

INAUGURAL – DISSERTATION

zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät
der
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Vorgelegt von
Diplom-Geograph Sebastian Günthert
aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Mai 2014

**Landnutzungsdynamiken und deren
ökologische Auswirkungen auf Teneriffa (Kanarische Inseln)**

Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Entwicklungsprozesse
mit Methoden der Fernerkundung und Landnutzungsmodellierung

Gutachter: Prof. Dr. Alexander Siegmund
Prof. Dr. Carsten Jürgens

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Heidelberg Center for the Environment (HCE) der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg betreuten Projektverbundes „Global Change and Globalization“. Ziel des im Jahr 2009 ins Leben gerufenen Verbundes von insgesamt 13 Dissertationsprojekten aus den Disziplinen Geographie, Umweltphysik, Biowissenschaften, Rechtswissenschaften und Wirtschaftswissenschaften war es, im Kontext des Globalen Wandels und der Globalisierung verschiedene Fragestellungen aus den Themenbereichen Wasserknappheit (Schwerpunkt Jordanien), Energie sowie Biodiversität & Stoffkreisläufe (Schwerpunkt Teneriffa) interdisziplinär zu erforschen. Die Dissertation wurde von der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg durch ein Promotionsstipendium finanziell unterstützt. Hierfür möchte ich der Universität Heidelberg danken.

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit auf unterschiedliche Weise unterstützt haben. Besonders herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Alexander Siegmund für seine wertvolle fachkundige Begleitung und Betreuung. Herrn Prof. Dr. Carsten Jürgens danke ich ebenfalls herzlich für die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen des Forschungsprojektes „Global Change and Globalization“ der Universität Heidelberg für die gute Zusammenarbeit und fachlichen Diskussionen vor allem während der Geländeaufenthalte auf Teneriffa. Frau Dipl.-Biol. Anja Betzin und Herrn Dr. Markus Heidak gilt mein besonderer Dank. Ferner möchte ich mich insbesondere bei Frau Dr. Simone Naumann für die kritische Diskussion, für die freundliche Unterstützung und Motivation während des gesamten Entstehungsprozesses bedanken. Ihre Anregungen haben zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinem ehemaligen Bürokollegen Herrn Dipl.-Geogr. Holger Thunig für die stets hilfreichen Fachgespräche und bei Herrn Dr. Marc Wieland für die konstruktiven Anregungen und Korrekturarbeiten.

Des Weiteren gilt mein Dank 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'Etudes Spatiales (CNES) und SPOT Image S. A. für die Bereitstellung von Daten im Rahmen der Planet Action Initiative.

Schließlich und keineswegs zuletzt möchte ich ganz herzlich meiner Familie, meiner Partnerin Dana und meinen Freunden für die Unterstützung, Hilfsbereitschaft und für ihre Geduld danken. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Zusammenfassung

Das heutige Landschaftsbild der Kanarischen Insel Teneriffa ist das Ergebnis einer beständigen kulturlandschaftlichen Entwicklung, die im Wesentlichen mit dem Beginn der europäischen Kolonialisierung im 15. Jahrhundert ihren Anfang nahm. Während bis Mitte des 20. Jahrhunderts fast ausschließlich landwirtschaftliche Inwertsetzungsprozesse die Landschaft prägten, spielen in jüngster Zeit vor allem der Tourismus und die damit verbundenen Wirtschaftssektoren eine maßgebliche Rolle bei der anthropogenen Umgestaltung des Raums. Der damit einhergehende sozioökonomische Wandel von einer Agrar- zu einer Dienstleistungsgesellschaft führt zu einer Umorientierung der Erwerbstätigen von der Landwirtschaft hin zum Tourismus und zu ansteigenden Migrationsbewegungen in die urbanen Tourismuszentren. Hierdurch kommt es einerseits zu enormen Siedlungsexpansionen in den Küstenzonen und andererseits zu einer verstärkten Aufgabe von landwirtschaftlichen Nutzflächen im ländlichen Raum. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine umfassende Analyse, Simulation und ökologische Bewertung der agrarischen Landnutzungsdynamiken auf Teneriffa durchgeführt. Die Ergebnisse liefern ein ganzheitliches Bild zur bisherigen sowie möglichen zukünftigen räumlichen Entwicklung der kanarischen Landwirtschaft und den damit verbundenen ökologischen Auswirkungen auf den teilweise stark fragmentierten Naturraum.

Ausgangspunkt der Untersuchung bildet die objektbasierte Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation (LULC-Klassifikation) von SPOT 1-Daten (1986/88), SPOT 4-Daten (1998) sowie RapidEye-Daten (2010) und die anschließende Change Detection-Analyse in Form eines modifizierten, halbautomatisierten Post-Klassifikations-Vergleichs. Ein weiterer objektbasierter Klassifikationsprozess für hochauflösende RGB-Orthophotos dient darüber hinaus zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas. Hauptaugenmerk dieses Verfahrens liegt auf der texturbasierten Detektion von Agrarflächen inklusive landwirtschaftlich stillgelegter Areale bzw. Dauerbrachen, die in den Multispektraldaten aufgrund fortgeschrittener Sukzessionsprozesse nicht mehr von der natürlichen oder naturnahen Landbedeckung unterschieden werden können.

Die Klassifikationsergebnisse münden anschließend in den Aufbau eines auf Dyna-CLUE 2 (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2) basierenden, räumlich expliziten Landnutzungsmodells, das nach einer Parametrisierung und Kalibrierung zur Simulation der möglichen zukünftigen Entwicklung des Agrarsektors bis 2030 herangezogen werden kann. Ein Trendszenario zeigt in diesem Zusammenhang auf, welche agrarischen Landnutzungsveränderungen auftreten, wenn sich der bisherige Trend mit einer Steigerung der Intensivlandwirtschaft und einer weiteren räumlichen Abnahme von Ackerflächen vor allem in den Peripheriegebieten fortsetzt. Ein zweites, alternatives Szenario prognostiziert hingegen, welche landwirtschaftlichen Veränderungen durch eine erfolgreiche Umsetzung von Agrarprogrammen und -maßnahmen der EU zu erwarten sind.

Im Rahmen einer ökologischen Analyse wird schließlich eruiert, welche Areale des Lorbeer- und Kiefernwaldes sowie des Sukkulentenbuschs in der Vergangenheit unter landwirtschaftlichem Einfluss standen und somit als Regenerationsflächen gelten. Darüber hinaus wird ermittelt, wie sich das zukünftige Regenerationspotenzial für die einzelnen Vegetationsformationen unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Entwicklungsszenarien darstellt. Nach einer Bewertung und Interpretation der gewonnenen Ergebnisse werden abschließend raumplanerische Vorschläge unterbreitet, wie der kanarische Lorbeerwald zukünftig stärker vor kulturlandschaftlichen Raumentwicklungsprozessen geschützt werden könnte.

Abstract

The present-day characteristic landscape of Tenerife (Canary Islands) is the result of a constant cultural landscape development which essentially began with the European colonisation in the 15th century. Whereas, until the mid 20th Century, mainly agricultural processes characterised the landscape structure, 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 a reorientation of the labour force from agriculture to tourism and increasing migratory movements to the urban tourist centres. This causes on the one hand a substantial expansion of settlements in the coastal zone and on the other hand an increased abandonment of agricultural land in rural areas. In the present study, a comprehensive analysis, simulation and environmental evaluation of agricultural land use dynamics on Tenerife is carried out. The results provide a comprehensive picture of the present and potential future spatial development of the Canarian agriculture and its associated ecological impact on the partially highly fragmented natural space.

Starting point of the research is the object-based land use and land cover classification (LULC-classification) of SPOT 1-data (1986/88), SPOT 4-data (1998) as well as RapidEye-data (2010) and the subsequent change detection analysis by a modified, semi automated post-classification comparison. An additional object-based classification process for high resolution RGB-orthophotos is used to detect the total agriculturally affected area of Tenerife. This method focuses on the texture-based detection of agricultural land, including agricultural set-aside respectively long-term fallow areas. Due to advanced successional processes these fallow lands cannot be distinguished from natural or semi-natural land cover in multispectral data.

The classification results are subsequently used to develop a spatially explicit land use model based on Dyna-CLUE 2 (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2). After parameterisation and calibration, the Dyna-CLUE 2-model can be utilised to simulate the possible future changes of the agricultural sector until 2030. In this context, a trend scenario simulates the agricultural land use development assuming a continuation of the present trend with an increase in intensive agriculture and a further decrease of arable land, especially in the peripheral areas. An alternative scenario predicts which agricultural changes are to be expected from a successful implementation of EU agricultural programs and policies.

Furthermore, an ecological study investigates which areas of the laurel- and pine-forest as well as the succulent shrub were under agricultural usage in the past and thus can be considered as regeneration areas. Additionally the future regeneration potential for these vegetation formations is determined, taking into account the two agricultural development scenarios. Finally, following an evaluation and interpretation of the results obtained, spatial planning recommendations about how the Canarian laurel forest could receive greater protection against cultural landscape development processes are presented.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XVI
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1 Einführung und Zielsetzung	1
1.1 Problemstellung und bisherige Forschungsarbeiten	2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Untersuchungsgebiet Teneriffa	8
2.1 Physisch-geographische Gegebenheiten	8
2.1.1 Geologische, bodenkundliche und geomorphologische Situation.....	9
2.1.1.1 Jüngere geologische Entstehungsgeschichte und stratigraphische Gliederung.....	9
2.1.1.2 Bodenkundliche Situation des Untersuchungsgebietes	10
2.1.1.3 Morphologische Verhältnisse und Geländeformen.....	11
2.1.2 Klimatische Gegebenheiten.....	12
2.1.2.1 Temperatur-Verhältnisse	13
2.1.2.2 Niederschlagsregime.....	14
2.1.3 Vegetationsgeographische Situation.....	15
2.1.3.1 Küsten- und Felsvegetation	16
2.1.3.2 Sukkulentenbusch (Tabaibal & Cardonal).....	17
2.1.3.3 Thermophiler Trockenbusch (Bosque termófilo & Sabinar)	18
2.1.3.4 Lorbeerwald und Baumheide-Buschwälder (Monteverde)	19
2.1.3.5 Kanaren-Kiefernwald (Pinar).....	20
2.1.3.6 Teideginster-Gebüsche (Retamar) und Teideveilchen-Fluren (Violeta del Teide).....	21
2.2 Die Entwicklung der Kulturlandschaft und daraus resultierende Landnutzungsformen.....	22
2.2.1 Entwicklung der Kulturlandschaft	22
2.2.1.1 Phase des Zuckerrohr- und Weinanbaus	22
2.2.1.2 Phase der ökonomischen Regression im 18. Jahrhundert – Beginn der landwirtschaftlichen Diversifizierung	23
2.2.1.3 Liberale Phase und Entwicklung zur Freihandelszone – Beginn der Plantagenwirtschaft	23
2.2.1.4 Landschaftsentwicklung seit 1950 – Entwicklung des Massentourismus und Rückgang der Agrarwirtschaft.....	24

2.2.2	Agrarische Landnutzungssysteme	25
2.2.2.1	Die traditionelle Landwirtschaft	25
2.2.2.2	Die exportorientierte Intensivlandwirtschaft	26
3	Fernerkundungsgestützte Analyse von Landnutzungs- und Landbedeckungs- veränderungen unter besonderer Berücksichtigung räumlicher Agrar- dynamiken	28
3.1	Der Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Detektion agrarischer Landnutzungsveränderung auf Teneriffa	29
3.1.1	Auswahl einer geeigneten Change Detection-Technik – der Post- Klassifikations-Vergleich	29
3.1.2	Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Klassifikation der Fernerkundungsdaten – die objektbasierte Klassifikation	30
3.2	Datengrundlage und -aufbereitung.....	34
3.2.1	Topographische und thematische Basisdaten.....	35
3.2.2	Orthophoto-Mosaik 2009.....	36
3.2.3	Multitemporale und -sensorale Satellitenbilddaten	37
3.2.3.1	SPOT 1 (Aufnahmejahre 1986 bis 1988)	37
3.2.3.2	SPOT 4 (Aufnahmejahr 1998).....	38
3.2.3.3	RapidEye (Aufnahmejahr 2010)	38
3.2.4	Image Pre-Processing der Satellitenbilddaten	39
3.2.4.1	Orthorektifizierung und Georeferenzierung der Satellitenbildszenen	40
3.2.4.2	Atmosphärenkorrektur mittels ATCOR (Atmospheric Correction Algorithm for ERDAS IMAGINE)	40
3.2.4.3	Subsetting der SPOT- und RapidEye-Datensätze	41
3.2.4.4	Spektrale Bildschärfung	41
3.2.5	Arithmetische Pixeloperationen.....	43
3.2.5.1	Hauptkomponentenanalyse.....	43
3.2.5.2	IHS-Transformation.....	44
3.2.5.3	Ratiobildungen – Vegetationsindizes.....	44
3.3	Objektbasierte Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation der multisensoralen Fernerkundungsdaten	46
3.3.1	Entwicklung einer objektbasierten Segmentierungs- und Klassifikationsstrategie zur Erfassung von LULC-Klassen in den verwendeten Satellitenbilddaten.....	47
3.3.2	Klassifikationsgüte der objektbasierten LULC- und LU-Klassifikationen	54
3.3.3	Visuelle Darstellung der Klassifikationsergebnisse	58

3.4	Multitemporale Change Detection-Analyse zur Erfassung räumlicher Agrardynamiken im Untersuchungsgebiet.....	62
3.4.1	Detektion von agrarischen Flächenveränderungen auf Pixelebene und Bilanzierung der agrarischen Hauptveränderungsarten im Zeitraum 1986/88 bis 1998 und 1998 bis 2010	64
3.4.2	Erfassung klassenspezifischer Veränderungsintensitäten im Untersuchungsgebiet zwischen 1986/88 und 1998 sowie zwischen 1998 und 2010.....	67
3.4.3	Erfassung der landwirtschaftlichen Gesamtveränderung zwischen 1986/88 und 2010 unter Berücksichtigung der Veränderungshistorie.....	69
3.5	Texturbasierte Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche im Untersuchungsgebiet anhand hochauflösender Orthophotos	71
3.5.1	Texturbasierter Klassifikationsprozess zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche	72
3.5.1.1	Kantendetektion mittels Canny's Edge Detector.....	74
3.5.1.2	Segmentierung der kantengefilterten Orthophotos und Klassifikation von linearen Agrarstrukturen	75
3.5.1.3	Transformation linearer zu flächenhafter Information anhand einer Line Density-Analyse.....	76
3.5.1.4	Erneute Segmentierung der Orthophotos und Klassifikation der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche.....	76
3.5.2	Klassifikationsgüte des texturbasierten Klassifikationsprozesses.....	78
3.5.3	Flächenbilanzierung und räumliche Differenzierung zwischen rezent bewirtschafteten sowie stillgelegten Agrarflächen.....	79
4	Räumlich explizite Modellierung agrarischer Landnutzungsdynamiken	81
4.1	Aktuelle Theorien und Methoden der Landnutzungsmodellierung.....	81
4.1.1	Kernprinzipien der Modellierung von Landnutzungsveränderung	83
4.1.2	Konzepte zur Modellierung von Landnutzungsveränderung	84
4.1.2.1	Zelluläre Automaten	84
4.1.2.2	Statistische Analysen.....	84
4.1.2.3	Markov-Ketten	85
4.1.2.4	Künstliche Neuronale Netzwerke	85
4.1.2.5	Ökonomie-basierte Modelle	86
4.1.2.6	Agentenbasierte Systeme	86
4.2	Anforderungen an die Modellierung von Landnutzungsveränderungen auf Teneriffa unter besonderer Berücksichtigung landwirtschaftlicher Dynamiken.....	88
4.3	Das räumlich explizite Simulationsmodell Dyna-CLUE 2 (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2)	90
4.3.1	Konzeption von Dyna-CLUE 2	90

4.3.2	Das nicht-räumliche Bedarfsmodul – Festlegung des zukünftigen Landnutzungsbedarfs	92
4.3.3	Bestimmung räumlicher Standortfaktoren und Nachbarschaftsinteraktionen	92
4.3.3.1	Logistisches Regressionsmodell zur Erfassung relevanter Antriebskräfte	94
4.3.3.2	Erfassung von Nachbarschaftsinteraktionen	98
4.3.4	Räumliche Bedingungen und Beschränkungen innerhalb des Dyna-CLUE 2 Modells	101
4.3.5	Konversionsregeln der spezifischen Landnutzungsklassen	101
4.3.5.1	Konversionsmatrix	101
4.3.5.2	Konversionselastizität	102
4.4	Berechnung der Modellgüte zur Ermittlung von Vorhersagegenauigkeiten	103
4.4.1	Erfassung der Modellgüte anhand eines Multiple Resolution Comparison	103
4.4.2	Bestimmung der Modellperformanz unter Verwendung eines Nullmodells	104
4.5	Parametrisierung sowie Kalibrierung und Validierung des Dyna-CLUE 2 Modells	105
4.5.1	Auswahl und Aufbereitung der Landnutzungsdaten und Antriebskräfte	106
4.5.1.1	Aufbereitung sowie Aggregation der agrarischen Landnutzungsklassifikationen und landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche	107
4.5.1.2	Auswahl und Aufbereitung der sozioökonomischen sowie biophysikalischen Eingangsparameter	109
4.5.2	Einfluss der ermittelten Driving Forces auf die landwirtschaftliche Flächendynamik	114
4.5.2.1	Antriebskräfte der Klasse Ackerfläche	116
4.5.2.2	Antriebskräfte der Klasse Plantagen	118
4.5.2.3	Antriebskräfte der Klasse Gewächshäuser	119
4.5.2.4	Antriebskräfte der Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Flächen	120
4.5.2.5	Antriebskräfte der Klasse Andere	121
4.5.3	Einfluss der Nachbarschaftseffekte auf die räumliche Dynamik der Landnutzungsklassen	122
4.5.4	Festlegung der räumlichen Bedingungen sowie der Konversionsoptionen und des Landnutzungsbedarfs	124
4.5.4.1	Definition der Landnutzungsübergangsregeln in Form einer Konversionsmatrix	124
4.5.4.2	Bestimmung der Konversionselastizitäten der einzelnen Landnutzungsklassen	125

4.5.4.3	Standortspezifische Erhöhung der Auftrittswahrscheinlichkeit einzelner Landnutzungstypen durch Location Specific Preference Additions (LSPA)	125
4.5.4.4	Ermittlung des Landnutzungsbedarfs zur Kalibrierung und Validierung des Landnutzungsmodells	126
4.5.5	Ergebnisse der Modellkalibrierung und -validierung	127
4.5.5.1	Kalibrierungsergebnis	127
4.5.5.2	Validierungsergebnis.....	130
5	Simulation agrarischer Landnutzungsdynamiken bis 2030	131
5.1	Szenario 1 – Trendszenario.....	132
5.1.1	Trendanalyse der spezifischen Landnutzungsklassen und Ableitung des Landnutzungsbedarfs bis 2030.....	133
5.1.2	Darstellung und Bewertung der Modellierungsergebnisse.....	136
5.2	Szenario 2 – EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft.....	139
5.2.1	Förderprogramme zur Unterstützung der kanarischen Landwirtschaft	139
5.2.1.1	Das EG-Programm zur Lösung der spezifisch auf die Ablegenheit und Insellage der Kanarischen Inseln zurückzuführenden Probleme (POSEICAN).....	139
5.2.1.2	Das EG-Programm für die Entwicklung des ländlichen Raums der Kanarischen Inseln 2007/2013 sowie 2014/2020.....	141
5.2.2	Definition des Simulationsszenarios und Ableitung des Landnutzungsbedarfs bis 2030.....	142
5.2.2.1	Prognose des zukünftigen Flächenbedarfs der spezifischen Anbauprodukte	142
5.2.2.2	Umwandlung der produktspezifischen Prognosewerte in den zukünftigen regionalen Bedarf der Landnutzungsklassen	145
5.2.3	Darstellung und Bewertung der Modellierungsergebnisse.....	148
6	Die Zukunft des kanarischen Naturraums – Ökologische Auswirkungen der landwirtschaftlichen Flächendynamiken	151
6.1	Qualitative Untersuchungen zum Regenerationspotenzial von landwirtschaftlich stillgelegten Flächen für verschiedene Pflanzenformationen.....	152
6.1.1	Natürliche Regeneration von Lorbeerwald und Baumheide-Gebüsch (Monteverde)	153
6.1.2	Natürliche Regeneration des Kiefernwaldes (Pinar)	154
6.1.3	Natürliche Regeneration des Sukkulentenbuschs (Tabaibal/Cardonal).....	155
6.2	Auswirkungen der historischen Brachflächenentstehung auf die Regeneration von Monteverde und Pinar sowie Tabaibal/Cardonal	156

6.3	Zukünftiges Regenerationspotenzial von Monteverde und Pinar sowie Tabaibal/Cardonal unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Entwicklungsszenarien	159
6.4	Diskussion der Ergebnisse sowie potenzieller raumplanerischer Maßnahmen zum Schutz des Lorbeerwaldes	162
7	Schlussbetrachtung und Ausblick	165
7.1	Räumlich explizite Detektion und Bewertung historischer Agrardynamiken mittels Fernerkundung und GIS.....	165
7.2	Aufbau eines räumlich expliziten Landnutzungsmodells zur Ursachenanalyse und Simulation landwirtschaftlicher Flächendynamiken.....	168
7.3	Ökologische Bewertung der agrarischen Landnutzungsveränderungen im Hinblick auf die räumliche Entwicklung spezifischer Pflanzenformationen	171
	Literaturverzeichnis	175

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Übersicht und struktureller Aufbau des Forschungskonzeptes zur Analyse der agrarischen Landnutzungsdynamiken und deren ökologischen Auswirkungen auf Teneriffa.....	5
Abb. 2:	Übersichtskarte zur Lage der Kanarischen Inseln.....	8
Abb. 3:	Vereinfachte Bodenkarte von Teneriffa (Klassifikation nach USDA Soil Taxonomy)	10
Abb. 4:	Karte der jährlichen Durchschnittstemperaturen im Zeitraum 1981 bis 2010 auf Teneriffa.....	14
Abb. 5:	Karte der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssummen zwischen 1981 und 2010 auf Teneriffa	15
Abb. 6:	Vereinfachte Karte der potenziellen natürlichen Vegetation auf Teneriffa nach DEL ARCO AGUILAR 2006 und DEL ARCO AGUILAR ET AL. 2006	16
Abb. 7:	Strandfelsvegetation im Norden, Nordwesten und Süden Teneriffas	17
Abb. 8:	Tabaibal-Sukkulentenbusch und Cardonal-Sukkulentenbusch im Untersuchungsgebiet	18
Abb. 9:	Durch <i>Phoenix canariensis</i> (Kanarische Dattelpalme) dominierter thermophiler Trockenbusch in der Küstenzone und in mittleren Höhenregionen	19
Abb. 10:	Lorbeerwald und Baumheide-Buschwald im Untersuchungsgebiet	20
Abb. 11:	Leeseitiger Kiefernwald und luvseitiger Kiefernwald	21
Abb. 12:	Teideginster-Gebüsche und Wildprets Natternkopf	21
Abb. 13:	Mit grauem Bimsstein bedeckte Ackerterrassen im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes	25
Abb. 14:	Wasserverteilungssysteme im Südwesten Teneriffas	26
Abb. 15:	Zusammenhang zwischen Segmentierungsebenen und semantischer Vernetzung der Objektklassen sowie der daraus resultierenden Wissensbasis innerhalb der Software eCognition	34
Abb. 16:	Exemplarische Darstellung des verwendeten digitalen Geländemodells und der landwirtschaftlichen Parzelleninformationen sowie der Infrastrukturdaten.....	35
Abb. 17:	Darstellung des in der Arbeit verwendeten Orthophoto-Mosaiks.....	36
Abb. 18:	Auflistung und Spezifikation sowie Verortung der verwendeten SPOT 1-Szenen anhand eines Natural Colour-Mosaiks.....	37
Abb. 19:	Auflistung und Spezifikation sowie Verortung der verwendeten SPOT 4-Szenen anhand eines Natural Colour-Mosaiks.....	38
Abb. 20:	Auflistung und Spezifikation sowie Verortung der verwendeten RapidEye-Szenen anhand eines Mosaiks (RGB 321)	39
Abb. 21:	Bildbearbeitungsschritte der einzelnen Datensätze.....	40
Abb. 22:	Subset einer multispektralen SPOT 1-Szene (RGB 321) vom 07.09.1988 und fusioniert mit der panchromatischen Szene vom 11.09.1986 unter Verwendung der HPF-Bildschärfung	42
Abb. 23:	Hierarchischer Aufbau des objektbasierten Klassifikationsalgorithmus für die Rapid Eye-, SPOT 4- und SPOT 1-Daten	47
Abb. 24:	Bildbeispiele der finalen Objektklasse Ackerfläche	50

Abb. 25: Bildbeispiele der finalen Objektklasse Plantagen.....	50
Abb. 26: Bildbeispiele der finalen Objektklasse Schwarzbrache	51
Abb. 27: Bildbeispiele der finalen Objektklasse Gewächshäuser	51
Abb. 28: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Siedlungen und Gewerbe, Straßen und Parks.....	52
Abb. 29: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Monteverde, Pinar und Tabaibal/Cardonal	53
Abb. 30: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Retamar und Mischvegetation (Strauchformationen und Offenland).....	53
Abb. 31: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Sedimentfläche, Anstehendes Gestein und Lava-Feld.....	54
Abb. 32: Objektbasierte Agrar-Landnutzungsklassifikation von Teneriffa 1986/88.....	59
Abb. 33: Objektbasierte Agrar-Landnutzungsklassifikation von Teneriffa 1998	60
Abb. 34: Objektbasierte Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation von Teneriffa 2010	61
Abb. 35: Entwicklung der agrarischen Landnutzungsklassen zwischen 1986/88 und 2010.....	62
Abb. 36: Ablaufschema der multitemporalen Change Detection-Analyse zur Erfassung von agrarischen Landnutzungsdynamiken auf Teneriffa.....	63
Abb. 37: Exemplarische Darstellung der agrarischen Veränderungsprozesse im Untersuchungsgebiet (Arten landwirtschaftlicher Veränderung).....	66
Abb. 38: Veränderungsbilanz der agrarischen Landnutzung zwischen 1986/88 und 2010.....	66
Abb. 39: Klassenspezifische Veränderung in ha pro Rasterzelle für die Untersuchungszeiträume 1986/88 bis 1998 und 1998 bis 2010.....	68
Abb. 40: Gesamt-Nettoveränderung der Landwirtschaft unter Berücksichtigung von Flächen kontinuierlicher Veränderung zwischen 1986/88 und 2010.....	70
Abb. 41: Landwirtschaftlich stillgelegte Terrassenlandschaften im Untersuchungsgebiet.....	72
Abb. 42: Ablaufschema zur texturbasierten Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas	73
Abb. 43: Bearbeitungsschritte der texturbasierten Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche anhand des Orthophotos 2009.....	77
Abb. 44: Detektierte landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche (LbG) und agrarische Landnutzung 2010.	80
Abb. 45: Beziehung zwischen dem Prozess der Landnutzungsveränderung und Computer- Simulationsmodellen	83
Abb. 46: Beziehung zwischen Kernprinzipien sowie Konzepten und aktuellen Simulationsmodellen für Landnutzungsveränderungen	87
Abb. 47: CLUE-s (Version Dyna-CLUE 2) Modellkonzept und Allokationsverfahren der Landnutzungsveränderungen.....	91
Abb. 48: Drei hypothetische ROC-Kurven	98
Abb. 49: Konfiguration der Nachbarschaften d einer zentralen Rasterzelle i mit unterschiedlichen Distanzen.....	99
Abb. 50: Beispiel einer Konversionsmatrix von vier Landnutzungstypen mit unterschiedlichen Übergangsregeln.....	102

Abb. 51: Übereinstimmung des Modellergebnisses in % mit der Referenzkarte und dem Nullmodell.....	105
Abb. 52: Verwendung der Fernerkundungsdaten (Referenzdatensätze) zur Parametrisierung sowie Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells.....	106
Abb. 53: Verfahren zur Zusammenführung und Aufbereitung der agrarischen Landnutzungs-klassifikationen und landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche.....	107
Abb. 54: Exemplarische Darstellung der agrarischen Landnutzung 1986/88, 1998 und 2010.....	109
Abb. 55: Darstellung der benötigten Gemeinde-, Nuklei- und Hauseingangsdaten zur Disaggregation der Zensusinformationen.....	112
Abb. 56: Eignungskarte der Landnutzungs-kategorie Ackerfläche.....	118
Abb. 57: Eignungskarte der Landnutzungs-kategorie Plantagen.....	119
Abb. 58: Eignungskarte der Landnutzungs-kategorie Gewächshäuser.....	120
Abb. 59: Eignungskarte der Landnutzungs-kategorie Landwirtschaftlich stillgelegte Flächen.....	121
Abb. 60: Eignungskarte der Landnutzungs-kategorie Andere.....	122
Abb. 61: Konversionsmatrix des Dyna-CLUE 2 Modells mit fünf verschiedenen Landnutzungs-klassen.....	125
Abb. 62: Einteilung des Untersuchungsraums in landwirtschaftliche Teilregionen als Grundlage zur Berechnung eines regionalen Landnutzungsbedarfs.....	127
Abb. 63: Ergebnisse Modellkalibrierung mit verschiedenen Parametereinstellungen.....	128
Abb. 64: Exemplarische Darstellung der Landnutzungen 1986/88 und 1998 sowie der modellierten Landnutzung 1998 und der entsprechenden Gesamtübereinstimmung im Vergleich zur Referenzkarte 1998.....	129
Abb. 65: Ergebnisse der Modellvalidierung.....	130
Abb. 66: SWOT-Analyse zur aktuellen Situation der kanarischen Landwirtschaft.....	131
Abb. 67: Auf Grundlage des historischen Verlaufs berechnete Entwicklungstrends und prognostizierte Bedarfswerte der einzelnen Landnutzungs-klassen zwischen 2011 und 2030 im gesamten Untersuchungsgebiet sowie die klassenspezifischen Trendlinienfunktionen und Bestimmtheitsmaße.....	134
Abb. 68: Regionsspezifische Entwicklungstrends der einzelnen Landnutzungs-klassen unter Szenario 1.....	135
Abb. 69: Modellierungsergebnis der Landnutzungssimulation unter Szenario 1 (Trend-szenario).....	137
Abb. 70: Exemplarische Darstellung des Modellierungsergebnisses 2030 von Szenario 1 im Vergleich zur Ausgangssituation 2010.....	138
Abb. 71: Historische und prognostizierte Entwicklung der Anbauflächen in ha für spezifische kanarische Feldfrüchte.....	144
Abb. 72: Detektierter Flächenbedarf 2010 der Landnutzungs-klassen Ackerfläche, Plantagen und Gewächshäuser (Referenzbedarf) sowie deren berechnete Flächenbedarfe aus den produktspezifischen Anbauflächen 2010 und dem Szenario 2030.....	145

Abb. 73: Prognostizierte Bedarfswerte der einzelnen Landnutzungsklassen des gesamten Untersuchungsgebiet im Rahmen des Szenarios EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft.....	146
Abb. 74: Regionsspezifische Entwicklungsprognose der einzelnen Landnutzungsklassen unter Szenario 2.....	147
Abb. 75: Modellierungsergebnis der Landnutzungssimulation unter Szenario 2 (Optimierung der kanarischen Landwirtschaft).....	149
Abb. 76: Exemplarische Darstellung des Modellierungsergebnisses 2030 von Szenario 2 im Vergleich zur Ausgangssituation 2010.....	150
Abb. 77: Verortung der Vegetationsaufnahmen und zusätzlichen GCPs aus der Geländekampagne 2011 zur Untersuchung der Regenerationsfähigkeit verschiedener Ökosysteme auf landwirtschaftlich stillgelegten Flächen.....	152
Abb. 78: Regenerierter Lorbeer-Sekundärwald auf einer ehemals landwirtschaftlich genutzten Fläche.....	154
Abb. 79: Natürliche Sukzessionsprozesse auf ehemaligen Rebflächen in unmittelbarer Umgebung zum Kiefernwald	155
Abb. 80: Natürliche Sukzessionsprozesse auf ehemaligen Ackerflächen innerhalb des Sukkulentenbuschs	156
Abb. 81: Prozentualer Anteil der Regenerationsfläche ausgewählter Pflanzenformationen an der jeweiligen Gesamtfläche im Jahr 2010 sowie detaillierte Informationen zur bisherigen Brachezeit der wiederbesiedelten Areale in ha.....	157
Abb. 82: Landwirtschaftlich unbeeinflusste Areale und Verortung der erfassten Regenerationsflächen verschiedener Vegetationsformationen im Jahr 2010	158
Abb. 83: Potenzielle Flächenveränderungen spezifischer Vegetationsformationen bis 2030 unter Berücksichtigung der konzipierten agrarischen Entwicklungsszenarien Trendszenario (Szenario 1) und EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft (Szenario 2)	160
Abb. 84: Potenzielle Flächenentwicklung des Monteverde unter Berücksichtigung der konzipierten agrarischen Entwicklungsszenarien Trendszenario (Szenario 1) und EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft (Szenario 2)	161
Abb. 85: Darstellung eines potenziellen Gebietes zur Ausweitung des Landschaftsparks Teno	163
Abb. 86: Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche inmitten der Übergangszone zwischen Pinar und Monteverde.....	164

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Zur Segmentierung verwendete Input-Daten und Segmentierungseinstellungen in den verschiedenen Maps.....	48
Tab. 2:	Auflistung der für die finalen Objektklassen der LULC- sowie LU-Klassifikationen verwendeten Attribute	49
Tab. 3:	Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der LULC-Klassifikation 2010 (RapidEye).....	56
Tab. 4:	Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der LU-Klassifikation 1998 (SPOT 4)	57
Tab. 5:	Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der LU-Klassifikation 1986/88 (SPOT 1).....	57
Tab. 6:	Einteilung und Erläuterung der im Rahmen der Change Detection-Analyse definierten Arten landwirtschaftlicher Veränderung	65
Tab. 7:	Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der klassifizierten landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche	78
Tab. 8:	Übersicht über die in der Modellierung verwendeten biophysikalischen Antriebskräfte.....	111
Tab. 9:	Übersicht über die in der Modellierung verwendeten sozioökonomischen Antriebskräfte	113
Tab. 10:	Übersicht über die in der Modellierung verwendeten strukturellen Antriebskräfte	114
Tab. 11:	Regressionsparameter der einzelnen Landnutzungsklassen 1986/88.	116
Tab. 12:	Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der klassenspezifisch berechneten Enrichment-Faktoren F auf die Konversionswahrscheinlichkeit P der Landnutzungsklassen zwischen 1986/88 und 1998	123

Abkürzungsverzeichnis

ANN	Artificial Neuronal Network
AUC	Area Under Curve
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATCOR	Atmospheric Correction
CA	Cellular Automata
CLUE	Conversion of Land Use and its Effects
CLUE-s	Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNL	Cognition Network Language
CVA	Change Vector-Analyse
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DTM	Digital Terrain Model
Dyna-CLUE 2	Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
EG	Europäische Gemeinschaft
EGFL	Europäischer Garantiefonds für die Landwirtschaft
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EU	Europäische Union
FWHM	Full Width at Half Maximum
GCP	Ground Control Point
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GRAFCAN	Cartografica de Canarias S.A.
HRV	High Resolution Visible
HRVIR	High Resolution Visible and Infrared
HPF	Hochpassfilter
IHS	Intensity Hue Saturation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KNN	K-nearest neighbours
LbG	Landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche
ln	Logarithmus naturalis
LSPA	Location Specific Preference Additions
LU	Land Use
LUCC	Land Use and Land Cover Changes
LULC	Land Use and Land Cover
LVM	Layer Mean Value
MRC	Multiple Resolution Comparison
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
MS	Multispektraler Modus
MSI	Moisture Stress Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
OBIA	Object-based Image Analysis

OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index
OSH	Optimal Separating Hyperplane
PAN	Panchromatischer Modus
PCA	Principal Component Analysis
PCC	Post Classification Comparison
PNV	Potenzielle natürliche Vegetation
POSEI	Programme d'Options Spécifiques à l'Eloignement et l'Insularité
PIOT	Plan Insular de Ordenación de Tenerife
RIKS	Research Institute for Knowledge Systems
RMSE	Root Mean Square Error
ROC	Relative Operating Characteristic
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SPOT	System Probatoire d' Observation de la Terre
SQL	Structured Query Language
SVM	Support Vector Machines
SWOT-Analysis	Analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
ROC-Methode	Relative Operating Characteristic-Methode
RUP	Régions ultrapériphériques
USDA	United States Department of Agriculture
VHR	Very High Resolution
VI	Vegetationsindex
WMS-Layer	Web Map Service-Layer

1 Einführung und Zielsetzung

Landnutzungs- und Landbedeckungsveränderungen (Land Use and Land Cover Changes, LUCC) wurden bislang überwiegend als lokale Umweltproblematiken aufgefasst, gewinnen jedoch angesichts ihrer enormen räumlichen Dimensionen zunehmend an globaler Bedeutung (FOLEY 2005, S. 570). Bis ins Jahr 2100 werden LUCC – noch vor den Folgen des Klimawandels und der ökologischen Bedrohung durch invasive Arten – die voraussichtlich größten globalen Auswirkungen auf die Biodiversität der Erde haben. Denn die zunehmende Konversion natürlicher oder naturnaher Landschaften in anthropogen modifizierte Kulturlandschaften geht einher mit einem steigenden Verlust von Lebensräumen, mit Fragmentierungsprozessen und einer räumlichen Isolation bestehender Ökosysteme (DINGLE ROBERTSON & KING 2011, S. 1505; CHAPIN III et al. 2000, S. 234). Landwirtschaftliche Flächendynamiken zählen aufgrund des immer stärkeren Bevölkerungsanstieges und einer zunehmend globalisierten Welt mit sich ständig ändernden Handels- und Produktionsströmen zu den signifikantesten globalen Landnutzungs- und Landbedeckungsveränderungen (LAMBIN & MEYFROIDT 2011, S. 2 ff.; LAMBIN et al. 2000, S. 322). Die Erschließung von Acker- und Weideflächen, die mit einem Anteil von etwa 40% der globalen Landoberfläche zu den derzeit größten terrestrischen Biomen zählen, führte in der Vergangenheit zur großflächigen Degradation und Zerstörung der natürlichen Vegetation in vielen Teilen der Erde (TURNER II et al. 2008, S. 20666; REY BENAYAS 2007, S. 1). Allein in den Tropen wurde mehr als die Hälfte des zwischen 1980 und 2000 neu hinzugekommenen Agrarlandes durch die Rodung ehemals intakter Waldflächen erschlossen. Der Ausdehnung von Agrarflächen in vornehmlich tropischen Entwicklungs- und Schwellenländern steht jedoch ein deutlicher Rückgang von Agrarland in den Industriestaaten gegenüber: So hat die Gesamtfläche an Acker- und Weideland in den Entwicklungsländern zwischen 1995 und 2007 um annähernd 400 Mio. ha zugenommen; in den Industrieländern konnte im selben Zeitraum ein Rückgang von 412 Mio. ha verzeichnet werden, hauptsächlich resultierend aus der Aufgabe bzw. Stilllegung landwirtschaftlicher Nutzflächen (LAMBIN & MEYFROIDT 2011, S. 1; GIBBS et al. 2010, S. 16736). Während die landwirtschaftliche Expansion und die damit verbundenen Abholzungsprozesse sehr gut untersucht sind, ist hingegen wenig bekannt über die Muster, komplexen Gründe und ökologischen Konsequenzen, die mit den landwirtschaftlichen Flächenaufgaben zusammenhängen (ALCANTARA et al. 2012, S. 334).

Inselsysteme bieten durch ihre spezifischen Merkmale, beispielsweise ihre begrenzte Verfügbarkeit an Raum, ihre isolierte Lage abseits der Kontinente, ihre einzigartige biologische Vielfalt und ihre vergleichsweise kurze Besiedlungsgeschichte außerordentlich gute Voraussetzungen zur Untersuchung solch anthropogen bedingter Ursache-Wirkungsbeziehungen. So sind Inselsysteme extrem fragil und anfällig für externe bzw. anthropogene Einflüsse, da die zur Verfügung stehenden (Raum-) Ressourcen begrenzt bzw. endlich sind und sich der anthropogene Druck auf diese erhöht. Aufgrund der meist späten Besiedlung durch den Menschen konnte sich die Insel-Flora und -Fauna darüber hinaus über einen langen Zeitraum ungestört entwickeln, weshalb sie zudem eine gesteigerte Sensitivität gegenüber anthropogen bedingten Störungen aufweisen (MAIRS 2007, S. 3; BALDACCHINO 2004, S. 15; FISHER 2004, S. 10). Hierdurch entsteht ein beträchtliches Spannungsgefüge zwischen sozioöko-

nomischen und ökologischen Faktoren bzw. zwischen den engen Verteilungsbereichen kultur- und naturräumlicher¹ Landschaftselemente (HASSAN et al. 2005, S. 672).

1.1 Problemstellung und bisherige Forschungsarbeiten

Die Kanarischen Inseln sind ein Musterbeispiel für die Umgestaltung von Inseln durch die intensive Einwirkung des Menschen auf die Natur (POTT et al. 2003, S. 184). Das heutige Landschaftsbild Teneriffas, der 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. Jahrhundert prägten dabei fast ausschließlich landwirtschaftliche Inwertsetzungsprozesse das Landschaftsbild der Insel. Während verschiedener landwirtschaftlicher Anbauphasen, beginnend beim monokulturellen Zuckerrohr- und Weinanbau im 16. Jahrhundert über die landwirtschaftliche Diversifizierung im 18. Jahrhundert bis hin zur heute vorherrschenden, auf Bananen, Tomaten und Schnittblumen basierenden Intensivlandwirtschaft, wurde der Kulturraum immer weiter ausgedehnt. Infolgedessen kam es zu einer enormen (Über-)Beanspruchung des Naturraums, so dass die einzelnen, durch eine außerordentliche hohe ökologische Vielfalt gekennzeichneten Vegetationsformationen² wie der kanarische Lorbeerwald oder der thermophile Buschwald bis zum heutigen Zeitpunkt stark fragmentiert und teilweise fast vollständig degradiert wurden.

In jüngster Zeit – insbesondere seit 1992 – spielen vor allem der Tourismus und damit verbundene Wirtschaftssektoren wie beispielsweise das Baugewerbe eine maßgebliche Rolle bei der anthropogenen Umgestaltung des Raums. Der mit dem Tourismusboom einhergehende sozioökonomische Wandel von einer Agrar- zu einer Dienstleistungsgesellschaft führt zu ansteigenden Migrationsbewegungen der Bevölkerung aus dem wirtschaftlich benachteiligten ländlichen Raum in die urbanen Tourismuszentren. Hierdurch kommt es einerseits zu einer zunehmenden Versiegelung der Küstenzonen infolge erhöhter Siedlungsexpansionen und dem Ausbau weiterer, überwiegend touristisch bedingter Infrastruktur (NAUMANN 2008, S. 1). Andererseits führt die Abwanderung der Bevölkerung aus dem Hinterland und die Umorientierung der Erwerbstätigen von der Landwirtschaft hin zum gewinnversprechenden Tourismus zu einer verstärkten Aufgabe von landwirtschaftlichen Nutzflächen (POTT et al. 2003, S. 201). Diese Brachflächen stellen potenziellen Raum zur Verfügung, auf dem sich angrenzende Ökosysteme durch sekundäre Sukzessionsprozesse³ wieder auf natürliche Weise ausbreiten und regenerieren können (FERNÁNDEZ-PALACIOS & WHITTAKER 2008, S. 383).

¹ Kultur- und Naturraum ist innerhalb der vorliegenden Arbeit gleichzusetzen mit Kultur- und Naturlandschaft. Während die Kulturlandschaft eine „überwiegend durch anthropogene Ökosysteme gebildete Landschaft mit vorherrschender Nutzfunktion“ (BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort Kulturlandschaft) darstellt, bezeichnet Naturlandschaft die „nicht vom Menschen beeinflusste Landschaft“ (BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort Naturlandschaft).

² Der Terminus Vegetations- oder Pflanzenformation bezeichnet einen „[...]physiognomisch(-ökologischen) Vegetationstyp, der durch das Vorherrschen bestimmter Gestalttypen bzw. Lebensformen gekennzeichnet ist. Dabei spielt die Artenzusammensetzung keine Rolle. Die Formationen (z. B. Montaner kältekahler Wald) werden nach den bestimmenden Gestalttypen bzw. Lebensformen benannt“ (FREY & LÖSCH 2010, S. 86).

³ Unter sekundärer Sukzession wird die Vegetationsentwicklung auf Kulturland nach Aufgabe der jeweiligen menschlichen Nutzungsform verstanden. Diese Art Regenerationsukzession, also die Regeneration einer ganzen Pflanzengemeinschaft nach einer größeren anthropogen verursachten oder natürlichen Störung, bedingt die spezifische Abfolge dreier Ereignisse: Zunächst findet die totale oder teilweise Zerstörung der natürlichen Vegetation in einem Areal statt. Anschließend wird eine oder mehrere Nutzungsformen über längere Zeit errichtet und diese schließlich ganz oder teilweise aufgegeben (OTTO 2003, S. 25).

Die aktuelle, vornehmlich durch den Tourismus induzierte Verlagerung und Konzentration menschlicher Aktivitäten von den mittleren Höhenzonen auf die Küstenbereiche Teneriffas ruft somit neue Transformationsprozesse im kanarischen Landschaftsgefüge hervor, die bislang nur im Rahmen weniger Forschungsarbeiten analysiert wurden. So befassen sich NAUMANN (2008) und NAUMANN & SIEGMUND (2008) im Rahmen einer fernerkundungsgestützten Untersuchung mit der urbanen und somit vorwiegend küstennahen Landschaftsentwicklung zwischen 1978 und 2002 sowie dem Aufbau eines Landnutzungsmodells zur Prognose der Siedlungsdynamik bis ins Jahr 2026. Die Ergebnisse münden in eine Analyse zur Abschätzung der möglichen ökologischen Folgen, die mit den potenziellen Siedlungsdynamiken einhergehen. Des Weiteren untersuchen OTTO et al. (2007) anhand einer quantitativen, GIS-gestützten Analyse Degradationsprozesse der natürlichen Vegetation zwischen 1964 und 1992 als Folge einer zunehmendem touristischen Inwertsetzung und landwirtschaftlichen Intensivierung. Letztgenannte Forschungsarbeit behandelt explizit landwirtschaftliche Entwicklungsprozesse, bezieht sich jedoch nur auf ein vergleichsweise kleines Untersuchungsgebiet in einer ariden, südwestlich gelegenen Küstenlandschaft Teneriffas mit einer Gesamtfläche von 50 km². Unter Berücksichtigung der enormen biologischen und klimatischen aber auch sozioökonomischen Vielfalt Teneriffas können die Ergebnisse dieser Studie somit nicht auf die gesamte Insel übertragen werden. Weitere qualitative Arbeiten, die die Folgewirkungen kulturlandschaftlicher Veränderungen für spezifische Ökosysteme, insbesondere Sukzessionsprozesse von Sukkulenteformationen auf ehemaligen Ackerflächen, behandeln, wurden von OTTO (2003) durchgeführt.

Eine quantitative, die gesamte Insel Teneriffa umfassende Untersuchung der landwirtschaftlichen Flächenveränderungen und deren ökologischen Auswirkungen seit Beginn des Tourismusbooms in den 1990er Jahren liegt bislang nicht vor. Eine derartige Analyse kann jedoch maßgeblich zu einem besseren Verständnis der komplexen Wirkungsbeziehungen zwischen rezenten kultur- und naturlandschaftlichen Entwicklungsprozessen und ihren Determinanten beitragen. Dies impliziert insbesondere landwirtschaftliche Flächenstilllegungen in den peripheren, ökonomisch benachteiligten Regionen und daraus resultierende Regenerationsprozesse der sich inmitten des landwirtschaftlichen Anbaugürtels befindlichen Vegetationsformationen des Lorbeer- und Kiefernwaldes sowie des Sukkulentebuschs. In Kombination mit einer Prognose zukünftiger agrarischer Entwicklungen können hierdurch erste Grundlagen im Hinblick darauf geschaffen werden, wie der kanarische Naturraum zukünftig stärker vor anthropogenen Einflüssen geschützt werden kann – beispielsweise durch konkrete raumplanerische Maßnahmen und Instrumente. In der vorliegenden Arbeit soll diesen Sachverhalten anhand einer ganzheitlichen Analyse und Bewertung der agrarischen Landnutzungsdynamiken und ihren ökologischen Auswirkungen Rechnung getragen werden.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, anhand von Methoden der Fernerkundung und Landnutzungsmodellierung die bisherigen landwirtschaftlichen Flächendynamiken für die gesamte Insel Teneriffa zu detektieren und zu analysieren sowie zukünftige agrarische Landnutzungsveränderungen bis 2030 räumlich explizit zu simulieren. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen dieser agrarischen Landnutzungsprozesse auf die Regeneration einzelner Vegetationsformationen, insbesondere des kanarischen Lorbeer- und Kiefernwaldes sowie des Sukkulentebuschs, erfasst und beurteilt werden.

Die Untersuchung kann in aufeinander aufbauende, methodologisch unterschiedliche Themenkomplexe unterteilt werden, denen spezifische Fragestellungen zugrunde liegen. Im Hinblick auf den ersten Themenkomplex, die Detektion und Bewertung historischer Agrardynamiken, sind folgende Forschungsfragen von zentraler Bedeutung:

- Welche räumlichen Veränderungsprozesse und -muster sind im Rahmen der landwirtschaftlichen Entwicklung seit 1986 identifizierbar? Lassen sich regionale Hot Spots landwirtschaftlicher Flächenveränderung erfassen, die durch eine kontinuierliche Agrarflächenabnahme oder -zunahme und eine besonders hohe Veränderungsintensität geprägt sind?
- Welche Areale des Untersuchungsgebiets wurden bislang für landwirtschaftliche Zwecke inwertgesetzt? Wie hoch ist der Anteil rezent bewirtschafteter Agrarflächen bzw. landwirtschaftlich stillgelegter Areale an der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche?

Der zweite Themenkomplex umfasst die Ursachenanalyse der bisherigen landwirtschaftlichen Entwicklung sowie die Simulation möglicher zukünftiger landwirtschaftlicher Flächendynamiken. Es ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Wie lassen sich die landwirtschaftlichen Veränderungsprozesse in einem räumlich expliziten Landnutzungsmodell reproduzieren? Welche biophysikalischen, sozioökonomischen und sonstigen Parameter beeinflussen den agrarischen Landnutzungswandel auf Teneriffa?
- Wie stellt sich die zukünftige räumliche Entwicklung der Landwirtschaft unter Verwendung eines Landnutzungsmodells dar, wenn sich a) der aktuelle Trend fortsetzt und b) Förderprogramme bzw. -maßnahmen der Europäischen Union zur Unterstützung der kanarischen Landwirtschaft erfolgreich umgesetzt werden? Wo könnten neue Brachflächen entstehen?

Die verschiedenen Teilergebnisse der vorangegangenen Analysen dienen als Grundlage für den dritten Themenkomplex, innerhalb dessen die ökologischen Auswirkungen der detektierten und prognostizierten Landnutzungsveränderungen hinsichtlich der natürlichen bzw. naturnahen Vegetation⁴ des Untersuchungsgebietes erfasst werden. Folgende Forschungsfragen sind in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse:

- Welchen Einfluss hat die bisherige landwirtschaftliche Entwicklung auf die räumliche Regeneration der teilweise stark fragmentierten Vegetationsformationen?
- Welches Regenerationspotenzial bietet sich für die Vegetationsformationen unter Berücksichtigung der simulierten landwirtschaftlichen Flächenentwicklungen? Wirken sich die zukünftigen Agrarentwicklungen möglicherweise auch negativ auf deren Regeneration aus?
- Welche raumplanerischen Instrumente und Maßnahmen könnten in Zukunft zu einem stärkeren Schutz sensibler Pflanzenformationen – insbesondere der Lorbeerwälder – beitragen?

