenziert werden. Dafür kann eine bereits georeferenzierte Aufnahme genutzt werden.

3.1.1.2 Radiometrische Korrektur

Die direkt vom Satelliten aufgezeichnete Rückstrahlung der Erdoberfläche unterliegt verschiedenen Absorptions- und Streuungseffekten der Atmosphäre, welche die wahre Reflexion der Erdoberfläche verändern. Diese atmosphärischen Effekte variieren stark und verhindern so einen Vergleich von multitemporalen Satellitenbildern (Hadjimitsis und Clayton 2008).

Um die atmosphärischen Störungen zu minimieren, wurde das von Chavez (1996) modifizierte und verbesserte Modell von Moran et al. (1992) zur Atmosphärenkorrektur angewandt, da es bei einem Vergleich verschiedener Modellen die konstantesten Ergebnisse für Klassifizierungen lieferte (Song et al. 2001). Praktisch realisiert wurde die Atmosphärenkorrektur mit einem im

ERDAS IMAGINE Programm erstellten Modell. Im Ergebnis erhält man atmosphärenkorrigierte Reflexionswerte für jeden Pixel im Ausgabebild. Abbildung 15 zeigt eine Landsat7-Aufnahme ohne Kontraststreckung von Cape Bird vor und nach der Atmosphärenkorrektur.



Abbildung 15: Vergleich von original (links) und atmosphärenkorrigierter (rechts) Landsat7-Aufnahme (Kanäle 321) von Cape Bird (Aufnahme mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012)

3.1.1.3 Pansharpening

Beim Pansharpening bzw. der Bildfusionierung werden die spektralen Eigenschaften der Multi-spektralkanäle mit den räumlichen Eigenschaften des PAN-Kanals in einem Bild verbunden. Das fusionierte Bild weist folglich eine hohe spektrale und räumliche Auflösung auf (Vijayaraj et al. 2004).

Für das Pansharpening der Landsat7- und WorldView2-Aufnahmen wurde das HCS-Verfahren (ERDAS 2010) angewandt. Nach Padwick et al. (2010) erzielt dieses Verfahren das beste Gesamtergebnis bei einem Vergleich von verschiedenen Pansharpening-Methoden für WorldView2-Aufnahmen. Das Ergebnis des Pansharpenings ist in Abbildung 16 an einer Landsat7-Aufnahme von Adélie-Land zu sehen. Die Ergebnisse für WorldView2 waren deutlich unschärfer als die beim SRM-Verfahren (ERDAS 2010) für QuickBird2.

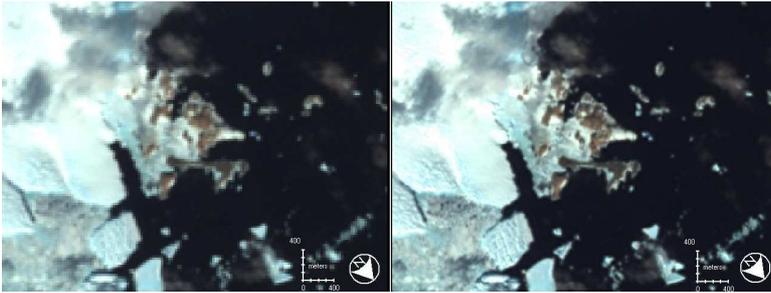


Abbildung 16: Vergleich einer originalen (links) und einer mit HCS-Verfahren fusionierten (rechts) Landsat7-Aufnahme (Kanäle 321) von Adélie-Land (Aufnahme mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012)

Für die QuickBird2-Aufnahmen wurde das SRM-Verfahren (ERDAS 2010) angewendet. Um dieses Verfahren anzuwenden, wird wie bei QuickBird2 zutreffend, ein PAN-Kanal benötigt, der die zu schärfenden Multispektralkanäle spektral abdeckt (siehe Abbildung 2; ERDAS 2010). Die Effizienz des Verfahrens zeigte Ashraf et al. (2011) in einem Vergleich verschiedener Pansharpening-Methoden, bei dem das SRM-Verfahren die besten Ergebnisse lieferte.

3.1.1.4 Bildauswahl

Wenn die Wolken zu dicht sind (z.B. bei Cumulus-Wolken), wird nur deren Rückstrahlung detektiert, nicht aber die der darunter liegenden Erdoberfläche. Bei Cirrus-Wolken und an den Rändern von Cumulus-Wolken ist die Wolkenschicht dünn genug, so dass die Rückstrahlung der Erdoberfläche vom Sensor detektiert werden kann. Dabei wird allerdings die spektrale Signatur der Landbedeckungsklassen stark verfälscht. Im Unterschied zur Atmosphärenkorrektur aus Kap. 3.1.1.2 verändern die Wolken, je nach Dichte, die spektralen Signaturen sehr kleinräumig. So gibt es zwar Methoden, die es ermöglichen kleinere, dünnere Wolkenschichten optisch aus den Bildern heraus zurechnen, allerdings wird dabei die spektrale Signatur verändert, so dass eine Klassifizierung mindestens erschwert wird.

Für den Anwendungsfall der Pinguinkoloniedetektierung sind keine Bilder verwendet worden, bei denen Wolken die Pinguinkolonien überlagern.

3.1.2 Radar Fernerkundungsdaten

Zur Überprüfung der Verwendbarkeit von Radardaten wurden in dieser Studie ausschließlich TerraSAR-X SAR-Daten ausgewertet. TerraSAR-X ist ein X-Band-SAR-System mit 3,1 cm Wellenlänge. Alle ausgewerteten TerraSAR-X-Aufnahmen sind in Tabelle 6 aufgeführt. Die Aufnahmen erfolgten in verschiedenen Aufnahmemodi. Das betrifft sowohl die Auflösung (StripMap mit 3 m und SpotLight mit bis zu 1 m) als auch die Polarisation (Single-Pol (HH) und Dual-Pol (HH/VV)).

Tabelle 6: Verwendete TerraSAR-X SAR-Aufnahmen

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic	Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
TerraSAR-X StripMap Single-Pol (HH)	04.11.2010 (a_011R)	28.12.2011 (d_s004R)	12.01.2012 (a_014R)	07.11.2008 (a_004R)	06.12.2009 (a_004R)	
	15.11.2010 (a_011R)	08.01.2012 (d_s004R)	23.01.2012 (a_014R)	18.11.2008 (a_005R)	23.01.2010 (a_004R)	
	18.12.2010 (a_011R)	19.01.2012 (d_s004R)	03.02.2012 (a_014R)			
	20.01.2011 (a_011R)	30.01.2012 (d_s004R)	14.02.2012 (a_014R)			
		10.02.2012 (d_s004R)				
		21.02.2012 (d_s004R)				
TerraSAR-X StripMap Dual-Pol (HH/VV)		05.11.2010 (d_sn004R)				
		27.11.2010 (d_sn004R)				
		19.12.2010 (d_sn004R)				
		10.01.2011 (d_sn004R)				
		01.02.2011 (d_sn004R)				
TerraSAR-X SpotLight Single-Pol (HH)	22.10.2010		20.11.2007	20.02.2012	19.02.2012	20.02.2012
	19.02.2012		20.11.2007			
			21.11.2007			

3.1.2.1 Geometrische und radiometrische Korrektur sowie Geokodierung

Alle ausgewerteten TerraSAR-X-Szenen wurden als EEC-Produkte entsprechend Basic Product Specification (TX-GS-DD-3302) und Level 1b Product Format Specification (TX-GS-DD-3307) prozessiert. Entsprechend dieser Spezifikationen erfolgten die geometrische und die radiometrische Korrektur sowie die Geokodierung mittels TMSP. Eine Georeferenzierung mit Ground Control Points wurde nicht durchgeführt.

3.1.2.2 Bildbearbeitung

Die Analyse der TerraSAR-X SAR-Daten erfolgte mittels NEST-Software sowie verschiedener SAR-Analyse-Tools des DLR. Die Analyse beinhaltet die Variation des Dynamikbereichs, die Auswertung der Bildstatistik, die Kombination von Polarisationskanälen (bei Dual-Pol) sowie, die Detektierung von Veränderungen bei Mehrfachaufnahmen mit selber Aufnahmegeometrie.

3.1.2.3 Bildauswahl

SAR-Daten können unabhängig von Lichtverhältnissen und Bewölkung aufgenommen werden. Insofern unterliegen sie nicht den Einschränkungen optischer Systeme. Es kann aber dazu kommen, dass geplante Aufnahmen nicht ausgeführt werden, sofern diese Aufnahmen im Konflikt zu Aufnahmen höherer Priorität stehen. Im Untersuchungszeitraum ergaben sich insbesondere Konflikte mit der TanDEM-X Mission. Dennoch konnten über 33 Szenen hinsichtlich Eignung für das Monitoring von Pinguinkolonien ausgewertet werden. Ausgewählt wurden Aufnahmen verschiedener Südsommer seit 2007. Für alle Testgebiete wurden TerraSAR-X StripMap- und/oder SpotLight-Daten bereitgestellt. Für das Testgebiet Point Thomas wurden neben Single-Pol-Aufnahmen (HH) zusätzlich auch Dual-Pol-Aufnahmen (HH/VV) in die Auswertung einbezogen.

3.2 Detektierbarkeit der einzelnen Pinguinkolonien mit optischen Fernerkundungsdaten

Die Detektierbarkeit einzelner Pinguinkolonien wurde mit vier verschiedenen Methoden getestet: der manuellen Bildinterpretation, der überwachten Klassifizierung, der Ratio-Analyse und der Subpixel-Analyse. Untersucht wurden dabei alle zur Verfügung stehenden Aufnahmen, um Aussagen zu den einzelnen Sensoren treffen zu können.

Einen Überblick über die einzelnen Methoden gibt Abbildung 17 mit einer visuellen Gegenüberstellung beispielhafter Ergebnisse.

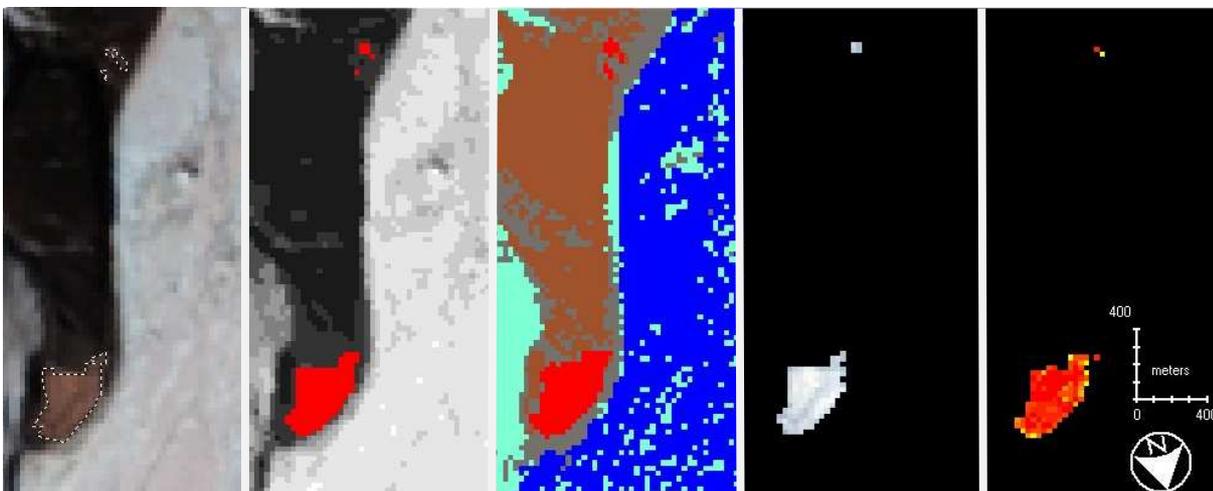


Abbildung 17: Landsat7 Cape Bird Methodenvergleich (v.l.n.r.): manuelle Bildinterpretation, unüberwachte Klassifizierung, überwachte Klassifizierung, Ratio-Ansatz, Subpixel-Analyse

3.2.1 Manuelle Bildinterpretation

Damit sich die Pinguinkolonien möglichst gut von dem umliegenden Gebiet abheben, wurde eine Kontraststreckung durchgeführt und geeignete Kanalkombinationen ausgewählt. Bei den Pinguinkolonien (Point Thomas, Ardley und Torgersen Island), bei denen im Umkreis große

Bereiche mit Vegetation bedeckt sind, lassen sich diese in der Echtfarbandarstellung Rot-Grün-Blau bei allen Sensoren am besten erkennen. Bei dieser Darstellung werden die Pinguinkolonien leicht rötlich angezeigt. Bei den Pinguinkolonien Cape Bird, Adélie-Land und Kopaitic Island trat der Guano noch deutlicher bei den Spektralkanälen 753 in den Landsat7-Aufnahmen hervor. In der Falschfarbenkomposite 432 waren die Nestgruppen bei den Quick-Bird2- und WorldView2-Aufnahmen am deutlichsten von ihrer Umgebung unterscheidbar. Die beiden zuletzt genannten Kombinationen störten bei den Pinguinkolonien mit Vegetation eher, da sie auch die Vegetation hervorheben und so eine Unterscheidung zum Guano erschweren.

Anschließend konnten die Pinguinkolonien mit einer GIS-Software digitalisiert und deren Größe berechnet werden. Für die einzelnen Kolonien ergab sich folgendes Bild (Überblick siehe Tabelle 7):

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse für die manuelle Bildinterpretation von Pinguinkolonien - gut sichtbare Kolonien (grün), schlecht sichtbare Kolonien (orange), nicht sichtbare Kolonien (rot)

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic		Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
			Kopaitic Island	Schmidt Peninsula			
Landsat7	12.01.2012	12.01.2012	07.01.2007	07.01.2007	14.11.2011	03.12.2011	28.11.2011
	09.02.2005	22.11.2010	20.01.2006	20.01.2006	12.03.2011	28.01.2011	04.02.2011
	06.12.2001	28.01.2003			15.12.2010	01.01.2011	15.12.2009
		03.01.2003			15.11.2006	09.12.2010	29.01.2009
		31.12.2001			09.02.2003	05.11.2010	28.12.2008
		22.11.2001				08.12.2007	12.12.2008
		21.02.2000				09.12.2001	
QuickBird2	28.11.2009	03.12.2011	21.11.2011		03.12.2007	03.12.2011	07.01.2012
	08.12.2005	16.01.2006			15.12.2004	16.12.2007	03.12.2007
WorldView2	08.01.2010	27.12.2011				18.12.2010	04.12.2011
WorldView1	10.12.2011						04.12.2011

Landsat7

Für Ardley Island wurden drei Aufnahmen betrachtet: eine während der Brutzeit, eine am Ende und eine deutlich nach der Brutzeit. Auf keiner dieser Aufnahmen war die Kolonie detektierbar, da die Nestgruppen zu klein sind und sich auf einer zu großen Fläche verteilen.

Auch die Kolonie auf der Schmidt Peninsula war aufgrund ihrer geringen Größe auf keiner der Aufnahmen sichtbar – im Gegensatz zur Kolonie auf Kopaitic Island, die gut digitalisiert werden konnte. Eine Unterscheidung der drei auf Kopaitic Island vorkommenden Pinguinarten war nicht möglich.

Die Pinguinkolonien bei Point Thomas und Torgersen Island waren nur auf wenigen historischen Aufnahmen sichtbar, zu einer Zeit als die Kolonien noch deutlich mehr besetzte Nester

hatten als in den aktuellen Aufnahmen. Die Abgrenzung zum Umland war aber zu wenig sichtbar, um eine sichere Digitalisierung vornehmen zu können (siehe Abbildung 18).

Sehr gut funktioniert hat die Detektion der Kolonien auf Cape Bird, da das umgebende dunkle Vulkangestein einen starken Kontrast zu dem hellen Guano bildet und dort keine störende Vegetation vorkommt. So ist selbst die relativ kleine Pinguinkolonie Cape Bird M gut zu erkennen. Auch die verschiedenen Pinguinkolonien von Adélie-Land waren identifizierbar, wenn auch nicht so deutlich wie die von Cape Bird.

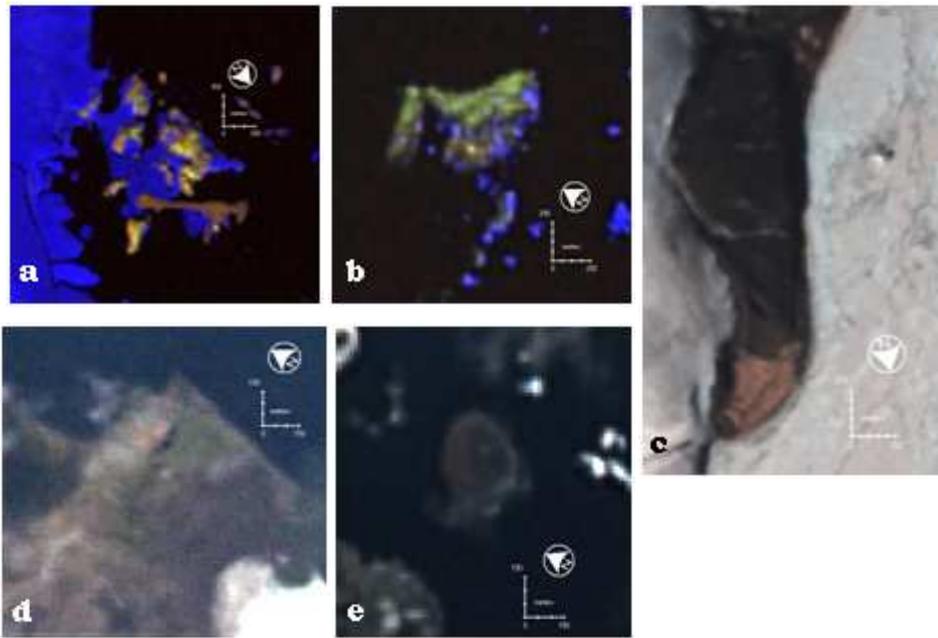


Abbildung 18: Landsat7-Überblicksaufnahmen von (a) Adélie-Land 04.02.2011 (Kanäle 753), (b) Kopaitic Island 07.01.2007 (Kanäle 753), (c) Cape Bird 09.12.2001 (Kanäle 312), (d) Point Thomas 21.02.2000 (Kanäle 312) und (e) Torgersen 09.02.2003 (Kanäle 312) (Aufnahmen mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012)

Die anhand von Landsat7-Aufnahmen manuell digitalisierten Koloniefächen der einzelnen Jahre sind in Abbildung 19 dargestellt. Gut zu sehen ist, dass Cape Bird N deutlich größer ist als die anderen Kolonien.

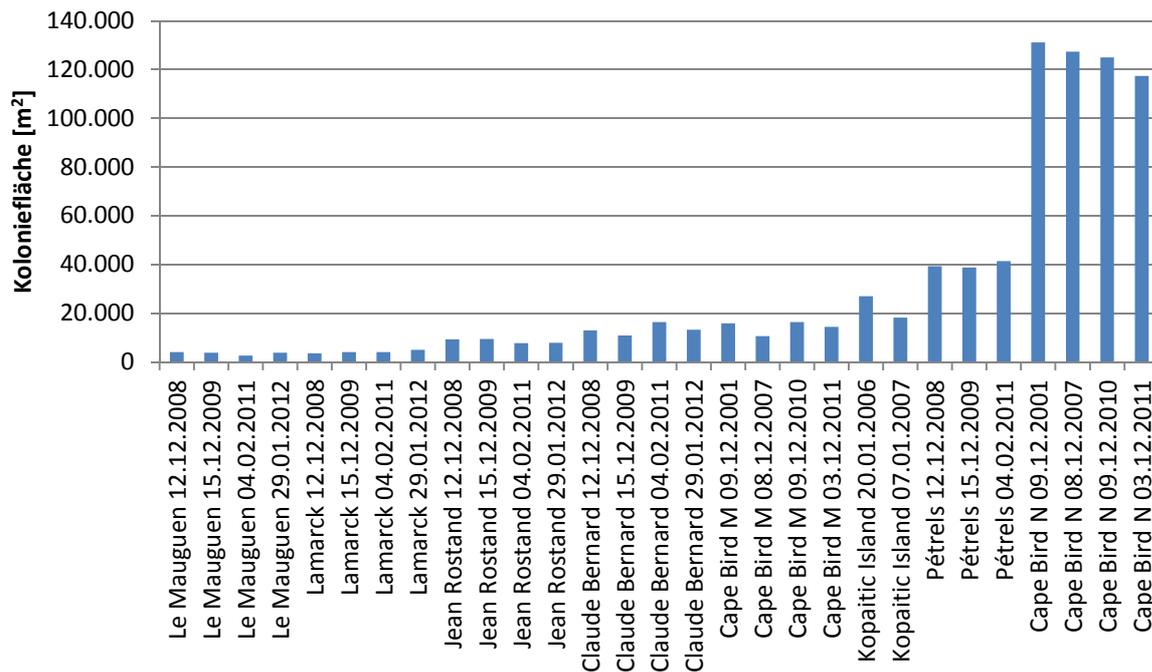


Abbildung 19: Anhand von Landsat7-Aufnahmen manuell abgegrenzten Koloniefleichen - nach deren Durchschnittsgröße sortiert

WorldView1

Auch anhand der hoch aufgelösten panchromatischen WorldView1-Aufnahme von Ardley war eine klare Abgrenzung der Nestgruppen kaum möglich. Diese sind zu klein, zu weit verstreut und der Kontrast im Grauwertbild zu gering. In Adélie-Land war hingegen eine Abgrenzung des hellen Guano von dem dunkleren Fels gut möglich (siehe Abbildung 20). In keiner der beiden Aufnahmen waren einzelne, auf Fels brütende Pinguine erkennbar. Eine Detektierung der Kaiserpinguinkolonien bei Adélie-Land ist mit hoch auflösenden panchromatischen Satellitenbildern theoretisch möglich, wenn Aufnahmen aus dem Zeitraum Juni bis Oktober vorliegen (Barber-Meyer 2007).

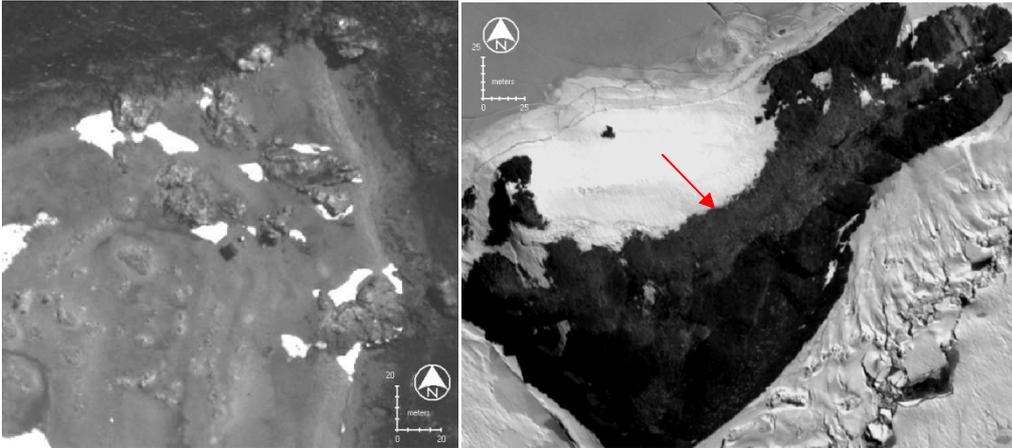


Abbildung 20: WorldView1-Bildausschnitte (PAN) von Ardley Island (links) und Claude Bernard (rechts) - bei Ardley heben sich die Nestgruppen kaum von der Umgebung ab (links), während diese bei Claude Bernard gut sichtbar sind (rechts), siehe roter Pfeil, dunkelgraue Fläche vor der schwarzen Fläche (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012)

QuickBird2 & WorldView2

Die einzelnen Nestgruppen waren auf Ardley Island gut mit den QuickBird2- und WorldView2-Aufnahmen digitalisierbar. Lediglich die Nestgruppen auf den Felsen direkt am Strand treten nicht so deutlich hervor wie die auf dem flachen Strand (siehe Abbildung 23). Bei der QuickBird2-Aufnahme vom 28.11.2009 waren die Nestgruppen nur schwer vom Fels zu unterscheiden und so kaum zu identifizieren. Eine Ursache dafür könnte das frühe Aufnahmedatum des Bildes am Anfang der Brutsaison sein. Zu dieser Zeit hat sich vermutlich noch nicht genug Guano angehäuft, den man detektieren könnte. Zudem werden zu diesem frühen Zeitpunkt nur die höher gelegenen, schneefreien Bereiche besetzt. Durch die vor Ort durchgeführten Kartierungen war es zudem möglich zu überprüfen, ob sich die Nestgruppen von Adéliepinguinen und Eselpinguinen in diesen Aufnahmen unterscheiden lassen, mit dem Ergebnis, dass eine visuelle oder spektrale Trennung nicht möglich ist. Die anhand von QuickBird2- und WorldView2-Aufnahmen digitalisierten Koloniefächen der einzelnen Jahre sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.

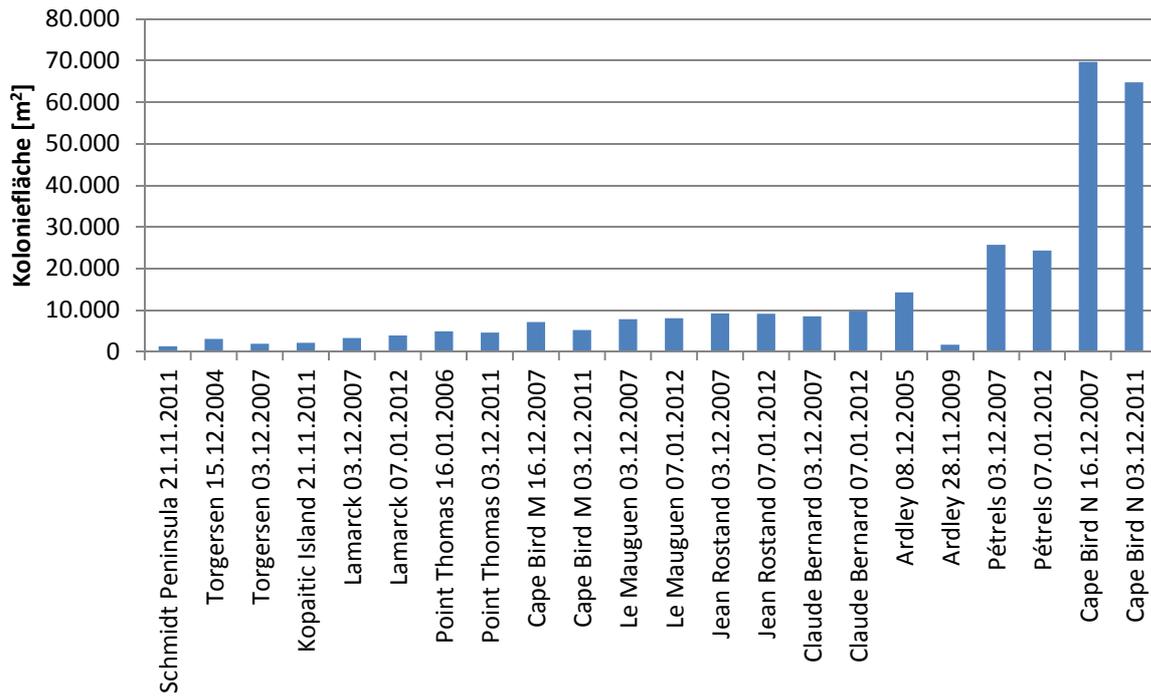


Abbildung 21: Anhand von QuickBird2-Aufnahmen manuell abgegrenzten Koloniefächen - nach deren Durchschnittsgröße sortiert

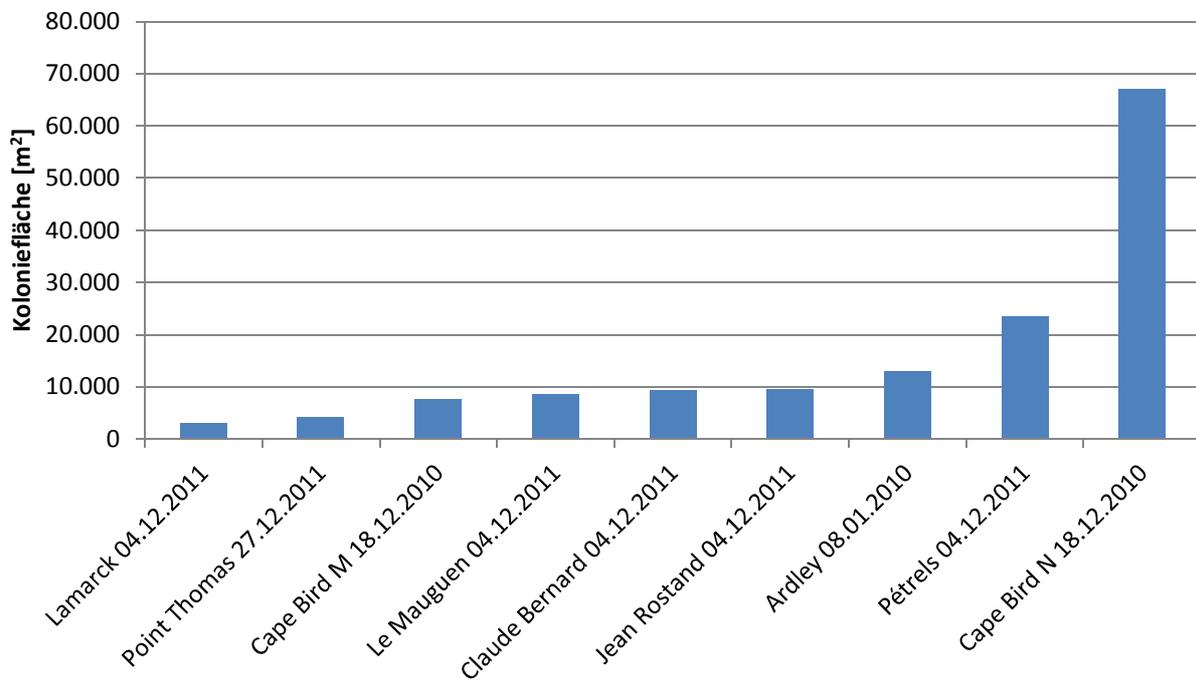


Abbildung 22: Anhand von WorldView2-Aufnahmen manuell abgegrenzten Koloniefächen - nach deren Durchschnittsgröße sortiert



Abbildung 23: QuickBird2-Aufnahmen (Kanäle 432) von Ardley Island vom 08.12.2005 (links) und vom 28.11.2009 (rechts) - Nestgruppen sind auf ebenen Geröllfeld genau (grüner Pfeil) und auf Felsen nur schwer abgrenzbar (roter Pfeil) - gelber Pfeil markiert vom Schnee verdeckte Nestgruppe (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012)

Bei Point Thomas waren auf allen Aufnahmen die Nestgruppen gut manuell digitalisierbar, obwohl in der Aufnahme vom 03.12.2011 eine geschlossene Nebelschicht die Sichtbarkeit einschränkte. Da die Aufnahmen nicht nur Point Thomas zeigen, sondern auch eine etwa 1,5 km südlich gelegene Kolonie bei der Pieter J. Lenie Field Station (USA), wurde auch diese visuell untersucht. Durch den Vergleich mit einer Karte von Jablonski (1986) aus dem Jahr 1978/1979, die die Artenverteilung der Kolonie zeigt, konnte die Vermutung aufgestellt werden, dass die dunklen Bereiche in der östlichen Strandkolonie Nester von Adéliepinguinen in einer ansonsten von Eselpinguinen dominierten Bereich darstellen. Hierfür spricht auch, dass die Nestgruppen der Eselpinguine gewöhnlich zersiedelter und nicht so kompakt sind wie die der Adéliepinguine. Sichtbar waren diese Unterscheidungen in den nebelfreien Aufnahmen von 2006 und 2011 (siehe Abbildung 24). Diese Abgrenzung würde sich auch mit den Beobachtungen von Lynch et al. (2012) decken, die feststellten, dass Bereiche mit Adéliepinguinnestern dunkler sind als die Bereiche mit brütenden Zügelpinguinen. Ein letztendliche Feststellung, ob es sich hier wirklich um Adéliepinguine handelt, konnte aufgrund fehlender aktueller Zähl- bzw. Kartierungsdaten nicht gemacht werden.



Abbildung 24: Pieter J. Lenie Field Station : links georeferenzierte Karte nach Jablonski (1986), Mitte WorldView2-Aufnahme vom 27.12.2011 (Kanäle 532), rechts QuickBird2-Aufnahme vom 16.01.2006 (Kanäle 321) - in Karte Links: horizontal gestreift = Adéliepinguine, gepunktet = Eselpinguine - roter Pfeil markiert die selben dunkle Flecken in östlichen Koloniestreifen, vermutlich Adéliepinguine in Eselpinguinkolonie (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012)

Sowohl die besetzten Nester auf Kopaitic Island als auch auf der Schmidt Peninsula waren sehr gut als rötliche Bereiche auf dem Schnee zu erkennen, wie in Abbildung 25 gut zu sehen ist.



Abbildung 25: Kopaitic Island (links) und Schmidt Peninsula (rechts) auf einer QuickBird2-Aufnahme vom 21.11.2011 (Kanäle 432) - mit rotem Pfeil sind Nestgruppen markiert (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012)

In der Aufnahme von Torgersen Island vom 15.12.2004 waren die Nestgruppen im Gegensatz zum Luftbild aus Abbildung 26 kaum vom umgebenden Untergrund zu trennen. Die Größe der Nestgruppen scheidet als Ursache hierfür aus, da die Nester in der Aufnahme von 03.12.2007 relativ gut sichtbar sind, obwohl die Anzahl der besetzten Nester deutlich abgenommen hat. In der Aufnahme von 2007 sind die Nestgruppen zwar besser erkennbar, aber immer noch sehr viel schlechter als in den späten Aufnahmen von Ardley Island oder Point Thomas. Auch hier könnte der relativ frühe Aufnahmezeitpunkt Anfang Dezember mit der damit einhergehenden geringen Guanoansammlung die Ursache sein.



Abbildung 26: Torgersen Island: Gegenüberstellung von Luftbild aus dem Jahr 1998 (links; Foto mit freundlicher Genehmigung von Fraser, briefl.), QuickBird2-Aufnahmen vom 15.12.2004 (Kanäle 312; Mitte) und vom 03.12.2007 (rechts) - in den QuickBird2-Aufnahmen sind die Nestgruppen nur schwer erkennbar - mit rotem Pfeil ist immer dieselbe Nestgruppe markiert (Aufnahmen © EUSI/DigitalGlobe 2012)

Auf Cape Bird sind sowohl die große nördliche als auch die kleine mittlere Kolonie sehr gut erkennbar. Wie schon bei den Landsat7-Aufnahmen herrscht ein starker Kontrast zwischen dem hellen Guano und dem dunklen vulkanischen Gestein. Besonders gut sichtbar ist auf Cape Bird die Unterscheidung von Koloniebereichen, die eng mit besetzten Nestern bedeckt sind, und Bereichen die nur aus Guano bestehen. So sind die Bereiche mit den Nestern dunkel gesprenkelt, während die Gebiete mit reinem Guano heller und gleichmäßiger erscheinen (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Cape Bird N: QuickBird2-Aufnahme vom 18.12.2010 (Kanäle 432; links; Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012) und Fotografie (Foto mit freundlicher Genehmigung von Lyver; rechts) zeigen ungefähr dieselben Nestgruppen - erkennbar sind dunkel gesprenkelte Bereiche, die eng mit besetzten Nestern bedeckt sind (weiße gestrichelte Linie zeigt zwei Beispiele)

Auch die Kolonien bei Adélie-Land waren bei allen Aufnahmen sehr gut erkennbar. Ein Vorteil der höher aufgelösten WorldView2-Aufnahmen konnte für die manuelle Bildinterpretation bei keiner Aufnahme gefunden werden.

3.2.2 Überwachte und unüberwachte Klassifizierung

Die unüberwachte Klassifizierung ist ein statistischer Ansatz, wobei die Pixel in Klassen mit ähnlich spektralen Eigenschaften eingeteilt werden, ohne dass der Benutzer Inhalte dieser Klasse kennt. Nach der Klassifizierung ordnet der Benutzer die Klassen einzelnen Objekten zu. Dieser Ansatz stellt u. a. Grundlage oder Ergänzung zur überwachten Klassifizierung dar. Auf diese Weise wird kontrolliert, ob die Daten eine Trennung der gewünschten Objektklassen ermöglichen oder ob die gewählten Klassen aus mehreren Unterklassen bestehen (Albertz 2007).

Die überwachte Klassifizierung wird am häufigsten für die Extraktion von quantitativen Informationen aus Fernerkundungsdaten verwendet. Diese Methode benutzt sogenannte Trainingsgebiete. Dies sind Referenzflächen, von denen bekannt ist, welcher Objektklasse sie angehören. Für jede Objektklasse muss mindestens eine Referenzfläche bestimmt werden (Albertz 2007). Durchgeführt wurden überwachte Klassifizierungen von sich auf Fels befindenden Pinguinkolonien bereits von Schwaller et al. (1989) mit Landsat7-Aufnahmen und von Bhikharidas et al. (1995) mit SPOT-HRV-Aufnahmen.

Hier wurde zunächst mit unüberwachten Klassifizierungen (Convergenz Threshold 0,975 ; 60 Iterations) mit 10 und 20 Klassen getestet, ob sich die Pinguinkolonien einwandfrei von ihrer Umgebung trennen lassen und ob die Klasse „Pinguinkolonie“ in sich konsistent ist. Eine Übersicht über die Ergebnisse für jede Kolonie ist in Tabelle 8 zu finden.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse für die unüberwachte Klassifizierung mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün), noch verwertbaren Klassifizierungsergebnissen (gelb) und nicht oder schlecht klassifizierbaren Kolonien (rot)

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic		Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
			Kopaitic Island	Schmidt Peninsula			
Landsat7	unbrauchbar	unbrauchbar	noch verwertbar	unbrauchbar	unbrauchbar	gut	noch verwertbar
WorldView1	unbrauchbar	-	-	-	-	-	unbrauchbar
QuickBird2	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	gut	schlecht
WorldView2	schlecht	schlecht	-	-	-	gut	schlecht

Landsat7

Anhand der Landsat-7 Aufnahmen wurde festgestellt, dass nur die Klassifizierungen der Pinguinkolonien auf Cape Bird, Adélie-Land und Kopaitic Island gute Ergebnisse lieferten. Auf Cape Bird wurden die Pinguinkolonien sehr gut abgegrenzt und waren in sich konsistent. Die Ergebnisse von Adélie-Land und Kopaitic waren suboptimal, denn es kam zu größeren Fehlklassifizierungen. Dennoch ist eine Abgrenzung dort möglich. Für die restlichen Pinguinkolonien hat die unüberwachte Klassifizierung keine Klasse für Pinguinkolonien liefern können.

