



Multitemporale und kantenbasierte Analyseverfahren zur Detektion agrarischer Landnutzungsdynamiken auf Teneriffa

SEBASTIAN GÜNTHERT, SIMONE NAUMANN & ALEXANDER SIEGMUND, Heidelberg

Keywords: Veränderungsanalyse, Objektbasierte Bildanalysen, Canny-Algorithmus, Brachflächen, Kanarische Inseln

Zusammenfassung: Während bis Mitte des 20. Jahrhunderts fast ausschließlich agrarische Inwertsetzungsprozesse das Landschaftsbild Teneriffas prägten, spielen in jüngster Zeit vor allem der Tourismus und damit verbundene Wirtschaftssektoren eine maßgebliche Rolle bei der anthropogenen Umgestaltung des Raums. Der mit dieser Entwicklung einhergehende sozioökonomische Wandel von einer Agrar- zu einer Dienstleistungsgesellschaft führt letztlich zu einer verstärkten Aufgabe von landwirtschaftlichen Nutzflächen im ländlichen Raum. Die quantitative Untersuchung dieser agrarischen Landnutzungsdynamiken stellt das Hauptziel der folgenden Studie dar. Die Grundlage hierfür bildet die quantitative Auswertung objektbasierter Landnutzungsklassifizierungen von SPOT 1-Daten (1986/88), SPOT 4-Daten (1998) sowie RapidEye-Daten (2010) anhand eines modifizierten, multitemporalen Post-Klassifikations-Vergleichs. Darüber hinaus wird ein weiterer objektbasierter Klassifizierungsprozess zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas anhand hochauflösender RGB-Orthophotos vorgestellt. Hauptaugenmerk dieses Verfahrens liegt auf der kantenbasierten Detektion von Agrarflächen inklusive landwirtschaftlich stillgelegter Areale bzw. Sukzessionsbrachen. Die Ergebnisse zeigen auf, dass zahlreiche Ackerbauregionen insbesondere im humiden Norden der Insel durch kontinuierliche Flächenstilllegungen gekennzeichnet sind. Darüber hinaus wird deutlich, dass etwa ein Drittel der Gesamtfläche Teneriffas durch agrarische Nutzung geprägt ist. Etwa 72% dieser Fläche bestehen derzeit jedoch aus Sukzessionsbrachen.

Summary: *Multitemporal and edge-based analysis techniques for detecting agricultural land use dynamics on Tenerife.* Whereas, until the mid-20th century, mainly agricultural processes characterised the landscape structure of Tenerife, tourism and related economic sectors have had the greatest effect on the anthropogenic landscape transformation in recent times. The associated socioeconomic change from an agricultural to a service economy has led to an increased abandonment of agricultural land in rural areas. The quantitative analysis of these agricultural land use dynamics is the main objective of the following study. For this purpose a quantitative analysis of object-based land use classifications of SPOT 1-data (1986/88), SPOT 4-data (1998) as well as RapidEye-data (2010) has been done, based on a modified, multitemporal post classification comparison. Moreover, an additional object-based classification process for identifying the total agriculturally affected area of Tenerife on the basis of high-resolution RGB orthophotos is presented. This method focuses on the edge-based detection of agricultural land, including agricultural set-aside respectively successional fallow areas. The results obtained indicate, that many agricultural regions especially in the north of the island are characterised by continuous agricultural abandonment. In addition, the analysis shows that about one third of the total area of Tenerife is shaped by agricultural use. However, at present approximately 72% of this area consists of agricultural set-aside.

1 Einleitung

Das heutige Landschaftsbild Teneriffas, der mit 2.057 km² größten Insel des Kanarischen Archipels, kann als das Ergebnis einer beständigen kulturlandschaftlichen Entwicklung angesehen werden, die hauptsächlich mit dem Beginn der europäischen Kolonialisierung im 15. Jahrhundert ihren Anfang nahm und bis heute andauert. Bis Mitte des 20. Jahrhunderts prägten dabei fast ausschließlich landwirtschaftliche Inwertsetzungsprozesse das Landschaftsbild der Insel. Das gesamte Untersuchungsgebiet unterliegt somit einer flächenintensiven landwirtschaftlichen Nutzung, die grundsätzlich in zwei Arten unterteilt werden kann: Eine exportorientierte, hochentwickelte Intensivlandwirtschaft in Form von Plantagen und Gewächshauskulturen sowie eine traditionelle Landwirtschaft für die Produktion von Waren für den lokalen Markt. Letztgenannte wird vornehmlich in Form von Terrassenfeldbau betrieben. Durch die Anlage von meist aus Basaltgestein bestehenden Mauern können steile Hänge urbar gemacht werden. Auf ebeneren Flächen dienen die Basaltmauern zum Schutz vor Bodenerosion bei Starkregenereignissen (OTTO 2003, S. 59). Hauptanbauprodukte für den lokalen Markt sind vor allem Kartoffeln, Weintrauben und subtropische Früchte. Die exportorientierte Landwirtschaft umfasst hingegen den Anbau von Bananen, Tomaten und Schnittblumen (GÜNTHERT et al. 2011, VILLA et al. 2003).

In jüngerer Zeit – insbesondere seit den 1990er Jahren – spielen jedoch vor allem der Tourismus und damit verbundene Wirtschaftssektoren eine maßgebliche Rolle bei der anthropogenen Umgestaltung des Raums. Der mit dem Tourismusboom einhergehende sozioökonomische Wandel von einer Agrar- zu einer Dienstleistungsgesellschaft führt zu einer zunehmenden Versiegelung der Küstenzonen infolge verstärkter Siedlungsexpansionen und dem Ausbau weiterer, überwiegend touristisch bedingter Infrastruktur (NAUMANN 2008). Andererseits führt die Abwanderung der Bevölkerung und die Umorientierung der Erwerbstätigen von der Landwirtschaft hin zum lukrativen Tourismus zu einer verstärkten Aufgabe von landwirtschaftlichen Nutzflächen im Hinterland (POTT et al. 2003). Diese

Brachflächen bieten potenziellen Raum, auf dem sich angrenzende Ökosysteme durch sekundäre Sukzessionsprozesse wieder auf natürliche Weise ausbreiten können (FERNÁNDEZ-PALACIOS & WHITTAKER 2008).

