

TEXTE

18/2012

# Vorstudie zum Monitoring von klimabedingten Ver- änderungen von Pinguin- kolonien in der Antarktis mittels Satellitenbildern

Kurzfassung



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**

### **Kurzfassung**

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 eine deutsche und englische Langfassung.

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](mailto: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

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. 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. 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. 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 oder mit punktuellen Luftbildaufnahmen von Flugzeugen und Helikoptern durchgeführt. Diese Methoden sind vergleichsweise aufwendig und sehr kostenintensiv. Die damit erzielten kleinräumigen Bestandsaufnahmen dienen meist der Fortführung wertvoller Langzeitdatensätze. Aufgrund der Vielzahl der Kolonien (es ist davon auszugehen dass 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. **Ziel des vorliegende Projektes** war deshalb die **Realisierbarkeit eines möglichst flächendeckenden repräsentativen Pinguinmonitorings zu überprüfen**.

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

Im Zuge des Projektes wurden **sechs Testgebiete** ausgewählt, 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 genutzt wurden.

Die Auswertung der entsprechenden Aufnahmen sowie die Erstellung von Vorschlägen für ein Monitoringkonzept stellen eine 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.

## *Testgebiete*

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 sechs Standorte als Testgebiete festgelegt werden, für die die entsprechenden Bestandsdaten vorliegen. Dies waren die im Bereich der Antarktischen Halbinsel gelegenen Kolonien Ardley Island, Point Thomas, Torgersen Island und Kopaitic (bestehend aus Kopaitic Island und Schmidt Peninsula), sowie die südlicher, kontinental gelegenen Testgebiete Cape Bird (bestehend aus Cape Bird N und M) und Adélie-Land (bestehend aus Le Mauguen Island, Jean Rostand Island, Claude Bernard Island, Petrels Island und Lamarck Island).

In jedem dieser Gebiete wurden **Anfang Dezember 2011 Zählungen der Arten *P. pappua*, *P. antarctica* und *P. adeliae*** (Esels-, Zügel-, und Adéliepinguin) von verschiedenen Wissenschaftlern durchgeführt. Allerdings konnten die Zählungen des Testgebietes Cape Bird durch die dortigen Bearbeiter nicht rechtzeitig fertig gestellt und übermittelt werden. Desweiteren liegen für alle Gebiete (außer Kopaitic) historische Zählungen vor. 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.

## *Fernerkundungsdaten und deren Aufbereitung*

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. 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.

Zur Überprüfung der Verwendbarkeit von Radardaten wurden in dieser Studie **TerraSAR-X SAR-Daten** ausgewertet. TerraSAR-X ist ein X-Band-SAR-System mit 3,1 cm Wellenlänge. 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)). Ausgewertet wurden insgesamt 23 StripMap und 8 SpotLight TerraSAR-X-SAR-Aufnahmen. Vor der Auswertung fand eine Aufbereitung der Satellitenbilder, in Form von radiometrischen und geometrischen Korrekturen, statt.

#### *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.

#### *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. 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.

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 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.

Im Gegensatz zu Landsat7 werden von **WorldView1, WorldView2 und QuickBird2** 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 bekommen, 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. Ein Nachteil sind zudem die relativ hohen Anschaffungskosten (mindestens 1.800 US\$ pro aktueller Aufnahme).

### *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.

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 Koloniefläche mindestens 3.000 m<sup>2</sup> einnehmen und aus mehr als rund 1.000 - 5.000 besetzten Nestern bestehen.** 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 m<sup>2</sup> des Kolonieareals (die von Nestgruppen eingegrenzte Koloniefläche) keine Kolonien mit Landsat7 detektierbar. 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 Kolonieformen sind bei gleicher Koloniefläche 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.

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 Koloniefläche 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. Erkennbar ist, dass die Ergebnisse der Flächendetektion für einzelne Kolonien stark schwanken. Ersichtlich wird auch eine deutliche Verschlechterung der Klassifikationsergebnisse für beide Methoden mit abnehmender Flächengröße der Pinguinkolonien. Die **Koloniegrößenuntergrenze für noch quantitativ auswertbare Ergebnisse liegt bei etwa 40.000 m<sup>2</sup>.** Insgesamt lieferten beide Methoden vergleichbare Ergebnisse.

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.

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. Auch mit der **überwachten Klassifizierung und dem Ratio-Ansatz** 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 einer Aufnahme mit Nebel (Point Thomas 2011). Ein Zusammenhang zwischen der Qualität der Klassifizierungsergebnissen und der Größe der Koloniefäche besteht nicht. Es wurde zudem festgestellt, dass die überwachte Klassifizierung unter schlechten Bedingungen robustere 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 unterscheiden lassen. Aufgrund fehlender aktueller Zähl- bzw. Kartierungsdaten konnte diese Vermutung aber nicht verifiziert werden.

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. 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.

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.

#### *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.

#### *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. Beim Vergleich der drei Methoden zeigte sich, dass die gemessenen Änderungen bei allen Methoden relativ groß sind, wenn auch die mit der 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.

#### *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.

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. Dass extreme Dichteschwankungen zwischen 0,1 bis 3,1 Brutpaaren pro m<sup>2</sup> vorkommen, haben Untersuchungen anderer Autoren 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.

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 m<sup>2</sup> stattfinden. Für Ardley Island hingegen konnte keine Korrelation festgestellt werden 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.

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 anderer Autoren weisen aber darauf hin, dass Veränderungen der Koloniefäche mit panchromatischen Aufnah-

men detektiert werden können, wenn deren ungefähre Ausdehnung *a priori* bekannt ist und sie auf kontrastreichem Untergrund liegen.

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.

#### *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.

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 unbekannte 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.

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.

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.

#### *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. Voraussetzung für die antarktische Erfassung der drei *Pygoscelis*-Arten (Adélie-, Zügel- und Eselpinguin) 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 Säugetkunde in der Antarktis und unterstützt Forschung, die die Rolle der Vögel und

Robben in antarktischen marinen und terrestrischen Ökosystemen beleuchtet. 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. 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).

#### *Ausblick*

In den vorangegangenen Abschnitten wurden 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. 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 Bildinterpretation 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 Brutsaison 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 Kolonieflächen und der Anzahl der besetzten Nester zu erreichen. 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 Eselpinguine 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. QuickBird2 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.