Resultierend aus diesen Fragestellungen ergibt sich ein sowohl methodisch als auch untersuchungsräumsspezifisch innovatives Forschungskonzept, das auf aktuellste fernerkundungs- und GIS-basierte Analysen, statistische Auswertungstechniken und Verfahren zur räumlich expliziten Modellierung bzw. Simulation von Landnutzungsveränderungen zurückgreift (vgl. Abb. 1). Die ineinander übergrei-

⁴ Im Vergleich zur natürlichen Vegetation, die beispielsweise nicht genutzte Naturwaldreste umfasst, bezeichnet die naturnahe Vegetation schwach anthropogen genutzte Wälder (BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort Naturnähe).

fende und kombinierte Verwendung dieser Methoden ermöglicht eine umfassende Betrachtung der landwirtschaftlichen Entwicklung Teneriffas und dem damit verbundenen Spannungsgefüge zwischen kultur- und naturlandschaftlichen Raumprozessen in retrospektiver sowie prospektiver Hinsicht.

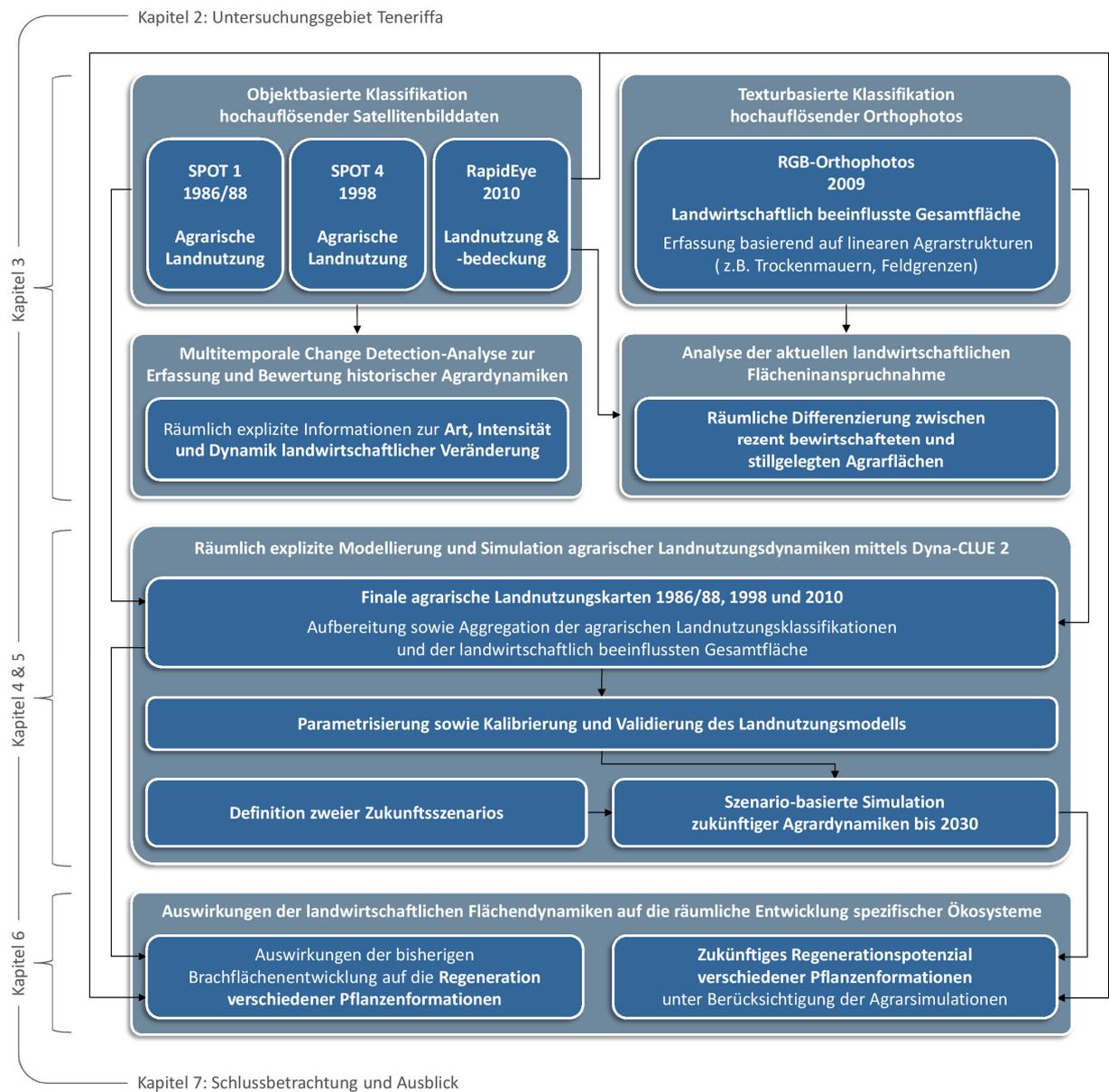


Abb. 1: Übersicht und struktureller Aufbau des Forschungskonzeptes zur Analyse der agrarischen Landnutzungs- und -bedeckungsdynamiken und deren ökologischen Auswirkungen auf Teneriffa (Quelle: Eigene Darstellung)

Die vorliegende Studie umfasst neben einer detaillierten physisch-geographischen und entwicklungsgeschichtlichen Beschreibung des Untersuchungsgebietes (Kapitel 2) vier in sich geschlossene Arbeitspakete. Diese beinhalten jeweils die theoretischen Grundlagen der darin verwendeten Forschungsansätze, deren methodische Umsetzung sowie die gewonnenen Ergebnisse und deren Bewertung.

Kapitel 3 befasst sich mit der Untersuchung historischer Agrardynamiken unter Verwendung multitemporaler und -sensoraler Fernerkundungsdaten. Mittels einer objektbasierten Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation (LULC-Klassifikation) von entsprechend vorprozessierten SPOT 1-Daten

(1986-88), SPOT 4-Daten (1998) und RapidEye-Daten⁵ (2010) werden zunächst die landwirtschaftlichen Nutzflächen sowie zusätzlich die Verbreitungsareale vorhandener Vegetationsformationen und weiterer nicht-agrarischer Landnutzungseinheiten für das Jahr 2010 erfasst. Zur quantitativen Detektion der agrarischen Landnutzungsveränderungen innerhalb des Untersuchungszeitraumes dient eine innovative, multitemporale Change Detection-Analyse auf Basis eines modifizierten, halbautomatisierten Post-Klassifikationsvergleichs (Post Classification Comparison, PCC). Der hierfür entwickelte, in verschiedene hierarchisch abhängige Analyseebenen untergliederte Cognition Network Language-Algorithmus (CNL-Algorithmus) ermöglicht die pixelgenaue Erfassung von verschiedenen Arten landwirtschaftlicher Veränderung wie beispielsweise Agrarflächenentstehungen oder -intensivierungen. Darüber hinaus lassen sich weitere Aussagen über die klassenspezifische und gesamtlandwirtschaftliche Veränderungsintensität auf lokaler bis regionaler Ebene treffen und Informationen über die Veränderungshistorie der Agrarflächendynamiken generieren. Dies ermöglicht eine umfassende Detektion von Hot Spot-Gebieten landwirtschaftlicher Veränderung unter Berücksichtigung der Faktoren Intensität und Kontinuität. Die Untersuchung rezenter Landnutzungsveränderungen zwischen 1986/88 und 2010 wird anschließend um einen weiteren objektbasierten Klassifikationsprozess zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas in sehr hochauflösenden RGB-Orthophotos (Aufnahmejahr 2009, räumliche Auflösung: 40 x 40 cm) ergänzt. Hauptaugenmerk des zu diesem Zweck entwickelten Verfahrens liegt auf der texturbasierten Detektion von Agrarflächen inklusive landwirtschaftlich stillgelegter Areale bzw. Dauerbrachen, die in den Multispektraldaten aufgrund fortgeschrittener Sukzessionsprozesse nicht mehr von der natürlichen oder naturnahen Landbedeckung unterschieden werden können. Diese Brachflächen können oftmals nur noch durch Landschaftsrelikte wie Trockenmauern und ehemalige Feldgrenzen, die auf eine ehemalige agrarische Nutzung hinweisen, identifiziert werden. Unter Verwendung der satellitenbasierten Multispektralinformationen mit räumlichen Auflösungen von 5 x 5 bzw. 10 x 10 m ist die Detektion solcher linearen Agrarstrukturen nicht möglich. Die landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche liefert in Kombination mit der agrarischen Landnutzungsclassifikation 2010 Informationen zur gegenwärtigen Flächeninanspruchnahme von rezent bewirtschafteten sowie stillgelegten Arealen. Sie stellt darüber hinaus in Synthese mit den agrarischen Landnutzungskarten die Grundlage zum Aufbau eines räumlich expliziten Landnutzungsmodells.

Nach einer detaillierten Analyse aktueller Theorien und Methoden der Landnutzungsmodellierung befasst sich Kapitel 4 mit der Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung des Landnutzungsmodells Dyna-CLUE 2 (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2). Im Rahmen dessen werden zunächst die biophysikalischen und sozioökonomischen Determinanten des agrarischen Landnutzungswandels im Untersuchungsgebiet erfasst und bewertet. Die mittels logistischer Regressionsanalysen abgeleiteten und quantifizierten Variablen dienen innerhalb des Modells zur Ermittlung von räumlichen Standortpräferenzen der mit einbezogenen Landnutzungsklassen. Neben den statistischen Modellierungstechniken fußt das Dyna-CLUE 2 Modell auf Prozess- und Experten-Wissen zur Festlegung weiterer Modellparameter, räumlicher Bedingungen und Beschränkungen sowie der Berücksichtigung von ebenfalls regressionsanalytisch erhobenen Nachbarschaftsinteraktionen zwischen den Landnutzungseinheiten. Aufgrund der Integration dieser Nachbarschaftsbezie-

⁵ Die Bereitstellung der dem Ergebnis zugrundeliegenden RapidEye Daten wurde im Auftrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie sichergestellt. Die Verantwortung für das Ergebnis liegt beim Datennutzer.

hungen zeigen sich hohe Ähnlichkeiten des verwendeten Modells zu gezwungenen Zellulären Automaten (VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1169). Die eigentliche räumlich explizite Modellierung mittels Dyna-CLUE 2 basiert schließlich auf einer dynamischen Simulation von Konkurrenzen zwischen den verschiedenen Landnutzungstypen, die durch die lokalen Standortpräferenzen und weiteren genannten Faktoren sowie einen Landnutzungsbedarf auf überregionaler Ebene determiniert werden.

Kapitel 5 widmet sich der Simulation zukünftiger agrarischer Landnutzungsdynamiken im Untersuchungsgebiet auf Basis des parametrisierten und kalibrierten Landnutzungsmodells. Die mögliche räumliche Entwicklung des Agrarsektors wird durch zwei Entwicklungsszenarios definiert, innerhalb deren spezifische Berechnungen zur Ermittlung des zukünftigen Landnutzungsbedarfs erfolgen. Hierdurch werden explizite Informationen über die szenariospezifische Gesamtfläche bereitgestellt, die von den einzelnen Landnutzungsklassen im Untersuchungsraum pro simuliertes Jahr in Anspruch genommen werden kann. Ein Trendszenario zeigt in diesem Zusammenhang auf, welche agrarischen Landnutzungsveränderungen auftreten, wenn sich der bisherige Trend bis ins Jahr 2030 fortsetzt. Ein zweites, alternatives Szenario prognostiziert hingegen, welche landwirtschaftlichen Veränderungen durch eine erfolgreiche Umsetzung von Förderprogrammen und -maßnahmen der Europäischen Union zur Unterstützung der kanarischen Landwirtschaft bis 2030 zu erwarten sind. Die Ergebnisse der beiden szenariospezifischen Simulationen werden anschließend interpretiert und miteinander verglichen.

Die Auswirkungen der bisherigen sowie prognostizierten landwirtschaftlichen Flächendynamiken auf die räumliche Entwicklung der kanarischen Lorbeerwälder, Kiefernwälder und des Sukkulenbuschs werden in Kapitel 6 thematisiert. In diesem Zusammenhang wird zunächst anhand der Auswertung einer qualitativen Feldstudie erörtert, welches Potenzial landwirtschaftlich stillgelegte Flächen für die räumliche Regeneration der genannten Vegetationsformationen bieten. Unter Verwendung der agrarischen Landnutzungskarten und der in der LULC-Klassifikation 2010 erfassten Verbreitungsareale der Pflanzenformationen wird anschließend eruiert, welche Vegetationsareale in der Vergangenheit unter landwirtschaftlichem Einfluss standen und somit als Regenerationsflächen bezeichnet werden können. Im Anschluss daran zielt eine weitere Analyse darauf ab, das zukünftige Regenerationspotenzial für die Vegetationsformationen unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Entwicklungsszenarien zu ermitteln. In diesem Kontext werden sowohl die zu erwartenden Flächenrückgänge der Pflanzenformationen durch prognostizierte landwirtschaftliche Inwertsetzungsprozesse erfasst als auch jene Flächen ermittelt, auf denen eine Wiederbesiedlung durch die untersuchten Pflanzenformationen als wahrscheinlich einzustufen ist. Nach einer Bewertung und Interpretation der gewonnenen Ergebnisse werden schließlich raumplanerische Vorschläge unterbreitet, wie der kanarische Lorbeerwald zukünftig besser vor kulturlandschaftlichen Raumentwicklungsprozessen geschützt werden kann.

Die Arbeit schließt letztlich mit einer zusammenfassenden Schlussbetrachtung und einem Ausblick auf mögliche weitere Untersuchungen, die zur Fortsetzung der hier vorgestellten Analyse als sinnvoll erachtet werden können (Kapitel 7).

2 Untersuchungsgebiet Teneriffa

Mit einer Gesamtfläche von 2.057 km² bildet Teneriffa die größte Insel des Kanarischen Archipels, der zwischen 13°28' und 18°10' westlicher Länge und zwischen 27°37' und 29°25' nördlicher Breite vor der Westküste Marokkos inmitten des Atlantischen Ozeans liegt (vgl. Abb. 2). Die Kanarischen Inseln werden in geographischer Hinsicht Nordafrika, politisch jedoch Spanien und somit Europa zugeordnet. Zusammen mit den anderen atlantischen Inselgruppen der Azoren, Madeira, Islas Salvajes und den Kapverden umfassen sie die biogeographische Region Makaronesien (OTTO 2003, S. 32; POTT et al. 2003, S. 14, 222).

Das Untersuchungsgebiet Teneriffa gleicht im Grundriss einem nach Nordosten gerichteten Dreieck. Die Topographie ist geprägt durch eine von NE nach SW gerichtete Gebirgskette, aus der sich im Zentrum der Insel ein Stratovulkan, der Pico del Teide, erhebt. Mit einer Höhe von 3.718 m. ü. NN ist er der höchste Berg Spaniens und das Wahrzeichen der Insel. Der Teide wird auf der Südseite umringt von einer Caldera, die eine auf über 2.000 m ü. NN gelegene Hochebene, die so genannten Cañadas, umschließt. Die südlichen Außenseiten dieser Caldera fallen relativ flach zum Ozean hin ab. In Richtung Norden weist der Vulkan hingegen ein höheres Gefälle auf und geht häufig in eine Steilküste über. Die alten und teilweise ebenfalls sehr abschüssigen Gebirgsmassive im Nordosten (Anaga-Massiv) sowie im Westen (Teno-Massiv) sind des Weiteren durch zahlreiche, strahlenförmig dem Meer zustrebende Schluchten, so genannte Barrancos, gekennzeichnet (POTT et al. 2003, S. 222 f.; OTTO 2003, S. 32).

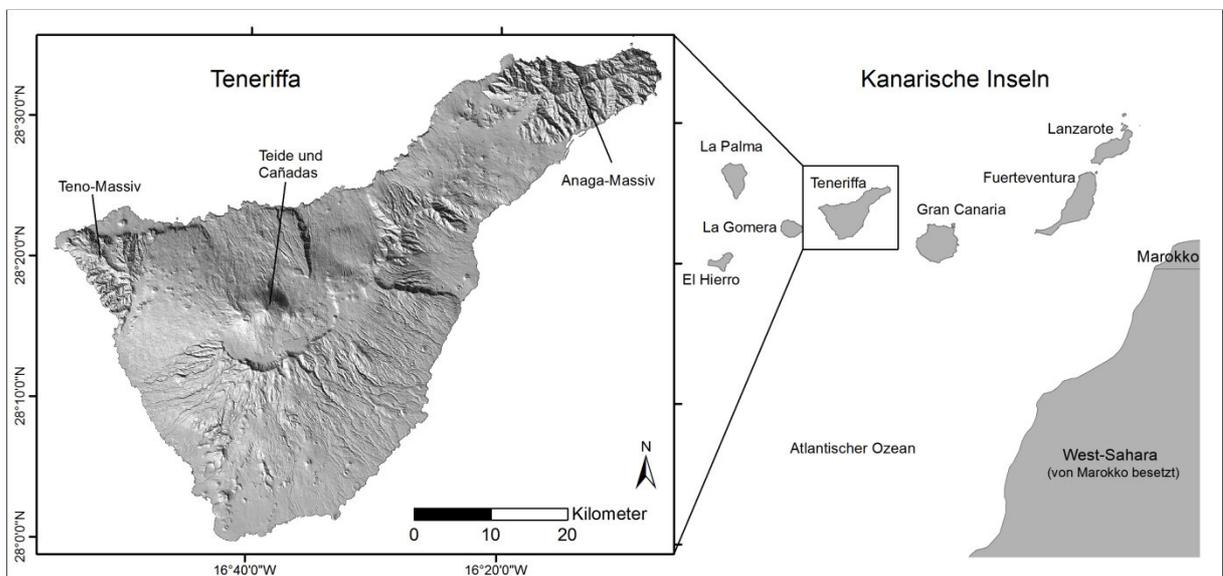


Abb. 2: Übersichtskarte zur Lage der Kanarischen Inseln (Quelle: Verändert nach GÜNTHERT et al. 2010, S. 783111; Datengrundlage: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

2.1 Physisch-geographische Gegebenheiten

Die Insel Teneriffa weist aufgrund ihrer vornehmlich durch Vulkanismus geprägten Entstehungsgeschichte sehr spezifische geologische, bodenkundliche und geomorphologische Eigenheiten auf. Die enormen orographischen Unterschiede in Verbindung mit der Lage Teneriffas im Einzugsgebiet des

feuchten Nordostpassats führen zudem zu räumlich sehr differenzierten klimatischen Verhältnissen und einer deutlichen Vegetationszonierung.

2.1.1 Geologische, bodenkundliche und geomorphologische Situation

Die Kanarischen Inseln sind trotz ihrer unmittelbaren Nähe zum afrikanischen Kontinent rein ozeanisch-vulkanischer und nicht kontinentaler Herkunft. Einem heute allgemein akzeptierten Modell zufolge wird ihre Entstehung dadurch erklärt, dass der im Bereich der Kanarischen Inseln etwa 150 bis 180 Mio. Jahre alte Ozeanboden in einer Stauzone vor der afrikanischen Küste infolge der tektonischen Schubkräfte des Sea Floor Spreading⁶ zerbrach. Die dabei entstandenen Schollenbruchstücke formten die Sockel, auf denen dann frühestens vor 20 Mio. Jahren die einzelnen Inseln durch vulkanische Prozesse aufgebaut wurden. Die submarine Entstehung der Inseln ist demnach miozän-pleistozänen Ursprungs. Durch radiometrische Datierungen der ältesten vulkanischen Materialien jeder Insel können folgende Alter angenommen werden: Fuerteventura 23,5 Mio., Lanzarote 15,5 Mio., Gran Canaria 14,5 Mio., La Gomera 12 Mio., Teneriffa 7,5 Mio., La Palma 1,7 Mio. und El Hierro 1,2 Mio. Jahre. Somit nimmt das Entstehungsalter nach Osten hin zu, was auch aus dem Erosionsgrad der Inseln ersichtlich wird (POTT et al. 2003, S. 32 ff.).

2.1.1.1 Jüngere geologische Entstehungsgeschichte und stratigraphische Gliederung

Die ersten submarinen Eruptionen, die zur Bildung von Teneriffa führten, formten die drei altbasaltischen Massive von Anaga (4 bis 6 Mio. Jahre BP), Teno (6 bis 7 Mio. Jahre BP) und Roque del Conde (7,5 Mio. Jahre BP). Aus dem Zentrum dieser zunächst eigenständigen Halbinseln hob sich schließlich vor ca. 1 Mio. Jahren der Cañadas-Vulkan heraus. In der ersten Phase des Cañadas-Vulkanismus eruptierten dabei hauptsächlich basische Magmen, im weiteren Verlauf entstanden dann höher differenzierte Vulkanite wie Trachyte und Phonolithe. Altersdatierungen von Vulkaniten des heutigen Caldera-Randes deuten darauf hin, dass sich die Cañadas-Caldera erst relativ spät, nämlich vor 0,56 bis 0,18 Mio. Jahren, gebildet hat. Innerhalb dieser erheben sich heute die beiden rezenten Strato-Vulkane des Pico del Teide und Pico-Viejo (3.103 m ü. NN). Daneben finden sich auf der Insel noch eine Vielzahl weiterer Vulkane, beispielsweise Montaña Blanca, Montaña Rajada und Los Gemelos (SCHEIDEGGER 2002; ARAÑA et al. 2000, S. 378; HÜRLIMANN et al. 2000, S. 122; ROTHE 1996, S. 166). Die Eruption der Montaña Blanca gilt als letzter größerer Ausbruch des Teide. Sie liegt schätzungsweise 200.000 Jahre zurück (POTT et al. 2003, S. 47). Der letzte Vulkanausbruch auf Teneriffa, die Eruption des in unmittelbarer Nähe zum Teide gelegenen Vulkans Chinyero, kann auf das Jahr 1909 zurückdatiert werden (MATZNETTER 1958, S. 8).

Die ältesten aufgeschlossenen Gesteine der Insel sind somit Basalte. Mit Mächtigkeiten von etwa 1.000 m bilden sie die Gebiete des Anaga- und Teno-Gebirges sowie das Gebiet um Adeje und San Lorenzo im SW (Roque del Conde). Über den miozänen Basalten liegen die Gesteinsserien der oberen und unteren Cañadas-Serie. Sie umfassen Basalte, Trachyte, Phonolithe sowie weitere, ähnliche Gesteine und bilden den zentralen Teil der Insel mit dem Prä-Teide-Massiv.

⁶ Die Bewegung ozeanischer Platten wird hauptsächlich durch emporsteigende Lavamassen im Bereich der mittelozeanischen Rücken verursacht, was zu einem Auseinanderweichen der Platten führt. Dieser Vorgang wird als Sea-Floor-Spreading bezeichnet (BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort: Plattentektonik).

Die obere Cañadas-Serie wird diskordant überlagert durch geringmächtige trachytische und trachyphonolithische bis trachy-basaltische Laven mit einem Alter von 0,6 bis 0,2 Mio. Jahren. Letztlich folgen die sauren und basischen Gesteinsserien des rezenten Vulkanismus. Ersteren gehören die Vulkanbauten des Pico-Viejo und Teide sowie die schwarzen Lavaströme des Pitón an (ROTHE 1996, S. 166 f.).

2.1.1.2 Bodenkundliche Situation des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet ist durch ein breites Spektrum an verschiedenen Böden gekennzeichnet. Es reicht einerseits von jungen Böden auf rezenten Vulkaniten bis zu sehr alten Relikt- sowie Paläoböden auf miozänen/pliozänen Vulkaniten und andererseits von Halbwüstenböden bis zu ferralitisches verwitterten Böden der feuchten Tropen. Ihr räumliches Verteilungsmuster ist dabei vorrangig durch das Alter der Landschaften sowie deren rezent- und paläoklimatischen Bedingungen geprägt. Weitere bodenbildende Faktoren wie die Reliefposition oder die Ausprägung des Gesteins können darüber hinaus zu örtlich starken Modifikationen der einzelnen Böden führen (ROTHE 1996, S. 70). Abb. 3 zeigt die räumliche Bodenverteilung im Untersuchungsgebiet. Die jeweilige Bodeneinteilung erfolgt nach dem Klassifikationsschema der USDA Soil Taxonomy (vgl. SOIL SURVEY STAFF 1999).

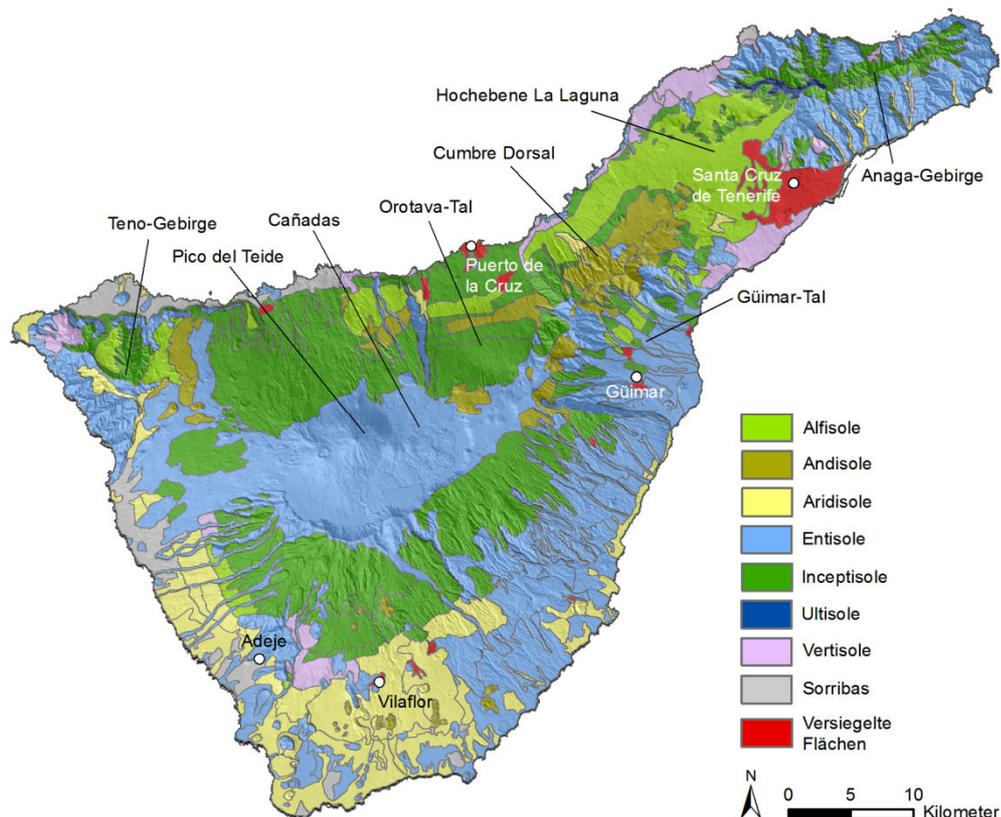


Abb. 3: Vereinfachte Bodenkarte von Teneriffa (Klassifikation nach USDA Soil Taxonomy) (Quelle: In Anlehnung an NAUMANN 2008, S. 12; Datengrundlage: FERNANDEZ CALDAS et al. 1982)

Entisole (engl. recent = jung) als erst im Ausgangsstadium der Bodenbildung befindliche Böden weisen noch keine Horizontbildung auf. Sie sind insbesondere im Höhenbereich der Cañadas und auf den von Pyroklastika überdeckten Südhängen der Insel entwickelt, daneben an den Steilhängen von Barrancos im Teno- und dem Anaga-Gebirge. Sie nehmen den flächenmäßig größten Teil der Insel

ein. Aufgrund ihrer sehr niedrigen Wasserspeicherkapazität und Nährstoffarmut spielen sie für die landwirtschaftliche Nutzung eine eher unbedeutende Rolle (NAUMANN 2008, S. 11; ROTHE 1996, S. 70). Die meist auf rezentem pyroklastischem Material entstehenden Inceptisole (lat. *inceptum* = Anfang) sind sehr schwach entwickelte Böden mit einer geringen Horizontdifferenzierung. Je nach Höhenlage, Niederschlag und Temperatur lassen sie sich in verschiedene Untergruppen gliedern, die von tropischem Charakter bis zu ranker-ähnlich schwacher Ausbildung in höheren Regionen oder an Steilhängen reichen. Zu den Inceptisolen zählen auch die so genannten Andisole (jap. *ando* = dunkler Boden). Diese meist auf rezentem vulkanischen Material entwickelten Böden enthalten große Mengen an schlecht kristallisierten Tonmineralen und vulkanischer Asche, weisen aber eine sehr hohe Wasserspeicherkapazität auf (ROTHE 1996, S. 70).

Alfisol (amerik.-engl. *pedalfer* = entkalkter Boden) können als gut entwickelte, tonreiche und tonverlagerte Böden mit einem meist hohen Gehalt an Eisenoxiden charakterisiert werden. Die vornehmlich auf geologisch alten Formationen entstandenen Böden bilden einen breiten Gürtel aus, der jedoch hauptsächlich auf den Nordteil der Insel zwischen Anaga und Teno beschränkt ist. Alfisol eignen sich sehr gut zur landwirtschaftlichen Nutzung und werden daher auch oftmals auf Terrassenflächen in der Küstenzone der Insel verbracht (NAUMANN 2008, S. 11; ROTHE 1996, S. 70).

Ultisol (lat. *ultimus* = der letzte) als stark verwitterte, basenarme Mineralböden mit Lessivierungshorizont finden sich einzig auf einer kleinen Fläche im Norden Teneriffas. Sie zeichnen sich durch eine hohe Nährstoffarmut aus und sind daher für landwirtschaftliche Zwecke nicht geeignet (NAUMANN 2008, S. 13; BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort Ultisols; ROTHE 1996, S. 70).

Vertisol (lat. *vertere* = wenden) sind eher kleinräumig vorkommende Böden im Küstenbereich des Nordens sowie vereinzelt in den Hangbereichen des Südens und Südwestens. Diese sehr humosen, tonigen und meist kalkhaltigen Böden sind durch eine hohe Gefügedynamik gekennzeichnet und können eine Mächtigkeit von zum Teil über 2 m erreichen. Aufgrund der hohen Austauschkapazität und einer Basensättigung von über 50% stellen Vertisol oftmals fruchtbare Ackerböden dar (NAUMANN 2008, S. 13; ROTHE 1996, S. 71).

Aridisol (lat. *aridus* = trocken) sind fast ausschließlich im Süden ausgebildet, wo sie großflächig bis in Höhen von 800 m ü. NN auftreten können. Die sehr gut entwickelten Böden weisen gelegentlich sehr hohe Salzgehalte auf und sind häufig durch eine starke Karbonat-Akkumulation gekennzeichnet (NAUMANN 2008, S. 13; ROTHE 1996, S. 71).

Die ebenfalls in der Bodenkarte vertretenen Sorribas sind künstliche, durch den Menschen angelegte Böden. In Arealen, die zu flachgründige Böden, jedoch geeignete thermische Verhältnisse aufweisen, wird durch die Aufschüttung von nährstoffreichem Bodensubstrat aus höher gelegenen Regionen der Insel eine grundlegende Voraussetzung für eine landwirtschaftliche Inwertsetzung geschaffen. Häufig werden dabei auch Böden verschiedener Herkunft aufgeschüttet. Den Sorribas kann eine wesentliche Rolle in der Entwicklung der kanarischen Landwirtschaft im Allgemeinen und den Küstenzonen im Besonderen zugeordnet werden (MATZNETTER 1958, S. 45).

2.1.1.3 Morphologische Verhältnisse und Geländeformen

Die überwiegend aus Vulkaniten aufgebaute Insel ist morphologisch das Resultat eines intensiven Wechselspiels zwischen endogener und exogener Dynamik, aus dem die heutigen morphologischen Großformen entstanden sind (ROTHE 1996, S. 3). Hierzu zählen beispielsweise die Bergmassive des Teno- und Anaga-Massivs, deren auffälligstes morphologisches Charakteristikum die zahlreichen tiefgreifenden Schluchten und Kerbtäler sowie schmalen Bergrücken, Kämmen und Grate sind. Das

Teno-Gebirge im Nordwesten der Insel, dessen höchste Erhebung 1.345 m ü. NN beträgt, weist zudem eine steile Kliffumrandung im Westen und Norden auf, während das Berglandsinnere einen verhältnismäßig hohen Reliefssockel besitzt. Diesem sitzen die wasserscheidenden Bergrücken und höchsten Erhebungen auf. Das Längsprofil der meisten Täler zeigt dementsprechend nach einem steilen Ursprungsgebiet und mäßiger abfallendem Mittellauf eine erneute Versteilung am Rande des Berglandes. Im Anaga-Gebirge, dessen höchste Erhebung 1.024 m ü. NN beträgt, ist der Reliefssockel tiefgreifender durch das Kerbtalrelief erniedrigt worden als im Teno. Auch hier zeigen die Täler ihre größte Steilheit im oberen Viertel des Profils. Westlich des Anaga-Gebirges breitet sich schließlich die Hochfläche von La Laguna auf einer Höhe von 550 bis 600 m ü. NN aus. Sie stellt neben den Cañadas die einzig größere Ebene der Insel abseits der Küstenregionen dar. Der langgestreckte Bergrücken der Cumbre Dorsal verbindet wiederum die Ausläufer des Anaga-Massivs bzw. der vorgelagerten La Laguna-Hochfläche mit dem Teide-Pico-Viejo-Komplex und den Cañadas im Zentrum des Untersuchungsgebietes. Dieser Bergrücken steigt in südwestlicher Richtung von 600 auf bis zu 2.400 m ü. NN an und bildet als zentrales Rückgrat der Insel die Wasserscheide zwischen Nord- und Südabdachung (HÖLLERMANN 1982, S. 22 ff.).

2.1.2 Klimatische Gegebenheiten

Die Kanarischen Inseln und somit auch das Untersuchungsgebiet Teneriffa können im Rahmen der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation der subtropischen Klimazone zugeordnet werden. Das Klima ist somit durch eine ausgeprägte Trockenheit im Sommer und Niederschlägen im Winter sowie durch milde bzw. mediterrane Temperaturen während des ganzen Jahres gekennzeichnet. Infolge der Lage des Untersuchungsraums im Überschneidungsbereich verschiedener Wetterlagen besteht jedoch ein abwechslungsreiches Witterungsgeschehen mit kurzfristigen Wetterwechseln vor allem im Winter (OTTO 2003, S. 35; HÖLLERMANN 1982, S. 40). Es können insgesamt fünf verschiedene Hauptwetterlagen unterschieden werden: Regime des Nordost-Passates; Einbruch trocken-heißer Luftmassen aus der Sahara; Einbruch maritim-polarer, feucht-kühler Luftmassen; Einbruch maritim-tropischer, feucht-warmer Luftmassen sowie ein antizyklonales trockenes Wetter (HUETZ DE LEMPS 1969; zit. in OTTO 2003, S. 35). Die jeweilige Wettersituation wird maßgeblich durch die Lage und Intensität der Azorenhochs bedingt, von denen im Normalfall ein mäßig starker Passatwind aus nordöstlicher Richtung weht (POTT et al. 2003, S. 62).

Dieser Nordost-Passat beherrscht im Sommer zu 90% und im Winter zwischen 50% und 70% das Wettergeschehen auf den Kanarischen Inseln. Kerncharakteristikum der Passatwetterlage ist die Aufteilung der Troposphäre in zwei klar voneinander getrennte Luftschichten. Die untere Luftschicht ist auf ihrem Weg vom subtropischen Hochdruckgürtel in stetigem Kontakt mit der Meeresoberfläche und wird dadurch verstärkt mit Feuchtigkeit angereichert. Infolge der vor der Nordwestafrikanischen Küste aufquellenden kühlen Wassermassen des Kanarenstroms liegen die Oberflächentemperaturen des Atlantischen Ozeans hier auf einem gleichbleibenden niedrigen Niveau. Dies führt zu einer Abkühlung der unteren Luftschicht, woraus der kühl-feuchte Wind des Nordost-Passats resultiert. Die Luftmassen des darüber liegenden, so genannten Oberpassats haben hingegen keine Möglichkeit, zusätzlichen Wasserdampf aufzunehmen. Sie zeichnen sich durch sehr niedrige Luftfeuchtigkeit und bis zu 10 °C höhere Temperaturen aus, wodurch in der Grenzschicht der beiden Luftmassen eine Temperaturinversion ausgebildet ist (POTT et al. 2003, S. 62 f.). Trifft der Nordost-Passat auf eine topographische Barriere – im Falle Teneriffas auf die jeweiligen Gebirgsmassive – steigt die feuchte Luft bis zur Inversionsschicht auf und kondensiert, wodurch an der Nordseite der

Insel eine dichte Stratocumulus-Wolkendecke zwischen 600 und 1.500 m ü. NN entsteht. Die Obergrenze der Wolkendecke schwankt dabei mit der Lage der Inversion. Oberhalb des Wolkenmeers und der Temperaturinversion herrscht meist wolkenloses, sehr trockenes und warmes Wetter, während der Bereich in den Wolken durch kühles und feuchtes Wetter gekennzeichnet ist. In der Wolkenzone kommt es jedoch weniger zu vertikalen Niederschlägen als vielmehr zu einem Nebelniederschlag, der insbesondere an den exponierten Hanglagen beträchtlich sein kann. Unterhalb der Wolkendecke herrschen wiederum milde Temperaturen ohne Niederschlag (ОТТО 2003, S. 36).

Durch eine Verschiebung des Azorenhochs Richtung Osten können sich im Gebiet der Kanaren östliche, von Staub durchsetzte Saharawinde einstellen. Diese auch als Levante bezeichnete Situation kann im Sommer zu extrem heißem und trockenem Wetter mit Temperaturen von über 40 °C führen. Eine vor allem im Winter auftretende Abschwächung oder Verschiebung des Azorenhochs Richtung Südwesten bewirkt hingegen den Einbruch von maritimer, kühler Polarluft, wodurch teilweise starke Niederschläge vor allem im Norden der Insel aufkommen können. Unstabile Wetterlagen im Winterhalbjahr führen in seltenen Fällen dazu, dass tropische Tiefdruckgebiete aus Südwesten in Richtung Kanaren wandern und intensive Niederschläge vor allem im Süden der Insel aufkommen lassen. Durch die allgemeine winterliche Verschiebung des Azorenhochs Richtung Süden und der Ausbildung von Hochdruckgebieten in unmittelbarer Nähe zu den Kanaren können schließlich auch Hochdruckwetterlagen entstehen. Sie führen zu wolkenlosem Himmel und teilweise sommerlichen Temperaturen (ОТТО 2003, S. 36).

Die beschriebene großklimatische Situation wird durch verschiedene Faktoren wie beispielsweise die Orientierung zur Hauptwindrichtung örtlich modifiziert, so dass sich eine Reihe von Lokalklimaten ausbilden. Die enorme vertikale Ausdehnung der Insel in Verbindung mit der spezifischen Luftmassenschichtung vor allem während des Passatregimes bewirkt zudem eine klare hypsometrische Gliederung bezüglich der thermischen und hygri-schen Gegebenheiten. So kann eine semiaride Fußstufe unterhalb der Wolken, eine semihumide Mittelstufe auf Wolkenniveau sowie eine semiaride, strahlungsintensive Hochstufe über den Wolken unterschieden werden (NAUMANN 2008, S. 16 f.; POTT et al. 2003, S. 72; HÖLLERMANN 1982, S. 43 f.) (vgl. Abb. 4 und Abb. 5).

2.1.2.1 Temperatur-Verhältnisse

Die Jahresmitteltemperatur liegt im Süden und Südwesten um ca. 2 bis 3 °C höher als im Norden und wird maßgeblich durch eine erhöhte Strahlungsexposition, geringere Bewölkung sowie eine Art leeseitigen Föhn Effekt verursacht (HÖLLERMANN 1982, S. 43). So überschreiten die Temperaturen insbesondere an der Süd- und Südwestküste großflächig die 20 °C-Marke und sinken bis etwa 1.000 m ü. NN auf etwa 16 bis 18 °C (vgl. Abb. 4). Im Norden beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur im Küstenbereich zwischen 18 und 20 °C und erreicht ab einer Höhe von 1.000 m ü. NN ca. 14 bis 16 °C. Diese enormen Nord-Süd-Unterschiede sind in den höchsten Lagen jedoch nicht mehr so stark ausgeprägt. Ab etwa 1.500 m ü. NN beträgt die Durchschnittstemperatur in allen Bereichen des Untersuchungsgebietes 12 bis 14 °C und sinkt in den Gebirgsregionen ab 2.000 m ü. NN auf 10 bis 12 °C. Am Gipfel des Pico del Teide auf 3.718 m ü. NN werden schließlich Minimalwerte von 1,5 °C erreicht.

Der mittlere Höhengradient der Temperaturabnahme ist durch regionale, lokale und jahreszeitliche Disparitäten gekennzeichnet. Innerhalb der Fußstufe besteht ein Temperaurgradient von 0,7 °C pro 100 m. Die Mittelstufe hingegen weist wesentlich geringere Werte, insbesondere während der Inver-

sionslagen, auf. Durch die erhöhte Strahlungsintensität besteht in den Hochgebirgslagen wiederum ein Temperaturgradient von 0,53 °C pro 100 m (NAUMANN 2008, S. 17; HÖLLERMANN 1982, S. 43).

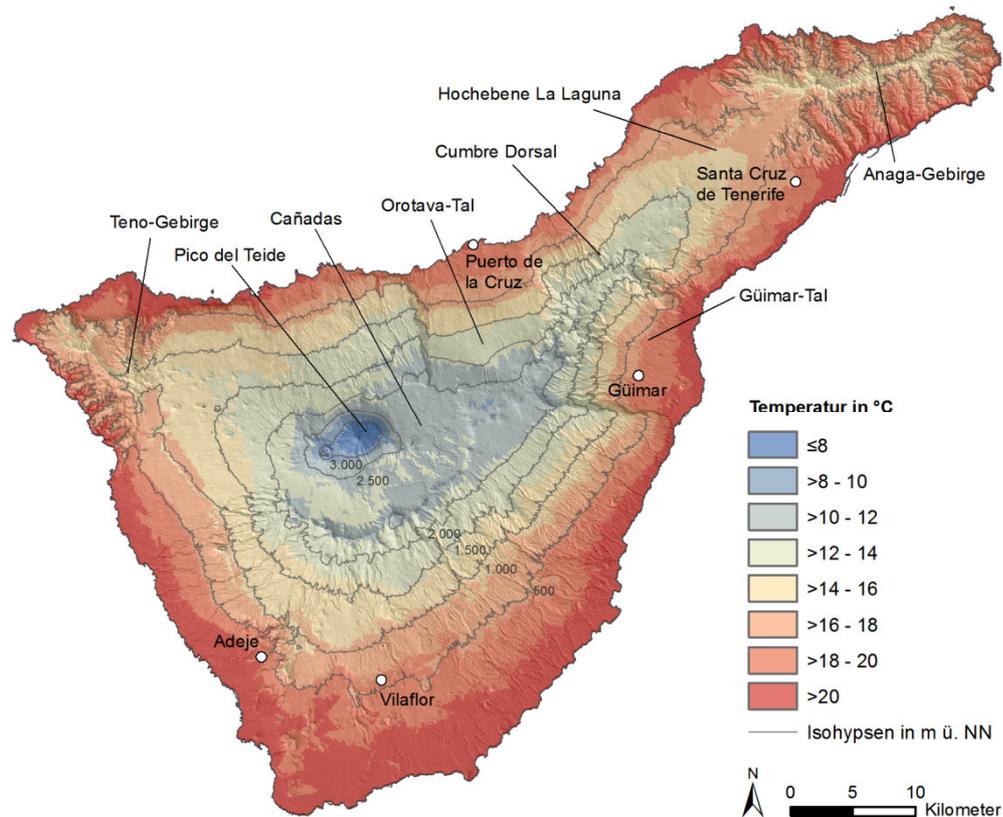


Abb. 4: Karte der jährlichen Durchschnittstemperaturen im Zeitraum 1981 bis 2010 auf Teneriffa (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: GOBIERNO DE CANARIAS 2013d)

2.1.2.2 Niederschlagsregime

Die räumliche Niederschlagsverteilung hängt auf Teneriffa hauptsächlich von orographischen Bedingungen wie Höhe ü. NN und Exposition ab. Die orographische Barriere der Ost-West gerichteten Bergmassive bewirkt darüber hinaus eine Zweiteilung der Insel in eine feuchte Luv- und eine trockene Lee-Seite (vgl. Abb. 5). Der Hauptwolkenstufe entsprechend werden die höchsten jährlichen Niederschläge an den Nordhängen der Mittelstufe erreicht (NAUMANN 2008, S. 17; HÖLLERMANN 1982, S. 45).

Auf der Luv-Seite steigt der Jahresniederschlag von 350 bis 400 mm in den Küstenregionen bis auf 800 mm zwischen 900 und 1.500 m ü. NN an – in einigen Teile der Cumbre Dorsal und an den Kamm-lagen des Anaga-Gebirges werden teilweise sogar Niederschlagswerte von 900 mm erreicht. Diese Maximalwerte nehmen schließlich mit zunehmender Höhe wieder ab. Die Nordseite kann somit in eine semi-aride Küstenzone bis 200 m ü. NN, eine semi-aride bis semi-humide Übergangszone zwischen 200 und 500 m ü. NN, eine semi-humide Mittelstufe zwischen 500 und 1.500 m ü. NN und eine trockene Bergstufe oberhalb von 2.000 m ü. NN untergliedert werden (OTTO 2003, S. 36 f.; SIEGMUND & NAUMANN 2001, S. 105; HÖLLERMANN 1982, S. 45).

An der leewärtigen Süd- und Südwestseite beträgt die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge in den Küstenbereichen nur etwa 100 mm und steigt auf ein Maximum von etwa 500 mm in einer Höhe von 1.500 bis 1.800 m. ü. NN an. Somit herrscht in der Küstenzone bis 250 m ü. NN ein vollari-

des Klima, gefolgt von einer semi-ariden Zone zwischen 250 bis 750 m ü. NN und einer trockenen Bergstufe bis zum Rand der Caldera. Der subhumide bzw. humide Klimatyp fehlt im Südteil der Insel gänzlich (OTTO 2003, S. 36 f.).

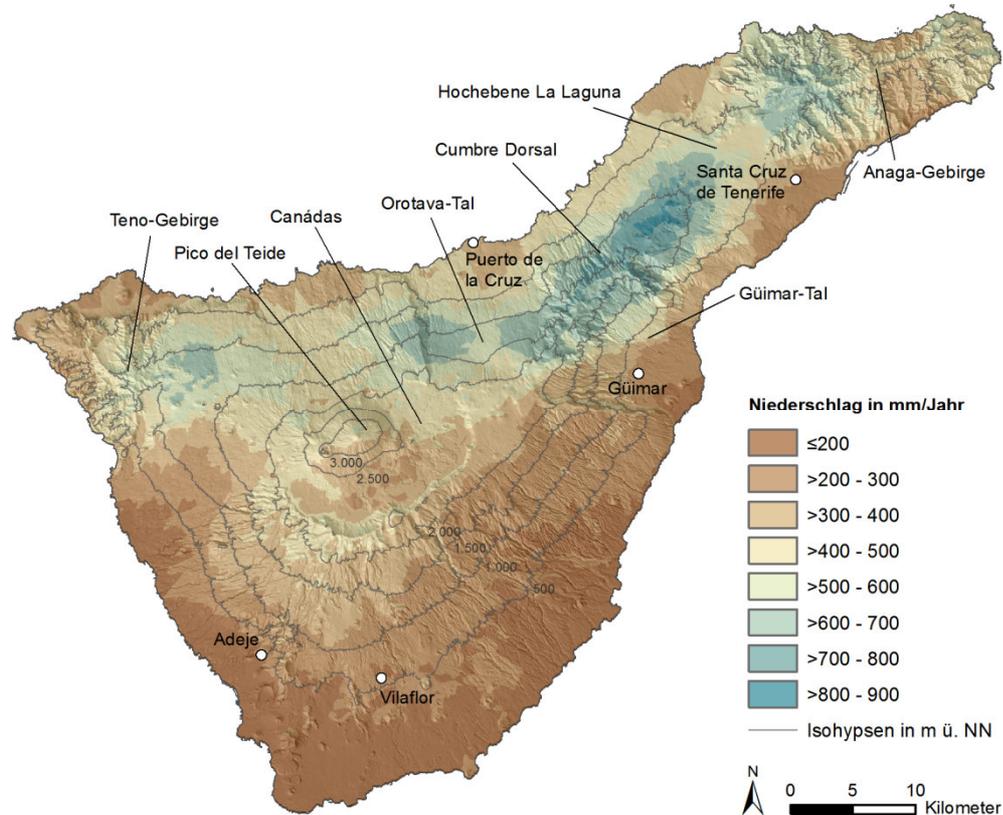


Abb. 5: Karte der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssummen zwischen 1981 und 2010 auf Teneriffa (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: GOBIERNO DE CANARIAS 2013d)

2.1.3 Vegetationsgeographische Situation

Teneriffa weist eine außerordentliche hohe ökologische Vielfalt auf, die mitunter auf die einzigartigen klimatischen und hypsometrischen Gegebenheiten zurückzuführen ist. Insbesondere die stabile Schichtung der Luftmassen während der Passatwetterlagen, die orographischen Gegebenheiten und die daraus resultierende, sehr unterschiedliche regionale sowie vertikale Verfügbarkeit von Wasser stellt eine wichtige Grundlage für die gesamte Vegetationsgliederung der Insel dar (POTT et al. 2003, S. 104). In Verbindung mit diesen klimatischen Verhältnissen können spezifische vertikale und expositionsabhängige Vegetationsgürtel im Untersuchungsgebiet definiert werden (DEL ARCO AGUILAR et al. 2010, S. 3090).

CHRIST (1885) unterschied in Anlehnung an die vorherrschende Passatwetterlage an der Nordseite Teneriffas drei verschiedene klimatisch-vegetationsgeographische Höhenstufen – eine Region unter den Wolken, eine Region in den Wolken sowie eine Region über den Wolken. Diese nach POTT et al. (2003, S. 112) und OTTO (2003, S. 42) relativ einfache, aber sehr plausible Vegetationszonierung wurde in den vergangenen Jahrzehnten weiter differenziert, so dass sich heute nach allgemeingültiger Auffassung verschiedener Autoren insgesamt sieben, von POTT et al. (2003, S. 112) auch als Vegetationslandschaften bezeichnete Zonen unterscheiden lassen (vgl. DEL ARCO AGUILAR et al. 2010; RIVAS MARTÍNEZ et al. 1993; CEBALLOS & ORTUÑO MEDINA 1976). Die Region unter den Wolken umfasst demnach die Küsten- und Felsvegetation, den Sukkulentebusch der Basalzone (Tabaibal / Cardonal)

und die thermophilen Buschwälder (Bosque termófilo und Sabinares). Die Region in den Wolken beginnt mit den als grünen Bergwald (Monteverde) zusammengefassten Arealen des Lorbeerwald (Laurisilva) und der Baumheide-Buschwälder (Fayal-Brezal), gefolgt von den Kanarenkiefernwäldern (Pinar). Die Region über den Wolken beginnt schließlich mit der oberen Grenze des Pinar. Darüber folgen die Teideginster-Gebüsche (Retamar) sowie die Teideveilchen-Fluren (Violeta del Teide) (OTTO 2003, S. 43; SCHMIDT 1997, S. 10).