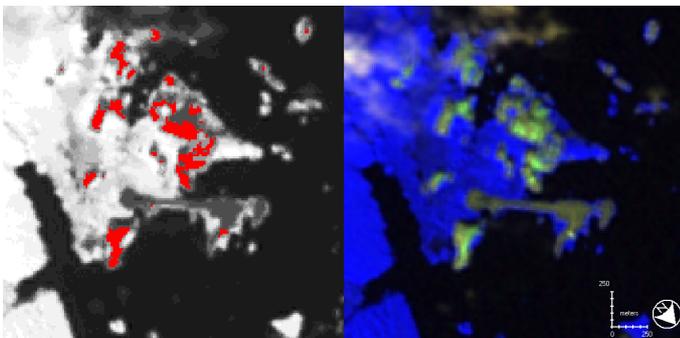


Abbildung 28: Adélie-Land Landsat7-Aufnahme vom 15.12.2009: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung (links) mit rot eingefärbten Kolonien und die unveränderte Aufnahme (Kanäle 753; rechts) (Aufnahme mit freundlicher Genehmigung von NASA GSFC & USGS 2012)

WorldView1

Mit den WorldView1-Aufnahmen konnte weder auf Ardley Island noch auf Adélie-Land eine oder mehrere Klassen gefunden werden, die allein Pinguinkolonien repräsentiert. Besonders beim Übergang von Eis zu Fels kommen Grauwerte vor, die denen der besetzten Nester und des Guanos gleichen. Auf Adélie-Land sind die Helligkeitsunterschiede zum umliegenden Fels nicht groß genug.

QuickBird2 & WorldView2

Lediglich auf Cape Bird konnten mit den QuickBird2- und WorldView2-Aufnahmen drei Klassen definiert werden, die dem am stärksten mit Guano bedeckten Teil der Pinguinkolonie entsprechen. Bei allen anderen Aufnahmen wurden den Guanoklassen immer auch andere Oberflächenklassen zugeordnet. Die Ursache dafür liegt in der sehr hohen Variabilität der Landbedeckungsklassen, die durch die hohe Auflösung der Aufnahmen zustande kommt. Im Ergebnis deutet das darauf hin, dass für eine erfolgreiche überwachte Klassifizierung relativ viele Klassen definiert werden müssen, um der großen Variabilität der Landbedeckungsklassen gerecht zu werden.

Anschließend fand ein Vergleich von drei überwachten Klassifikationsarten, der Maximum-Likelihood, der Minimum-Distance und der Mahalanobis-Distance- Klassifikation statt (vgl. Albertz 2007, ERDAS Field Guide 2010). Das Ergebnis dieses Vergleiches besagt, dass die Maximum-Likelihood-Klassifizierung die besten Ergebnisse liefert.

Um die überwachte Klassifizierungen an den einzelnen Aufnahmen durchzuführen, wurden zuerst für jeden Oberflächentyp Trainingsgebiete festgelegt. Diese waren je nach Aufnahmegebiet die Klassen Pinguinkolonie, Fels, Eis/Schnee, Ozean und Vegetation. Zudem wurde für jede Klasse überprüft, ob eine Normalverteilung vorherrscht und ein Trennbarkeitstest (Jeffries-Matusita Distance) durchgeführt (siehe ERDAS Field Guide 2010). Damit die Trainingsgebiete die Ergebnisse nicht verfälschen, wurden diese bei der Auswertung nicht mit betrachtet. Deshalb wurde bspw. Jean Rostand nicht ausgewertet, da diese Kolonie als Trainingsgebiet für die anderen Kolonien bei Adélie-Land diene. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse für die überwachte Klassifizierung befindet sich in

Tabelle 9.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse für die überwachte Klassifizierung mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün), schlecht klassifizierbaren Kolonien (orange) und nicht klassifizierbaren Kolonien (rot)

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic		Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
			Kopaitic Island	Schmidt Peninsula			
Landsat7	12.01.2012	12.01.2012	07.01.2007	07.01.2007	14.11.2011	03.12.2011	28.11.2011
	09.02.2005	22.11.2010	20.01.2006	20.01.2006	12.03.2011	28.01.2011	04.02.2011
	06.12.2001	28.01.2003			15.12.2010	01.01.2011	15.12.2009
		03.01.2003			15.11.2006	09.12.2010	29.01.2009
		31.12.2001			09.02.2003	05.11.2010	28.12.2008
		22.11.2001				08.12.2007	12.12.2008
		21.02.2000				09.12.2001	
QuickBird2	28.11.2009	03.12.2011	21.11.2011		03.12.2007	03.12.2011	07.01.2012
	08.12.2005	16.01.2006			15.12.2004	16.12.2007	03.12.2007
WorldView2	08.01.2010	27.12.2011				18.12.2010	04.12.2011
WorldView1	10.12.2011						04.12.2011

Landsat7

Auch mit der überwachten Klassifizierung war es nicht möglich die Pinguinkolonien von Ardley, Point Thomas, Torgersen und Schmidt Peninsula zu klassifizieren, da keine ausreichend großen Trainingsgebiete für Guano vorhanden waren.

Sehr gute Ergebnisse lieferte die Klassifizierung von Cape Bird. Vor allem durch die große nördliche Pinguinkolonie konnte ein gutes Trainingsgebiet festgelegt werden, anhand dessen dann auch die sehr viel kleinere mittlere Pinguinkolonien Cape Bird M klassifiziert wurden.

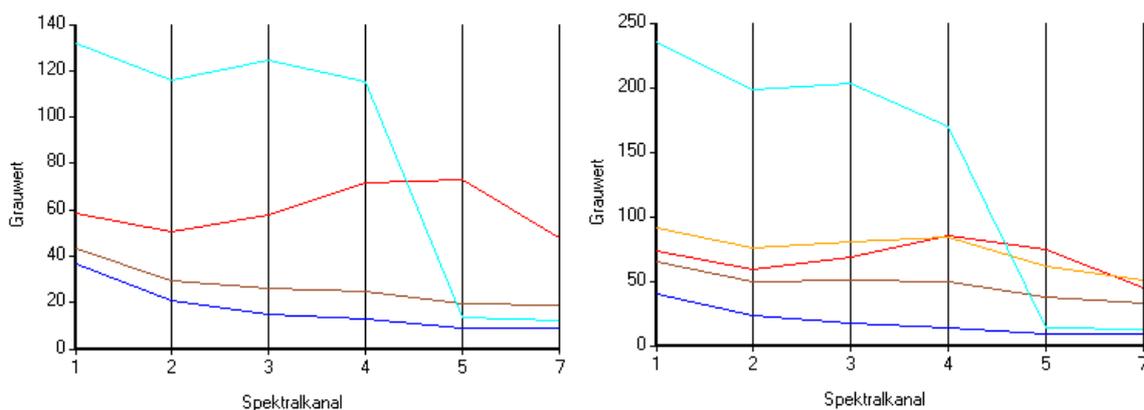


Abbildung 29: Gemittelte spektrale Signaturen der Trainingsgebiete von Cape Bird (links) und Adélie-Land (rechts) für Landsat7 - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Orange = Fels alt

Die Ergebnisse für Adélie-Land und Kopaitic Island waren ähnlich gut, enthielten aber mehr Fehlklassifikationen als die Klassifizierung von Cape Bird. Dies lag vor allem daran, dass die spektrale Signatur des Fels (Klasse „Fels alt“ Abbildung 29), auf dem die Kolonien angesiedelt sind, sehr stark dem Guano ähneln, weshalb es zu häufigeren Fehlklassifikationen kommt. Je größer die Werte in Abbildung 29 sind, desto größer ist die Reflexion im jeweiligen Spektralkanal. Gut unterscheidbare Klassen zeigen spektral deutliche Unterschiede.

Abbildung 30 zeigt die quantitativen Ergebnisse der Klassifizierung für alle ausgewerteten Kolonien im direkten Vergleich zur manuellen Abgrenzung. Sichtbar wird die große Schwankung in der Abweichung der klassifizierten Fläche bei allen Kolonien außer Cape Bird N. Die Ursache liegt zum einen in der spektralen Ähnlichkeit des Felsuntergrundes bei Adélie-Land und Kopaitic Island und zum anderen darin, dass Fehlklassifizierungen von wenigen Pixeln bei kleinen Kolonien viel stärker ins Gewicht fallen als bei großflächigen Kolonien. So ist in Abbildung 31 gut zu sehen, dass die Abweichungen mit zunehmender Koloniefäche deutlich abnehmen.

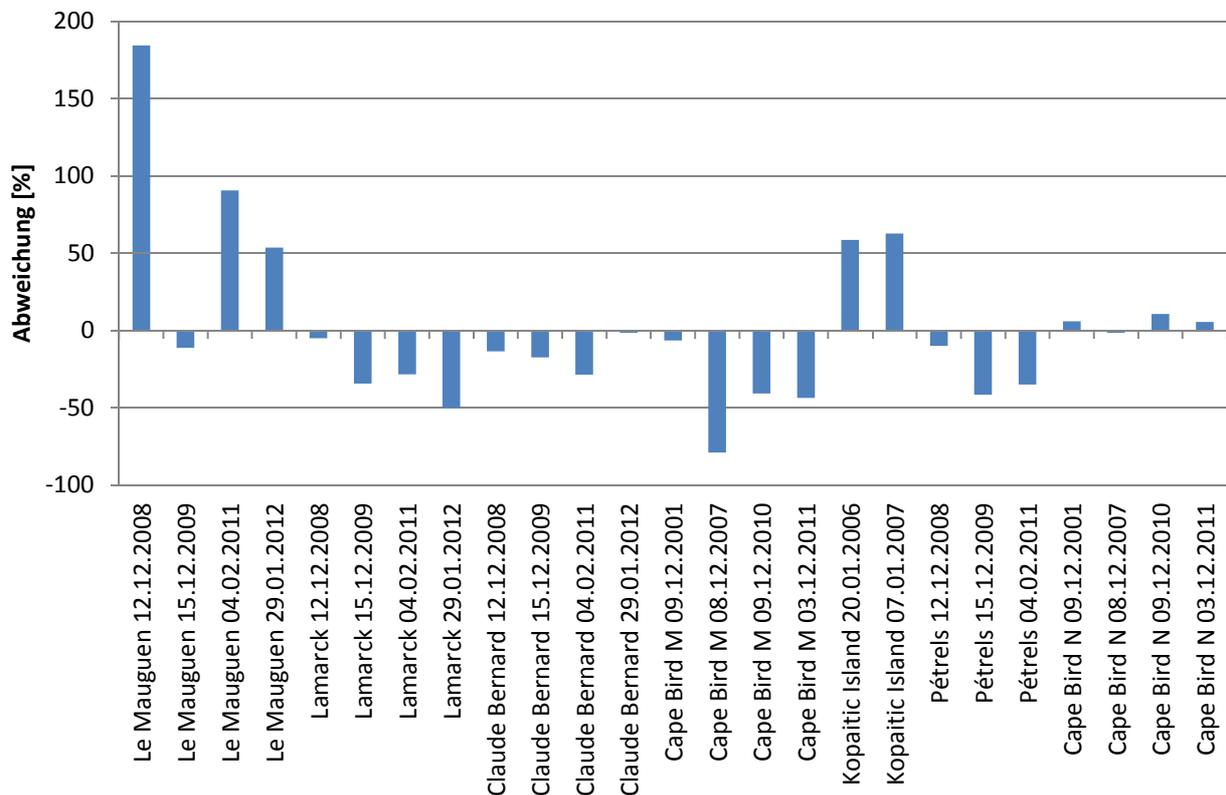


Abbildung 30: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen

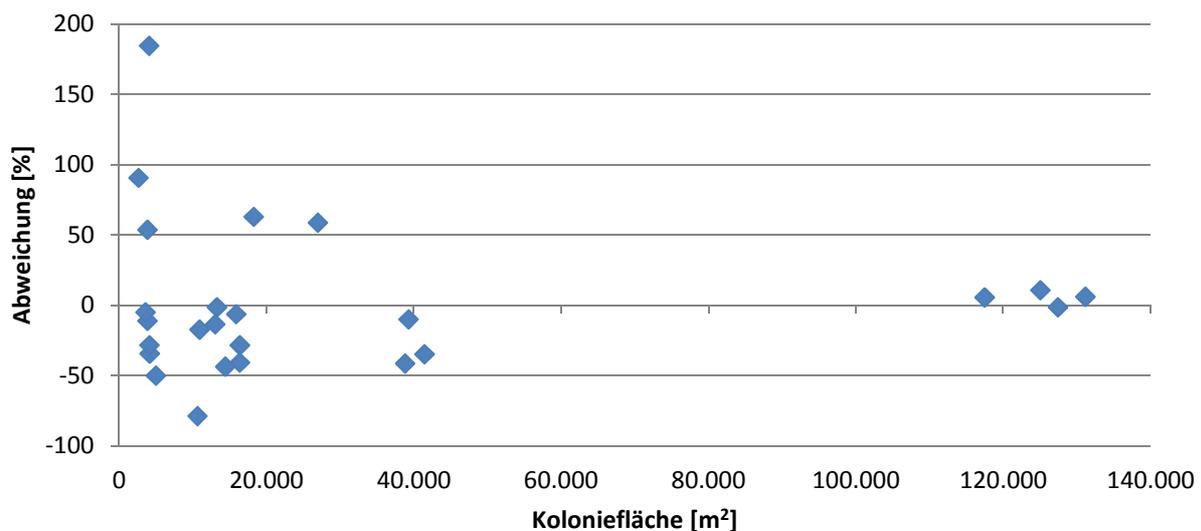


Abbildung 31: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen

WorldView1

In der Aufnahme von Ardley Island konnten die einzelnen Nestgruppen nicht klassifiziert werden, wie schon die unüberwachte Klassifizierung vermuten ließ. Die Grauwerte des PAN-Kanals ließen eine zweifelsfreie Differenzierung zwischen Nestgruppen und ähnlich hellem Felsuntergrund nicht zu. In Adélie-Land waren die Ergebnisse deutlich besser, auch wenn es hier ebenfalls zu häufigen Fehlklassifizierungen kam. So wurde zwar überwiegend der von Guano bedeckte Fels detektiert, aber auch ähnlich helle Bereiche im Übergang von Fels zu Eis.

QuickBird2 & WorldView2

Ohne Problem konnten die Kolonien in den Aufnahmen von Cape Bird, Adélie-Land und die nebelfreien Aufnahmen von Point Thomas klassifiziert werden. Durch den Nebel in der Point Thomas-Aufnahme vom 03.12.2011 wurde die Klassifizierung deutlich verschlechtert, so dass einige Nestgruppen nicht komplett klassifiziert werden konnten.

Auch in den Ardley-Aufnahmen vom 08.12.2005 und 08.01.2010 ließen sich die Bereiche mit Guano gut klassifizieren, eine komplette Trennung von den umliegenden Landbedeckungsklassen gelang jedoch nicht. Vor allem die gemischten Pixelbereiche von Eis, Vegetation und bestimmte Bodentypen ließen sich nicht einwandfrei von Guano trennen und wurden fehlklassifiziert. Auch die zusätzlichen Spektralkanäle der WorldView2-Aufnahmen konnten das Ergebnis nicht verbessern.

Besonders schwierig zu klassifizieren waren die verschneiten frühen Aufnahmen von Ardley (28.11.2009) und Kopaitic (21.11.2011) sowie beide Aufnahmen von Torgersen (03.12.2007, 15.12.2004). Bei Ardley und Torgersen bereitete vor allem die schlechte Trennbarkeit des Guanos zum Fels und bei Kopaitic die Trennung zu den verschiedenen stark beschatteten Schneeflächen Probleme. Abbildung 32 verdeutlicht, dass die spektrale Unterscheidung des Guanos von

den umliegenden Landbedeckungsklassen bei Ardley und Torgersen im Gegensatz zu Cape Bird nur sehr gering ist.

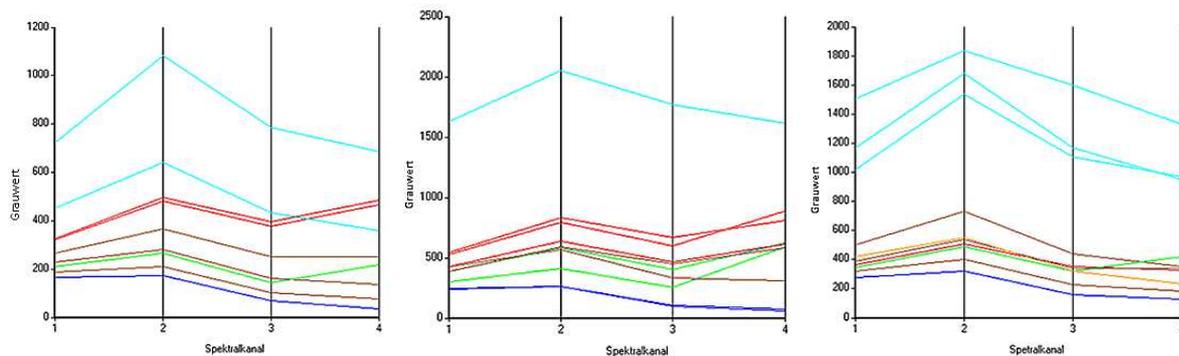


Abbildung 32: Gemittelte spektrale Signatur von QuickBird2 Trainingsgebieten für Cape Bird (links), Ardley (Mitte) und Torgersen 2007 (rechts) - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Grün = Vegetation; Orange = Brandung

Vor allem bei Cape Bird wurde deutlich, dass die Abgrenzung der Pinguinkolonien stark davon abhängig ist, welche Trainingsgebiete gewählt wurden. Bereiche die eng mit besetzten Nestern bedeckt sind, konnten aber nicht von Bereichen mit reinem Guano getrennt werden. Die überwacht klassifizierte Koloniefächen für QuickBird2 und WorldView2 sind in Abbildung 33 bis Abbildung 36 dargestellt. Im Gegensatz zu den Landsat7-Aufnahmen besteht kein Zusammenhang zwischen der Koloniefäche und der Abweichung von den manuell abgegrenzten Koloniefächen, was auf die höhere räumliche Auflösung der Aufnahmen zurückzuführen ist.

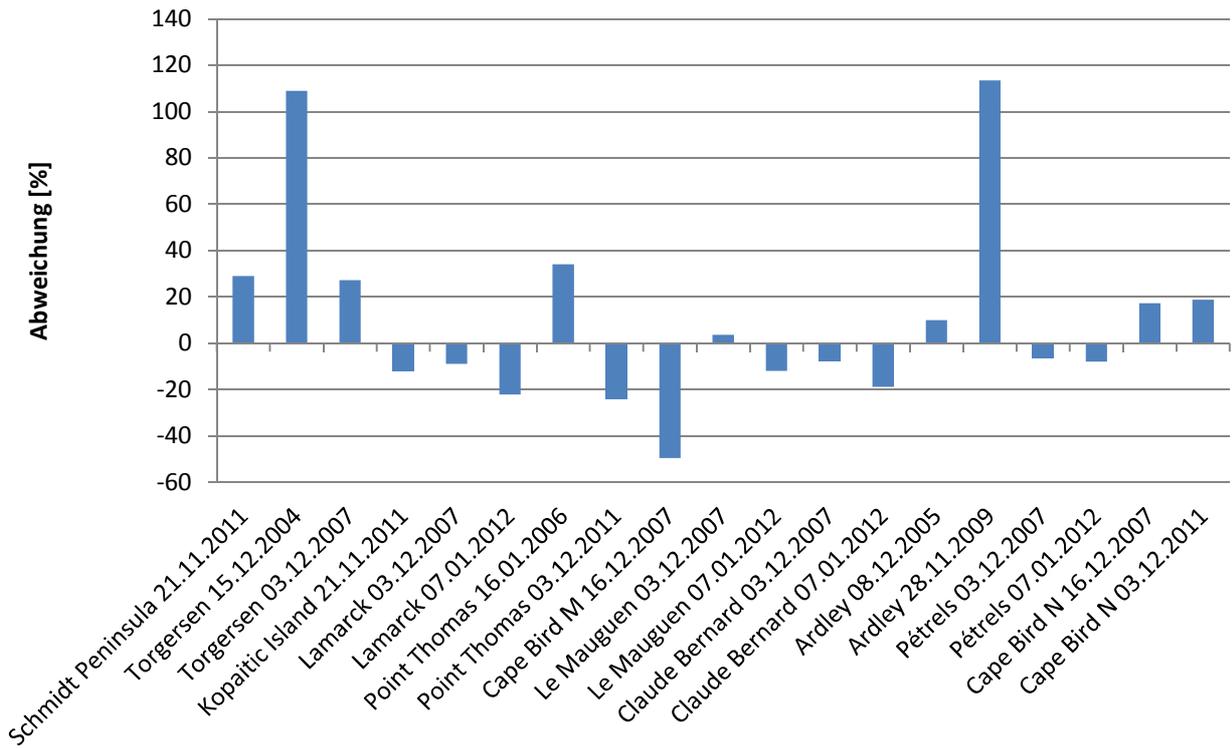


Abbildung 33: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

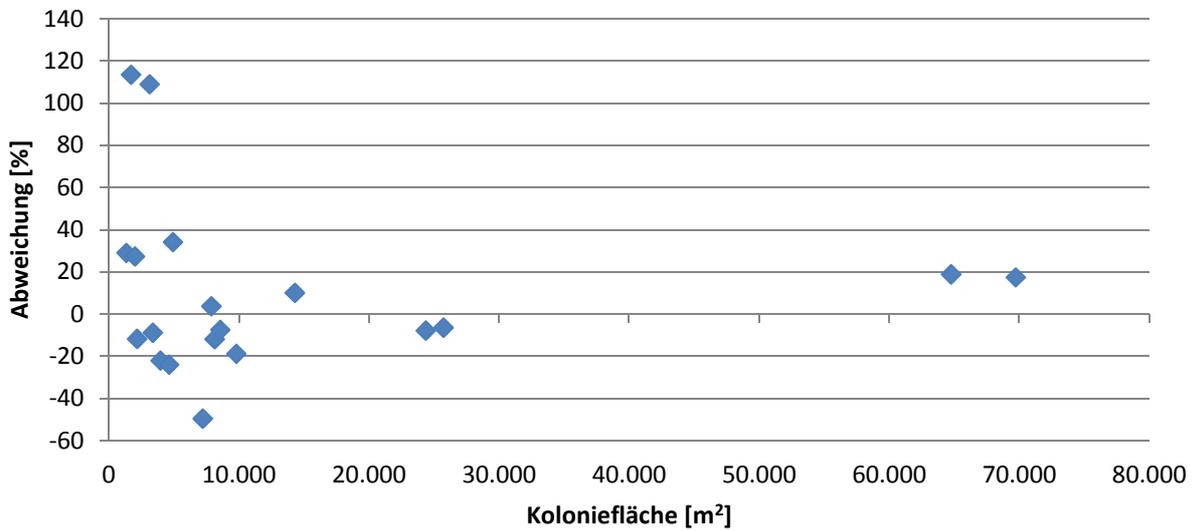


Abbildung 34: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für QuickBird2-Aufnahmen

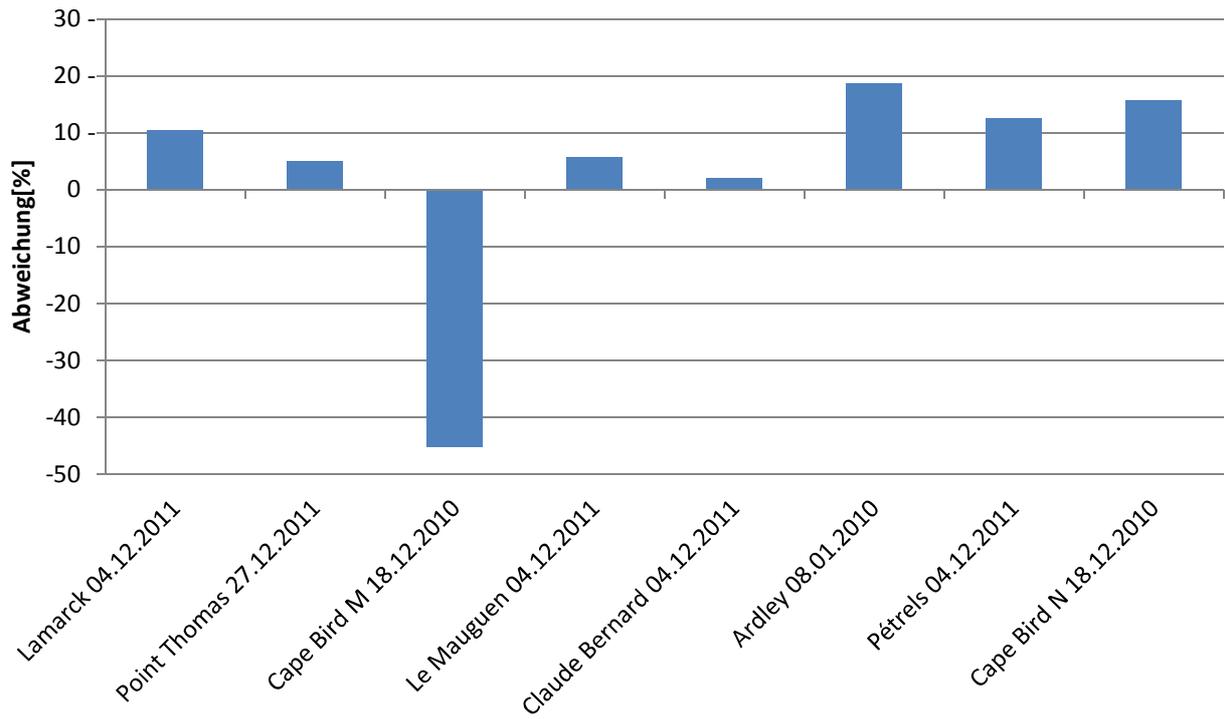


Abbildung 35: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten für einzelne WorldView2-Aufnahmen

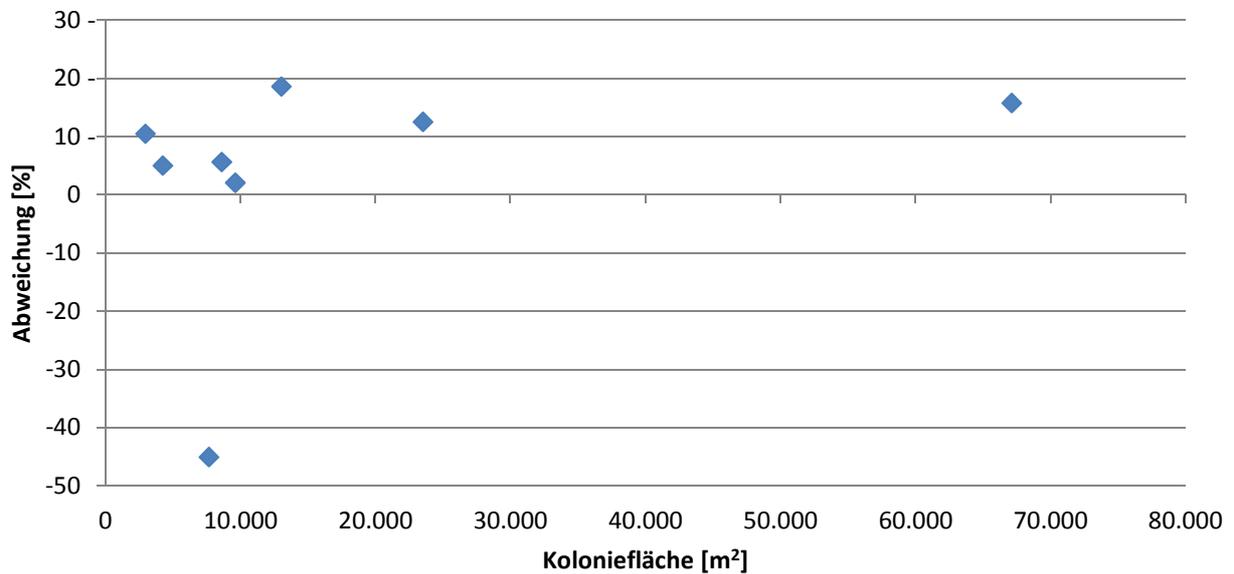


Abbildung 36: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für WorldView2-Aufnahmen

3.2.3 Ratio-Ansatz

Daten mehrerer Spektralkanäle können durch arithmetische Operationen miteinander verknüpft werden und so neue Bilddatensätze erzeugen, um optimale Informationen über ein bestimmtes Objekt zu gewinnen. Ratios werden gebildet, indem die Grauwerte eines Spektralkanals durch die eines anderen dividiert werden. Durch Ratios kann die Verteilung eines bestimmten Stoffes wie Guano hervorgehoben werden, während andere Signale anderer Stoffe unterdrückt werden (Albertz 2007). Durch setzen eines Grenzwertes im Ratiobild werden erwünschte und unerwünschte Klassen voneinander getrennt. Dieser Schritt wird mit verschiedenen Ratiokombinationen und verschiedenen Schwellenwerten so lange wiederholt, bis nur die gewünschte Klasse übrig bleibt (Lillesand et al. 2004).

Schwaller (1984) hat bereits nachgewiesen, dass Pinguinkolonien theoretisch mit Ratios von umliegenden Materialien separiert werden können. Um dies praktisch zu überprüfen, wurden zunächst mit einem ERDAS-Imagine-Modell alle möglichen Ratios (15 für Landsat7, 6 für QuickBird2 und 28 für WorldView2) der Eingangsbilder erstellt. In diesen wurden Trainingsgebiete für alle voneinander zu trennenden Landbedeckungsklassen festgelegt und die Grauwertverteilung jedes Ratios für jede Landbedeckungsklassenfläche berechnet. Anhand der Minimal- und Maximalwerte der Landbedeckungsklassen konnten die Ratios ausgewählt werden, die eine Klassentrennung erlauben. Das Ergebnis ist eine Maske, die im Idealfall der Ausdehnung der Pinguinkolonie entspricht. Damit die Trainingsgebiete die Ergebnisse nicht verfälschen, wurden diese von der Auswertung ausgeschlossen. Eine Übersicht über die Güte der Ergebnisse für jede Aufnahmen befindet sich in Tabelle 10.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse für den Ratio-Ansatz - mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün), schlecht klassifizierbaren Kolonien (orange) und nicht klassifizierbaren Kolonien (rot)

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic		Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
			Kopaitic Island	Schmidt Peninsula			
Landsat7	12.01.2012	12.01.2012	07.01.2007	07.01.2007	14.11.2011	03.12.2011	28.11.2011
	09.02.2005	22.11.2010	20.01.2006	20.01.2006	12.03.2011	28.01.2011	04.02.2011
	06.12.2001	28.01.2003			15.12.2010	01.01.2011	15.12.2009
		03.01.2003			15.11.2006	09.12.2010	29.01.2009
		31.12.2001			09.02.2003	05.11.2010	28.12.2008
		22.11.2001				08.12.2007	12.12.2008
		21.02.2000				09.12.2001	
QuickBird2	28.11.2009	03.12.2011	21.11.2011		03.12.2007	03.12.2011	07.01.2012
	08.12.2005	16.01.2006			15.12.2004	16.12.2007	03.12.2007
WorldView2	08.01.2010	27.12.2011				18.12.2010	04.12.2011
WorldView1	10.12.2011						04.12.2011

Landsat7

Auch mit dem Ratio-Ansatz bzw. der Ratio-Analyse konnten die Pinguinkolonien im Bereich der Antarktischen Halbinsel aus o.g. Gründen (siehe 3.2.1) nicht abgegrenzt werden.

Auf Cape Bird, Adélie-Land und Kopaitic Island war eine Abgrenzung der Pinguinkolonien gut möglich. Einen Überblick über die Ratios der einzelnen Landbedeckungsklassen von Cape Bird und Adélie-Land gibt Abbildung 37. Differenzieren lassen sich Landbedeckungsklassen in denjenigen Ratios, in denen sie möglichst unterschiedlich große Quotienten haben. So ist bspw. in allen Ratios mit den Multispektralkanälen fünf und sieben eine Unterscheidung von Eis zu den übrigen Landbedeckungsklassen möglich. Da bei beiden Orten keine in den Aufnahmen messbare Vegetation vorkommt, wurden die Ratios der Vegetation aus den Point Thomas-Aufnahmen erstellt. Zu sehen ist, dass sich die durchschnittlichen Ratios für Eis und Ozean relativ stark von Guano unterscheiden, während Guano und Vegetation eine sehr ähnliche Verteilung aufweisen, so dass deren Trennung nicht möglich ist. Im Gegensatz zu Cape Bird lässt sich Guano und Fels in Adélie-Land und Kopaitic Island nur schwer trennen.

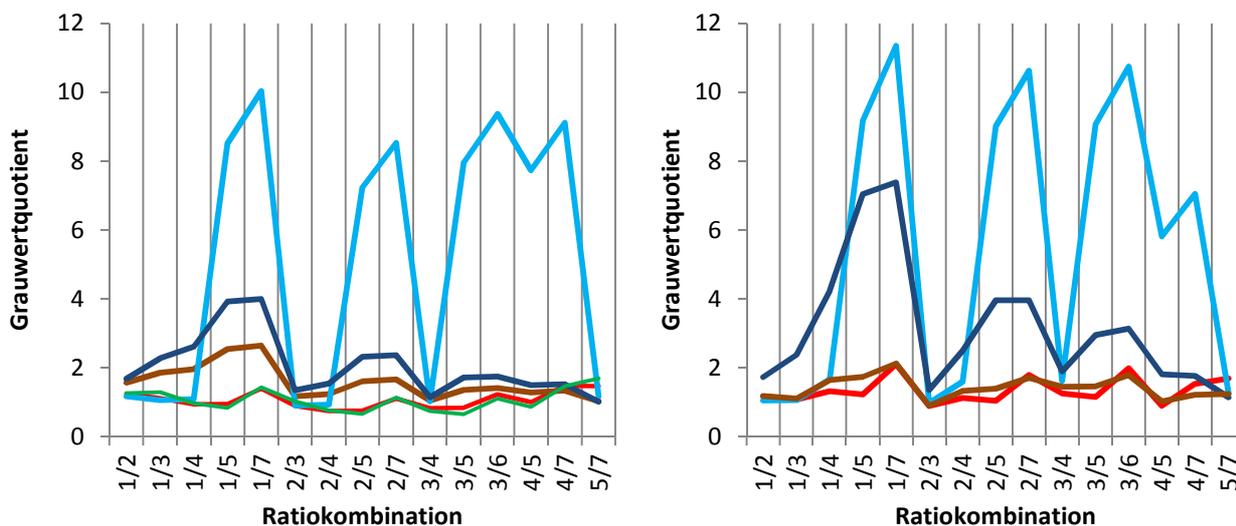


Abbildung 37: Gemittelte Landsat7-Ratios der Landbedeckungsklassen von Cape Bird (links) und Adélie-Land (rechts) - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Grün = Vegetation

Die Ergebnisse des Ratio-Ansatzes zeigen allgemein eine starke Abweichung zur manuellen Abgrenzung, siehe Abbildung 38. Tendenziell wird die Koloniefläche im Vergleich zur manuellen Abgrenzung unterschätzt. Die größten Abweichungen treten bei kleinen Kolonien auf (siehe Abbildung 39).

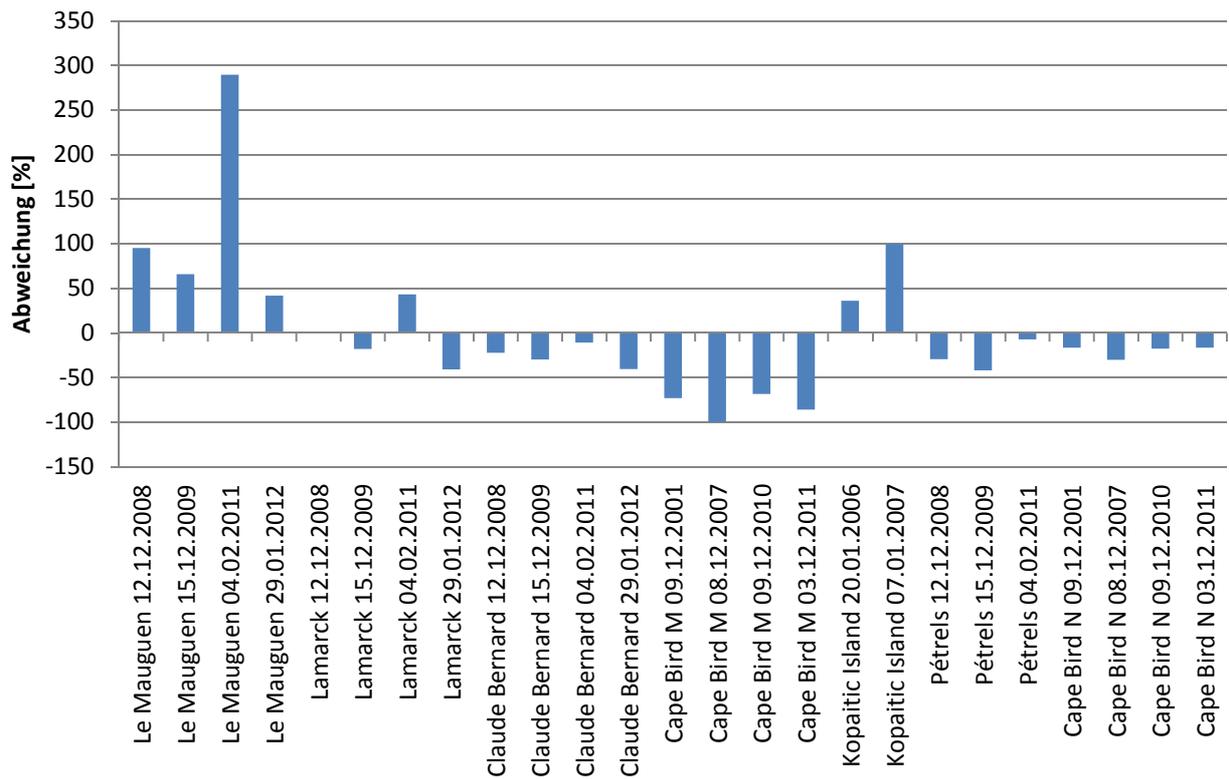


Abbildung 38: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen

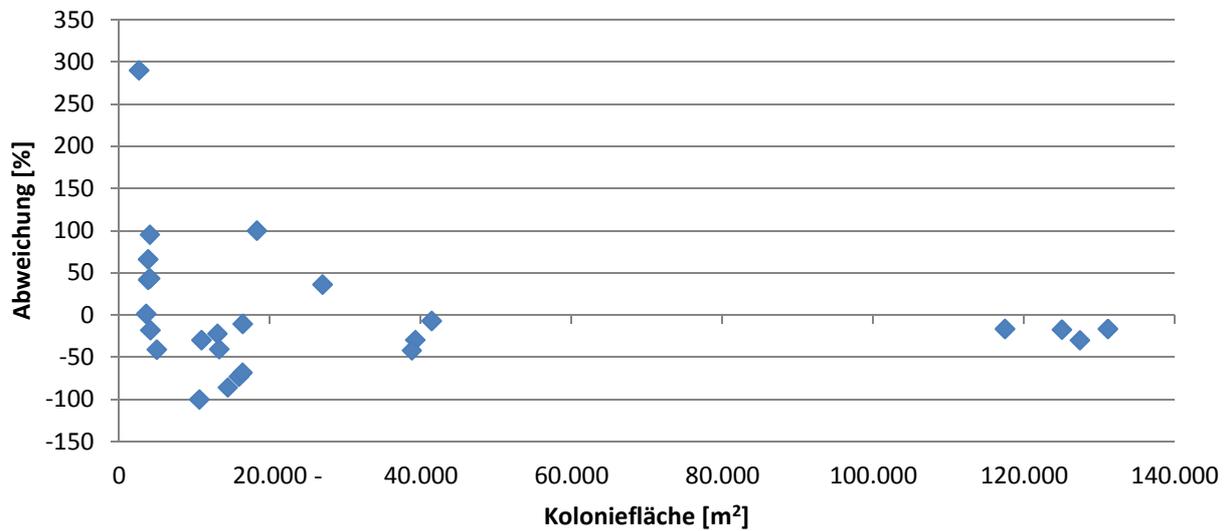


Abbildung 39: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen

WorldView1

Die Ratio-Methode setzt multispektrale Daten voraus, weshalb sie nicht auf die panchromatischen WorldView1-Aufnahmen angewendet werden kann.