Die vorliegende Studie zielt darauf ab, die räumlichen Veränderungsprozesse und -muster der landwirtschaftlichen Entwicklung der gesamten Insel im Rahmen des sozioökonomischen Wandels quantitativ zu identifizieren und insbesondere regionale Hot Spots landwirtschaftlicher Flächenveränderung zu erfassen, die durch eine kontinuierliche Agrarflächenabnahme oder -zunahme sowie eine besonders hohe Veränderungsintensität geprägt sind. Darüber hinaus soll eruiert werden, welche Areale bislang für landwirtschaftliche Zwecke inwertgesetzt wurden und wie hoch der Anteil rezent bewirtschafteter Agrarflächen bzw. landwirtschaftlich stillgelegter Areale an der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas ist. Die hierdurch gewonnenen Ergebnisse stellen die Grundlage zur Analyse und Bewertung des Regenerationspotenzials, das sich durch die Entstehung von Brachflächen für die teilweise stark anthropogen überprägten Pflanzenformationen der Insel, beispielsweise des kanarischen Lorbeerwaldes, ergibt (vgl. GÜNTHERT 2014).

2 Datengrundlage und -aufbereitung

Die Grundlage zur quantitativen Erfassung der agrarischen Landnutzungsveränderungen auf Teneriffa bilden objektbasierte Landnutzungsklassifizierungen (LU-Klassifizierungen) von 1986/88 (Overall Accuracy 90,9%), 1998 (OA 89,8%) und 2010 (OA 91,8%) (vgl. GÜNTHERT 2014). Diese basieren auf folgenden Satellitenbilddaten, die im Vorfeld ein umfangreiches Pre-Processing, bestehend aus einer Orthorektifizierung (SPOT), Koregistrierung (RapidEye), Atmosphärenkorrektion (ATCOR, Atmospheric Correction), spektralen Bildschärfung mittels des High-Pass-Filter Resolution Merge (SPOT) sowie arithmetischen Pixeloperationen zur Gewinnung weiterer Trennungskriterien während der LU-Klassifizierung (Kalkulation verschiedener Vege-

tationsindizes, PCA und IHS-Transformation) durchlaufen haben:

- SPOT 1 (älteste zur Verfügung stehende, hochauflösende Daten für das Untersuchungsgebiet; Aufnahmejahre 1986, 1987 und 1988): 3 Multispektralszenen (Level 1a, räumliche Auflösung $20\text{ m} \times 20\text{ m}$; 3 PAN Szenen (Level 1a, räumliche Auflösung $10\text{ m} \times 10\text{ m}$).
- SPOT 4 (Aufnahmejahr 1998): 3 Multispektralszenen (Level 1a, räumliche Auflösung $20\text{ m} \times 20\text{ m}$; 3 M-Mode Szenen (Level 1a, räumliche Auflösung $10\text{ m} \times 10\text{ m}$).
- RapidEye (Aufnahmejahr 2010): 11 Multispektralszenen (Level 3a, räumliche Auflösung $5\text{ m} \times 5\text{ m}$).

Der zur Analyse der multispektralen Fernerkundungsdaten verwendete Segmentierungs- und Klassifizierungsalgorithmus berücksichtigt insgesamt vier Agrarklassen (*Ackerflächen*, *Schwarzbrache*, *Plantagen*, *Gewächshäuser*) sowie die Klasse *Wolken* (SPOT 4 und RapidEye) und *Siedlungsgebiete* (RapidEye). Letztgenannter Landnutzungstyp findet Eingang in die Analyse zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche (vgl. Kap. 5). Die Agrarklasse *Schwarzbrache* umfasst im Gegensatz zur Klasse *Ackerfläche* alle Areale, die infolge verschiedener ackerbaulicher Maßnahmen, z.B. Pflügen, Einsatz von Herbiziden, planmäßig vegetationslos sind, aber dennoch einer geregelten agrarischen Nutzung unterliegen (vgl. BRUNOTTE et al. 2002). *Plantagen* hingegen beinhalten großflächige Monokulturen. Der Landnutzungstyp *Gewächshäuser* bezieht sich schließlich auf jene Agrarflächen, die von Plastikfolien überspannt sind.

Ein Orthophoto-Mosaik von Cartográfica de Canarias S.A. (GRAFCAN) (Aufnahmejahr 2009, 389 vorprozessierte Einzelbilder, räumliche Auflösung $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$) diente als Referenzdatensatz für die Orthorektifizierung und Koregistrierung der genannten Fernerkundungsdaten. Es bildet zudem die Grundlage zur kantenbasierten Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche. Weitere in der Studie verwendete Daten umfassen ein digitales Geländemodell mit einer räumlichen Auflösung von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ sowie eine digitale Straßenkarte des Untersuchungsgebiets von GRAFCAN.

3 Veränderungsanalyse zur Erfassung der rezenten Agrardynamik

Der klassische Post Classification Comparison (PCC) Algorithmus basiert im Allgemeinen auf dem pixel- oder objektbasierten Vergleich bi-temporaler Datensätze. Die daraus resultierende Veränderungsmatrix in Form eines thematischen Layers zeigt auf, wo klassenspezifische, räumliche Veränderungen zwischen Untersuchungszeitpunkt t_1 und t_2 zu beobachten sind (CAMPBELL 2006). Die alleinige Berechnung solcher „from-to“-Informationen bietet jedoch nicht die Möglichkeit, räumlich unterschiedliche Veränderungsintensitäten im Untersuchungsgebiet quantitativ zu detektieren. Diese sind jedoch zur Erfassung von möglichen Hot Spots landwirtschaftlicher Flächenveränderung unabdingbar. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird daher ein PCC-Algorithmus angewandt, der eine quantitative Erfassung räumlicher Agrardynamiken berücksichtigt und sowohl eine bi- als auch tri-temporale Auswertung der Daten in z.T. hierarchisch abhängigen Analyseebenen ermöglicht.