Abb. 6 gibt in Form einer vereinfachten Karte der potenziellen natürlichen Vegetation⁷ einen Überblick über die räumliche Lage dieser Vegetationslandschaften auf Teneriffa (vgl. DEL ARCO AGUILAR 2006; DEL ARCO AGUILAR et al. 2006). Hierbei ist anzumerken, dass durch die infrastrukturelle sowie land- und forstwirtschaftliche Inwertsetzung der Insel seit dem 15. Jahrhundert zahlreiche Gebiete insbesondere des Monteverde und der thermophilen Buschwälder verloren gingen, so dass diese bis zum heutigen Zeitpunkt zum Teil stark fragmentiert bzw. im Falle der Buschwälder fast vollständig degradiert wurden (vgl. Kapitel 3.3.3).

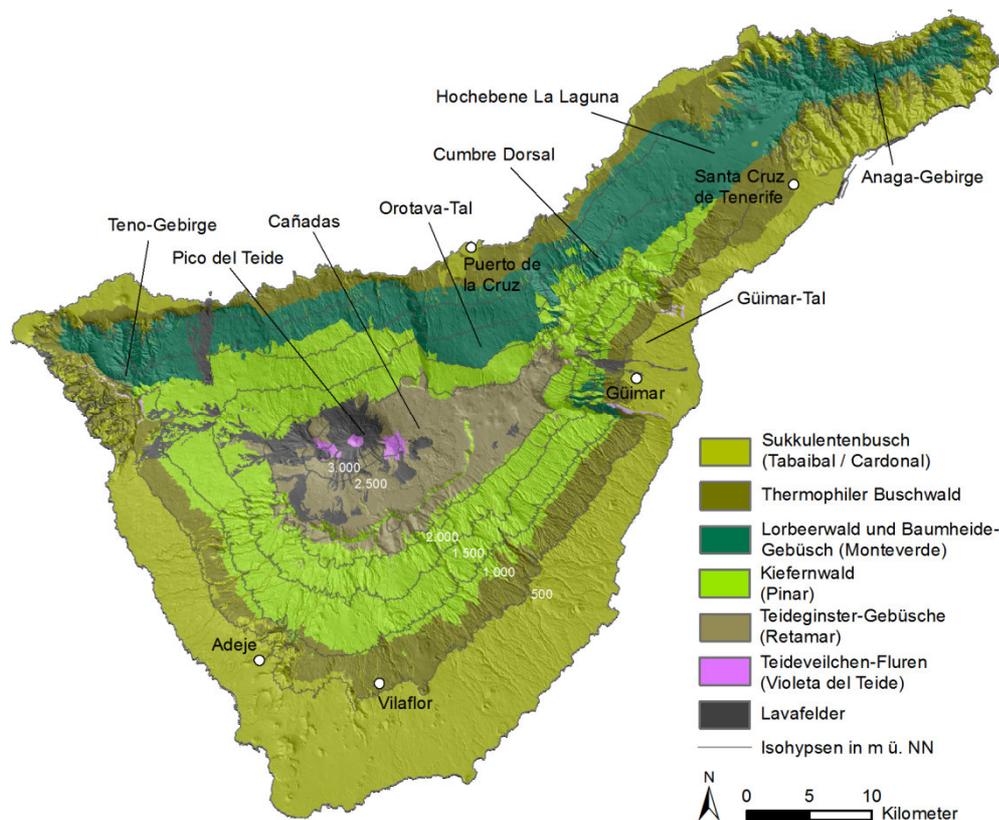


Abb. 6: Vereinfachte Karte der potenziellen natürlichen Vegetation auf Teneriffa nach DEL ARCO AGUILAR 2006 und DEL ARCO AGUILAR et al. 2006 (Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

2.1.3.1 Küsten- und Felsvegetation

Der Küstenbereich Teneriffas ist geprägt durch schroffe Felsabhänge mit weitreichenden, geröllhaltigen schwarzen Lavabuchten, vereinzelt Sandküsten und bis zu 500 m hohen Steilküsten (vgl. Abb. 7).

⁷ Als potenzielle natürliche Vegetation (PNV) wird in diesem Zusammenhang die theoretische Verbreitung der natürlichen Vegetation in einem Untersuchungsraum verstanden, die ohne menschliche Einflüsse aufgrund aktueller klimatischer, edaphischer und floristischer Bedingungen bestehen würde. Die Struktur und Zusammensetzung der PNV basiert also im Wesentlichen auf der Korrelation natürlicher und naturnaher Ökosystem-Restbestände mit geologischen, pedologischen und klimatischen Standortbedingungen (LOIDI et al. 2012; BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 2008).

Allen Küstentypen ist eine halophytenreiche, d.h. gegenüber erhöhten Salzkonzentrationen in Boden und Luft tolerante Vegetation gemein (OTTO 2003, S. 46; POTT et al. 2003, S. 112).

Die im unmittelbaren Brandungsbereich liegenden Steilküsten vor allem der nordexponierten Hänge sind dabei durch Strandfelsvegetation wie beispielsweise verschiedene Strandfliederarten (*Limonium* sp.) oder *Frankenia ericifolia* bzw. *Frankenia laevis* charakterisiert (vgl. Abb. 7). Einzig an der Südküste Teneriffas bei El Médano und Los Christianos schließt sich an den Halophytensaum der Küsten- und Felsvegetation eine subtropische Halbwüste an. Die hier vorherrschende Stranddünenvegetation zeichnet sich vor allem durch ihre Anpassung an Standorte mit geringem Wasserhaltevermögen und Nährstoffarmut aus. Darüber hinaus entsteht zusätzlicher Pflanzenstress durch die hohe Albedo des für diese Region typischen hellen Sandbodens mit hohen Tagestemperaturschwankungen sowie durch eine erhöhte Austrocknungsgefahr infolge der ständigen Winde. Typische Vertreter dieses aus Halbsträuchern und einem großen Anteil an Therophyten zusammengesetzten Vegetationstyps sind beispielsweise *Launaea spinosa*, das stark sukkulente Jochblattgewächs *Zygophyllum fontanesii*, *Traganum moquinii* und *Polycarpha nivea*. An feuchteren küstennahen Arealen findet sich zudem die Kanarische Tamariske (*Tamarix canariensis*) als einziger Baum der Küstenvegetation. Neben Strandfels- und Dünenvegetation existieren auf episodisch überfluteten Salzflächen zwischen den Dünen zudem verschiedene halophile Gesellschaften wie beispielsweise *Sarcocornia perennis*, *Arthrocnemum macrostachyum* oder *Suaeda vera* (NAUMANN 2008, S. 21; POTT et al. 2003, S. 117; EHRIG 1998, S. 81 ff.).



Abb. 7: Strandfelsvegetation im Norden (links), Nordwesten (Mitte) und Süden (rechts) Teneriffas (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

2.1.3.2 Sukkulentenbusch (*Tabaibal & Cardonal*)

Der Sukkulentenbusch als mitunter auffälligste Pflanzenformation Teneriffas reicht auf der nordöstlichen Seite der Insel bis in mittlere Höhen von 400 m ü. NN und auf der Südseite auf über 700 m ü. NN, bis er nach oben hin durch den thermophilen Buschwald bzw. Monteverde abgelöst wird. Bis heute existieren sehr großflächige naturnahe Areale, vielerorts wurde diese Vegetationsformation jedoch durch die Ausweitung von Siedlungsgebieten und durch landwirtschaftliche Inwertsetzung zerstört oder stark verändert (POTT et al. 2003, S. 122).

Besonders auffälliges Merkmal dieser Pflanzenformation sind zum einen eine ausgeprägte Stammsukkulenz der Pflanzen und zum anderen die so genannte Schopfblättrigkeit, d.h. die Pflanzen sind lediglich am Ende des Zweiges in Form einer dichtgedrängten Blattrosette beblättert. Es kann daher zwischen zwei Sukkulenten-Formationen unterschieden werden, dem Schopfblatt-Sukkulentenbusch

(span. Tabaibal) mit etwa 10,1% Anteil an der Gesamtfläche Teneriffas und dem Kandelaber-Sukkulentenbusch (span. Cardonal) mit etwa 4,2% Flächenanteil (vgl. Abb. 8).

Der Tabaibal, dessen Leitpflanze die kugelbuschige Balsamwolfsmilch (*Euphorbia balsamifera*, span. Tabaiba dulce) ist, besticht durch ein recht gleichförmiges Aussehen und eine offene Vegetation mit einem durchschnittlichen Bedeckungsgrad von 35% bis vereinzelt 70%. Auf trockeneren, küstennahen Standorten dominiert die Balsamwolfsmilch, während auf tiefgründigeren, feuchteren Böden in höheren Lagen die Stumpflättrige Wolfsmilch (*Euphorbia obtusifolia*, span. Tabaiba amarga) vorherrscht. Weitere charakteristische Vertreter sind *Euphorbia aphylla*, *Campylanthus solsoloides* und *Ceropegia fusca* (POTT et al. 2003, S. 123; EHRIG 1998, S. 76 f.).

Kerncharakteristikum des Cardonal ist die kaktusähnliche und kandelaberwüchsige Kanaren-Wolfsmilch (*Euphorbia canariensis*, span. Cardón). In ihrer unmittelbaren Nachbarschaft treten häufig weitere Sträucher auf, weshalb diese Sukkulentenbusch-Formation heterogener erscheint als der Tabaibal. Der Cardonal tritt überall entlang der Sukkulentenbuschstufe zwischen 50 und 500 m ü. NN auf, wobei vor allem im Umfeld der Barrancos des Anaga und Teno-Massiv die größten Bestände zu finden sind. Im Vergleich zum Schopfbblatt-Sukkulentenbusch ist der Cardonal des Weiteren artenreicher und teilweise sehr dichtwüchsig – der Bedeckungsgrad reicht von 40% bis 90%. Weitere Charakterarten sind unter anderem *Kleinia nerifolia*, *Euphorbia regis-jubae* und *Asparagus spec.* (EHRIG 1998, S. 77 f.)



Abb. 8: Tabaibal-Sukkulentenbusch (links) und Cardonal-Sukkulentenbusch (Mitte, rechts) im Untersuchungsgebiet (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

2.1.3.3 Thermophiler Trockenbusch (*Bosque termófilo & Sabinar*)

Der Übergangsbereich zwischen Sukkulentenbusch und dem montanen Waldgürtel ist im Gegensatz zur unteren Tabaibal-/Cardonal-Stufe durch eine höhere Feuchtigkeit, geringere Insolation sowie niedrigere Temperaturen charakterisiert. Diese standörtlichen Bedingungen begünstigen das Auftreten verschiedener wärmeliebender Hartlaubgehölze, die von SCHÖNFELDER & SCHÖNFELDER (1997, S. 18, zit. in EHRIG 1998, S. 80) auch als thermophiler Buschwald zusammengefasst werden (vgl. Abb. 9). Bei dieser Pflanzenformation handelt es sich um ehemals lichte Wälder des Phönizischen Wacholders (*Juniperus phoenica* L., span. Sabina) und des Kanaren-Ölbaums (*Olea europaea* L. ssp. *cerasiformis*). Ebenfalls zum *Bosque termófilo* zählen die Palmenhaine der Kanarischen Dattelpalme (*Phoenix canariensis* hort. ex Chab.) und die Bestände des Drachenbaumes (*Dracaena draco* L.) (POTT et al. 2003, S. 132; EHRIG 1998, S. 80).

Die Zone des thermophilen Trockenbuschs wurde aufgrund ihrer für landwirtschaftliche Zwecke optimalen Klimabedingungen zum Teil stark überformt bzw. aufgelöst. Flächenhaft bedeutsame Bestände der einst großflächigen Wälder finden sich heute daher nur noch an schwer zugänglichen Felsstandorten. Im Norden und Nordosten der Insel grenzt die Trockenbusch-Formation stellenweise an die salzbeeinflusste Küstenzone. An ihrer Höhengrenze in der Übergangszone zur subhumiden und humiden Region in den Wolken vermischen sich die Sabinares in Nord- und Nordost-Expositionen mit dem Monteverde, während sie in südexponierten Bereichen höhenwärts in die Pinar-Formation eindringen (vgl. Abb. 6) (POTT et al. 2003, S. 132; EHRIG 1998, S. 80).



Abb. 9: Durch *Phoenix canariensis* (Kanarische Dattelpalme) dominierter thermophiler Trockenbusch in der Küstenzone und in mittleren Höhenregionen (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

2.1.3.4 Lorbeerwald und Baumheide-Buschwälder (Monteverde)

Die Vegetationszone der immergrünen Lorbeerwälder (span. Laurisilva) und Baumheide-Buschwälder (span. Fayal-Brezal) umfasst die passatorientierten, feuchteren Regionen der Nordseite zwischen 600 und 1.700 m Höhe ü. NN (vgl. Abb. 10). Die Temperaturverhältnisse in dieser auch als Lorbeerwaldstufe bezeichneten Höhenzone sind mit einer Jahresmitteltemperatur von 15 °C sehr ausgeglichen. Die Niederschlagsmengen liegen zwischen 700 und 900 mm pro Jahr, zu denen aufgrund der Lage inmitten des Passatwolkengürtels beträchtliche Mengen an horizontalem Niederschlag hinzukommen. Aufgrund einer markanten Trockenzeit im Sommer, in der die Luftfeuchte von 80% auf etwa 40% sinkt, kann allerdings beim kanarischen Lorbeerwald nicht von einem echten Nebelwald gesprochen werden. Die humusreichen, tiefgründigen Böden zeigen jedoch trotz der sommerlichen Trockenheit eine ganzjährig positive Wasserbilanz, auch wenn im Juli/August die oberste Bodenschicht austrocknet (OTTO 2003, S. 45; EHRIG 1998, S. 90 f.).

Lorbeerwälder sind grundsätzlich vielschichtig aufgebaut und bilden mit fast 90% Bodenbedeckung einen annähernd geschlossenen Bestand. Die Baumschicht erreicht dabei Höhen von 20 bis 30 m und zeigt mit einer Kronenabdeckung von 95 bis 100% ein geschlossenes Kronendach. Typische Vertreter innerhalb der Baumschicht sind beispielsweise der Kanaren-Lorbeer (*Laurus novocanariensis* Rivas Mart., Lousã, Fern. Prieto, E. Días, J.C. Costa & C. Aguiar nom. nov., ehemals klassifiziert als *Laurus azorica* Franco (Seub.)) als häufigste Art, der Stinklorbeer (*Ocotea foetens*), die Indische Persea (*Persea indica*), das Ölbaumgewächs (*Picconia excelsa*), die Kanaren-Stechpalme (*Ilex canariensis*) oder der portugiesische Kirschlorbeer (*Prunus lusitanica*) (OTTO 2003, S. 45; RIVAS MARTÍNEZ et al. 2002, S. 703; EHRIG 1998, S. 91). Die Strauchschicht ist neben Baumjungwuchs durch verschiedene Sträucher und Baumsträucher gekennzeichnet. Hierzu zählen beispielsweise der Kanaren-Enzian (*Ixanthus viscosus*),

den Kanaren-Fingerhut (*Isoplexis canariensis*), der Kanaren-Storchschnabel (*Geranium canariensis*) oder die Kanaren-Glockenblume (*Canarina canariensis*). Epiphytische Farne, Moose und Lianen bilden die dritte Schicht. Sie wachsen vornehmlich in den humideren Lagen der Lorbeerwaldstufe und vervollständigen deren subtropischen Charakter. Die Krautschicht ist letztendlich aufgrund des Lichtmangels eher spärlich ausgebildet (OTTO 2003, S. 45; EHRIG 1998, S. 92).

Der Baumheide-Buschwald (Fayal-Brezal) mit den charakteristischen Hauptvertretern *Erica arborea* L. (Baumheide, span. Brezo) und *Myrica faya* (Gagelbaum, span. Faya) entsteht zumeist aus degradiertem Lorbeerwald, der aufgrund seiner Verwendung als Möbelholz, Bauholz und Brennholz oder als Areal für landwirtschaftliche Nutzung in der Vergangenheit stark dezimiert wurde (vgl. Kap. 6.1). Aufgrund seiner höheren Toleranz bezüglich arider Bedingungen und niedrigeren Temperaturen findet sich diese Ersatzgesellschaft darüber hinaus auch in Gebieten, die für den Lorbeerwald nur suboptimale Wachstumsbedingungen aufweisen. Hierzu zählen beispielsweise windexponierte Berg- rücken und von Trockenheit bedrohte Waldsäume im Übergang zum Sukkulentenbusch (NAUMANN 2008, S. 23; POTT et al. 2003, S. 156; EHRIG 1998, S. 94).

Die Baumheide und der Gagelbaum bilden sehr großflächige Mischbestände mit einer Höhe von 8 bis 12 m und besitzen mit einer Bedeckung von 80 bis 95% eine fast geschlossene Kronenschicht. Die Kräuter im Unterwuchs sind besonders gut an die Trockenheit angepasst. Zudem finden sich im Baumheide-Buschwald zahlreiche epiphytische Moose und Flechten (EHRIG 1998, S. 92).



Abb. 10: Lorbeerwald (links, Mitte) und Baumheide-Buschwald (rechts) im Untersuchungsgebiet (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

2.1.3.5 Kanaren-Kiefernwald (Pinar)

Der oberhalb der Lorbeerwaldzone befindliche Kiefernwald bildet einen unterschiedlich breiten Vegetationsgürtel aus, der auf der Luv-Seite zwischen 1.500 bis 2.400 m ü. NN eine feuchtere und auf der Lee-Seite zwischen 1.000 und 2.200 m ü. NN eine trockenere Variante ausbildet (vgl. Abb. 11). Der Wald ist relativ artenarm und wird nahezu vollständig durch die Kanaren-Kiefer (*Pinus canariensis*) dominiert.

Die im Schatten der Passatwolken befindlichen Kiefernwälder können als typische Trockenwälder mit einem sehr offenen Bestand, aber enormen Waldhöhen bezeichnet werden. Ein Unterwuchs ist insbesondere auf höher gelegenen, unverwitterten Lavaböden kaum entwickelt und fehlt stellenweise gänzlich. In den tieferen, etwas feuchteren Lagen ist meist eine dünne Humusschicht vorhanden, wodurch an diesen Standorten verschiedene Sträucher wie beispielsweise die beinwellblättrige Zistrose (*Cistus symphytifolius*) und die Montpellier-Zistrose (*Cistus monspeliensis*), der Zwergginster

(*Chamaecytisus proliferus*) oder die klebrige Drüsenfrucht (*Adenocarpus viscosus*) zu finden sind (POTT et al. 2003, S. 167; OTTO 2003, S. 46).

Die luvseitigen Pinares profitieren von der günstigen Wasserversorgung, weshalb die Bäume oftmals sehr dicht beieinander stehen und von Flechten behangen sind. Der Unterwuchs ist durch zahlreiche Jungpflanzen sowie eine ausgeprägte Strauch- und Krautschicht geprägt, die unter anderem durch die bereits genannten Vertreter sowie durch Hornklee (*Lotus campylocladus*), *Sideritis oroteneriffae* und *Echium virescens* charakterisiert ist (POTT et al. 2003, S. 169).

Die heute Ausdehnung des Kanaren-Kiefernwaldes stimmt nicht mit der natürlichen Verbreitung überein, da in den letzten Jahrhunderten riesige Areale dieser Vegetationsformation abgeholzt wurden. Zahlreichen Aufforstungen, unter anderem mit der Strahligen Kiefer (*Pinus radiata* D. Don), wurden darüber hinaus außerhalb des natürlichen Verbreitungsareals angelegt (EHRIG 1998, S. 96).



Abb. 11: Leeseitiger Kiefernwald (links, Mitte) und luvseitiger Kiefernwald (rechts) (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

2.1.3.6 Teideginster-Gebüsche (*Retamar*) und Teideveilchen-Fluren (*Violeta del Teide*)

Oberhalb der Waldgrenze, in der Region über den Wolken ab 2.000 m ü. NN, herrscht ein subtropisches, semi-arides Hochgebirgsklima, das sich durch eine enorme Sonneneinstrahlung, geringe Niederschlagsmengen, große Lufttrockenheit, hohe tägliche und jährliche Temperaturschwankungen sowie winterlichen Schnee und Frost auszeichnet. Die an dieses Klima angepasste Vegetation gleicht einer sehr lichten Gebirgshalbwüste mit typischem Polsterwuchs und Zwergsträuchern (vgl. Abb. 12) (OTTO 2003, S. 46; EHRIG 1998, S. 101).



Abb. 12: Teideginster-Gebüsche (links, Mitte) und Wildprets Natternkopf (rechts) (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Charakterart der Retamar-Zone ist der Teideginster (*Spartocytisus supranubis*, span. Retama del Cumbre), ein etwa 3 Meter hoher, feinästiger und kugelwüchsiger Rutenstrauch. Stellenweise weit verbreitet sind ebenfalls die Teide-Rauke (*Descurainia bourgeauana*) und der Teidelack (*Erysimum scoparium*), seltener die krautigen bzw. nur an der Basis verholzten Arten Teide-Katzenminze (*Nepeta teydea*) und Teide-Bibernelle (*Pimpinella cumbrae*). Ebenfalls optimal an diesen Lebensraum angepasst ist der rote Natternkopf bzw. Wildprets Natternkopf (*Echium wildpretii* H.Pearson ex Hook.f. subsp. *wildpretii*), dessen unverzweigte Blütenstände oftmals über 50.000 Einzelblüten aufweisen können (vgl. Abb. 12). Ab einer Höhe von 2.700 m ü. NN, dem Areal des Teide-Vulkans, wachsen nur noch niedere Pflanzen. Hierzu zählen vor allem Flechten, Moose und einige krautige Blütenpflanzen wie das Teideveilchen (*Viola cheiranthifolia*) (POTT et al. 2003, S. 174; OTTO 2003, S. 46).

2.2 Die Entwicklung der Kulturlandschaft und daraus resultierende Landnutzungsformen

Das heutige Landschaftsbild Teneriffas ist das Ergebnis einer spezifischen sozioökonomischen Entwicklungsgeschichte, die mit der ersten Besiedlung Teneriffas durch die Ureinwohner vor etwa 2.000 Jahren ihren Anfang nahm. Tiefgreifende Veränderungen der Naturlandschaft entstanden jedoch erst seit der Ankunft der Europäer im 15. Jahrhundert (POTT et al. 2003, S. 186). Dieser Zeitpunkt kann daher als Beginn einer bis heute andauernden Umgestaltung des Naturraums angesehen werden. Diese Umgestaltung bzw. die Entwicklung der Kulturlandschaft kann dabei in unterschiedliche Phasen eingeteilt werden, aus denen sich verschiedene, bis heute bestehende Landnutzungs- und Wirtschaftsformen herausgebildet haben.

2.2.1 Entwicklung der Kulturlandschaft

Bis zur spanischen Eroberung der Kanarischen Inseln gegen Ende des 15. Jahrhundert beschränkte sich die von den Ureinwohnern (Guanchen) betriebene Landwirtschaft hauptsächlich auf den Anbau von Getreide und die Haltung von Wanderviehherden.

2.2.1.1 Phase des Zuckerrohr- und Weinbaus

Ab dem 16. Jahrhundert begann die Anpflanzung von Zuckerrohr durch die spanischen Besatzer. Diese erste Form der Intensivlandwirtschaft bildete bereits ab dem Jahr 1506 einen beträchtlichen Wirtschaftsfaktor. Der Zuckerrohranbau fand vornehmlich auf Kosten der kanarischen Waldbestände statt, die zum einen wegen des vermehrten Flächenbedarfs und zum anderen zur Gewinnung von Brennholz gerodet wurden. Die absolute Höhengrenze des Zuckerrohranbaus ist nicht mehr eindeutig feststellbar, lag jedoch nach MATZNETTER (1958, S. 81) vermutlich in einer Höhe von 350 bis 400 m ü. NN. Dies entspricht vor allem im Norden der Insel der Vegetationszone des thermophilen Buschwaldes (POTT et al. 2003, S. 187; MATZNETTER 1958, S. 81).

Mit den ersten Kolonisten kam zugleich auch der Weinbau nach Teneriffa, der sich zunächst auf die Höhenlagen zwischen 500 und 650 m ü. NN im Norden der Insel beschränkte. Bis Ende des 16. Jahrhunderts stieg dessen Produktionsmenge auf etwa 10.000 Liter an und erlangte in den darauffolgenden Jahrhunderten eine herausragende Rolle. In den Hochzeiten des Weinbaus wurde die Weinrebe im Norden Teneriffas bis fast an die Küste kultiviert, wohingegen im Süden der Insel die mittleren Lagen bevorzugt wurden. Dies hatte zur Folge, dass der thermophile Buschwald und der Sukkulentenbusch gebietsweise komplett verdrängt wurden. Mit vereinzelt Unterbrechungen

stellt der Weinanbau bis heute einen wichtigen landwirtschaftlichen Faktor dar, wobei die besten Rebfluren gegenwärtig zwischen 100 und 1.000 m ü. NN zu finden sind (OTTO 2003, S. 52; POTT et al. 2003, S. 187 f.; MATZNETTER 1958, S. 82). Die Produktionsmenge von Wein betrug im Jahr 2010 etwa 7.963 Tonnen (INSTITUTO CANARIO DE ESTADISDICA 2013).

2.2.1.2 Phase der ökonomischen Regression im 18. Jahrhundert – Beginn der landwirtschaftlichen Diversifizierung

Aufgrund des Verlustes der internationalen Absatzmärkte für Zuckerrohr und Wein nach Etablierung der Zuckerrohrproduktion in der Karibik und dem Weinanbau im Mittelmeerraum setzte auf Teneriffa ab Mitte des 17. Jahrhunderts eine Regression ein, die bis zum Beginn des freien Handels im Jahr 1778 andauerte. Durch Reformbestrebungen und königliche Verordnungen kam es ab dieser Zeit zu einem verstärktem Import von Kartoffeln, Mais und anderen Nutzpflanzen wie Süßkartoffeln und Feigenkakteen (*Opuntia ficus-barbarica*). Hieraus entwickelten sich die noch heute bestehenden, verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzungssysteme in den Mittel- und Küstenzonen, die im folgenden Kapitel detailliert erläutert werden. Der gleichzeitige Aufbau einer tropischen Landwirtschaft mit dem Anbau verschiedener überseeischer Gemüse- und Obstsorten führte des Weiteren zu speziellen agroforestalen Systemen mit verschiedenen Stockwerkkulturen (POTT et al. 2003, S. 189; MATZNETTER 1958, S. 92 ff.).

2.2.1.3 Liberale Phase und Entwicklung zur Freihandelszone – Beginn der Plantagenwirtschaft

Die erste Hälfte des 19. Jahrhundert war charakterisiert durch das Aufblühen des Cochenille-Handels auf Teneriffa – dem roten Naturfarbstoff aus der Schildlaus (*Dactylopius coccus*) – und des daraus folgenden verstärkten Anbaus von Feigenkakteen, an denen die Schildlaus lebt. Bis zu ihrer Hochblüte um ca. 1860 sorgte die Cochenille-Zucht für einen enormen wirtschaftlichen Aufschwung, was zur Folge hatte, dass vor allem die Kiefernwälder und der Sukkulentenbusch sowie Brachfelder und Rebberge den Beständen des Feigenkaktus weichen mussten. Etwa zur selben Zeit, im Jahre 1852, wurden die Kanarischen Inseln zur Freihandelszone erklärt. Ab diesem Zeitpunkt nahmen die Handelsbeziehungen in Anbetracht der strategisch günstig gelegenen Häfen zu und die Einwohnerzahl stieg infolge des florierenden Handels. Waren 1857 noch rund 213.000 Einwohner gezählt worden, so stieg die Bevölkerungszahl bis 1877 auf etwa 274.000 an (OTTO 2003, S. 51; POTT et al. 2003, S. 191; MATZNETTER 1958, S. 108 ff.).

Ab Mitte des 19. Jahrhunderts begann schließlich der monokulturelle Anbau von Bananen und etwas später von Tomaten. Die aus Indochina stammende Banane (*Musca cavendishii*) wurde vor allem für den Export nach Frankreich und England angebaut, wobei England zumindest bis zum Zweiten Weltkrieg der Hauptabnehmer dieser und auch weiterer landwirtschaftlicher Exportprodukte von den Kanarischen Inseln blieb. Der Bananenanbau wird bis heute intensiv durch EU-Subventionen gefördert (vgl. Kap. 5.2.1) und dominiert daher nach wie vor weite Teile Teneriffas. So lag die Produktionsmenge von Bananen im Jahr 2010 bei etwa 174.700 Tonnen. Dabei ist die kanarische Banane allein nicht weltmarktfähig, da sie auf einen arbeitsintensiven chemischen Pflanzenschutz und künstliche Bewässerung angewiesen ist. In den letzten Jahren wird daher mit zunehmendem Erfolg versucht, die Bananenkulturen durch Weinanbau zu ersetzen. Gegen Ende des 19. Jahrhundert setzte schließlich mit dem Bau des Taoro-Sanatoriums in Puerto de la Cruz der erste Tourismus ein, blieb jedoch bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges relativ unbedeutend (INSTITUTO CANARIO DE ESTADISDICA 2013; POTT et al. 2003, S. 191; MATZNETTER 1958, S. 108 ff.).

2.2.1.4 Landschaftsentwicklung seit 1950 – Entwicklung des Massentourismus und Rückgang der Agrarwirtschaft

Nach dem Ende des spanischen Bürgerkrieges und des darauf folgenden Zweiten Weltkrieges nahm die Bevölkerung der Insel drastisch zu, mit der Folge eines enormen Anstiegs von Baumaßnahmen, Verkehrsverbindungen und der gesamten landwirtschaftlichen Infrastruktur. Die exportorientierte Produktion von Bananen und Kartoffeln wurde zudem um den Anbau von Nelken, Rosen und Strelitzien erweitert und bis heute schrittweise ausgebaut. Gegenwärtig werden über 1.000 verschiedene Blumensorten gezüchtet, wobei vor allem Orchideen, Rosen und südafrikanische sowie australische *Proteaceen* das Exportgeschäft dominieren (POTT et al. 2003, S. 191 f.).

In der Nachkriegszeit bis 1962 setzte zugleich eine erste Phase der Fremdenverkehrsentwicklung im heutigen Sinne ein: Der historische Tourismus exklusiver Minderheiten wurde allmählich abgelöst durch einen industriellen Tourismus, infolgedessen zahlreiche Bau- und Entwicklungspläne insbesondere zur Expansion der süd- und südwestlich gelegenen Küstenstädte ins Leben gerufen wurden. Seitdem ist der Tourismus auf Teneriffa durch einen stetigen und beständigen Aufstieg geprägt. Nach vereinzelt Rückschlägen infolge der europäischen Krise in den 1970er Jahren begann insbesondere ab dem Jahr 1992 der bis heute anhaltende Tourismusboom, dessen Ursache vor allem auf Rückgänge des Fremdenverkehrs anderer touristischer Destinationen infolge politischer Instabilitäten zurückzuführen ist. Während die Touristenanzahl um 1960 bei etwa 75.000 pro Jahr lag und bis 1975 auf ca. 2 Mio. anstieg, belief sich die Gesamtanzahl der Touristen Teneriffas im Jahr 2011 auf circa 4,1 Mio. (INSTITUTO CANARIO DE ESTADÍSTICA 2013; POTT et al. 2003, S. 193 f.; CASTELLANO GIL & MACÍAS MARTÍN 1999, S. 85).

Im Unterschied zur Landschaftsentwicklung vor 1950, als anthropogene Aktivitäten vornehmlich auf mittlere Höhenstufen von 400 bis 800 m ü. NN (Waldrodungen) und auf die Basalstufe zwischen 0 und 400 m ü. NN (Landwirtschaft) beschränkt waren, konzentriert sich die gegenwärtige touristische Infrastruktur mit Urbanisationen, Sporthäfen, Spazierwegen und Schwimmanlagen auf die unmittelbar an der Küste gelegenen Areale. Davon betroffen sind auch die Randzonen mit Industriegebieten, sekundärem Straßennetz, Wohnorten und weiteren Einrichtungen für die lokale und regionale Infrastruktur (POTT et al. 2003, S. 200).

Als direkte Folge dieses enormen Bodenverbrauchs ist ein erheblicher Rückgang der küstennahen Agrarfläche zu verzeichnen. So zeigt sich beispielsweise im Orotava-Tal seit 1982 eine stetige Agrarflächenabnahme von 68 ha pro Jahr. Das einst für Ursprünglichkeit und Naturnähe bekannte Gebiet hat sich bis heute zu einem halbbebauten Tal verwandelt. Des Weiteren dehnen sich die Siedlungen vor allem der touristischen Kerngebiete im Südwesten der Insel immer weiter landeinwärts aus und beanspruchen zahlreiche ehemals als Bananen- und Tomatenplantagen genutzte Areale (POTT et al. 2003, S. 197 ff.).

Der ebenfalls zu beobachtende enorme Agrarflächenrückgang in den höher gelegenen, peripheren Regionen der Insel beruht jedoch nicht unbedingt auf dem Verlust landwirtschaftlicher Anbauflächen infolge von Flächenumwidmungen, sondern entsteht vor allem indirekt durch die Umorientierung der Erwerbstätigen von der Landwirtschaft hin zum gewinnversprechenden Tourismus und zum Baugewerbe (POTT et al. 2003, S. 201). So hat sich die Anzahl der Erwerbstätigen Teneriffas im Dienstleistungssektor von circa 204.100 im März 1999 auf 286.100 im März 2008 enorm erhöht. Dies gilt auch für den Bausektor. Hier ist die Anzahl Erwerbstätiger wiederum von 32.760 (März 1999) auf 45.385 (März 2008) angestiegen. Währenddessen reduzierte sich die Anzahl der Beschäftigten im

Agrarsektor zwischen März 1999 und März 2008 um über 20% auf insgesamt 10.750 Personen. Großflächige Stilllegungen der ehemals intensiv genutzten Agrarflächen sind die Folge.

2.2.2 Agrarische Landnutzungssysteme

Die aus der beschriebenen kulturlandschaftlichen Entwicklung hervorgegangenen, heute existierenden agrarischen Landnutzungssysteme lassen sich in zwei Arten unterteilen: eine traditionelle Landwirtschaft und eine exportorientierte Intensivlandwirtschaft. Diese sind eng an spezifische Klima- und Vegetationszonen des Untersuchungsgebietes angepasst.

2.2.2.1 Die traditionelle Landwirtschaft

In den trockenen Küstenregionen, die sich durch ein teilweise ausgesprochen arides Klima auszeichnen, kommen einzig der intensive Bewässerungsfeldbau (span. Regadio) oder der Trockenfeldbau (span. Secano) als landwirtschaftliche Nutzungsformen in Frage. Der Secano, d.h. jeglicher Feldbau auf unbewässertem Land, zeichnet sich zunächst dadurch aus, dass unmittelbar nach dem ersten Winterregen gesät wird, um gegen Ende der Regenzeit und vor Beginn der sommerlichen Trockenheit zu ernten. Die Felder werden dabei zur Regeneration des Nährstoffhaushaltes im Boden periodisch brach gelegt. Infolge der sehr geringen und unregelmäßigen Niederschläge sowie hohen Verdunstungsraten ist jedoch in den küstennahen Arealen mit einer nur geringen Produktivität zu rechnen. In Verbindung mit einem zunehmenden Bevölkerungsdruck wurden daher in der Vergangenheit vor allem die Vulkanhänge, die eine entsprechend geeignete Bodenfruchtbarkeit aufweisen, durch ausgedehnte Terrassierungen in Form von Stützmauern urbar gemacht (vgl. Kap. 3.5) (OTTO 2003, S. 50).

Eine spezielle Form des Trockenfeldbaus, Enarendo Natural und Enarendo Artificial (natürliche und künstliche Besandung), wurde im 18. Jahrhundert entwickelt. Sie beruht auf dem Ausbringen einer etwa 20 cm dicken Schicht von natürlich gelagertem oder weit her transportiertem Lapilli-Sediment bzw. Bimsgrus auf den gepflügten Untergrund (vgl. Abb. 13).



Abb. 13: Mit grauem Bimsstein bedeckte Ackerterrassen im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes (Fotos: S. Günthert, 10/2011)

Diese künstlichen oder natürlichen vulkanischen Auswürflinge bieten einen erhöhten Schutz vor Verdunstung. Zudem bewirken deren Porosität und hygroskopische Eigenschaften eine hohe Wasserspeicherkapazität sowie die Absorption von Luftfeuchtigkeit in der Nacht und in den Morgenstunden. Dies führt zu deutlich höheren Ernteerträgen. Durch eine zusätzliche leichte Bewässerung kann bei

dieser Form der Landwirtschaft sogar mit mehreren Ernten pro Jahr, beispielsweise von Kartoffeln, gerechnet werden (POTT et al. 2003, S. 29; OTTO 2003, S. 50; MATZNETTER 1958, S. 118).

Die grundlegende Aufgabe der kanarischen Bewässerungslandwirtschaft (Regadio) liegt darin, den verhältnismäßig geringen natürlichen Wasservorrat möglichst wirksam zu erschließen, zu sammeln und zu kanalisieren, um die jeweiligen Felder zu bewässern. Dabei kann auf verschiedene Arten der Wassererschließung zurückgegriffen werden. Hierzu zählt neben natürlichen Quellen und Stauwerken insbesondere die Verwendung von Galerías⁸ oder die Beschaffung von Wasser aus Brunnen (span. Pozos) mittels motorisierter Pumpen. Von diesen Wasserquellen wird das Wasser über verschiedene Rohrleitungen auf die Felder geleitet (vgl. Abb. 14). Darüber hinaus werden meist in privatem Besitz befindliche kleinere Tanks und Regenwasserzisternen verwendet oder größere, weiherartige Wasserspeicher angelegt (MATZNETTER 1958, S. 133 ff.). Der Regadio dient vornehmlich zum Anbau von Feldfrüchten wie Kartoffeln, Süßkartoffeln, Paprika, Mais, Bohnen, Karotten und Kürbis sowie tropischen Früchten, beispielsweise Papaya, Mango, Cherimoya oder Avocado (OTTO 2003, S. 51). Darüber hinaus werden jegliche, in Form von exportorientierter Landwirtschaft betriebenen Flächen, insbesondere zum Anbau von Bananen und Tomaten, bewässert (AGUILERA-KLINK et al. 2000, S. 235).



Abb. 14: Wasserverteilungssysteme im Südwesten Teneriffas (Fotos: S. Günthert, 10/2011)

2.2.2.2 Die exportorientierte Intensivlandwirtschaft

Die Exportlandwirtschaft beschränkt sich heute vornehmlich auf den Anbau von Bananen, Tomaten und Schnittblumen. Erstere benötigen zum optimalen Wachstum einen humosen Boden, hohe Mitteltemperaturen und enorme Mengen an Wasser. Die thermischen Voraussetzungen sind dabei einzig in Küstennähe zu finden, weshalb sich der Bananenanbau auf eine Zone zwischen 0 und 300 m ü. NN beschränkt. Humose Böden liegen jedoch meist nur in den montanen Stufen der Insel vor. Daher werden die Bananenplantagen oftmals künstlich durch humusreiche Feinerde aus der Bergstufe angelegt oder zumindest angereichert (vgl. Kap. 2.1.1.2, Sorribas). Da die Niederschläge besonders im Küstenbereich viel zu niedrig für die Kultivierung von Bananen sind, wird zusätzlich eine intensive künstliche Bewässerung benötigt. Der Anbau der Monokulturen in großflächigen Plastiktreibhäusern soll zudem zur Verminderung der Verdunstung und des Wasserverbrauchs beitragen (OTTO 2003, S. 535).

⁸ Galerías sind waagrechte oder leicht geneigte, in wasserführende Schichten getriebene Stollen, aus denen das Wasser mittels gemauerter Kanäle abgeleitet wird (POTT et al. 2003, S. 197; AGUILERA-KLINK et al. 2000, S. 235).

Die exportorientierte Landwirtschaft konnte noch Mitte des 20. Jahrhunderts klar aufgeteilt werden in eine vom Bananenanbau geprägte nördliche und eine südliche Tomatenanbauregion. In den 1970er Jahren hielten jedoch auch die Bananenplantagen Einzug in den trockenen Südteil der Insel. Die Schnittblumen kamen in den letzten Jahrzehnten als dritter landwirtschaftlicher Exportzweig hinzu und werden ebenfalls in Form bewässerter Gewächshauskulturen im Küstenbereich der gesamten Insel angebaut. Der Tomatenexport beschränkt sich heute vornehmlich auf die winterliche Ausfuhr von Früh-Tomaten nach Europa und hat im Vergleich zu den 1950er und 1960er eine geringere wirtschaftliche Bedeutung. Zu dieser Zeit wurde der Sukkulentenbusch im Inlands Süden aufgrund des enormen Platzbedarfs des ebenfalls in Gewächshäusern betriebenen Tomatenanbaus großflächig zerstört (OTTO 2003, S. 535).

3 Fernerkundungsgestützte Analyse von Landnutzungs- und Landbedeckungsveränderungen unter besonderer Berücksichtigung räumlicher Agrardynamiken

Das Hauptziel der folgenden Analyse ist die detaillierte Erfassung von agrarischen Landnutzungsveränderungen und ihren Auswirkungen auf Teneriffa mit Hilfe Geographischer Informationssysteme sowie Fernerkundungsdaten (Satellitenbilder und Orthophotos). Daher wird zunächst eine multitemporale, objektbasierte Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation (LULC-Klassifikation) von SPOT 1-Daten (1986-88), SPOT 4-Daten (1998) und RapidEye-Daten (2010) durchgeführt. Durch die Entwicklung eines entsprechenden Segmentierungs- und Klassifikationsalgorithmus mittels eCognition Developer werden hierbei die rezenten landwirtschaftlichen Nutz- und Brachflächen Teneriffas für die Aufnahmezeitpunkte 1986/88 und 1998 sowie die agrarische Landnutzung und Landbedeckung inklusive der Verbreitungsareale vorhandener Vegetationsformationen für das Jahr 2010 ermittelt. Die Auswertung der gewonnenen thematischen Daten mittels einer mehrskaligen, multitemporalen Veränderungsanalyse (Change Detection-Analyse) auf Basis eines Post-Klassifikations-Vergleichs (Post Classification Comparison) zeigt auf, wo und mit welcher Intensität sowie Kontinuität landwirtschaftliche Veränderungsprozesse in der Vergangenheit stattfanden.

Unter Verwendung eines texturbasierten Algorithmus zur Auswertung hochauflösender Orthophotos wird des Weiteren die landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes detektiert, die neben rezent genutzten Ackerflächen auch Langzeit- oder Dauerbrachflächen⁹ umfasst. In Abhängigkeit zur Dauer der jeweiligen Brachephase haben fortschreitende Sukzessionsprozesse auf diesen Flächen zu einer teilweisen oder vollständigen Wiederbesiedlung durch umliegende Pflanzengesellschaften geführt, so dass meist nur noch Relikte wie Trockenmauern auf die vergangene Nutzung hindeuten. Die SPOT- und RapidEye-Satellitenbilddaten weisen eine zu geringe räumliche Auflösung zur Detektion solcher linienhaften Strukturen auf. Daher ist eine Abgrenzung zur natürlichen oder naturnahen Landbedeckung nur anhand der Orthophotos möglich.

Die landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche dient zur Ausmaßeinschätzung der aktuellen landwirtschaftlichen Flächensituation und stellt in Synthese mit den agrarischen Landnutzungskarten die Grundlage für die Simulation agrarischer Landnutzungsdynamiken bis ins Jahr 2030 (vgl. Kap. 4 und 5) dar (GÜNTHERT et al. 2012, S. 853804-3). Durch die weitere kombinatorische Auswertung der dabei generierten Datensätze mit der LULC-Klassifikation aus dem Jahr 2010 kann zudem das ökologische Regenerationspotenzial von Brachflächen, dass sich sowohl durch die historischen als auch zukünftigen Entwicklungsprozesse für die sensitiven Ökosysteme der Insel ergibt, untersucht werden (vgl. Kap. 6).

⁹ Unter Langzeit- oder Dauerbrachen werden im Kontext der vorliegenden Arbeit „[...]die aus der Agrarproduktion längerfristig (mehrjährig) ausgeschiedenen landwirtschaftlichen Nutzflächen [bezeichnet], die keiner anderen Verwendung zugeführt wurden“ (BRUNOTTE et al. 2002). Aufgrund ihrer zum Teil mehrere Dekaden andauernden Brachephase und oftmals endgültigen Stilllegung werden solche Areale im Folgenden auch als landwirtschaftlich stillgelegt bezeichnet. Diese sind nicht zu verwechseln mit der im Rahmen der EU-Agrarpolitik definierten und mit Prämien geförderten Flächenstilllegung und den daraus entstehenden, so genannten Stilllegungsbrachen (vgl. BÖRNER 2004, S. 328; BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort Brache).

3.1 Der Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Detektion agrarischer Landnutzungsveränderung auf Teneriffa

Die Analyse von Landnutzungs- und Landbedeckungsveränderungen (Land Use and Land Cover Changes, LUCC) spielt seit der verstärkten Integration von Fernerkundungsdaten in die wissenschaftliche Forschung zu Beginn der 1970er Jahre eine zentrale Rolle, wobei die Methoden zur Detektion der Veränderungen stark abhängig von der jeweiligen Forschungsfrage sowie von der Qualität der Geodaten selbst sind (HUSSAIN et al. 2013, S. 91; DINGLE ROBERTSON & KING 2011, S. 1505; NAUMANN 2008, S. 40). Landwirtschaftliche Veränderungen können als eine Schlüsselkomponente in der LUCC-Forschung angesehen werden, da der weltweit enorme Zuwachs agrarischer Nutzflächen von ca. 14 Mio. km² zwischen 1700 und 1990 in vielen Teilen der Erde zu einem steigenden Verlust, zu Fragmentierungsprozessen und einer räumlichen Isolation sensibler Ökosysteme führt bzw. geführt hat. Hierdurch gewinnt eine Überwachung solcher Mensch-Umwelt bezogenen Veränderungen auf verschiedenen Maßstabsebenen zunehmend an Bedeutung (ALCANTARA et al. 2012, S. 334). Das Untersuchungsgebiet Teneriffa kann in diesem Zusammenhang als ein Musterbeispiel angesehen werden. Aufgrund seiner begrenzten Landoberfläche, seiner gebirgigen Gestalt und einem immer stärker zunehmenden Bevölkerungsdruck kam es in der Vergangenheit zu massiven landwirtschaftlichen Inwertsetzungsprozessen, die zu einer intensiven Umgestaltung des natürlichen Landschaftsbildes führten (POTT et al. 2003, S. 184 ff.). In jüngster Zeit auftretende Flächenstilllegungen und Regenerationserscheinungen ehemals stark degradierter Naturräume zeugen jedoch deutlich von einem sozioökonomischen Wandel einer Agrar- zu einer Dienstleistungsgesellschaft.

Durch den Einsatz geeigneter Fernerkundungsmethoden sollen diese agrarischen Landnutzungsveränderungen im Untersuchungsraum umfassend analysiert werden. Die hierdurch gewonnenen Resultate stellen zudem die Basis für die Simulation zukünftiger räumlicher Agrardynamiken sowie für eine spätere Analyse der ökologischen Auswirkungen landwirtschaftlicher Flächendynamiken auf den sensiblen Naturraum Teneriffas dar.

3.1.1 Auswahl einer geeigneten Change Detection-Technik – der Post-Klassifikations-Vergleich

Zur Detektion von Umweltveränderungen mittels Fernerkundungsdaten stehen zahlreiche Methoden (Change Detection-Analysen) zur Verfügung, die aufgrund der Entstehung immer neuer Sensoren mit unterschiedlichen räumlichen, zeitlichen und spektralen Auflösungen stetig weiterentwickelt werden (vgl. HUSSAIN et al. 2013; COPPIN et al. 2004; LU et al. 2004; SINGH 1989). Das Hauptziel jener Techniken liegt darin, den geographischen Standort und die Art der Veränderung, also die Änderung des Reflexionswertes oder der lokalen Textur, zu erfassen sowie die Veränderungen zu quantifizieren und die produzierten Ergebnisse zu bewerten (HUSSAIN et al. 2013, S. 91). Sie lassen sich nach RUELLAND et al. (2011, S. 1748) maßgeblich in zwei Kategorien einteilen.

Die erste Kategorie, die Klassifikation von multitemporalen Datensätzen, basiert vornehmlich auf der Identifikation von Gebieten spektraler Veränderung innerhalb eines multitemporalen Bildkomposits. Hierzu zählt beispielsweise das so genannte Image Differencing. Beim Image Differencing werden identische Spektralkanäle von Satellitenbilddaten mit unterschiedlichem Aufnahmedatum oder daraus abgeleitete Daten wie Vegetationsindizes pixelweise voneinander subtrahiert. Rasterzellen, die Grauwerte nahe 0 besitzen, weisen keine signifikante Veränderung auf, während Werte größer oder kleiner 0 Veränderungsflächen repräsentieren (SINHA & KUMAR 2013, S. 32). Ein weiteres Verfahren ist das so genannte Image Rationing (vgl. KLONUS et al. 2012). Hierbei werden die multitemporalen Da-

ten im Gegensatz zum Image Differencing miteinander dividiert. Als Ergebnis wird ein neues Bild produziert, wobei alle Werte, die von 1 abweichen, eine Veränderung aufweisen. Bei der im Kontext von Change Detection verwendeten Principal Component Analysis (PCA) wird eine Hauptkomponentenanalyse zweier, zuvor fusionierter Spektralkanäle von Satellitenbilddaten mit unterschiedlichen Aufnahmedatum durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass unveränderte Flächen im Gegensatz zu Arealen mit Veränderung eine hohe Korrelation aufweisen. Daher repräsentieren die erste und zweite Hauptkomponente vor allem unveränderte Areale und alle weiteren die Veränderungsinformation (vgl. HUSSAIN et al. 2013, S. 96; KLONUS et al. 2012; CELIK 2009). Die Change Vector Analysis (CVA) ist eine multivariate Change Detection-Methode, die die volle spektrale und temporale Dimensionalität der Bilddaten verarbeitet und zwei verschiedene Ergebnisse produziert – das Veränderungsmaß (Change Magnitude), das Informationen über die Signifikanz der Veränderungen bereitstellt, sowie die Veränderungsrichtung (Change Direction). Anhand der beiden Resultate kann somit die Art und Stärke der Veränderung erfasst werden (vgl. HUSSAIN et al. 2013, S. 96; BOVOLO et al. 2012; COPPIN et al. 2004, S. 1579).

Den bislang aufgeführten, nach HUSSAIN et al. (2013, S. 91) auch als Pre-Klassifikations-Techniken bezeichneten Algorithmen ist gemein, dass sie generell schwer zu interpretierende Karten produzieren, die oftmals aus nur wenigen Klassen oder einer einfachen binären Veränderungsmaske bestehen. Zudem sind die vorgestellten Techniken meist nicht auf mehr als zwei Datensätze anwendbar, insbesondere dann, wenn die Bilder von unterschiedlichen Sensoren stammen (RUELLAND et al. 2011, S. 1748).

Die zweite Kategorie umfasst den auch in der vorliegenden Arbeit verwendeten Post-Klassifikations-Vergleich (Post Classification Comparison, PCC), bei dem bereits klassifizierte Datensätze unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte miteinander verglichen werden. Ein Vorteil dieser Art von Change Detection-Analysen besteht vor allem in der Minimierung radiometrischer Probleme, die durch phänologische oder atmosphärische Variationen infolge unterschiedlicher saisonaler Aufnahmezeitpunkte der Satellitenbilddaten bzw. bei der Verwendung unterschiedlicher Fernerkundungssensoren aufkommen können. Durch die separate Klassifikation mit einer einheitlichen Nomenklatur wird eine Standardisierung der Daten für jedes einzelne Bild erreicht (RUELLAND et al. 2011, S. 1748; COPPIN et al. 2004, S. 1574 f.). Den Klassifikationen liegt jedoch ein hoher Bearbeitungsaufwand zugrunde und die Genauigkeit der erfassten Veränderung ist stark abhängig von der Qualität der durchgeführten Klassifikationen (NAUMANN 2008, S. 83). Hierdurch entsteht die Gefahr einer Verstärkung der inhärenten Fehler (LILLESAND et al. 2008, S. 595). Dennoch wird die Post-Klassifikations-Analyse für zahlreiche regionale Untersuchungen zu LUCC verwendet, denen mittel- bis hochauflösende Daten ganz verschiedener Fernerkundungssensoren zugrunde liegen (vgl. AGUIRRE-GUTIÉRREZ et al. 2012; KAMH et al. 2012).