QuickBird2 & WorldView2

Im Unterschied zu den Landsat7-Aufnahmen ist es möglich, durch die bessere Auflösung die Pinguinkolonien in Ardley, Point Thomas und Torgersen grob abzugrenzen. Allerdings ist eine komplette Trennung des Guanos von den umliegenden Materialien nicht möglich. Wie schon bei den überwachten Klassifizierungen (siehe Kap. 3.2.2) treten Problem bei Eisrändern und bestimmten Bodentypen auf sowie bei Aufnahmen, bei denen sich nur wenig Guano ansammelte. Beispielhaft ist in Abbildung 40 eine Gegenüberstellung der gemittelten Ratios von Adélie-Land mit guten Ergebnissen und Ardley, bei dem eine Analyse ohne große Fehlklassifizierungen nicht möglich war. Erkennbar ist die Überlagerung und geringe Differenz der Ratios bei Ardley. Eine Übersicht, bei welchen Aufnahmen eine Klassifizierung mit dem Ratio-Ansatz möglich war, gibt Tabelle 10. Abbildung 41 bis Abbildung 44 zeigen die Ergebnisse der klassifizierten Flächen. Es ist kein Zusammenhang zwischen der Größe der Koloniefäche und der Abweichung zur manuell abgegrenzten Koloniefäche erkennbar.

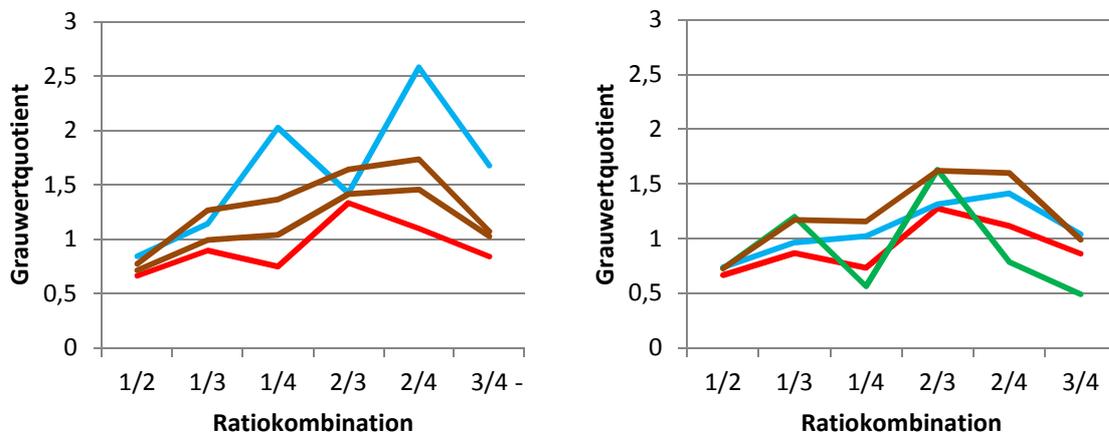


Abbildung 40: Gemittelte QuickBird2-Ratios für Adélie-Land (links) und Ardley (rechts) - Rot = Guano; Braun = Fels; Türkis = Eis; Blau = Ozean; Grün = Vegetation

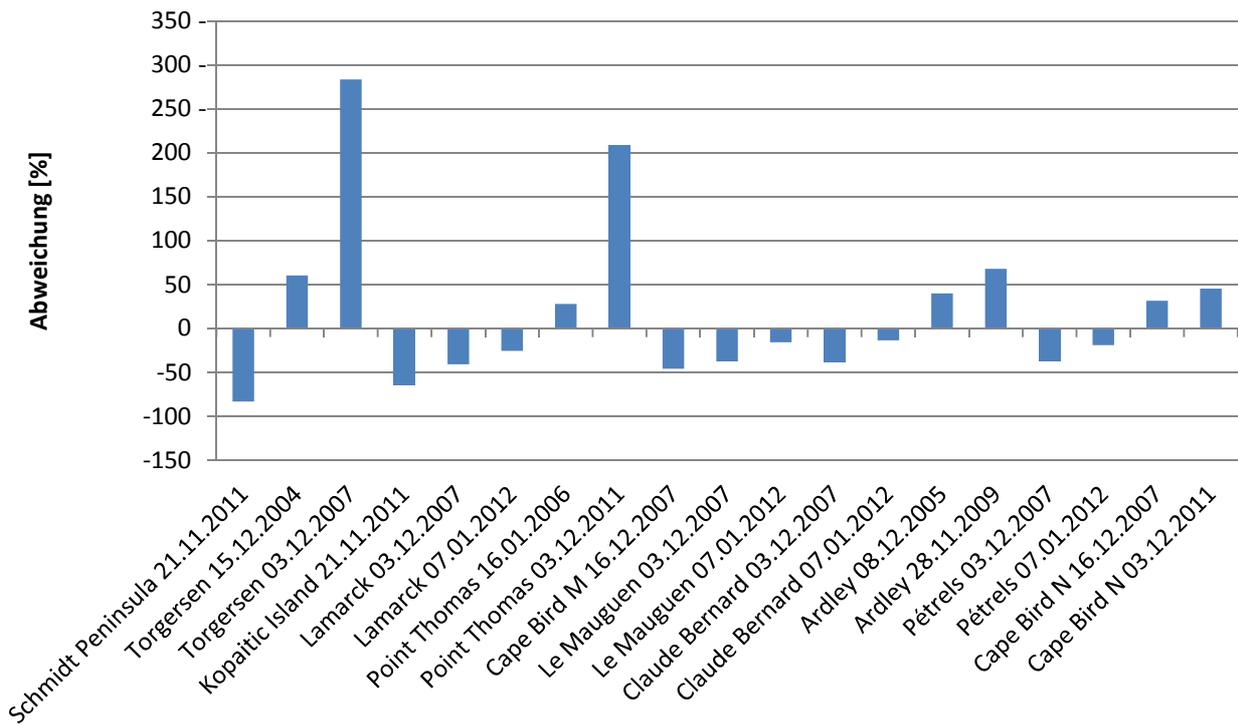


Abbildung 41: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

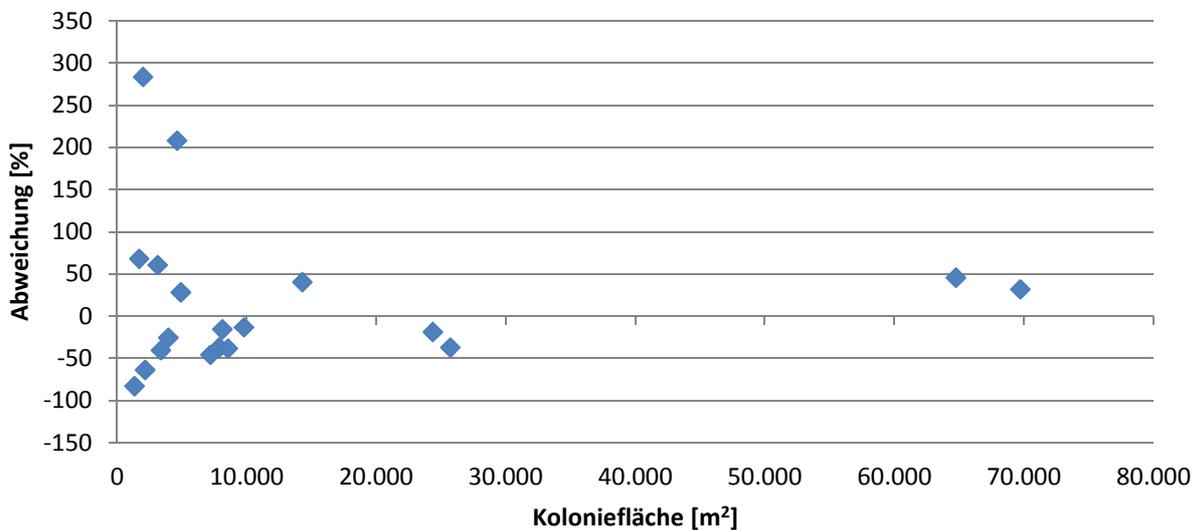


Abbildung 42: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für QuickBird2-Aufnahmen

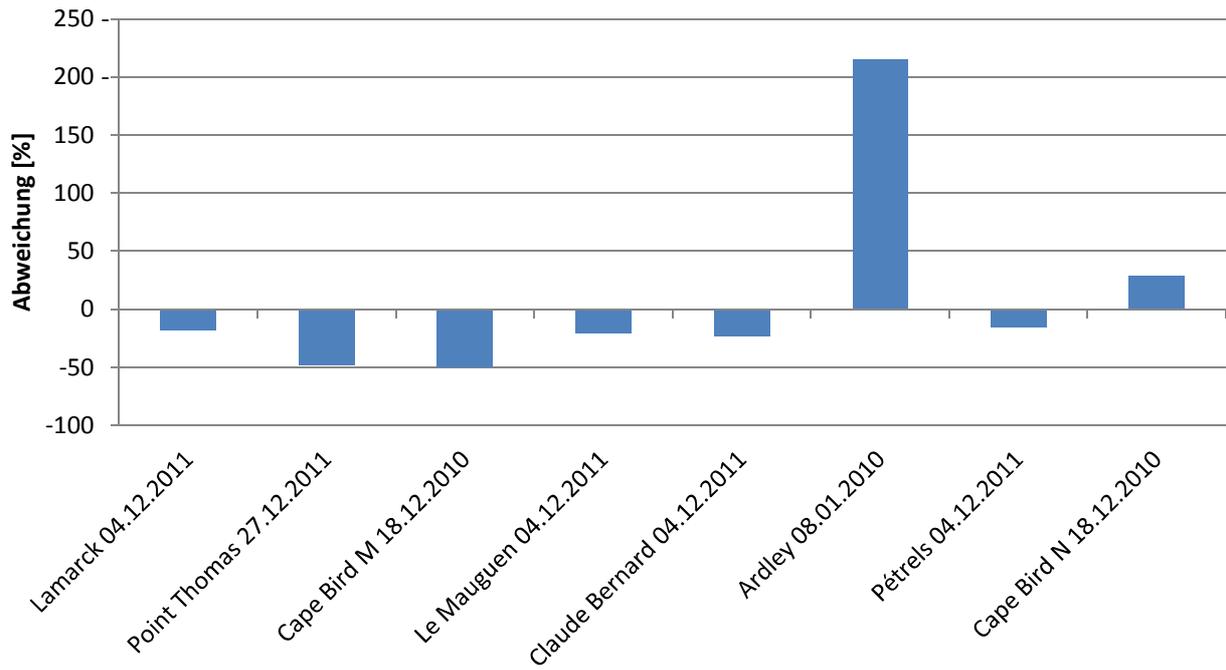


Abbildung 43: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten für einzelne WorldView2-Aufnahmen

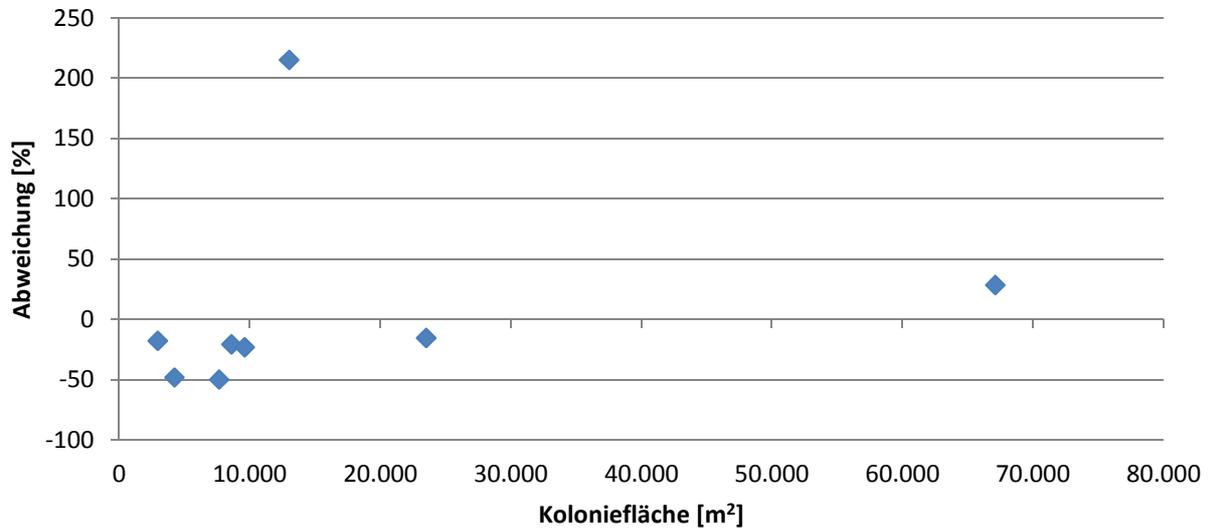


Abbildung 44: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für WorldView2-Aufnahmen

3.2.4 Subpixel-Analyse

Die Subpixel-Analyse wird angewandt, um in Pixeln, die aus mehr als einer Landbedeckungsklassen bestehen (sogenannten Mixed-Pixel) eine bekannte spektrale Signatur herauszufiltern (ERDAS Field Guide 2010). Enthält ein Pixel z.B. die spektrale Signatur von Guano und Fels, wird bei der Subpixel-Analyse bestimmt, wie groß der Anteil des Guanos an der Gesamtsignatur ist. Dazu wurde zuerst ein Trainingsgebiet festgelegt, in dem der Anteil von Guano sehr hoch ist. Anschließend wurde ein Trainingsgebiet bestimmt, das spektral dem Guano ähnelt und mit diesem vermischt ist. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um den Felsuntergrund, auf dem die Pinguine brüten. Im Ergebnis wurde ein Bild erstellt, das für jedes Pixel des Eingangsbildes angibt, wie hoch der prozentuale Anteil der Guanosignatur an der Gesamtsignatur ist. Einen Überblick über die Ergebnisse gibt Tabelle 11.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Subpixel-Analyse von Pinguinkolonien mit gut klassifizierbaren Kolonien (grün) und nicht bzw. schlecht klassifizierbaren Kolonien (rot)

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic	Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
Landsat7	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht verwertbar	Nicht möglich	gut	Nicht verwertbar
QuickBird2	Nicht verwertbar					
WorldView2	Nicht verwertbar	Nicht verwertbar	-	-	Nicht verwertbar	Nicht verwertbar

Landsat7

Aufgrund mangelnder Trainingsgebiete für Guano, konnten wiederum keine Analyse die Kolonien Ardley, Point Thomas, Torgersen und Schmidt Peninsula vorgenommen werden. Die Analyse bei Cape Bird lieferte gute Ergebnisse, beide Pinguinkolonien, die nördliche und die mittlere, konnten klassifiziert werden. Bei Adélie-Land und Kopaitic waren die Ergebnisse hingegen nicht verwertbar, da es nicht gelang, eine Signatur zu finden, die eine Klassifizierung der Pinguinkolonien in vollem Umfang erlaubt.

WorldView1

Die Subpixel-Analyse setzt multispektrale Daten voraus, weshalb sie nicht auf panchromatische WorldView1-Aufnahmen angewandt werden kann.

QuickBird2 & WorldView2

Die Ergebnisse für alle Kolonien zeigen, dass die Guanoflächen nur sehr lückenhaft erfasst werden und es zu häufigen Fehlklassifizierungen kommt. Die hoch aufgelösten Aufnahmen sind zu detailreich für diese Klassifizierungsmethode. Einen beispielhaften Ausschnitt der Subpixelanalyse zeigt Abbildung 45.

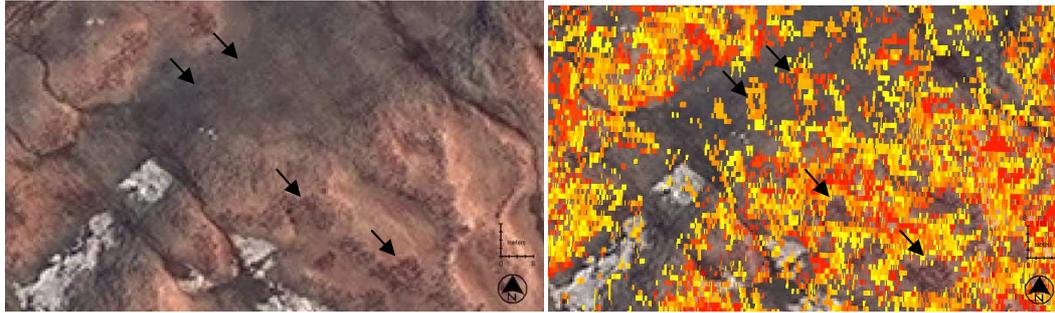


Abbildung 45: Cape Bird N: QuickBird2-Aufnahme vom 18.12.2010 (Kanäle 432): Originalbild (links) mit Guano in hellbraunen Farbtönen und Ergebnis der Subpixel-Analyse (rechts), gelb und rot = klassifizierte Guanoflächen - mit Pfeilen wurden beispielhaft große fehlklassifizierte Bereiche markiert (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012)

3.3 Detektierbarkeit der einzelnen Pinguinkolonien mit Radardaten

Während positive Erfahrungen hinsichtlich Detektierbarkeit von Kolonien der Art *A. forsteri* (Kaiserpinguin) mittels TerraSAR-X vorliegen, konnten keine Pinguinkolonien der Arten *P. papua*, *P. antarctica* und *P. adeliae* (Esels-, Zügel-, und Adéliepinguin) mittels TerraSAR-X SAR-Daten detektiert werden. Auch unter Einbeziehung der aus den optischen Satellitendaten abgeleiteten Shape-Files der Kolonien konnten keine Korrelationen hinsichtlich Radarrückstreuungseigenschaften identifiziert werden. Das trifft sowohl für Single-Pol- als auch für Dual-Pol-SAR-Aufnahmen zu. Sehr wahrscheinlich ist dies darauf zurückzuführen, dass bei 3,1 cm Wellenlänge für TerraSAR-X die Radarrückstreuungseigenschaften durch eine dünne Guanoschicht auf Geröll oder Felsuntergrund nicht oder nur unwesentlich verändert werden. Die Beschaffenheit des Untergrunds der Brutgebiete dieser Arten ist auch der wesentliche Unterschied zu den Kolonien der Kaiserpinguine. Diese brüten auf Meereis und Guanoablagerungen verändern die Radarreflektivität des Meereises deutlich.

Im Folgenden werden exemplarisch SAR-Aufnahmen für die verschiedenen Testgebiete mit Esels-, Zügel-, und Adéliepinguinen gezeigt (siehe Abbildung 46 bis Abbildung 52). Kolonien konnten in keinem der Fälle identifiziert werden. Die Abbildungen 47 und 48 veranschaulichen, dass keine signifikanten Unterschiede in der Radarreflektivität zwischen den Polarisationskombinationen HH und VV für das Testgebiet Point Thomas existieren.

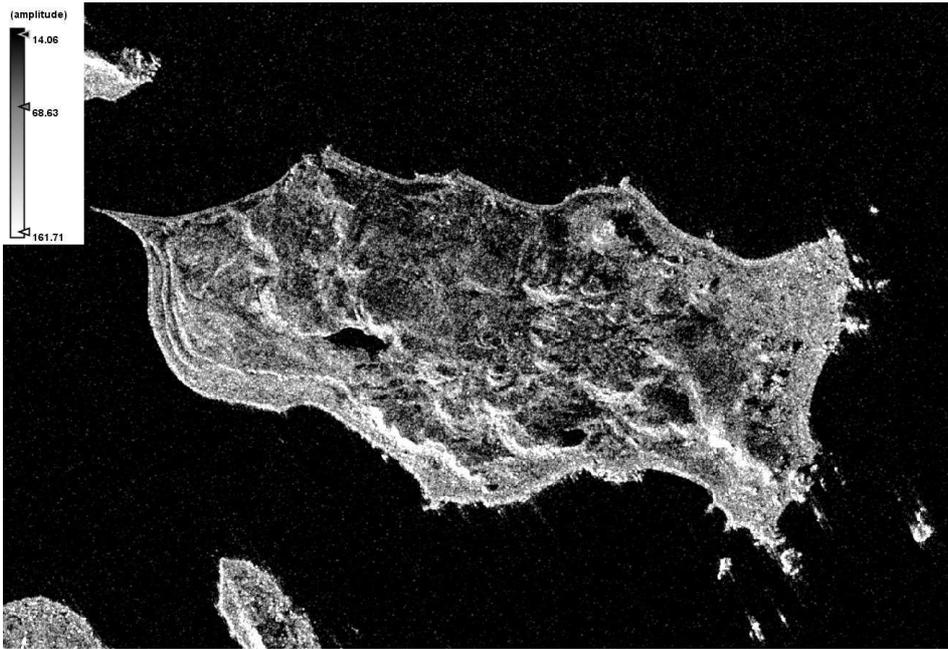


Abbildung 46: Ardley Island - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 19.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)

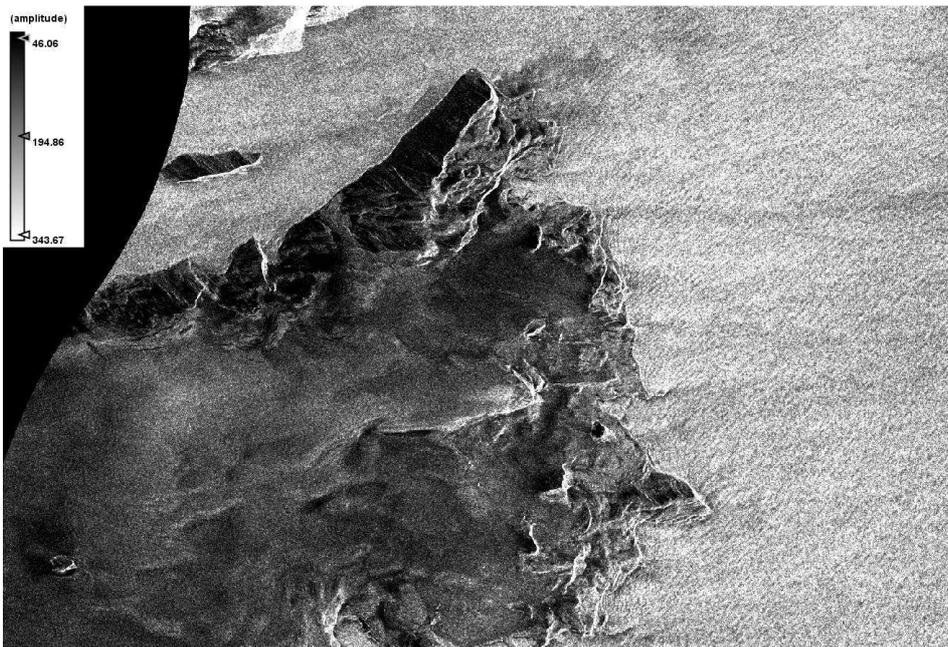


Abbildung 47: Point Thomas - TerraSAR-X StripMap (Dual), Polarisation HH, 27.11.2010 (Aufnahme © DLR 2012)

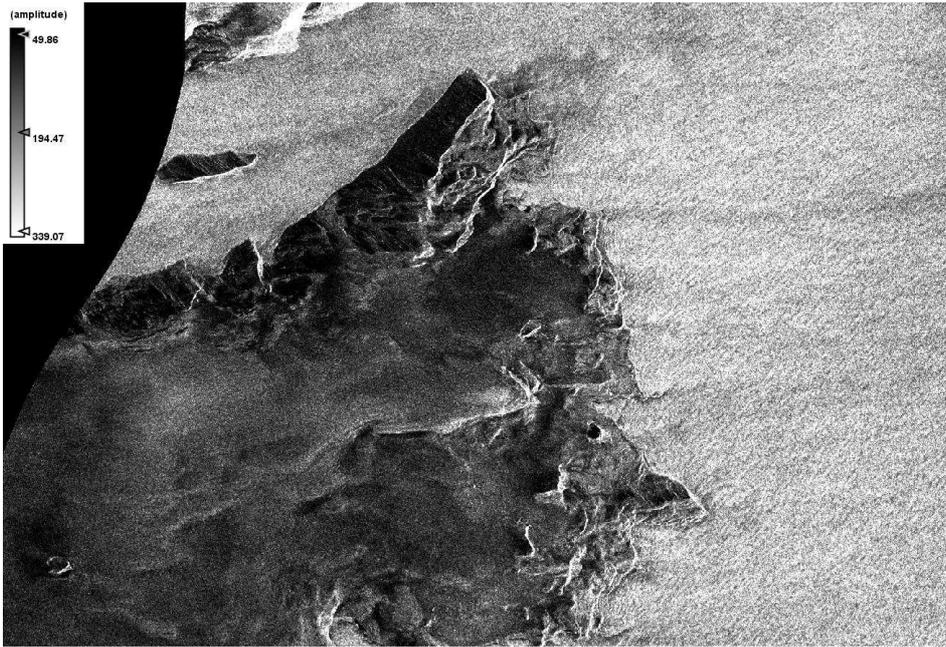


Abbildung 48: Point Thomas - TerraSAR-X StripMap (Dual), Polarisation VV, 27.11.2010 (Aufnahme © DLR 2012)

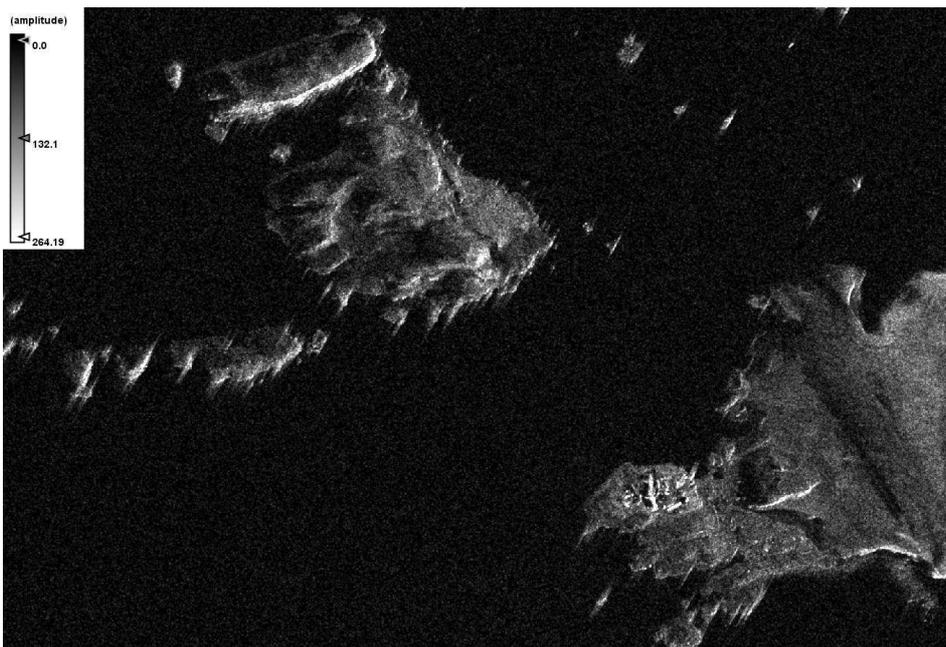


Abbildung 49: Kopaitic Island & Schmidt Peninsula - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 20.11.2007 (Aufnahme © DLR 2012)

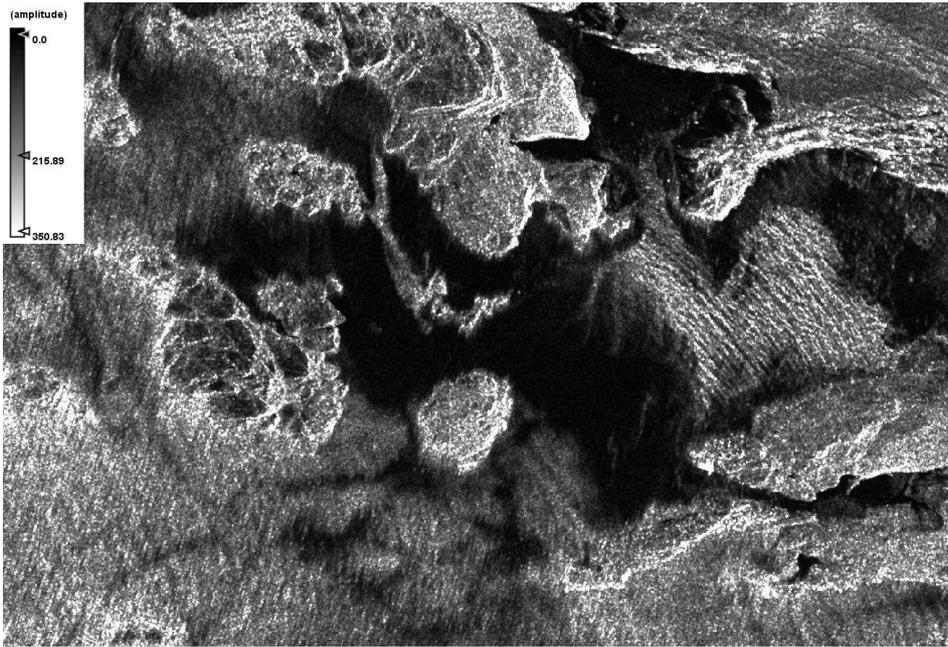


Abbildung 50: Torgersen Island - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 20.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)

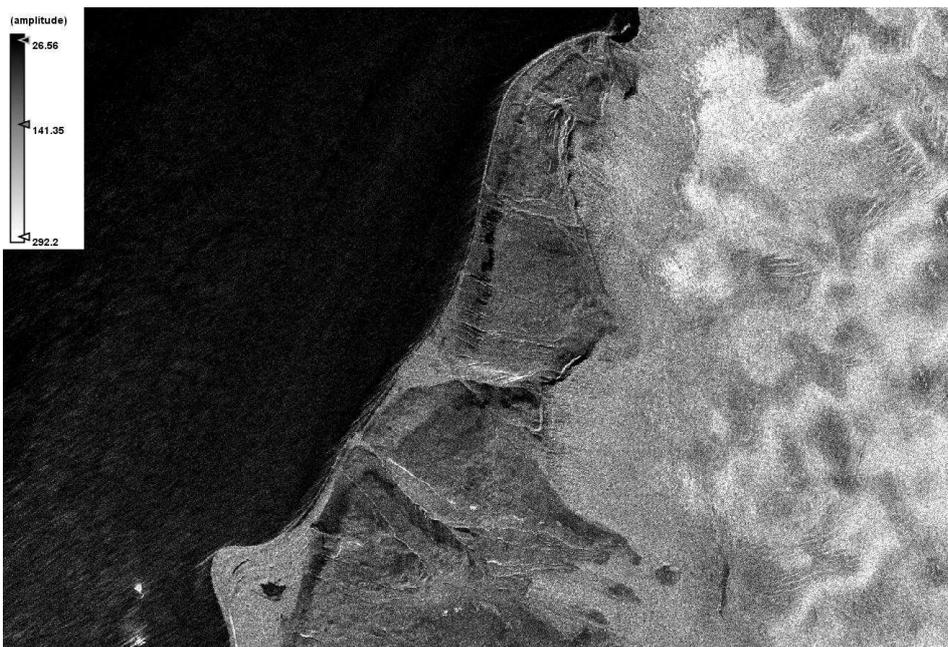


Abbildung 51: Cape Bird - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 20.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)

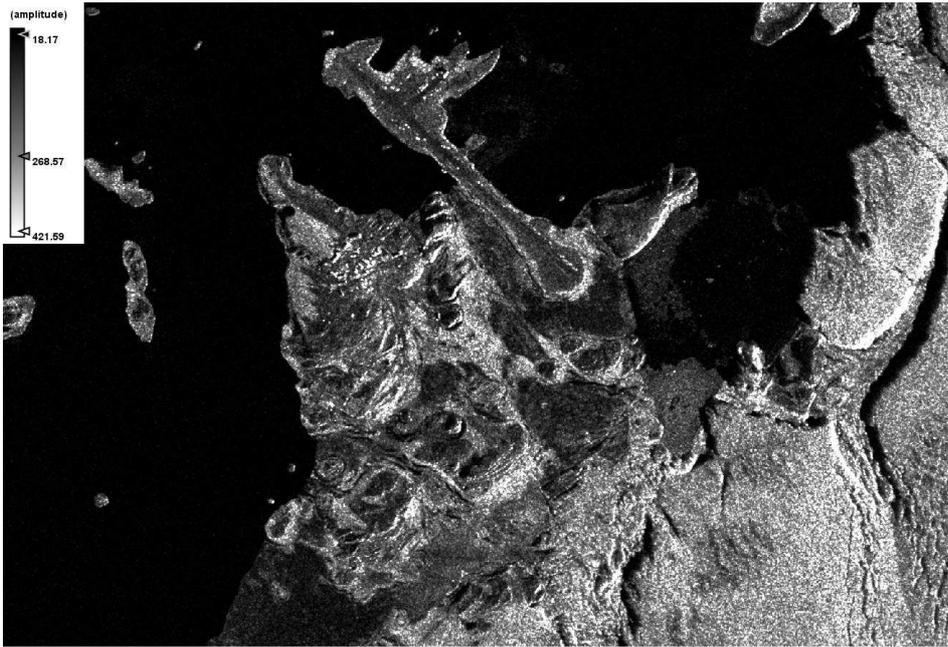


Abbildung 52: Adélie-Land - TerraSAR-X SpotLight, Polarisation HH, 19.02.2012 (Aufnahme © DLR 2012)

3.4 Multitemporale Analyse optischer Fernerkundungsdaten

Um zu überprüfen, ob mit den unter Kap. 3.2 getesteten Aufnahmesystemen und Methoden auch eine Detektierung der Veränderung der Anzahl der besetzten Nester möglich ist, fanden Analysen an multitemporalen Aufnahmen statt, für die Zählraten vorlagen. Grundvoraussetzung für eine Detektierung der Anzahl der besetzten Nester über die Flächengröße der Kolonie ist, dass diese beiden Werte korrelieren. In Tabelle 12 sind alle Aufnahmen aufgeführt, für die Zählraten zur Verfügung stehen und in denen detektierbare Pinguinkolonien (siehe Kap. 3.2) zu finden sind. Zudem wurde mit multitemporalen Aufnahmen analysiert, ob eine Veränderung in der Kolonie innerhalb einer Brutsaison messbar ist. Es sollte überprüft werden, ob sich der Guano im Laufe der Saison sichtbar verteilt und akkumuliert, so dass er am Brutsaisonende besser detektierbar ist.

Tabelle 12: Aufnahmedaten von auswertbaren Satellitenaufnahmen, für die Zählraten vorliegen: aus einer Saison (orange) oder mehreren Saisons (grün)

	Ardley	Point Thomas	Kopaitic	Torgersen	Cape Bird	Adélie-Land
Landsat7					08.12.2007	28.11.2011
					09.12.2001	04.02.2011
						15.12.2009
QuickBird2	28.11.2009	03.12.2011	21.11.2011	03.12.2007	16.12.2007	07.01.2012
	08.12.2005			15.12.2004		03.12.2007
WorldView2	08.01.2010	27.12.2011				04.12.2011

Um zu überprüfen, ob die Ergebnisse der multitemporalen Analyse, die mit der überwachten Klassifizierung und der Ratio-Analyse durchgeführt wurde, plausibel sind, wurden diese mit den Ergebnissen der manuellen Bildinterpretation verglichen. Aufgrund der Erfahrungen aus Kapitel 3.2 wird angenommen, dass die Ergebnisse der manuellen Bildinterpretation die bestmöglichen sind. Demzufolge sollten die Ergebnisse der anderen Methoden von diesen so wenig wie möglich abweichen, um plausibel zu bleiben.

Die Subpixel-Analyse wurde aufgrund der schlechten Ergebnisse aus Kapitel 0 nicht für die multitemporale Analyse herangezogen.

3.4.1 Manuelle Bildinterpretation

Landsat7

In Cape Bird und Adélie-Land waren die Wetterbedingungen so gut, dass in der Saison 2010/2011 für Cape Bird und in der Saison 2008/2009 für Adélie-Land monatliche Aufnahmen zur Verfügung standen. So bestand die Möglichkeit, Veränderungen in der Fläche über eine Saison hin überprüfen zu können. Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen die Ergebnisse der Auswertung der drei Aufnahmen von Adélie-Land und Cape Bird M sowie der vier verfügbaren Aufnahmen von Cape Bird N. Die Kolonie Cape Bird M konnte nur in drei Aufnahmen ausgewertet werden, da diese in der Aufnahme vom 01.01.2011 leicht von Wolken verdeckt war. Bei den Kolonien von Adélie-Land wird deutlich, dass die sichtbare Koloniefäche in einer Saison stark schwankt, tendenziell zum Ende der Saison aber leicht zunimmt. Bei Cape Bird hingegen nimmt die Sichtbarkeit tendenziell nach einer Zunahme im Dezember wieder nach der Brutsaison ab. Die Zunahme in Dezember lässt sich dadurch erklären, dass die Septembereaufnahmen verschneit und so die Kolonien nicht so deutlich sichtbar waren.

Aus den Abbildungen 53 und 54 wird deutlich, dass die großen Kolonien tendenziell den geringsten relativen Schwankungen unterliegen und die kleinsten Kolonien den Größten (Le Mauguen und Cape Bird M). Die Ursache dafür liegt vermutlich darin, dass die kleinen Kolonien sich an der Grenze der Auflösung von Landsat7 bewegen und so schon kleine Abweichungen von wenigen Pixeln zu großen prozentualen Schwankungen führen.