Grundlage zur Berechnung von Veränderungsintensitäten bildet die Erzeugung eines Raster-Grids mit einer den Input-Daten übergeordneten Zellgröße von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$. Innerhalb jeder erzeugten Rasterzelle kann nun zunächst die Veränderung der einzelnen Klassen während eines spezifischen Untersuchungszeitraums berechnet werden, indem die klassenspezifische Fläche $Area_{lu}$ des zeitlich älteren thematischen Datensatzes t_1 von der Fläche des aktuelleren Datensatzes t_2 subtrahiert wird: $Area_{lu}(t_2) - Area_{lu}(t_1)$ (vgl. GÜNTHERT 2014). Durch eine Addition der erzeugten klassenspezifischen Flächenveränderungen in einer zweiten Hierarchieebene innerhalb des PCC-Algorithmus können darüber hinaus weitere thematische Veränderungskarten erzeugt werden: die so genannte Netto-Veränderung der Landwirtschaft für 1986/88 bis 1998 sowie für 1998 bis 2010. Werden diese Informationen erneut addiert, kann die Gesamt-Nettoveränderung der Landwirtschaft von 1986/88 bis 2010 berechnet werden (vgl. Abb. 2).

Der Zwischenschritt, der zur Berechnung dieses finalen Ergebnisses führt, ermöglicht die zusätzliche Untersuchung der Veränderungshistorie. Ist eine Rasterzelle durch eine stetige Abnahme, also einen Rückgang der Agrarfläche sowohl zwischen 1986/88 und 1998 als auch zwischen 1998 und 2010, geprägt, wird sie der Klasse *Kontinuierliche Abnahme* zugeordnet. Umgekehrt verhält es sich mit der Klasse *Kontinuierliche Zunahme*. Bei allen weiteren Veränderungskombinationen, beispielsweise einer Zunahme zwischen 1986/88 und 1998 sowie einer Abnahme zwischen 1998 und 2010, wird die Rasterzelle stattdessen als *Dynamische Veränderung* charakterisiert.

Die in der vorliegenden Studie speziell für Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen auf Teneriffa entwickelte Veränderungsanalyse (Change-Detection-Analyse) verläuft nach einer Festlegung der zu untersuchenden Landnutzungsklassen automatisiert. Das Verfahren ist daher leicht auf andere klassifizierte Datensätze übertragbar. Die Rasterzellengröße kann dabei in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung der Daten sowie von der Größe des Untersuchungsgebietes spezifisch angepasst werden.

4 Kantenbasierte Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche anhand hochauflösender Orthophotos

Die Untersuchungen im Rahmen der Veränderungsanalyse (Change-Detection-Analyse) beschränken sich ausschließlich auf die Erfassung rezent genutzter Agrarflächen im Untersuchungsgebiet seit 1986/88. Feldforschungen und Auswertungen alter Luftbildaufnahmen zeigen jedoch, dass neben den detektierten Gebieten zahlreiche weitere Flächen für landwirtschaftliche Zwecke genutzt worden sind, deren aktive Nutzung jedoch zum Teil schon mehrere Dekaden vor 1986/88 zurückreicht. Die für eine gesamtlandwirtschaftliche Untersuchung notwendige Detektion dieser ehemals genutzten Agrarflächen ist in den verwendeten Satellitenbilddaten nur schwerlich möglich, da natürliche Sukzessionsvorgänge je nach Dauer der Brachephase zu einer teil-

weisen oder vollständigen Wiederbesiedlung der Flächen durch benachbarte Pflanzenformationen geführt haben. Unter alleiniger Verwendung spektraler Informationen können sie somit nicht mehr von der natürlichen, anthropogen unbeeinflussten Vegetationsbedeckung unterschieden werden (GÜNTHERT et al. 2012).

Diese Sukzessionsbrachen (vgl. BRUNOTTE et al. 2002) bzw. landwirtschaftlich stillgelegten Areale können oftmals nur noch durch Landschaftsrelikte, die auf ihre ehemalige agrarische Nutzung hinweisen, identifiziert werden. Hierzu zählen insbesondere die zur Terrassierung von Flächen errichteten Trockenmauern, die sich aufgrund der vorherrschenden orographischen Bedingungen über weite Teile des Untersuchungsgebiets erstrecken. Bewirtschaftete Agrarflächen weisen darüber hinaus neben Trockenmauern zahlreiche weitere lineare Elemente auf. Hierzu zählen beispielsweise Ackerfurchen, Flur- und Feldgrenzen sowie lineare Pflanzmuster. Die Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche, die sowohl alle rezenten landwirtschaftlich genutzten wie auch stillgelegten Areale im Untersuchungsgebiet repräsentiert, steht demnach in direkter Beziehung zur Detektion linearer landwirtschaftlicher Strukturen, sofern diese in den zur Analyse verwendeten Bilddaten erfasst werden können. Es bedarf daher eines Detektionsverfahrens, das anstatt spektraler Attribute einzig lineare Merkmale zur Erfassung von Agrarflächen berücksichtigt.

Die Grundlage zur Detektion und Extraktion von linearen Agrarstrukturen aus Fernerkundungsdaten bilden im Allgemeinen verschiedene Bildbearbeitungsverfahren wie Textur-Filter (Kantendetektoren) oder Wavelet-Transformationen (vgl. TURKER & KOK 2013, ISHIDA et al. 2004, RYDBERG & BORGEFORS 2001, Ji 1996). Die Berücksichtigung der daraus resultierenden Informationen dient dabei vor allem einem Ziel, nämlich der Erhöhung der Detailgenauigkeit infolge eines verbesserten räumlichen Differenzierungsgrades zwischen den jeweiligen agrarischen Landnutzungseinheiten. Die zu ermittelnden linearen Einheiten sind in der vorliegenden Studie jedoch vielmehr als so genannte Agrarproxys aufzufassen, durch deren Auftreten eine Unterscheidung zwischen landwirtschaftlich be-

einflusssten und unbeeinflussten Arealen im Untersuchungsgebiet ermöglicht wird. Voraussetzung zur Erfassung vorhandener Landwirtschaftstrukturen ist eine ausreichend hohe räumliche Auflösung der zu analysierenden Fernerkundungsdaten. RGB-Orthophotos des Untersuchungsgebiets (räumliche Auflösung $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$) bieten hierfür eine sehr gute Grundlage, da sich Terrassen und Trockenmauern selbst bei einer dichten Vegetationsdecke noch sehr gut identifizieren lassen (GÜNTHERT 2014). Der speziell zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas entwickelte, kantenbasierte Klassifizierungsprozess dient daher der Auswertung von Orthophotos und besteht aus der Kombination von insgesamt sechs verschiedenen Teilanalysen (vgl. Abb. 1).