3.1.2 Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Klassifikation der Fernerkundungsdaten – die objektbasierte Klassifikation

Die für den Post-Klassifikations-Vergleich benötigte Klassifikation der Fernerkundungsdaten kann, neben der so genannten On-Screen-Interpretation, bei der bestimmte Untersuchungsobjekte oder LULC-Typen und ihre räumlichen Grenzen im Datensatz direkt durch den Anwender interpretiert werden, im Wesentlichen in zwei verschiedene Ansätze der Bildanalyse unterteilt werden: die pixelbasierte Klassifikation und die objektbasierte Klassifikation (RUELLAND et al. 2011, S. 1749). Hauptziel beider Klassifikationsprozeduren ist die automatische Kategorisierung aller Pixel eines

multispektralen Fernerkundungsdatensatzes in LULC-Klassen. Die pixel-spezifischen spektralen Muster¹⁰ bilden dabei die numerische Grundlage für die Kategorisierung (LILLESAND et al. 2008, S. 546).

Bei den pixelbasierten Verfahren dient das Pixel als alleiniger Träger von Informationen. Die Klassifikation der Fernerkundungsdaten finden also einzig auf Grundlage ihrer spektralen Muster statt. Dabei kann zwischen Überwachter und Unüberwachter Klassifikation unterschieden werden. Bei der Überwachten Klassifikation müssen die thematischen Klassen vorab durch spektrale Signaturen bestimmt sein. Die Festlegung der Signaturen erfolgt „überwacht“, d.h. sie werden auf Basis bekannter Landbedeckungstypen durch das Setzen von Trainingsgebieten im verwendeten Datensatz erfasst (JENSEN 2005, S. 335). Bei Unüberwachten Klassifikationen bzw. Cluster-Analysen werden dagegen keine Trainingsdaten als Grundlage zur Klassifikation verwendet. Hier wird die Gesamtheit der Bildelemente in eine Anzahl von Klassen ähnlicher spektraler Eigenschaften unterteilt (ALBERTZ 2007, S. 159). Klassische pixelbasierte Verfahren sind die zur Überwachten Klassifizierung zählende Parallelepiped-Classification, das Minimum Distance-Verfahren oder die Maximum Likelihood Classification (LILLESAND et al. 2008, S. 550 ff.).

Neben den traditionellen Techniken haben in den letzten Jahren vor allem so genannte Machine-Learning-Algorithmen bei der pixelbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten an Bedeutung gewonnen (PANEQUE-GÁLVEZ et al. 2013, S. 373). Diesen ist gemein, dass sie in einer Trainingsphase ein Rule-Set zur Differenzierung von Klassen anhand von Trainingsdaten „lernen“, das letztlich zur Prognostizierung der Klassenzugehörigkeit bisher unbekannter Flächen herangezogen werden kann (NAUMANN 2008, S. 62; KOTSIANTIS 2007, S. 250). Zu den häufig verwendeten Machine-Learning-Verfahren zählen beispielsweise Support Vector Machines (SVM). SVM können als eine überwachte, nicht-parametrische, statistische Lerntechnik bezeichnet werden, mit der versucht wird, eine optimale Entscheidungsgrenze bzw. Hyperebene in einem n-dimensionalen Merkmalsraum zu finden, durch die das jeweilige Datenset in eine diskrete, vordefinierte Anzahl an Klassen mit möglichst wenigen Fehlklassifikationen separiert werden kann. Dabei werden die der Hyperebene am nächsten liegenden Trainingsvektoren, die so genannten Support Vectors, mit einem möglichst weiten Abstand voneinander getrennt. Andere Trainingsvektoren, die weiter entfernt zu dieser Optimal Separating Hyperplane (OSH) liegen, werden nicht zur Spezifizierung der Entscheidungsgrenze herangezogen. Der Begriff „Lernen“ bezieht sich bei der SVM-Klassifikationstechnik auf den iterativen Prozess, einen Klassifikator mit einer optimalen Entscheidungsgrenze für die Separation der Trainingsmuster zu finden, der in einem nächsten Schritt zur Separation des „realen“ Datensatzes herangezogen werden kann (MOUNTRAKIS et al. 2011, S. 248; ZHU & BLUMBERG 2002, S. 234). Mithilfe von Support Vector Machines konnten im Vergleich zu anderen Verfahren sehr hohe Genauigkeiten bei der LULC-Klassifikation von Fernerkundungsdaten erreicht werden (vgl. PANEQUE-GÁLVEZ et al. 2013; SZUSTER et al. 2011; MARÇAL et al. 2005).

Random Forests (vgl. BREIMANN 2001) als Erweiterung des traditionellen Entscheidungsbaum-Modells (Decision Trees) ist ein weiteres lernendes Klassifikationsverfahren in Form eines Ensembles einzelner, voneinander unabhängiger Entscheidungsbäume, die als Basis-Klassifikatoren fungieren. Jeder der Entscheidungsbäume wird mittels des sog. Bagging auf Grundlage einer randomisierten Unterstichprobe des Trainingsdatensatzes entwickelt. Beim Training, das bei jedem der Basis-Klassifikatoren zu einer Hypothese führt, werden jedoch immer nur zwei Drittel der Trainingsdaten benutzt. Das letzte Drittel (Out Of Bag) dient zur unabhängigen Validierung und Fehlerbestimmung des

¹⁰ Als spektrales Muster wird in diesem Zusammenhang das Set an Grauwerten bezeichnet, das in den verschiedenen Spektralkanälen für jedes Pixel in einem Fernerkundungsdatensatz vorliegt (LILLESAND et al. 2008, S. 546)

Ensembles. Schließlich werden die zuvor aufgestellten Hypothesen der einzelnen Entscheidungsbäume/Basis-Klassifikatoren per Mehrheitsentscheid zu einer Gesamtklassifikation zusammengeführt (HERBST & MOSIMANN 2010, S. 141; EHLERS 2008, S. 11 f.). Random Forests werden in jüngster Zeit immer stärker für die Klassifikation von Fernerkundungsdaten (vgl. LOOSVELT et al. 2012; WASKE & BRAUN 2009; GISLASON et al. 2006) und für die Habitats-Modellierung (vgl. PETERS et al. 2011) eingesetzt, da diese Technik selbst bei sehr großen Datensätzen eine gute Performanz aufweist. Weitere bekannte Verfahren, die auf Maschinellem Lernen beruhen, sind k-Nearest Neighbours (KNN) (vgl. SALBERG 2011; BLANZIERI & MELGANI 2008; FRANCO-LOPEZ et al. 2001) und Künstliche Neuronale Netzwerke (Artificial Neuronal Networks, ANN) (vgl. Kap. 4.1.2.4).

Bei der Erfassung von landwirtschaftlichen Veränderungen kann sich die Unterscheidung zwischen landwirtschaftlichen Anbauflächen und umliegenden Vegetationsformationen, sowie zwischen den unterschiedlichen Anbauprodukten selbst, je nach verwendeter spektraler und räumlicher Auflösung als sehr schwierig erweisen. So haben zahlreiche Feldfrüchte sehr ähnliche phänologische und wachstumszeitliche Entwicklungsmuster und können aufgrund ihrer annähernd identischen spektralen Charakteristiken oftmals nicht differenziert werden. Deshalb bringen gerade pixelbasierte Ansätze, die einzig spektrale Informationen zur Kategorisierung der Pixel verwenden, oftmals die Gefahr hoher Fehlklassifizierungen mit sich. Diese wird insbesondere bei Daten mit geringer räumlicher Auflösung verstärkt, da hier die Anzahl an Mischpixeln, die spektrale Eigenschaften mehrerer Landschaftsobjekte beinhalten, sehr ausgeprägt sein kann (PEÑA-BARRAGÁN et al. 2011, S. 1302). Für agrarische Untersuchungen ist es daher sinnvoll, weitere Informationen über die räumlichen Beziehungen der Pixel untereinander mit einzubeziehen, da landwirtschaftliche Nutzflächen in der Regel durch homogene, klar voneinander abgegrenzte Raumeinheiten getrennt sind und sich durch bestimmte Formen, Größen, aber auch Nachbarschaftsbeziehungen auszeichnen. Methoden der objektbasierten Bildanalyse (Object-Based Image Analysis, OBIA) stellen im Gegensatz zu den vorgestellten pixelbasierten Verfahren zusätzliche Differenzierungsmöglichkeiten zur Klassifikation solcher Areale bereit, da bei den Trainings- bzw. Referenzdaten neben den spektralen Informationen der Pixel auch räumliche Muster berücksichtigt werden können¹¹ (RITTER et al. 2012, S. 73). So ist allen OBIA-Ansätzen gemein, dass statt einzelner Pixel so genannte Bildobjekte bzw. lokale Pixelgruppen die Basis für die Klassifikation stellen. Objekte besitzen neben den spektralen Informationen zugleich einen räumlichen Kontext, der sich aus den darin enthaltenen Pixeln ergibt (DE KOK et al. 2000, S. 2). Um die Objekte aus einem Datensatz zu generieren, wird das Bild durch heuristische Verfahren im Rahmen eines spezifischen Segmentierungsprozesses in möglichst homogene Segmente bzw. Objekte zerlegt, die nachbarschaftliche Gemeinsamkeiten bezüglich spektraler oder textueller Eigenschaften besitzen (NAUMANN 2008, S. 64). Diese sowie weitere Form-Attribute des Objektes (beispielsweise Länge, Kantenzahl des Objektes etc.) und topologische Features (Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Klassen und Objekten etc.) lassen sich dann zur Objekt-Klassifikation heranziehen. Eine Wiederholung des Segmentierungsprozesses auf unterschiedlichen Skalenebenen ermöglicht zudem eine hierarchische Verknüpfung unter- und übergeordneter Segmente, indem beispielsweise Obergruppen von Objekten gebildet werden, die die Eigenschaften der Unterobjekte erben und umgekehrt (NAUMANN 2008, S. 64).

¹¹ Die im Rahmen der pixelbasierten Klassifikation vorgestellten Machine-Learning-Algorithmen, insbesondere Random Forests, SVM und k-Nearest Neighbours, werden daher teilweise auch mit objektbasierten Klassifikationsverfahren kombiniert bzw. in die objektbasierte Bildklassifizierung integriert (vgl. WOLF 2013; GRAF & WEGENKITTL 2012; STUMPF & KERLE 2011).

Zahlreiche Forschungsarbeiten verwenden die Software eCognition Developer (BLASCHKE 2010; vgl. BENZ et al. 2004) zur objektbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten. Das auch in der vorliegenden Arbeit verwendete Programm (eCognition Developer Version 8.7) beschreibt das Bildobjekt im Rahmen einer semantischen Vernetzung zwischen verschiedenen Segmentierungsebenen und wird durch folgende grundlegende Merkmale charakterisiert (DE KOK 2001, S. 34; DE KOK et al. 2000, S. 2):

- Ein erweiterter Segmentierungsalgorithmus weist zunächst Pixel aus unterschiedlichen Raster-Layern einer lokalen räumlichen Pixel-Population (Bildobjekt) zu, woraufhin eine Konstruktion der Objekt-Topologie erfolgt, die in einer relationalen Datenbank registriert wird.
- Die verschiedenen Bild-Layer und weiteren GIS-Daten sind über ihre jeweiligen Bildobjekte und topologischen Beziehungen miteinander verbunden, wodurch ein semantisches Netzwerk aufgebaut wird, das sowohl in seinen horizontalen als auch vertikalen Eigenschaften der Nachbarschaft abfragbar ist.
- Die Objekte lassen sich durch den Aufbau wissensbasierter Regelwerke klassifizieren. Eine Klasse stellt dabei eine Gruppe von Objekten dar, die die gleichen ausgewählten Attribute teilen.

eCognition Developer stellt zur Bildung von Objekten verschiedene Segmentierungsprozesse bereit, die je nach Fragestellung ausgewählt werden können. Neben Chessboard-, Quadtree-, Contrast Split-, Contrast Filter- und Multi Threshold-Segmentation wird hauptsächlich die so genannte Multiresolution Segmentation zur Generierung von Bildobjekten aus Fernerkundungsdaten verwendet. Das Ergebnis des Segmentierungsprozesses kann dabei durch den Nutzer beeinflusst werden, indem zum einen eine Auswahl sowie Gewichtung der Input-Daten vorgenommen wird. Zum anderen kann über die zusätzliche Spezifizierung verschiedener Parameter die Größe, die spektrale und räumliche Homogenität sowie die Form der Objekte beeinflusst werden. Der dabei zugrunde liegende Algorithmus wird als eine Region-Growing-Technik beschrieben, bei der individuelle Pixel zunächst zu kleinen Objektprimitiven verbunden werden. Durch sukzessive Iterationen werden die Objektprimitive schrittweise zu größeren Objekten fusioniert. Dies geschieht unter der Prämisse, dass die Heterogenität der resultierenden Bildobjekte minimiert wird. Der Fusionierungsprozess läuft solange, bis der Grenzwert, der sich aus den Parametereinstellungen des Nutzers ergibt, erreicht ist (CHUBEY et al. 2006, S. 385; BAATZ & SCHÄPE 2000, S. 3 ff.).

Zur Klassifikation der Bildobjekte in eCognition wird eine Wissensbasis erstellt, die die jeweiligen Klassenmerkmale beinhaltet. Die Erstellung der Wissensbasis kann einerseits regelbasiert in Form von Zugehörigkeitsfunktionen erfolgen, bei denen die spezifischen Klassenmerkmale über die Festlegung von Schwellenwerten, Merkmalsbereichen oder auf Basis von Fuzzy-Logik¹² definiert werden. Das Fuzzy-Prinzip ermöglicht dabei die Generierung unscharfer Klassenmerkmale, wobei dem Bildobjekt die Klasse mit dem höchsten Erfüllungsgrad (der höchsten Wahrscheinlichkeit) zugewiesen wird. Andererseits kann die Klassenbeschreibung innerhalb des Regelwerks anhand einer Auswahl von Trainingsflächen durchgeführt werden. Durch entsprechende Datenbankabfragen – im ersten Fall auf Grundlage der Structured Query Language (SQL), im zweiten Fall anhand eines Nearest Neighbour-Klassifikators – können die Objekte dann klassifiziert werden (HESE 2007, S. 6; NEUBERT 2005, S. 75).

¹² Die grundlegende Idee der Fuzzylogik besteht darin, für ein Element nicht mehr zu fordern, dass es entweder zu einer Klasse gehört oder nicht. Stattdessen kann die Klassenzugehörigkeit durch eine reelle Zahl, üblicherweise aus dem Intervall [0,1] stammend, angegeben werden. Das Element besitzt somit eine gewisse Unschärfe oder „Fuzziness“ (LEHMANN et al. 1992, S. 1).

Die hierarchische Segmentierung erlaubt letztlich eine Klassifikation in Form eines wissensbasierten Entscheidungsbaums. Innerhalb des Entscheidungsbaums lassen sich die Klassifikationsregeln in der Klassenhierarchie vererben, so dass Merkmale der übergeordneten Klasse (Parent Class) auf untergeordnete Klassen (Child Class) übertragen werden können. Darüber hinaus lassen sich voneinander unabhängige Klassen zu semantischen Gruppen zusammenfassen bzw. vergesellschaften. Hierdurch ist es beispielsweise möglich, Offenland und Wald als Vegetation zu gruppieren (vgl. Abb. 15). In diesem Top-Down-Ansatz geht somit im Gegensatz zu einem Bottom-Up-Ansatz die Merkmalsausprägung vom Allgemeinen ins Spezielle über (NAUMANN 2008, S. 64 f.; NEUBERT 2005, S. 76).

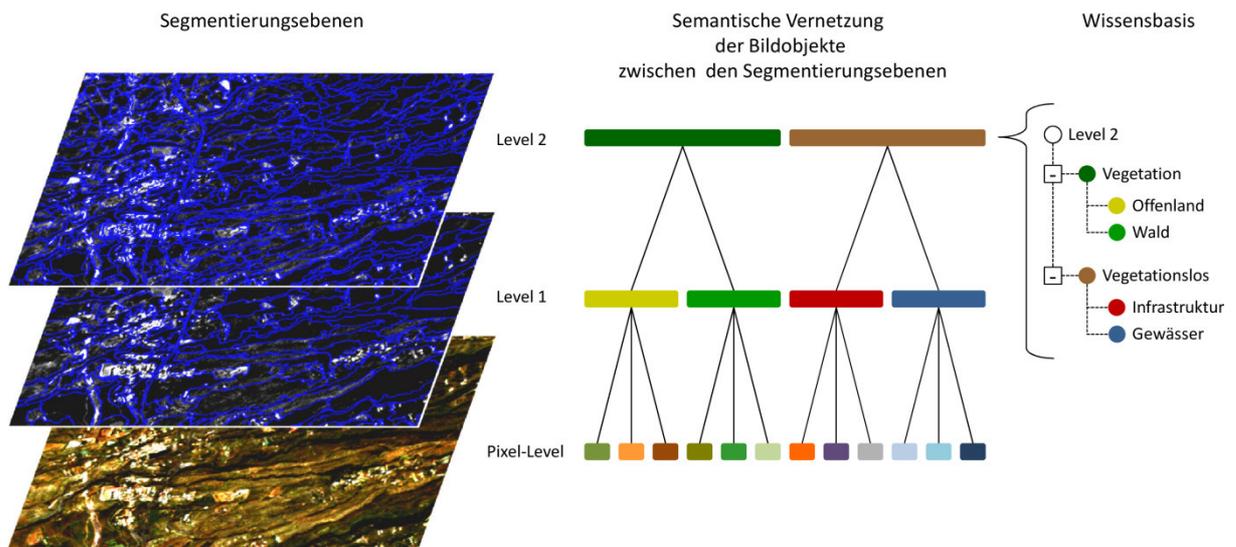


Abb. 15: Zusammenhang zwischen Segmentierungsebenen und semantischer Vernetzung der Objektklassen sowie der daraus resultierenden Wissensbasis innerhalb der Software eCognition (Quelle: Eigene Darstellung, angelehnt an NEUBERT 2005, S. 71)

Das Programm zeichnet sich vor allem durch die Möglichkeit aus, sehr heterogene Daten mit unterschiedlichen spektralen oder thematischen Eigenschaften direkt in den Klassifikationsvorgang zu integrieren. Mit diesen lassen sich im Rahmen eines Spectral Enhancement zugleich arithmetische Operationen wie Ratiobildungen durchführen. Hierdurch können zusätzliche Trennungskriterien für die jeweiligen Klassen herangezogen werden. Zur Erfassung agrarischer Landnutzungsveränderungen ergibt sich weiter die Möglichkeit, schon beim Segmentierungsprozess thematische Informationen wie beispielsweise Katasterdaten mit einzubeziehen. Dies hat bei der späteren Klassifikation den Vorteil, Parzellenattribute wie Größe, Form und Durchmesser der Ackerflächen zur Klassifikation der teilweise sehr heterogenen agrarischen Landnutzungsklassen bereitzustellen (Wu et al. 2007, S. 2778). Darüber hinaus können verschiedenste statistische Kenngrößen wie spektrale Mittelwerte und Standardabweichungen parzellenspezifisch berechnet werden, wodurch detaillierte Differenzierungen agrarischer Landnutzungstypen realisierbar sind.

3.2 Datengrundlage und -aufbereitung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dienen verschiedene Infrastruktur-/Katasterdaten und topographische Informationen des Untersuchungsgebietes zur Unterstützung der objektbasierten LULC-Klassifikation sowie zur Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche. Hauptgrundla-

ge der folgenden Analysen bilden jedoch neben einem Orthophoto-Mosaik die multitemporalen und -sensoralen Satellitenbilddaten. Diese werden unter Anwendung verschiedener Bildbearbeitungsmethoden geometrisch korrigiert und radiometrisch verbessert. Des Weiteren erhöhen zusätzliche arithmetische Pixeloperationen die Interpretationsmöglichkeiten der verwendeten Daten. Hierdurch ist eine zuverlässige Auswertung der Satellitenbildszenen gewährleistet.

3.2.1 Topographische und thematische Basisdaten

Zu den topographischen und thematischen Basisdaten zählen ein digitales Geländemodell (Digital Terrain Model, DTM), landwirtschaftliche Parzelleninformationen und Infrastrukturdaten (vgl. Abb. 16). Das digitale Geländemodell von Cartográfica de Canarias S.A. (GRAFCAN) mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 m liegt als ASCII-Punktdatensatz (XYZ-Koordinaten) vor und muss daher entsprechend prozessiert und mosaikiert werden. Anschließend werden drei verschiedene Karten des gesamten Untersuchungsgebiets – eine Hangneigungs-, eine Expositions- und eine Höhenkarte – aus dem Modell abgeleitet und für die weiteren Analyseschritte bereitgestellt.

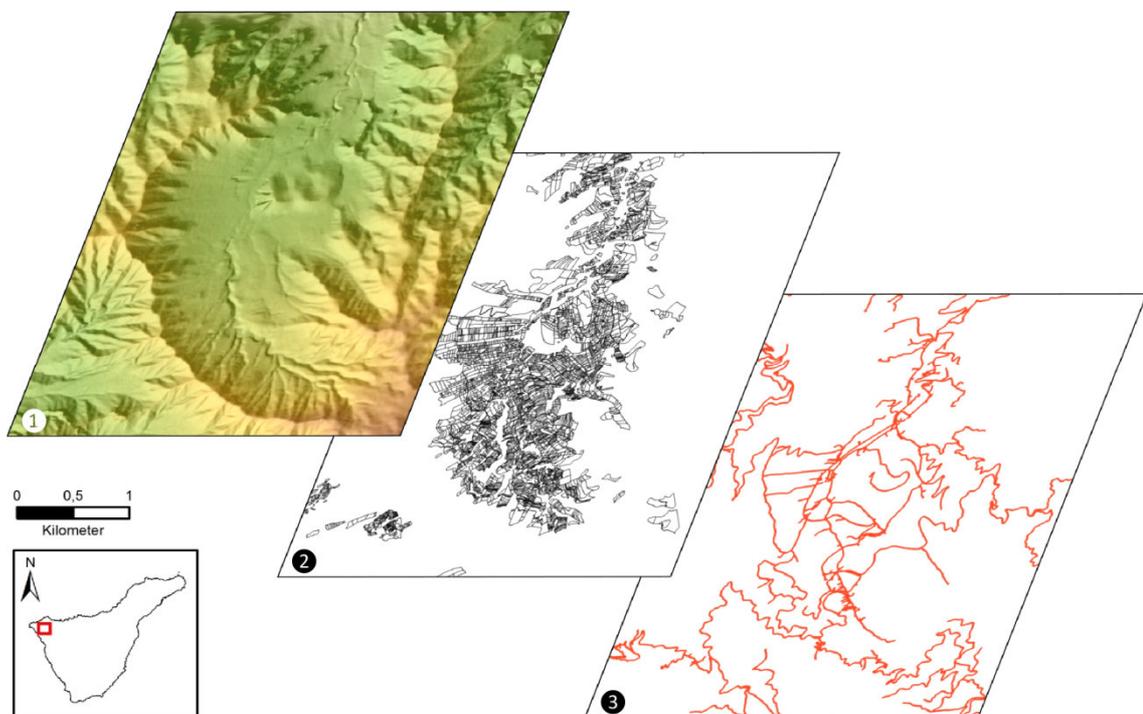


Abb. 16: Exemplarische Darstellung des verwendeten digitalen Geländemodells (1) und der landwirtschaftlichen Parzelleninformationen (2) sowie der Infrastrukturdaten (3) (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN und Cabildo de Tenerife)

Die landwirtschaftlichen Parzelleninformationen bzw. Katasterdaten können einer Karte der landwirtschaftlichen Anbauflächen Teneriffas von 2008 entnommen werden. Die von der Inselverwaltung Teneriffas (Cabildo de Tenerife, Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación) erstellte Karte liegt im Vektordatenformat vor und beinhaltet die rezenten landwirtschaftlichen Anbauflächen der Insel. Sie gibt zudem Informationen über die zum Zeitpunkt der Erhebung angebauten Feldfrüchte in den einzelnen Parzellen oder Flurstücken wieder. Die Verortung der Parzellen basiert auf Katasterdaten, während die parzellenspezifischen Anbauprodukte durch verschiedene Geländekampagnen erfasst wurden (vgl. CABILDO DE TENERIFE 2009). Die Parzelleninformationen aus dem Jahr 2008

können im Rahmen der objektbasierten LULC-Klassifikation zur Unterstützung des Segmentierungsprozesses verwendet werden.

Eine auf Grundlage von Orthophotos und Geländebegehungen erstellte digitale Straßennetzkarte des Untersuchungsgebiets von GRAFCAN bildet den dritten Basisdatensatz. Die Straßenkarte wird hauptsächlich im Zusammenhang mit der Ermittlung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche verwendet.

3.2.2 Orthophoto-Mosaik 2009

Ein Orthophoto bezeichnet im Allgemeinen ein Luftbild, bei dem der orographisch bedingte zentralperspektivische Bildpunktversatz unter Verwendung eines digitalen Geländemodells digital korrigiert wurde. Hierdurch entspricht es in guter Näherung einer Orthogonalprojektion bzw. senkrechten Parallelprojektion des jeweils abgebildeten Teils der Erdoberfläche. Das Orthophoto-Luftbild ist somit flächen- und winkeltreu wie Karten im Plan-Maßstab und eignet sich als Planungsgrundlage (BALDENHOFER & MARSCHALL 2013, Stichwort Orthophoto; BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort Orthophoto).

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit prozessierte Orthophoto-Mosaik besteht aus insgesamt 389 Einzelbildern, die zwischen Februar und Mai 2009 vom gesamten Untersuchungsgebiet aufgenommen wurden (vgl. Abb. 17). Die räumliche Auflösung der so genannten OrtoExpress-Bilder beträgt ca. 40 cm, mit einem planimetrischen Fehler von weniger als 1,5 m (Root Mean Square Error < 1,5).

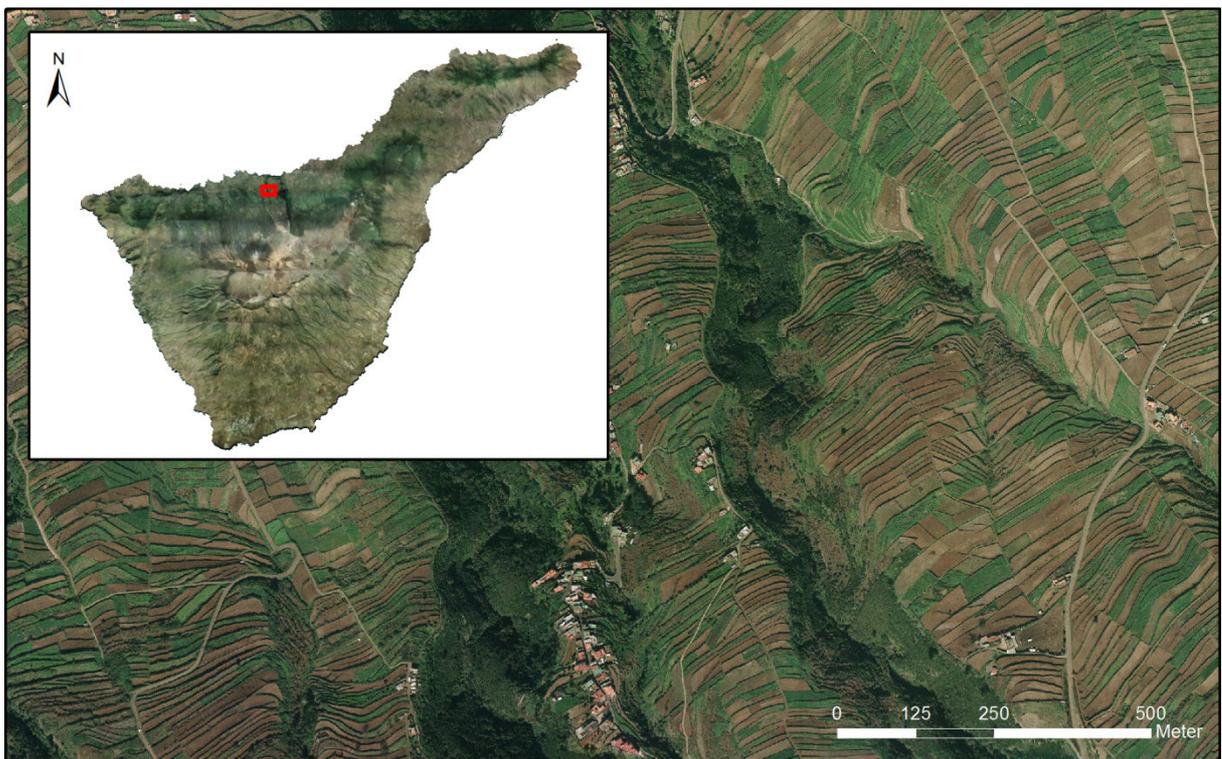


Abb. 17: Darstellung des in der Arbeit verwendeten Orthophoto-Mosaiks (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Das Orthophoto-Mosaik wird als Referenzdatensatz für die Orthorektifizierung und Georeferenzierung der übrigen Fernerkundungsdaten verwendet (vgl. Kap. 3.2.4.1). Darüber hinaus stellt es die Grundlage zur texturbasierten Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche dar (vgl. Kap. 3.5).

3.2.3 Multitemporale und -sensorale Satellitenbilddaten

Zur Erfassung der Landnutzungs- und Landbedeckungsveränderungen auf Teneriffa werden Satellitenbilddaten hoher räumlicher Auflösung benötigt, deren Spektralbereiche maßgeblich für die Beobachtung von Landoberflächen ausgelegt sind und eine detaillierte Differenzierung verschiedener Vegetationseinheiten sowie agrarischer Landnutzung erlauben. Das gesamte Untersuchungsgebiet soll dabei für einen möglichst großen Zeitraum in regelmäßigen Intervallen von ca. 10 Jahren abgedeckt werden. Unter Berücksichtigung dieser spektralen und temporalen Voraussetzungen werden daher Satellitenbildszenen von SPOT 1, SPOT 4 sowie RapidEye für die Untersuchung ausgewählt.

3.2.3.1 SPOT 1 (Aufnahmejahre 1986 bis 1988)

SPOT 1 (System Probatoire d' Observation de la Terre), der erste einer Serie von fünf Erdbeobachtungssatelliten der französischen Weltraumagentur CNES (Centre national d'études spatiales), wurde insbesondere für die Analyse der Landoberfläche, Land- und Forstwirtschaft sowie für raumplanerische Anwendungszwecke entwickelt. Der Sensor umfasst ein Paar aus gleichartigen HRV-Kameras (Instrument Haute Résolution Visible), die in einem panchromatischen Modus (PAN) mit 10 m räumlicher Auflösung oder in einem multispektralen Modus mit etwa 20 m räumlicher Auflösung betrieben werden können (BALDENHOFER & MARSCHALL 2013, Stichwort SPOT). Der multispektrale Modus zeichnet Daten in drei Kanälen auf: Grün (0,500 - 0,590 μm), Rot (0,610 - 0,680 μm) und Nahes Infrarot (0,790 - 0,890 μm). Der panchromatische Kanal umfasst den Spektralbereich von 0,510 - 0,730 μm . SPOT 1 wurde 1986 gestartet und lieferte Daten bis 2001 (DE LANGE 2013, S. 413).

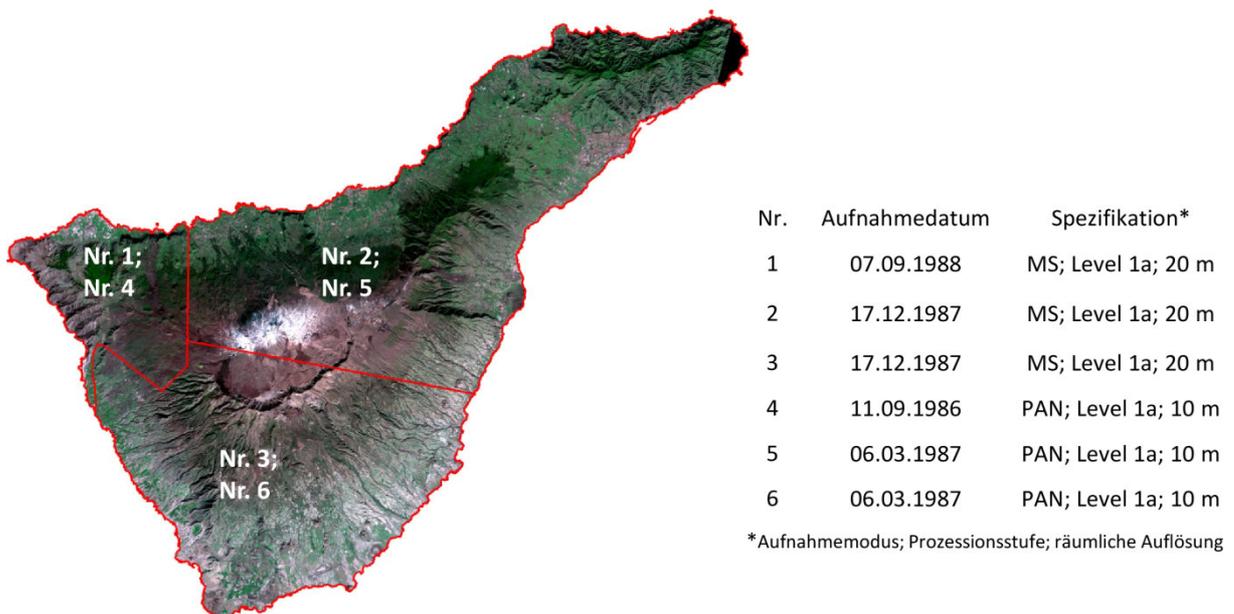


Abb. 18: Auflistung und Spezifikation sowie Verortung der verwendeten SPOT 1-Szenen anhand eines Natural Colour-Mosaiks. Dargestellt sind die tatsächlich verwendeten Subsets der erworbenen Szenen (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: © CNES (2010), bereitgestellt durch Spot Image S. A.).

Insgesamt werden drei multispektrale sowie drei panchromatische SPOT 1-Szenen aus den Jahren 1986 bis 1988 verwendet. Dies sind die ältesten zur Verfügung stehenden, hochauflösenden Daten, die das gesamte Untersuchungsgebiet abdecken. Abb. 18 zeigt die tatsächlich genutzten Subsets der erworbenen Szenen in Form eines Natural Colour-Mosaiks der bereits fusionierten PAN- und Multi-

spektral-Daten (vgl. Kap. 3.2.4.4). Die Subsets wurden dabei so ausgewählt, dass das Untersuchungsgebiet aus möglichst wolkenarmen Teilszenen besteht.

3.2.3.2 SPOT 4 (Aufnahmejahr 1998)

SPOT 4 wurde im Jahr 1998 gestartet (Betrieb eingestellt seit Januar 2013) und hat im Gegensatz zu SPOT 1 bis 3 einen HRVIR-Sensor (High Resolution Visible and Infrared) an Bord, der einen weiteren Kanal für das mittlere Infrarot besitzt. Der Kanal B2 (Rot) kann zudem in zwei verschiedenen Modi betrieben werden. Im so genannten Monospectral Mode (M-Mode) liefert er Graustufenbilder mit einer räumlichen Auflösung von 10 m, während im Xi-Mode multispektrale Bilder mit einer Auflösung von 20 m bereitgestellt werden (DE LANGE 2013, S. 411). Die beiden Instrumente können dabei völlig unabhängig voneinander arbeiten. Der M-Mode stellt somit das Pendant zum PAN-Modus der vorherigen SPOT-Satelliten dar. Alle weiteren Kanäle und räumlichen Auflösungen sind mit SPOT 1 bis 3 identisch, wodurch sich für SPOT 4 folgende Spektralbereiche ergeben: Grün (0,500 - 0,590 μm), Rot (0,610 - 0,680 μm), Nahes Infrarot (0,790 - 0,890 μm) und Mittleres Infrarot (1,580 - 1,750 μm). Für das Jahr 1998 werden ebenfalls drei multispektrale Satellitenbildszenen sowie drei im M-Mode aufgenommene Szenen verwendet, die in einem späteren Bildbearbeitungsschritt miteinander fusioniert werden. Abb. 19 zeigt für diesen Zeitraum die jeweils verwendeten Subsets der SPOT 4-Szenen nach Bildfusion und Mosaikierung.

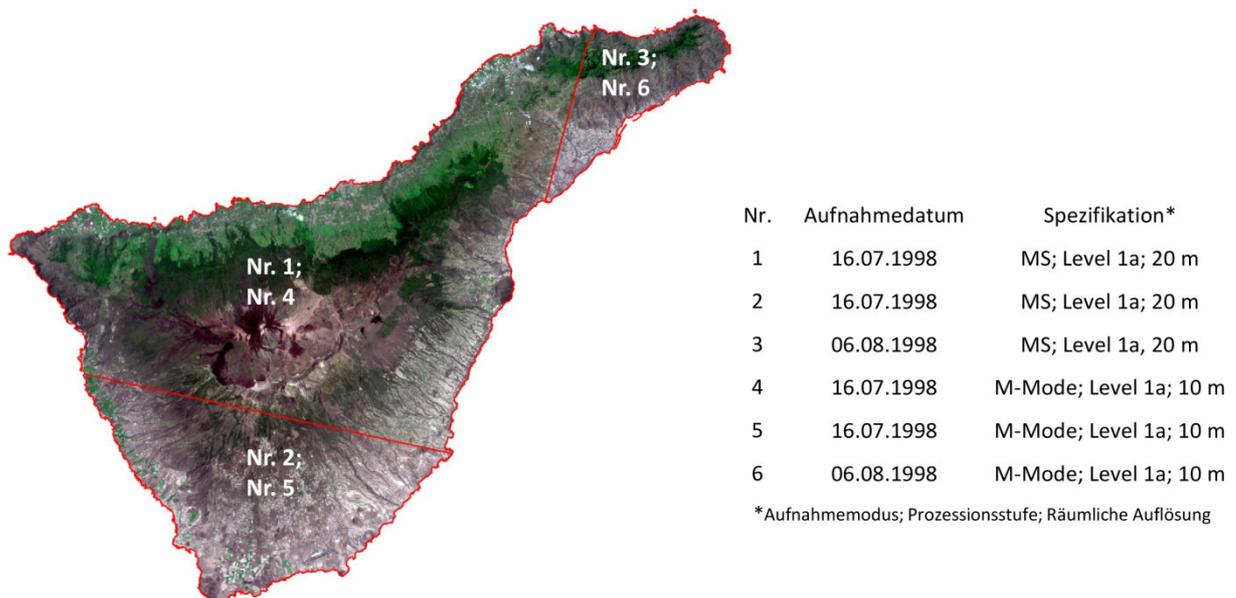


Abb. 19: Auflistung und Spezifikation sowie Verortung der verwendeten SPOT 4-Szenen anhand eines Natural Colour-Mosaiks. Dargestellt sind die tatsächlich verwendeten Subsets der erworbenen Szenen (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: © CNES (2010), bereitgestellt durch Spot Image S. A.)

3.2.3.3 RapidEye (Aufnahmejahr 2010)

Das RapidEye-System der BlackBridge AG (ehemals RapidEye AG) wurde im August 2008 gestartet und liefert seit Februar 2009 beständig Fernerkundungsdaten. Die fünf baugleichen Satelliten beinhalten eine Multispektralkamera (Multi-Spectral-Imager, MSI), die Daten in fünf verschiedenen Spek-

tralkanälen mit einer räumlichen Auflösung von 6,5 m aufzeichnet¹³: Blau (0,440 - 0,510 µm), Grün (0,520-0,590 µm), Rot (0,630 - 0,685 µm), Red Edge (0,690-0,730 µm) und Nahes Infrarot (0,760 - 0,850 µm) (BORG et al. 2012, S. 4). Der Red-Edge-Kanal ist eine Besonderheit des RapidEye-Satellitensystems. Er deckt einen Wellenlängenbereich zwischen den Kanälen Rot und Nahes Infrarot ab, ohne diese jedoch zu überlappen. Seine spektrale Spannweite umfasst somit exakt den Bereich, in dem die Reflexion von grüner Vegetation stark in Richtung Nahes Infrarot ansteigt. Zahlreiche Studien deuten daraufhin, dass der Kanal dadurch zusätzliche Informationen zur Identifikation von Pflanzentypen, zur Pflanzenbedeckung und -abundanz sowie zu weiteren vegetationspezifischen Analysen bereitstellen kann. Hierdurch eignen sich die Daten des RapidEye-Systems unter anderem besonders gut für landwirtschaftliche Untersuchungen, für Vegetationsklassifikationen sowie für forstliche Bestandsaufnahmen (WEICHELT et al., S. 1 ff.). Zur Erfassung der rezenten Landnutzung und Landbedeckung werden insgesamt elf Szenen des RapidEye-Systems aus dem Jahr 2010 verwendet (vgl. Abb. 20). Die Daten sind im Gegensatz zu den SPOT-Daten, die als unkalibrierte Rohdaten vorliegen, bereits orthorektifiziert und radiometrisch sensor-korrigiert.

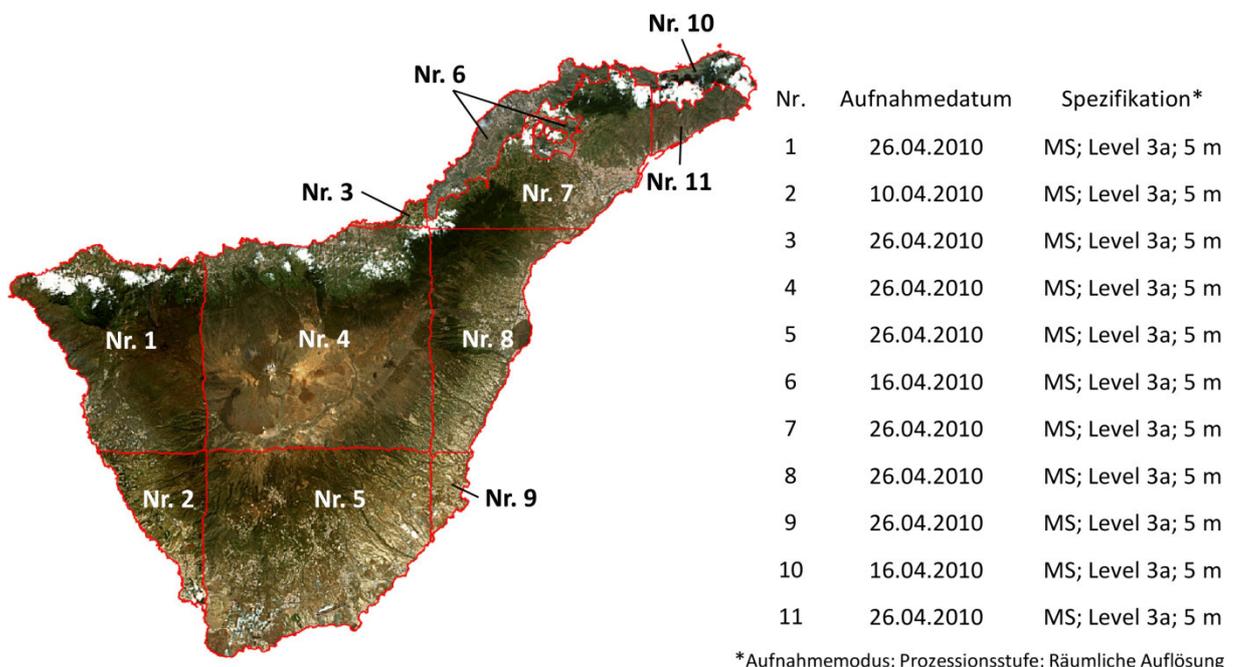


Abb. 20: Auflistung und Spezifikation sowie Verortung der verwendeten RapidEye-Szenen anhand eines Mosaiks (RGB 321). Dargestellt sind die tatsächlich verwendeten Subsets der erworbenen Szenen (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Bereitgestellt durch das DLR 2010)

3.2.4 Image Pre-Processing der Satellitenbilddaten

Das Image-Pre-Processing umfasst verschiedene Bearbeitungsschritte, die aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften und Prozessierungsstufen der erworbenen Satellitenbilddaten nicht bei jedem Datensatz angewendet werden müssen. Abb. 21 gibt Aufschluss darüber, welches Pre-Processing bei den jeweiligen Datensätzen durchgeführt wird.

¹³ RapidEye nimmt Satellitenbilddaten mit einer geometrischen Auflösung von 6,5 m auf, die aber anschließend auf 5 m formatiert werden (KLONUS & EHLERS 2012, S. 244).

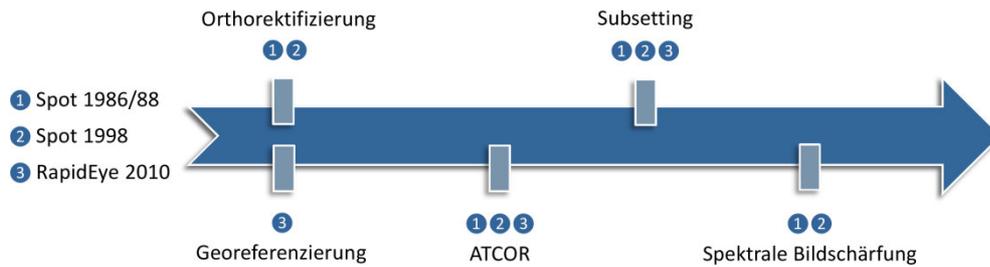


Abb. 21: Bildbearbeitungsschritte der einzelnen Datensätze (Quelle: Eigene Darstellung)

3.2.4.1 Orthorektifizierung und Georeferenzierung der Satellitenbildszenen

Die SPOT 1- und SPOT 4-Daten liegen als unkalibrierte Rohdaten (Level 1a) vor und werden für die weitere Analyse zunächst orthorektifiziert (Zielkoordinatensystem UTM WGS 28N). Die Orthorektifizierung der einzelnen Szenen erfolgt – unter Einbezug eines digitalen Geländemodells (vgl. Kap. 3.2.1) – anhand des in der Fernerkundungssoftware ERDAS Imagine (Version 2010) verfügbaren geometrischen Modells für SPOT-Daten. Die hierfür benötigten Passpunkte (Ground Control Points GCPs) können dem Orthophoto 2009, das als Referenzdatensatz dient, entnommen werden. Der Root Mean Square Error (RMSE) liegt bei allen zwölf Szenen unter 0,2.

Die bereits orthorektifizierten RapidEye-Daten (Level 3a) müssen aufgrund von räumlichen Lageungenauigkeiten zum Referenz-Orthophoto ebenfalls geometrisch korrigiert werden. Durch eine nicht-parametrische Polynominaltransformation (vgl. HUGHES et al. 2006) werden diese ebenso anhand des Referenzlayers georeferenziert. Der RMSE liegt bei allen RapidEye-Szenen unter 0,31.

3.2.4.2 Atmosphärenkorrektur mittels ATCOR (Atmospheric Correction Algorithm for ERDAS IMAGINE)

Durch Absorptionsprozesse in der Atmosphäre wird der Transport der Solarstrahlung von der Sonne zur Erdoberfläche und von der Erdoberfläche zum jeweiligen Sensor beeinträchtigt. Bestimmte Wellenlängen werden durch Moleküle abgefangen und in andere Energieformen wie beispielsweise Wärme umgewandelt. Die in der Atmosphäre befindlichen Aerosole sowie Dunst, Wolken oder Nebel bewirken zudem eine Ablenkung oder Streuung der elektromagnetischen Strahlung in verschiedene Richtungen, wodurch eine weitere Abschwächung des Signals entsteht. Zur Bereitstellung exakter Informationen über die zu untersuchende Erdoberfläche und zur Beseitigung solcher Störeinflüsse, sollte daher der Einfluss der Atmosphäre korrigiert werden. Die so genannte Atmosphärenkorrektur reduziert die durch Streuung und Absorption bedingten Einflüsse aus optischen Fernerkundungsdaten. Hierdurch können die Grauwerte verschiedener Satellitenbildszenen vergleichbar gemacht werden sowie tages- und jahreszeitliche Differenzen zwischen multitemporalen Aufnahmen reduziert bzw. ausgeglichen werden. Zudem wird die Chance einer Übertragung von Klassifikationsschemen auf andere Bildszenen erhöht, da die Spannbreite der spektralen Objektmerkmale verringert wird. Die hierfür angewendeten Algorithmen basieren auf der Kenntnis oder Schätzung meteorologischer Größen, die den spezifischen Zustand der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Aufnahme beschreiben. Diese Informationen stehen in den einzelnen Softwareprogrammen als Datenbanken zur Verfügung. Einzelne Aufnahmeparameter wie beispielsweise Sensortyp und Sichtweite müssen jedoch bekannt sein (NEUBERT & MEINEL 2005, S. 1 f.; HOLZER-POPP et al. 2002, S. 2).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird zur Durchführung der Atmosphärenkorrektur auf die Software „ATCOR for ERDAS Imagine 2010“ zurückgegriffen (vgl. GEOSYSTEMS GMBH 2009). Das

Programm berechnet den Reflexionsgrad, gegebenenfalls auch den Emissionsgrad sowie die Temperatur der Oberfläche, wodurch Aerosolgehalt und Wasserdampfsäulengehalt aus der Szene abgeleitet werden können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, topographische Effekte und Dunstbereiche zu korrigieren (DLR 2013). Unter Verwendung der programmspezifischen Variante ATCOR 2 wird für jede der insgesamt 23 Satellitenbildszenen eine zweidimensionale Atmosphärenkorrektur durchgeführt. Benötigte radiometrische und geometrische Kenngrößen wie beispielsweise bandspezifische Kalibrierungswerte oder die Sensorneigung können den entsprechenden Metadaten-Files entnommen werden.

3.2.4.3 Subsetting der SPOT- und RapidEye-Datensätze

Vor Durchführung weiterer Pre-Processing-Schritte werden spezifische Subsets der orthorektifizierten sowie atmosphärenkorrigierten SPOT- und RapidEye- Szenen erstellt (vgl. Abb. 18, Abb. 19 und Abb. 20). Die Subsets sind so ausgewählt, dass etwaige Wolkenfelder durch wolkenfreie Bereiche benachbarter Bildszenen überlagert werden und – im Falle der SPOT-Daten – Bildpaare entstehen, die aus jeweils einer panchromatischen und einer multispektralen Szene mit identischem Bildausschnitt zusammengesetzt sind. Zudem bleiben vorhandene Meeresflächen in den einzelnen Satellitenszenen unberücksichtigt.

3.2.4.4 Spektrale Bildschärfung

Der Vielzahl an derzeit verfügbaren Fernerkundungssystemen ist gemein, dass die höchste räumliche Auflösung nur im panchromatischen Modus erzeugt werden kann (KLONUS 2011, S. 1). Dies trifft auch auf die in der vorliegenden Arbeit verwendeten SPOT-Daten zu. Die in unterschiedlichen Modi erzeugten Bilddaten der einzelnen Sensoren besitzen somit sehr gegensätzliche Eigenschaften – die panchromatischen Daten eine höhere räumliche und geringere spektrale Auflösung, die Multispektraldaten eine hohe spektrale und niedrigere räumliche Auflösung. Zur Erfassung sehr kleinräumig differenzierter Landnutzungseinheiten im Rahmen einer Landnutzungsklassifikation ist eine größtmögliche spektrale und räumliche Auflösung im Hinblick auf die Klassifikationsgenauigkeit von Vorteil, der simultane Einbezug panchromatischer und multispektraler Daten in Form einzelner Kanäle bringt jedoch oftmals nicht den gewünschten Mehrwert (KLONUS 2011, S. 189).