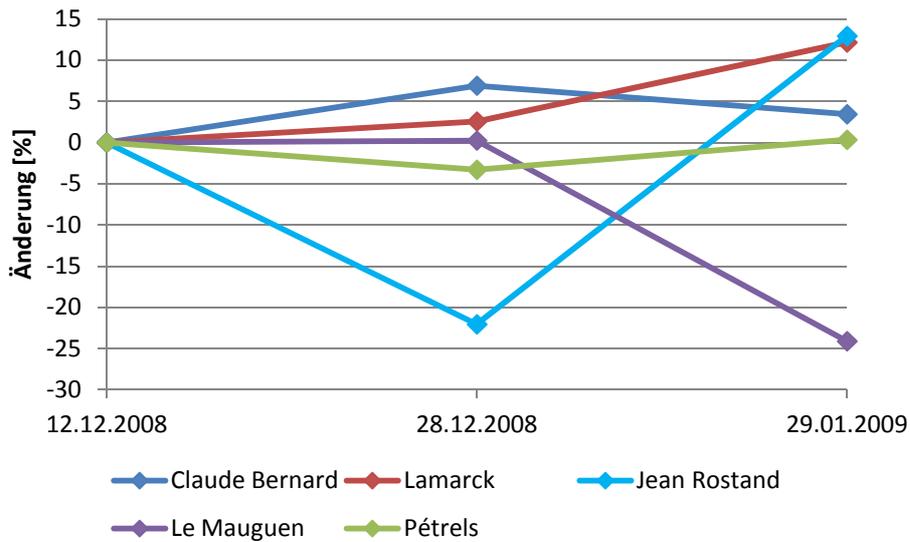


Abbildung 53: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Adélie-Land für Landsat7-Aufnahmen, durch manuelle Bildinterpretation bestimmt

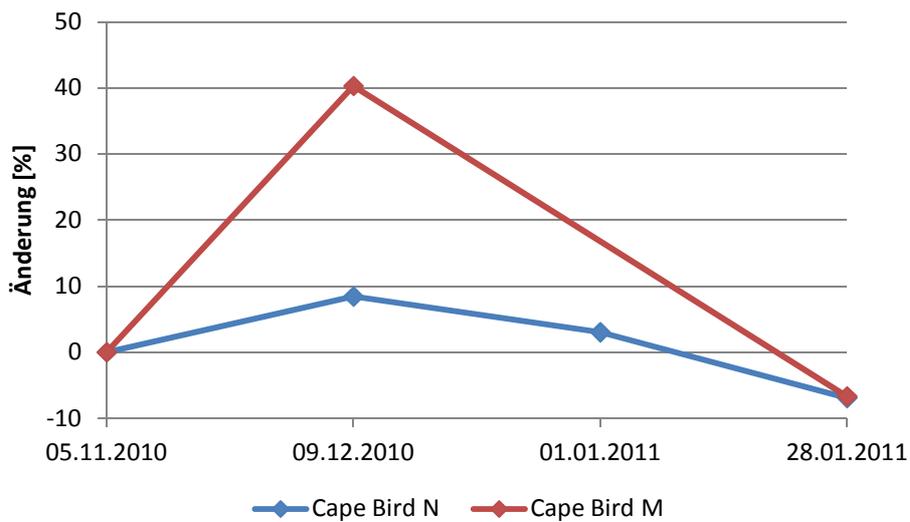


Abbildung 54: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Cape Bird für Landsat7-Aufnahmen, durch manuelle Bildinterpretation bestimmt

Mit Hilfe von Abbildung 55 wird untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen der Veränderung der Anzahl besetzter Nester und der Flächenänderung für einzelne Kolonien besteht. Die Ergebnisse sind insgesamt sehr diffus, was vermutlich wiederum an der groben räumlichen Auflösung von Landsat7 liegt, so dass mit diesen Daten keine definitive Aussage über einen Zusammenhang gemacht werden kann. Bei Cape Bird N hingegen, das aufgrund seiner Größe sehr gut abgegrenzt werden kann, wird deutlich, dass kein Zusammenhang besteht: Obwohl die Anzahl der besetzten Nester um 85 % im Vergleich zum Ausgangsjahr zugenommen hat, ist die Koloniefäche gleich groß geblieben.

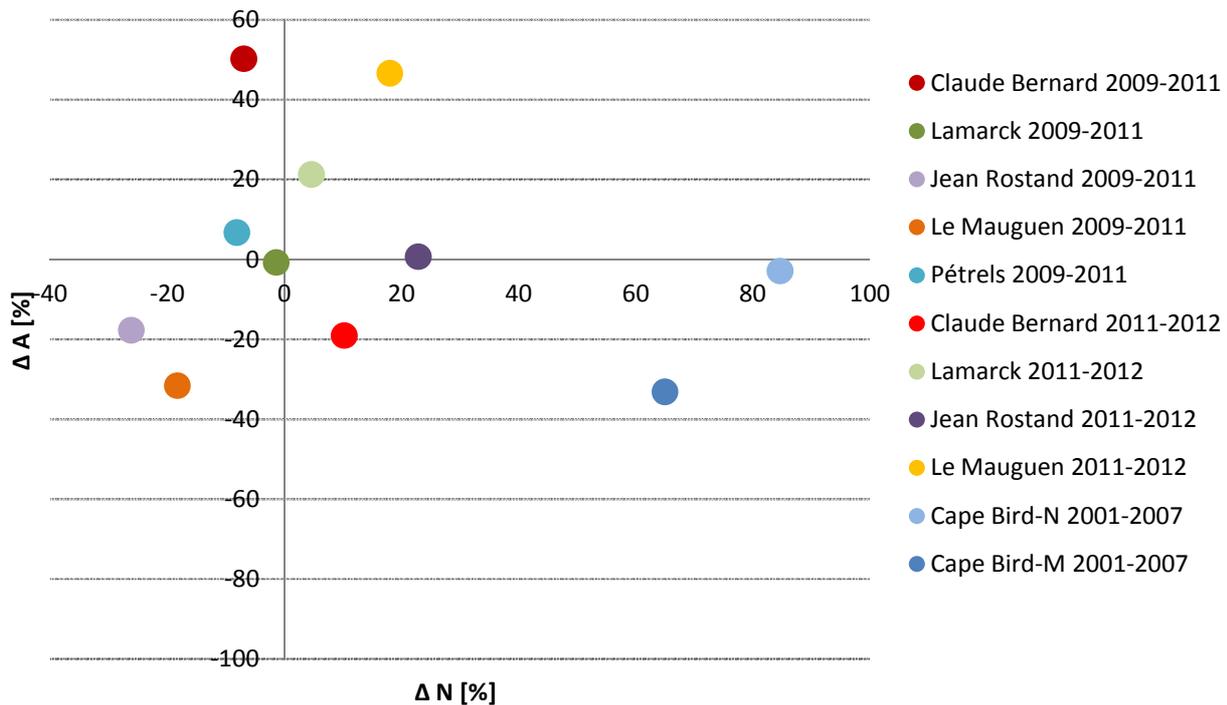


Abbildung 55: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - manuelle Bildinterpretation, Landsat7

QuickBird2 & WorldView2

Für QuickBird2 und WorldView2 konnten mangels unterschiedlicher Aufnahmen aus einer Saison keine Veränderungsanalysen der Fläche gemacht werden. Allerdings wurde bei der Auswertung in Kap. 3.2 trotzdem deutlich, dass sehr früh in der Saison gemachte Aufnahmen von Kolonien entlang der Antarktischen Halbinsel tendenziell schlechter auszuwerten sind als spätere.

Bei Adélie-Land besteht nur bei großen Änderungen in der Anzahl der besetzten Nester ein Zusammenhang mit der Größe der Änderung der Koloniefäche. Bei kleinen Änderungen hingegen nicht, wie aus Abbildung 56 ersichtlich wird. Für Ardley Island wird hingegen deutlich, dass ein Vergleich von verschneiten (d.h. es lag zum Aufnahmezeitpunkt deutlich sichtbar Schnee; siehe QuickBird2-28.11.2009) und unverschneiten (QuickBird2-08.12.2005) Aufnahmen problematisch sein kann, da so Flächenänderungen detektiert werden, die auf den Schnee, nicht aber auf die tatsächliche Fläche der besetzten Nester, zurückgeht. Dies wird vor allem dadurch deutlich, dass mit der unverschneiten WorldView2-Aufnahme in derselben Saison 2009/2010 kaum eine Flächenänderung detektiert wurde. Aber auch beim Vergleich mit der unverschneiten WorldView2-Aufnahme ist kein Zusammenhang für Ardley erkennbar. Für Torgersen hingegen wurde bei Abnahme der besetzten Nester um 35 % auch eine Abnahme in der Fläche von 45 % ermittelt. Da hier aber wiederum eine verschneite (QuickBird2 03.12.2007) mit einer unverschneiten Aufnahme (QuickBird2-15.12.2004) verglichen wird, ist unklar, ob die gemessene Flächenänderung tatsächlich existiert oder der Schneebedeckung geschuldet ist.

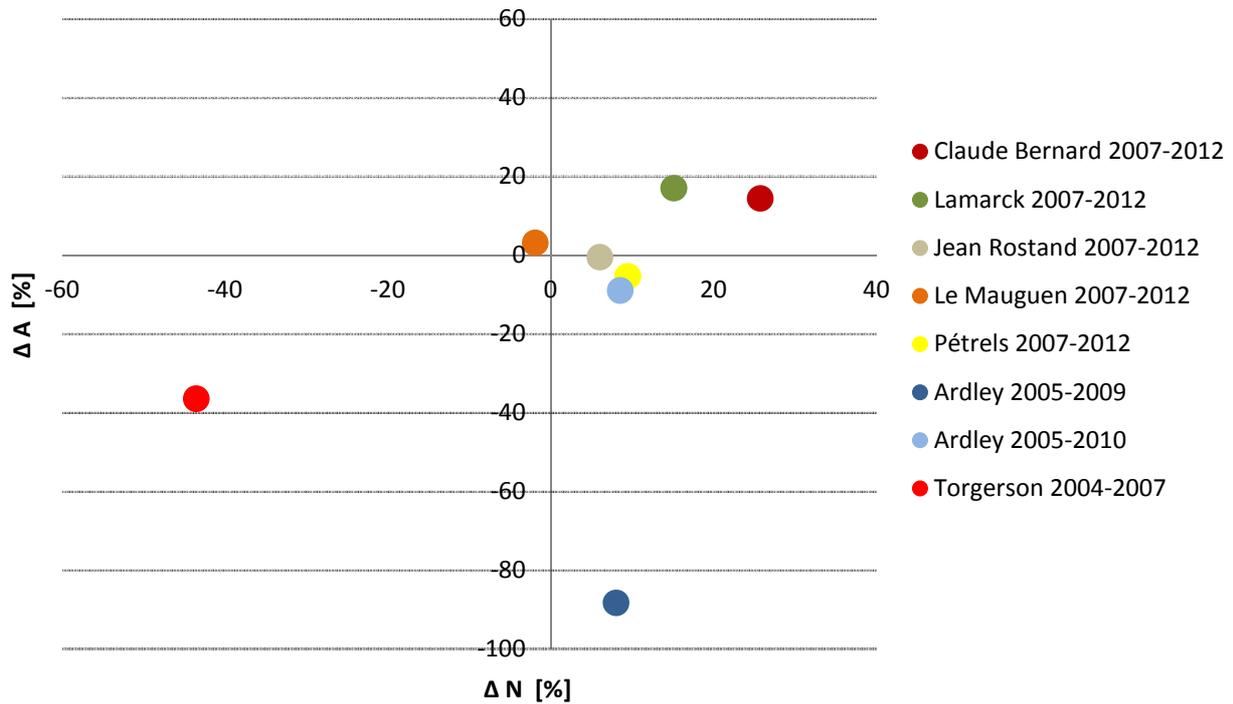


Abbildung 56: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - manuelle Bildinterpretation, QuickBird2



Abbildung 57: QuickBird2-Aufnahme 16.01.2006 (Kanäle 312; links) und WorldView2-Aufnahme 27.12.2011 (Kanäle 532; rechts) - deutlich sichtbare Abnahme der Koloniegroßen bei den Pfeilen (Aufnahme © EUSI/DigitalGlobe 2012)

Für Point Thomas wurden deutlich sichtbare Flächenabnahmen festgestellt (siehe Abbildung 57). Da aber für die Aufnahme vom 16.01.2006 keine Zählzeiten zur Verfügung stehen, war es nicht möglich zu überprüfen, ob die detektierte Abnahme auch mit einer Abnahme in der Anzahl der besetzten Nester einher geht. Dies scheint aber plausibel, da sich die Anzahl der besetzten Nester in den letzten 20 Jahren mehr als halbiert hat. Um dies zu verifizieren werden aber genaue Zählzeiten benötigt. Die dunkle Färbung des Guanos in der WorldView2-Aufnahme vom 27.12.2011 (siehe Abbildung 57) ist vermutlich auf ein kurz vor dem Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes eingetretenes Niederschlagsereignis zurückzuführen.

Auch für die Kolonie bei der Pieter-J. Lenie-Field Station wurde eine deutliche Flächenänderung zwischen den Jahren 2006 und 2012 detektiert. Vor allem war es gut möglich, große Nestgruppen zu identifizieren, die 2006 nicht erkennbar waren (vgl. Abbildung 24). So kam es in diesem Zeitraum zu einer Zunahme der Koloniefäche um 15 %. Ein Zusammenhang mit einer Populationsänderung konnte aufgrund fehlender Zählzeiten nicht überprüft werden.

In Cape Bird zeigen die Messungen, dass keine signifikanten Änderungen in der Fläche zwischen den Aufnahmen von 2007 und 2010 für Cape Bird N stattfanden, während für Cape Bird M eine Steigerung um 10 % festgestellt wurde. Da aber keine Zählzeiten für 2010 zu Verfügung stehen, ist es wiederum nicht möglich zu überprüfen, ob ein Zusammenhang mit der Änderung der Anzahl der besetzten Nester besteht. Aus den vorhandenen Zählzeiten geht aber hervor, dass sich die Anzahl der besetzten Nester in Cape Bird N in den letzten zehn Jahren etwa verdoppelt hat. Angenommen, es fand auch eine Zunahme für den Zeitraum zwischen den beiden Aufnahmen statt, würde das zeigen, dass kein Zusammenhang zwischen Änderung in der Koloniefäche und der Änderung der Anzahl besetzter Nester für Cape Bird N besteht.

3.4.2 Überwachte Klassifizierung

Landsat7

Da angenommen wird, dass die manuelle Bildinterpretation die besten Ergebnisse liefert, wurde in Abbildung 58 die Abweichung der Flächenänderung der überwachten Klassifizierung von der manuell gemessenen Flächenänderung abgebildet. Je geringer die Abweichungen der überwachten Klassifizierung von der manuellen Bildinterpretation ist, desto besser sind die Ergebnisse. Sichtbar wird vor allem, dass die Abweichungen teilweise sehr groß sind (im Durchschnitt 27 %) und auch von Kolonie zu Kolonie stark schwanken. Die Ergebnisse der mit der überwachten Klassifizierung durchgeführten Veränderungsanalysen sind demnach mit großer Vorsicht zu betrachten. Auch besteht kein Zusammenhang zwischen der Größe der manuell bestimmten Flächenänderung und der Qualität der Ergebnisse der überwachten Klassifizierung (siehe Abbildung 59). Denn sonst würde ein Zusammenhang zwischen einer deutlichen Zu- oder Abnahme der Abweichungen und der Größe der manuell bestimmten Flächenänderung bestehen.

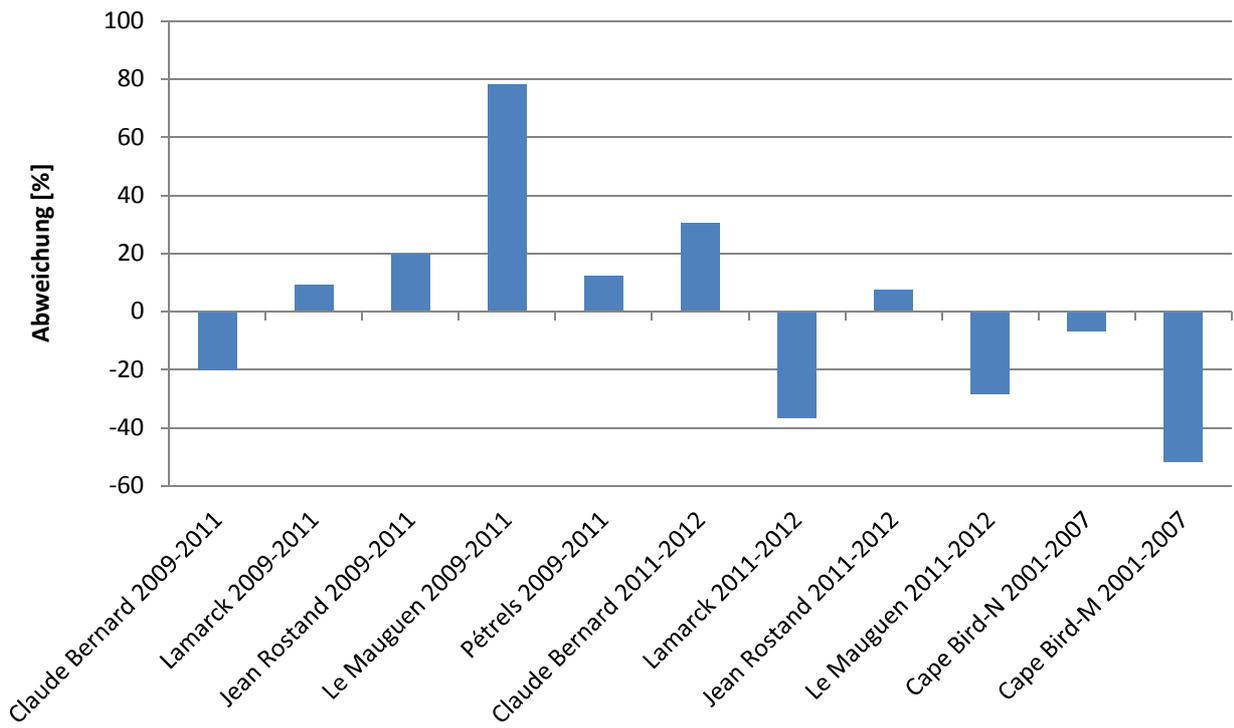


Abbildung 58: Abweichung der überwach klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen

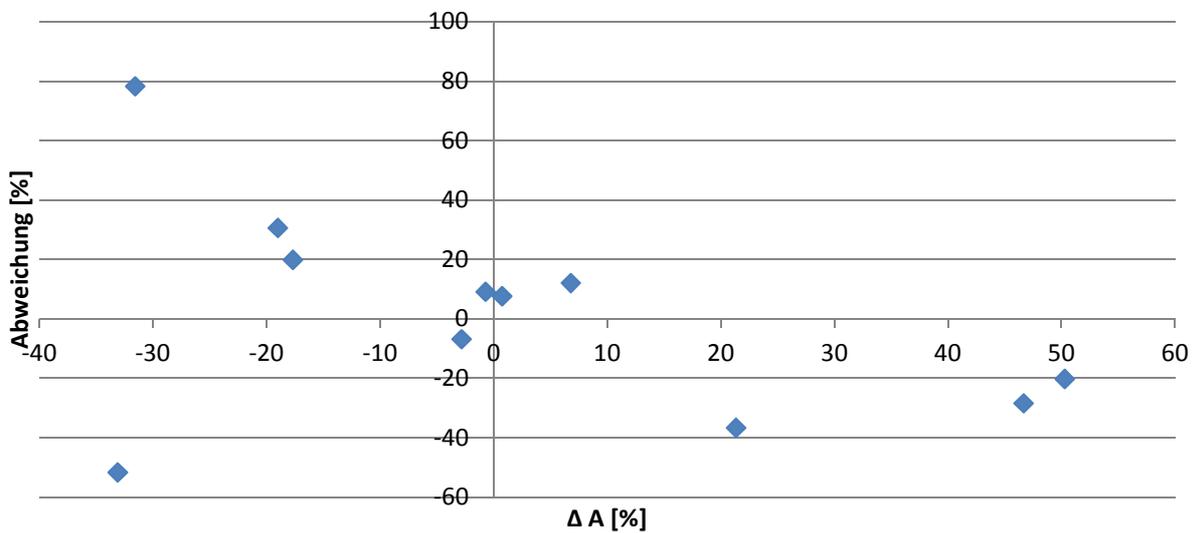


Abbildung 59: Abweichung der überwach klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für Landsat7-Aufnahmen

Mit der überwachten Klassifizierung konnte kein eindeutiger Trend bei der Veränderung der Koloniefäche über eine Saison hinweg festgestellt werden (siehe Abbildung 60). Bei Cape Bird N hingegen zeigt sich wiederum eine Zunahme der Koloniefäche im Dezember mit anschließender Abnahme im Januar (siehe Abbildung 61). Auffällig ist auch hier wieder, dass die Fläche der kleinen Kolonie Cape Bird M stark schwankt.

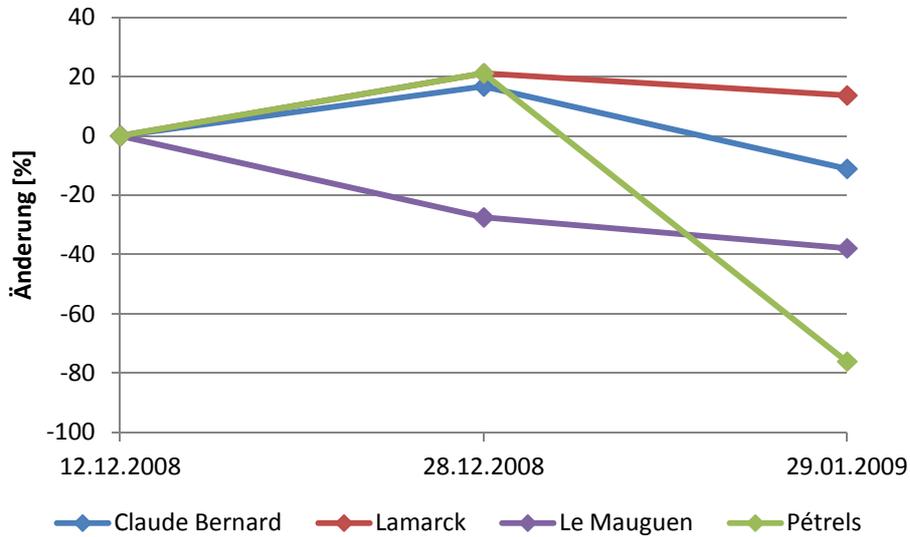


Abbildung 60: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Adélie-Land - überwachte Klassifizierung, Landsat7

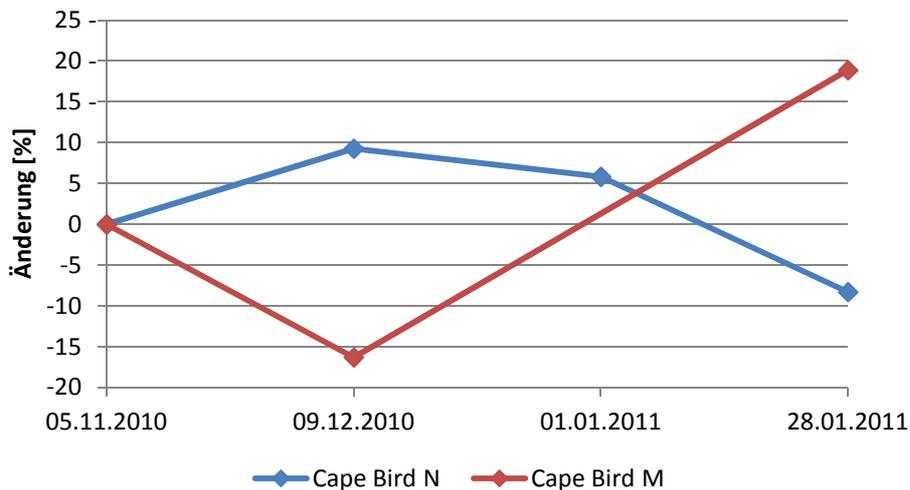


Abbildung 61: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Cape Bird - überwachte Klassifizierung, Landsat7

Wie aus Abbildung 62 ersichtlich wird, besteht weder bei Adélie-Land noch bei Cape Bird ein Zusammenhang zwischen der Veränderung der Anzahl besetzter Nester und der Flächenänderung für einzelne Kolonien.

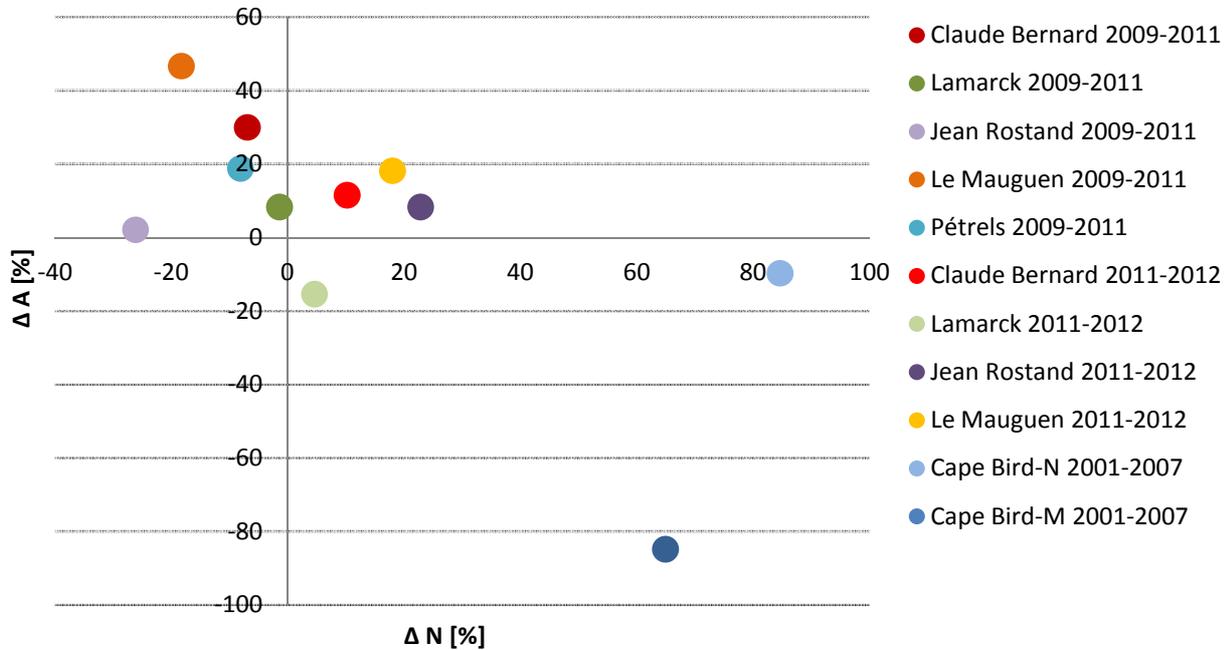


Abbildung 62: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - überwachte Klassifizierung, Landsat7

QuickBird2

Die Ergebnisse der Flächenänderungen weichen mit durchschnittlich 12 % nur relativ gering von denen der manuellen Bildinterpretation ab (siehe Abbildung 63). Die Ergebnisse der überwachten Klassifizierung sind demnach plausibel. Auch besteht kein Zusammenhang zwischen der Größe der manuell bestimmten Flächenänderung und der Abweichung der Ergebnisse der überwachten Klassifizierung (siehe Abbildung 64).

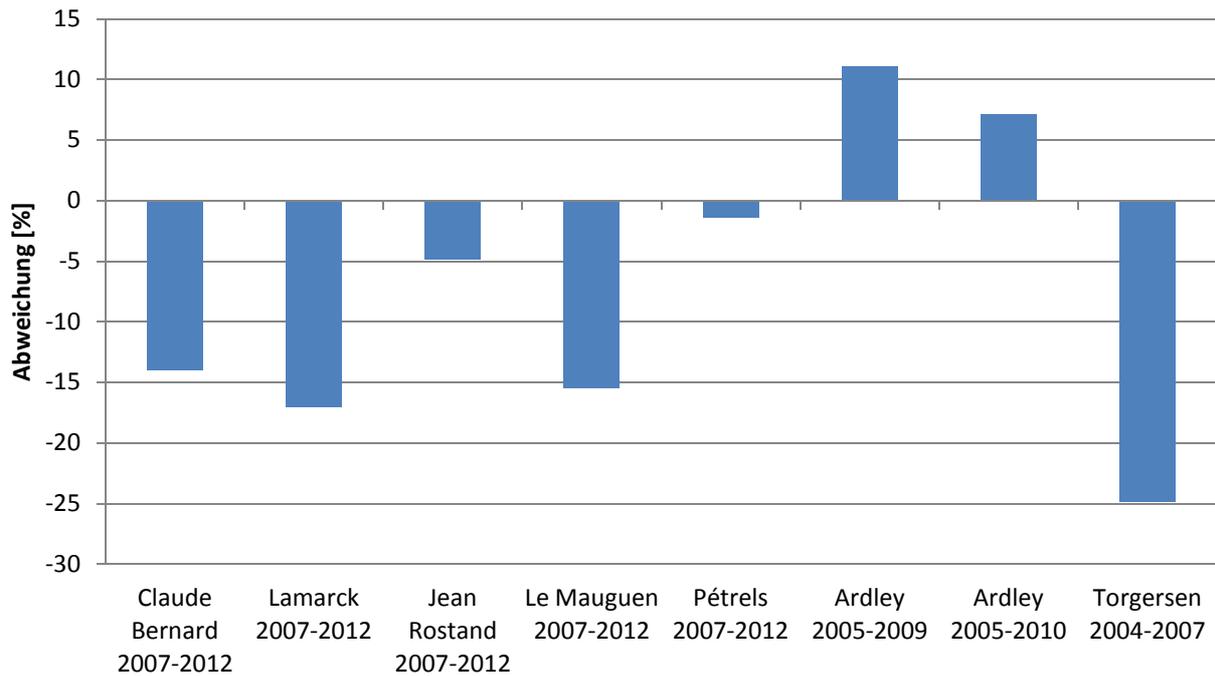


Abbildung 63: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

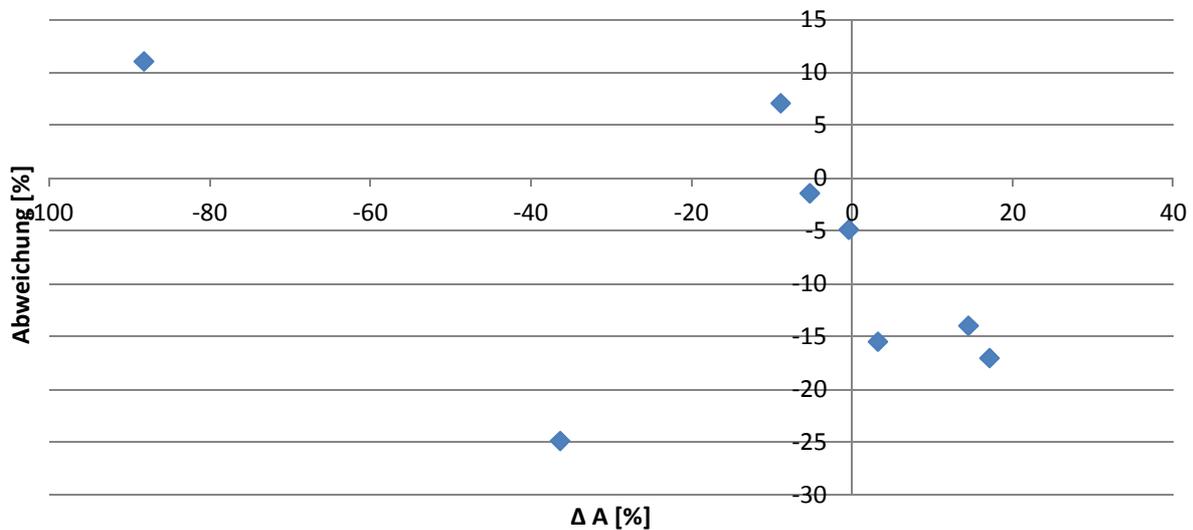


Abbildung 64: Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für QuickBird2-Aufnahmen

Für Adélie-Land und Ardley Island wird aus Abbildung 65 deutlich, dass kein Zusammenhang zwischen Flächenänderung und der Änderung der Anzahl der besetzten Nester besteht. Bei Torgersen hingegen konnte auch mit der überwachten Klassifizierung eine Verkleinerung der Koloniefäche bei gleichzeitiger Abnahme der Anzahl besetzter Nester detektiert werden.

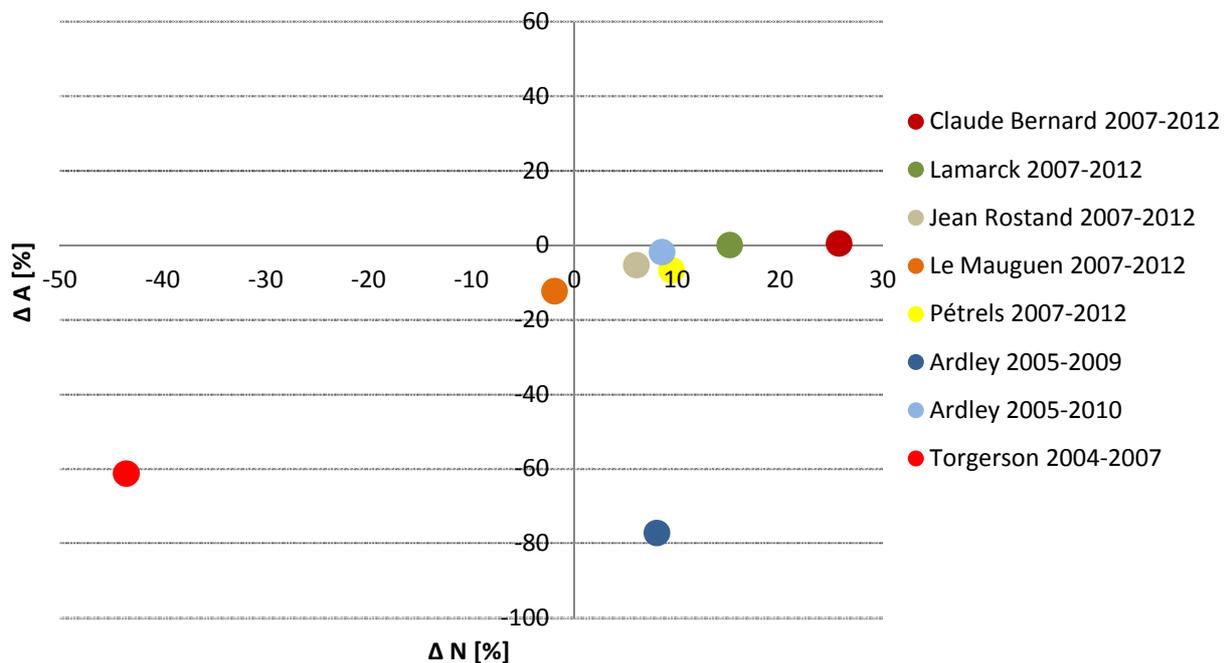


Abbildung 65: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - überwachte Klassifizierung, QuickBird2

Eine Flächenänderung für die Pieter J. Lenie-Field Station konnte nicht gemessen werden, da die QuickBird2 Aufnahme von 2006 an dieser Stelle leicht mit Wolken bedeckt ist, die zwar eine manuelle Auswertung, aber keine überwachte Klassifizierung erlauben.

Da die überwachte Klassifizierung bei der QuickBird2-Aufnahme von 2011 aufgrund des Nebels sehr schlechte Ergebnisse lieferte, musste die QuickBird2-Aufnahme von 2006 mit der WorldView2-Aufnahme von 2011 verglichen werden. Die Flächenabnahme ist mit detektierten 45 % aber unrealistisch groß.

Bei Cape Bird wurden bei beiden Kolonien (Cape Bird N: -3,88 % und Cape Bird M: +5,89 %) nur geringe Flächenänderungen festgestellt.

3.4.3 Ratio-Ansatz

Landsat7

Da auch bei dem Ratio-Ansatz angenommen wird, dass die manuelle Bildinterpretation genauere Ergebnisse liefert, ist in Abbildung 66 die Abweichung der Flächenänderung der überwachten Klassifizierung von der manuell gemessenen Flächenänderung abgebildet. Es ist erkennbar, dass die Abweichung bis auf Cape Bird N durchweg mit durchschnittlich 58 % sehr groß ist. Die Ergebnisse der Veränderungsanalysen, die mit dem Ratio-Ansatz an den Landsat7-Aufnahmen

durchgeführte wurden, sind deshalb bis auf Cape Bird N nicht plausibel. Aus Abbildung 67 wird ersichtlich, dass kein Zusammenhang zwischen der Größe der manuell bestimmten Flächenänderung und der Güte der mit dem Ratio-Ansatz gewonnenen Ergebnissen besteht. Denn die Abweichungen von der manuellen Flächenbestimmung schwanken sowohl bei großen als auch bei kleinen manuell bestimmten Flächenänderungen.

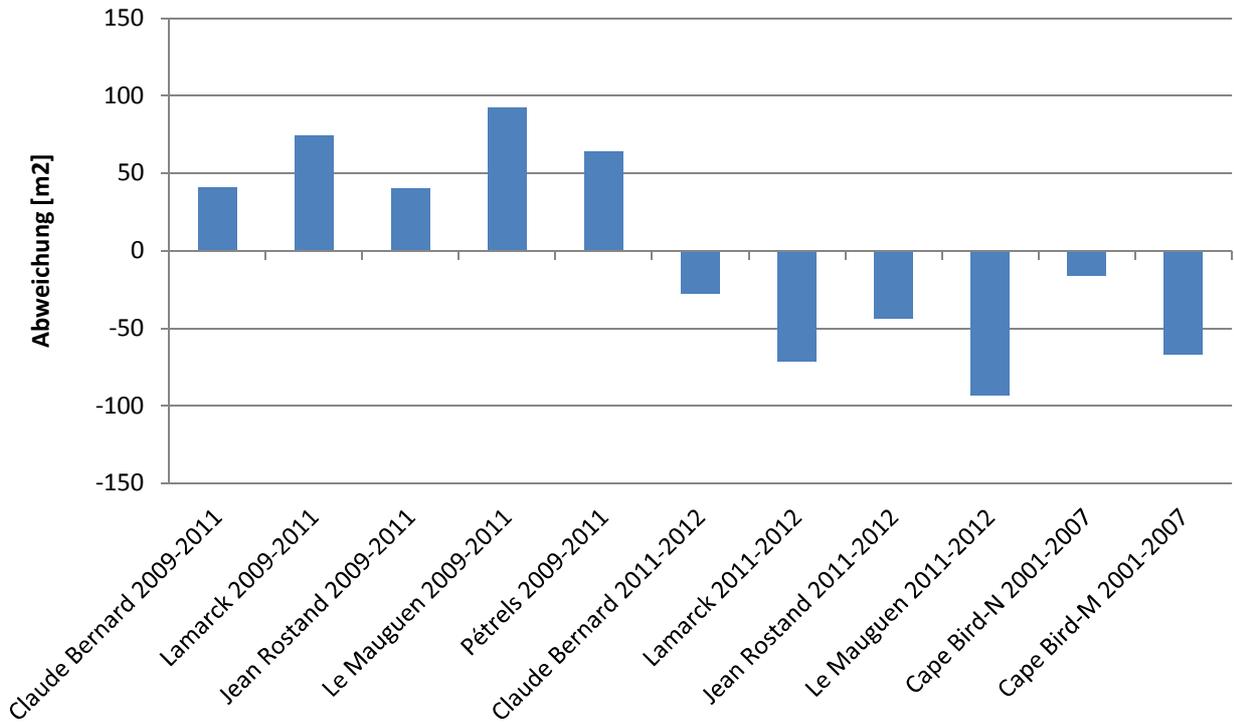


Abbildung 66: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne Landsat7-Aufnahmen

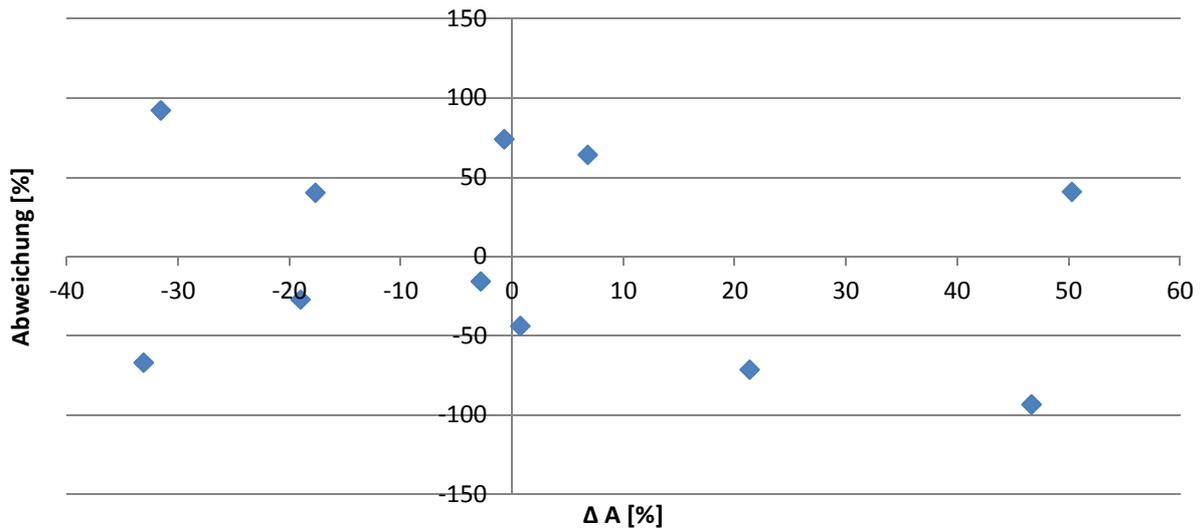


Abbildung 67: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für Landsat7-Aufnahmen

Mit der Ratio-Analyse wurde bei Adélie-Land tendenziell eine Zunahme der Koloniefäche zum Saisonende hin detektiert (siehe Abbildung 68). Im Gegensatz zu den vorherigen Methoden wird für Cape Bird N eine Abnahme der Koloniefäche im Dezember sichtbar (siehe Abbildung 69).