4.1 Kantendetektion mittels Canny Edge Detector

Zur Detektion von linearen landwirtschaftlichen Strukturen und deren Verwendung als Agrarproxys ist zunächst ein Pre-Processing der Orthophotos in Form einer Kantenfaltung erforderlich. Ein häufig zur Detektion von Agrarstrukturen aber auch zur Erfassung von urbanen und topographischen Mustern eingesetzter Operator ist der Canny-Algorithmus (Canny Edge Detector) (vgl. TURKER & KOK 2013, LIU et al. 2010, CANNY 1986). Aufgrund seiner hohen Performanz gegenüber anderen Techniken wie beispielsweise dem Prewitt's Operator, Robert's Cross Operator oder dem Laplacian of Gaussian (JUNEJA & SANDHU 2009) wird dieser in der vorliegenden Untersuchung zur Erfassung linearer Agrarstrukturen verwendet (vgl. Abb. 1, Bild 2).

Die Kantenfaltung durch den Canny-Algorithmus wird durch drei Faktoren determiniert: Breite des Gauß-Filters innerhalb der Glättungsphase, Festlegung eines unteren sowie oberen Schwellenwertes im Rahmen eines Hysterese-Verfahrens. Die Schwellenwerte dienen zur weiteren Reduktion der Gradientenspannweite, nachdem das geglättete Bild durch einen Sobel-Operator in x- und y-Richtung gefaltet, die Stärke sowie Orientierung der Gradientenvektoren bestimmt und eine Non-Maximum Suppression durchgeführt wurde

(TURKER & KOK 2013, LIU et al. 2010, JUNEJA & SANDHU 2009, CANNY 1986).

Die Canny-Kantendetektion erfolgt in den einzelnen Teilszenen mit einer Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum, FWHM) von 2 für die Gauß-Filterung. Dieser relativ niedrige Wert gewährleistet eine ausreichend hohe Detailgenauigkeit auch nach der Bildglättung. Für die beiden Schwellenwerte wird ebenfalls ein niedriger Wertebereich von 0,01 (Low) und 0,08 (High) definiert. Das daraus resultierende Kantenbild beinhaltet zwar eine große Anzahl an Kantenfragmenten, die tatsächlichen Agrarstrukturen wie Trockenmauern und Feldgrenzen sind jedoch durch sehr gleichmäßige, zusammenhängende Linien dargestellt.

4.2 Segmentierung der kantengefilterten Orthophotos und Klassifizierung von linearen Agrarstrukturen

Auf Grundlage der kantengefilterten Fernerkundungsdaten wird in einem weiteren Analyseschritt eine Bildsegmentierung und anschließende Klassifizierung von linearen Agrarstrukturen durchgeführt (vgl. Abb. 1, Bild 3). Die klassifizierten Elemente stellen die Basis für die darauffolgende Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche dar.

Für die Multiresolution-Segmentierung¹ wird ein niedriger Skalierungsparameter von 3 sowie Homogenitätskriterien von 0,1 sowohl für Shape als auch für Compactness verwendet. Zur anschließenden Erfassung der linearen Agrarobjekte werden weitere Eingangsdaten, d.h. das digitale Geländemodell (DTM), die Straßennetzkarte sowie die Flächen der Objektklasse *Siedlungsgebiete* aus der Landnutzungsklassifizierung 2010, in den Klassifizierungsprozess integriert. Die Klassifizierung der Kantensegmente zielt darauf

¹ Die Multiresolution Segmentierung und die darauffolgende objektbasierte Klassifizierung wurden mittels eCognition Developer durchgeführt. Nachfolgende Homogenitätskriterien und Merkmalsattribute beziehen sich auf die Software (vgl. BLASCHKE 2010, BENZ et al. 2004).

ab, überwiegend gerade, lange und schmale Agrarobjekte zu erfassen. Das hierfür entwickelte Regelset besteht aus folgenden Merkmalsattributen: Shape-Density, Length, Length/Thickness, Main direction, Shape Index, Layer Value Mean Slope, Layer Value Mean Elevation und Layer Value Standard Deviation Elevation. Die beiden Attribute Shape-Density und Length/Thickness müssen dabei in Relation zum Auftreten des Kiefernwaldes in der jeweils zu untersuchenden Bildszen

spezifisch angepasst werden. Diese Waldbestände weisen eine teilweise sehr offene und insbesondere bei Pflanzungen lineare Struktur auf, wodurch es zu erhöhten Fehlklassifizierungen kommen kann. Ist der relative Anteil der Waldflächen in der Szene sehr groß, müssen die Merkmalsbereiche der beiden Attribute enger gefasst werden. Die Berücksichtigung von Layer Value Standard Deviation Elevation gewährleistet, dass besonders in montanen Regionen nur hangparallele Seg-