In den vergangenen Jahren wurden daher zahlreiche Verfahren entwickelt, um die hohe räumliche Auflösung des panchromatischen Bildes und die spektrale Auflösung des multispektralen Bildes zu kombinieren. Zahlreiche Untersuchungen bestätigen, dass solche fusionierten multispektralen Daten dabei helfen können, mehr Informationen aus den Eingangsdaten zu extrahieren als aus jedem separat betrachteten Datensatz. Durch die dabei entstehende Bildschärfung und die Herausstellung von Objektmerkmalen können die Daten besser interpretiert und die Genauigkeit bei der Klassifikation erhöht werden (DE LANGE 2013, S. 436; KLONUS 2011, S. 189 f.; SIVANPILLAI & MILLER 2008; POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 825). Die im Bereich der pixelbasierten Bildfusion (vgl. POHL & VAN GENDEREN 1998) angesiedelten Bildschärfungstechniken werden im Allgemeinen als Pansharpening bzw. aufgrund der Tatsache, dass neben panchromatischen Bildern auch andere Bilddaten höherer räumlicher Auflösung genutzt werden können, auch als spektrale Bildschärfung bezeichnet (KLONUS 2011, S. 10). Die spektrale Bildschärfung beschreibt also ein „[...]Verfahren, bei dem ein räumlich höher aufgelöstes Bild verwendet wird, um eine multispektrale räumlich niedriger aufgelöste Szene zu schärfen, so dass ein Bild entsteht, das die hohe räumliche Auflösung des höher aufgelösten Bildes und die spektralen

Informationen des multispektralen Bildes kombiniert ohne Änderungen der spektralen Werte zu verursachen“ (KLONUS 2011, S. 10).

Derzeit existieren zahlreiche, zum Teil sehr unterschiedliche Techniken zur spektralen Bildschärfung, die je nachdem, welche Eingangsdaten verwendet werden und welche Gütekriterien erfüllt werden sollen, spezifische Vor- und Nachteile besitzen (vgl. weitergehend KLONUS 2011). Häufig verwendete Techniken sind beispielsweise die Intensity Hue Saturation-Transformation (IHS) (vgl. RAHMANI et al. 2010), die Principal Component-Transformation (vgl. CHAVEZ JR. et al. 1991) oder die Brovey-Transformation (vgl. EYERS et al. 1998). Neuere Algorithmen wie die modifizierte IHS-Transformation (vgl. SIDDIQUI 2003) bauen meist auf diesen auf, nutzen neue Technologien (beispielsweise Gram-Schmitt Spectral Sharpening, vgl. JALAN & SOKHI 2012) oder kombinieren unterschiedliche Verfahren (z.B. Ehlers-Fusion, vgl. KLONUS & EHLERS 2007) (KLONUS 2011, S. 13). Eine zu den numerischen Fusionsverfahren zählende Technik, die zur Bildschärfung der in der vorliegenden Arbeit erworbenen multispektralen SPOT 1- und SPOT 4-Szenen verwendet wird, ist die so genannte Hochpassfilterung (HPF Resolution Merge). Kernprinzip des Verfahrens ist die Ergänzung der hochfrequenten Informationen des höher aufgelösten Bildes in das niedriger aufgelöste multispektrale Bild. Hierdurch entstehen räumlich scharfe Bilder mit einem hohen Kontrast, während gleichzeitig überdurchschnittlich gute Ergebnisse beim Erhalt der multispektralen Informationen erreicht werden (KLONUS 2011, S. 45; DE JONG & VAN DER MEER 2004, S. 260; MULARZ et al. 2000, S. 4). Dies ist vor dem Hintergrund, dass die zu fusionierenden panchromatischen und multispektralen SPOT 1-Daten zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, eine grundlegende Prämisse. Denn durch die Zeitunterschiede im Aufnahmedatum können zusätzliche Farbveränderungen im Bild entstehen, die auf dem unterschiedlichen phänologischen Zustand der Vegetation beruhen (KLONUS 2011, S. 13 f.). Da bei der HPF-Bildschärfung die hochaufgelöste Komponente gefiltert wird – hierbei wird der Großteil an spektralen Informationen aus dem Bild entfernt – und somit nicht ohne Veränderung zu der multispektralen Komponente addiert wird, die verwendeten Daten darüber hinaus in der gleichen Saison bzw. Jahreszeit aufgenommen wurden, kann jedoch von einer nur geringfügigen Beeinflussung durch die verschiedenen Aufnahmedaten ausgegangen werden. Abb. 22 zeigt einen Subset der durch diese Methode fusionierten SPOT 1-Daten (KLONUS 2011, S. 13, 45; CHAVEZ JR. et al. 1991, S. 296).

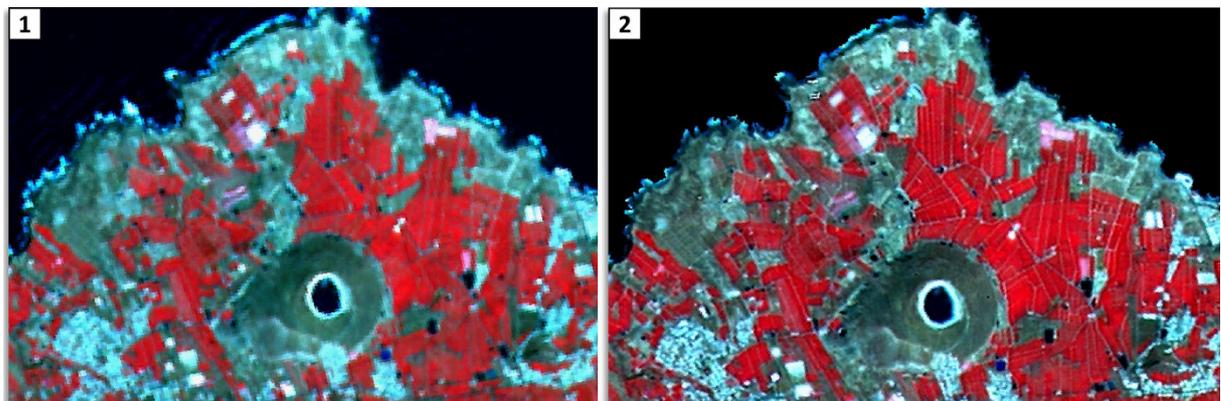


Abb. 22: (1) Subset einer multispektralen SPOT 1-Szene (RGB 321) vom 07.09.1988 und (2) fusioniert mit der panchromatischen Szene vom 11.09.1986 unter Verwendung der HPF-Bildschärfung (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: © CNES (2010), bereitgestellt durch Spot Image S. A.)

Der HPF-Algorithmus berechnet zunächst einen Ratio R zwischen der räumlichen Auflösung des multispektralen und des hochaufgelösten Bildes. Anschließend wird das multispektrale Bild unter

Anwendung eines bilinearen Algorithmus auf die Auflösung des hochaufgelösten Bildes formatiert. Darauf folgend wird ein gewichteter Hochpassfilter, dessen Filterkernel-Größe abhängig von R ist, generiert und zur Faltung des hochaufgelösten Bildes eingesetzt. Das hochpassgefilterte Bild wird nun, in Abhängigkeit zur Standardabweichung der multispektralen Kanäle sowie zu R , gewichtet und mit dem multispektralen Wert addiert. Schließlich wird eine lineare Streckung des Histogramms durchgeführt, wodurch der Mittelwert und die Standardabweichung des fusionierten Bildes an die entsprechenden Werte des originalen multispektralen Bildes angepasst werden (KLONUS 2011, S. 43 f.).

3.2.5 Arithmetische Pixeloperationen

Nach der spektralen und räumlichen Aufbereitung der Satellitenbildszenen werden verschiedene arithmetische Pixeloperationen durchgeführt, um den Informationsgehalt der Daten zu steigern und weitere mögliche Trennungskriterien während der folgenden LULC-Klassifikationen zu gewinnen. Komplexe Pixeloperation wie die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA) und Intensity Hue Saturation-Transformation (IHS-Transformation) werden dabei vorab in ERDAS Imagine durchgeführt. Die erzeugten Bilddatensätze werden dann als eigene Layer in die objektbasierte Klassifikation mit einbezogen. Ratiobildungen und verschiedene Indizes können dagegen direkt im Klassifikationsprogramm eCognition Developer 8.7 aus den vorhandenen Rasterdaten berechnet werden.

3.2.5.1 Hauptkomponentenanalyse

Die in verschiedenen Spektralkanälen aufgezeichneten Daten einer Bildszene zeigen oftmals hohe Korrelationen untereinander. Sie enthalten demnach nicht nur nutzbare Informationen, sondern auch sich wiederholende und somit redundante Informationen. Daher ist es nützlich, neue Datensätze zu generieren, die die wesentlichen Informationen in wenigen Kanälen konzentrieren (ALBERTZ 2007, S. 114). Die Hauptkomponentenanalyse bietet generell die Möglichkeit, diese Redundanzen zu beseitigen. Bei der Reduktion der Eingangsvariablen wird der größte Teil der Input-Informationen, beschrieben durch die Summe der Varianz der Eingangsvariablen, mittels weniger Hauptkomponenten dargestellt. Somit wird die Gesamtanzahl der Variablen gemindert (DE LANGE 2013, S. 433). Die PCA berechnet hierzu Gewichtungen (Eigenvektoren) für die Linearkombinationen der ursprünglichen Spektralwerte, mit denen das Koordinatensystem durch entsprechende Achsendrehungen in ein neues rechtwinkliges Achsensystem transformiert wird. Diese neuen Achsen stellen die Hauptkomponenten (Faktoren) dar und erklären mit zunehmender Faktorenanzahl sukzessiv sinkende Anteile an der Gesamtvarianz (LANGAR 2007, S. 41). Die größte Varianz ist demnach in der ersten Hauptkomponente verortet, während die höheren Komponenten zunehmend das Rauschen der ursprünglichen Daten enthalten (ALBERTZ 2007, S. 116) (vgl. weitergehend LILLESAND et al. 2008, S. 527 ff.; JENSEN 2005, S. 296 ff.).

Vorteile der PCA für eine Klassifikation ergeben sich aus der Reduzierung der Anzahl der Originalkanäle, in einem Kontrastanstieg aufgrund der Datenkompression und in einer Minimierung von sensorspezifischen Datenstörungen. Für die vorliegende Arbeit werden daher jeweils die ersten drei Hauptkomponenten aus den verfügbaren Satellitenbildszenen berechnet und als zusätzliche Kanäle in die objektbasierte Klassifikation integriert.

3.2.5.2 IHS-Transformation

Der Intensity Hue Saturation-Farbraum (IHS-Farbraum) trennt im Gegensatz zum RGB-Farbraum die Bildkomponenten in räumliche (Intensität) und spektrale (Farbton und Sättigung) Eigenschaften auf. Dabei stellt die Intensität (Intensity) die Stärke des Signals dar, während der Farbton (Hue) ein Merkmal ist, das eine reine Farbe, beispielsweise reines Gelb oder Rot, charakterisiert. Hue bezieht sich somit auf den dominanten oder durchschnittlichen Wellenlängenbereich der entsprechenden Farbe. Die Sättigung (Saturation) ist ein Maß für den Anteil des weißen Lichts in der Farbe (KLONUS 2011, S. 26; LILLESAND et al. 2008, S. 543). Im Rahmen der IHS-Transformation werden die jeweiligen Bilddaten vom RGB-Farbsystem zum IHS-Farbsystem umgewandelt, so dass drei neue Bilder entstehen. Dieses Verfahren kann zu Erhöhung des Informationsgehaltes beitragen, da Unterschiede zwischen den einzelnen Spektralbändern durch eine Verbesserung der Farbwiedergabe hervorgehoben werden. Die Daten der Spektralkanäle können hierdurch in anderer Weise und völlig unabhängig voneinander modifiziert werden als durch additive Farbmischung. So kann beispielsweise ein Contrast Stretch auf die Intensitätskomponente angewendet werden, während der Farbton und die Sättigung der Pixel völlig unverändert bleiben. Dies ist beim RGB-Contrast-Stretch normalerweise nicht der Fall (BALDENHOFER & MARSCHALL 2013, Stichwort IHS-Transformation; LILLESAND et al. 2008, S. 544; BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort IHS-Farbraum).

3.2.5.3 Ratiobildungen – Vegetationsindizes

Durch die Bildung von Ratios und insbesondere Vegetationsindizes (VIs) können detaillierte Aussagen über den Zustand der Vegetation und die Veränderung von Vegetationsmustern getroffen werden (FRANKE et al. 2006, S. 11). Im Kontext einer LULC-Klassifikation dienen Vegetationsindizes darüber hinaus zur weiteren Separation verschiedener Landbedeckungstypen.

Im Allgemeinen ergeben sich die spektralen Reflexionswerte einer Vegetationsfläche aus der komplexen Zusammensetzung verschiedener biologischer und physikalischer Faktoren wie beispielsweise Pflanzentyp und -alter, Wassergehalt, Bedeckungsgrad, Reihenabstand etc. sowie verschiedener Eigenschaften der Atmosphäre, des Bodens (Bodenfeuchte, Textur, Struktur, Farbe, Material) oder szenenspezifischer Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrien. Die biologischen Faktoren wirken sich dabei auf die spektralen Reflexionswerte der Vegetationsschicht und die daraus abgeleiteten Indizes aus, mit denen verschiedenste Informationen zur Vegetationsstruktur erhoben werden können. Die physikalischen Faktoren gelten wiederum als Störgrößen, die es bei der Berechnung der VIs zu minimieren gilt (OEHMICHEN 2004, S. 12 f.). In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Indizes berechnet, die durch zum Teil sehr unterschiedliche Eigenschaften wie beispielsweise die Minimierung des Einflusses bodenphysikalischer Parameter charakterisiert werden können. Diese werden im Folgenden aufgeführt – dabei gilt ρ_x = Reflexionsgrad im Spektralbereich x:

a) *NDVI – Normalized Difference Vegetation Index* (vgl. ROUSE et al. 1974)

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{ROT}}{\rho_{NIR} + \rho_{ROT}} \quad (1)$$

Der NDVI gilt als einer der am häufigsten verwendeten Indizes. Er wird aus den Reflexionswerten des roten und nahen infraroten Spektralbereiches berechnet und basiert auf dem Unterschied zwischen den spektralen Signaturen von unbewachsenen Arealen wie Brachflächen und mit grüner Vegetation

bewachsenen Flächen. Das Spektralverhalten des NDVI wird jedoch stark von optischen Eigenschaften der jeweiligen Oberfläche bestimmt, sofern keine vollständige Vegetationsdecke vorhanden ist (DE LANGE 2013, S. 430; OEHMICHEN 2004, S. 14).

b) *GNDVI – Green Normalized Difference Vegetation Index* (vgl. GITELSON et al. 1996)

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GRÜN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GRÜN}} \quad (2)$$

Der GNDVI wird aus den Reflexionswerten des nahen infraroten und des grünen Spektralbereiches gebildet. Im Vergleich zum NDVI, der als Maß für die photosynthetische Aktivität stark mit der Vitalität und Dichte der Vegetationsdecke korreliert, besitzt dieser Vegetationsindex eine höhere Sensitivität gegenüber dem Chlorophyllgehalt der Vegetation (SCHMITZ 2005, S. 13; GITELSON et al. 1996, S. 293).

c) *SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index* (vgl. HUETE 1988)

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rot}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rot} + L} (1 + L) \quad (3)$$

Der SAVI berücksichtigt im Vergleich zum NDVI die Bodenreflexion in einem noch nicht geschlossenen Bestand. Hierdurch wird deren Einfluss auf den Vegetationsindex verringert. Der verwendete Bodenanpassungsfaktor L ist eine dimensionslose Konstante, die in Relation zum unterschiedlichen Absorptionsmaß zwischen dem ROT-Kanal und dem NIR-Kanal von Boden und Vegetation steht. Die Konstante hat einen Wertebereich von 0 (starke Vegetation) bis 1 (geringe Vegetation), wobei als erste Näherung meist ein Wert von 0,25 verwendet wird (JACOBI 2005, S. 20; OEHMICHEN 2004, S. 15). Dieser L -Wert wird auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

d) *MSAVI – Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (vgl. QI et al. 1994)

$$MSAVI = \frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{ROT})}}{2} \quad (4)$$

Der MSAVI als Erweiterung des SAVI wurde entwickelt, um den L -Faktor, für den Vorwissen über die im Untersuchungsgebiet vorhandene Vegetation benötigt wird, durch einen selbstjustierenden Faktor zu ersetzen. Zudem soll eine verbesserte Vegetationssensitivität durch eine Erweiterung des Dynamikbereiches und eine Reduzierung störender Bodeneinflüsse im Hintergrund erreicht werden (QI et al. 1994, S. 120).

e) *OSAVI – Optimized Soil Adjusted Vegetation Index* (vgl. RONDEAUX et al. 1996)

$$OSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rot}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rot} + 0,16} \quad (5)$$

Beim OSAVI als zweite in der vorliegenden Arbeit verwendete Modifikation des SAVI wird durch die Anpassung an reale Daten ein konkreter Wert für L festgelegt. Ziel ist auch hier eine Minimierung des Bodeneinflusses (OEHMICHEN 2004, S. 15).

f) *MSI – Moisture Stress Index* (vgl. ROCK et al. 1985)

$$MSI = \frac{\rho_{MIR}}{\rho_{NIR}} \quad (6)$$

Zur Berechnung des Moisture Stress Index wird ein Ratio aus dem MIR-Kanal und dem NIR-Kanal gebildet. Der MSI eignet sich insbesondere zur Erfassung von Pflanzenwasserstress bzw. des Feuchtegehaltes von Vegetation, da Wasser vor allem im MIR-Wellenlängenbereich das höchste Absorptionsvermögen besitzt und somit dessen Reflexionsvermögen mit abnehmendem Blattwassergehalt ansteigt (HUNT JR. & ROCK 1989, S. 44 f.).

g) *NDWI – Normalized Difference Water Index* (vgl. GAO 1996)

$$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{MIR}} \quad (7)$$

Der NDWI ist ein weiterer Index zur Erfassung der Vegetationsfeuchte bzw. zur allgemeinen Erfassung des Feuchtegehaltes von Landoberflächen. Im Gegensatz zum NDVI ist er sehr robust gegenüber atmosphärischen Störungen, weist jedoch auch eine Anfälligkeit gegenüber Bodeneinflüssen auf (DANSON & BOWYER 2004, S. 312; GAO 1996, S. 264).

3.3 Objektbasierte Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation der multisensorialen Fernerkundungsdaten

Die geometrisch und radiometrisch aufbereiteten Satellitenbilddaten der verschiedenen Sensoren werden zur Erfassung der agrarischen Landnutzung für alle drei Aufnahmezeitpunkte sowie zur Detektion der infrastrukturellen Landnutzung und natürlichen Landbedeckung im Jahr 2010 verwendet. Grundlage hierfür bildet ein mittels eCognition entwickelter, objektbasierter Klassifikationsalgorithmus, anhand dessen die einzelnen Subsets der drei Satellitenbildsensoren (vgl. Abb. 18, Abb. 19 und Abb. 20) individuell klassifiziert werden. Nach einer Mosaikierung der daraus resultierenden Teilklassifikationen zu einer Gesamtklassifikation stehen diese Daten für die weiteren Bearbeitungsschritte – Change Detection-Analyse und Simulation künftiger agrarischer Landnutzungsdynamiken – zur Verfügung.

Im Folgenden wird das objektbasierte Klassifikationsverfahren insbesondere im Hinblick auf den hierarchischen Segmentierungsprozess und die während der Klassifikation erfassten Objektklassen mit ihren klassenspezifischen Trennungskriterien detailliert erläutert. Anschließend werden die Klassifikationsergebnisse zur Eruiierung der Klassifikationsgüte einem Accuracy Assessment unterzogen.

3.3.1 Entwicklung einer objektbasierten Segmentierungs- und Klassifikationsstrategie zur Erfassung von LULC-Klassen in den verwendeten Satellitenbilddaten

Der zur Analyse der multispektralen Fernerkundungsdaten verwendete Segmentierungs- und Klassifikationsalgorithmus wird anhand des Datensatzes mit der höchsten räumlichen Auflösung, des RapidEye-Datensatzes 2010, entwickelt und anschließend zur weiteren agrarischen Landnutzungs-klassifikation der SPOT 4- und SPOT 1- Daten modifiziert. Diese Modifikationen sind notwendig aufgrund der unterschiedlichen räumlichen und spektralen Auflösung sowie radiometrischer Differenzen infolge der saisonal unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte der Daten. Sie umfassen insbesondere Änderungen innerhalb der Segmentierungsparameter und bei der Auswahl der zur Objektklassifizierung verwendeten Trennungskriterien (vgl. Tab. 1 und Tab. 2).

Der allgemeine Segmentierungs- und Klassifikationsprozess bleibt jedoch für alle zu analysierenden Satellitenbilddaten gleich. Dieser ist durch zwei wesentliche Strukturmerkmale gekennzeichnet: 1) Die separate Analyse von thematischen Objektgruppen (z.B. Landwirtschaft) in voneinander unabhängigen Sub-Projekten – so genannten Maps sowie 2) eine map-spezifische Multi-Resolution-Segmentierung und Klassifikation von Objektklassen in bis zu drei Segmentierungsebenen, wobei die jeweils letzte Hierarchieebene die finalen Objektklassen beinhaltet (z.B. Ackerfläche, Plantagen und Schwarzbrache). Abb. 23 zeigt einen schematischen Überblick des hierarchischen Klassifikationsalgorithmus von den einzelnen Objektgruppen bis hin zu den finalen Objektklassen der einzelnen LULC- sowie LU-Klassifikationen.

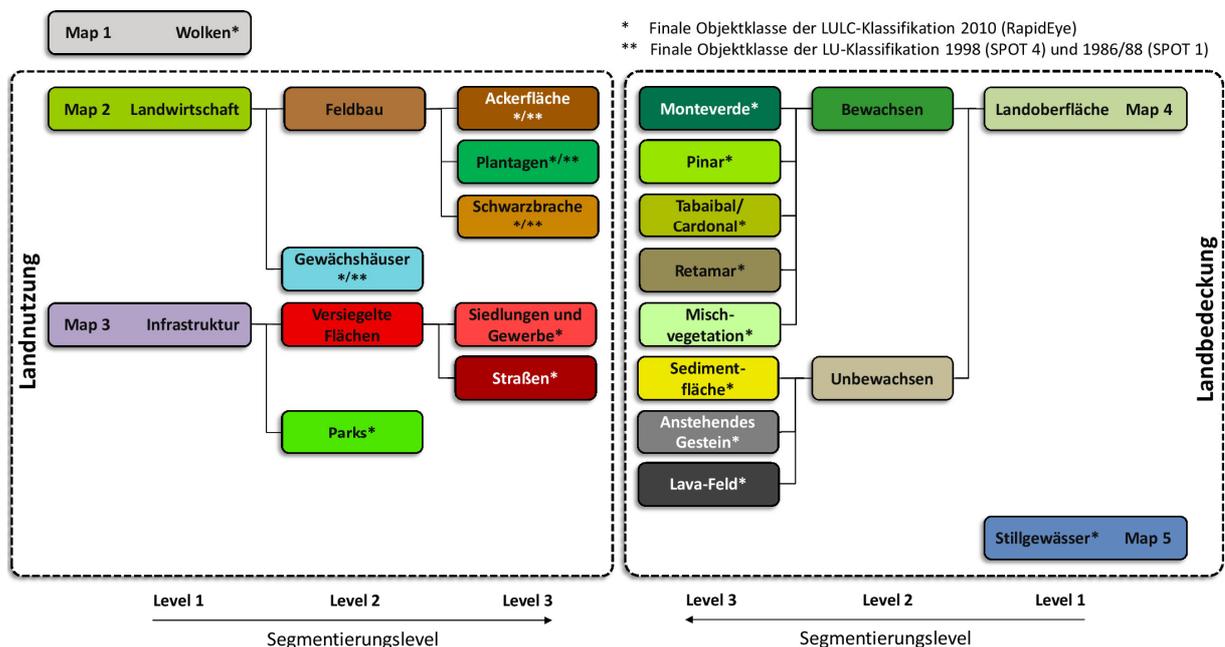


Abb. 23: Hierarchischer Aufbau des objektbasierten Klassifikationsalgorithmus für die Rapid Eye-, SPOT 4- und SPOT 1-Daten (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Nutzung mehrerer Maps ermöglicht im Kontext des hier vorgestellten Klassifikationsverfahrens die Analyse ein und desselben Bilddatensatzes mit individuell angepassten Segmentierungs- und Klassifikationsstrategien. Dies ist insbesondere bei der Klassifikation von Objekten mit unterschiedlicher Größe und gleichzeitig ähnlichen spektralen Eigenschaften sinnvoll, wie es beispielsweise bei Wolken und bestimmten Versiegelungsflächen der Fall ist. So eignen sich zur Erfassung von homogenen Wolkenfeldern eher größere Segmente, während zur exakten Detektion von Weilern und ein-

zelen Gebäuden weitaus kleinere, möglichst homogene Segmente benötigt werden. Daneben besteht die Möglichkeit, für agrarische Landnutzungseinheiten thematische Informationen in Form von Katasterdaten in den Segmentierungsprozess mit einzubeziehen, ohne dass dies zu Konflikten bei der Segmentierung und anschließenden Klassifikation anderer Objektklassen wie beispielsweise Waldflächen führt. Die einzelnen Maps lassen sich darüber hinaus miteinander synchronisieren, wodurch auch notwendige hierarchische Abhängigkeiten zwischen diesen geschaffen werden können. Der hier vorliegende Klassifikationsalgorithmus impliziert die Erstellung von fünf Maps für die RapidEye-Daten bzw. zwei Maps für die SPOT-Daten. Diese weisen, abhängig von der jeweiligen thematischen Objektgruppe, unterschiedliche zur Segmentierung verwendete Input-Daten und Skalierungsparameter bzw. Homogenitätskriterien auf (vgl. Tab. 1).

		Zur Segmentierung verwendete Input-Daten	Skalierungsparameter bei Segmentierungslevel 1	Homogenitätskriterien bei Segmentierungslevel 1
LULC 2010 (RapidEye)	Map 1	MS* BLAU; MS GRÜN; MS ROT; MS RED EDGE; MS NIR	100	Shape 0,3 Compactness 0,7
	Map 2	MS BLAU; MS GRÜN; MS ROT; MS RED EDGE; MS NIR; NDVI; TH** Katasterdaten	70	Shape 0,3 Compactness 0,6
	Map 3	MS BLAU; MS GRÜN; MS ROT; MS RED EDGE; MS NIR; NDVI, PC***1	50	Shape 0,3 Compactness 0,6
	Map 4	MS BLAU; MS GRÜN; MS ROT; MS RED EDGE; MS NIR; NDVI, PC1	60	Shape 0,1 Compactness 0,5
	Map 5	MS BLAU; MS GRÜN; MS ROT; MS RED EDGE; MS NIR; NDVI	40	Shape 0,1 Compactness 0,2
LU 1998 (SPOT 4)	Map 1	MS GRÜN; MS ROT; MS NIR; MS MIR	50	Shape 0,3 Compactness 0,6
	Map 2	MS GRÜN; MS NIR; TH Katasterdaten	30	Shape 0,3 Compactness 0,7
LU 1986/88 (SPOT 1)	Map 1	Keine Wolken vorhanden		
	Map 2	MS GRÜN; MS NIR; PC 1; NDVI; TH Katasterdaten	30	Shape 0,3 Compactness 0,6

*MS: Multispektral-Kanal **TH: Thematische Daten ***PC: Hauptkomponente

Tab. 1: Zur Segmentierung verwendete Input-Daten und Segmentierungseinstellungen in den verschiedenen Maps (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Objektklassen der einzelnen Maps werden stets in die nächstfolgenden Subprojekte vererbt und können hierdurch als grundsätzliches Ausschlusskriterium bei der Erfassung der weiteren Klassen genutzt werden. So können beispielsweise Siedlungsbereiche mit ähnlichen spektralen Eigenschaften wie Wolken leichter klassifiziert werden, da die Wolkenareale schon zuvor mit einem entsprechend auf diese Klasse zugeschnittenem Segmentierungs- und Klassifikationsprozess erfasst wurden.

Die LULC-Klassifikation der RapidEye-Daten berücksichtigt insgesamt 17 finale Objektklassen, während die LU-Klassifikationen der SPOT-Daten vier bzw. fünf finale Klassen aufweisen. Jede Einheit wird dabei durch ein Set an Regeln charakterisiert, innerhalb dessen spezifische Schwellenwerte und Merkmalsbereiche der mit einbezogenen Attribute festgelegt sind. Tab. 2 gibt einen Überblick, welche Merkmalsattribute zur Differenzierung der finalen Objektklassen in den verwendeten Satellitenbilddaten beitragen.

Objektklasse	Zur Klassifizierung verwendete Attribute		
	LULC 2010 (RapidEye)	LU 1998 (SPOT 4)	LU 1986/88 (SPOT 1)
Wolken	LVM ROT; LVM PC1; LVM IHS Saturation; LVM MsSum; LVSD ROT; EXT NrPix	LVM NIR; LVM PC1; LVM IHS Saturation; LVM MsSum; LVM DEM; LVSD NIR; EXT NrPix	Keine Wolken vorhanden
Ackerfläche	LVM PC 2; LVM Slope; LVM DEM; LVM NDVI; LVM MSAVI; LVM OSAVI; LVM NDWI; LVSD ROT; LVSD Slope; EXT Length; SH RectFit;	LVM GRÜN; LVM NIR; LVM MIR; LVM IHS Hue; LVM IHS Saturation; LVM DTM; LVM Slope; LVM NDVI; LVM MSAVI; LVM; MSI; LVSD DTM; LVSD Slope; SH RectFit	LVM GRÜN; LVM Slope; LVM IHS Saturation; LVM OSAVI; LVM GNDVI; LVSD Slope; SH RectFit
Plantagen	LVM GRÜN; LVM IHS Hue; LVM DTM; LVM Slope; LVM OSAVI; EXT NrPix; SH RectFit	LVM GRÜN; LVM DTM; LVM Slope; LVM NDVI; LVM GNDVI; LVSD ROT; LVSD NIR; EXT NrPix; SH RectFit	LVM GRÜN; LVM IHS Hue; LVM IHS Saturation; LVM DTM; LVM Slope; LVM OSAVI; LVI GNDVI; EXT NrPix; SH RectFit
Schwarzbrache	LVM Slope; LVM NDVI; LVM MSAVI; LVM OSAVI; SH RectFit	LVM GRÜN; LVM NIR; LVM MIR; LVM IHS Hue; LVM IHS Saturation; LVM Slope; LVM MSI; EXT NrPix; SH RectFit	LVM PC1; LVM IHS Hue; LVM MSAVI; LVM OSAVI; LVM Slope; LVM GNDVI; EXT Length/Width; EXT NrPix; SH RectFit
Gewächshäuser	LVM MSAVI; LVM MsSum; LVM IHS Saturation; LVM DTM; LVM Slope; SH RectFit	LVM NIR; LVM MIR; LVM MSAVI; LVM IHS Saturation; LVM DTM; LVM Slope; LVM IHS Hue; EXT NrPix; SH RectFit	LVM MsSum; LVM IHS Hue; LVM IHS Saturation; LVM DTM; LVM Slope; LVM MSAVI; LVM OSAVI; EXT NrPix; SH RectFit
Straßen	LVM DTM; LVM OSAVI; LVSD BLAU; EXT Length/Width; SH Compactness; SH RectFit	Attributkategorien LVM Layer Value Mean – Durchschnittswert der im Objekt zusammengefassten Pixel des verwendeten Kanals LVSD Layer Value Standard Deviation – Standardabweichung der im Objekt zusammengefassten Pixel des verwendeten Kanals EXT Extent features SH Shape features Abkürzungen Attribute DTM Digitales Geländemodell GNDVI Green Normalized Difference Vegetation Index NIR Multispektral-Kanal Nahes Infrarot MIR Multispektral-Kanal Mittleres Infrarot IHS IHS-Transformation NDVI Normalized Difference Vegetation Index NDWI Normalized Difference Water Index MSAVI Modified Soil Adjusted Vegetation Index MSI Moisture Stress Index MsSum Summe aller sensorspezifischen Multispektralkanäle NrPix Pixelanzahl OSAVI Optimized Soil Adjusted Vegetation Index PC x jeweilige Komponente der Hauptkomponentenanalyse RectFit Rectangular Fit SAVI Soil Adjusted Vegetation Index	
Parks	LVM IHS Hue; LVM NDVI; LVM MSAVI; LVM DTM		
Monteverde	LVM Red Edge; LVM PC 3; LVM IHS Intensity; LVM DTM; LVM NDVI; LVM MSAVI		
Pinar	LVM BLAU; LVM ROT; LVM NIR; LVM DTM; LVM Sum; LVM NDVI; LVM OSAVI		
Tabaibal/ Cardonal	LVM NIR; LVM IHS Hue; LVM DTM; LVM NDVI; LVM MSAVI		
Retamar	LVM DTM; LVM OSAVI		
Misch-vegetation	LVM Sum; LVM NDVI; LVM SAVI; LVM MSAVI; LVSD NDVI;		
Sedimentfläche	LVM Sum; LVM NDVI; LVM OSAVI		
Anstehendes Gestein	LVM DTM; LVM MSAVI		
Lava-Feld	LVM GRÜN; LVM PC 1; LVM PC 3; LVM DTM; LVM SAVI; LVM MSAVI; LVM OSAVI		
Stillgewässer	LVM NDWI; LVM IHS Hue; LVM Slope;		

Tab. 2: Auflistung der für die finalen Objektklassen der LULC- sowie LU-Klassifikationen verwendeten Attribute (Quelle: Eigene Darstellung)

Die finale Objektklasse „Wolken“ umfasst die durch Wolken sowie Wolkenschatten überdeckten Areale der Satellitenbilddaten. Die großflächigen Segmente der Wolkenkernbereiche weisen insbesondere im Nahen Infrarot sehr hohe Reflexionswerte auf, während im IHS Saturation-Kanal eher niedrige Werte zu verzeichnen sind. Durch einen Region Grow-Algorithmus lassen sich schließlich auch die Wolkenrand- und Schattenareale um die Kernbereiche der Klasse erfassen.

Die finale Objektklasse „Ackerfläche“ impliziert alle landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Nutzpflanzenbewuchs zum Zeitpunkt der Satellitenbilddaufnahme (vgl. Abb. 24). Davon ausgeschlossen sind Anbauareale, die aufgrund ihrer Größe und monokulturellen Nutzungsweise als Plantagen, beispielsweise Bananenplantagen, klassifiziert werden können. Aufgrund der bei der Segmentierung berücksichtigten Katasterdaten bzw. landwirtschaftlichen Parzelleninformationen (vgl. Kap. 3.2.1) lassen sich die Objekte dieser sowie aller folgenden Klassen der thematischen Objektgruppe Landwirtschaft durch die Form der Segmente, die im günstigsten Fall annähernd rechteckig sind, sowie durch eine gemäßigte Hangneigung klassifizieren. Die bestellten Ackerflächen können dabei insbesondere durch eine Kombination aus Merkmalsbereichen verschiedener Vegetationsindizes von den übrigen landwirtschaftlichen Arealen unterschieden werden.



Abb. 24: Bildbeispiele der finalen Objektklasse Ackerfläche (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Die finale Objektklasse „Plantagen“ beinhaltet großflächige Monokulturen, die fast ausnahmslos aus Bananenpflanzungen, dem Hauptexportprodukt der Insel, bestehen (vgl. Abb. 25). Vereinzelt werden dieser Klasse jedoch auch Obstbauplantagen zugeordnet, sofern diese eine ausreichend hohe Pflanzdichte aufweisen. Aufgrund ihrer Größe sowie ihres hohen Biomasseanteils weisen die Plantagen im Gegensatz zu Ackerflächen insbesondere beim OSAVI signifikant höhere Vegetationsindexwerte auf und können somit eindeutig von diesen unterschieden werden.



Abb. 25: Bildbeispiele der finalen Objektklasse Plantagen (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Die finale Objektklasse „Schwarzbrache“ umfasst alle landwirtschaftlich genutzten Flächen, die vorübergehend unbestellt bzw. vegetationslos sind, aber dennoch einer geregelten agrarischen Nutzung unterliegen (vgl. Abb. 26) (BRUNOTTE et al. 2002, Stichwort: Brache). Neben dem für diese thematische Objektgruppe typischen Formmerkmal Rectangular Fit können die Brachflächen durch sehr niedrige Vegetationsindexwerte, auch bei dieser Klasse vor allem beim OSAVI, von den restlichen landwirtschaftlichen Nutzklassen unterschieden werden.



Abb. 26: Bildbeispiele der finalen Objektklasse Schwarzbrache (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Die finale Objektklasse „Gewächshäuser“ enthält alle landwirtschaftlichen Anbauflächen in Form von Gewächshäusern (vgl. Abb. 27). Diese Treibhäuser, bestehend aus großflächigen, die Ackerfläche komplett umspannenden Plastikfolien, werden vornehmlich zum Anbau von Monokulturen wie Bananen, Tomaten und Schnittblumen genutzt (NAUMANN 2008, S. 73). Die Gewächshäuser weisen, ähnlich wie Siedlungsflächen, sehr niedrige IHS Saturation-Werte auf, zeigen jedoch aufgrund einer gewissen Lichtdurchlässigkeit der Plastikfolien erhöhte MSAVI-Werte, wodurch sie von den infrastrukturellen Flächen klar differenziert werden können. Zudem findet die Anlage von Gewächshäusern nur in den leicht zugänglichen Küstenbereichen des Untersuchungsgebietes statt.



Abb. 27: Bildbeispiele der finalen Objektklasse Gewächshäuser (Fotos: S. Günthert, 10/2011)

Die finale Objektklasse „Siedlungen und Gewerbe“ besteht sowohl aus großflächig zusammenhängenden Städten und Dörfern, beinhaltet aber auch einzelne Weiler und Höfe (vgl. Abb. 28). Daneben zählen auch Gewerbeflächen und Flughäfen zu dieser Klasse. Zur Klassifikation der Siedlungsflächen werden sehr niedrige Merkmalsbereiche verschiedener Vegetationsindizes sowie des blauen Spektralbereichs verwendet. Etwaige Überschneidungen zu Wolken und Gewächshäusern werden durch die hierarchische Vererbung der thematischen Objektgruppen von vornherein ausgeschlossen.

Zur finalen Objektklasse „Straßen“ zählen alle asphaltierten Straßen, die im Rahmen der vorliegenden räumlichen Auflösung segmentierbar sind. Hierzu zählen vornehmlich die Autobahnen und Bundesstraßen im Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 28). Die Klassifikation dieses Objekttyps beruht vor allem auf verschiedenen Form- und Längenmerkmalen der Segmente.

Die finale Objektklasse „Parks“ wird größtenteils durch Golfplätze im Süden der Insel charakterisiert (vgl. Abb. 28). Diese großflächigen Rasenareale weisen sehr spezifische NDVI- und MSAVI-Werte auf und befinden sich meist in direkter Nähe zur Küste.



Abb. 28: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Siedlungen und Gewerbe, Straßen und Parks (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Die finale Objektklasse „Monteverde“ beinhaltet die fast ausschließlich im Norden der Insel vorkommenden Lorbeerwälder und Baumheidegebüsche (vgl. Abb. 29) (vgl. Kap. 2.1.3.4). Diese immergrünen Vegetationsformationen weisen sehr spezifische Merkmalsbereiche im Red Edge-Kanal und bei verschiedenen Vegetationsindizes auf. Zudem befindet sich die Vegetationszone des Monteverde in einem klar abgrenzbaren Höhenbereich, wodurch die Klassifikationsgenauigkeit bei dieser Klasse deutlich gesteigert werden kann.

Die finale Objektklasse „Pinar“ bezieht sich auf die montane Kiefernwaldregion oberhalb der Lorbeerwaldzone (vgl. Abb. 29) (vgl. Kap. 2.1.3.5). Auch bei dieser Klasse lassen sich klare Klassifikationskriterien insbesondere durch die kombinatorische Verwendung verschiedener Spektralkanäle und Höheninformationen feststellen. Die Unterscheidung zu Lorbeerwald wird im besonderen Maße durch niedrigere MSAVI-Schwellenwerte ermöglicht.

Die finale Objektklasse „Tabaibal/Cardonal“ berücksichtigt jegliche Sukkulenteformationen in der Basalstufe der Insel (vgl. Abb. 29). Diese halbwüstenähnliche Vegetation wird vor allem durch zwei verschiedene Pflanzenformationen dominiert: Cardonal, charakterisiert durch die blattlose, kandelaberartige Wuchsform des Cardón (*Euphorbia canariensis*), sowie Tabaibal, gekennzeichnet durch den pachykaulen Wuchs der verschiedenen Arten von Tabaibas (*Euphorbia balsamifera*, *E. obtusifolia* etc.) (POTT et al. 2003, S. 122) (vgl. Kap. 2.1.3.2). Durch den meist relativ offenen Bestand weist diese Klasse relativ niedrige Werte bei den zur Klassifizierung verwendeten Vegetationsindizes MSAVI und NDVI auf.



Abb. 29: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Monteverde, Pinar und Tabaibal/Cardonal (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Die finale Objektklasse „Retamar“ umfasst die gesamte offene Gebüschformation des Hochgebirges oberhalb von 2.000 bis 2.500 m (vgl. Abb. 30) (vgl. Kap. 2.1.3.6). Die vornehmlich aus Ginsterheide bestehende Vegetation mit der Charakterart *Spartocytisus supranubis* (Retama blanca) kann durch ihren extremen Höhenstandort leicht von den übrigen Vegetationsformationen der Insel unterschieden werden.

Die finale Objektklasse „Mischvegetation“ bezieht jegliche Vegetation mit ein, die sich nicht eindeutig einer der zuvor genannten Pflanzenformationen zuordnen lässt. Sie ist zusammengesetzt aus mehr oder weniger dicht bewachsenen Strauchformationen bis hin zu Offenlandflächen (vgl. Abb. 30). Oftmals können solche Areale auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen detektiert werden, wenn sich die Sukzessionsprozesse noch in einem frühen Stadium befinden. Daneben können aber auch Weideflächen als Mischvegetation klassifiziert werden. Zur Klassifikation dieses Objekttyps werden verschiedene Wertebereiche der Vegetationsindizes herangezogen.



Abb. 30: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Retamar und Mischvegetation (Strauchformationen und Offenland) (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Die Objektklasse „Sedimentfläche“ beinhaltet alle unbewachsenen, landwirtschaftlich ungenutzten Areale des Untersuchungsgebiets, die sich aus losem Substrat unterschiedlicher Kornfraktionen zusammensetzen. Hierzu zählen beispielsweise die Sandstrände der Küstenzonen, aber auch die vegetationslosen Flächen in der vulkanischen Gebirgsregion (vgl. Abb. 31). Als Trennungsattribute dienen unter anderem der NDVI und MSAVI.

Die finale Objektklasse „Anstehendes Gestein“ umfasst die unbewachsenen und sedimentlosen, an der Landoberfläche heraustretenden vulkanischen Gesteine des Untergrundes wie beispielsweise größere Felsverbände in direkter Nähe zur Küste oder in den Gebirgsregionen des Anaga- und Tenomassivs (vgl. Abb. 31). Zur Klassifikation wird der MSAVI verwendet. Zuvor erfasste Objektklassen mit spektraler Ähnlichkeit dienen dabei als Ausschlusskriterium.

Die finale Objektklasse „Lava-Feld“ beinhaltet die aufgrund ihrer dunklen Farben deutlich von anderen vegetationslosen Flächen differenzierbaren Lavaströme, die in unterschiedlicher Breite vom Teide-Pico-Viejo-Komplex hangabwärts geflossen sind (vgl. Abb. 31). Innerhalb dieser Klasse werden vor allem die geologisch sehr jungen Areale erfasst, die wenig bis keine Vegetation besitzen. Die Lava-Felder weisen sehr geringe Werte innerhalb der ersten und dritten Hauptkomponente sowie bei den einzelnen Vegetationsindizes auf.



Abb. 31: Bildbeispiele der finalen Objektklassen Sedimentfläche, Anstehendes Gestein und Lava-Feld (Fotos: S. Günthert, 03/2010)

Die finale Objektklasse „Stillgewässer“ bezeichnet im Untersuchungsgebiet vor allem künstlich angelegte Wasserreservoirs und kleinere Stauseen (vgl. Abb. 25, links, unterer Bildrand). Sehr niedrige NDWI-Werte sowie hohe IHS Hue-Werte ermöglichen eine eindeutige Trennung der Stillgewässer von anderen Landbedeckungseinheiten.

3.3.2 Klassifikationsgüte der objektbasierten LULC- und LU-Klassifikationen

Zur quantitativen Abschätzung der Klassifikationsgenauigkeit müssen die Klassifikationsergebnisse einem Accuracy Assessment unterzogen werden. Neben einer rein statistischen Aussage über den Anteil richtig klassifizierter Pixel sollen bei dieser Ergebnisvalidierung auch Angaben über die wechselseitigen Abhängigkeiten von Fehlklassifikationen zwischen den verschiedenen Klassen ermöglicht werden. Ein in diesem Zusammenhang sehr häufig verwendetes Verfahren ist die so genannte Error-Matrix, auch als Konfusionsmatrix bezeichnet (DE LANGE 2013, S. 445; CAMPBELL 2006, S. 398). Diese Technik basiert auf einem stichprobenartigen Vergleich zwischen dem Klassifikationsergebnis und einem Referenzdatensatz. Anhand eines spezifischen zufallsbasierten Sampling-Verfahrens oder durch vorab getätigte Geländekartierungen wird für jede Klasse eine bestimmte Anzahl an Testpixeln aus dem Klassifikationsergebnis ausgewählt und dem entsprechenden Referenzbild zugrunde gelegt. Anschließend werden den Testpixeln manuell diejenigen Klassenwerte zugeordnet, die sie darstellen

sollen. Das Ergebnis dieser Referenzklassifizierung wird schließlich dem tatsächlichen Klassifikationsergebnis in Form einer Konfusionsmatrix bzw. Error-Matrix gegenübergestellt (DE LANGE 2013, S. 445). Durch die Verwendung einer Konfusionsmatrix wird die Betrachtung der Klassifikationsgüte aus mehreren Perspektiven ermöglicht. Es können unter anderem vier verschiedene Gütekriterien abgeleitet werden (vgl. DE LANGE 2013, S. 445 f.; CAMPBELL 2006, S. 403 ff.):

- Die Gesamtgenauigkeit der Klassifikation kann durch den Quotienten aus allen korrekt klassifizierten Pixeln und der Gesamtzahl der Pixel errechnet werden. Sie gibt somit den prozentualen Anteil der korrekt klassifizierten Testgebiete wieder.
- Durch Division der Anzahl an korrekt klassifizierten Testpixeln durch die Reihensumme wird die Nutzergenauigkeit (Comission Error) berechnet. Sie repräsentiert die prozentuale Wahrscheinlichkeit, mit der ein klassifizierter Pixel die jeweilige Klasse auch tatsächlich in der Realität repräsentiert. Die Nutzergenauigkeit gilt somit als Maß für die Zuverlässigkeit der klassifizierten Daten.
- Durch Division der richtig klassifizierten Pixel durch die Spaltensumme kann die Herstellergenauigkeit (Omission Error) errechnet werden. Sie zeigt auf, wie viel Prozent der Referenzdaten mit der Klassifikation erfasst werden konnten.
- Eine Möglichkeit zur zusammenfassenden Validierung der Klassifikationsergebnisse bildet die Berechnung des so genannten Kappa-Koeffizienten (Kappa-Index). Dieser Kontingenzkoeffizient bezieht sowohl den Error of Omission als auch den Error of Comission in die Beurteilung der Klassifikationsgüte mit ein. Der Kappa-Koeffizient basiert auf der Annahme, dass die beiden untersuchten Klassifizierungen – die erstellte und die Referenzklassifizierung – von gleicher Zuverlässigkeit sind. Wie exakt sie miteinander übereinstimmen, wird letztendlich durch die Berechnung dieses Gütemaßes definiert. Die Kappa-Index-Werte schwanken zwischen 0 und 1, wobei ein Wert von 0 keine und ein Wert von 1 die totale Übereinstimmung aufzeigt. Weiter gilt: Indexwerte größer 0,75 deuten eine sehr gute Klassifikationsgüte an, während Werte kleiner 0,4 auf eine eher schlechte Qualität der Klassifikation hinweisen (vgl. DE LANGE 2013, S. 445 f.; NAUMANN 2008, S. 80; OCZIPKA 2007, S. 96) (vgl. weitergehend LILLESAND et al. 2008, S. 591; JENSEN 2005, S. 506 ff.).

Unter Verwendung des Accuracy Assessment-Tools von ERDAS Imagine 2011 werden für die objektbasierten Klassifikationen von 1986/88, 1998 und 2010 jeweils eine Error-Matrix und die vorgestellten Gütekriterien abgeleitet. Grundlage zur Erstellung hierfür benötigter Testgebiete bzw. Referenzpixel stellt für alle drei Genauigkeitsanalysen das Verfahren der geschichteten Zufallsstichprobe mit proportionaler Allokation (Stratified Random). Bei dieser zufallsbasierten Sampling-Technik wird die vorab angegebene Anzahl an Referenzpunkten je nach Klassenstärke gewichtet. Die verwendete Anzahl an Referenzpunkten beläuft sich bei den zwei SPOT-Klassifikationen auf je 500. Für die Genauigkeitsabschätzung der RapidEye-basierten Klassifikation besteht die Möglichkeit, neben 800 zufallsbasierten Referenzpunkten weitere 200 Ground Control Points (GCPs) aus einer Geländekartierung des Untersuchungsgebietes im März 2010 heranzuziehen. Somit beläuft sich die Summe der Testpunkte für die LULC-Klassifikation 2010 auf insgesamt 1.000 Referenzpunkte. Die zum Accuracy Assessment benötigten Referenzdaten bilden die SPOT- bzw. RapidEye-Satellitenbilder von 1986/88, 1998 und 2010 sowie verschiedene hochauflösende Orthophotos des Untersuchungsgebiets aus den Jahren 1990, 1998 und 2009. Letztere stehen als Web Map Service-Layer (WMS-Layer) zur Verfügung (vgl. GOBIERNO DE CANARIAS 2014).

Die Gesamtgenauigkeit der LULC-Klassifikation 2010 beläuft sich auf 90,9% (vgl. Tab. 3). Bis auf wenige Ausnahmen zeigen auch die Nutzergenauigkeiten der einzelnen Klassen Werte im Bereich um 90% auf. Dies deutet auf eine sehr gute Zuverlässigkeit bei der Verteilung der einzelnen Klassen im Untersuchungsgebiet hin. Mit einem Gesamt-Kappa-Wert von 0,909 kann die Klassifikationsgüte zusammenfassend als sehr gut bezeichnet werden.