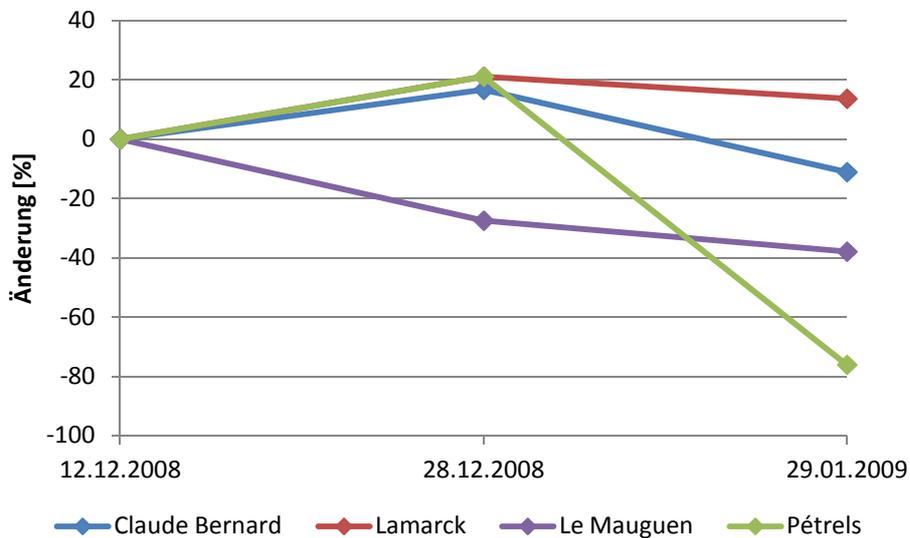


Abbildung 68: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Adélie-Land - Ratio-Analyse, Landsat7

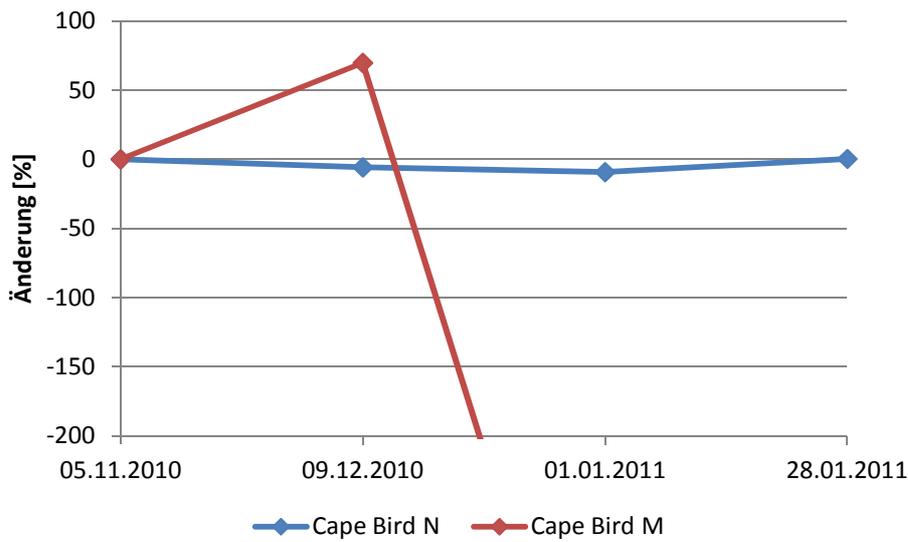


Abbildung 69: Prozentuale Änderung der Koloniefäche in einer Saison im Verhältnis zum Saisonanfang von Cape Bird - Ratio-Analyse, Landsat7

Abbildung 70 zeigt, dass weder bei Adélie-Land noch bei Cape Bird ein Zusammenhang zwischen der Veränderung der Anzahl besetzter Nester und der Flächenänderung für einzelne Kolonien besteht.

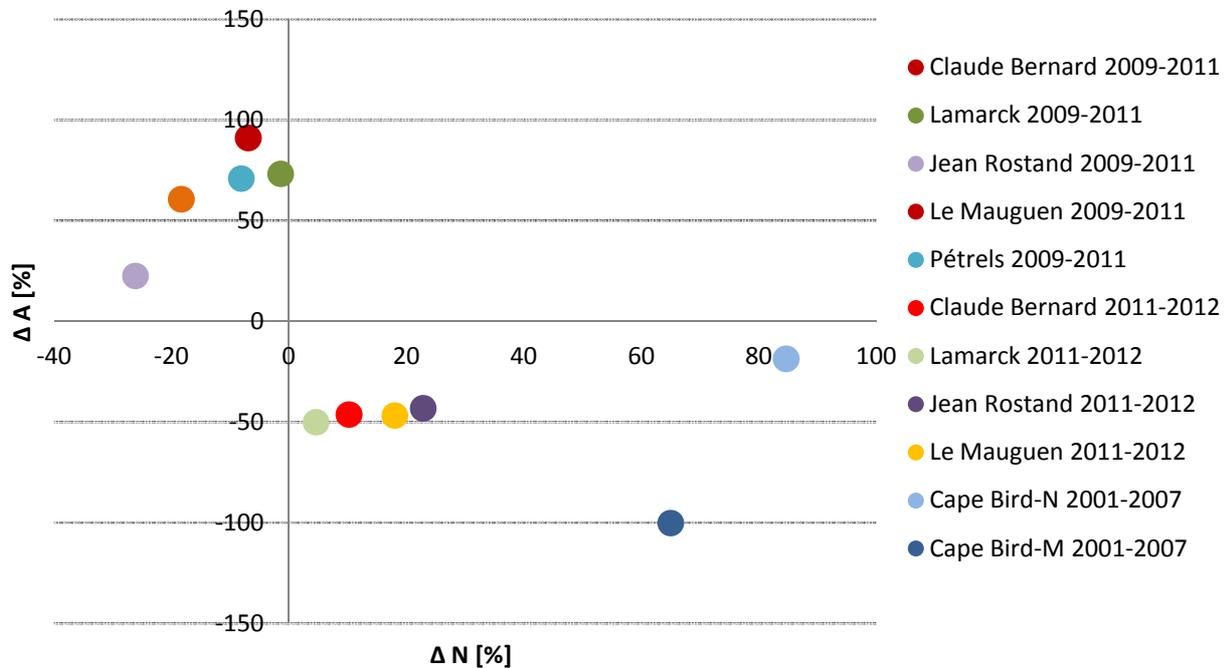


Abbildung 70: Verhältnis von Flächenänderung (Δ A) und Änderung der besetzten Nester (Δ N) für Adélie-Land und Cape Bird - Ratio-Analyse, Landsat7

QuickBird2

Die Ergebnisse der Ratio-Analyse für QuickBird2-Aufnahmen weichen stark von denen der manuellen Abgrenzung ab (im Durchschnitt 45 %, siehe Abbildung 71 und Abbildung 72). Die detektierten Flächen werden dabei immer deutlich überklassifiziert. Deshalb muss auch der in Abbildung 73 deutlich erkennbare Zusammenhang zwischen den tendenziell zunehmenden Brutpaaren bei Adélie-Land skeptisch betrachtet werden. Die ebenfalls für diese Kolonien festgestellte Zunahme der Koloniefäche lässt sich auf die Ungenauigkeit der Ratio-Analyse zurückführen und nicht unbedingt auf eine tatsächliche Zunahme in der Koloniefäche.

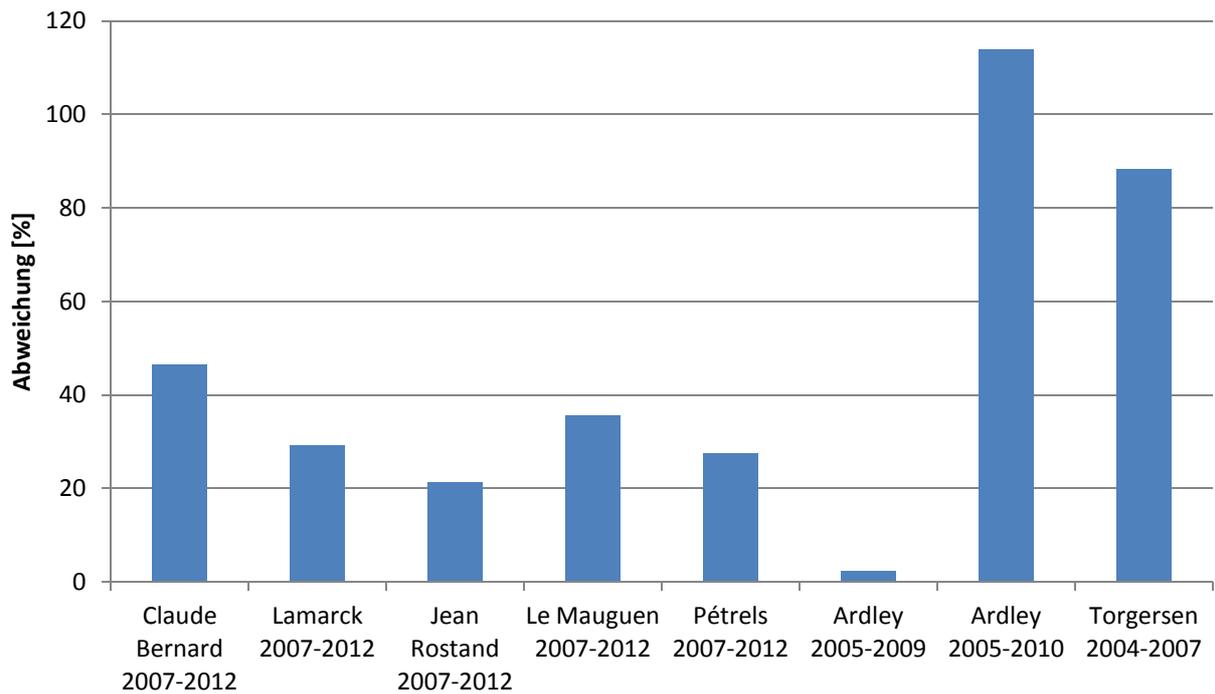


Abbildung 71: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderung von der manuell Bestimmten für einzelne Quick-Bird2-Aufnahmen

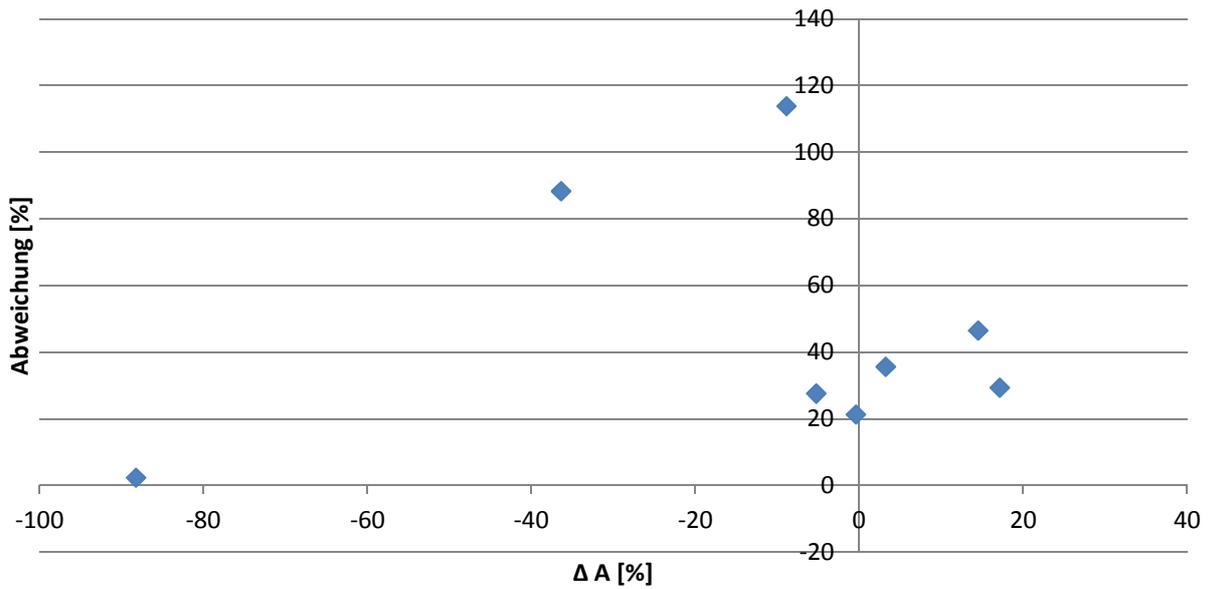


Abbildung 72: Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefächenänderungen von der manuell Bestimmten, sortiert nach manuell bestimmten Koloniefächenänderungen ΔA für QuickBird2-Aufnahmen

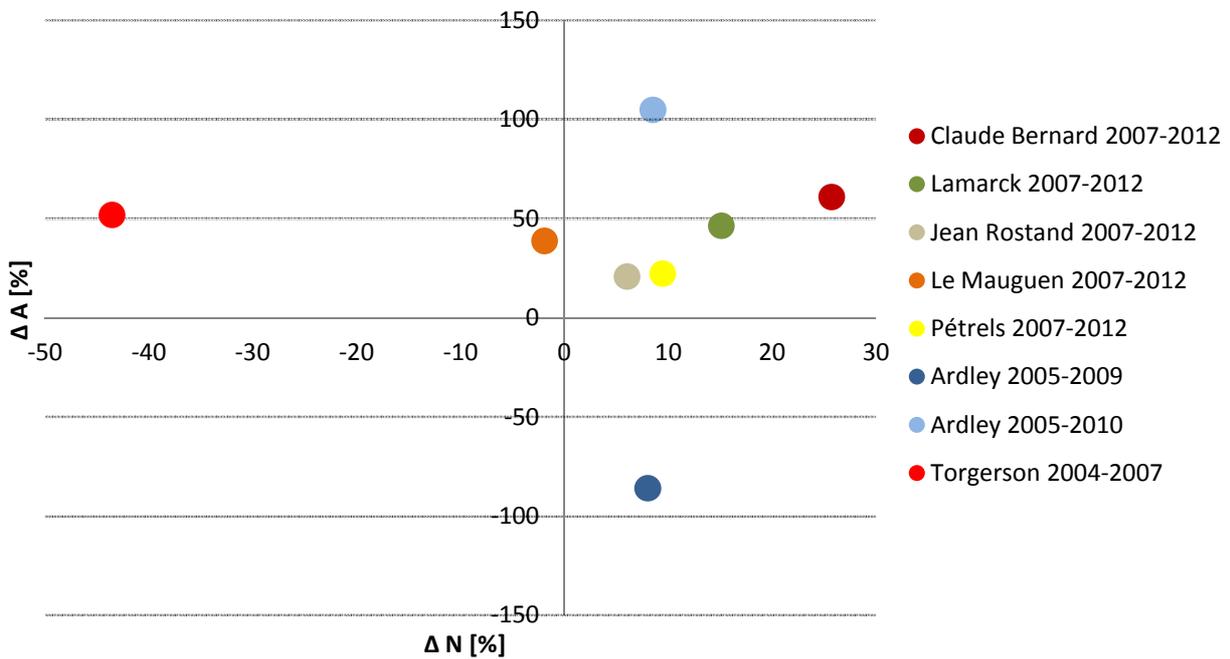


Abbildung 73: Verhältnis von Flächenänderung (ΔA) und Änderung der besetzten Nester (ΔN) für Adélie-Land und Cape Bird - Ratio-Analyse, QuickBird2

Die Ergebnisse aus dem Vergleich der Aufnahmen von Point Thomas aus den Jahren 2006 und 2011 ergeben eine unrealistisch große Abnahme der Koloniefläche von 186 %. Die Kolonien bei der Pieter-J. Lenie-Field Station konnten aufgrund von Wolkenbedeckung in der QuickBird2-Aufnahme von 2006 nicht mit der Ratio Analyse ausgewertet werden.

Für Cape Bird wurden zwischen den Jahren 2006 und 2010 leichte Abnahmen der Fläche beider Kolonien detektiert, obwohl anzunehmen ist, dass in diesen Zeitraum die Anzahl besetzter Nester gestiegen ist (siehe Kap. 3.4.1).

3.5 Multitemporale Analyse von Radardaten

Die multitemporale Analyse von mehreren aufeinanderfolgenden SAR-Aufnahmen mit gleicher Aufnahmegeometrie für Ardley Island, Point Thomas sowie Kopaitic Island/Schmidt Peninsula (Kolonien der Arten *P. papua*, *P. antarctica* und *P. adeliae*) – hier gab es jeweils vier bzw. sechs entsprechende aufeinanderfolgende Aufnahmen – ergab keine verwertbaren Ergebnisse hinsichtlich Veränderungen von Pinguinkolonien. Für die Art *A. forsteri* muss die Datenbasis im nächsten Südwinter erst erstellt werden, um eine multitemporale Analyse durchführen zu können.

3.6 Automatisierbarkeit der Analyseverfahren von optischen Fernerkundungsdaten

Die Methode der manuellen Digitalisierung der Pinguinkolonien durch visuelle Interpretation ist per Definition nicht automatisierbar. Die Subpixel-Analyse konnte nicht automatisiert werden. So ist zwar vom Prinzip her eine Automatisierung der Subpixel-Analyse möglich, aber die Ergebnisse waren durchweg für alle Sensoren und Kolonien unbrauchbar. Dies war auch für Cape Bird der Fall, bei der diese Methode gute Ergebnisse bei der Detektierbarkeit lieferte (siehe Kap. 0). Ob und inwieweit sich die überwachte Klassifizierung und die Ratio-Analyse automatisieren lassen, wird im Folgenden untersucht.

3.6.1 Überwachte Klassifizierung

Die Schwierigkeit bei der Automatisierung der überwachten Klassifizierung liegt darin, dass in jeder Aufnahme eigene Trainingsgebiete gesetzt werden müssten, um eine für jede Landbedeckungsklasse angepasste Signatur zu erhalten. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Signaturen der zuvor durchgeführten überwachten Klassifizierung für jede Landbedeckungsklasse aus allen Jahren in einen „Signaturkatalog“ zusammengefügt und mit diesem die einzelnen Aufnahmen überwacht klassifiziert. Dabei wurden nach zwei verschiedenen Kriterien zusammengestellte Signaturkataloge angewendet.

Zum einen wurden alle Signaturen von allen Aufnahmen eines Gebietes und eines Sensors zusammengeführt. Mit diesen „regionalen“ Signaturkatalogen wurden dann auch nur die Gebiete klassifiziert, aus denen der Katalog zusammengesetzt ist. Damit sollte überprüft werden, ob eine automatisierte Auswertung eines bestimmten Gebietes mit Hilfe der speziell für dieses Gebiet angepassten Signaturen möglich ist. Zum anderen wurden die Signaturen aller zur Verfügung stehenden Aufnahmen eines Sensors, von unterschiedlichen Gebieten, in einem „über-

regionalen“ Signaturkatalog zusammengefasst. Mit Hilfe dieses überregionalen Signaturkataloges wurden alle Aufnahmen eines Sensors klassifiziert. Damit sollte überprüft werden, ob eine gebietsübergreifende automatisierte Auswertung möglich ist.

Dieser Automatisierungsansatz setzt voraus, dass die überwachte Klassifizierung der Einzelaufnahmen aus Kap. 3.2.2 gute Ergebnisse lieferte. Zudem werden Signaturen aus möglichst vielen verschiedenen Aufnahmen benötigt, um ein möglichst breites Spektrum an spektralen Variationen der in den Aufnahmen vorkommenden Landbedeckungsklassen zu erhalten. Denn die spektrale Signatur des Guanos und der umliegenden Landbedeckungsklassen variieren mit jeder Aufnahme. Damit eine automatisierte Auswertung überhaupt theoretisch möglich ist, darf die spektrale Signatur des Guanos nicht zu stark zwischen den Aufnahmen schwanken.

Landsat7

Abbildung 74 zeigt die durchschnittlichen spektralen Signaturen des Guanos beispielhaft für Cape Bird. Es wird ersichtlich, dass sich die Guanosignaturen relativ ähnlich sind und so eine automatisierte Auswertung zumindest theoretisch ermöglichen.

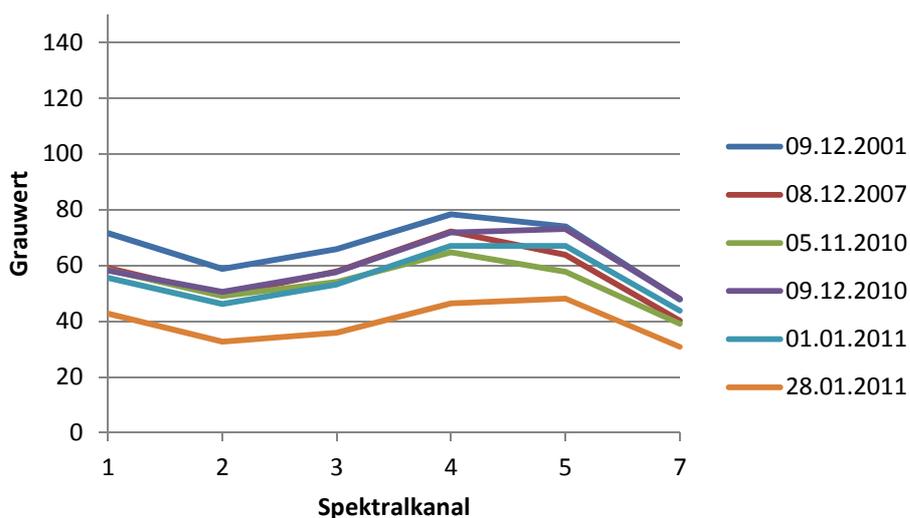


Abbildung 74: Spektrale Guanosignaturen von Cape Bird für Landsat7

Für die Zusammenstellung des regionalen Signaturkatalogs von Cape Bird lagen sieben und für Adélie-Land sechs Landsat7-Aufnahmen zur Verfügung. Da aber im Katalog nicht die Signaturen der Aufnahme enthalten sein durften, die klassifiziert werden sollte, setzte sich der Signaturkatalog von Cape Bird jeweils nur aus sechs von sieben und für Adélie-Land nur aus fünf von sechs verfügbaren Aufnahmen zusammen. Da für Kopaitic nur zwei Aufnahmen vorhanden waren, musste hier jeweils eine Aufnahme mit den Signaturen der anderen Testgebiete klassifiziert werden.

Prinzipiell war es gut möglich, mit dem regionalen Signaturkatalog die Aufnahmen zu klassifizieren. Die genauen Ergebnisse der Klassifizierung sind in Abbildung 75 dargestellt. Es wird

erkennbar, dass sich die Abweichungen zur manuellen Abgrenzung je nach Kolonie sehr stark unterscheiden. Im Durchschnitt liegen die Abweichungen bei 45 %. Bei den großen Kolonien wie Pétrels und Cape Bird N kommt nur eine geringe Abweichung vor, während vor allem Le Mauguen mit fast 250 % extrem stark abweicht. Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Größe der Abweichungen und der Koloniefäche (Abbildung 76). So nehmen die Abweichungen mit zunehmender Koloniegröße ab.

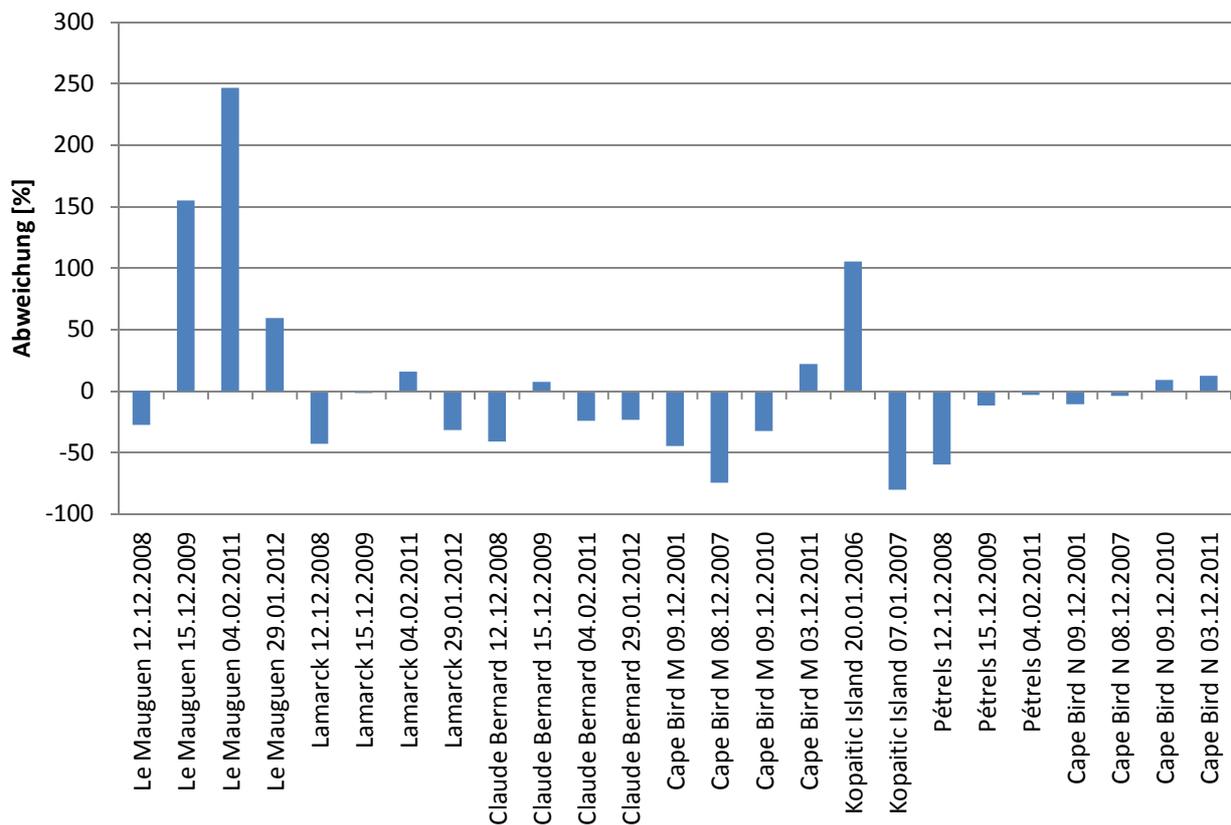


Abbildung 75: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierte Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne Landsat7-Aufnahmen

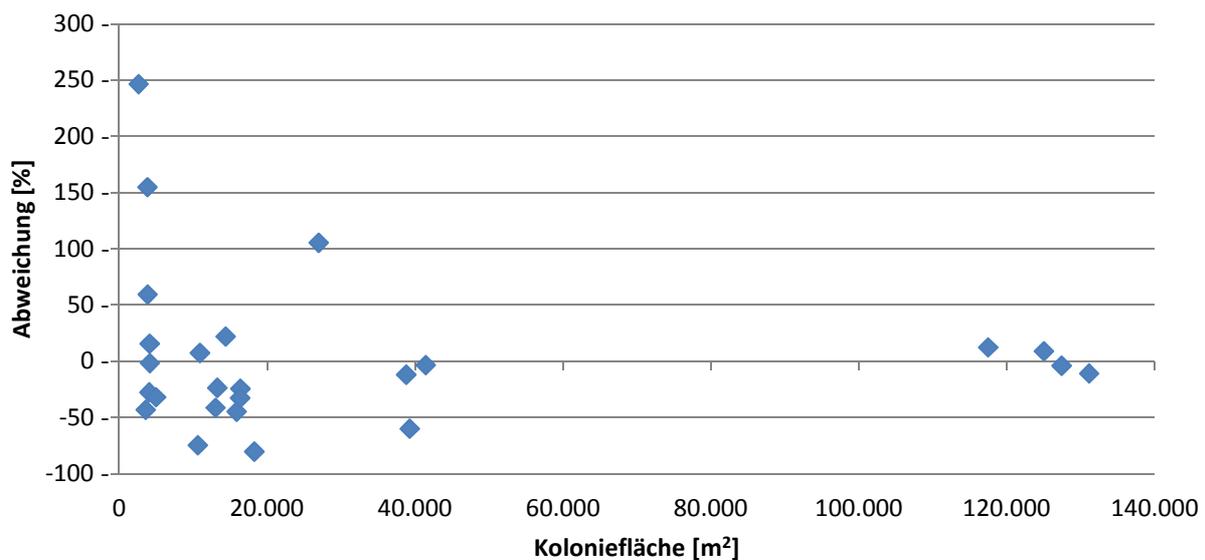


Abbildung 76: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen

Für die Zusammenstellung des überregionalen Signaturkatalogs wurde genauso vorgegangen wie zuvor beim Regionalen. Dieser setzte sich nun aber aus 14 Aufnahmen zusammen.

Auch mit dem überregionalen Signaturkatalog war es möglich, alle Aufnahmen zu klassifizieren. Wie in Abbildung 77 erkennbar ist, kommt es wieder bei einigen Kolonien zu starken Abweichungen von der manuell gemessenen Koloniefläche, während beim Großteil der Kolonien nur relativ geringe Abweichungen ermittelt werden. Die durchschnittliche Abweichung liegt bei relativ hohen 46 %. Es besteht wiederum ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Größe der Abweichungen und der Koloniefläche (Abbildung 78).

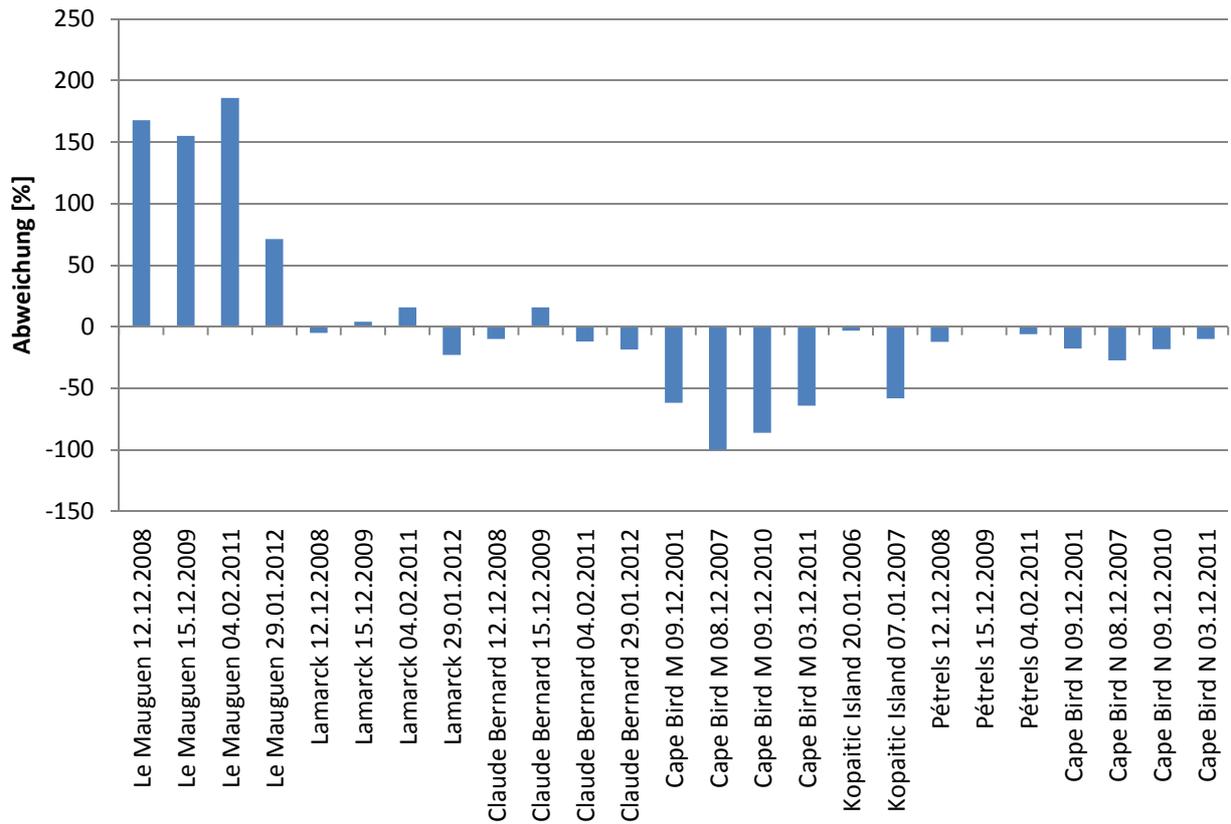


Abbildung 77: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne Landsat7-Aufnahmen

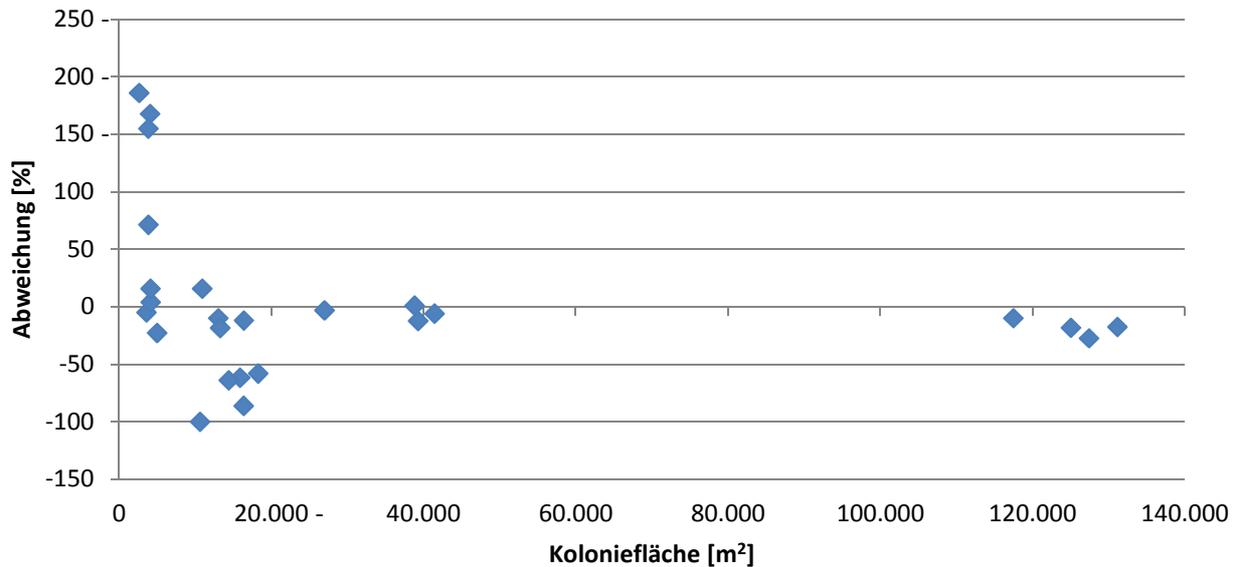


Abbildung 78: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für Landsat7-Aufnahmen

QuickBird2 & WorldView2

Bei der Analyse der QuickBird2-Aufnahmen trat das Problem auf, dass nur maximal zwei Aufnahmen pro Kolonie vorhanden waren. Somit war es nicht möglich, einen regionalen Signaturkatalog für die einzelnen Gebiete zusammenzustellen. Um dennoch wenigstens einen Hinweis darauf zu bekommen, ob eine regionale Klassifizierung mit QuickBird2-Aufnahmen möglich ist, wurde jeweils eine Aufnahme mit den Signaturen der Zweiten klassifiziert. Für WorldView2 lag jeweils nur eine Aufnahme pro Kolonie vor, so dass eine regionale Klassifizierung unmöglich war. Eine Kombination von QuickBird2- und WorldView2-Aufnahmen ist zudem aufgrund der unterschiedlichen Spektralkanäle nicht sinnvoll.

Die Ergebnisse der Klassifizierungen werden in Abbildung 79 bis Abbildung 82 dargestellt. Nur für die Aufnahmen von Cape Bird und Adélie-Land liegen plausible Ergebnisse vor. Dies liegt unter anderem daran, dass bei den übrigen Kolonien die Aufnahmen zu unterschiedlich hinsichtlich aktueller Witterungseinflüsse (Nebel, Schnee etc.) waren. Die Ergebnisse schwanken zwar stark, geben aber einen Hinweis darauf, dass eine regionale Klassifizierung gute Ergebnisse liefern kann, wenn genügend historische Aufnahmen zur Verfügung stehen. Wie schon bei der Veränderungsanalyse in Kap. 3.4.2 besteht auch hier bei den hoch auflösenden Sensoren aufgrund der großen räumlichen Auflösung kein Zusammenhang zwischen den Abweichungen und der Koloniefäche (Abbildung 80 und Abbildung 82).