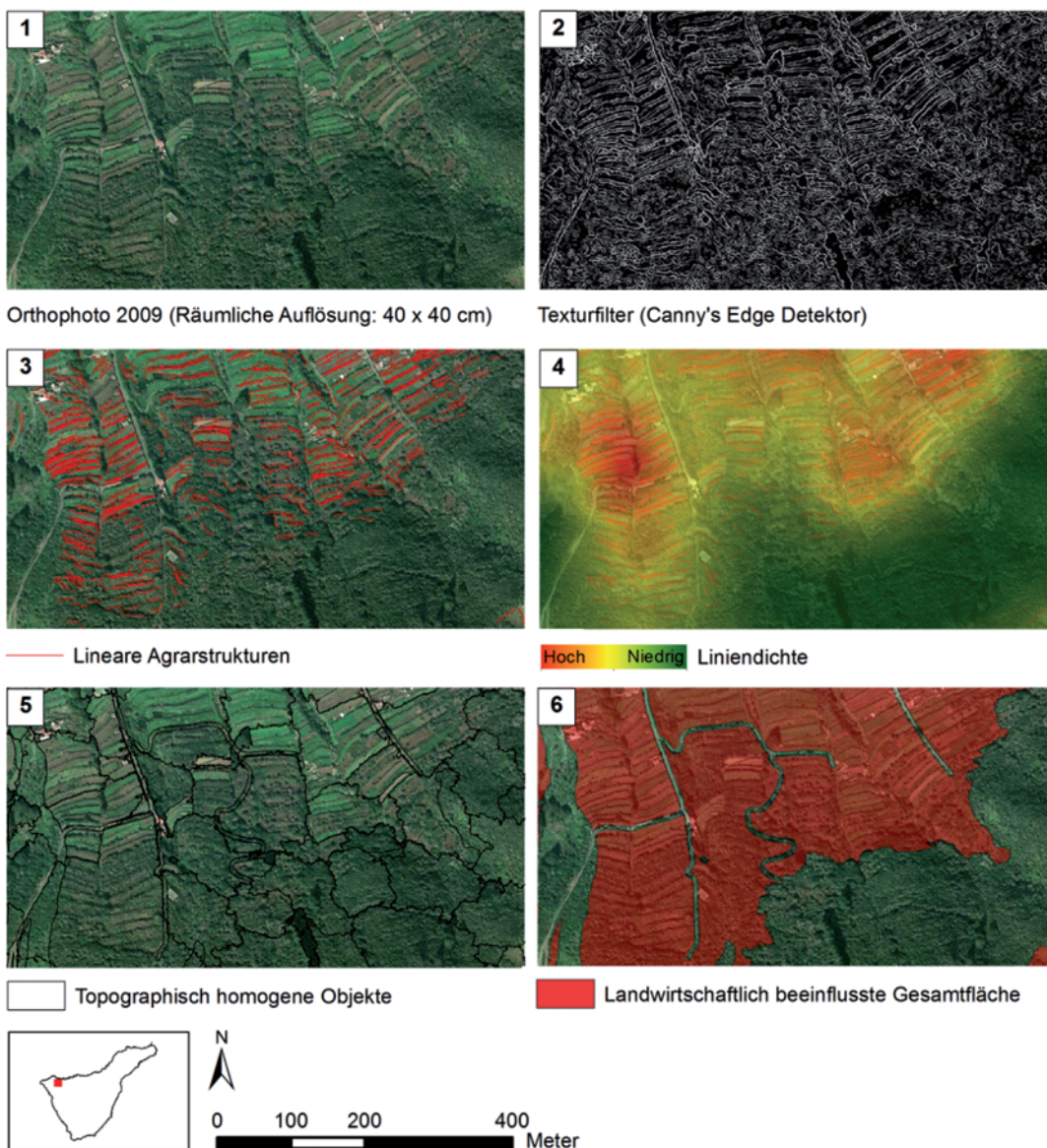


Abb. 1: Bearbeitungsschritte der kantenbasierten Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche anhand von Orthophotos (Quellen: Verändert nach GÜNTHERT 2014, Datengrundlage Orthophoto: Cartográfica de Canarias S.A. GRAFCAN).

mente als Agrarstrukturen identifiziert werden. Darüber hinaus wird durch eine zusätzliche Regel definiert, dass alle Segmente unberücksichtigt bleiben, die sich innerhalb von Siedlungs-, Gewerbe- oder Straßenflächen befinden. Hierdurch wird verhindert, dass weitere anthropogen bedingte Linearmuster wie Gebäudekomplexe und Verkehrswege klassifiziert werden (GÜNTHERT 2014).

4.3 Transformation von linearer zu flächenhafter Information anhand einer Line-Density-Analyse

Die als lineare Vektordaten extrahierten Agrarstrukturen geben Aufschluss darüber, wo eine landwirtschaftliche Beeinflussung des Untersuchungsraums vorliegt. Die Detektion von Agrarflächen ist bislang jedoch nur indirekt durch das Überlagern der Orthophotos mit den erfassten Strukturen möglich. Die linienbasierten Informationen müssen demnach so modifiziert werden, dass sie zur flächenhaften Erfassung und Abgrenzung von agrarisch beeinflussten und nicht beeinflussten Arealen verwendbar sind. Dies wird durch eine Line-Density-Analyse (verfügbar in Esri ArcGIS 10.1) ermöglicht (vgl. Abb. 1, Bild 4). Eine Density-Analyse kann als Datenglättungs-Technik bezeichnet werden, mit der Punkt- oder Liniendaten in eine kontinuierliche Oberfläche transformiert werden können (KLOOG et al. 2009). Dabei wird anhand der Eingangsvektordaten ein Rasterdatensatz generiert, innerhalb dessen für jede Rasterzelle – abhängig von der räumlichen Verteilung der Eingangsdaten – ein Dichtewert erzeugt wird. Im Rahmen der Line-Density-Analyse wird die Dichte von linearen Features innerhalb eines definierten Radius jeder Ausgabe-Rasterzelle erfasst. Dies geschieht, indem die Länge des Teiles jeder Linie, die in den entsprechenden Radius fällt, addiert und durch die Fläche des so entstandenen Kreises dividiert wird. Die resultierenden Dichteinheiten werden anschließend in die Maßeinheit „m pro m²“ konvertiert (ESRI 2013).

Die zur Erzeugung des Dichte-Rasters durchgeführte Line-Density-Analyse beruht auf einem Untersuchungsradius von 75 m und einer räumlichen Auflösung des Rasters von

5 m × 5 m. Die so entstandenen kontinuierlichen Flächeninformationen ermöglichen in den nächsten beiden Teilschritten eine Unterscheidung von landwirtschaftlich beeinflussten und unbeeinflussten Flächen (GÜNTHERT 2014).

4.4 Erneute Segmentierung der Orthophotos und Klassifizierung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche (LbG)

Der nächste Analyseschritt besteht aus einer erneuten Segmentierung der Orthophotos (vgl. Abb. 1, Bild 5). Hierdurch werden homogene Landschaftsegmente geschaffen, die zur endgültigen Klassifizierung von agrarisch beeinflussten Arealen herangezogen werden können. Die Grundlage zur Segmentierung bilden auch hier neben den RGB-Orthophotos die thematischen Daten in Form der Straßennetzkarte und der Flächen der Objektklasse *Siedlungsgebiete* aus der LU-Klassifizierung 2010. Die Einbeziehung der thematischen Informationen in diesen zweiten Segmentierungsprozess garantiert eine klare Abgrenzung zwischen infrastrukturellen und nicht-infrastrukturellen Objekten. Der zu definierende Skalierungsparameter wird hierbei auf einen hohen Wert von 100 und die Homogenitätskriterien auf einen Faktor von 0,3 für Shape und 0,9 für Compactness gesetzt.