	Wolken	Ackerfläche	Plantagen	Schwarzbrache	Gewächshäuser	Siedlungen	Straßen	Parks	Monteverde	Pinar	Tabaibal/Cardonal	Retamar	Mischvegetation	Sedimentfläche	Anst. Gestein	Lava-Feld	Stilgewässer	Nutzergenauigkeit	Herstellergenauigkeit
Wolken	58	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	92,1%	85,3%
Ackerfläche	0	83	2	2	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	92,2%	95,4%
Plantagen	0	0	67	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	94,4%	91,8%
Schwarzbrache	1	0	0	90	2	1	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	91,8%	93,8%
Gewächshäuser	0	2	0	3	90	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	89,1%	94,7%
Siedlungen	0	0	0	1	0	60	3	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	88,2%	88,2%
Straßen	0	0	0	0	0	2	32	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	91,4%	82,1%
Parks	0	0	3	0	0	0	0	29	0	0	1	0	0	0	0	0	0	87,9%	87,9%
Monteverde	0	0	0	0	0	0	0	0	68	6	0	0	2	0	0	0	0	89,5%	95,8%
Pinar	0	0	0	0	0	0	0	0	3	55	0	0	0	1	0	0	0	93,2%	84,6%
Tabaibal/Cardonal	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0	0	96,6%	96,6%
Retamar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	41	0	1	0	0	0	93,2%	100%
Mischvegetation	0	2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	45	0	0	0	0	88,2%	88,2%
Sedimentfläche	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	37	0	1	2	90,2%	86,0%
Anst. Gestein	4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	36	2	0	81,8%	85,7%
Lava-Feld	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	96,9%	91,2%
Stilgewässer	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	30	85,7%	85,7%
Gesamtanzahl der Testpixel: 1000										Gesamtgenauigkeit: 90,9%									
Summe korrekt klassifizierter Pixel: 909										Gesamt-Kappa-Index: 0,901									

Tab. 3: Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der LULC-Klassifikation 2010 (RapidEye) (Quelle: Eigene Darstellung)

Die LU-Klassifikation 1998 hat mit 89,9% eine im Gegensatz zur bereits vorgestellten Klassifikation von 2010 geringfügig niedrigere Gesamtgenauigkeit (vgl. Tab. 4). Bei Betrachtung der Nutzergenauigkeit wird deutlich, dass insbesondere die Klasse Gewächshäuser aufgrund von Fehlklassifizierungen zugunsten der spektral sehr ähnlichen Klasse Wolken die niedrigsten Werte aufweist, mit 80% aber dennoch akzeptabel ist. Der Kappa-Wert beläuft sich auf 0,875 und spiegelt auch für diesen Datensatz eine insgesamt sehr hohe Klassifikationsqualität wider.

	Wolken	Ackerfläche	Plantagen	Schwarzbrache	Gewächshäuser	Sonstige Flächen	Nutzer- genauigkeit	Hersteller- genauigkeit
Wolken	34	0	0	1	4	0	87,2%	82,9%
Ackerfläche	0	92	0	7	0	2	91,1%	86,8%
Plantagen	0	8	88	5	0	0	87,1%	95,7%
Schwarzbrache	0	6	1	101	0	3	91,0%	85,6%
Gewächshäuser	7	0	3	4	56	0	80%	93,3%
Sonstige Flächen	0	0	0	0	0	78	100%	94%
Gesamtanzahl der Testpixel: 500				Gesamtgenauigkeit: 89,8%				
Summe korrekt klassifizierter Pixel: 449				Gesamt-Kappa-Index: 0,875				

Tab. 4: Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der LU-Klassifikation 1998 (SPOT 4) (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Error-Matrix der LU-Klassifikation 1986/88 zeigt insgesamt einen sehr hohen Anteil an korrekt klassifizierten Pixeln, wodurch eine Gesamtgenauigkeit von 91,8% erreicht wird (vgl. Tab. 5). Allerdings weist auch bei dieser Klassifikation die Klasse Gewächshäuser mit 80% die niedrigsten Werte bei der Nutzergenauigkeit auf. Alle weiteren agrarischen Klassen liegen hier zum Teil deutlich über 90%. Die dennoch überdurchschnittlich hohe Klassifikationsgenauigkeit bzw. -qualität der LU-Klassifikation wird bei Betrachtung des Kappa-Koeffizienten ersichtlich. Er kann auf 0,895 beziffert werden.

	Ackerfläche	Plantagen	Schwarzbrache	Gewächshäuser	Sonstige Flächen	Nutzer- genauigkeit	Hersteller- genauigkeit	
Ackerfläche	134	6	1	0	5	91,8%	94,4%	
Plantagen	5	88	0	0	0	94,6%	88,9%	
Schwarzbrache	2	2	100	2	5	90,1%	92,6%	
Gewächshäuser	1	3	4	40	2	80%	95,2%	
Sonstige Flächen	0	0	3	0	97	97%	89,0%	
Gesamtanzahl der Testpixel: 500				Gesamtgenauigkeit: 91,8%				
Summe korrekt klassifizierter Pixel: 459				Gesamt-Kappa-Index: 0,895				

Tab. 5: Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der LU-Klassifikation 1986/88 (SPOT 1) (Quelle: Eigene Darstellung)

3.3.3 Visuelle Darstellung der Klassifikationsergebnisse

Die Resultate der objektbasierten Klassifikationen von 1986/88, 1998 und 2010 werden in Form von Landnutzungs- und Landbedeckungskarten (vgl. Abb. 32, Abb. 33 und Abb. 34) dargestellt. Bei einer visuellen Überprüfung der Karten lassen sich erste Rückschlüsse auf die bisherige räumliche Entwicklung der Landwirtschaft ziehen.

Es wird deutlich, dass zwischen 1986/88 und 2010 ein stetiger Rückgang der Ackerflächen insbesondere im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes zu verzeichnen ist. Gleichzeitig sind verschiedene agrarische Intensivierungsprozesse in den küstennahen Bereichen der gesamten Insel erkennbar. Diese äußern sich, wie beim Vergleich der drei aufgeführten thematischen Karten (Subset 1 und 2) ersichtlich wird, in Form einer zunehmenden Umnutzung von Ackerflächen durch Plantagen und Gewächshäuser sowie durch eine verstärkte Modifizierung von Plantagen ebenfalls zu Gewächshäusern. Hierdurch wird eine weitere Steigerung des Hektarertrages der Monokulturen gewährleistet. Bei Betrachtung der LULC-Karte 2010 zeigt sich das enorme Ausmaß dieser angestrebten Ertragssteigerungen. Verschiedene Anbauregionen vor allem im äußersten Süden und Südwesten Teneriffas sind ausschließlich durch Gewächshauskulturen geprägt.

Im Hinblick auf die Landbedeckung 2010 ist eine klare vertikale Zonierung der einzelnen Pflanzenformationen erkennbar. Während der Sukkulentenbusch (Klasse Tabaibal/Cardonal) die komplette Basalstufe der Insel umfasst, befindet sich die Kiefernwaldzone (Klasse Pinar) in mittleren Höhenzonen. Die zwischen diesen beiden Vegetationsformationen liegenden, stark niederschlagsabhängigen Lorbeerwälder und Baumheidegebüsche beschränken sich aufgrund der humiden klimatischen Verhältnisse fast ausschließlich auf den Nordteil des Untersuchungsgebietes. Ginsterheidegebüsche (Klasse Retamar) als Anpassungsstrategen an klimatische Extrembedingungen besiedeln wiederum einzig die Gebirgsregion um den Teide-Pico Viejo-Komplex.

Die dargestellten Klassifikationen eignen sich für eine erste qualitative Beurteilung der historischen Agrardynamiken im Untersuchungsgebiet. Zur quantitativen Erfassung der Veränderungsintensität und insbesondere räumlichen Dynamik der agrarischen Landnutzungsklassen müssen die drei Datensätze jedoch einer Change Detection-Analyse unterzogen werden.

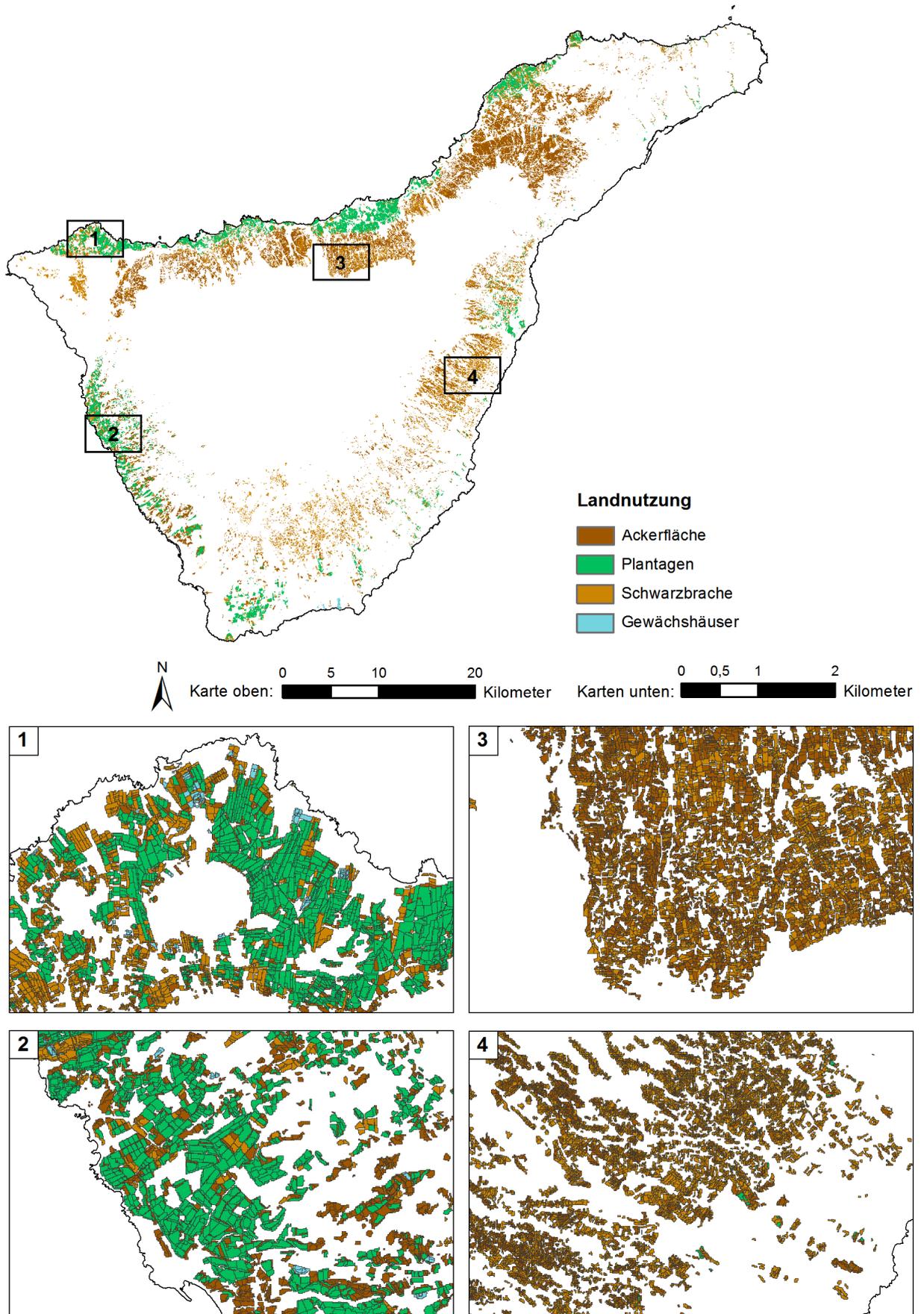


Abb. 32: Objektbasierte Agrar-Landnutzungs-klassifikation von Teneriffa 1986/88 (Quelle: Eigene Darstellung)

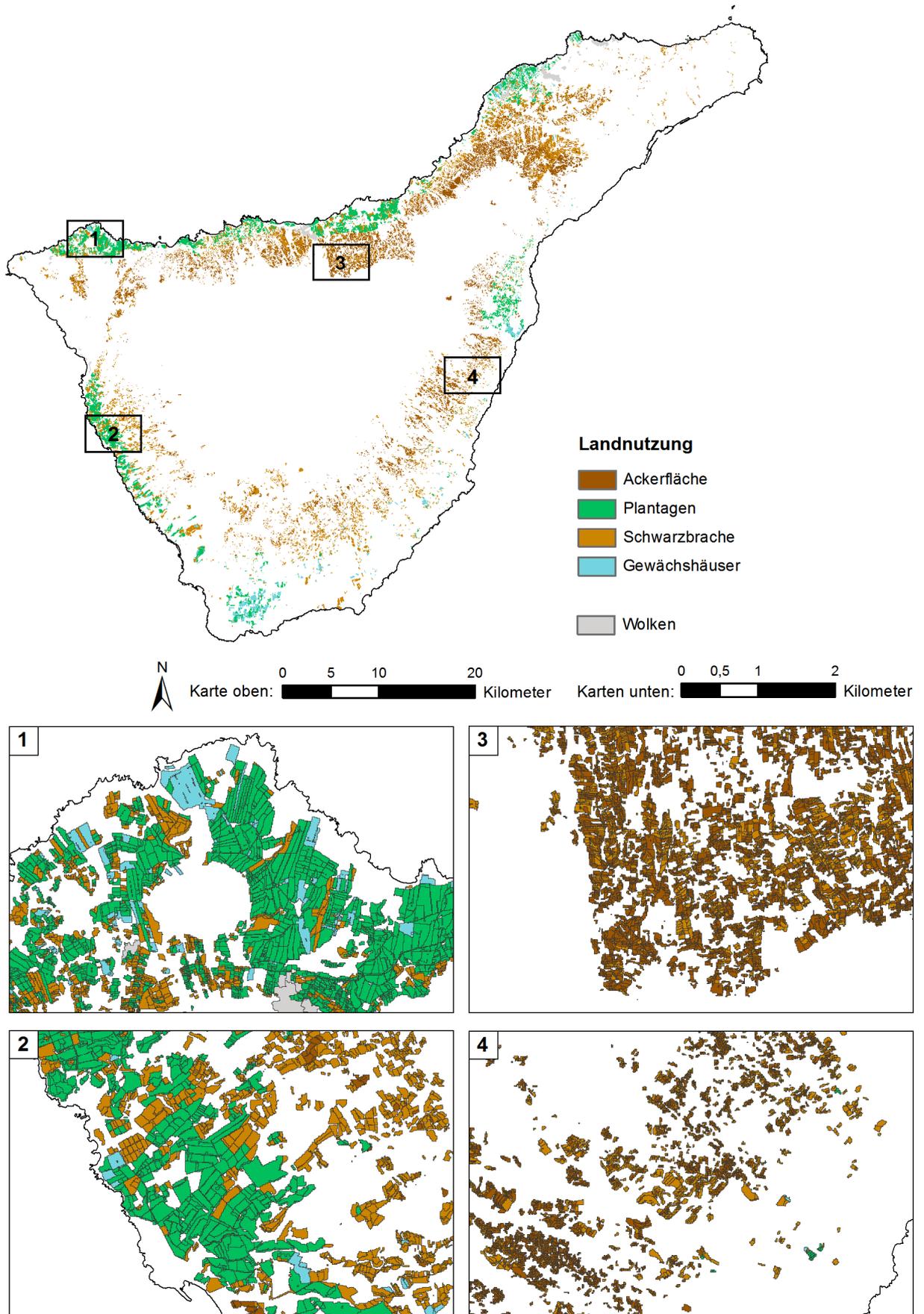


Abb. 33: Objektbasierte Agrar-Landnutzungs-klassifikation von Teneriffa 1998 (Quelle: Eigene Darstellung)

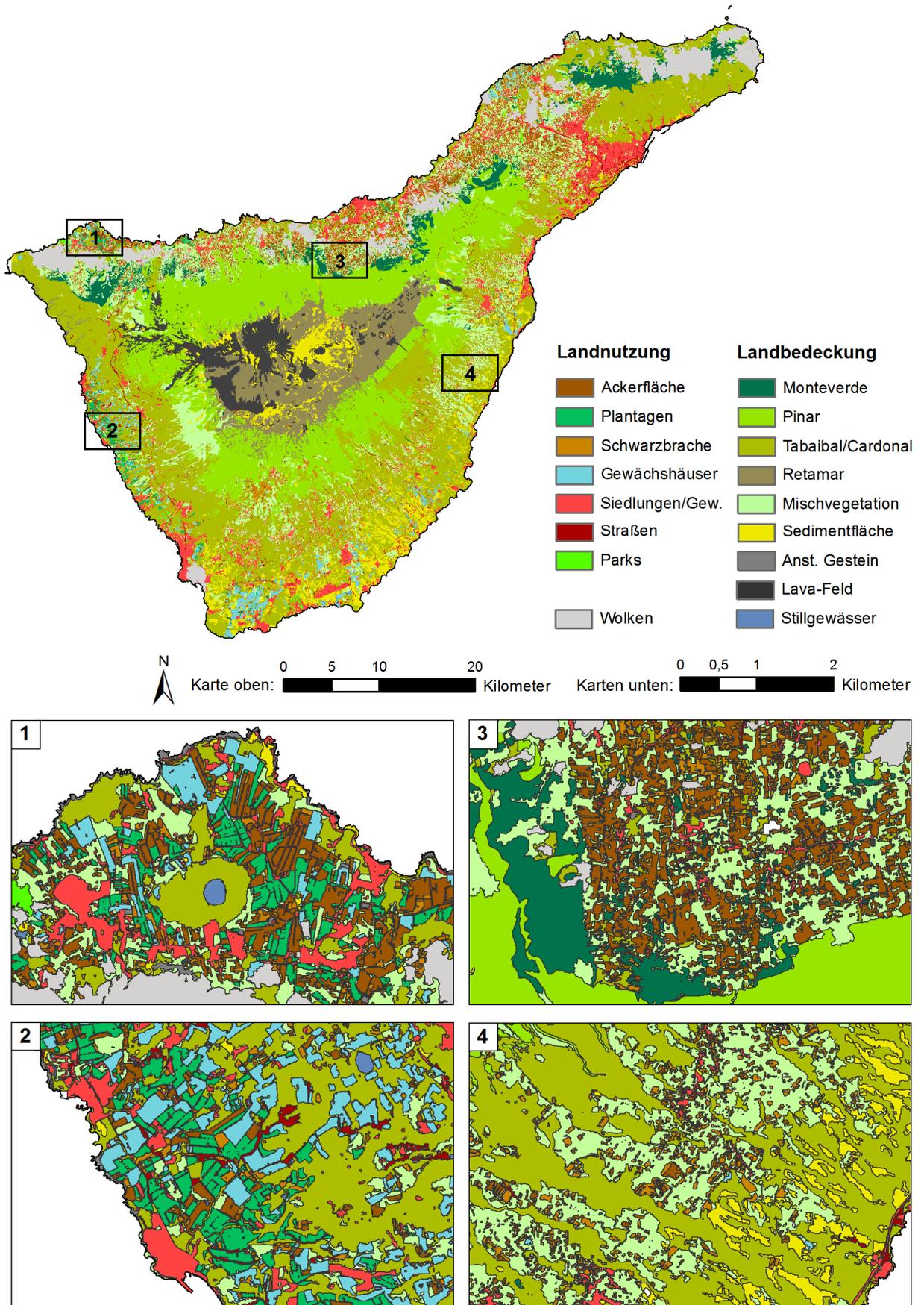


Abb. 34: Objektbasierte Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation von Teneriffa 2010 (Quelle: Eigene Darstellung)

3.4 Multitemporale Change Detection-Analyse zur Erfassung räumlicher Agrardynamiken im Untersuchungsgebiet

Eine erste quantitative Erfassung der landwirtschaftlichen Veränderungen in Form einer Veränderungsstatistik gibt Aufschluss darüber, wie hoch die Veränderungsraten der einzelnen Klassen im untersuchten Zeitraum sind (vgl. Abb. 35) (GÜNTHERT et al. 2012, 853804-5). Hierbei wird deutlich, dass insbesondere Ackerflächen und Schwarzbrachen¹⁴ mit über 8.000 ha die höchsten Flächeneinbußen im Untersuchungszeitraum zu verzeichnen haben. Während die Plantagen ebenfalls einen deutlichen Flächenrückgang aufweisen, ist dagegen bei den Gewächshauskulturen ein stetiger Anstieg von über 3.000 ha zwischen 1986/88 und 2010 erkennbar.

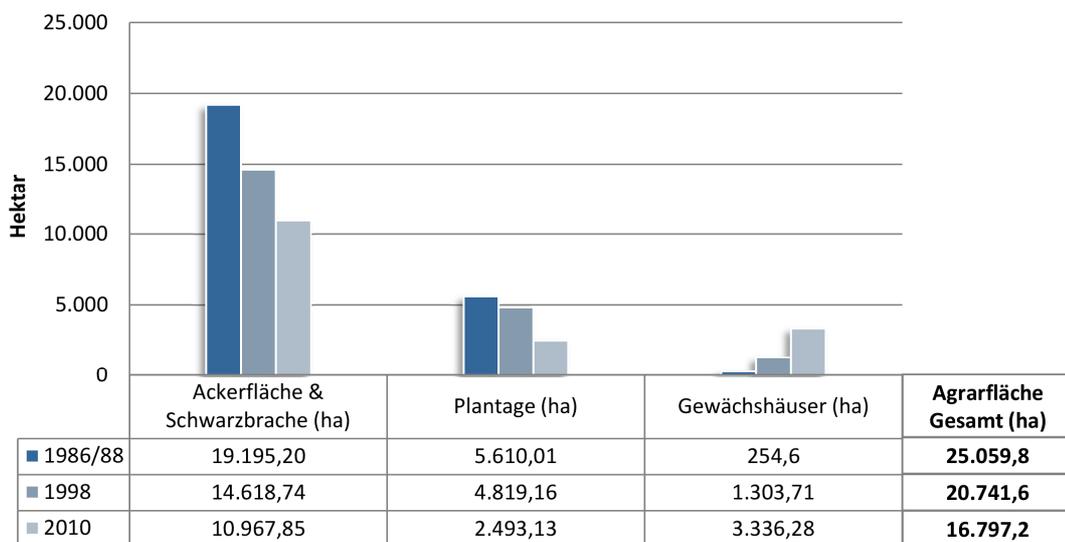


Abb. 35: Entwicklung der agrarischen Landnutzungsklassen zwischen 1986/88 und 2010 (Quelle: Eigene Darstellung)

Seit 1986/88 haben sich die landwirtschaftlichen Anbauflächen somit um ca. ein Drittel verringert. Zur Lokalisierung dieser enormen Flächenveränderungen im Untersuchungsgebiet muss nun eine räumlich explizite Change Detection-Analyse auf Basis eines Post-Klassifikations-Vergleiches durchgeführt werden.

Der klassische Post Classification Comparison (PCC) basiert im Allgemeinen auf dem pixel- oder objektbasierten Vergleich bi-temporalen Datensätze. Die daraus resultierende Veränderungsmatrix in Form eines thematischen Layers zeigt auf, wo klassenspezifische, räumliche Veränderungen zwischen Untersuchungszeitpunkt t_1 und t_2 stattgefunden haben (CAMPBELL 2006, S. 578). Die alleinige Berechnung solcher „from-to“-Informationen bietet jedoch keine Möglichkeit, räumlich unterschiedliche Veränderungsintensitäten im Untersuchungsgebiet quantitativ zu detektieren. Dies ist jedoch zur Erfassung von möglichen Hot Spots landwirtschaftlicher Flächenveränderung unabdingbar. Aussagen über die Veränderungshistorie, insbesondere inwieweit die Agrarveränderungen kontinuierlich oder eher dynamisch verlaufen sind, können bei dieser Art von bi-temporalen Vergleich der Landnutzungs-klassifikationen zudem nicht getroffen werden.

¹⁴ Die beiden Objektklassen Ackerflächen und Schwarzbrache werden in den folgenden Analysen zusammengefasst, da Veränderungen zwischen diesen beiden Klassen einzig aufgrund von saisonal unterschiedlichen Bedingungen während der Satellitenbilddaufnahmen entstanden sind (vgl. Kapitel 3.2.3).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher ein PCC-Algorithmus entwickelt, der eine quantitative Erfassung der räumlichen Agrardynamiken im Hinblick auf die genannten Teilaspekte landwirtschaftlicher Veränderung berücksichtigt und sowohl bi- als auch tri-temporale Auswertungstechniken in z.T. hierarchisch abhängigen Analyseebenen beinhaltet (vgl. Abb. 36).

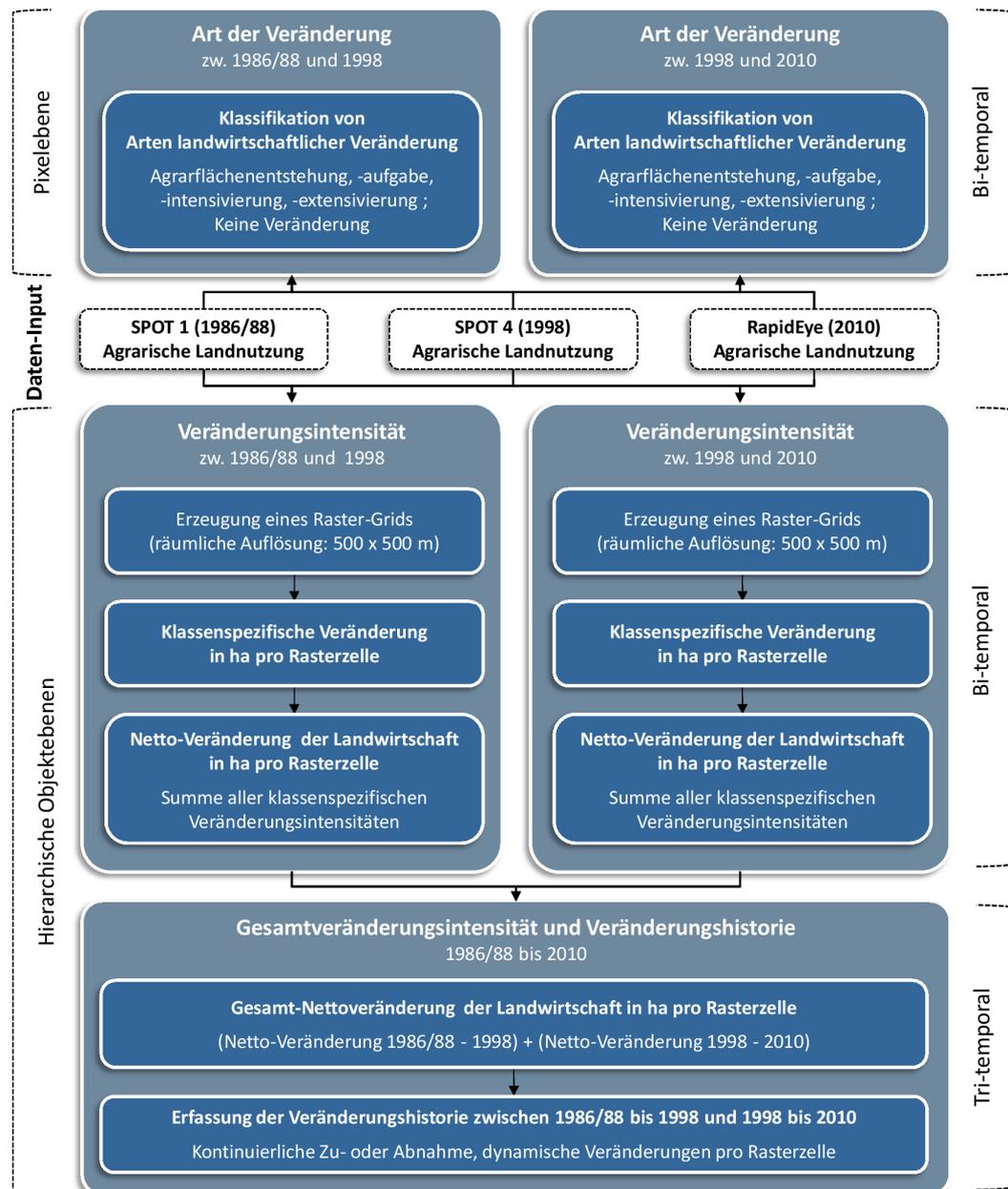


Abb. 36: Ablaufschema der multitemporalen Change Detection-Analyse zur Erfassung von agrarischen Landnutzungs-dynamiken auf Teneriffa (Quelle: Eigene Darstellung)

Der mittels CNL (Cognition Network Language) implementierte Algorithmus gründet auf zwei voneinander unabhängigen Verfahren. Zunächst werden alle zwischen den Landnutzungstypen möglichen „from-to“-Kombinationen in verschiedene „Arten landwirtschaftlicher Veränderung“ klassifiziert. Hierdurch kann die Umnutzung, Aufgabe oder das Entstehen neuer Agrarflächen pixelgenau lokalisiert und entsprechende Gesamt-Flächenbilanzen zwischen 1986/88 bis 1998 und 1998 bis 2010 berechnet werden. Das bisher auf Pixelebene ablaufende Verfahren wird anschließend um einen objektbasierten Analyseprozess erweitert. Dieser basiert grundlegend auf einer Chessboard-Segmen-

tierung des Untersuchungsraumes, aus dem ein Rastergrid beliebiger räumlicher Auflösung hervorgeht. Pro Rasterzelle können nun sowohl klassenspezifische Veränderungsintensitäten als auch die Gesamt-Netto-Veränderungen der Landwirtschaft zwischen 1986/88 und 1998 sowie zwischen 1998 und 2010 räumlich explizit erfasst werden. Letztgenannte finden schließlich Eingang in die Berechnung der „Gesamt-Nettoveränderung zwischen 1986/88 und 2010“. Während dieses Rechenschrittes findet zudem eine Untersuchung der „multitemporalen Veränderungshistorie“ statt, d.h. die Rasterzellen werden im Hinblick auf ihre Veränderungskontinuität bzw. -dynamik klassifiziert. 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. Findet beispielsweise eine Zunahme zwischen 1986/88 und 1998 sowie eine Abnahme zwischen 1998 und 2010 statt, wird die Rasterzelle stattdessen als „Dynamisches Veränderungsgebiet (Tendenz Flächenabnahme)“ charakterisiert.

Die im vorliegenden Fall speziell für landwirtschaftliche Veränderungen auf Teneriffa entwickelte Change Detection-Technik verläuft nach einer Festlegung der zu untersuchenden Landnutzungsclassen und einer Einteilung der jeweiligen Veränderungsklassen zu spezifisch gewünschten Arten von Veränderung automatisiert. Das Verfahren ist daher leicht auf andere klassifizierte Datensätze übertragbar. Die Rasterzellengröße kann dabei in Abhängigkeit zur räumlichen Auflösung der Daten sowie zur Größe des Untersuchungsgebietes spezifisch angepasst werden.

Im Folgenden werden die landwirtschaftlichen Flächendynamiken Teneriffas detailliert analysiert. Hauptaugenmerk liegt dabei insbesondere auf einer Bilanzierung der verschiedenen Veränderungsarten, der Auswertung klassenspezifischer Veränderungsintensitäten sowie der Gesamtveränderungsintensität in Kombination mit der Veränderungshistorie. Aufgrund des Auftretens von Wolken in den verschiedenen Klassifikationen werden für die Veränderungsanalysen wie auch für allen weiteren Schritte der vorliegenden Arbeit nur jene Bereiche der Klassifikationen untersucht, die in allen Zeitabschnitten wolkenfrei sind.

3.4.1 Detektion von agrarischen Flächenveränderungen auf Pixelebene und Bilanzierung der agrarischen Hauptveränderungsarten im Zeitraum 1986/88 bis 1998 und 1998 bis 2010

Die erste Analyseebene des oben beschriebenen PCC-Algorithmus, die Detektion von agrarischen Flächenveränderungen auf Pixelebene, basiert auf einer sinnvollen Einteilung der klassenspezifischen Veränderungen in vier verschiedene Arten des agrarischen Landnutzungswandels. „Landwirtschaftliche Flächenstilllegungen“ berücksichtigen jene Klassen, die zu Zeitpunkt t_1 unter landwirtschaftlicher Nutzung standen, jedoch zu Zeitpunkt t_2 nicht mehr als solche klassifiziert werden konnten. Umgekehrt verhält es sich mit der „Neu-Entstehung von Agrarflächen“. Innerhalb dieses Veränderungstyps werden alle neu entstandenen agrarischen Landnutzungsclassen zwischen t_1 und t_2 zusammengefasst. Unter „landwirtschaftlicher Intensivierung“ werden jene Veränderungen verstanden, bei denen eine mögliche Steigerung des Flächenertrags im betreffenden Areal angenommen werden kann. Hierzu zählen beispielsweise Veränderungen der Klasse Ackerfläche zu Plantage oder Gewächshäuser sowie Plantagen zu Gewächshäuser. Im Gegensatz dazu bezieht der Veränderungstyp „Extensivierung“ alle Landnutzungsveränderungen mit ein, die voraussichtlich zu einer Verringerung des Flächenertrages führen, beispielsweise die Transformation einer Plantagenfläche zur Klasse Ackerflächen. Tab. 6 fasst die definierten Arten landwirtschaftlicher Veränderung sowie die zur Einteilung verwendeten Veränderungsklassen zusammen.

Art der Veränderung	Veränderungsklassen (Klasse t_1 → Klasse t_2)	Erläuterung
Neuentstehung	Keine Landwirtschaft → Landwirtschaft	Agrarflächen-Neuentstehung auf ehemals ungenutzten Arealen
Stilllegung	Landwirtschaft → Keine Landwirtschaft	Stilllegung von Agrarflächen
Intensivierung	Ackerfläche → Plantagen oder Gewächshäuser Schwarzbrache → Plantage oder Gewächshäuser Plantage → Gewächshäuser	Flächenertrag der bisherigen Landnutzung kann durch neue Nutzung gesteigert werden
Extensivierung	Plantage oder Gewächshäuser → Ackerfläche Plantage oder Gewächshäuser → Schwarzbrache Gewächshäuser → Plantage	Flächenertrag der bisherigen Landnutzung wird durch neue Nutzung voraussichtlich verringert
Keine Veränderung	Ackerfläche → Ackerfläche oder Schwarzbrache* Schwarzbrache → Schwarzbrache oder Ackerfläche* Plantage → Plantage Gewächshäuser → Gewächshäuser	Es findet keine Veränderung zwischen Zeitpunkt t_1 und t_2 statt
* Die auf Saisonalität zurückzuführenden Unterschiede zwischen der Landnutzung Schwarzbrache und Ackerfläche werden nicht als Veränderung detektiert.		

Tab. 6: Einteilung und Erläuterung der im Rahmen der Change Detection-Analyse definierten Arten landwirtschaftlicher Veränderung (Quelle: Eigene Darstellung)

Die ermittelten Veränderungen zwischen 1986/88 bis 1998 sowie zwischen 1998 und 2010 können nun anhand von thematischen Karten visuell dargestellt werden. Durch diese Veränderungskarten wird im Gegensatz zu denen der Landnutzungsklassifikation direkt ersichtlich, wo und wie landwirtschaftliche Veränderungsprozesse im Untersuchungsgebiet stattgefunden haben (vgl. Abb. 37). Die zusätzliche statistische Erfassung der landwirtschaftlichen Prozesse anhand einer Veränderungsbilanz zeigt zudem auf, wodurch der agrarische Wandel dominiert wird (vgl. Abb. 38).

Die Neu-Entstehung von Flächen weist mit annähernd 5.000 ha zwischen 1986/88 und 1998 sowie zwischen 1998 und 2010 ähnliche hohe Raten auf. Die Stilllegung von landwirtschaftlichen Nutzflächen ist mit Beträgen um 9.000 ha zwischen beiden Zeiträumen ebenso annähernd identisch. Bei weiterer Untersuchung der Veränderungsbilanz ist jedoch auffällig, dass der Intensivierungsprozess zwischen 1986/88 und 1998 deutlich stärker verlaufen ist als im zweiten Untersuchungszeitraum. Dies ist unter Berücksichtigung der klassenspezifischen Veränderungen (vgl. Abb. 35) überraschend: Bis 1998 fällt die Zunahme von Gewächshäusern mit etwa 1.050 ha fast um die Hälfte geringer aus als zwischen 1998 und 2010. Die Intensivierungsrate von 1.746 ha kann demnach nur zu etwa 60% durch die Anlage von Gewächshäusern abdeckt werden. Somit müssen die restlichen 40% in diesem Zeitraum maßgeblich mit der Umnutzung von Ackerflächen als Plantagen zusammenhängen – trotz eines allgemeinen Rückgangs dieser Landnutzungs-klasse. Währenddessen kann die Intensivierungsrate zwischen 1998 und 2010 vollständig durch das Aufkommen von Gewächshäusern erklärt werden. Dies wird aufgrund des extremen Rückgangs der Plantagen in diesem Zeitraum weiter untermauert. Die Extensivierung von Flächen bis 1998 liegt des Weiteren bei etwa 700 ha und steigt bis 2010 auf ca. 1.000 ha an. Sie bezieht sich vornehmlich auf ehemalige Plantagenflächen, die nun in Form eines nicht-monokulturellen Ackerbaus betrieben werden.

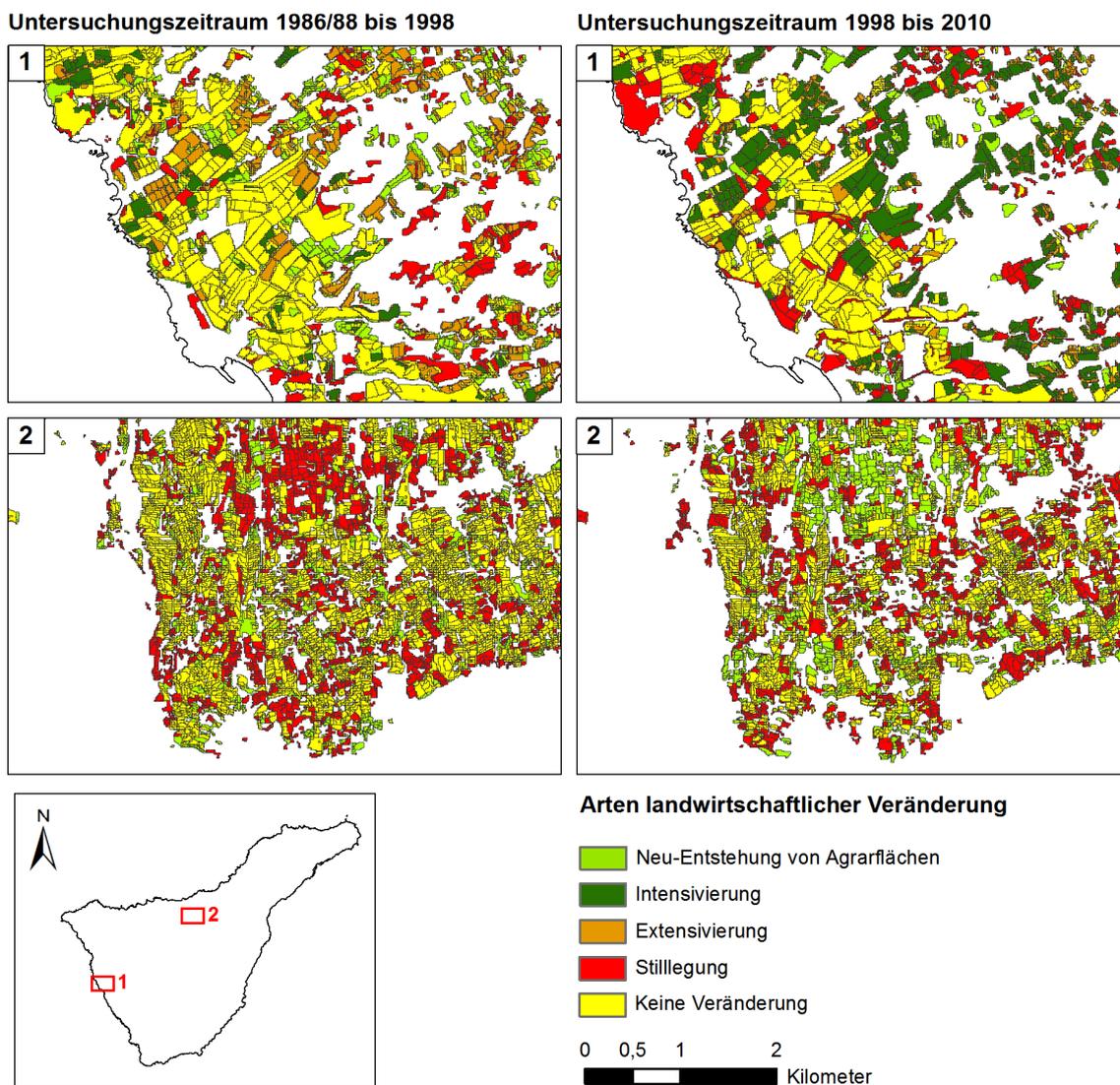


Abb. 37: Exemplarische Darstellung der agrarischen Veränderungsprozesse im Untersuchungsgebiet (Arten landwirtschaftlicher Veränderung) (Quelle: Eigene Darstellung)

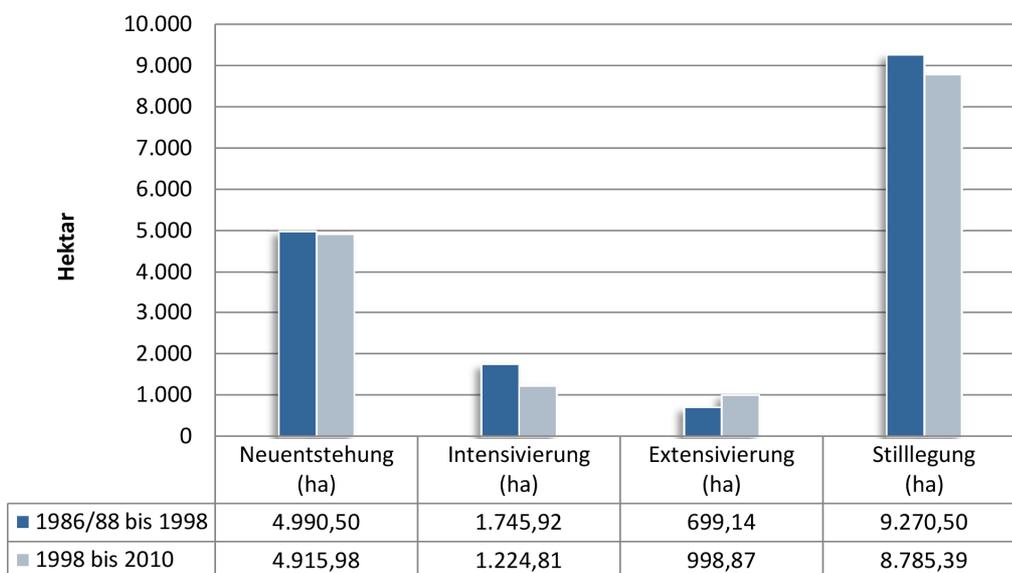


Abb. 38: Veränderungsbilanz der agrarischen Landnutzung zwischen 1986/88 und 2010 (Quelle: Eigene Darstellung)

3.4.2 Erfassung klassenspezifischer Veränderungsintensitäten im Untersuchungsgebiet zwischen 1986/88 und 1998 sowie zwischen 1998 und 2010

Grundlage zur Berechnung von klassenspezifischen Veränderungsintensitäten bildet die Erzeugung eines Rastergrids mit einer den Input-Daten übergeordneten Zellgröße. Innerhalb jeder Rasterzelle kann die Veränderung dieser Input-Daten während eines spezifischen Untersuchungszeitraums berechnet werden, indem die Fläche des älteren thematischen Datensatzes $Area(t_1)$ von der Fläche des aktuelleren Datensatzes $Area(t_2)$ subtrahiert wird ($Area(t_2) - Area(t_1)$). Je nachdem, ob die Informationen zur Veränderungsintensität als absoluter oder relativer Wert dargestellt werden sollen, muss das Resultat zusätzlich mit der Maximalausdehnung der Rasterzelle in Beziehung gesetzt werden. Vorteile dieser Art von Change Detection sind zum einen eine sehr schnelle visuelle Erfassung von räumlichen Flächenveränderungen – in Abhängigkeit zur gewählten Rasterzellengröße auf lokaler bis regionaler Ebene. Zum anderen können überregional zusammenhängende Veränderungsprozesse zwischen den Objektklassen detektiert werden, die auf Pixelebene nicht unmittelbar sichtbar sind.

Die Erfassung klassenspezifischer Veränderungsintensitäten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung basiert auf einer räumlichen Auflösung des Rastergrids von 500 x 500 m. Die jeweiligen Resultate für den Untersuchungszeitraum 1986/88 bis 1998 sowie 1998 bis 2010 sind in Abb. 39 dargestellt.

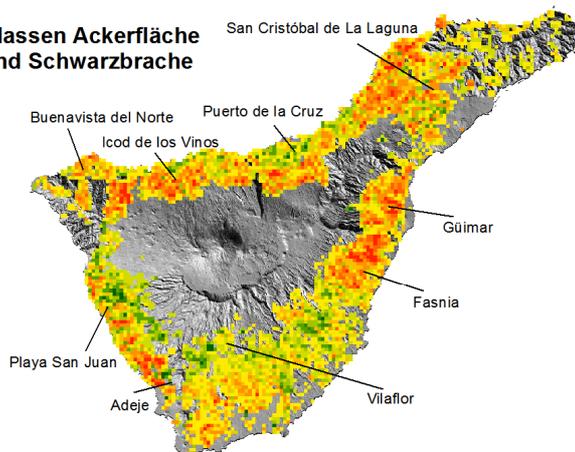
Bei Betrachtung der Analyseergebnisse wird deutlich, dass die während der Flächenbilanzierung ermittelten enormen Flächeneinbußen von Ackerflächen und Schwarzbrache (vgl. Abb. 35) zwischen 1986/88 und 1998 vor allem drei Regionen betreffen. So sind insbesondere die Anbauflächen um Güimar und Fasnía im Südosten der Insel, die Region nördlich von La Laguna sowie die montan gelegenen Regionen zwischen Puerto de La Cruz und Buenavista del Norte durch diese Entwicklung gekennzeichnet. Flächenzuwächse finden sich dagegen in den ariden Regionen zwischen Fasnía und Vilaflor sowie in den höher gelegenen Regionen des gesamten Südwestens. Gleichzeitig ist erkennbar, dass neue Plantagenflächen zum einen küstennah, zum anderen vornehmlich in ehemals durch die Klasse Ackerfläche und Schwarzbrache geprägten Arealen auftreten, beispielsweise entlang der Küstenlinie von Playa San Juan, Buenavista del Norte und Güimar. Somit kann verifiziert werden, dass die Intensivierungsprozesse zwischen 1986/88 und 1998 neben der vereinzelt Neuentstehung von Gewächshäusern stark durch Flächenumnutzungen von Ackerflächen zu Plantagen geprägt sind. Bestehende Plantagen werden dagegen oftmals durch neue Gewächshäuser ersetzt, beispielsweise im äußersten Süden der Insel und nordwestlich von La Laguna.

Zwischen 1998 und 2010 vergrößern sich die durch Flächenrückgänge und -stilllegungen geprägten Areale der Ackerflächen und Schwarzbrachen insbesondere im Südwesten der Insel. Dabei sind vor allem die höher gelegenen Regionen an der Randzone des landwirtschaftlichen Anbaugürtels betroffen. Küstennahe Areale, besonders entlang des gesamten ariden Südens, dienen auch in diesem Zeitraum zur weiteren räumlichen Ausdehnung der Intensivlandwirtschaft in Form von Gewächshäusern. Flächenzuwächse der Klasse Ackerfläche und Schwarzbrachen lassen sich durch Extensivierungsprozesse von Plantagenflächen erklären. Dies gilt insbesondere für die Region um Güimar und ein nördlich von La Laguna gelegenes Anbaugelände. Diese Konversionen der Plantagen zu Ackerflächen sind allerdings ebenso entlang des nördlichen Küstenbereiches sowie im Süden Teneriffas zu verzeichnen.

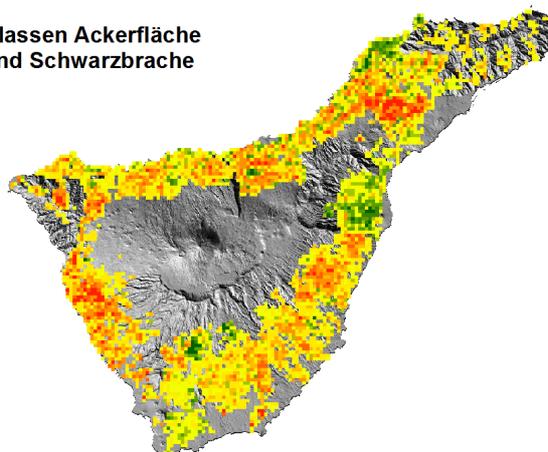
Untersuchungszeitraum 1986/88 bis 1998

Untersuchungszeitraum 1998 bis 2010

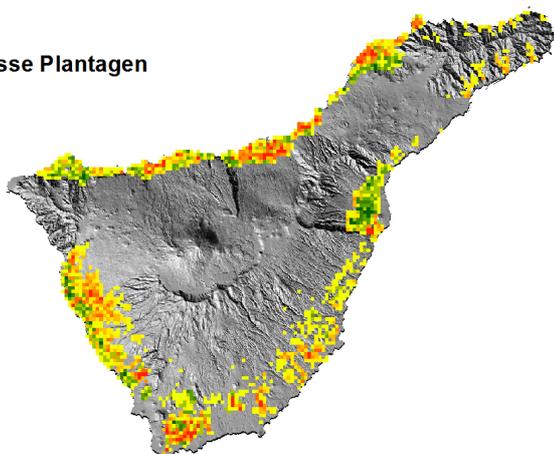
Klassen Ackerfläche und Schwarzbrache



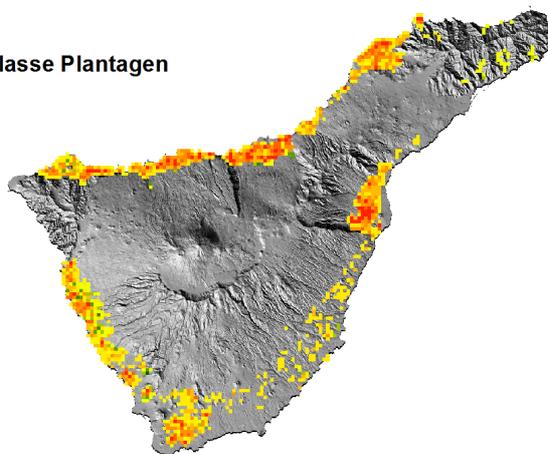
Klassen Ackerfläche und Schwarzbrache



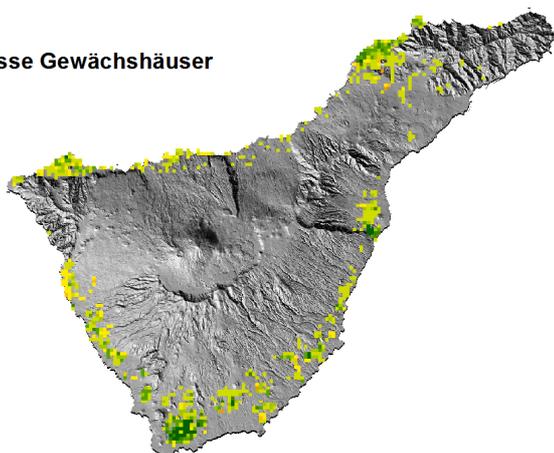
Klasse Plantagen



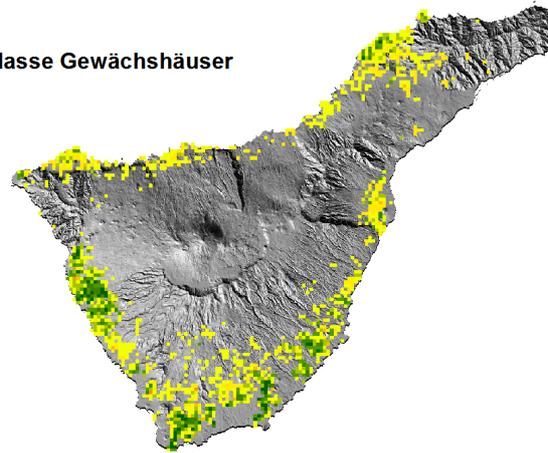
Klasse Plantagen



Klasse Gewächshäuser



Klasse Gewächshäuser



Klassenspezifische Veränderung in ha pro Rasterzelle
(Rasterzellengröße: 500 x 500 m; entspricht einer Maximalgröße von 25 ha)



Abb. 39: Klassenspezifische Veränderung in ha pro Rasterzelle für die Untersuchungszeiträume 1986/88 bis 1998 und 1998 bis 2010 (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canaria S.A. GRAFCAN)

Insgesamt wird ersichtlich, dass die landwirtschaftliche Flächendynamik zwischen 1986/88 und 1998 durch enorme Flächenstilllegungen innerhalb der Klasse Ackerflächen bei einer gleichzeitig schrittweisen Intensivierung bestehender Areale geprägt ist. So werden küstennahe Ackerflächen durch Plantagen ersetzt, während diese andernorts Raum für neue Gewächshäuser stellen. Flächenneuentstehungen in Form von Gewächshäusern sind dagegen selten.