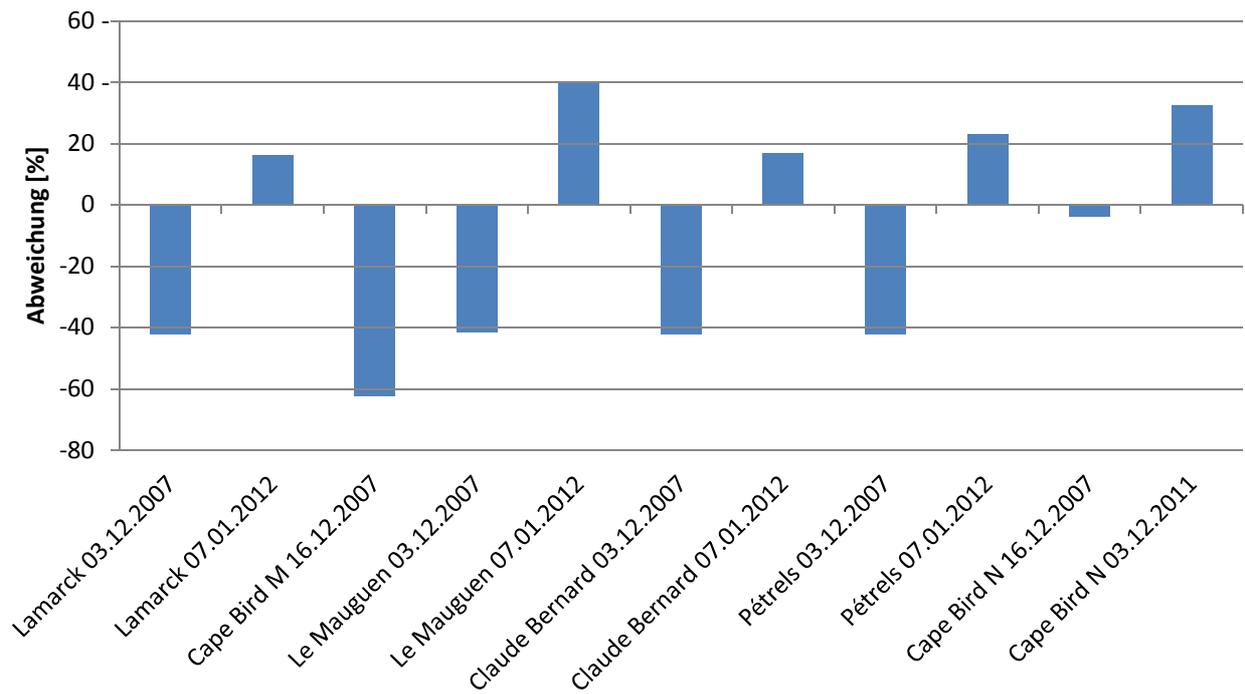


Abbildung 79: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

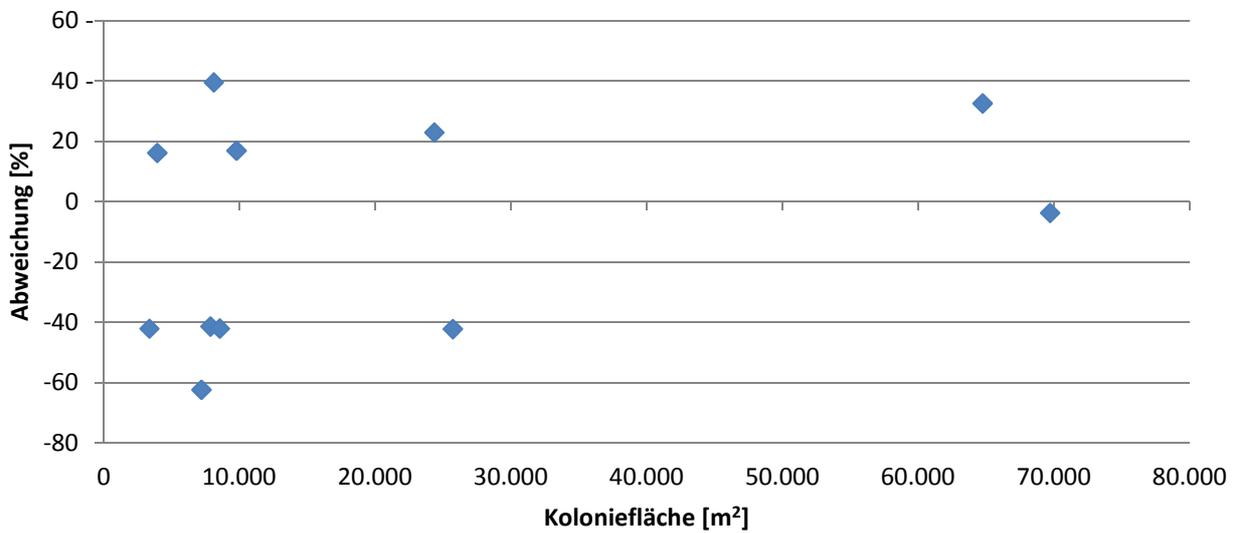


Abbildung 80: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmen, sortiert nach Koloniefäche für QuickBird2-Aufnahmen

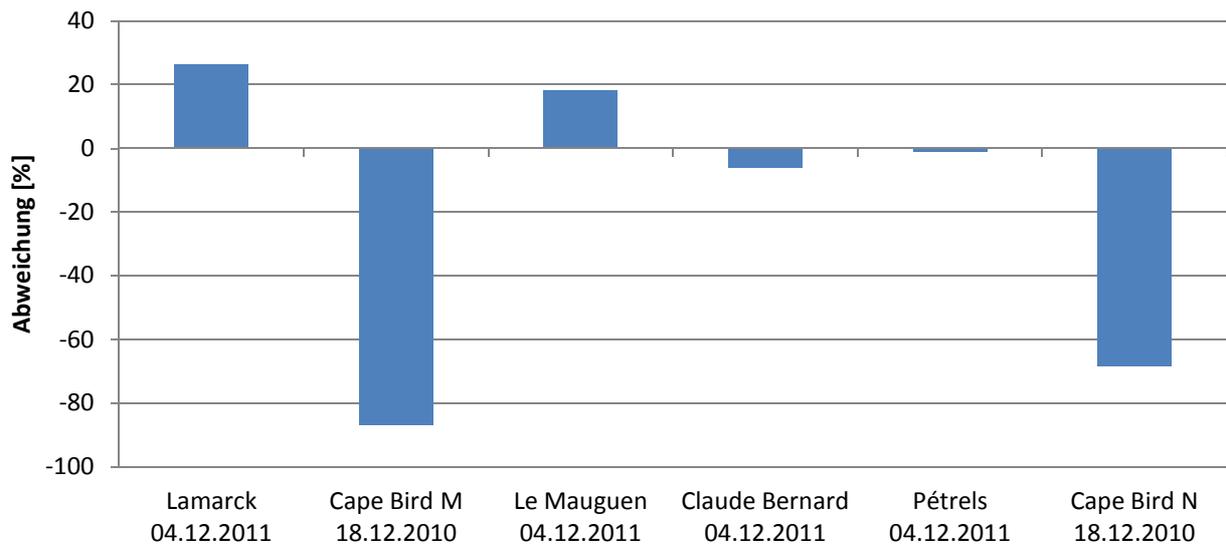


Abbildung 81: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne WorldView2-Aufnahmen

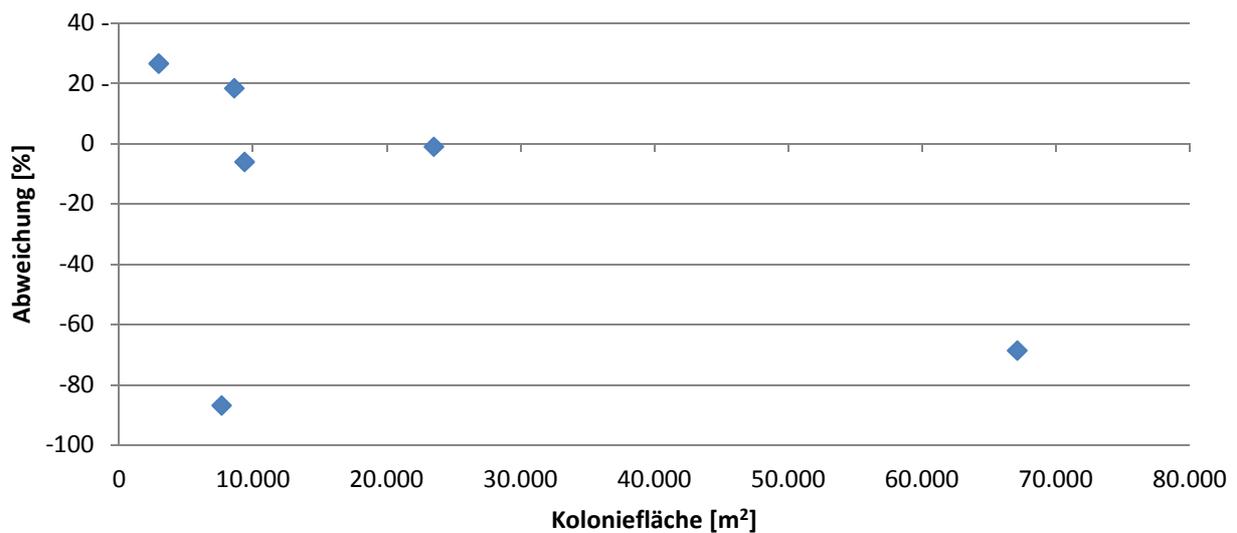


Abbildung 82: Abweichung der mit regionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für WorldView2-Aufnahmen

Die Ergebnisse der überregionalen überwachten Klassifizierung, bei der sich der Signaturkatalog aus allen Aufnahmen zusammensetzte, lieferten bei allen Kolonien für QuickBird2 und WorldView2 unbrauchbare Ergebnisse. Aus diesem Grund wurden verschiedene Signaturkombination getestet, mit dem Ergebnis, dass nur die überregionale Klassifizierung mit den Aufnahmen von Cape Bird und Adélie-Land verwertbare Ergebnisse liefert, welche in Abbildung 83 bis Abbildung 86 dargestellt sind. Auch diese stark schwankenden Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, dass eine überregionale Klassifizierung, die aus vielen Signaturen besteht, gute Ergeb-

nisse liefern könnte, da für Adélie-Land nur geringe Abweichungen detektiert wurden. Bei keinen der Sensoren besteht ein Zusammenhang zwischen der Größe der Abweichungen und der Koloniefäche.

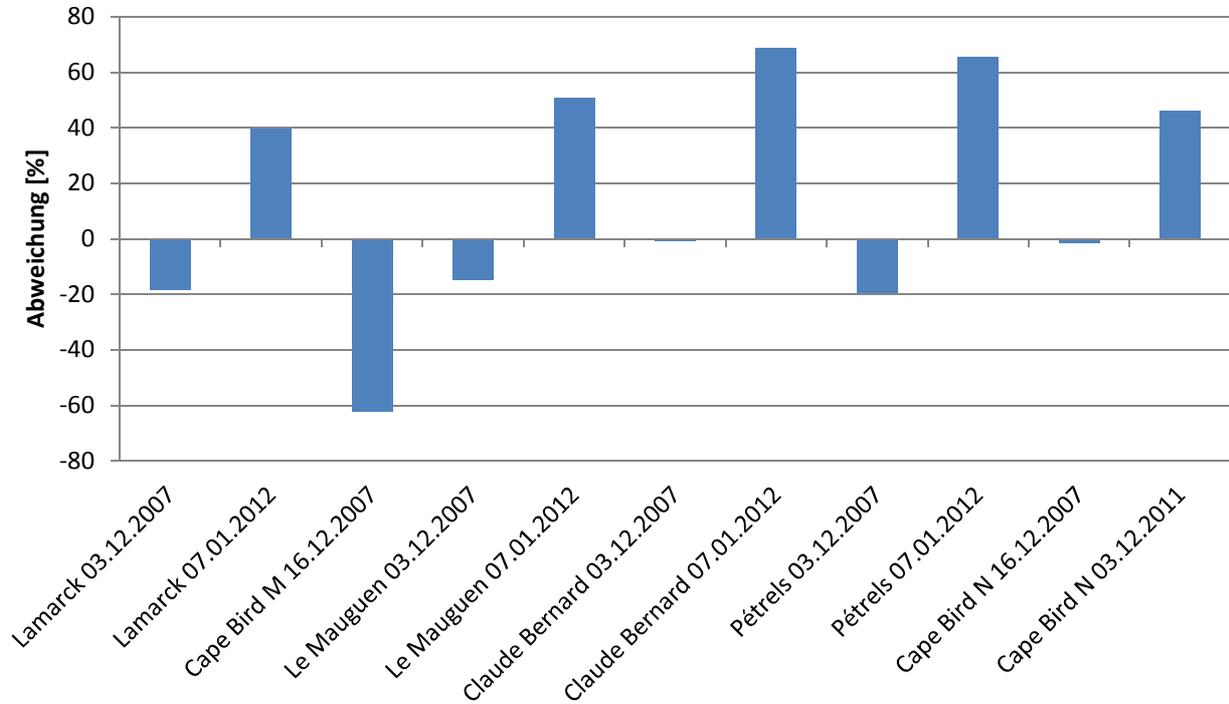


Abbildung 83: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

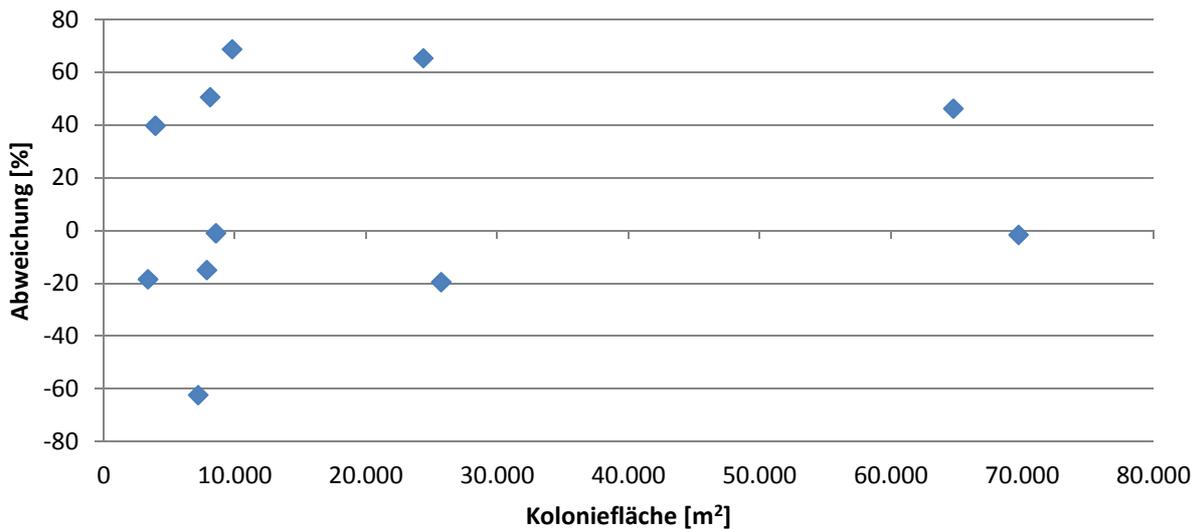


Abbildung 84: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für QuickBird2-Aufnahmen

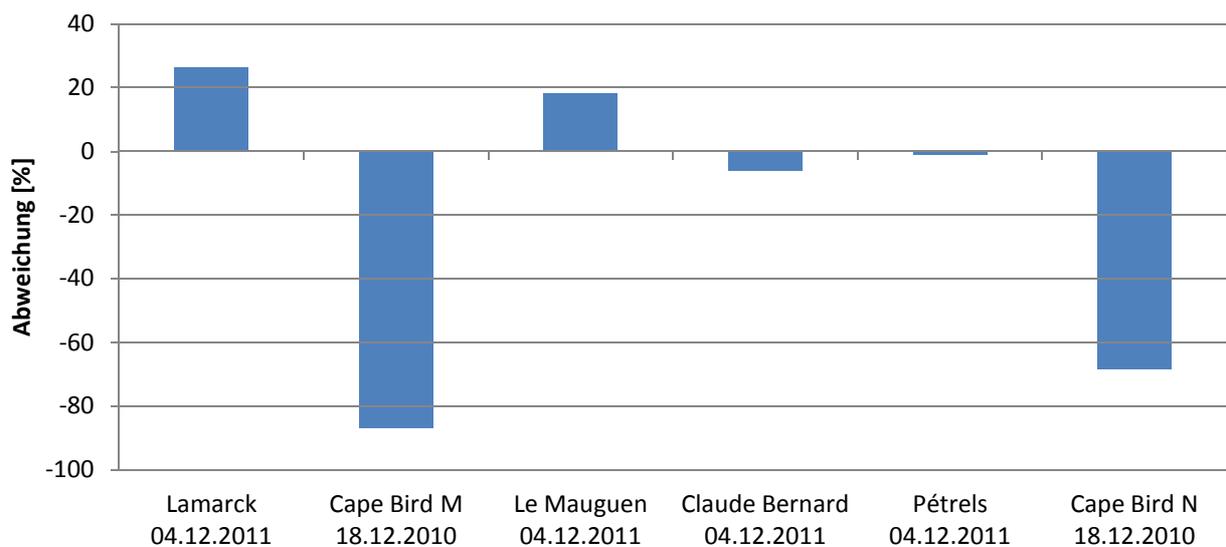


Abbildung 85: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne WorldView2-Aufnahmen

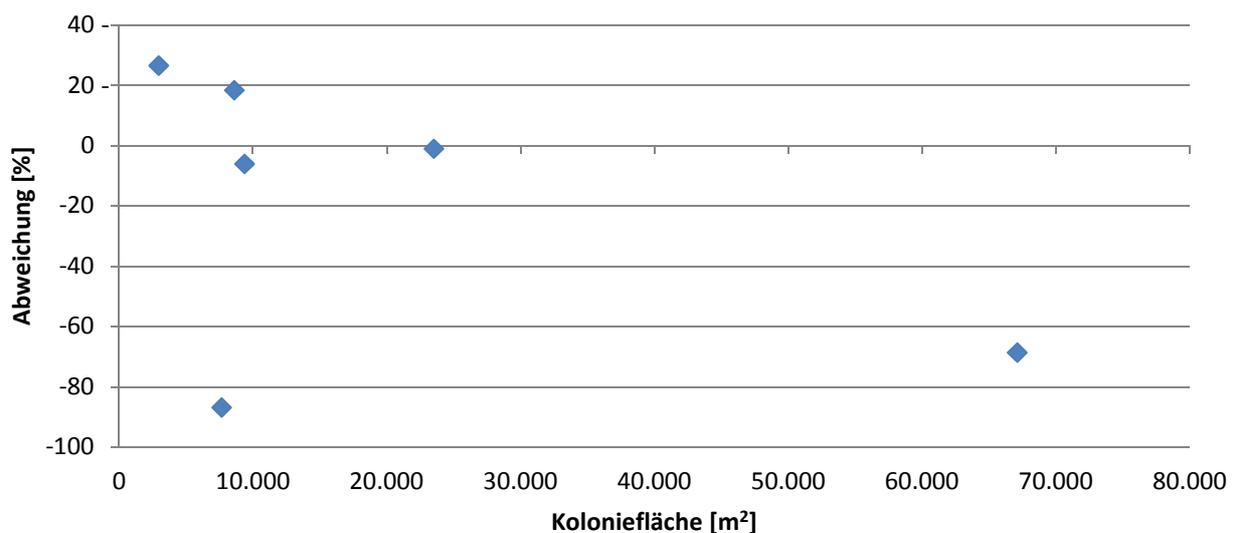


Abbildung 86: Abweichung der mit überregionalem Signaturkatalog überwacht klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen

3.6.2 Ratio-Ansatz

Um mit dem Ratio-Ansatz automatisiert Pinguinkolonien in verschiedenen Aufnahmen detektieren zu können, wird eine allgemeingültige Ratiokombination benötigt. Diese muss solche Ratios enthalten, mit denen in allen gewünschten Gebieten eine Trennung des Guanos von den umliegenden Landbedeckungsklassen möglich ist. Um eine solche allgemeingültige Ratiokombination mit dazugehörigem Schwellenwert zu finden, wurden aus allen historischen Aufnahmen für jeden Sensor die Minima und Maxima der Ratios für Guano bestimmt. Dann

wurden diese miteinander verglichen und zu einer gemeinsamen Signatur für Guano zusammengefügt. Abbildung 87 zeigt beispielhaft die durchschnittlichen Ratios von Guano von sechs historischen Aufnahmen von Cape Bird. Schließlich konnte mit Hilfe der Minima und Maxima der umliegenden Landbedeckungsklassen die Schwellenwerte zur Abgrenzung der Pinguinkolonien abgeleitet werden. Dabei wurde wie bei der überwachten Klassifizierung, eine regional gültige Ratiokombination gesucht, welche für alle Aufnahmen eines Gebietes gültig ist. Desweiteren wurde eine überregionale Ratiokombination gesucht, mit der auch in Aufnahmen aus unterschiedlichen Gebieten Pinguinkolonien detektiert werden können. Um eine möglichst allgemeingültige Ratiokombination zu erhalten, werden möglichst viele Aufnahmen benötigt.

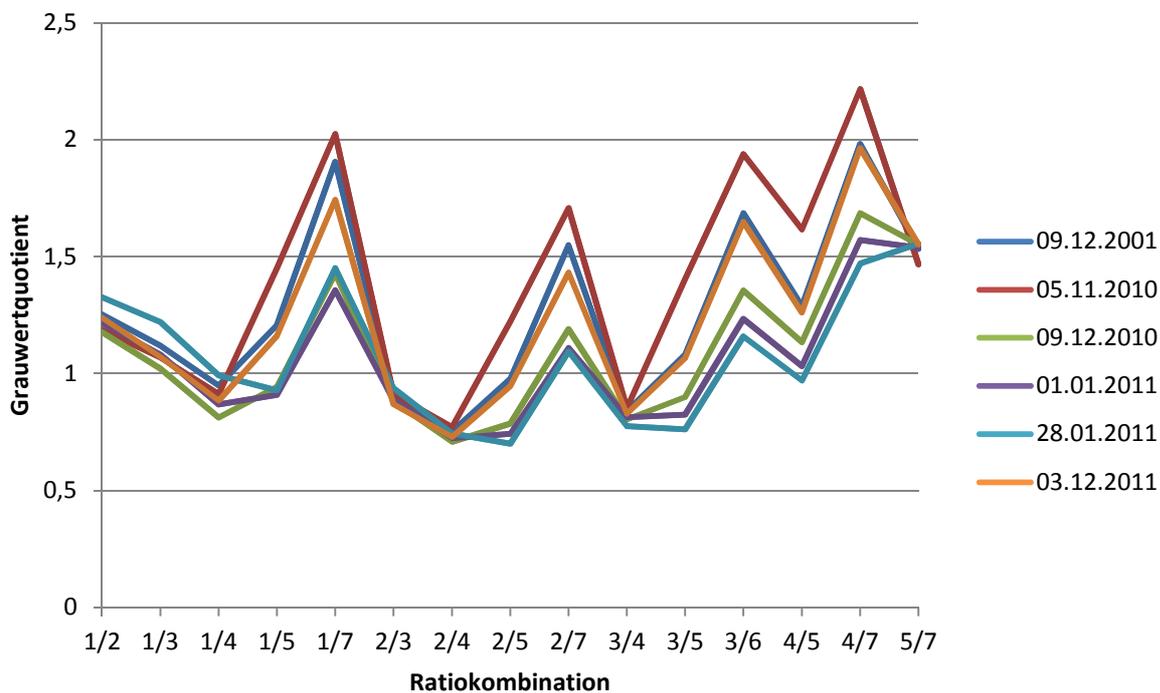


Abbildung 87: Variabilität der durchschnittlichen Ratios für Guano in verschiedenen Aufnahmen von Cape Bird für Landsat7

Landsat7

Für die regionale und überregionale Analyse der einzelnen Kolonien standen genauso viele Aufnahmen wie bei der überwachten Klassifizierung (siehe Kap. 3.6.1) zu Verfügung. Im Ergebnis konnten für alle untersuchten Kolonien eine geeignete regionale Ratiokombination gefunden werden (Cape Bird, Adélie Land und Kopaitic). Auch war es möglich mit einer überregionalen Ratiokombination in allen Aufnahmen die Pinguinkolonien abzugrenzen. Der Vergleich der Ergebnisse mit der manuellen Abgrenzung zeigt, dass es wiederum zu extrem großen Abweichungen bei einzelnen Kolonien kommt, während andere nur relativ gering Abweichen (siehe Abbildung 88 und Abbildung 91). Erneut zeigt sich dabei eine deutliche Abnahme der Abweichungen mit zunehmender Koloniefäche.

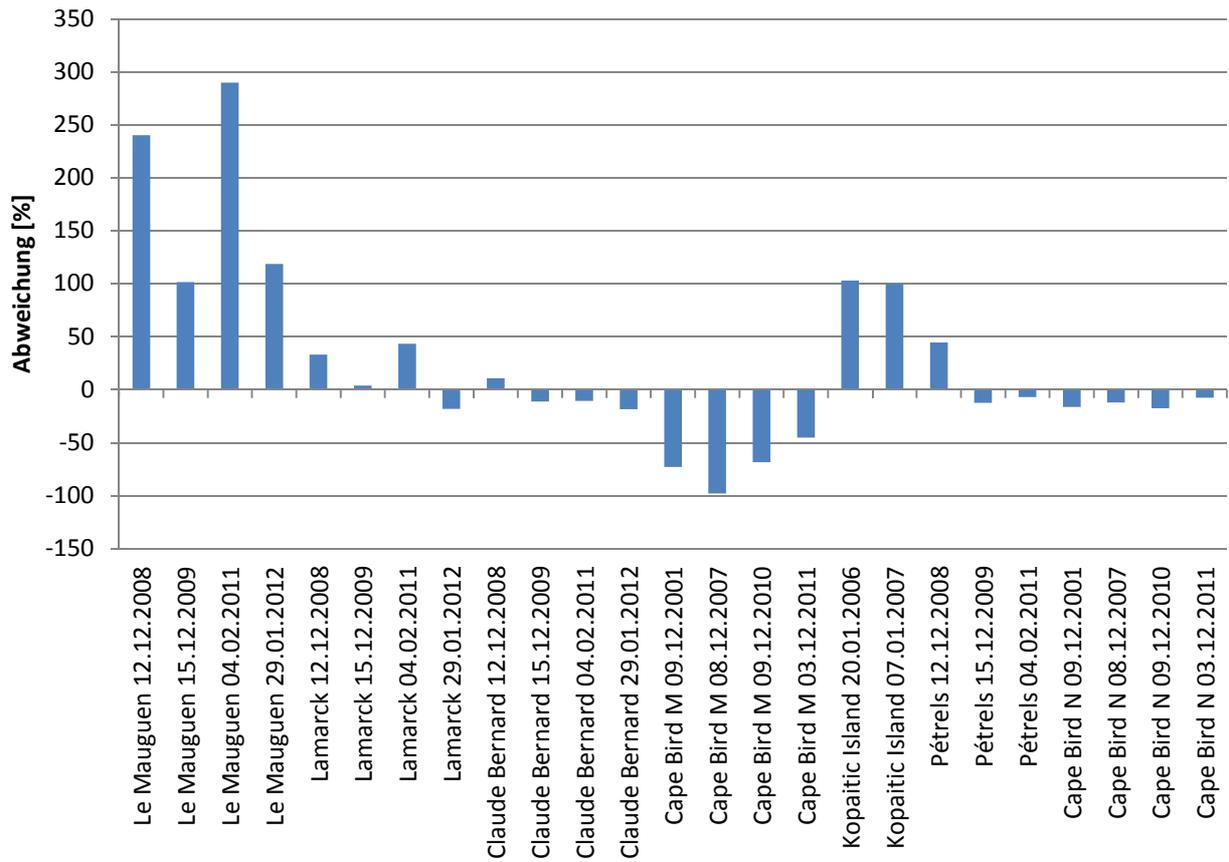


Abbildung 88: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne Landsat7-Aufnahmen

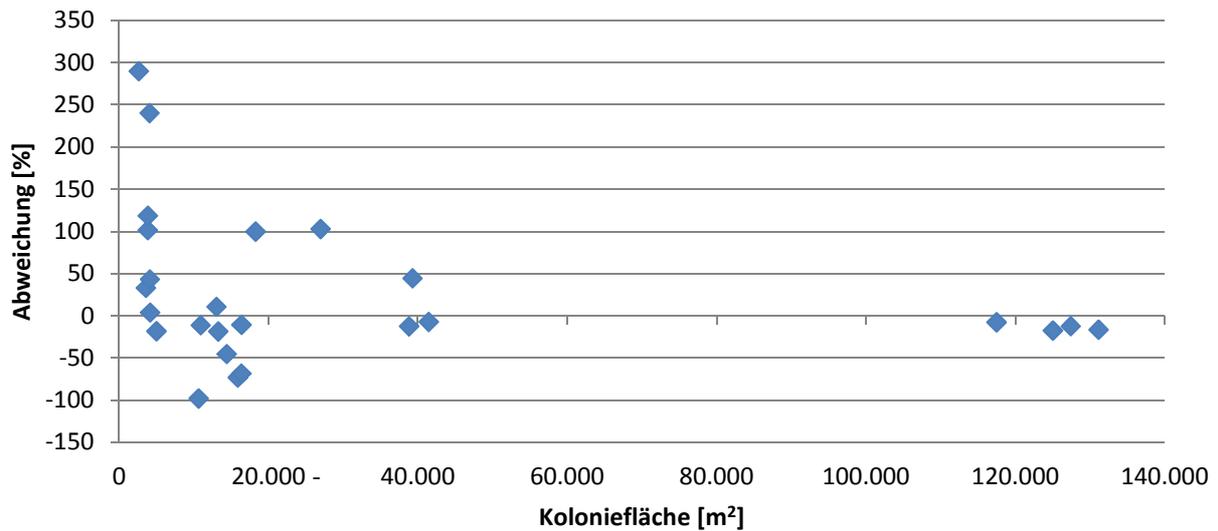


Abbildung 89: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für Landsat7-Aufnahmen

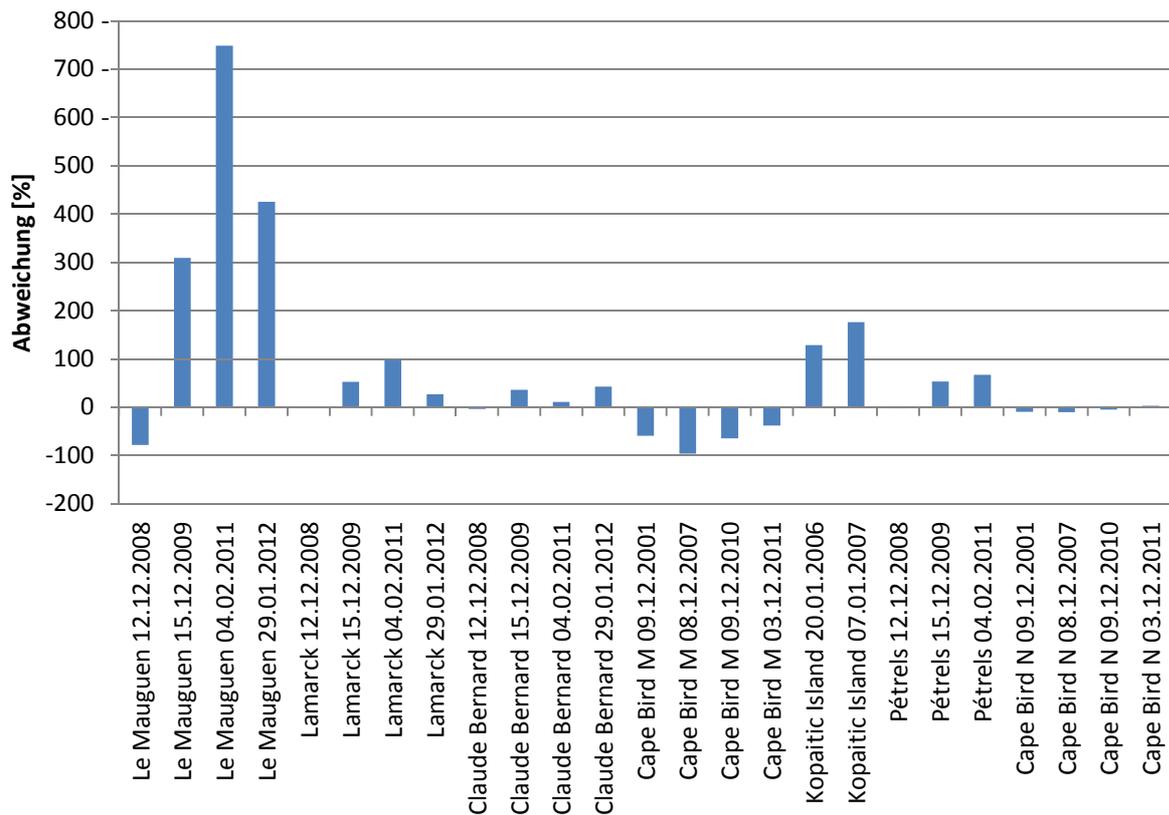


Abbildung 90: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell bestimmten Koloniefäche für einzelne Landsat7-Aufnahmen

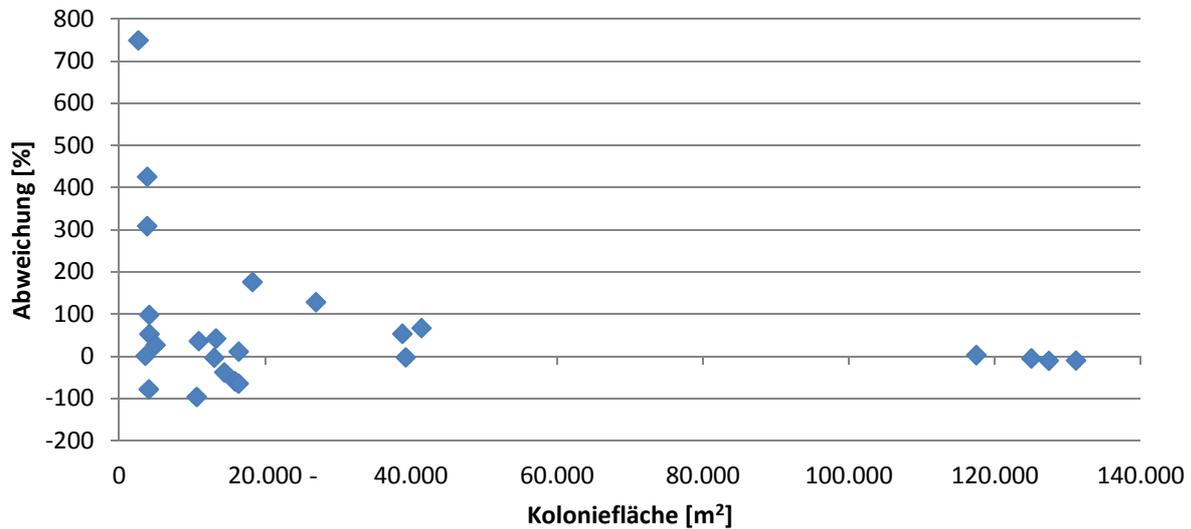


Abbildung 91: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für Landsat7-Aufnahmen

QuickBird2 & WorldView2

Bei der Analyse der QuickBird2 und WorldView2-Aufnahmen trat wie schon bei der überwachten Klassifizierung (siehe Abschnitt Kap. 3.6.1), das Problem auf, das nur maximal zwei Aufnahmen für die gleiche Kolonie vorlagen. Deshalb wurden die QuickBird2-Aufnahmen jeweils nur mit der Ratiokombination der zweiten verfügbaren Aufnahme derselben Kolonie klassifiziert. Für WorldView2 war eine regionale Analyse aufgrund fehlender historischer Aufnahmen nicht möglich. Keine verwertbaren Ergebnisse lieferten die Analyse für Ardley, Point Thomas und Torgersen, weil sich bei diesen die Aufnahmen zu stark unterschieden und auch schon die speziell auf die Einzelaufnahmen angepasste Ratios unbefriedigende Ergebnisse lieferten (siehe Kap. 3.2.3). Die Ergebnisse der regionalen Ratio-Analyse für Cape Bird und Adélie-Land sind in Abbildung 92 dargestellt. Erkennbar ist, dass es nur zu moderaten Abweichungen im Vergleich zur manuellen Abgrenzung kommt und das kein Zusammenhang zwischen Koloniegröße und der Abweichung besteht (siehe Abbildung 93).

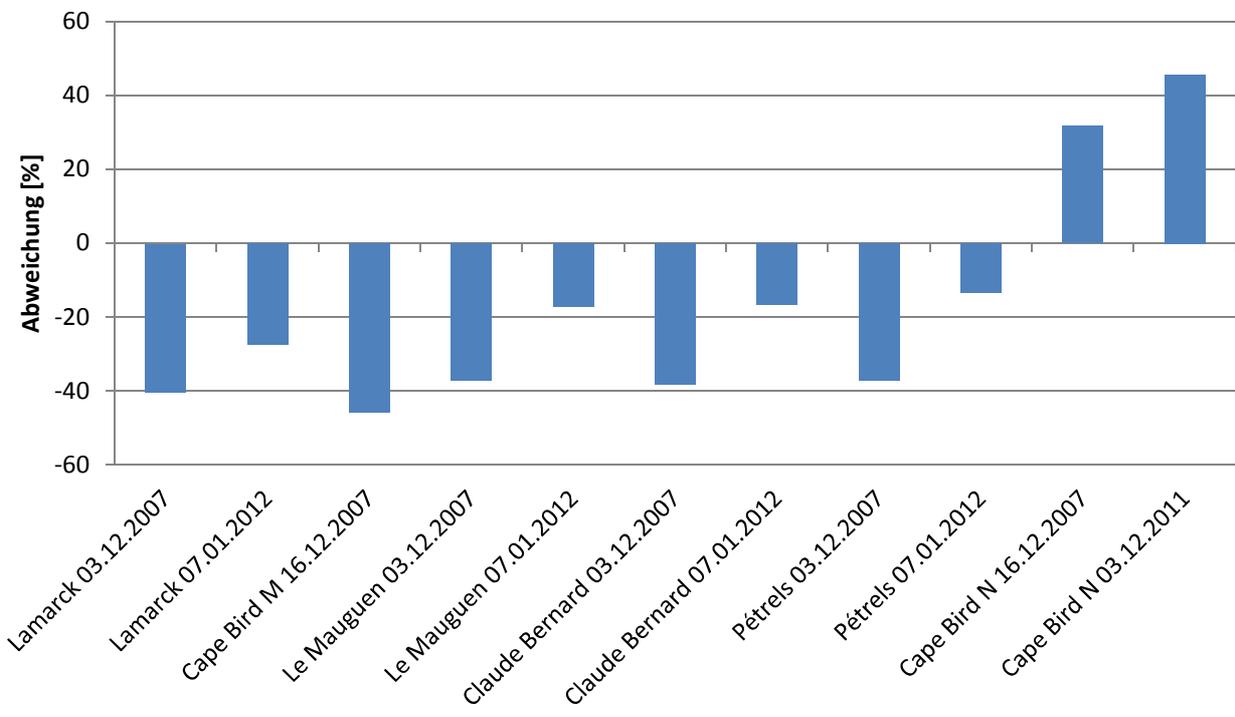


Abbildung 92: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

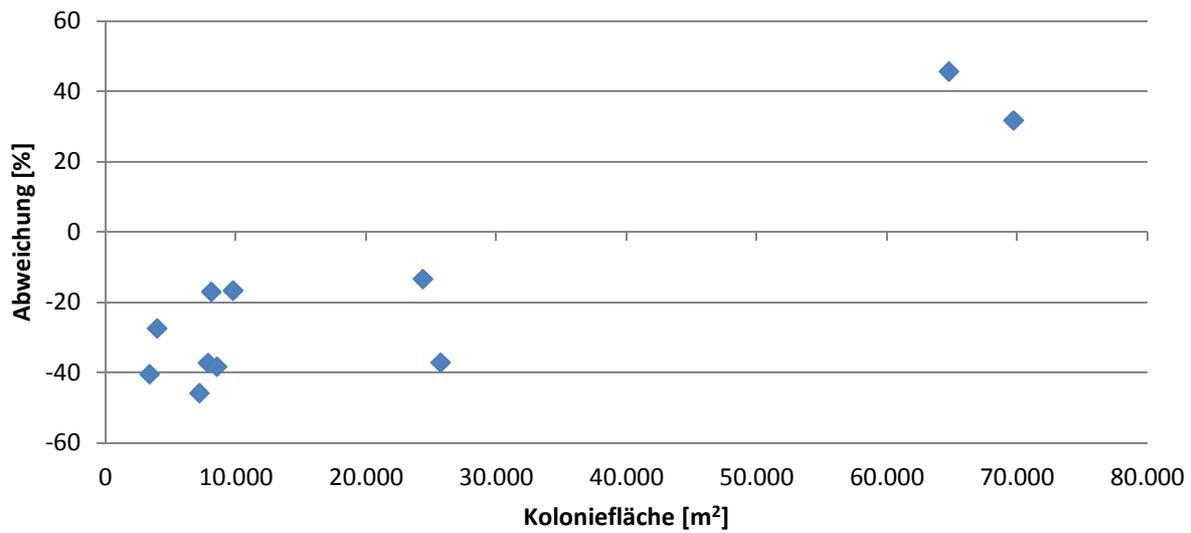


Abbildung 93: Abweichung der mit regionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für QuickBird2-Aufnahmen

Es konnte keine überregionale Ratiokombination gefunden werden, die jeweils für alle verfügbaren QuickBird2- und WorldView2-Aufnahmen brauchbare Ergebnisse liefert, da sich die verschiedenen Aufnahmen zu stark voneinander unterscheiden. Die einzig verwertbare überregionale Ratiokombination wurde zwischen den Aufnahmen von Cape Bird und Adélie-Land ermittelt. Die relativ geringen Abweichungen sind in Abbildung 94 und Abbildung 97 dargestellt. Wie bei allen bisherigen Untersuchungen mit diesen Sensoren besteht auch hier kein Zusammenhang zwischen der Abweichung und der Koloniefläche.