Die erzeugten Landschaftsobjekte werden schließlich im Hinblick auf ihre landwirtschaftliche Beeinflussung klassifiziert (vgl. Abb. 1, Bild 6 und Abb. 3). Hierzu wird auf Grundlage des zuvor generierten Line-Density-Rasters ein spezifischer Wert definiert, ab dem ein Landschaftsobjekt als landwirtschaftlich beeinflusst gilt. Dieser Mindestschwellenwert, der sich auf die durchschnittliche Agrarstrukturdichte pro Objekt bezieht, kann nach einer qualitativen Analyse verschiedener Grenzwerte auf 0,025 m/m² beziffert werden, was bei einem Radius von 75 m um die entsprechende Ausgaberrasterzelle einer Gesamtlänge von ca. 442 m entspricht. Durch die Verwendung des Schwellenwertes wird gewährleistet, dass Flächen mit sehr vereinzelt auftretenden, nichtagrarischen Linearstruktu-

ren bzw. sehr geringen Dichtewerten von der Klassifizierung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche ausgeschlossen werden (GÜNTHERT 2014).

4.5 Klassifizierungsgüte

Zur Ermittlung der Klassifizierungsgenauigkeit des vorgestellten Verfahrens wird eine Konfusionsmatrix (Confusion Matrix) erstellt und entsprechende Gütekriterien abgeleitet (vgl. Tab. 1). Grundlage zur Erfassung der notwendigen Testpixel stellt das Verfahren der geschichteten Zufallsstichprobe mit proportionaler Allokation (Stratified Random, 1000 Referenzpunkte) dar. Als Referenzdatensatz dient aufgrund fehlender bzw. nicht existenter Vergleichsdaten das hochauflösende Orthophoto von 2009. Die Objektklasse *Landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche* (LbG) wird dabei einer weiteren Objektklasse *Sonstige Flächen* gegenübergestellt. Letzgenannte Klasse umfasst all jene Gebiete des Untersuchungsgebietes, die im Rahmen des vorliegenden Klassifizierungsprozesses nicht als Agrarflächen detektiert wurden.

Darüber hinaus wurden im Oktober 2011 insgesamt 120 Testflächen innerhalb der als landwirtschaftlich beeinflusst detektierten Areale aufgenommen und mit den Klassifizierungsergebnissen abgeglichen. Auch diese qualitative Vor-Ort-Untersuchung der Klassifizierungsgüte unterstreicht die sehr hohe räumliche Detektionsgenauigkeit des Verfahrens selbst bei sehr alten und somit stark überwucherten Brachflächen.

Tab. 1: Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der klassifizierten landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche (Quelle: Verändert nach GÜNTHERT 2014)

Objektklasse	Orthophoto Mosaik 2009	
	*Pa	**Ua
LbG	94,6%	84,5%
Sonstige Flächen	89,1%	96,3%
	Overall accuracy: 91,2%	

* Producer's accuracy ** User's accuracy

5 Interpretation des agrarischen Landnutzungswandels auf Teneriffa

Die Untersuchung des agrarischen Wandels auf Teneriffa zwischen 1986/88 und 2010 in Form einer Gesamt-Nettoveränderungskarte unter Berücksichtigung der Veränderungshistorie zeigt das Ausmaß der agrarischen Flächennutzungsveränderungen (vgl. Abb. 2). So sind zahlreiche großflächig zusammenhängende Areale insbesondere im humiden Norden durch kontinuierliche Flächenstilllegung seit 1986/88 gekennzeichnet. Zu diesen Hot Spots landwirtschaftlichen Flächenrückgangs zählen insbesondere die montanen Regionen im südlich von Buenavista del Norte gelegenen Teno-Massiv, die Region um Puerto de La Cruz, die südlich von Puerto de la Cruz gelegenen Berghänge des Orotava-Tals sowie das Anbaugebiet rund um La Laguna. Das touristische Ballungsgebiet im Südwesten Teneriffas zeigt im Vergleich ebenfalls kontinuierliche Arealverluste. Diese fallen jedoch absolut betrachtet deutlich geringer aus. Gründe hierfür liegen vor allem in der Intensivierung von Agrarland in Form von Gewächshauskulturen, vor allem Bananen- und Tomatenanbau unter Folie. Dem detektierten Flächenrückgang stehen vor allem im Süden des Untersuchungsraums vereinzelte Hot Spots kontinuierlicher Agrarflächenzunahme gegenüber. Während dieser Trend in den südlichen Küstengebieten auf die Neuentstehung von Gewächshäusern zurückzuführen ist, hängen die Flächenzunahmen in montanen Arealen mit der verstärkten Anlegung von Rebflächen für die Weinproduktion zusammen (GÜNTHERT 2014).

Die kantenbasierte Klassifizierung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche lässt erkennen, dass insgesamt 60.160 ha, also etwa ein Drittel der Gesamtfläche Teneriffas, durch eine rezente oder historische Agrarnutzung geprägt sind. Die Überlagerung dieses Areales mit der landwirtschaftlichen Anbaufläche 2010 erlaubt darüber hinaus eine eindeutige Differenzierung zwischen rezent agrarisch genutzten und landwirtschaftlich stillgelegten Flächen (vgl. Abb. 3). Der Anteil rezent genutzter Areale an der ermittelten Gesamtfläche beträgt dabei nur etwa 28%. Die restlichen 72% bestehen demnach aus stillge-

legten Flächen bzw. Sukzessionsbrachen, die sich vornehmlich in den topographisch und/oder klimatisch benachteiligten Regionen der Insel befinden.

Erste Analysen verdeutlichen, dass diese stillgelegten Areale ein sehr hohes ökologisches Potenzial hinsichtlich der natürlichen Regeneration ökologisch wertvoller Vegetationsgesellschaften wie dem Lorbeerwald aufweisen. So zeigt ein Vergleich von aktuellen Verbreitungskarten spezifischer Pflanzenformationen mit der detektierten landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche, dass derzeit etwa 930 ha des Lorbeerwaldes auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Arealen zu verorten sind und diese somit als Regenerationsflächen bezeichnet werden können. Beim Sukkulentenbusch, einer Pflanzenformation, die sich inmitten des traditionellen landwirtschaftlichen Kerngebiets befindet, beläuft sich

der Anteil der Regenerationsflächen auf ca. 20.740 ha (vgl. GÜNTHERT 2014).