Die landwirtschaftlichen Veränderungen zwischen 1998 und 2010 zeigen einen dramatischen Rückgang der Plantagenflächen. Diese werden teilweise extensiviert, durch Gewächshäuser ersetzt und insbesondere im Norden der Insel großflächig stillgelegt. Auf Plantagenwirtschaft ausgelegte Intensivierungsprozesse sind im Gegensatz zum Zeitraum 1986/88 bis 1998 selten. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Tatsache, dass viele Gewächshäuser auf zuvor landwirtschaftlich ungenutztem Land entstehen und somit als Flächenneuentstehungen gelten, kann hierdurch die verminderte Intensivierungsrate zwischen 1998 und 2010 trotz eines starken Anstiegs von Gewächshäusern erklärt werden.

3.4.3 Erfassung der landwirtschaftlichen Gesamtveränderung zwischen 1986/88 und 2010 unter Berücksichtigung der Veränderungshistorie

Die erläuterten Veränderungsintensitäten werden nun in einer weiteren Hierarchieebene innerhalb des PCC-Algorithmus zusammengeführt. Durch die Addition der jeweiligen klassenspezifischen Flächenveränderungen auf Rasterebene entstehen so zunächst zwei neue thematische Veränderungskarten: 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. Der Zwischenschritt, der zur Berechnung dieses finalen Ergebnisses führt, ermöglicht die zusätzliche Untersuchung der Veränderungshistorie. Wie bereits in Kapitel 3.4 erläutert, werden dabei die landwirtschaftlichen Veränderungen auf Rasterebene hinsichtlich ihrer Veränderungsdynamik bzw. -kontinuität eruiert. Folgende Differenzierungen können getroffen werden:

- Kontinuierliche Flächenzunahme innerhalb der Rasterzelle
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 > 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 > 0 ha)
- Kontinuierliche Flächenabnahme innerhalb der Rasterzelle
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 < 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 < 0 ha)
- Dynamisches Veränderungsgebiet (Aktuelle Tendenz Flächenzunahme)
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 < 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 > 0 ha)
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 = 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 > 0 ha)
- Dynamisches Veränderungsgebiet (Aktuelle Tendenz Flächenabnahme)
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 > 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 < 0 ha)
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 = 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 < 0 ha)
- Dynamisches Veränderungsgebiet (Flächenzunahme mit aktueller Tendenz Stagnation)
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 > 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 = 0 ha)
- Dynamisches Veränderungsgebiet (Flächenabnahme mit aktueller Tendenz Stagnation)
(Netto Veränderung 1986/99 bis 1998 < 0 ha; Netto Veränderung 1998 bis 2010 = 0 ha)

Die Darstellung des landwirtschaftlichen Wandels in Form einer Gesamt-Nettoveränderungskarte unter Berücksichtigung der Veränderungshistorie ermöglicht eine umfassende Detektion von Hot Spot-Gebieten landwirtschaftlicher Veränderung. Diese können sowohl hinsichtlich ihrer Intensität als auch hinsichtlich ihrer Kontinuität simultan überprüft werden. Abb. 40 zeigt die Gesamt-Nettoveränderung der Landwirtschaft zwischen 1986/88 und 2010 unter Einbezug der durch Kontinuität charakterisierten Veränderungsflächen.

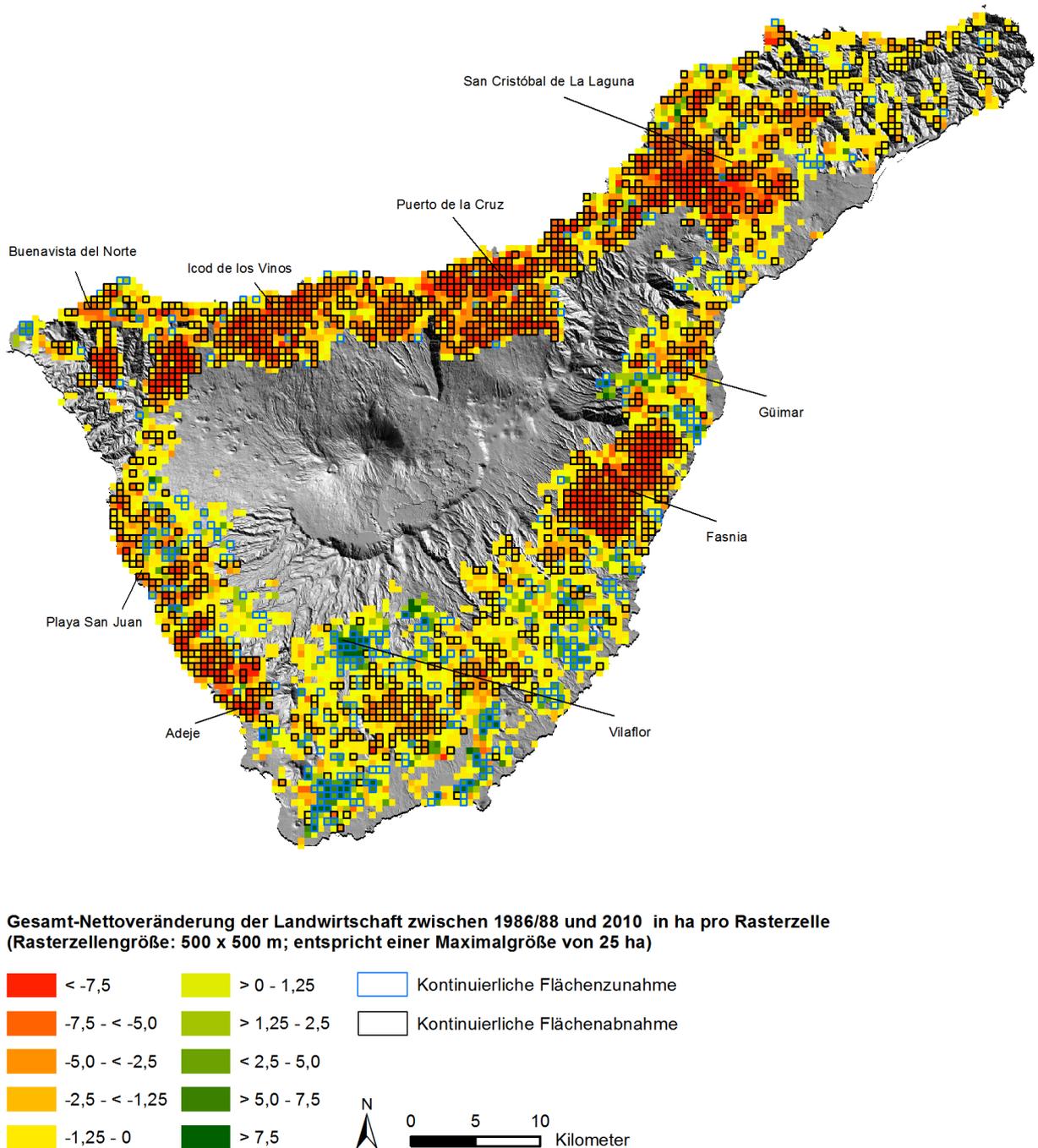


Abb. 40: Gesamt-Nettoveränderung der Landwirtschaft unter Berücksichtigung von Flächen kontinuierlicher Veränderung zwischen 1986/88 und 2010 (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Die thematische Karte zeigt das enorme Ausmaß der landwirtschaftlichen Veränderungen im Untersuchungsgebiet. Zahlreiche, großflächig zusammenhängende Areale insbesondere im humiden Norden sind durch kontinuierliche Flächenstilllegungen gekennzeichnet. Dabei weisen vor allem die montanen Regionen im südlich von Buenavista del Norte gelegenen Teno-Massiv mit Flächenverlusten von zum Teil über 15 ha pro Rasterzelle die höchsten Werte auf. Weitere Hot Spots lassen sich in der Region um Puerto de La Cruz, an den südlich von Puerto de la Cruz gelegenen Berghängen des Orotava-Tals sowie rund um La Laguna verorten. Im Südosten Teneriffas konzentrieren sich die Verluste von landwirtschaftlichen Nutzflächen auf das traditionelle Obst- und Gemüseanbaugebiet Fasnía. Durch einen kontinuierlichen Rückgang der Anbauflächen werden hier Einbußen von vereinzelt über 12,5 ha pro Rasterzelle erreicht. Der Südwesten als touristisches Haupt-Ballungsgebiet Teneriffas zeigt dagegen zwar kontinuierliche, insgesamt betrachtet jedoch deutlich geringere Arealverluste. Als Gründe hierfür sind vor allem die oben beschriebenen Flächenintensivierungen in Form von Gewächshäusern zu nennen. Hohe Hektarrückgänge zeichnen sich in dieser Region dagegen einzig um Adeje ab. Hier werden zahlreiche küstennahe Areale infolge des Tourismusbooms zu Siedlungsarealen umgewandelt.

Der detektierten negativen Flächenentwicklung stehen vereinzelte Hot Spots kontinuierlicher landwirtschaftlicher Flächenzunahme, hauptsächlich im Süden des Untersuchungsraums, gegenüber. Während dieser Trend in den südlichen Küstengebieten auf die Neuentstehung von Gewächshäusern zurückzuführen ist, hängen die Flächenzunahmen in montanen Arealen wie beispielsweise in Vilaflor mit der verstärkten Anlegung von Rebflächen für die Weinproduktion zusammen. Aufgrund einer steigenden Nachfrage durch den Tourismus erlebt dieser Agrarsektor in den letzten Jahren eine Renaissance (vgl. Kap. 2.2.1) (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 132 f.; GOBIERNO DE CANARIAS 2013c, S. 143).

Die multitemporale Change Detection-Analyse zeigt auf, wie divers und vielschichtig die landwirtschaftlichen Veränderungen zwischen 1986/88 und 2010 verlaufen sind. Es wird deutlich, dass sich die rezente landwirtschaftliche Entwicklung insbesondere durch eine Intensivierung der Landwirtschaft sowie einen klaren Trend zu Flächenstilllegungen in spezifischen Agrarregionen der Insel auszeichnet. Die Agrarentwicklung Teneriffas reicht jedoch weitaus länger in die Geschichte zurück als die vorgestellte Analyse abdeckt (vgl. Kap. 2.2.1). Vor-Ort-Untersuchungen weisen auf ein deutlich größeres räumliches Ausmaß landwirtschaftlicher Inwertsetzung hin, als es durch die bisher vorgestellten Analysen erfasst wurde. Welchen Anteil die heutige Agrarfläche an der tatsächlichen landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets besitzt, wird daher im folgenden Kapitel analysiert.

3.5 Texturbasierte Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche im Untersuchungsgebiet anhand hochauflösender Orthophotos

Die bisherigen Analysen im Rahmen der Landnutzungs-klassifikationen und Change Detection-Analyse beschränken sich ausschließlich auf die Erfassung rezent genutzter Agrarflächen im Untersuchungsgebiet seit 1986/88. Vor-Ort-Untersuchungen und Auswertungen alter Luftbildaufnahmen zeigen jedoch, dass neben den detektierten Gebieten zahlreiche weitere Flächen für landwirtschaftliche Zwecke genutzt worden sind – deren aktive Nutzung reicht jedoch zum Teil schon mehrere Dekaden

vor 1986/88 zurück. Die für eine gesamtlandwirtschaftliche Betrachtung notwendige Detektion dieser ehemals genutzten Agrarflächen ist in den verwendeten Satellitenbilddaten nur schwerlich möglich, da natürliche Sukzessionsvorgänge je nach Dauer der Brachephase zu einer teilweisen oder vollständigen Wiederbesiedlung der Flächen durch umliegende Pflanzenformationen geführt haben. Unter alleiniger Verwendung spektraler Informationen können sie somit nicht mehr von der natürlichen, anthropogen unbeeinflussten Vegetationsbedeckung differenziert werden (GÜNTHERT et al. 2012, 853804-3; GÜNTHERT et al. 2011a, 818111-3). Solche Langzeitbrachflächen bzw. landwirtschaftlich stillgelegten Areale können oftmals nur noch durch Landschaftsrelikte, die auf ihre ehemalige agrarische Nutzung hinweisen, identifiziert werden. Hierzu zählen insbesondere Trockenmauern, die sich aufgrund der vorherrschenden orographischen und klimatischen Bedingungen über weite Teile des Untersuchungsgebiets erstrecken. Durch die Anlage der meist aus Basaltgestein bestehenden Mauern können steile Hänge im Sinne eines Terrassenfeldbaus urbar gemacht werden. Auf ebeneren Flächen dienen sie des Weiteren zum Schutz vor Bodenerosion bei Starkregenereignissen sowie zur Bewässerung (OTTO 2003, S. 59). Diese linearen Agrarstrukturen stellen somit ein klares Indiz für eine (ehemalige) landwirtschaftliche Nutzung im Untersuchungsraum dar.



Abb. 41: Landwirtschaftlich stillgelegte Terrassenlandschaften im Untersuchungsgebiet (Fotos: S. Günthert, 10/2011)

Bewirtschaftete Agrarflächen weisen darüber hinaus neben Trockenmauern zahlreiche weitere lineare Elemente auf. Hierzu zählen beispielsweise Ackerfurchen, Flur- und Feldgrenzen sowie lineare Pflanzmuster. Die Erfassung einer landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche, die sowohl alle rezenten landwirtschaftlich genutzten wie auch stillgelegten Areale im Untersuchungsgebiet repräsentiert, steht demnach in direkter Beziehung mit der Detektion von linearen landwirtschaftlichen Strukturen, sofern diese in den zur Analyse verwendeten Bilddaten erfasst werden können. Es muss daher ein Detektionsverfahren entwickelt werden, das statt spektralen Attributen einzig textuelle bzw. lineare Merkmale zur Erfassung von Agrarflächen berücksichtigt.

3.5.1 Texturbasierter Klassifikationsprozess zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche

Grundlage zur Detektion und Extraktion von linearen Agrarstrukturen bilden im Allgemeinen hochauflösende Fernerkundungsdaten, die verschiedenen Bildbearbeitungsverfahren wie beispielsweise Textur-Filtern (Kantendetektoren) oder Wavelet-Transformationen (vgl. TURKER & KOK 2013; vgl. ISHIDA et al. 2004; RYDBERG & BORGEFORS 2001; JI 1996) unterzogen werden. Ferner werden auch

objektorientierte Segmentierungstechniken zur Extraktion der linearen Muster verwendet. Diese gründen unter anderem auf der Analyse von Objekt-Formen (Shape Features), farblichen und textuellen Gradienten sowie der Kombination aus kanten- und regionsbasierten Segmentierungstechniken (vgl. CONRAD et al. 2010; TIWARI 2009; MUELLER et al. 2004). Die Berücksichtigung der daraus resultierenden Informationen in landwirtschaftlichen Untersuchungen dient dabei vor allem einem Ziel – der Erhöhung der Detailgenauigkeit infolge eines verbesserten räumlichen Differenzierungsgrades zwischen den jeweiligen Landnutzungseinheiten. So können durch die Integration von beispielsweise Parzelleninformationen in den Klassifikationsprozess präzisere Ergebnisse bei der Verteilung von Feldfrüchten bzw. Objektklassen erzielt oder Ertragsprognosen direkt auf Parzellenebene berechnet werden (vgl. CONRAD et al. 2010; ENCLONA et al. 2004).

Statt einer Steigerung der räumlichen Detailgenauigkeit landwirtschaftlicher Untersuchungen soll die Detektion linearer Agrarstrukturen in der folgenden Analyse vielmehr als Grundlage zur Erfassung von großflächigen Agrarregionen dienen. Die linearen Einheiten sind sozusagen als Agrarproxys aufzufassen, durch deren Auftreten eine Unterscheidung zwischen landwirtschaftlich beeinflussten und unbeeinflussten Arealen im Untersuchungsgebiet ermöglicht wird. Voraussetzung zur Erfassung der vorhandenen Landwirtschaftstrukturen ist eine ausreichend hohe räumliche Auflösung der zu analysierenden Fernerkundungsdaten. Dies ist bei den bisher verwendeten Satellitenbilddaten mit 5 x 5 m bzw. 10 x 10 m Pixelauflösung nicht gegeben. Hochauflösende RGB-Orthophotos des Untersuchungsgebiets bieten dagegen mit einer Auflösung von 40 x 40 cm eine sehr gute Alternative, da sich Terrassen und Trockenmauern selbst bei einer dichten Vegetationsdecke noch sehr gut identifizieren lassen.

Der speziell zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas entwickelte, texturbasierte Klassifikationsprozess dient daher der Auswertung von Orthophotos (vgl. Kap. 3.2.2). Er besteht aus der Kombination von insgesamt sechs verschiedenen, zum Teil bereits oben genannten Teilanalysen, die im Folgenden detailliert erörtert werden (vgl. Abb. 42) (vgl. GÜNTHERT et al. 2012; GÜNTHERT et al. 2011a).

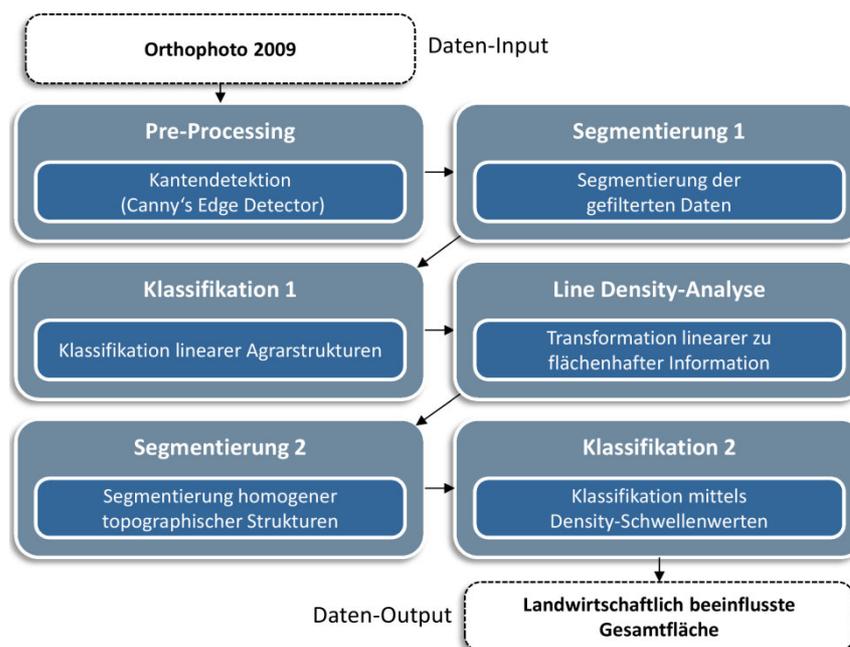


Abb. 42: Ablaufschema zur texturbasierten Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas (Quelle: Eigene Darstellung)

Das zur Analyse verwendete Orthophoto-Mosaik wird aufgrund seiner Datengröße in 11 Subsets aufgeteilt, die wiederum aus verschiedenen Teilszenen bestehen. Diese insgesamt 132 Szenen werden durch einen automatisierten Prozess zunächst separat voneinander ausgewertet. Nach Durchführung von Analyseschritt 3 (Klassifikation 1) werden die Teilszenenresultate innerhalb der einzelnen Subsets vereinigt und für die restliche Analyse herangezogen. Die Zusammenführung der 11 subset-spezifischen Ergebnisse findet nach Durchführung von Analyseschritt 6 statt.

3.5.1.1 Kantendetektion mittels Canny's Edge Detector

Die Grundidee des vorliegenden Klassifikationsalgorithmus, lineare landwirtschaftliche Strukturen als Agrarproxys zu verwenden, bedarf zunächst einem Pre-Processing der verwendeten Daten in Form einer Kantendetektion. Ziel dieser Art von Filterung ist es, lineare Elemente bzw. Kanten im Orthophoto als Grundlage für die folgenden Analyseprozesse hervorzuheben. Kanten können dabei als Grenzen zwischen verschiedenen Texturen angesehen werden. Sie stellen somit Diskontinuitäten in der Bildintensität von einem Pixel zum anderen dar (JUNEJA & SANDHU 2009, S. 614).

Zur Detektion von Kanten existiert eine Vielzahl an Algorithmen, die durch sehr unterschiedliche Charakteristiken hinsichtlich Kantenorientierung, Rauschumgebung und Kantenstruktur gekennzeichnet sind. Die jeweiligen Operatoren unterscheiden sich somit vor allem darin, in welcher Richtung – ob horizontal, diagonal oder vertikal – eine besonders hohe Sensitivität gegenüber Kanten besteht, inwieweit störende Rauscheffekte im Bild verringert werden und welche Wertebereiche der Pixel gerade bei sehr rauschintensiven Bildern tatsächlich als Kanten detektiert werden. Bekannte Verfahren sind in diesem Zusammenhang beispielsweise der Sobel Operator, Prewitt's Operator, Robert's Cross Operator oder der Laplacian of Gaussian (JUNEJA & SANDHU 2009, S. 614 ff.).

Ein weiterer, häufig zur Detektion von Agrarstrukturen aber auch zur Erfassung von urbanen und topographischen Mustern eingesetzter Operator ist der so genannte Canny Edge Detector (vgl. TURKER & KOK 2013; KARSLI & KAHYA 2012; LIU et al. 2010; LIU & JEZEK 2004; CANNY 1986). Aufgrund seiner hohen Performanz gegenüber den anderen genannten Techniken (KARSLI & KAHYA 2012, S. 16; JUNEJA & SANDHU 2009, S. 146) wird dieser in der vorliegenden Arbeit zur Erfassung linearer Agrarstrukturen verwendet.

Der Canny-Detektor besteht aus einer Verknüpfung verschiedener lokaler Operationen. Mittels eines Gauß-Filters wird zunächst eine Bildglättung durchgeführt, um durch Bildrauschen verursachte Störungen zu verringern. Zur Extraktion von horizontalen bzw. vertikalen Kanten wird das geglättete Bild anschließend durch einen Sobel-Operator in x- und y-Richtung gefaltet. Auf Grundlage der so erhaltenen x- und y-Kantenbilder kann schließlich die Stärke sowie Orientierung der Gradientenvektoren bestimmt werden. Letztgenannte kann 0° , 45° , 90° oder 135° betragen. Die eigentliche Kantendetektion erfolgt anhand des Vergleichs eines jeden Pixels mit seinen Nachbarpixeln entlang der durch die Orientierung vorgegebenen Richtung. Weist ein Pixel einen größeren Gradienten als seine Nachbarn – also ein lokales Maximum – auf, wird dieses als Kantenpixel detektiert. Pixel, die unterhalb dieses Maximums liegen, werden dagegen unterdrückt und erhalten den Grauwert 0. Dieser Prozess wird auch als Nonmaximum Suppression bezeichnet. Im Anschluss daran findet eine weitere Reduktion der verbleibenden Kantenpixel bzw. der Gradientenspannweite unter Verwendung eines Hysterese-Verfahrens statt. Dieses beruht auf zwei im Vorfeld der Prozedur definierten Schwellenwerten. Liegt der Gradient eines Kantenpixels unter dem ersten Schwellenwert (Low), wird es als solches verworfen und erhält ebenfalls den Wert 0. Befindet sich der Gradient über dem zweiten Schwellenwert (High), wird es weiter als Kantenpixel detektiert. Ist der Gradient hingegen

zwischen den beiden Schwellenwerten angesiedelt, wird das Pixel ebenfalls unterdrückt – es sei denn, es ist mit benachbarten Pixeln verbunden, die wiederum einen über dem Schwellenwert befindlichen Gradienten besitzen (TURKER & KOK 2013, S. 197 f.; JUNEJA & SANDHU 2009, S. 617 f.; STIENE 2006, S. 23 f.; CANNY 1986, S. 691).

Die Durchführung der Canny-Kantendetektion in den einzelnen Teilszenen erfolgt 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 ein ebenfalls 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 (vgl. Abb. 43, Bild 2).

3.5.1.2 Segmentierung der kantengefilterten Orthophotos und Klassifikation von linearen Agrarstrukturen

Auf Grundlage der kantengefilterten Fernerkundungsdaten wird nun eine Bildsegmentierung und anschließende Klassifikation von linearen Agrarstrukturen in den Teilszenen durchgeführt. Die so erfassten Daten stellen die Basis für die darauffolgende Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche.

Für die Multiresolution-Segmentierung wird ein niedriger Skalierungsparameter von 3 sowie Homogenitätskriterien von 0,1 sowohl für Shape als auch für Compactness gewählt. Zur anschließenden Erfassung der linearen Agrarobjekte werden weitere Input-Daten – ein digitales Geländemodell, eine Straßennetzkarte sowie die Flächen der Objektklasse Siedlungen und Gewerbe aus der LULC-Klassifikation 2010 – in den Klassifikationsprozess integriert (vgl. Kap. 3.2.1 und 3.3). Die Klassifikation der Kantensegmente zielt nun darauf ab, überwiegend gerade, lange und schmale Objekte zu erfassen. Hierzu dient ein Regelset aus folgenden Merkmalsattributen: Shape-Dichte, Segmentlänge, Segmentlänge/Segmentbreite, Hauptrichtung des Segments, Shape Index, Layer Value Mean Slope, Layer Value Mean DTM und Layer Value Standard Deviation DTM. Die beiden Attribute Shape-Dichte und Segmentlänge/Segmentbreite müssen dabei in Abhängigkeit zum Kiefernwald-Flächenanteil in der zu untersuchenden Bildszene spezifisch angepasst werden. Denn diese Waldbestände weisen eine teilweise sehr offene und insbesondere bei Pflanzungen lineare Struktur auf, wodurch es zu erhöhten Fehlklassifikationen kommen kann. Ist der relative Anteil der Wäldflächen in der Szene sehr groß, müssen die Merkmalsbereiche der beiden Attribute enger gefasst werden. Der Einbezug der Höhen-Standardabweichung gewährleistet, dass besonders in montanen Regionen nur hangparallele Segmente als Agrarstrukturen identifiziert werden (GÜNTHERT et al. 2011a, S. 81811-4). Darüber hinaus wird durch eine zusätzliche Regel definiert, dass alle Segmente unberücksichtigt bleiben, die sich innerhalb von Siedlungen/Gewerbe oder Straßen befinden. Hierdurch wird verhindert, dass weitere anthropogen bedingte Linearmuster wie Gebäudekomplexe und Verkehrswege klassifiziert werden.

Die aus dem Klassifikationsprozess resultierende Objektklasse „Lineare Agrarstrukturen“ beinhaltet neben den gewünschten Strukturen einen minimalen Anteil an nichtagrarischen Strukturen (vgl. Abb. 43, Bild 3). Diese treten jedoch im Gegensatz zu denen der Landwirtschaftsareale räumlich sehr unregelmäßig auf und können daher vernachlässigt werden, was anhand der beiden folgenden Analyseschritte ersichtlich wird.

3.5.1.3 Transformation linearer zu flächenhafter Information anhand einer Line Density-Analyse

Die in Form von linearen Vektordaten extrahierten Agrarstrukturen geben Aufschluss darüber, wo eine landwirtschaftliche Beeinflussung des Raums vorliegt. Die Detektion von Agrararealen ist bislang jedoch nur indirekt durch das Überlagern der Orthophotos mit den erfassten Strukturen möglich. Die linienbasierten Informationen müssen demnach insofern modifiziert werden, als dass sie zur flächenhaften Erfassung und Abgrenzung von beeinflussten und nicht beeinflussten Arealen verwendbar sind. Dies wird durch eine Line Density-Analyse ermöglicht.

Die in ArcGIS 10 verfügbare Density-Analyse kann gewissermaßen als Datenglättungs-Technik bezeichnet werden, mit der entsprechende Punkte- oder Linien-Vektordaten mit Raumbezug in eine kontinuierliche Oberfläche transformiert werden können (KLOOG et al. 2009, S. 56). Dabei wird anhand der Input-Vektordaten ein Rasterdatensatz erzeugt, innerhalb dessen für jede Rasterzelle – in Abhängigkeit zur räumlichen Verteilung der Input-Daten – 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 Dichteeinheiten werden anschließend in die Maßeinheit m pro m^2 konvertiert. Befinden sich keine Linien in der Nachbarschaft einer Zelle, wird dieser der Wert „NoData“ zugewiesen (ESRI 2013).

Die zur Erzeugung des Dichte-Rasters durchgeführte Line Density-Analyse basiert auf einem Untersuchungsradius von 75 m und einer räumlichen Auflösung des Rasters von 5×5 m (vgl. Abb. 43, Bild 4). Die so entstandenen kontinuierlichen Flächeninformationen ermöglichen in den nächsten beiden Teilschritten eine Unterscheidung von landwirtschaftlich beeinflussten und unbeeinflussten Flächen.

3.5.1.4 Erneute Segmentierung der Orthophotos und Klassifikation der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche

Teilschritt 5 umfasst eine erneute Segmentierung der Orthophotos. Hierdurch werden homogene Landschaftsegmente geschaffen, die zur finalen Klassifikation von agrarisch beeinflussten Arealen herangezogen werden können. Grundlage zur Segmentierung stellen auch hier neben den originalen RGB-Orthophotos thematische Daten in Form der Straßennetzkarte und den Flächen der Objektklasse Siedlungen und Gewerbe aus der LULC-Klassifikation 2010. Der Einbezug der thematischen Informationen in diesen zweiten Segmentierungsprozess garantiert eine klare Abgrenzung zwischen infrastrukturellen und nicht-infrastrukturellen Objekten. Der zu definierende Scale-Parameter wird im Gegensatz zu Teilschritt 2 auf einen hohen Wert von 100 gesetzt, die Homogenitätskriterien wiederum auf einen Faktor von 0,3 für Shape und 0,9 für Compactness (vgl. Abb. 43, Bild 5).

Die erzeugten Landschaftsobjekte werden schließlich in Teilschritt 6 im Hinblick auf ihre landwirtschaftliche Beeinflussung klassifiziert. 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 $0,025 \text{ m/m}^2$ 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 jene Flächen mit sehr vereinzelt auftretenden, nichtagrarischen Linearstrukturen bzw. sehr geringen Dichtewerten von der Klassifikation der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche ausgeschlossen werden.

Nach Berechnung und einer anschließenden Vereinigung der elf subset-spezifischen Teilresultate liegt die landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche des kompletten Untersuchungsgebietes vor (vgl. Abb. 43, Bild 6). Zur Abschätzung der Klassifikationsgüte wird ein quantitatives sowie qualitatives Accuracy Assessment durchgeführt.

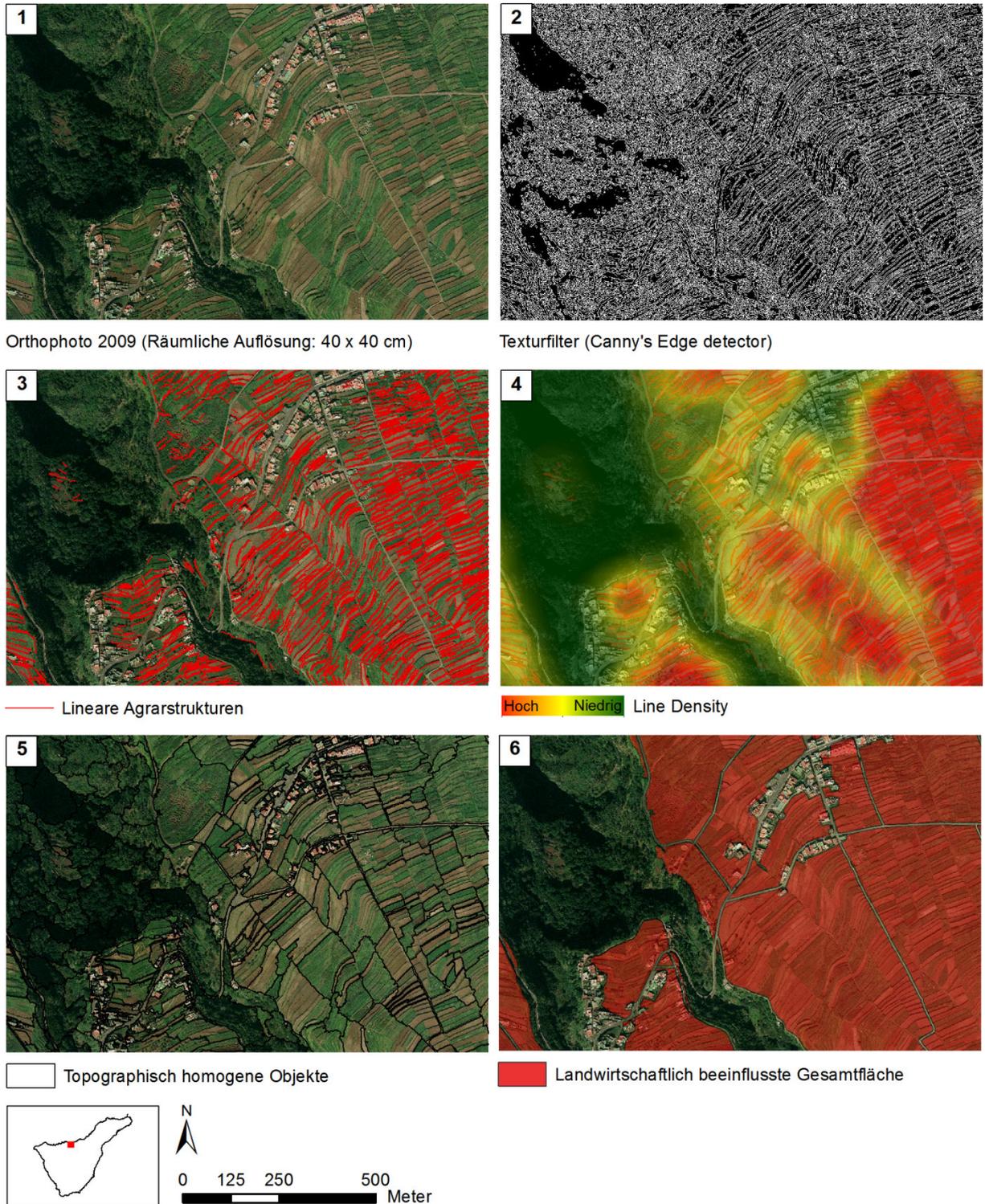


Abb. 43: Bearbeitungsschritte der texturbasierten Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche anhand des Orthophotos 2009 (Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Orthophoto: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

3.5.2 Klassifikationsgüte des texturbasierten Klassifikationsprozesses

Analog zum Accuracy Assessment der LULC- bzw. LU-Klassifikationen wird zur Ermittlung der Klassifikationsgenauigkeit des vorgestellten Verfahrens zunächst eine Error Matrix erstellt und die entsprechenden Gütekriterien Gesamtgenauigkeit, Nutzer- und Herstellergenauigkeit sowie Kappa-Koeffizient abgeleitet (vgl. Kap. 3.3.2). Die Objektklasse „Landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche“ wird dabei einer weiteren Objektklasse „Sonstige Flächen“ gegenübergestellt. Sie umfasst all jene Gebiete des Untersuchungsgebietes, die im Rahmen des vorliegenden Klassifikationsprozesses nicht als Agrarflächen detektiert wurden. Grundlage zur Erfassung der notwendigen Testpixel stellt auch hier das Verfahren der geschichteten Zufallsstichprobe. Anhand dieser Technik werden insgesamt 1.000 Referenzpunkte erhoben, die nach der jeweiligen Klassenstärke gewichtet werden (vgl. Tab. 7). Als Referenzdatensatz dient aufgrund fehlender bzw. nicht existenter Vergleichsdaten das hochauflösende Orthophoto 2009.

	LbG*	Sonstige Flächen	Nutzer-genauigkeit	Hersteller-genauigkeit
LbG*	365	67	84,5%	94,6%
Sonstige Flächen	21	547	96,3%	89,1%
Gesamtanzahl der Testpixel: 1000			Gesamtgenauigkeit: 91,2%	
Summe korrekt klassifizierter Pixel: 912			Gesamt-Kappa-Index: 0,818	

* LbG: Landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche

Tab. 7: Error-Matrix und daraus abgeleitete Genauigkeits-Indizes der klassifizierten landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Gesamtgenauigkeit der Klassifikation beträgt 91,2%. Die Nutzergenauigkeit als prozentuale Wahrscheinlichkeit, mit der ein klassifiziertes Pixel die landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche auch tatsächlich in der Realität repräsentiert, liegt bei einem Wert von annähernd 85%. Somit kann der Klassifikation nach Durchführung der quantitativen Genauigkeitsanalyse eine insgesamt überdurchschnittlich gute Klassifikationsgüte attestiert werden. Dies wird auch durch den Gesamt-Kappa-Wert, der mit 0,818 als sehr gut einzustufen ist, deutlich (vgl. GÜNTHERT et al. 2011a).

Ein Hauptproblem, das sich jedoch beim vorliegenden Accuracy Assessment ergibt, ist das Fehlen von Referenzdaten. Die Erfassung der Klassifikationsgenauigkeit fußt einzig auf der korrekten visuellen Erfassung von linearen Agrarstrukturen im Orthophoto und der daraus folgenden Zuordnung der Klassenwerte in den einzelnen Testpixeln. Dies ist trotz der sehr hohen räumlichen Auflösung der Daten in vereinzelt Fällen schwierig, da die linearen Strukturen beispielsweise aufgrund von Vegetationsbewuchs oder durch aufnahmebedingte Lichteffekte nicht immer eindeutig erkennbar sind. Aus diesem Grund wird eine zweite, qualitative Genauigkeitsanalyse der erhobenen Agrarflächen in Form einer Vor-Ort-Untersuchung benötigt.

Eine im Oktober 2011 durchgeführte Geländekampagne im Untersuchungsgebiet hatte daher neben verschiedenen geoökologischen Analysen zum Ziel, die als hoch eingestufte Klassifikationsgenauigkeit vor Ort zu überprüfen und verschiedene, möglicherweise fehlklassifizierte Areale hinsichtlich ihrer tatsächlichen Klassenzugehörigkeit erneut zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden insgesamt

120 Ground Control Points innerhalb der als landwirtschaftlich beeinflusst detektierten Areale aufgenommen und mit den Ergebnissen der Klassifikation überprüft (vgl. Abb. 77, Kap. 6.1).

Auch diese qualitative Untersuchung der Klassifikationsgüte unterstreicht die sehr hohe räumliche Detektionsgenauigkeit des Verfahrens selbst bei sehr alten und somit stark überwucherten Brachflächen. Die Vor-Ort-Überprüfung unklarer, im Vorfeld als Fehlklassifikation ausgewiesener Flächen insbesondere im Südwesten der Insel zeigt zudem eine klare landwirtschaftliche Beeinflussung in Form von Trockenmauern. Demnach ist die quantitativ ermittelte Klassifikationsgüte, wie sie in Tab. 7 dargestellt ist, als absolut repräsentativ einzustufen.

3.5.3 Flächenbilanzierung und räumliche Differenzierung zwischen rezent bewirtschafteten sowie stillgelegten Agrarflächen

Die Ergebnisse der texturbasierten Klassifikation hochauflösender Orthophotos zeigen ein enormes Ausmaß landwirtschaftlicher Inwertsetzung innerhalb des Untersuchungsgebiets. Mit einer landwirtschaftlich beeinflussten Fläche von insgesamt 601,6 km² im Jahr 2009 ist annähernd ein Drittel Teneriffas durch eine rezente oder historische Agrarnutzung geprägt^{15,16} (vgl. Abb. 44).

Eine Überlagerung der detektierten Areale mit der agrarischen Landnutzung von 2010 macht deutlich, dass jedoch nur etwa 170 km² dieser Fläche unter aktueller landwirtschaftlicher Nutzung stehen (vgl. Abb. 35). Der Großteil der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche beinhaltet demnach landwirtschaftlich stillgelegte Areale, die sich vornehmlich in den topographisch und klimatisch benachteiligten Regionen der Insel befinden. Hierzu zählen insbesondere montane, zum Teil schwer zugängliche Gebiete mit einem vergleichsweise hohen Gefälle – beispielsweise zwischen Buenavista del Norte und Icod de los Vinos im Nordwesten der Insel – sowie durch hohe Aridität geprägte Regionen im Süden. Qualitative Untersuchungen zur Sukzession auf Ackerbrachen in der Vegetationszone des Sukkulentenbuschs zeigen auf, dass solche ehemals kultivierten Flächen teilweise seit über 60 Jahren brachliegen können (OTTO 2003, S. 59 ff.). Dies kann durch historische Luftbildaufnahmen und eigene Vor-Ort-Untersuchungen im trockenen Süden der Insel sowie in den Bergregionen des Nordens verifiziert werden. So weisen zahlreiche Flächen einen sehr hohen Sukzessionsgrad durch Pflanzenvertreter umliegender Vegetationsformationen sowie teilweise stark verwitterte Trockenmauern auf (vgl. Kap. 6.1).

¹⁵ Im weiteren Verlauf der Arbeit wird deutlich, dass innerhalb des Untersuchungszeitraums 1986/88 bis 2010 einige landwirtschaftlich genutzte Areale v.a. in den Küstenbereichen tourismusbedingten Siedlungserweiterungen anheimgefallen sind (vgl. Kapitel 4.5.1). Diese von Siedlungsexpansionen betroffenen Flächen können in den Orthophotos von 2009 dementsprechend nicht als ehemals agrarisch genutzte Areale detektiert werden.

¹⁶ Die unter Wolken befindlichen landwirtschaftlich beeinflusste Areale sind hierbei nicht mit eingerechnet. Sie belaufen sich auf insgesamt 2.673 ha.

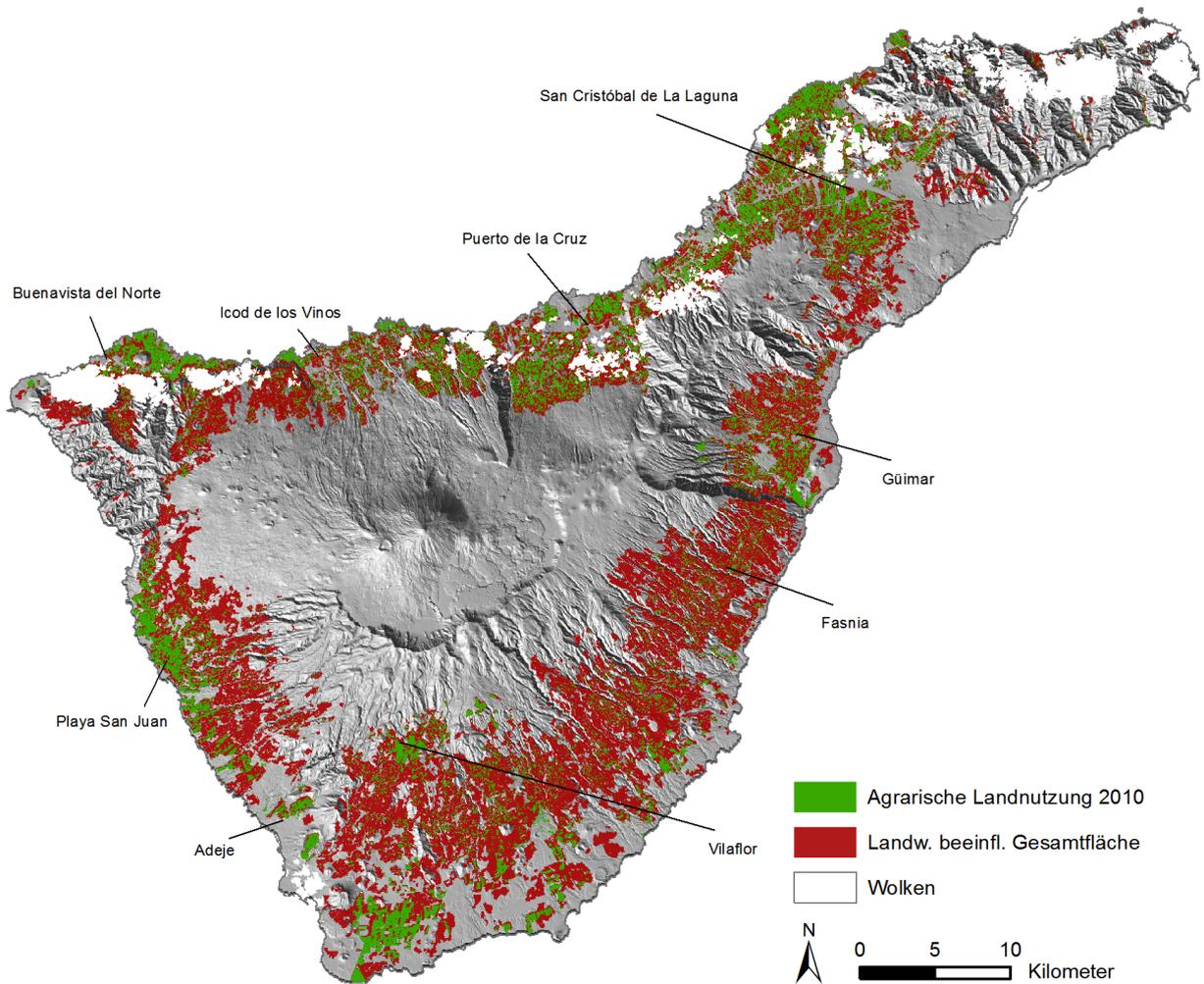


Abb. 44: Detektierte landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche (LbG) und agrarische Landnutzung 2010. (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

4 Räumlich explizite Modellierung agrarischer Landnutzungsdynamiken

Auf Grundlage der klassifizierten Fernerkundungsdaten wird im Folgenden ein räumlich explizites Landnutzungsmodell¹⁷ mittels Dyna-CLUE 2 (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2) implementiert, anhand dessen wichtige Erkenntnisse über die Determinanten der bisherigen landwirtschaftlichen Entwicklung im Untersuchungsgebiet erworben werden können. Hauptziel dieser Landnutzungsmodellierung ist jedoch die Prognostizierung zukünftiger agrarischer Landnutzungsdynamiken im Rahmen verschiedener Entwicklungsszenarien bis ins Jahr 2030.

Daher werden zunächst verschiedene aktuelle Theorien und Methoden der Landnutzungsmodellierung¹⁸ diskutiert. Anschließend wird das räumliche Simulationsmodell Dyna-CLUE 2 und dessen Parametrisierung, Kalibrierung sowie Validierung im Detail erläutert. Schließlich erfolgt die Entwicklung und Bewertung zweier potenzieller Szenarien agrarischer Landnutzungsdynamiken im Untersuchungsgebiet.

4.1 Aktuelle Theorien und Methoden der Landnutzungsmodellierung

Landnutzungsveränderungen sind komplexe dynamische Prozesse, die durch raum-zeitliche Interaktionen zwischen biophysikalischen und anthropogenen Faktoren beeinflusst und determiniert werden (VELDKAMP & FRESCO 1996, S. 254). Insbesondere bei Inselssystemen wie Teneriffa kann die Modifikation der Landoberfläche erhebliche Folgen nach sich ziehen, da durch den begrenzten Raum und die meist abgeschiedene Lage hoch sensitive Wechselwirkungen zwischen den Landschaftselementen bestehen. Ein Modell, nach PAEGELOW & CAMACHO-OLMEDO (2008, S. 15) definiert als „[...]a functional representation of reality able to help us in understanding its action or predicting its behaviour“, dient im Allgemeinen dazu, diese räumlichen Landnutzungsdynamiken und deren spezifische Kausalitäten zu analysieren und so das Zusammenspiel der verschiedenen biophysikalischen und sozioökonomischen Einflussfaktoren innerhalb eines Landnutzungssystems besser verstehen zu können. Zudem können unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien künftige Landnutzungsänderungen erforscht und als Grundlage für potenzielle raumplanerische Maßnahmen herangezogen werden (vgl. KOOMEN & STILLWELL 2007; VERBURG et al. 2004b).

Dabei können verschiedene Rahmenbedingungen wie makroökonomische Parameter oder sich während der Simulation ändernde, dynamische Variablen so verwendet werden, dass die verschiedenen Modelle in ihrem Ergebnis divergieren. Diese Ergebnisse beschreiben den jeweiligen potenziellen Rahmen an Möglichkeiten, der in Zukunft eintreten kann (PAEGELOW & CAMACHO-OLMEDO 2008, S. 11 f.). Die Modellierung kann demnach als eine wichtige Technik für die Vorhersage von alternativen Wegen in die Zukunft sowie für die Durchführung von Experimenten zur Erfassung und Quantifizierung des Verständnisses von Schlüsselprozessen angesehen werden. So bieten Landnutzungsmodelle die Möglichkeit, die Sensitivität von Landnutzungsmustern unter veränderten anthropoge-

¹⁷ Der Ausdruck „räumlich explizit“ bezieht sich auf die Repräsentation einer konkreten Land-Einheit durch eine Rasterzelle innerhalb eines gleichmäßigen Zellenrasters (GOETZKE 2010, S. 26).

¹⁸ Landnutzung, also die Nutzung der Landoberfläche durch Menschen, sowie Landbedeckung, die durch Menschen modifiziert wurde (vgl. CAMPBELL 2006, S. 559) wird im Folgenden zusammengefasst unter dem einen Begriff Landnutzung. Da in der vorliegenden Arbeit eine räumlich explizite Modellierung von agrarisch genutzten und beeinflussten Flächen durchgeführt wird und rein natürliche Landbedeckungstypen keinen Eingang in die Simulation finden, wird auf den Terminus Landbedeckung verzichtet.

nen und Umweltbedingungen zu testen oder die Stabilität von miteinander verbundenen sozioökonomischen und ökologischen Systemen zu analysieren (VELDKAMP & LAMBIN 2001, S. 1).

Während der vergangenen Jahrzehnte wurden zahlreiche Simulationsmodelle und Applikationen zur Analyse und Prognose von Landnutzungsveränderungen in räumlicher und zeitlicher Perspektive entwickelt. Mit der Implementierung eines Landnutzungsmodells können sehr unterschiedliche Intentionen verfolgt werden, die sich nach PAEGELOW & CAMACHO-OLMEDO (2008, S. 11 f.) in drei Hauptbereiche einteilen lassen. Innerhalb dieser Bereiche werden nach VELDKAMP & LAMBIN (2001, S. 2) und LAMBIN et al. (2000, S. 323) weitere zentrale Fragestellungen adressiert:

Knowledge Objective

Verständnis temporaler Prozesse – Das Simulationsmodell wird genutzt um ein Phänomen und dessen Entwicklung in seiner ganzen Komplexität besser zu verstehen.

- Welche ökologischen und kulturellen Variablen tragen am meisten zur Erklärung der Landnutzungsveränderungen bei (why in the past / future)?

Operational Objective

Die Simulation der Zukunft oder die vorhersagende Modellierung – Ziel ist es, ein mögliches Bild der Zukunftssituation zu erhalten und fähig zu sein, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit abschätzen zu können.

- Wann werden Landnutzungsveränderungen eintreten (when in the future)?
- Wo werden Landnutzungsveränderungen am ehesten stattfinden (location of change)?
- In welchem Umfang werden diese Veränderungen ablaufen (quantity of change)?

Methodological Objective

Nutzung des Modells „sensu stricto“ – Hierbei wird beabsichtigt, Werkzeuge, komparative Methoden oder Ergebnisvalidierungen zu testen. Dies ist sinnvoll, um beispielsweise den möglichen Generalisierungsgrad eines Modells oder einer Methode sowie deren thematische Anwendungsfelder und benötigte Daten zu definieren.