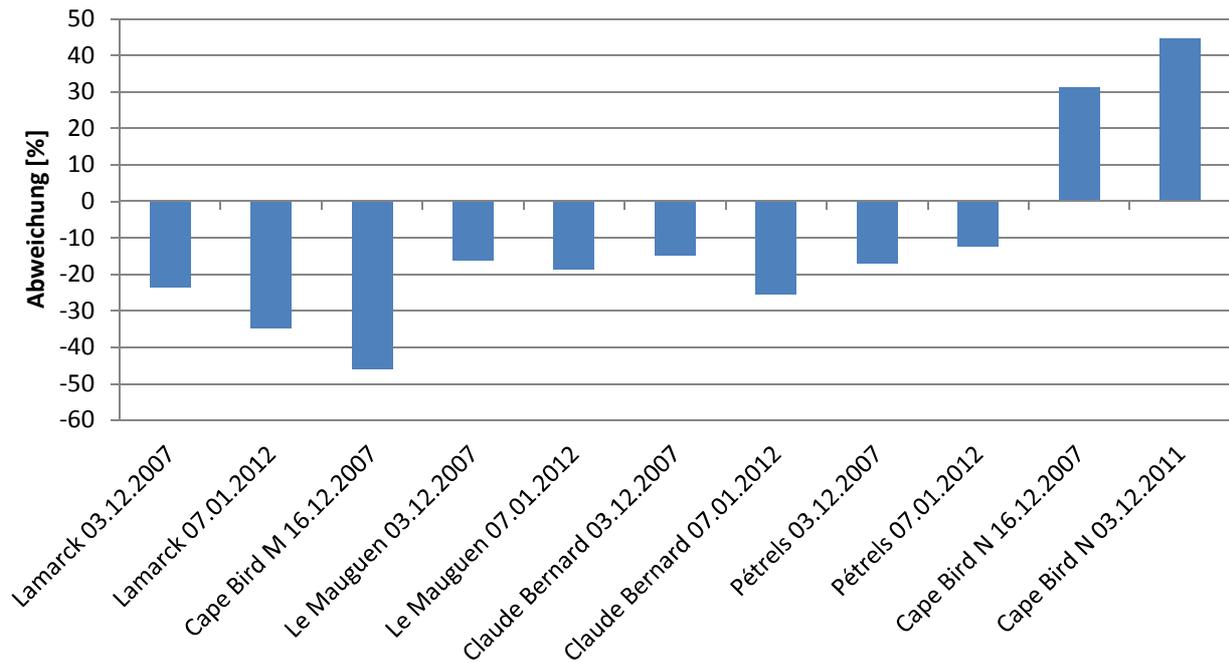


Abbildung 94: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

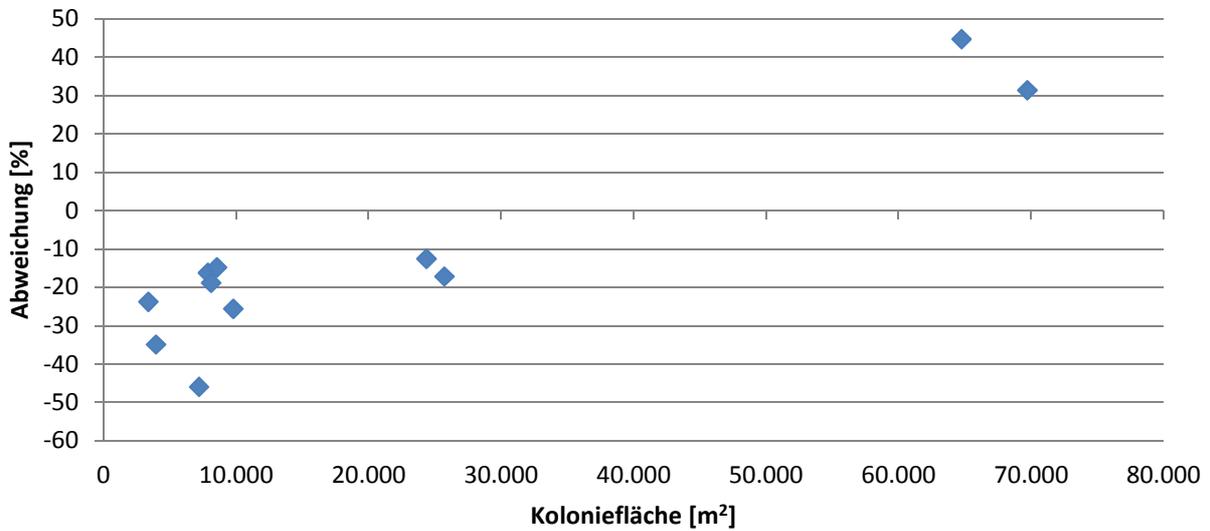


Abbildung 95: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für QuickBird2-Aufnahmen

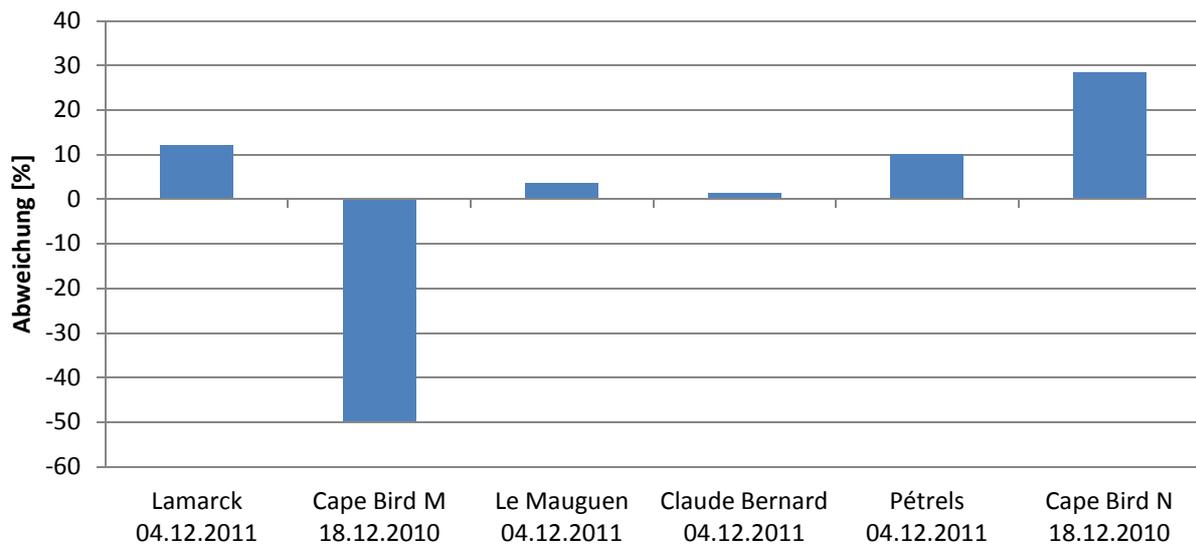


Abbildung 96: Ergebnisse der Ratio-Analyse mit überregionalen Ratiokombinationen von Cape Bird und Adélie-Land im Vergleich zur manuellen Abgrenzung für WorldView2-Aufnahmen

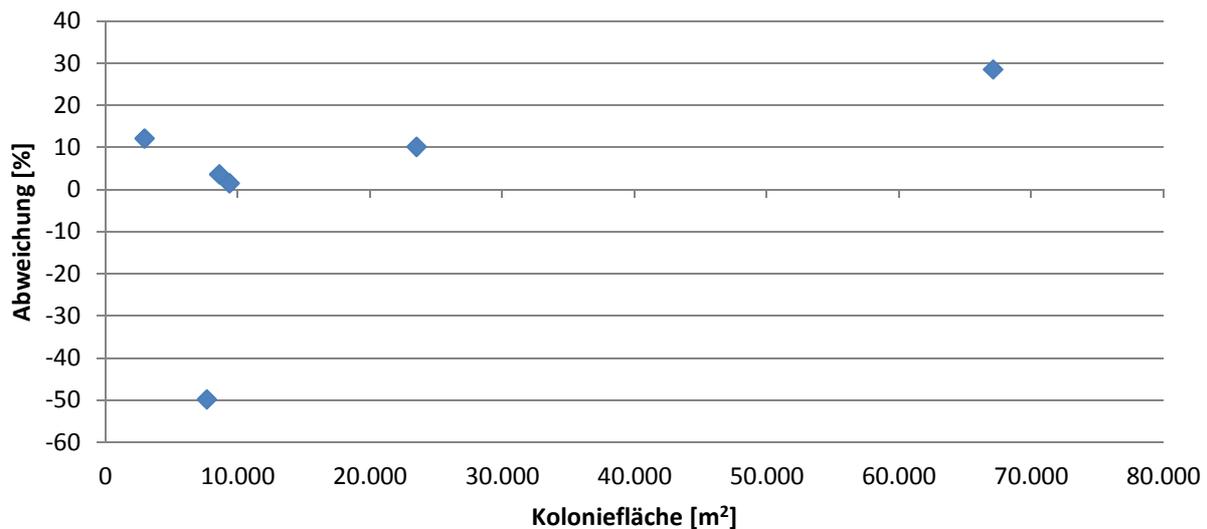


Abbildung 97: Abweichung der mit überregionaler Ratiokombination klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen

3.7 Automatisierbarkeit der Analyseverfahren von Radardaten

Pinguinkolonien der Arten *P. papua*, *P. antarctica* und *P. adeliae* (Esels-, Zügel-, und Adéliepinguin) konnten mittels TerraSAR-X SAR-Daten nicht detektiert werden, insofern stellt sich hier die Frage nach der Automatisierbarkeit nicht. Um eine Aussage hinsichtlich Automatisierbarkeit der Analyseverfahren für die Art *A. forsteri* (Kaiserpinguin) treffen zu können, ist eine breitere Datengrundlage notwendig. Die Analyse weitere SAR-Aufnahmen ist aber erst für den kommenden Südwinter während der Brutzeit des Kaiserpinguins vorgesehen.

4 Synthese der Untersuchungen

4.1 Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Aufnahmesysteme

Die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Aufnahmesysteme werden zum einen durch ihre Verfügbarkeit und zum anderen durch die Fähigkeit bestimmt, Pinguine oder Guano zu detektieren.

4.1.1 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit brauchbarer optischer Satellitendaten wird für die Antarktis hauptsächlich durch die Wetterbedingungen und das fehlende Licht während des Südwinters eingeschränkt. Besonders im Bereich der nördlichen Antarktischen Halbinsel ist der am stärksten die Verfügbarkeit beeinträchtigende Faktor die häufige Wolkendeckung (siehe Abbildung 4). In den kontinentalen Küstenbereichen hingegen sind die Wetterbedingungen viel geeigneter für optische Aufnahmen. Bilder, die kurz vor oder nach dem Südwinter entstanden sind, haben den Nachteil, dass bei ihnen, je nach Topografie des Aufnahmegebietes, starke Schlagschatten sehr wahrscheinlich sind und so eine Auswertung erschwert oder gar unmöglich gemacht wird.

Landsat7

Die Landsat7-Plattform hat den Vorteil, dass die Aufnahmen kostenfrei für jedermann zeitnah zu Verfügung stehen. Die räumliche Abdeckung der antarktischen Küstengebiete ist flächendeckend. Zudem stehen zeitlich lückenhafte aber freie Archivdaten seit 1999 für Landsat7 und seit 1982 für Landsat4 zur Verfügung. Bei Landsat7 wird derselbe Ort stets nur alle 16 Tage direkt überflogen. Theoretisch ist die zeitliche Abdeckung mit Landsat7 aber größer, da sich die Aufnahmestreifen seitlich überlappen. Diese Überlappung nimmt in Richtung Südpol zu, so dass die südlicheren Kolonien theoretisch häufiger aufgenommen werden. Allerdings wird der bei allen ab 2003 aufgenommenen Landsat7-Aufnahmen auftretende Scan Line Corrector Failure (NASA 2011) zum Bildrand hin immer größer, so dass nur in Ausnahmefällen Aufnahmen verwendet werden können, bei denen die Kolonie am Bildrand liegt, was die Verfügbarkeit wiederum stark einschränkt. In der Praxis bedeutet das, dass in dem für die Koloniedetektierung von Felsbrütern idealen Zeitraum von Dezember bis Februar in einzelnen Jahren z.B. aufgrund häufiger Schlechtwettersituationen keine oder kaum verwertbaren Aufnahmen vorliegen können. Erfahrungsgemäß liegen z.B. für Cape Bird, vier Mal mehr auswertbare Aufnahme pro Saison vor, als für das nördlichere Ardley Island.

WorldView1, WorldView2 & QuickBird2

Im Gegensatz zu Landsat7 werden von diesen Satelliten in der Antarktis nur Aufnahmen auf Bestellung durchgeführt. Zwar sind sie denselben Beschränkungen wie Wetter und Tageslicht ausgesetzt, erreichen aber durch ihren schwenkbaren Sensor eine sehr viel höhere zeitliche Abdeckung von wenigen Tagen. So können auch kurze, wolkenfreie Zeitfenster zur Aufnahme genutzt werden. Trotzdem ist es möglich, dass in einer Saison für einzelne Kolonien keine verwertbaren Aufnahmen gemacht werden können. So war es aufgrund der Wetterbedingungen nicht möglich, für Ardley und Torgersen Island Aufnahmen für die Saison 2011/2012 zu be-

kommen, obwohl diese Kolonien für einen Zeitraum von knapp zwei Monaten mehrfach von WorldView1, WorldView2 und QuickBird2 überflogen wurden. Historische Aufnahmen sind zeitlich und räumlich nur sehr lückenhaft vorhanden. In der Praxis bedeutet das, dass für manche Pinguinkolonien gar keine historischen Daten vorliegen. Ein Nachteil sind zudem die relativ hohen Anschaffungskosten (mindestens 1.800 US\$ pro aktueller Aufnahme).

4.1.2 Detektierbarkeit

Die Detektierbarkeit hängt von der spektralen und räumlichen Auflösung des Sensors sowie der jeweiligen angewandten Auswertungsmethode ab. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine Zusammenfassung beider Punkte durchgeführt. Keine verwertbaren Ergebnisse lieferte die Subpixel-Analyse, weswegen diese nicht weiter besprochen wird. Es konnten keine Pinguinkolonien der Arten *P. papua*, *P. antarctica* und *P. adeliae* (Esels-, Zügel-, und Adéliepinguin) mittels TerraSAR-X SAR-Daten detektiert werden.

Landsat7

Die Analysen der Landsat7-Aufnahmen ergibt, dass sich nicht alle untersuchten Pinguinkolonien gleich gut detektieren lassen. Damit die Kolonien sicher detektierbar sind, muss die mit Guano bedeckte Koloniefäche mindestens 3.000 m² einnehmen und aus mehr als rund 1.000 - 5.000 besetzten Nestern bestehen (siehe Abbildung 98). Entscheidend ist auch die Dichte der Nestgruppen innerhalb der Kolonie. Sind die einzelnen Nestgruppen, wie auf Ardley Island, auf einer großen Fläche verstreut, ist ein Detektieren nicht möglich. So sind unter einer Dichte von 0,12 besetzten Nestern pro m² des Kolonieareals (die von Nestgruppen eingegrenzte Koloniefäche) keine Kolonien mit Landsat7 detektierbar (siehe Tabelle 13). Einfluss auf die Detektierbarkeit haben aber auch Form der Kolonie sowie die sie umgebenden Landbedeckungsklassen, insbesondere wenn sich die oben genannten Parameter an den genannten Mindestwerten bewegen. Kompakte Kolonieförmungen sind bei gleicher Koloniefäche und Nestanzahl mit Landsat7 besser detektierbar (z.B. Lamarck Island) als längliche, schlauchförmige Kolonien. Auch Kolonien auf kontrastreichen Untergrund (z.B. dunkles Vulkangestein bei Cape Bird) sind deutlich besser detektierbar als Kolonien, die mit der dem Guano spektral ähnlichen Vegetation durchsetzt oder von ihr umgeben sind (z.B. Point Thomas). Verschiedene auf Fels brütende Pinguinarten konnten mit Landsat7-Aufnahmen nicht unterschieden werden.

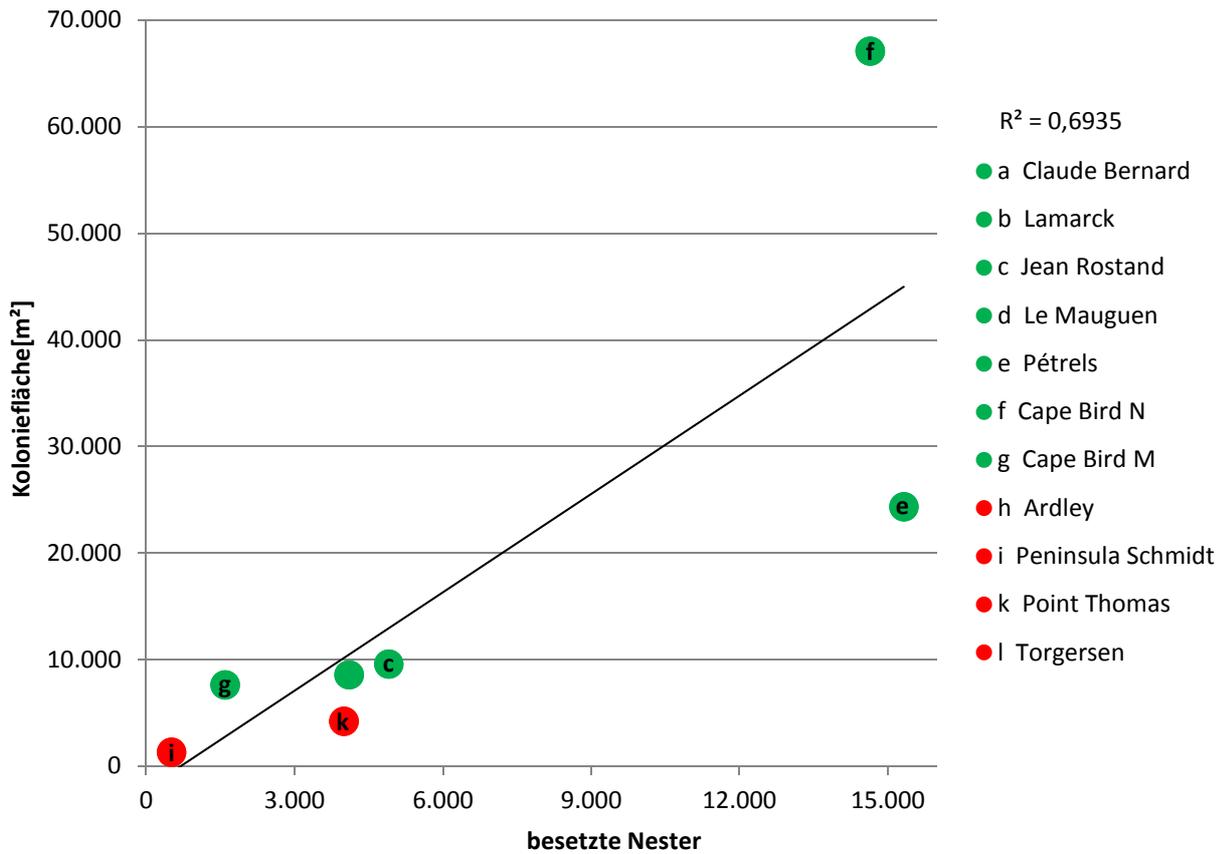


Abbildung 98: Verhältnis der Koloniefläche zur Anzahl der besetzten Nester - Grün = sichtbar, Rot = nicht sichtbar und lineare Korrelationsgerade mit $R^2 = 0,693$

Tabelle 13: Dichte in besetzten Nestern pro m² des Kolonieareals für die Koloniefläche für Landsat7 - Grün = sichtbar, Rot = nicht sichtbar

Kolonien	Dichte des Kolonieareals [Nester / m ²]
a Claude Bernard	0,18
b Lamarck	0,19
c Jean Rostand	0,23
d Le Mauguen	0,18
e Pétrels	0,24
f Cape Bird N	0,27
g Cape Bird M	0,23
h Ardley	0,08
i Schmidt Peninsula	0,04
k Point Thomas	0,30
l Torgersen	0,12

Aufgrund der oben genannten Beschränkungen waren nur die Kolonien bei Cape Bird, Adélie-Land und Kopaitic Island unterscheidbar. Aus den bei den Auswertungen gewonnenen Erfahrungen geht hervor, dass die besten Ergebnisse in Bezug auf die Koloniefäche mit der manuellen Abgrenzung gemacht werden. Der Nachteil der manuellen Abgrenzung liegt u.a. darin, dass sie, wenn große Flächen bearbeitet werden müssen, sehr zeitaufwendig ist. Da die Kolonien im Verhältnis zur Auflösung von Landsat7 aber alle relativ klein sind, fiel der Faktor Zeit nicht ins Gewicht. Im Gegenteil, bei der Auswertung einzelner Aufnahmen war die manuelle Abgrenzung am schnellsten. Nachteilig ist, dass die manuelle Auswertung starken subjektiven Einflüssen unterworfen ist. Je nach Bearbeiter können die Koloniegrenzen sehr unterschiedlich interpretiert werden.

Auch mit der überwachten Klassifizierung und dem Ratio-Ansatz war eine Detektierung von Pinguinkolonien möglich. In Abbildung 99 und Abbildung 100 werden die Ergebnisse beider Methoden gegenübergestellt. Abgebildet sind die prozentualen Abweichungen der durch Klassifizierung bestimmten Koloniefächen von den manuell gemessenen Koloniefächen. Als Maß für die Güte wurden die Ergebnisse der manuellen Abgrenzung gewählt. Erkennbar ist, dass die Ergebnisse der Flächendetektion für einzelne Kolonien stark schwanken. Die extremen Abweichungen für Le Mauguen lassen sich auf die spezielle Nestgruppenverteilung der Inselkolonie zurückführen. Diese besteht aus einer großen zusammenhängenden Nestgruppe im Norden und vielen kleinen verstreuten im Süden. Bei der manuellen Abgrenzung wurde nur der eindeutig zu erkennende nördliche Teil erfasst, während die pixelbasierten Klassifizierungen (überwachte Klassifizierung und Ratio-Ansatz) auch Teile der südlichen Kolonien erfassten. Er-sichtlich wird auch eine deutliche Verschlechterung der Klassifikationsergebnisse für beide Methoden mit abnehmender Flächengröße der Pinguinkolonien (siehe Abbildung 100). Die Koloniegrößenuntergrenze für noch quantitativ auswertbare Ergebnisse liegt bei etwa 40.000 m². Insgesamt lieferten beide Methoden vergleichbare Ergebnisse.

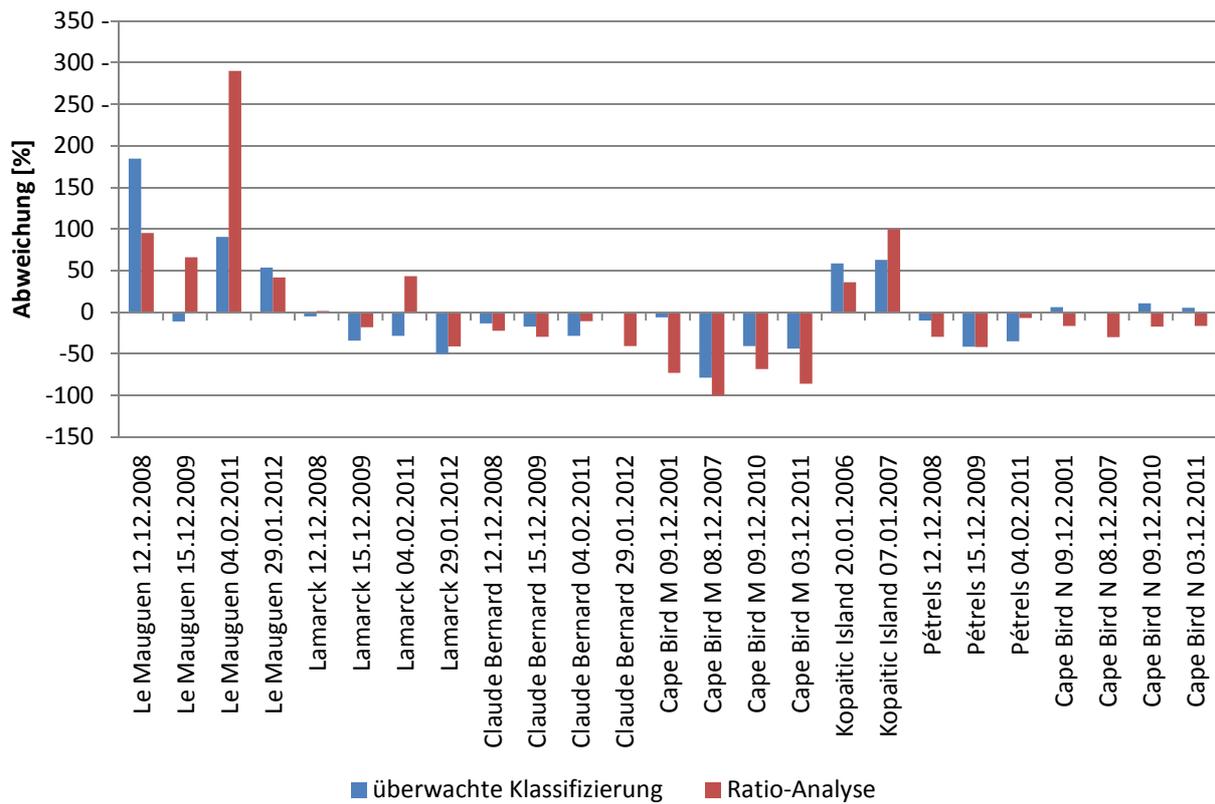


Abbildung 99: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell bestimmten Koloniefläche, für einzelne Landsat7-Aufnahmen

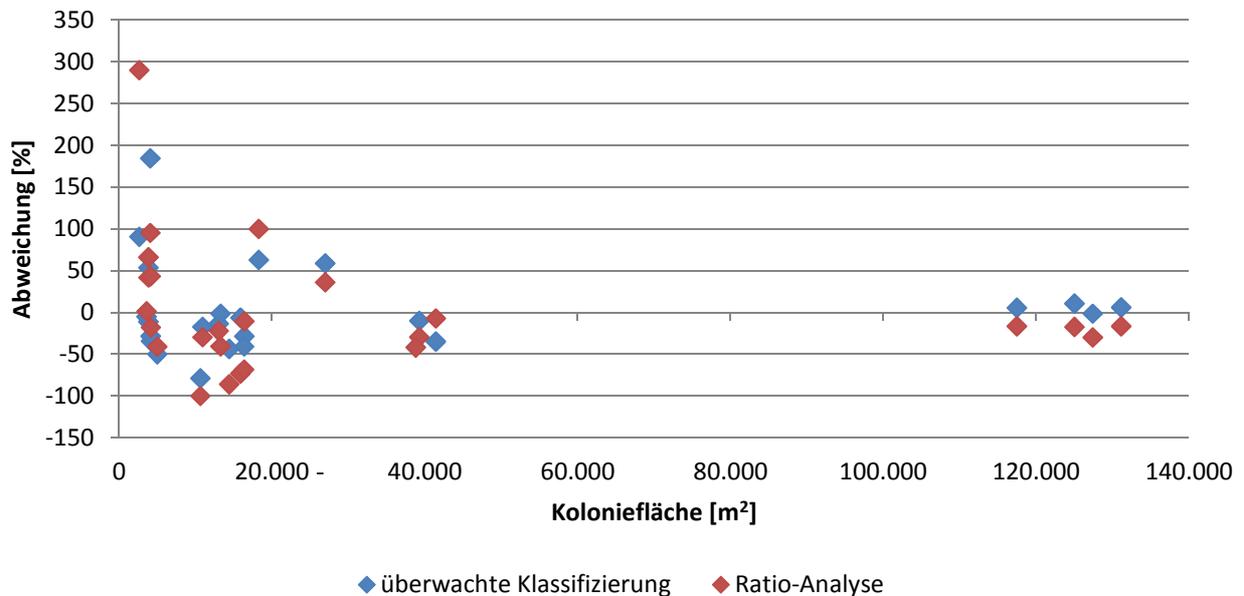


Abbildung 100: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für Landsat7-Aufnahmen

WorldView1

Die Analyse der panchromatischen WorldView1-Aufnahmen zeigt, dass eine Detektierung von Pinguinkolonien auf Felsuntergrund relativ schwierig und nur unter bestimmten Voraussetzungen überhaupt möglich ist. So muss die ungefähre Lage und Ausbreitung der zu detektierenden Kolonie bekannt sein und ihre Helligkeitswerte müssen sich deutlich von der Umgebung unterscheiden. Einzig die manuelle Bildinterpretation könnte unter diesen speziellen Bedingungen verwertbare Ergebnisse liefern.

QuickBird2 & WorldView2

Für QuickBird2 und WorldView2 konnte keine Untergrenze für die Detektierbarkeit von Kolonien oder deren Nestgruppen ermittelt werden. Vielmehr konnten alle, auch die kleinsten Kolonien, detektiert werden. Mit Hilfe der manuellen Bildinterpretation war es sogar möglich, einzelne Nester und größere Pinguinansammlungen zu erkennen. Trotz der hohen räumlichen Auflösung von 50 - 60 cm sind keine einzeln stehenden Pinguine auf Fels detektierbar. Probleme bereiteten vor allem Aufnahmen, die am Anfang der Brutsaison aufgenommen wurden und bei denen die Kolonie stark mit Schnee bedeckt war. Zum einen bedeckte der Schnee die tiefer gelegenen potentiellen Nistplätze und zum anderen wird vermutet, dass sich am Anfang der Brutsaison noch nicht genügend detektierbarer Guano akkumuliert hat.

Ein Vergleich der Ergebnisse für die überwachte Klassifizierung und den Ratio-Ansatz ist in Abbildung 101 bis Abbildung 104 dargestellt. Auch mit diesen Methoden war es möglich, alle Kolonien zu detektieren, allerdings mit deutlichen Qualitätsschwankungen zwischen den einzelnen Aufnahmen. Die größten Abweichungen gibt es bei verschneiten Aufnahmen (Torgersen 2007 und Ardley Island 2009) sowie bei Aufnahme mit Nebel (Point Thomas 2011). Die bei den QuickBird2-Aufnahmen in Abbildung 102 scheinbar ersichtliche Zunahme der Abweichung mit kleiner werdender Koloniefäche, ist darauf zurückzuführen, dass fünf von elf QuickBird2-Aufnahmen nicht unter optimalen Bedingungen aufgenommen wurden. Die vier WorldView2-Aufnahmen wurden hingegen unter optimalen Bedingungen aufgenommen - ein Zusammenhang zwischen Abweichung und Koloniefäche ist nicht ersichtlich (siehe Abbildung 104). Wird dieser Fakt mit in Betracht gezogen, sind keine qualitativen Unterschiede zwischen den QuickBird2- und WorldView2-Aufnahmen ersichtlich. Auch ist erkennbar, dass die überwachte Klassifizierung unter schlechten Bedingungen bessere Ergebnisse liefert als der Ratio-Ansatz.

Eine Artunterscheidung konnte bei den untersuchten Aufnahmen nicht sicher durchgeführt werden. Lediglich bei der Kolonie nahe der Pieter J. Lenie Field Station (USA) konnte die Vermutung aufgestellt werden, dass sich dort Bereiche die überwiegend mit Adéliepinguinnestern besetzt sind von denen der Eselpinguine unterschieden lassen. Aufgrund fehlender aktueller Zähl- bzw. Kartierungsdaten konnte diese Vermutung aber nicht verifiziert werden.

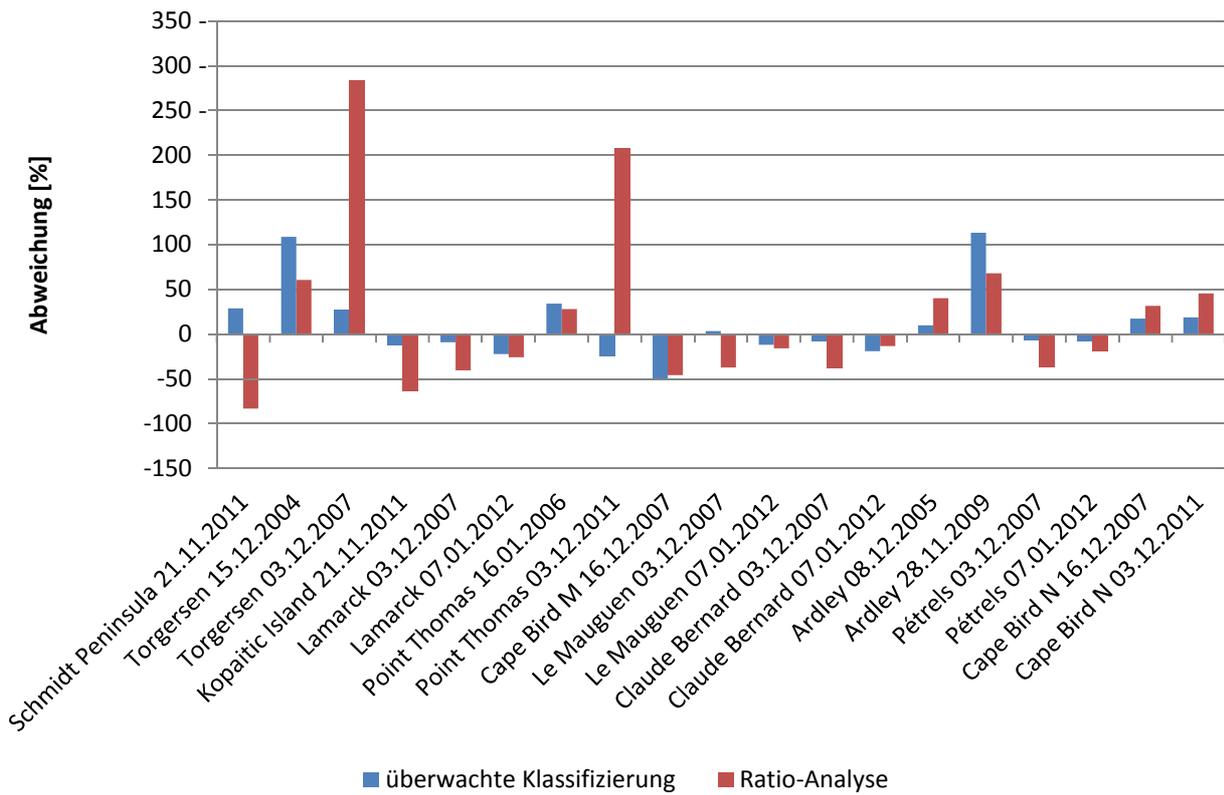


Abbildung 101: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, für einzelne QuickBird2-Aufnahmen

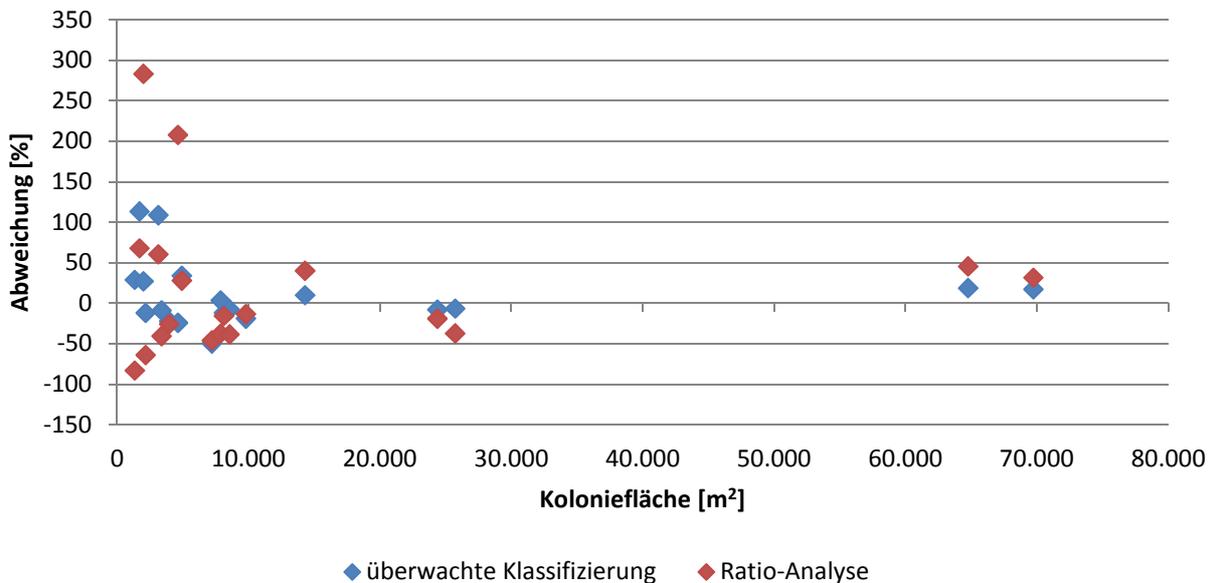


Abbildung 102: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten Koloniefäche mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefäche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefäche für QuickBird2-Aufnahmen

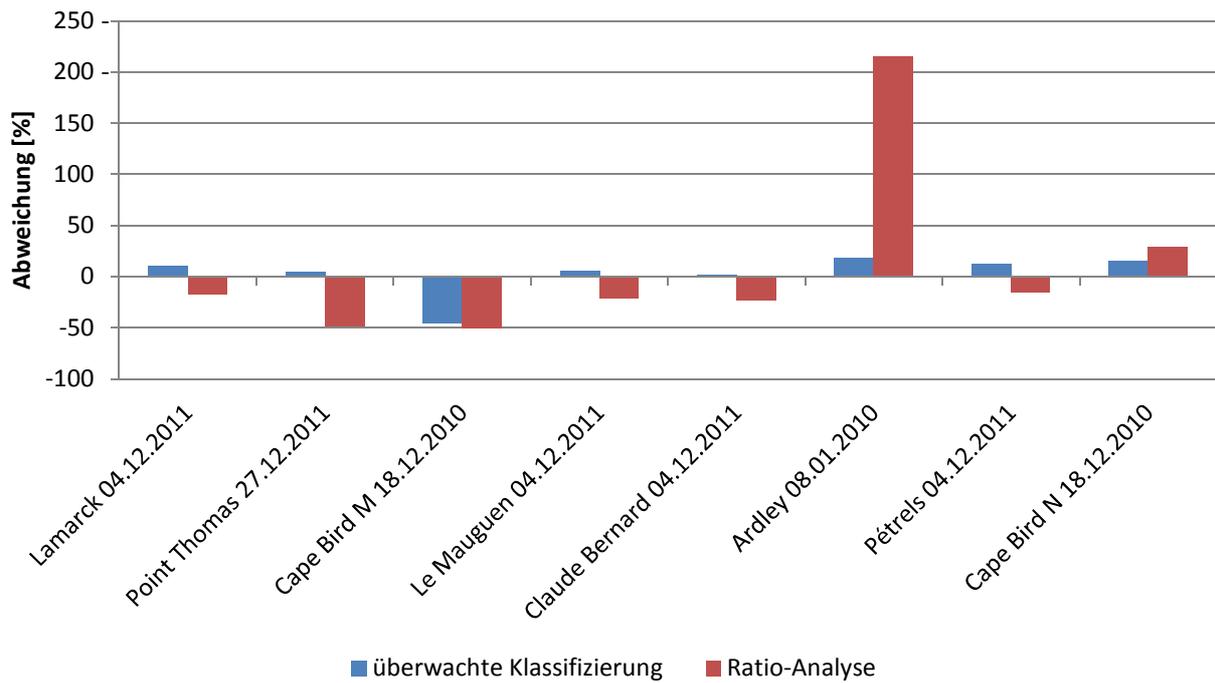


Abbildung 103: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, für einzelne WorldView2-Aufnahmen

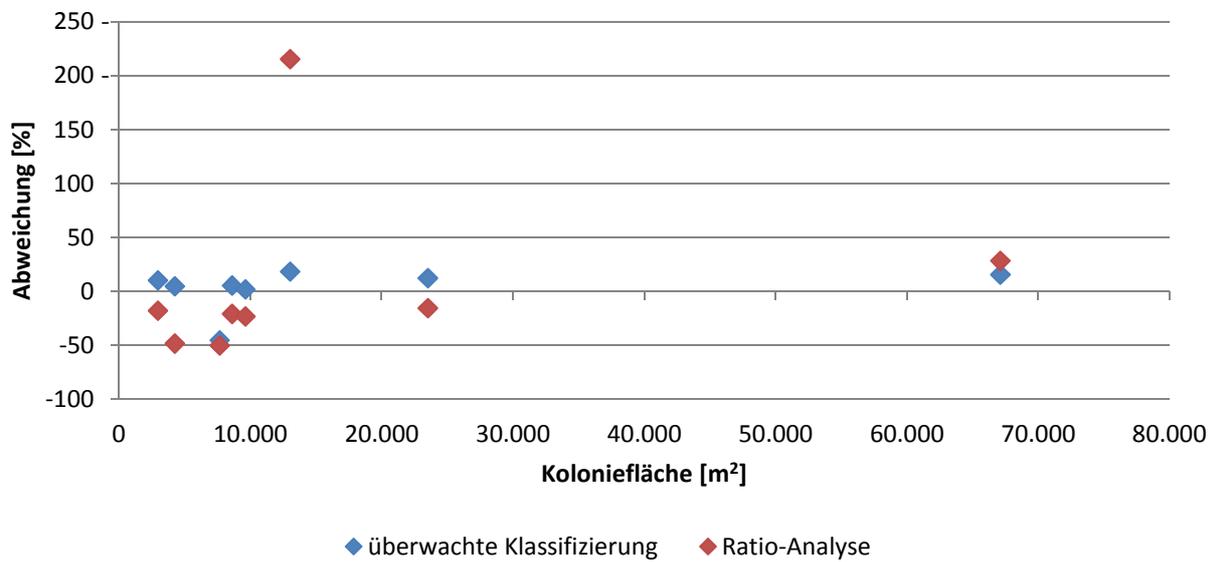


Abbildung 104: Vergleich der Abweichung der überwacht klassifizierten mit der Abweichung der mit Ratios klassifizierten Koloniefläche von der manuell Bestimmten, sortiert nach Koloniefläche für WorldView2-Aufnahmen

Werden alle Ergebnisse mit QuickBird2- und WorldView2-Aufnahmen miteinander verglichen, wird ersichtlich, dass die maximal ca. 10 cm höher räumlich aufgelösten und mit vier zusätzlichen Spektralkanälen ausgestatteten WorldView2-Aufnahmen keinen signifikanten Vorteil gegenüber den QuickBird2-Aufnahmen bei der Pinguinkoloniedetektierung haben. Der Unterschied in der maximalen räumlichen Auflösung wird in der Praxis dadurch relativiert, dass eine Zunahme des „Off-Nadir“-Winkels (Betrachtungswinkel) um 20° (max. 45° möglich) bei der Aufnahme der Satellitenbilder eine Verschlechterung der räumlichen Auflösung um ca. 10 % zur Folge hat. Um eine hohe zeitliche Abdeckung der Kolonien zu erreichen, müssen aber hohe „Off-Nadir“-Winkel in Kauf genommen werden. Auch die zusätzlichen Multispektralkanäle haben in der Praxis keinen Vorteil gebracht, da sie sich alle im sichtbaren oder nahen IR befinden und sich die Reflexion des Guanos dort nicht signifikant von den zu trennenden Landbedeckungsklassen unterscheidet.