Die im Rahmen der Change-Detection-Analyse erfasste räumliche Agrarentwicklung mit einem Rückgang von Nutzflächen vor allem im Norden Teneriffas kann somit zumindest aus ökologischer Sicht positiv bewertet werden. Hält diese Entwicklung weiter an, könnte dies zu einer weiteren räumlichen Ausdehnung der genannten naturnahen Pflanzenformationen führen. Zukünftige Studien sollten die als Regenerationsflächen ausgewiesenen Areale jedoch eingehender hinsichtlich ihres Sukzessionsgrades untersuchen. In diesem Zusammenhang wäre es sinnvoll, eine Kategorisierung der erfassten Sukzessionsflächen, beispielsweise auf Grundlage von Hyperspektraldaten hinsichtlich potenziell notwendiger Aufforstungsmaßnahmen zur Förderung der Biodiversität vorzunehmen.

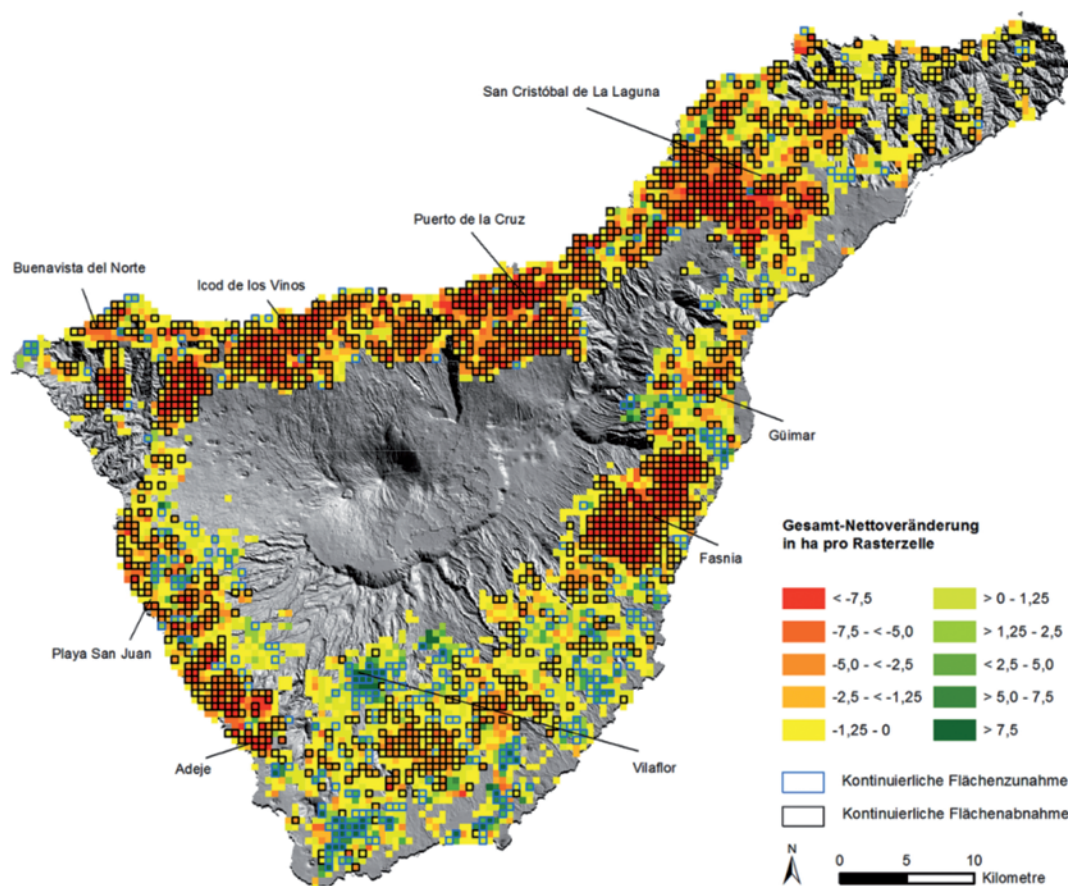


Abb. 2: Gesamt-Nettoveränderung der Landwirtschaft unter Berücksichtigung von Flächen kontinuierlicher Veränderung zwischen 1986/88 und 2010 (Quellen: GÜNTHERT 2014, Datengrundlage DTM: Cartográfica de Canarias S.A. GRAFCAN).