4.2 Einschätzung der Detektierbarkeit von Veränderungen der Kolonien

Um Veränderungen zwischen verschiedenen Saisons detektieren zu können, musste zuerst überprüft werden, wie groß die Veränderungen in der detektierbaren Fläche innerhalb eines Jahres sind. Es sollte ausgeschlossen werden, dass detektierte Flächenänderungen aus Aufnahmen von verschiedenen Jahren auf die Variabilität innerhalb eines Jahres zurückzuführen sind. Anschließend konnte untersucht werden, ob und in welchem Maß Flächenänderungen der von Guano bedeckten Kolonieteile detektiert werden können. Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte dann analysiert werden, ob ein Zusammenhang zwischen detektierter Flächenänderung und der Änderung der Brutpaarzahl zwischen verschiedenen Saisons existiert.

4.2.1 Flächenänderungen in einer Saison

Um exemplarisch Flächenänderungen innerhalb einer Saison zu detektieren, standen vier Landsat7-Aufnahmen von Cape Bird (Saison 2010/2011) und drei von Adélie-Land (Saison 2008/2009) zur Verfügung. Es wurde für beide Gebiete festgestellt, dass die detektierbare Fläche zum Ende der Saison zunimmt und bei Cape Bird nach der eigentlichen Brutsaison wieder abnimmt. Es wird angenommen, dass die Ursache dafür zum einem in einer zunehmenden Akkumulation von Guano mit fortschreitender Brutsaison liegt und zum anderen darin, dass die Aufnahmen vom Saisonbeginn meist Schneebedeckung zeigen wodurch tiefer gelegene Brutplätze von Schnee überlagert werden. Die maximalen Flächenänderungen innerhalb einer Saison für jede Kolonie sind in Tabelle 14 aufgeschlüsselt. Dort wird erkennbar, dass die gemessenen Änderungen bei allen Methoden relativ groß sind, wenn auch die manuelle Interpretation die geringsten Änderungen detektiert. Auffällig ist auch, dass nur für Cape Bird N bei allen Methoden moderate Änderungen ermittelt wurden. So scheinen mit Landsat7 bei großen Kolonien Flächenänderungen zwischen den Jahren erst ab einer Größe von mehr als 13 % mit der manuellen Bildinterpretation und bei mehr als 17 % mit der überwachten Klassifizierung oder Ratio-Methode erfasst werden zu können. Bei den kleineren Kolonien hingegen können Änderungen erst ab einer Größenänderung von 20 % bis 105 % detektiert werden, was den praktischen Nutzen der Veränderungsanalyse mit Landsat7-Aufnahmen bei kleinen Kolonien in Frage stellt. Da aber bei dieser Analyse nur eine Saison und nur zwei Kolonien betrachtet wurden,

sind die Ergebnisse nicht repräsentativ und sollten durch weitere Zeitreihenanalysen überprüft werden.

Tabelle 14: Maximale gemessene Flächenänderung innerhalb einer Saison für Landsat7

	Claude Bernard [%]	Lamarck [%]	Le Mauguen [%]	Pétrels [%]	Cape Bird N [%]	Cape Bird M [%]
Manuelle Interpretation	11	17	24	3	13	67
Überwachte Klassifizierung	20	47	76	55	17	23
Ratio-Analyse	40	69	34	39	16	105

4.2.2 Detektierbarkeit von Änderungen der Brutpaarzahl

Grundannahme für die Detektierung von Veränderungen der Anzahl der besetzten Nester ist, dass diese mit Flächenänderungen der Kolonien korrelieren. Der Umweg über die Flächenänderung muss gegangen werden, da einzelne auf Fels brütende Pinguine nicht mit Sicherheit flächendeckend detektierbar sind. Aus diesem Grund wurden die detektierten Flächenänderungen von Landsat7- und QuickBird2-Aufnahmen aus verschiedenen Jahren mit den Änderungen der besetzten Nester verglichen. Da aber nur Bodenzählungen und Kartierungsdaten von Ardley Island für eine QuickBird2-Aufnahme aus der Saison 2005/2006 vorliegen, konnten die gemessenen Änderungen nicht verifiziert, sondern lediglich auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Keine verwertbaren Ergebnisse hinsichtlich Veränderungen von Pinguinkolonien der Arten *P. papua*, *P. antarctica* und *P. adeliae* ergab die multitemporale Analyse von mehreren aufeinanderfolgenden SAR-Aufnahmen mit gleicher Aufnahmegeometrie für Ardley Island, Point Thomas sowie Kopaitic Island/Schmidt Peninsula.

Landsat7

Für Adélie-Land wurde die Veränderung zwischen vier und für Cape Bird zwischen zwei Landsat7-Aufnahmen aus unterschiedlichen Saisons untersucht. Die Analysen der Kolonien von Adélie-Land und Cape Bird M ergaben überwiegend unplausible Ergebnisse. Die Ursache dafür wird in der geringen räumlichen Auflösung von Landsat7 sowie der geringen Größe der Kolonien gesehen. Die detektierten unplausiblen Flächenänderungen werden zu stark von den methodisch bedingten Ungenauigkeiten beeinflusst und weniger durch tatsächliche Änderungen in der Koloniefäche. Für die große Kolonie Cape Bird N hingegen wurde für die beobachteten Jahre festgestellt, dass keine Korrelation zwischen Flächenänderung und Änderung der besetzten Nester besteht. Für den Zeitraum von 2001 bis 2007 fand zwar eine Verdopplung der absoluten Anzahl besetzter Nester statt, es wurde aber keine signifikante Flächenänderung festgestellt. Die Ursache für diese Beobachtung liegt vermutlich darin, dass bevor eine Ausbreitung in der Fläche stattfindet – und damit auch die optimalen Nistplatzbereiche verlassen werden – es erst zu einer Dichtezunahme innerhalb der Nestgruppen kommt. Erst wenn ein bestimmter Schwellwert überschritten wird, kommt es zu einer flächenhaften Ausbreitung der Kolonie (vgl. Mustafa et al. 2005). Dass extreme Dichteschwankungen zwischen 0,1 bis 3,1 Brutpaaren pro m² vorkommen, haben Woehler und Riddle (1998) gezeigt.

Die Ergebnisse der Flächenmessungen der überwachten Klassifizierung und der Ratio-Methode wichen deutlich von denen der manuellen Abgrenzung ab (50 - 80 %), so dass praktisch nur sehr große Flächenänderungen sicher mit Hilfe dieser Methodik detektiert werden können.

QuickBird2 & WorldView2

Die multitemporale Analyse von QuickBird2-Aufnahmen konnte für drei Kolonien an je zwei unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt werden. Mit der manuellen Bildinterpretation wurden für die Kolonien von Adélie-Land nur bei großen Flächenänderungen (>26 %) und großer Änderung der Zahl besetzter Nester (>15 %) eine Korrelation zwischen beiden festgestellt. Das kann einerseits daran liegen, dass kleine Flächenänderungen aufgrund von Messungenauigkeiten der Methode nicht detektiert werden können, aber andererseits auch bedeuten, dass Flächenänderungen erst ab einer bestimmten Dichtezunahme von besetzten Nester pro m² stattfinden. Für Ardley Island hingegen konnte keine Korrelation festgestellt werden (vgl. Mustafa et al. 2005) und bei Torgersen Island ist nicht eindeutig klärbar, ob die gefundene Korrelation auf tatsächliche Flächenänderungen oder auf aufnahmebedingte Ursachen zurückzuführen ist. Zweifelsfrei konnte eine Flächenabnahme bei Point Thomas und eine Flächenzunahme bei der wenige Kilometer südlich gelegenen Pieter J. Lenie Field Station festgestellt werden. Ein Zusammenhang zu einer möglichen Änderung der Zahl besetzter Nester war aufgrund fehlender Zählzeiten nicht möglich. Die Untersuchungen von Cape Bird N stützen die Beobachtungen, die mit Landsat7 gemacht wurden, denn auch mit den QuickBird2-Aufnahmen war keine Flächenänderung messbar. Allerdings lagen für diese QuickBird2-Aufnahmen ebenfalls keine Zählzeiten der besetzten Nester vor.

Auch mit den QuickBird2-Aufnahmen kommt es bei der überwachten Klassifizierung und Ratio-Analyse zu relativ starken Abweichungen im Vergleich zur manuellen Abgrenzung. Wobei die überwachte Klassifizierung mit max. 27 % deutlich genauere Ergebnisse liefert als die Ratio-Analyse mit max. 45 % Abweichungen von der manuellen Abgrenzung.

WorldView1

Aufgrund nicht vorhandener historischer Aufnahmen sind keine konkreten Aussagen über die Eignung von WorldView1-Aufnahmen zur Veränderungsanalyse möglich. Die Untersuchungen der Einzelaufnahmen und die Ergebnisse von Guinet et al. (1995) weisen aber darauf hin, dass Veränderungen der Koloniefäche mit panchromatischen Aufnahmen detektiert werden können, wenn deren ungefähre Ausdehnung *a priori* bekannt ist und sie auf kontrastreichem Untergrund liegen.

4.3 Abschätzung der Effizienz des Verfahrens und der Möglichkeiten zur Automatisierung

Die Automatisierbarkeit der Auswertungsprozedur wurde für die überwachte Klassifizierung und Ratio-Analyse für Landsat7, QuickBird2 und WorldView2 getestet. Dabei wurden jeweils regionale (auf Kolonien einer Region mit ähnlichen Landbedeckungsklassen angepasste) und überregionale (auf alle Kolonien verschiedener Regionen angepasste) Signaturkataloge und Ratiokombinationen für die überwachte Klassifizierung und Ratio-Analyse erstellt und getestet. Da mit TerraSAR-X SAR-Daten keine Pinguinkolonien der Arten *P. papua*, *P. antarctica* und *P.*

adeliae (Esels-, Zügel-, und Adéliepinguin) detektiert werden konnten, war es auch nicht möglich die Automatisierung mit diesen Daten zu testen.

Landsat7

Nur für Landsat7 standen ausreichend Aufnahmen zur Verfügung, um die Automatisierung der Analysemethoden hinreichend zu testen. So konnte insgesamt auf 7 Aufnahmen für die Erstellung regionaler und bis zu 15 Aufnahmen für die Erstellung überregionaler Signaturkataloge bzw. Ratiokombinationen zurückgegriffen werden. Denn die in diesem Projekt angewandten automatisierten Analysemethoden benötigen ein möglichst breites Spektrum an spektralen Variationen der in den Aufnahmen vorkommenden Landbedeckungsklassen.

Die überwachte Klassifizierung sowie die Ratio-Analyse lieferten für alle getesteten Kolonien verwertbare Ergebnisse. Es konnten bei allen Aufnahmen von Cape Bird, Adélie-Land und Kopaitic Island die Kolonien detektiert werden. Dabei machte es keinen Unterschied, ob regionale oder überregionale Analysen durchgeführt wurden. Die Aussagekraft beider Analysemethoden war stark von der Flächengröße der zu detektierenden Kolonie abhängig. So waren die Abweichungen von der manuellen Abgrenzung wiederum nur bei Cape Bird N so gering, dass auch kleine Änderungen der Koloniefäche sicher detektiert werden konnten. Nicht getestet werden konnte die Detektierbarkeit in der Nähe von Gebieten mit großen Vegetationsflächen. Die Probleme bei der Detektierung der Kolonie Point Thomas weisen darauf hin, dass Vegetation in der Nähe von Kolonien die Automatisierbarkeit erschweren kann. Die Vegetation ist auch ein wichtiger Punkt bei der Unterscheidung der beiden Analysemethoden: Mit dem Ratio-Ansatz war es in einem Test nicht möglich, Guano von Cape Bird und die Vegetation von Point Thomas zu trennen. Hingegen weisen die Erfahrungen mit der überwachten Klassifizierung in diesem Projekt darauf hin, dass eine solche Trennung möglich sein kann. Eine Anwendung des überregionalen Signaturkatalogs auf King George Island, der aus den Aufnahmen von Cape Bird, Adélie-Land und Kopaitic Island erstellt wurde, erwies sich als nicht erfolgreich. Prinzipiell bietet sich die Antarktis aber aufgrund der vergleichsweise geringen Variabilität der Landbedeckungsklassen für die Automatisierung an. So wurden mit dem überregionalen Signaturkatalog zu Testzwecken auch weitere zuvor nicht betrachtete Aufnahmen von der Region Cape Bird mit der überwachten Klassifizierung und Ratio-Analyse klassifiziert. Es zeigte sich, dass zwei weitere, dem Bearbeiter bisher unbekannt Kolonien (auf Beaufort Island und Cape Crozier) detektiert werden konnten. Dabei wurde allerdings auch das Problem von Fehlklassifizierungen deutlich, denn die Ratio-Methode klassifizierte in den antarktischen Trockentälern fälschlicherweise helles Gestein als Guano. Um derartige Fehler zu minimieren, wäre es sinnvoll, nur die Küstenstreifen und Inseln statt der gesamten Landsat7-Aufnahmen zu klassifizieren.

QuickBird2 & WorldView2

Zur Einschätzung von QuickBird2 standen nur maximal je zwei Aufnahmen derselben Kolonie zu Verfügung, für WorldView2 sogar nur eine. Daher konnte keine aussagekräftige regionale Analyse mit der überwachten Klassifizierung und der Ratio-Analyse durchgeführt werden. Auch für die überregionale Auswertung standen zu wenige unter vergleichbaren Bedingungen aufgenommene Aufnahmen zur Verfügung, um eine sichere Aussage über die Möglichkeit der Automatisierbarkeit abzuleiten. Die dennoch durchgeführten Analysen haben ergeben, dass zumindest für die Aufnahmen von Cape Bird und Adélie-Land automatisierte Auswertungen

möglich scheinen. Sicher ausgeschlossen werden kann dagegen die automatisierte Ratio-Analyse von Ardley und Torgersen Island, da sich dort der Guano nicht ohne signifikante Fehlklassifikationen von anderen Landbedeckungsklassen trennen lässt. Zusammenfassend scheint es, dass eine Automatisierung mit den in dieser Untersuchung an QuickBird2 und WorldView2 getesteten Methoden deutlich schwieriger zu erreichen ist, als mit den Landsat7-Aufnahmen. So kommt es zu deutlich mehr Fehlklassifikationen. Der Grund dafür liegt in der hohen räumlichen Auflösung und einer damit einhergehende starken kleinräumigen Variabilität der Landbedeckungsklassen.

5 Vorschläge zur Implementierung eines internationalen Monitoring Projektes

Voraussetzung für die Etablierung eines antarktischen Monitorings von Pinguinpopulationen ist die Zusammenarbeit von Wissenschaft (Scientific Committee on Antarctic Research - SCAR) und Politik (Antarctic Treaty Consultative Meeting - ATCM) unter Einbeziehung weiterer Akteure (z.B. Convention of the Conservation of Antarctic Marine Living Resources - CCAMLR). Neben dem politischen Willen ist hier vor allem die Verständigung (Bereitschaft zum Datenaustausch), eine gesicherte Finanzierung und nicht zuletzt die Tatkraft der einschlägigen Wissenschaftler notwendig. Aus diesem Grund sollte diese Initiative in den genannten Gremien diskutiert und gemeinschaftlich Ziele und Methoden entwickelt werden, die für alle Beteiligten konsensfähig sind.

Lückenlose Langzeitdatensätze für antarktische Vogelbestände sind in der Praxis selten verfügbar. Das gilt auch für die in der Antarktis brütenden Pinguinarten. Eine antarktische flächendeckende Erfassung ist bisher nur für den Kaiserpinguin realisiert worden (Fretwell et al. 2012). Voraussetzung für die antarktische Erfassung der drei *Pygoscelis*-Arten (Adélie-, Zügel- und Eselspinguin) sowie des Goldschopfpinguins (*Eudyptes chrysolophus*) ist die Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung o.g. Antarktischgremien.

Die SCAR „Expert Group on Birds and Marine Mammals“ (SCAR EG-BAMM) wird als der geeignetste Koordinator zur Sammlung von Daten angesehen. Diese „Expert Group“ gehört zur „Standing Scientific Group on Life Sciences“ (SSG-LS). Die SCAR EG-BAMM bündelt gemäß ihrer Statuten das Wissen der Experten auf dem Gebiet der Ornithologie und Säugerkunde in der Antarktis und unterstützt Forschung, die die Rolle der Vögel und Robben in antarktischen marinen und terrestrischen Ökosystemen beleuchtet (siehe <http://www.egbamm.scar.org>). Die Gruppe trägt auch zum Schutz und zum Management antarktischer Vögel und Säuger durch die Nutzung und Interpretation von verfügbaren wissenschaftlichen Daten bei. SCAR EG-BAMM sammelt u.a. Informationen über Status und Trends von Populationen einzelner Arten im antarktischen Vertragsgebiet. Seit den 1980er Jahren werden durch das ehemalige SCAR „Bird Biology Subcommittee“ (BBS) der „Working Group on Biology“ Informationen gesammelt und publiziert, die letzte Übersicht ist jedoch mehr als zehn Jahre alt (Woehler et al. 2001). Das „Australian Antarctic Data Centre (AADC)“ entwickelte und verwaltete eine passwortgeschützte webbasierte Datenbank, deren Langzeitdaten Grundlagen für diese Übersicht waren. Geplant ist, die Ergebnisse dieses Projektes im Rahmen der XXXII „SCAR and Open Science Conference“, die im Juli 2012 in Portland, Oregon, USA, stattfindet, vorzustellen und innerhalb der EG-BAMM zu diskutieren. Die Ergebnisse des EG-BAMM-Treffens finden Eingang in die SCAR SSG-LS.

Parallel hierzu plant Deutschland, die Ergebnisse des Projektes in die nächste Jahrestagung der Konsultativstaaten (ATCM) und deren Umweltausschuss (Committee for Environmental Protection - CEP) einzubringen. Das Umweltbundesamt hat bereits im Vorfeld des Projektes Kontakt zu CEP-Vertretern anderer Vertragsstaaten aufgenommen, um die mit dem Projekt verbundene Monitoringinitiative einzuleiten und um Unterstützung zu werben.

Weiterhin ist eine Verständigung mit Vertretern des Übereinkommens über die Erhaltung lebender Meeresschätze (CCAMLR) wünschenswert. Dies wird als wichtig angesehen, da sich CCAMLR in seinem „Ecosystem Monitoring Program“ (CEMP) mit der Erfassung von Pinguinbeständen in der Antarktis befasst und daher über einschlägige Erfahrungen verfügt sowie entsprechende Standards formuliert hat (CEMP Standard Methods).

6 Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Möglichkeiten und Grenzen des Monitorings von Pinguinkolonien in der Antarktis mittels Satellitenaufnahmen beschrieben.

Wie ließe sich nun ein antarktisches Monitoring von Pinguinpopulationen methodisch realisieren? Für die weitere Arbeit kann aus vorliegender Studie ein aus drei zeitlich parallelen Untersuchungsebenen bestehendes Vorgehen abgeleitet werden:

Ebene 1

Es konnte gezeigt werden, dass mit Landsat7-Aufnahmen große Kolonien nicht auf Eis brütender Pinguine (>1.000 - 5.000 besetzte Nester) detektierbar sind, jedoch aufgrund der relativ geringen räumlichen Auflösung damit nur eine begrenzte Ergebnispräzision erreichbar ist. Dafür sind die Daten kostenfrei und werden flächendeckend aufgenommen; sie liegen für die gesamte Antarktis z.T. seit 1999 vor und können sehr effizient mit einem hohen Automatisierungsgrad ausgewertet werden. Daher wird vorgeschlagen, Landsat7-Aufnahmen flächendeckend für alle eisfreien, küstennahen Gebiete der Antarktis jährlich durchzuführen, um insbesondere große Adélie-, aber auch Zügel-, Esel- und Goldschopfpinguinkolonien südlich 60° Süd zu detektieren. Parallel dazu sollten vorhandene Literaturdaten gesammelt und mit diesen Satellitendaten verglichen werden. Um den Unsicherheitsbereich, z.B. bei Interferenz mit der Vegetation (insbesondere im Bereich der Antarktischen Halbinsel) zu verringern, ist die Klärung der offenen Fragen zur Detektierbarkeit notwendig (siehe Kap. 4). Optional wäre zudem eine Untersuchung von Landsat7-Aufnahmen aus früheren Jahren interessant, um Veränderungen der Koloniegrößen aus dieser Zeit zu detektieren.

Ebene 2

Um Veränderungen von Kolonieausdehnungen quantitativ erfassen zu können, müssten zusätzlich kostenpflichtige Aufnahmen von hoch auflösenden Sensoren (z.B. QuickBird2 oder WorldView2) in Auftrag gegeben werden. Damit könnten insbesondere im Bereich der Antarktischen Halbinsel, wo Adéliepinguine zum Teil starke Bestandsveränderungen zeigen, selektiv detaillierte Daten (im Vergleich zu den Landsat7-Aufnahmen) von ca. 30 repräsentativen Kolonien erlangt werden. Die Auswertung könnte mit vertretbarem Aufwand durch manuelle Bild-

interpretation erfolgen. Parallel dazu sollten diese Kolonien mindestens einmal während des Untersuchungszeitraums besucht und gezählt sowie fernerkundlich relevante Informationen (z.B. Reliefstruktur, Vegetationsbedeckung, Gestein) aufgenommen werden. Das könnte in Absprache mit den beteiligten Ländern z.B. auch bei Logistikfahrten der Versorgungsschiffe auf dem Weg zu den Stationen geschehen. Auch hierfür wäre eine internationale Kooperation notwendig und sinnvoll.

Ebene 3

An zehn ausgewählten Kolonien bzw. zusammenhängenden Nestgruppen sollten parallel zu den hoch aufgelösten Satellitenaufnahmen (vgl. Ebene 2) gezielt Artenzusammensetzung und Dichte (Adulte mit Juvenilen, gegebenenfalls bis zum Kindergartenalter) im Verlaufe der Brut-saison vor Ort ermittelt werden. Das schließt die Kartierung der Koloniegrenzen mittels präziser Satellitennavigation (GPS/GLONASS) sowie die Erfassung der Individuenzahl gegebenenfalls unter Zuhilfenahme von Luftbildern (z.B. Gasballonaufnahmen) ein. Mit der Erlangung einer umfangreicheren Datenbasis als in der vorliegenden Untersuchung wird das Ziel verfolgt, eine Verbesserung der Korrelation zwischen der mit Hilfe der Satellitenaufnahmen ermittelten Koloniefächen und der Anzahl der besetzten Nester zu erreichen (siehe Kap. 4.1). Dazu gehören auch Untersuchungen zu Bestandsveränderungen über die Jahre und innerhalb einer Saison sowie zur Unterscheidung der Arten. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass im Rahmen dieser Pilotstudie Zügel- und Eselspinguine aus Gründen der Datenverfügbarkeit nur eine untergeordnete Rolle spielten. Wie auch die Goldschopfpinguine sollten sie in die weitere Betrachtung einbezogen werden. Letztendlich ist durch die Bearbeitung dieser Fragestellungen auch eine Verbesserung der Automatisierbarkeit des Verfahrens zu erwarten.

Kostenschätzung für Satellitenbilder

Falls ein Monitoringprogramm wie hier vorgeschlagen mit einer Projektlaufzeit von drei Jahren durchgeführt werden sollte, würden schätzungsweise Kosten für die Beschaffung der Satellitendaten in Höhe von etwa 250.000 US\$ entstehen (Ebene 1: keine Kosten, Ebene 2: 170.000 US\$ und Ebene 3: 80.000 US\$).

Weitere Untersuchungen

Die Genauigkeit der semiautomatischen und automatischen Bildauswertung, sowohl bei Landsat7-Aufnahmen als auch bei räumlich hoch aufgelösten Satellitenaufnahmen (z.B. Quick-Bird2 oder WorldView2), sollte durch weitere Untersuchungen verbessert werden. Als besonders viel versprechend gelten u.a. objektbasierte Ansätze als Ergänzung zu den in diesem Projekt untersuchten pixelbasierten Klassifikationen. Um die automatische Bildauswertung im speziellen zu verbessern, werden mehr Satellitenaufnahmen (Zeitreihen) einer Kolonie benötigt (vgl. Ebene 3).

Die vorliegende Studie wird im September 2012 um Untersuchungsergebnisse der im antarktischen Winter brütenden Kaiserpinguine erweitert. Dabei werden Aufnahmen mit WorldView2 und RapidEye jeweils kurz vor der Brutsaison im April bis Mai und kurz nach der Brutsaison im Juli bis September von den Kaiserpinguinkolonien in der Umgebung der Neumayer-Station III

und Dumont d'Urville gemacht. Desweiteren werden Terra-SAR-X-Aufnahmen derselben Kolonien während der Brutzeit im Juli gemacht. Zudem sind dort für die Saison 2012 Bodenzählungen geplant.

7 Quellenverzeichnis

- Ainley, D.G., Clarke, E.D., Arrigo, K., Fraser, W.R., Kato, A., K.J. Barton and P.R. Wilson (2005): Decadal-scale changes in the climate and biota of the Pacific sector of the Southern Ocean, 1950s to the 1990s. *Antarctic Science* 17:171-182.
- Ainley, D., Russell, J., Jenouvrier, S., Woehler, E., Lyver, P.O., W.R. Fraser and G.L. Kooyman (2010): Antarctic penguin response to habitat change as Earth's troposphere reaches 2 degrees C above preindustrial levels. *Ecological Monographs* 80:49-66.
- Albertz, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt.
- Ashraf, S., L. Brabyn and B.J. Hicks (2011): Image data fusion for the remote sensing of freshwater environments. *Applied Geography* 32: 619-628.
- Ballard, G., Toniolo, V., Ainley, D.G., Parkinson, C.L., K. R. Arrigo and P. N. Trathan (2010): Responding to climate change: Adelie Penguins confront astronomical and ocean boundaries. *Ecology* 91:2056-2069.
- Barber-Meyer S.M., G.L. Kooyman and P.J. Ponganis (2007): Estimating the relative abundance of emperor penguins at inaccessible colonies using satellite imagery. *Polar Biology* 30 (12): 1565-1570.
- Bhikharidas, A.K. and J.A. Peterson (1995): Mapping Adeliè penguin rookeries in the Prydz Bay area, East Antarctica, using remotely sensed data: a comparison between SPOT HRV and Landsat TM. In Dixon, G. and Aitken, D. (eds) *Proceedings of the IAG Conference*, Monash University, Sept 1993: 6-11. Sponsors: MPA (microBRIAN); The Australian Research Council.
- Chavez, P.S. (1996): Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (9): 1025-1036.
- Cole, J. W. and A. Ewart (1968): Contributions to Volcanic Geology of Black Island Brown Peninsula and Cape Bird Areas McMurdo Sound Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 11: 793-828.
- DigitalGlobe (2012): DigitalGlobe Core Imagery Products Guide.
http://www.digitalglobe.com/downloads/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf.
- ERDAS (2010): ERDAS IMAGINE 2011 On-Line Documentation. Norcross, GA: ERDAS Inc.
- ERDAS Field Guide™ (2010): Norcross USA

- Fraser W.R. and D.L. Patterson (1997): Human disturbance and longterm changes in Adélie penguin populations: a natural experiment at Palmer Station, Antarctic Peninsula. In: Battaglia B., Valencia J., Walton D.W.H. (eds) Antarctic communities: species, structure and survival, 63. Cambridge University Press, London, pp 445–452
- Fretwell, P. T., LaRue, M., Morin, P., Kooyman, G.L., Wienecke, B., Ratcliffe, N., Fox, A.J., Fleming, A.H., C. Porter and P.N. Trathan (2012): An emperor penguin population estimate: the first global, synoptic survey of a species from space. PloS ONE.
- Giesen J. (2006): Sonnenschein-Applet <<http://www.jgiesen.de/uv/index.htm>> (Zugriff: 16.03.2012) (Stand: 29.07.2006).
- Guinet, C., P. Jouventin and J. Malacamp (1995): Satellite remote sensing in monitoring change of sea-birds: use of Spot Image in king penguin population increase at Ile aux Cochons, Crozet Archipelago, Polar Biol. 15: 511-515.
- Hadjimitsis, D.G. and C.R.I. Clayton (2008): The use of an improved atmospheric correction algorithm for removing atmospheric effects from remotely sensed images using an atmosphere–surface simulation and meteorological data. Meteorological applications 15 (3): 381-387.
- Halpern, M. (1965): The geology of the General Bernardo O'Higgins Area, northwest Antarctic Peninsula, in Geology and Paleontology of the Antarctic. Antarct. Res. Ser. 6: 177-209.
- Jablonski, B. (1986): Distribution, abundance and biomass of a summer community of birds in the region of the Admiralty Bay (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica) in 1978/1979. Pol. Polar Res 7: 217-260.
- Jubier, X.M. (2006): World Weather and Meteorological Data <http://xjubier.free.fr/en/site_pages/SolarEclipseWeather.html> (Zugriff: 15.03.2012) (Stand: 03.01.2006).
- Lillesand, T.M., R.W. Kiefer and J.W. Chipman (2004): Remote Sensing and Image Interpretation. Fourth Edition. New York: Wiley. Chapter 7: Digital Image Processing, 491-637.
- Lynch, H.J., White R., A.D. Black and R. Naveen (2012): Detection, differentiation, and abundance estimation of penguin species by high-resolution satellite imagery. Polar Biol; online first: DOI 10.1007/s00300-011-1138-3
- Micol, T. and P. Jouventin (2001): Long-term population trends in seven Antarctic seabirds at Pointe Geologie (Terre Adélie) - Human impact compared with environmental change. Polar Biology 24: 175-185.

- Moran, M.S., Jackson, R.D., P.N. Slater and P.M. Teillet (1992): Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment* 41: 169-184.
- Mustafa, O., Bassin, M., Chupin, I., Flores, M., Godoy, C., Peter, H.-U., Pfeiffer, S., M.J. Rosello and J. Valencia (2005): Changes in the special distribution of a 3-species penguin rookery at Ardley Island (South Shetland Islands). SCAR Conference, International SCAR Biology Symposium, Curitiba, Brazil, p.220.
- NASA (2011): Landsat 7 Science Data Users Handbook. In: National Aeronautics and Space Administration. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf.
- Padwick, C., Deskevich, M., F. Pacifici and S. Smallwood (2010): WorldView-2 Pan-Sharpening. In. 2010 ASPRS Conference in San Diego.
- Peucat, J.J., Menot, R.P., O. Monnier and C. M. Fanning (1999): The Terre Adelie basement in the East-Antarctica Shield: geological and isotopic evidence for a major 1.7 Ga thermal event; comparison with the Gawler Craton in South Australia. *Precambrian Research* 94: 205-224.
- Peter, H.U., Buesser, C., O. Mustafa and S. Pfeiffer (2008): Risk assessment for Fildes Peninsula and Ardley Island, and development of management plans for their designation as Special Protected or Specially Managed Areas. Research Report UBA: Chapter 4.5. Flora and Fauna.
- Sander, M., Balbão, T.C., Polito M.J., E.S. Costa and A.P.B. Carneiro (2006): Decline of the breeding population of *Pygoscelis antarctica* and *Pygoscelis adeliae* on Penguin Island, South Shetland, Antarctica. *Polar Biology* 30:659–661
- Schwaller M.R., W.S. Benninghoff and C.E.Jr. Olson (1984): Prospects for satellite remote sensing of Adelie penguin Rookeries, *International Journal of Remote Sensing*, 5(5): 849-853
- Schwaller, M.R., Olson, C.E., Zhenqui M., Z. Zhiliang and P. Dahmer (1989): A remote sensing analysis of Adeliè penguin rockeries. *Remote sens. Environ.* 28: 199-206.
- Smellie, J.L., Pankhurst, R.J., M.R.A. Thomson and R.E.S. Davies (1984): The Geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, Geochemistry and Evolution. British Antarctic Survey Scientific Report 87.
- Smith, R.C., Fraser, W.R., S.E. Stammerjohn and M. Vernet. (2003): Palmer long-term ecological research on the Antarctic marine ecosystem. *ANTARCTIC RESEARCH SERIES* 79:131-144.
- Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., M.P. Lenney and S.A. Macomber (2001): Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment* 75: 230-244.

- Trivelpiece, W Z., Hinke, J.T., Miller, A.K., Reiss, C.S., S.G. Trivelpiece and G.M. Watters (2011): Variability in krill biomass links harvesting and climate warming to penguin population changes in Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108:7625-7628.
- Turner, J., Bindschadler, R., Convey, P., di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D.A., P. A. Mayewski and C. P. Summerhayes (2009): Antarctic climate change and the environment Scientific Committee for Antarctic Research, Cambridge, UK.
- Vijayaraj, V., C.G. O'Hara and N.H. Younan (2004): Pansharpening and Image Quality Interface. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Starkville.
- Wilson, P.R., Ainley, D.G., Nur, N., Jacobs, S.S., Barton, K.J., G. Ballard and J. C. Comiso (2001): Adelie penguin population change in the pacific sector of Antarctica: relation to sea-ice extent and the Antarctic Circumpolar Current. *Marine Ecology-Progress Series* 213:301-309.
- Woehler E.J. and M.J. Riddle (1998): Spatial relationships of Adelie penguin colonies: implications for assessing population changes from remote imagery. *Antarctic Science* 10 (4): 449-454
- Woehler, E.J., Cooper, J., Croxall, J.P., Fraser, W.R., Kooyman, G.L., Miller, G.D., Nel, D.C., Patterson, D.L., Peter, H.-U., Ribic, C.A., Salwicka, K., W.Z. Trivelpiece and H. Weimerskirch (2001): A statistical assessment of the status and trends of Antarctic and Subantarctic seabirds. Report on SCAR BBS Workshop on Southern Ocean seabird populations. SCAR, Montana, 45 pp.

8 Danksagung

Wir bedanken uns bei European Space Imaging (EUSI) aus München (Germany) für die kostenlose Akquirierung und Bereitstellung von zehn QuickBird2-, vier WorldView2- und zwei WorldView1-Aufnahmen, ohne die das Projekt in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Wir bedanken uns des Weiteren für die Bereitstellung von Bodendaten bei:

Korczak-Abshire, Malgorzata und Body, Artur von der Polish Academy of Sciences Department of Antarctic Biology aus Warsaw (Poland)

Fraser, William von der Polar Oceans Research Group aus Sheridan (USA)

Lyver, Philip vom Landcare Research aus Manaaki Whenua (New Zealand)

Weimerskirch, Henri vom Chizé Centre of Biological Studies (CNRS), Villiers en Bois (France)

Guajardo, Claudio und Jiménez, Christian vom Departamento Antártico del Ejército (DAE) (Chile)

Lindh, Ulf und Sanzana, David vom Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Germany)