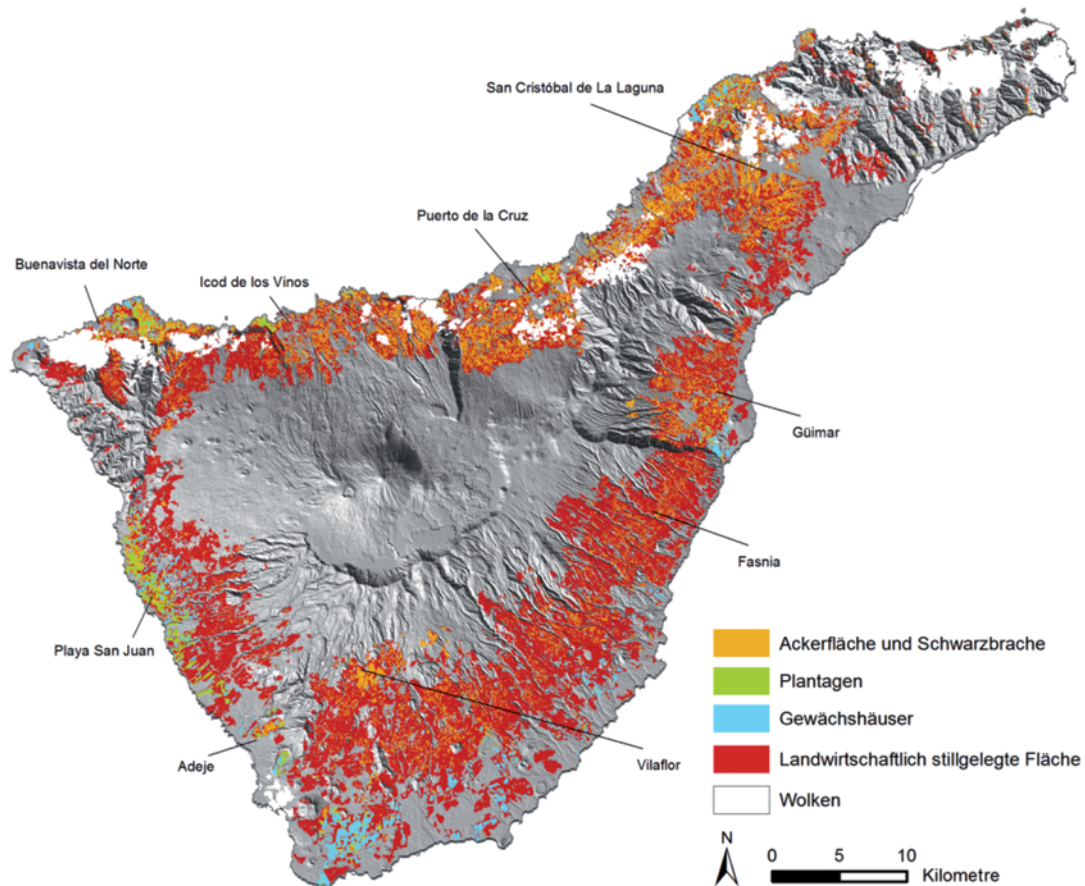


Abb. 3: Agrarisch genutzte und landwirtschaftlich stillgelegte Areale auf Teneriffa im Jahr 2010 (Datengrundlage DTM: Cartográfica de Canarias S.A. GRAFCAN).

Danksagung

Wir danken dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) für die Bereitstellung von Daten aus dem RapidEye Science Archiv (RESA) sowie dem Centre National d'Études Spatiales (CNES) und SPOT Image S. A. für die Bereitstellung von Daten im Rahmen der Planet Action Initiative.

Literatur

BENZ, U.C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I. & HEYNEN, M., 2004: Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **58** (3–4): 239–258.

BLASCHKE, T., 2010: Object based image analysis for remote sensing. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **65** (1): 2–16.

BRUNOTTE, E., GEBHARDT, H., MEURER, M., MEUSBURGER, P. & NIPPER, J., 2002: *Lexikon der Geographie*. – Spektrum Akademischer Verlag, CD-ROM. Heidelberg, Berlin.

CAMPBELL, J.B., 2006: *Introduction to remote sensing*. – 4. Auflage, Taylor & Francis, London, UK.

CANNY, J., 1986: Computational approach to edge detection. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI* **8** (6): 679–698.

ESRI, 2013: *ArcGIS 10.2 – Line Density (Spatial Analyst)*. – <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//009z0000000t000000> (2.4.2014).

FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.M. & WHITTAKER, R.J., 2008: The Canaries: an important biogeographical meeting place. – *Journal of Biogeography* **35** (3): 379–387.

- GÜNTHERT, S., SIEGMUND, A., THUNIG, H. & MICHEL, U., 2011: Object-based detection of LUCC with special regard to agricultural abandonment on Tenerife (Canary Islands). – Proceedings of SPIE **8181**: 81811-1–81811-7.
- GÜNTHERT, S., NAUMANN, S. & SIEGMUND, A., 2012: Detection and assessment of land use dynamics on Tenerife (Canary Islands): the agricultural development between 1986 and 2010. – SPIE **8538**: 853804-1–853804-7.
- GÜNTHERT, S., 2014: Landnutzungsdynamiken und deren ökologische Auswirkungen auf Teneriffa (Kanarische Inseln). Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Entwicklungsprozesse mit Methoden der Fernerkundung und Landnutzungsmodellierung. – Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Geographisches Institut.
- ISHIDA, T., ITAGAKI, S., SASAKI, Y. & ANDO, H., 2004: Application of wavelet transform for extracting edges of paddy fields from remotely sensed images. – International Journal of Remote Sensing **25** (2): 347–357.
- Ji, C.Y., 1996: Delineating agricultural field boundaries from TM imagery using dyadic wavelet transforms. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **51** (6): 268–283.
- JUNEJA, M. & SANDHU, P., 2009: Performance evaluation of edge detection techniques for images in spatial domain. – International Journal of Computer Theory and Engineering **1** (5): 614–621.
- KLOOG, I., HAIM, A. & PORTNOV, B.A., 2009: Using kernel density function as an urban analysis tool: Investigating the association between nightlight exposure and the incidence of breast cancer in Haifa, Israel. – Computers, Environment and Urban Systems **33** (1): 55–63.
- LIU, Z., GONG, P., SHI, P., CHEN, H., ZHU, L. & SASAGAWA, T., 2010: Automated building change detection using UltraCamD images and existing CAD data. – International Journal of Remote Sensing **31** (6): 1505–1517.
- NAUMANN, S., 2008: Modellierung der Siedlungsentwicklung auf Tenerife (Kanarische Inseln). Eine fernerkundungsgestützte Analyse zur Bewertung des touristisch induzierten Landnutzungswandels. – Heidelberger Geographische Arbeiten 125, Geographisches Institut.
- OTTO, R., 2003: Räumliche und zeitliche Variabilität des Sukkulentenbuschs auf Tenerife und ihre ökologische Interpretation. – Dissertation. Universität Zürich, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Schweiz.
- POTT, R., HÜPPE, J. & WILDPRET DE LA TORRE, W., 2003: Die Kanarischen Inseln. – Natur- und Kulturlandschaften. – Ulmer, Stuttgart.
- RYDBERG, A. & BORGEFORS, G., 2001: Integrated method for boundary delineation of agricultural fields in multispectral satellite images. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **39** (11): 2514–2520.
- TURKER, M. & KOK, E.H., 2013: Field-based sub-boundary extraction from remote sensing imagery using perceptual grouping. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **79**: 106–121.
- VILLA, S., FINIZIO, A., DIAZ DIAZ, R. & VIGHI, M., 2003: Distribution of Organochlorine Pesticides in Pine Needles of an Oceanic Island: The Case of Tenerife (Canary Islands, Spain). – Water, Air, and Soil Pollution **146** (1/4): 335–349.

Adresse der Autoren:

Dr. SEBASTIAN GÜNTHERT, Dr. SIMONE NAUMANN & Prof. Dr. ALEXANDER SIEGMUND, Pädagogische Hochschule & Universität Heidelberg, Abteilung Geographie, Research Group for Earth Observation (geo), D-69115 Heidelberg, Tel.: +49-6221-477-792, -797, -771, Fax: +49-6221-477-769, e-mail: {guentert}, {naumann}, {siegmund}@ph-heidelberg.de

Manuskript eingereicht: Januar 2014

Angenommen: Juli 2014