- Für welchen Zweck kann das Modell eingesetzt werden?
- Welche Daten werden benötigt?
- Wie kann das Modell verbessert werden?

Je nachdem, welche Fragestellung verstärkt im Fokus der Untersuchung steht, hat dies grundsätzliche Auswirkungen auf die Datenanforderungen, die Datenvalidierung und somit auf das gesamte Modellierungskonzept (VELDKAMP & LAMBIN 2001, S. 2). Die Vielfältigkeit an Modellen, die in der Literatur beschrieben wird, lässt sich je nach Autor sehr unterschiedlich kategorisieren, was vor allem damit zusammenhängt, dass die meisten Simulationsmodelle eine hohe Komplexität aufweisen und der Bereich der Landnutzungsmodellierung sehr interdisziplinär ist (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 36). So unterscheiden LAMBIN et al. (2000, S. 324 ff.) zwischen fünf Modellklassen (empirisch-statistische Modelle, stochastische Modelle, Optimierungsmodelle, dynamische Simulationsmodelle und integrierte Modellierungsansätzen), während VERBURG et al. (2004b, S. 309 f.) verschiedene Modelleigenschaften differenzieren: (1) Level of analysis, (2) Cross-scale dynamics, (3) Driving factors, (4) Spatial interaction and neighbourhood effects, (5) Temporal dynamics und (6) Level of integration.

Allen Landnutzungsmodellen ist jedoch nach SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. (2011, S. 36 f.) gemein, dass der jeweilige Prozess der Landnutzungsveränderung einem bestimmten Konzept oder Mechanismus (z.B. Zelluläre Automaten) zugeordnet wird, das zur Charakterisierung der Landnutzungsveränderung herangezogen werden kann (siehe Abb. 45). Dieses Konzept ist zusammengesetzt aus bestimmten Kernprinzipien, von denen angenommen wird, dass sie die Landnutzungsprozesse steuern. So basieren beispielsweise Zelluläre Automaten auf Nachbarschaftsinteraktionen. Das Konzept der Landnutzungsveränderung wird für die eigentliche Computersimulation schließlich in Algorithmen umcodiert.



Abb. 45: Beziehung zwischen dem Prozess der Landnutzungsveränderung und Computer-Simulationsmodellen (Quelle: Verändert nach SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 37)

4.1.1 Kernprinzipien der Modellierung von Landnutzungsveränderung

Ausführliche Literaturanalysen durch SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. (2011) zum Thema Landnutzungsmodellierung zeigen auf, dass alle Simulationsmodelle der Landnutzung auf vier Kernprinzipien von Landnutzungsveränderungen zurückzuführen sind:

Fortführung der historischen Entwicklung

- Kernaussage: Zukünftige Landnutzung kann durch die Analyse historischer Veränderungen prognostiziert werden.
- Prinzip: Extrapolation von vergangenen Landnutzungsveränderungen zu zukünftigen Veränderungen (Business As Usual-Szenario).

Eignung von Flächen (in monetären oder anderen Einheiten)

- Kernaussage: Menschen wollen Profit maximieren, der entweder in Form von monetären (quantitativ) oder anderen nicht-messbaren Einheiten (qualitativ) ausgedrückt werden kann.
- Prinzip: Eignung als eine Kombination verschiedener Faktoren wie beispielsweise Bodeneignung, räumliche Lagecharakteristiken oder Distanz zu Märkten.

Ergebnis von Nachbarschaftsinteraktionen

- Kernaussage: Der Übergang von einer Landnutzung zur anderen ist abhängig von der Landnutzung der sie umgebenden Zellen.
- Prinzip: Biophysikalische oder sozioökonomische Treiber beeinflussen die in Nachbarschaft liegenden Zellen.

Ergebnis von Interaktionen zwischen Akteuren

- Kernaussage: Landnutzungsveränderung ist das Ergebnis von Interaktionen zwischen Akteuren – Akteure können als Agenten repräsentiert werden (je nach Maßstab als einzelne Einheiten oder als Gruppe von Akteuren).
- Prinzip: Abbildung von sozioökonomischen Entscheidungsprozessen und Handlungsweisen menschlicher Akteure und deren Interaktionen (BERGER 2004, S. 79).

4.1.2 Konzepte zur Modellierung von Landnutzungsveränderung

Die zahlreichen Konzepte der Landnutzungsveränderung repräsentieren verschiedene Ansätze, um die Realität vor Ort zu erklären und sie in ein Modell zu übertragen. Jedes einzelne Konzept besitzt dabei Vor- und Nachteile, basiert jedoch immer auf einem oder mehreren der in Kap. 4.1.1 genannten Kernprinzipien (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 37). Im Folgenden werden die gängigsten Konzepte hinsichtlich ihrer zugrundeliegenden Prinzipien und Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt.

4.1.2.1 Zelluläre Automaten

Das Konzept der Zellulären Automaten (Cellular Automata, CA) zählt zu den bekanntesten Ansätzen der Landnutzungsmodellierung und basiert auf den Kernprinzipien „Fortführung der historischen Entwicklung“ und „Ergebnis von Nachbarschaftsinteraktionen“ (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 40). Ein Zellulärer Automat besteht aus den fünf Hauptelementen Zellraum, Nachbarschaft, Randbedingungen, Zustandsentwicklung und Zustandsmenge. Der Zellraum wird definiert durch ein regelmäßiges Raster von Zellen, die Werte aus einer endlichen Menge diskreter Elemente annehmen können. Der CA ändert dabei seinen Systemzustand in diskreten Zeitschritten, wobei der Zustand einer bestimmten Zelle abhängig ist vom Ist-Zustand der Zelle, den Zuständen der Nachbarzellen und vordefinierten Entscheidungsregeln. Diese vor allem für die Zustandsentwicklung und Randbegrenzung des Zellraumes festgelegten Entscheidungsheuristiken können deterministischer oder stochastischer Art sein. Dabei können generell zwei verschiedene Typen von Zellulären Automaten unterschieden werden: ungezwungene und gezwungene CA. Ungezwungene CA berechnen Landnutzungsveränderungen allein auf Grundlage von Entscheidungsregeln, während bei gezwungenen CA der Umfang der Veränderung pro Landnutzungstyp limitiert ist. Dieser kann entweder expertenbasiert oder durch die Extrapolation historischer Landnutzungsveränderungen berechnet werden (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 40; NAUMANN 2008, S. 98; THINH 2002, S. 38).

Im Bereich der geographischen Forschung wurde der Ansatz der Zellulären Automaten erstmals durch TOBLER (1979) verwendet und seitdem stetig modifiziert. Im Rahmen der Landnutzungsmodellierung werden Zelluläre Automaten vielfältig eingesetzt, insbesondere zur Untersuchung der Dynamik und Evolution von urbanen Räumen (vgl. SANTÉ et al. 2010; NAUMANN 2008; PINTO & ANTUNES 2007).

4.1.2.2 Statistische Analysen

Statistische Analysen können auf allen vier Kernprinzipien basieren, je nachdem welches Ziel mit der jeweiligen Forschung verfolgt werden soll. Im Rahmen von Landnutzungsmodellierungen werden lineare Regressionen, Probit-Regressionen sowie binominale und multinominale Logit-Modelle genutzt, um statistische Beziehungen zwischen möglichen Antriebskräften und Landnutzungsveränderungen zu erfassen oder zukünftige Landnutzungsmuster zu prognostizieren (vgl. GÜNTHERT et al. 2011b; MÜLLER et al. 2011; VERBURG et al. 2006; WEAR & BOLSTAD 1998). Des Weiteren können logisti-

sche Regressionsanalysen genutzt werden, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Landnutzungsklassen in Abhängigkeit zu verschiedenen biophysikalischen Charakteristiken oder dergleichen zu analysieren (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 41; VERBURG et al. 2004c, S. 136).

4.1.2.3 Markov-Ketten

Markov-Ketten (Markov chains) basieren auf dem Kernprinzip „Fortführung der historischen Entwicklung“. Bei einer Markov’schen Analyse werden Matrizen der Übergangswahrscheinlichkeiten verwendet, um Veränderungen zwischen Landnutzungsklassen zu repräsentieren. So enthält ein Matrixelement p_{ij} der i -ten Reihe und j -ten Spalte die Wahrscheinlichkeit, dass beim nächsten Zeitschritt eine Veränderung vom Zustand i zum Zustand j stattfindet. Unter der Annahme von Stationarität, also der Unterstellung, dass die zeitliche Rate von Veränderung sowie deren Umfang konstant bleiben und sich die Wahrscheinlichkeit des Übergangs von einem Zustand zum nächsten im Laufe der Zeit nicht ändert, kann die Matrix genutzt werden, um die Veränderung von einer Landnutzungsklasse zur anderen zu berechnen. Ein großer Nachteil dieser Art von Modellierung ist der nicht vorhandene Raumbezug. Daher sind weitere Voraussetzungen für die Ausweisung von Landnutzungsveränderungen notwendig. Hierbei wird unterschieden zwischen Markov-Ketten erster und zweiter Ordnung. Erstere benutzen eine Matrix mit der aktuellen Landnutzung sowie eine Übergangsmatrix, die auf Expertenwissen basiert. Zweitere berechnen Veränderungen von einer Landnutzungsklasse zur nächsten durch den Vergleich multitemporaler Landnutzungskarten. Die Veränderungsmatrix wird in diesem Fall auf Basis der historischen Landnutzung erstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die temporale Veränderungsrate konstant bleibt. Somit kann diese Übergangsmatrix in der gleichen Weise genutzt werden, wie die der Markov-Ketten erster Ordnung (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 42; LABASCH 2007, S. 4).

Markov-Ketten finden in zahlreichen aktuellen Landnutzungsstudien Anwendung (vgl. SYMEONAKIS et al. 2012; AURBACHER & DABBERT 2011; AURBACHER 2010). Die Einfachheit dieser Art von Modellierung macht sie des Weiteren zu einer sehr populären Kombinationstechnik mit anderen Modellierungskonzepten wie beispielsweise Zellulären Automaten (vgl. JOKAR ARSANJANI et al. 2013; ADHIKARI & SOUTHWORTH 2012; LI & ZHANG 2011).

4.1.2.4 Künstliche Neuronale Netzwerke

Künstliche Neuronale Netzwerke (Artificial Neuronal Networks, ANNs) können auf allen vier genannten Kernprinzipien basieren. Ursprünglich entwickelt zur Modellierung des Nervensystems im Gehirn von Säugetieren, hat die Nutzung Künstlicher Neuronaler Netzwerke im Rahmen von Landnutzungsmodellierungen über die letzten Jahre stetig zugenommen. Künstliche Neuronale Netzwerke sind selbstlernende Computermodelle, die zur Bearbeitung eines Problems lediglich eine bestimmte Verbindungsstruktur und ein Lernverfahren wie beispielsweise Überwachtes Lernen, Verstärkendes Lernen oder Unüberwachtes Lernen benötigen (vgl. EISENBACH 2005, S. 23). Ein ANN ist zusammengesetzt aus einem Set von Input-Layern wie z.B. Landnutzungskarten, Bodeneignungskarten, Distanzkarten und Hangneigungskarten, die als Knotenpunkte dienen. Lernende Algorithmen werden genutzt, um Erkenntnisse zu entwickeln und diese in spezifischen Gewichtungen der Input-Layer und variablen Schwellenwerten (Bias) zu speichern. Die Festlegung der Gewichtungen und der Bias-Werte wird während des Trainings-Prozesses durchgeführt, anhand dessen sich das Netz selbstständig konfiguriert. Dabei reagiert das Neuronale Netzwerk durch die Anpassung der Parameter auf die in den Input-Daten vorhandenen Muster und lernt so den funktionalen Zusammenhang zwischen Ein-

und Ausgabedaten. Der Algorithmus kann also eine Beziehung zwischen vergangenen und zukünftigen Landnutzungsveränderungen übernehmen und zusätzlich direkt mit entsprechenden Eignungskarten verbunden werden. Vorteile gegenüber anderen Modellen liegen hierbei in der Fähigkeit, auch nichtlineare Zusammenhänge darstellen zu können, in ihrer Robustheit gegenüber verrauschten Daten und in ihrer Fähigkeit, Muster zu erkennen (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 42) (vgl. MAEDA et al. 2009; EISENBACH 2005; FERNÁNDEZ-STEEGER 2002). Künstliche Neuronale Netzwerke werden beispielsweise angewendet, um Beziehungen zwischen Landnutzungseinheiten und deren spezifischen Antriebskräften zu detektieren (vgl. LIN et al. 2011) oder Landnutzungsveränderungen wie Entwaldungsprozesse (vgl. MAS 2004) oder urbane Dynamiken (vgl. PIJANOWSKI et al. 2005) zu erfassen.

4.1.2.5 Ökonomie-basierte Modelle

Ökonomie-basierte Modelle, von einigen Autoren auch als generalisierte Von-Thünen-Modelle bezeichnet, sind eher als Landnutzungstheorien denn als Konzepte von Landnutzungsveränderung zu verstehen (LAMBIN et al. 2000, S. 324). Dennoch haben sie einen hohen Stellenwert in der Landnutzungsmodellierung. Sie basieren vornehmlich auf dem Prinzip „Eignung von Flächen (in monetären oder anderen Einheiten)“, können aber auch dem Prinzip „Fortführung der historischen Entwicklung“ zugeordnet werden. Das erste ökonomie-basierte Landnutzungsmodell wurde 1826 durch VON THÜNEN (1886) entwickelt und wird in erweiterter Form noch heute verwendet. VON THÜNEN stellte die Theorie auf, dass solange der Profit einer Ware (Umsatz minus Produktionskosten) höher ist als dessen Transportkosten, das jeweilige Land weiter genutzt wird, um diese Ware zu produzieren. Für die Landnutzungsmodellierung ergibt sich daraus die Schlussfolgerung, dass Landparzellen angesichts ihrer naturräumlichen, sozioökonomischen Eigenschaften und räumlichen Lage in der Weise verwendet werden, dass sie die höchsten Renditen abwerfen (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 42 f.; LAMBIN et al. 2000, S. 324). Solche Konzepte werden beispielsweise zur Untersuchung von Entwaldungsprozessen in tropischer Wäldern (vgl. CALDAS et al. 2007; WALKER 2004) und zur Analyse von landwirtschaftlichen Flächendynamiken angewendet (vgl. PRISHCHEPOV et al. 2013; ANGELSEN 2010).

4.1.2.6 Agentenbasierte Systeme

Agentenbasierte Modelle liegen immer dem Kernprinzip „Ergebnis von Interaktionen zwischen Akteuren“ zugrunde. Eines der ersten akteursinteraktionbasierten Modelle für Landnutzungsveränderungen wurde durch BALMANN (1997) entwickelt und diente der Untersuchung landwirtschaftlicher Strukturveränderungen unter Einbezug individueller Präferenzen der Landwirte. Seitdem wurden agentenbasierte Konzepte stetig verbessert, befinden sich nach KAPLAN (2011, S. 5) aber für die Simulation von Landnutzungsveränderungen noch immer in ihren Anfängen – z.B. hinsichtlich ihrer räumlichen Übertragbarkeit. Ein agentenbasiertes Modell für Landnutzungsveränderungen besteht aus zwei Schlüsselkomponenten: einer Karte des Untersuchungsgebietes (Umwelt) sowie einem Modell mit autonomen Entscheidungseinheiten (Agenten), die menschliche Entscheidungsfindung repräsentieren. Die Agenten werden nach PARKER et al. (2003, S. 317) durch verschiedene Charakteristiken definiert: Sie sind autonom, sie teilen eine Umgebung durch Kommunikation und Interaktion untereinander und sie treffen Entscheidungen, die mit ihrem Verhalten zur Umgebung verknüpft sind. Die Regeln, die die Beziehung zwischen Agenten und ihrer Umwelt sowie die Abfolge von Entscheidungen und Handlungen definieren, können durch Expertenbeurteilungen, durch Fragebo-

generierungen sowie durch die Nutzung von Neuronalen-Netzwerk-Techniken erfasst werden (SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 43; BERGER 2004, S. 79).

Ein Agent kann entweder ein Individuum oder eine Gruppe sein. Im Gegensatz zu konventionellen Modellsimulationen, in denen Akteure aggregiert dargestellt werden (Top-Down), besteht somit die Möglichkeit, die Entscheidungen von Akteuren auch individuell zu modellieren (Bottom-Up). Bei dieser sehr realitätsnahen Simulation entsteht so ein sich selbst entwickelndes dynamisches System, das einen besseren Einblick in die Prozesse und Ergebnisse von strategischen Entscheidungen erlaubt. Des Weiteren ermöglichen mehrskalige Multi-Agenten-Systeme, biophysikalische und sozio-ökonomische Teilmodelle räumlich disaggregiert zu verknüpfen, um z.B. agrar-oder umweltpolitische Maßnahmen, betriebliche Landnutzungsentscheidungen und verschiedenste Umweltprozesse abzubilden (GAUBE et al. 2009, S. 7; BERGER 2004, S. 79 f.).

Ziel der agentenbasierten Modellierung ist nach BERGER (2004, S. 84) nicht die möglichst exakte Prognose von Landnutzungsveränderungen, sondern die Vorhersage von zusätzlichen Eigenschaften der untersuchten Mensch-Umwelt-Systeme, beispielsweise zur Stabilität von räumlichen, ländlichen Strukturen. Aktuelle Forschungsansätze zu agentenbasierten Konzepten der Landnutzungsmodellierung liefern RALHA et al. (2013), SCHREINEMACHERS & BERGER (2011) und PARKER et al. (2003).

Aus den genannten Konzepten sind in der Vergangenheit zahlreiche Computersimulations-Modelle entwickelt worden, die zukünftige Landnutzungsdynamiken abschätzen können (vgl. KOOMEN & STILLWELL 2007; HUNT et al. 2005; VERBURG et al. 2004b; AGARWAL et al. 2002). Alle diese Modelle nutzen Algorithmen, um zu entscheiden, wo und wann Landnutzungsveränderungen entstehen werden. Abb. 46 gibt einen Überblick über aktuelle Simulationsmodelle für zukünftige Landnutzungsveränderungen und ihre Beziehungen zu den jeweiligen Kernprinzipien und Landnutzungskonzepten. Für detaillierte Informationen zu den einzelnen Simulationsmodellen vgl. CHEN & PONTIUS (2010); VERBURG & OVERMARS (2009); ASSENG et al. (2010); BORSBOOM-VAN BEURDEN et al. (2007); PIJANOWSKI et al. (2006) und WAGNER & WEGENER (2007).

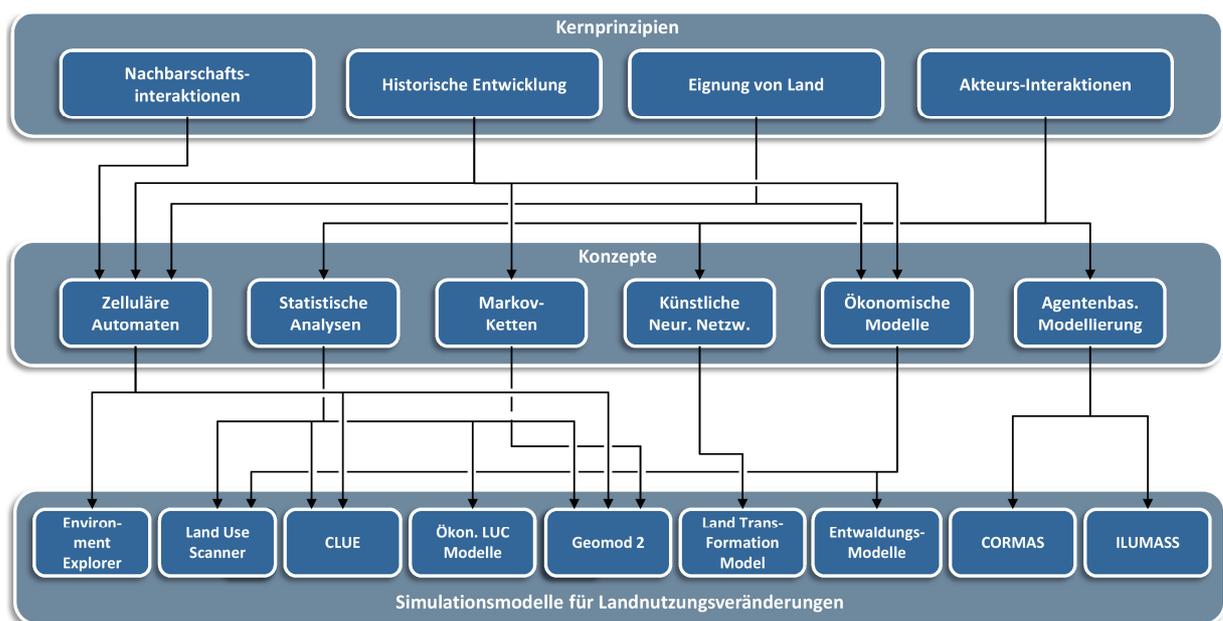


Abb. 46: Beziehung zwischen Kernprinzipien sowie Konzepten und aktuellen Simulationsmodellen für Landnutzungsveränderungen (Quelle: Verändert nach SCHROJENSTEIN LANTMAN et al. 2011, S. 46)

4.2 Anforderungen an die Modellierung von Landnutzungsveränderungen auf Teneriffa unter besonderer Berücksichtigung landwirtschaftlicher Dynamiken

Wie in Kapitel 1 genannt, sollen durch den Aufbau eines räumlich expliziten Landnutzungsmodells im Rahmen der vorliegenden Arbeit mögliche Auswirkungen landwirtschaftlicher Veränderungen auf die sensitiven Ökosysteme Teneriffas abgeschätzt und schließlich Vorschläge entwickelt werden, wie vor allem negative ökosystemare Folgen begrenzt werden könnten. Im Sinne von PAEGELOW & CAMACHO-OLMEDO (2008, S. 11 f.), VELDKAMP & LAMBIN (2001, S. 2) und LAMBIN et al. (2000, S. 323) ergeben sich daraus verschiedene Fragestellungen und daran anknüpfende Zielvorstellungen, die es bei der Entwicklung des Landnutzungsmodells für Teneriffa zu berücksichtigen gilt:

Welche sozioökonomischen und biophysikalischen Standortfaktoren sind für die räumliche Dynamik landwirtschaftlicher Prozesse auf Teneriffa von Bedeutung?

Landwirtschaftliche Prozesse sind gekennzeichnet durch verschiedene biophysikalische und sozio-ökonomische Faktoren, die sich mitunter gegenseitig beeinflussen. So hängen landwirtschaftliche Produktionstypen auf Teneriffa stark mit lokal sehr unterschiedlichen klimatischen und orographischen Bedingungen, aber auch mit der räumlichen Lage zu Straßen und lokalen Absatzmärkten zusammen. Daher ist ein ganzheitlicher Modellierungsansatz, der gleichzeitig die räumliche Entwicklung individueller agrarischer Landnutzungstypen sowie räumliche Interaktionen und Konkurrenzen zwischen diesen adressiert, essentiell für das Verständnis der agrarischen Landnutzungsveränderungen (VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1167 ff.). Dies gilt insbesondere für das vorliegende Untersuchungsgebiet, da hier sehr vielfältige lokale Landschaftscharakteristiken die Dynamik der jeweiligen Landnutzungstypen bestimmen. Doch nur durch eine ausreichend hohe räumliche Auflösung des Modells können die determinierenden Antriebskräfte für die zu simulierenden Prozesse ausreichend erfasst werden. Eine geringe räumliche Auflösung birgt die Gefahr, dass Schlüsselprozesse der Landnutzungsveränderungen nicht identifiziert werden können (VELDKAMP & LAMBIN 2001, S. 3). Trotzdem muss die Möglichkeit gegeben sein, auch Parameter unterschiedlicher räumlicher Maßstabsebenen für die Quantifizierung von Standortfaktoren der zu modellierenden Landnutzungstypen mit einzubeziehen (VERBURG et al. 2004b, S. 313). Denn oftmals sind mögliche determinierende Parameter, beispielsweise sozioökonomische Daten, nur auf kommunaler Ebene verfügbar und auch sinnvoll, während andere räumliche Informationen, wie abgeleitete Parameter aus digitalen Geländemodellen, sehr viel höher aufgelöst sind.

Wo und in welchem Umfang werden agrarische Landnutzungsänderungen, insbesondere landwirtschaftliche Intensivierungsprozesse und Flächenaufgaben, stattfinden?

In räumlich expliziten Modellen für Landnutzungstypen, deren räumliche Dynamik weitgehend durch exogene Kräfte bestimmt wird, ist es sinnvoll, eine klare Unterscheidung zwischen der räumlichen Zuweisung von Landnutzung innerhalb des zu untersuchenden Gebietes (der räumlichen Lage von Veränderung bzw. Zuweisung von Landnutzung) und der Festlegung der gesamten, aggregierten Veränderungsfläche zu machen (der Quantität der Veränderung bzw. dem Bedarf an Landnutzung). Dies trifft vor allem auf agrarisch genutztes Land zu, dessen Dynamiken in weiten Teilen der Erde wie auch im Untersuchungsgebiet ein Resultat von (globaler) Nachfrage/Bedarf, Marktkonditionen sowie politischer Maßnahmen und Restriktionen, beispielsweise Strategien für die Entwicklungen des ländlichen Raums, sind (ROUNSEVELL et al. 2005, S. 120).

Bei diesem Top-Down-Ansatz der Landnutzungsmodellierung wird die Gesamtveränderungsfläche der individuellen Landnutzungstypen im Rahmen von Zukunftsszenarien vorab festgelegt und die aus dem Szenario resultierende Quantität an Veränderung individuellen Rasterzellen räumlich zugewiesen. Die räumliche Zuweisung kann dabei beispielsweise durch Analysen zur Eignung von Flächen (Erfassung von Standortfaktoren) für bestimmte Landnutzungstypen erfolgen. Die Top-Down-Vorgehensweise bietet für die vorliegende Landnutzungsmodellierung einen wichtigen Vorteil: Im Rahmen des oben genannten Modellierungsziels sollen zwei verschiedene Gruppen von Landnutzungstypen in die Simulation miteinbezogen werden, deren zukünftige Entwicklung eng mit exogenen Ursachen zusammenhängt, die sich aber dennoch grundlegend unterscheiden. Dies sind zum einen Landnutzungstypen, denen anhand von Zukunftsszenarien explizit ein Bedarf an Landnutzung zugewiesen werden kann, also rezent genutzte Landwirtschaftsflächen wie beispielsweise Gewächshäuser, Plantagen und Ackerflächen. Zum anderen sind dies semi-natürliche Landnutzungseinheiten, deren Landnutzungsbedarf vornehmlich aus den Dynamiken der genannten Landnutzungstypen resultiert, also landwirtschaftlich aufgegebenen Brachflächen (vgl. VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1169). Die Gesamtveränderung dieser Kategorie hängt dementsprechend eng mit der Veränderung der bedarfsorientierten Landnutzungstypen zusammen, was bei der Entwicklung eines Zukunftsszenarios berücksichtigt werden kann. Somit besteht die Möglichkeit, unter Verwendung des Top-Down-Ansatzes auch Brachflächen zu modellieren, denen nicht direkt ein Bedarf zugewiesen werden kann, die aber dennoch als vollwertige dynamische Landnutzungsklasse im Untersuchungsgebiet angesehen werden müssen.

Für die Bildung von Szenarien ist es wichtig, historische Trendanalysen bis hin zu komplexen makroökonomischen Modellen sowie Veränderungen politischer Rahmenbedingungen, die auf die räumliche Lage landwirtschaftlicher Aktivitäten einwirken, mit einzubeziehen. Die grundlegende Idee hierbei ist, dass die agrarische Landnutzung zunimmt, wenn der Bedarf an landwirtschaftlichen Gütern steigt und umgekehrt. Jedoch sollte auch berücksichtigt werden, dass der Bedarf an Landnutzung sinkt, sobald die Produktivität der jeweiligen Anbautechniken zunimmt.

Modelle, die zur Konstruktion von Landnutzungsszenarien genutzt werden, sollten nach ROUNSEVELL et al. (2005, S. 119) zudem durch transparente Modellmechanismen gekennzeichnet sein sowie Prozesse und Parameterwerte enthalten, die sehr gut beschrieben und verständlich sind. Ansonsten hat das Landnutzungsszenario den Charakter einer Black Box, und ihre zugrundeliegenden Annahmen und Hypothesen können nicht offen debattiert und kritisiert werden (ROUNSEVELL et al. 2005, S. 120).

Unter Berücksichtigung der oben genannten Zielvorstellungen wird somit eine räumlich explizite Modellierungstechnik benötigt, die lokale und regionale räumliche Interaktionen und Konkurrenzen zwischen verschiedenen agrarischen Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet analysiert und adressiert sowie szenario-basierte Agrardynamiken auf überregionaler Ebene berücksichtigt. Zukünftige agrarische Entwicklungsdynamiken sollen dabei möglichst transparent und nachvollziehbar prognostiziert werden können, ohne an Aussagekraft infolge zu hoher Komplexität zu verlieren.

Nach einer umfassenden Literaturstudie der in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Konzepte und Simulationsmodelle unter der Prämisse, die Zielvorstellungen für das in der vorliegenden Arbeit benötigte Simulationsmodell zu erfüllen, wurde der CLUE Modellansatz (**C**onversion of **L**and **U**se and its **E**ffects Model) zur Simulation der agrarischen Landnutzungsdynamiken auf Teneriffa gewählt (vgl. VERBURG & OVERMARS 2009). Im folgenden Kapitel wird dieser Modellierungsansatz im Detail erläutert.

4.3 Das räumlich explizite Simulationsmodell Dyna-CLUE 2 (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2)

Das CLUE-Modell wurde von VELDKAMP & FRESCO (1996) entworfen, um Landnutzungsveränderungen anhand von empirisch quantifizierten Beziehungen zwischen Landnutzung und ihren Antriebskräften sowie räumlichen Konkurrenzen zwischen den Landnutzungstypen dynamisch zu simulieren. Diese Ursprungsversion modellierte auf nationaler bis kontinentaler Ebene mit Pixelgrößen von 7 x 7 bzw. 32 x 32 km (Mindestpixelgröße > 1 x 1 km) und konnte aufgrund von Unterschieden in der Datenrepräsentation nicht für regionale Untersuchungen verwendet werden. So wurde die Landnutzung bei diesen überregionalen Anwendungen in Form des prozentualen Anteils verschiedener Landnutzungstypen pro Rasterzelle repräsentiert (Sub-Pixelinformation). Bei regionalen Untersuchungen wird eine Rasterzelle nach VERBURG et al. (2002, S. 392) jedoch durch eine einzelne, dominante Landnutzungs-kategorie definiert. Daher entwickelten VERBURG et al. (2002) mit dem CLUE-s Modell (Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent) eine abgewandelte Modellversion für regionale und lokale Anwendungsbereiche (Pixelgröße < 1 x 1 km). Dieses erlaubt die räumlich explizite Simulation von Landnutzungsveränderungen auf Basis empirischer Analysen von Standorteignungen (Location Suitability) sowie Konkurrenzen und Interaktionen zwischen räumlichen und zeitlichen Dynamiken von Landnutzungssystemen (vgl. VERBURG 2010; VERBURG et al. 2002).

Das CLUE-s Modell wurde bislang in zahlreichen Untersuchungen zur Veränderung von Landnutzung erfolgreich eingesetzt. Aktuelle Arbeiten behandeln beispielsweise Erosions- und Depositionseffekte infolge landwirtschaftlicher Expansion (vgl. BARRETO et al. 2013), landwirtschaftliche Veränderungen und deren potenzielle Folgen in Europa (vgl. RENWICK et al. 2013; BRITZ et al. 2011) sowie Landnutzungsveränderungen in Südost- und Ost-Asien (vgl. FOX et al. 2012; ZHU et al. 2010). Das in der vorliegenden Arbeit genutzte Modell Dyna-CLUE 2 (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2) ist die neueste Version von CLUE-s (vgl. VERBURG & OVERMARS 2009).

4.3.1 Konzeption von Dyna-CLUE 2

Der CLUE-s-Modellansatz (Version Dyna-CLUE 2) basiert auf der dynamischen Simulation von Konkurrenzen zwischen verschiedenen Landnutzungstypen, die durch lokale Standortpräferenzen und den Landnutzungsbedarf auf überregionaler Ebene determiniert werden (vgl. Abb. 47). Das Modell ist nach VERBURG (2010, S. 2) somit grundsätzlich unterteilt in zwei unterschiedliche Module: ein nicht-räumliches Bedarfsmodul (Land Use Type Requirements – Demand) sowie ein räumlich explizites Allokationsverfahren (Land Use Change Allocation Procedure). Mit dem Bedarfsmodul wird die Quantität der Veränderungen für alle Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet in Form von Landnutzungsszenarien festgelegt (vgl. Kap. 4.3.2). Dabei wird dem Modell für jeden Zeitabschnitt der jeweilige Flächenbedarf (Demand) der zu simulierenden Landnutzungen vorgegeben (VERBURG et al. 2002, S. 395). Das räumliche Allokationsmodul teilt nun diesen überregionalen Flächenbedarf individuellen Rasterzellen zu, bis die Nachfrage an vordefinierten Landnutzungsveränderungen erfüllt ist. Dies geschieht durch einen iterativen Prozess, bei dem die Allokationsfläche der Landnutzungstypen mit dem jeweiligen überregionalen Flächenbedarf verglichen wird.

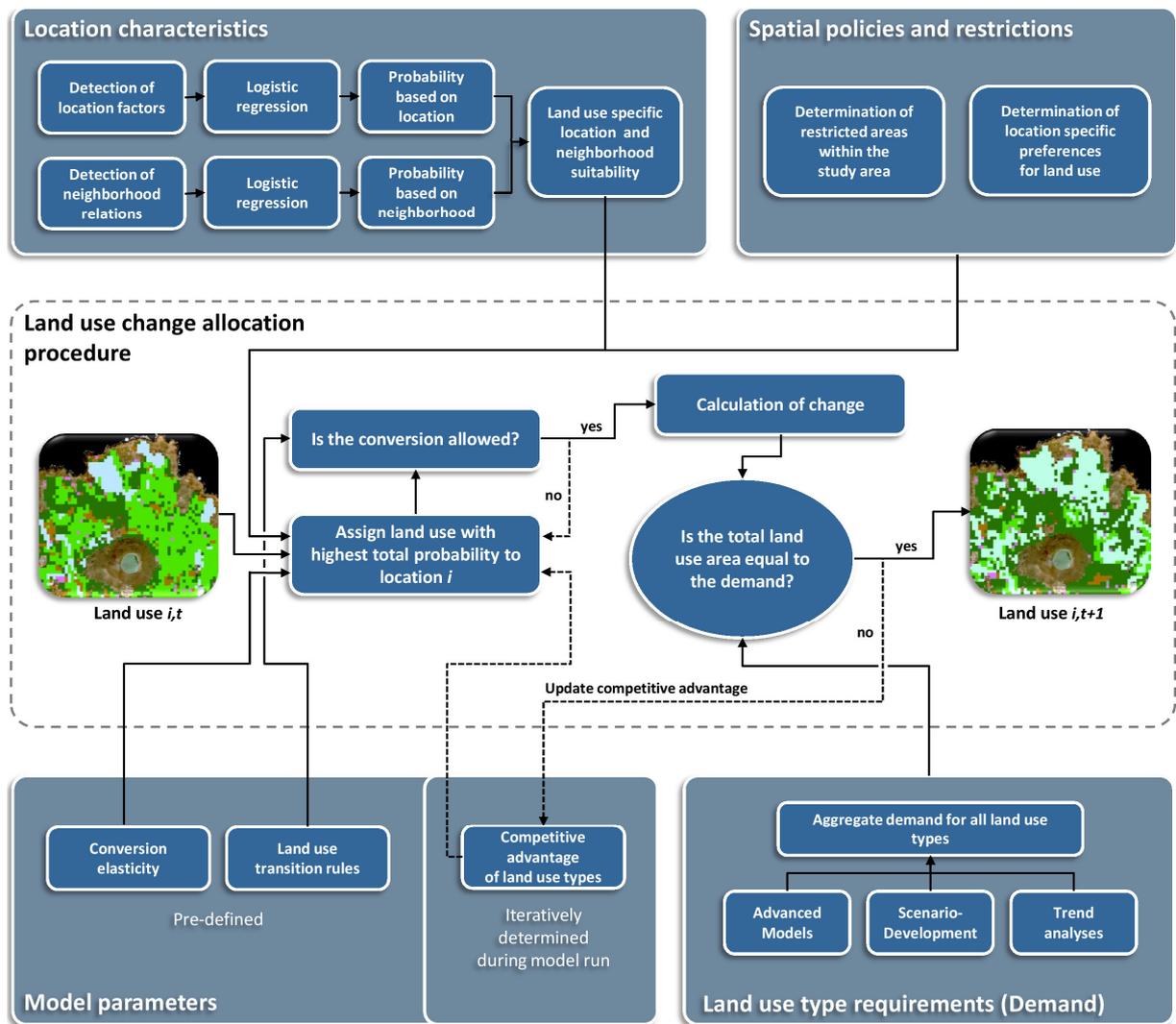


Abb. 47: CLUE-s (Version Dyna-CLUE 2) Modellkonzept und Allokationsverfahren der Landnutzungsveränderungen (Quelle: Verändert und erweitert nach VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1170; JUDEX 2008, S. 70; VERBURG et al. 2002, S. 395)

Bei der räumlichen Zuordnung wird jeder Rasterzelle i zu einem Zeitpunkt t der Landnutzungstyp lu mit der höchsten Gesamtwahrscheinlichkeit $P_{tot_{i,t,lu}}$ zugeordnet. Die Gesamtwahrscheinlichkeit wird nach VERBURG & OVERMARS (2009, S. 1169) und GROOT et al. (2009, S. 150) definiert als die Summe aus Location Suitability $P_{loc_{i,t,lu}}$, Neighbourhood Suitability $P_{nh_{i,t,lu}}$, Conversion Elasticity $Elas_{lu}$, Location Specific Preferences and Restrictions $Lspr_{lu}$ und Competitive Advantage $Comp_{t,lu}$:

$$P_{tot_{i,t,lu}} = P_{loc_{i,t,lu}} + P_{nh_{i,t,lu}} + Elas_{lu} + Lspr_{lu} + Comp_{t,lu} \quad (8)$$

Standorteignung $P_{loc_{i,t,lu}}$ und Nachbarschaftseignung $P_{nh_{i,t,lu}}$ (vgl. Kap. 4.3.3) können durch verschiedene Möglichkeiten festgelegt werden: entweder über empirische Methoden, Expertenwissen oder die (dynamische) Analyse von Nachbarschaftsinteraktionen, ähnlich wie gezwungene Zelluläre Automaten (vgl. Kap. 4.1.2.1) (VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1169). Die Konversionselastizität $Elas_{lu}$ (vgl. Kap. 4.3.5.2) ist eine Maßeinheit zur Bestimmung von Übergangskosten von einem Landnutzungstyp zum nächsten und hängt stark von der Reversibilität der Landnutzungsveränderungen ab. Sie wird für jeden Landnutzungstyp spezifisch festgelegt.

Zudem können Information über standortbedingte Präferenzen und Beschränkungen $Lspr_{lu}$ (vgl. Kap. 4.3.4) bestimmter Landnutzungen in die Berechnung mit einfließen. So besteht z.B. die Möglichkeit, agrarpolitische Entscheidungsmaßnahmen zur Festlegung bestimmter landwirtschaftlicher Intensivierungsgebiete, die Errichtung neuer Schutzgebiete im Untersuchungsraum sowie szenariobedingte Änderungen hinsichtlich der Standorteignung von Landnutzungen zu berücksichtigen.

Der Konkurrenzvorteil $Comp_{t,lu}$ wird im Laufe des Allokationsverfahrens für alle Landnutzungstypen iterativ festgelegt. Dieser Iterationsparameter ist bei der ersten Iteration für alle Landnutzungstypen gleich. Die Werte werden während der nächsten Iterationen für die Klassen erhöht, deren zugewiesene Fläche kleiner ist als die Fläche, die vorab durch den Demand festgelegt wurde. Dies geschieht auch in umgekehrter Weise, wodurch die Gesamtwahrscheinlichkeit $Ptot_{i,t,lu}$ für die jeweilige Landnutzung also entweder steigt oder sinkt. Der Vorgang wird solange durchgeführt, bis alle Landnutzungsklassen entsprechend des vorgegebenen Bedarfs verteilt worden sind (GROOT et al. 2009, S. 150; VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1169).

Die maximierte Gesamtwahrscheinlichkeit wird schließlich an jedem Standort i hinsichtlich eines vordefinierten Sets an Übergangsregeln geprüft. Durch diese Konversionsmatrix wird angegeben, welche Konversionen für jeden spezifischen Landnutzungstyp möglich sind (vgl. Kap. 4.3.5.1). Konversionen von Landnutzungstypen, die durch die Konversionsmatrix ausgeschlossen werden, führen zur Ablehnung der maximierten Gesamtwahrscheinlichkeit, wodurch folglich der Landnutzungstyp mit der höchsten Gesamtwahrscheinlichkeit ausgewählt wird, für den die Konversion erlaubt ist (VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1169).

4.3.2 Das nicht-räumliche Bedarfsmodul – Festlegung des zukünftigen Landnutzungsbedarfs

Die Festlegung des zukünftigen Landnutzungsbedarfs ist ein zentraler Bestandteil innerhalb des Dyna-CLUE 2 Modells und essentiell für die Landnutzungssimulation. Mit dem Bedarfsmodul werden explizite Informationen über die Gesamtfläche angegeben, die von den einzelnen Landnutzungsklassen im Untersuchungsraum pro simuliertes Jahr in Anspruch genommen wird. Diese Daten wandern als direkter Input in das Allokationsmodul. Zusätzlich muss festgelegt werden, wie hoch die Abweichung dieses Gesamtbedarfs bei der lokalen Verteilung der einzelnen Landnutzungen durch das Allokationsmodul sein darf. Bei einer zu strikten Vorgabe des zu ändernden Flächenbetrags wäre das Modell nicht fähig, alle Landnutzungsklassen auf die vorhandenen Pixel zu verteilen (GOETZKE 2010, S. 76). Wie bereits erwähnt, kann der Zukunftsbedarf durch sehr unterschiedliche Herangehensweisen, beispielsweise Trendextrapolationen oder integrierte komplexe ökonomische Modelle, ermittelt werden (vgl. ROUNSEVELL et al. 2005). Die Wahl eines spezifischen ökonomischen Modells oder anderer Vorgehensweisen hängt eng damit zusammen, welche Landnutzungsveränderungen im Untersuchungsgebiet stattfinden und mit welchen Zukunftsszenarien diese Veränderungen am sinnvollsten abgebildet werden können. Daher können sich die Bedarfsberechnungen, die folglich unabhängig von Dyna-CLUE 2 durchgeführt werden, je nach Anwendungsgebiet und Szenario sehr stark voneinander unterscheiden. Es muss situationsspezifisch abgewogen werden, welcher Ansatz unter Beachtung der jeweiligen Fragestellung der Richtige ist (VERBURG et al. 2002, S. 395).

4.3.3 Bestimmung räumlicher Standortfaktoren und Nachbarschaftsinteraktionen

Das räumliche Muster von Landnutzung und dessen Veränderung im Untersuchungsraum wird häufig als eine Funktion bestimmter Variablen betrachtet, die als so genannte Antriebskräfte (Driving Forces) der Landnutzungsveränderung bezeichnet werden (TURNER II et al. 1994). Driving Forces

werden nach TURNER II et al. (1995, S. 30) in drei verschiedene Gruppen unterteilt: (1) Sozioökonomische Antriebskräfte, beispielsweise Populationswachstum, Siedlungsexpansionen oder Veränderungen innerhalb des Wirtschaftssystems; (2) biophysikalische Antriebskräfte, die nicht unmittelbar für Veränderungen der Landnutzung verantwortlich sind, jedoch bestimmte Allokationsentscheidungen maßgeblich beeinflussen (beispielsweise Bodenqualität) und (3) unmittelbare Antriebskräfte, die als Flächenmanagement-Variablen angesehen werden können, beispielsweise Raumplanungsentscheidungen oder die Ausweisung von Naturschutzgebieten.

Daneben wird das Landnutzungsmuster durch Beziehungen zwischen einzelnen Landnutzungstypen im Raum bestimmt, die im Sinne von nachbarschaftlichen Interaktionen und Abhängigkeiten das Vorkommen spezifischer Landnutzungen stark beeinflussen (VERBURG et al. 2004a, S. 669). So kommen bestimmte landwirtschaftliche Produktionstypen oftmals in räumlichen Clustern vor, während beispielsweise Wohnsiedlungen eher fernab von industriellen Fabrikanlagen und in der Nähe zur Straßeninfrastruktur errichtet werden.

Zur lokalen Verteilung des vorab definierten Landnutzungsbedarfs im vorliegenden Simulationsmodell müssen diese unterschiedlichen Antriebskräfte/Standortfaktoren sowie die bestehenden Abhängigkeiten zwischen den Landnutzungen, die für das Vorkommen einer Landnutzung an einem bestimmten Standort i relevant sind und somit zu dessen Eignung beitragen, umfassend detektiert werden. Die Selektion möglicher determinierender Antriebskräfte basiert dabei auf allgemein verbreiteten Theorien zu Landnutzungsveränderungen und deren Antriebskräften (vgl. WALKER 2004; LAMBIN et al. 2001) oder Expertenwissen über die Vor-Ort-Bedingungen im Untersuchungsgebiet. Die jeweilig benötigten Daten können aus dem Bereich der Fernerkundung (Landnutzungsklassifikationen), aus Sekundärstatistiken oder topographischem Kartenmaterial stammen, müssen zur Analyse der Standortfaktoren allerdings so aufbereitet werden, dass sie in ein rasterbasiertes System mit einer den Daten entsprechenden räumlichen Auflösung übertragen werden können (VERBURG et al. 2002, S. 396). Hierdurch kann eine quantifizierte und vor allem raumbezogene Analyse der Antriebskräfte gewährleistet werden.

Für die Analyse der Beziehungen zwischen dem Auftreten von Landnutzung und den jeweiligen Standort- bzw. Nachbarschaftsfaktoren im Kontext des vorliegenden Simulationsmodells werden logistische Regressionen durchgeführt. Ziel dieser statistischen Analysen ist es, Wahrscheinlichkeiten zu determinieren, mit denen eine bestimmte Rasterzelle unter Einbezug der jeweils relevanten Driving Forces einer bestimmten Landnutzung zugedacht wird (VERBURG et al. 2002, S. 396). Die Wahrscheinlichkeiten werden für jede zu simulierende Landnutzung in Form von Eignungs- oder Wahrscheinlichkeitskarten (Suitability Maps) aufbereitet¹⁹ und dem Modell zur Berechnung des Landnutzungswandels zur Verfügung gestellt.

¹⁹ Die Eignungskarten werden auf Grundlage der durch logistische Regressionsanalysen gewonnenen Regressionskoeffizienten, die den Einfluss spezifischer Antriebskräfte auf die einzelnen Landnutzungstypen widerspiegeln, sowie der in Rasterform vorliegenden Antriebskräfte berechnet (GOETZKE 2010, S. 78).

4.3.3.1 *Logistisches Regressionsmodell zur Erfassung relevanter Antriebskräfte*

Die binominale logistische Regressionsanalyse ist eines der am häufigsten genutzten Werkzeuge im Kontext der vorhersagenden Modellierung. Anhand dieser auch als Logit-Modell bezeichneten Analyseverfahren werden empirische Zusammenhänge zwischen einer binären abhängigen Variable und mehreren unabhängigen kategorischen oder kontinuierlichen Variablen aufgedeckt (JOKAR ARSANJANI et al. 2013, S. 266). Typische Anwendungsfelder für die logistische Regression sind Fragestellungen bezüglich der Faktoren, die das Eintreten eines Ereignisses oder Zustandes bei einem Untersuchungsobjekt i beeinflussen.

Bei dieser Form der Regressionsanalyse werden Ereignisse als dichotome abhängige Variable y_i betrachtet und entsprechend ihrer Ausprägungen kodiert: So wird das Eintreten eines Ereignisses oder Zustandes mit 1 chiffriert, das Nichteintreten des Ereignisses oder Zustandes mit 0. Somit haben die Variablen nur zwei mögliche, sich ausschließende Ausprägungen: der „Zustand tritt ein“ ($y_i = 1$) oder der „Zustand tritt nicht ein“ ($y_i = 0$). In welcher Weise (wie stark und in welcher Richtung) die Eintrittswahrscheinlichkeit von $y_i = 1$ durch determinierende Merkmale (unabhängige Variablen) beeinflusst wird und wie hoch die konkrete Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Ereignisses oder Zustandes $P(y_i = 1)$ ist, kann als das zentrale Ziel einer logistischen Regressionsanalyse bezeichnet werden (DIAZ-BONE & KÜNEMUND 2003, S. 2). Dabei stehen beide Ausprägungen der dichotomen abhängigen Variable in folgender Beziehung:

$$P(y_i = 0) + P(y_i = 1) = 1 ; \text{ und es gilt: } P(y_i = 0) = 1 - P(y_i = 1) \quad (9)$$

Im Kontext der Landnutzungsmodellierung mit Dyna-CLUE 2 kann somit die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, mit der eine spezifische Landnutzung an einer Rasterzelle i auftritt ($y_i = 1 =$ Landnutzung tritt auf) und welche Standortfaktoren oder Driving Forces zur Erklärung dieser Wahrscheinlichkeit beitragen. Die Methode der logistischen Regression wird herangezogen, um für jede Rasterzelle die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer Landnutzungs Klasse zu berechnen. Für jede zu modellierende Landnutzung wird dementsprechend ein separates Regressionsmodell aufgestellt.

Die Durchführung der logistischen Regressionsanalyse wird unabhängig von Dyna-CLUE 2 mit SPSS (Version 19) realisiert, innerhalb dessen die Modellparameter mit Hilfe einer Maximum-Likelihood-Methode geschätzt werden. Das Ziel besteht darin, die Parameter b_k des Regressionsmodells, die die Einflussgewichtungen der unabhängigen Variablen wiedergeben, so zu bestimmen, dass die Wahrscheinlichkeit, die beobachteten Erhebungsdaten zu erhalten, maximiert wird (BACKHAUS et al. 2008, S. 252 f.). Räumliche Autokorrelationen zwischen benachbarten Rasterzellen können von vornherein minimiert werden, indem eine 10%-ige Stichprobe der Pixel jeder Landnutzungs Klasse zur Schätzung des Regressionsmodells verwendet wird. Die Selektion der Stichprobe erfolgt dabei ausgeglichen (Balanced Sample), d.h. es wird eine ähnliche Anzahl an Pixeln mit dem Wert 0 (Landnutzung tritt nicht auf) und dem Wert 1 (Landnutzung tritt auf) für die statistische Analyse ausgewählt (JUDEx 2008, S. 72; OVERMARS et al. 2003, S. 259).

Der Rechenansatz der logistischen Regression

Die einfache lineare Regression unterstellt einen linearen Zusammenhang zwischen einer abhängigen y_i und einer oder mehreren unabhängigen Variablen b durch folgende Regressionsgleichung (FROMM 2005, S. 6):

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_jx_{ij} + \dots + b_k x_{ik}$$

Mit:

y_i = Ausprägung der abhängigen Variable bei Merkmalsträger i ($i = 1, 2, \dots, n$)

x_{ij} = Ausprägung der j -ten unabhängigen Variable bei Merkmalsträger i ($j = 1, 2, \dots, k$)

b_j = Regressionskoeffizient (Steigungsparameter) der j -ten unabhängigen Variable

b_0 = Regressionskonstante

(10)

Bei der linearen Regression wird die Ausprägung einer metrischen Variable y_i geschätzt. Diese kann theoretisch alle Werte von $-\infty$ bis $+\infty$ abbilden, nicht nur die Werte 0 und 1. Somit ließe sich eine lineare Regressionsanalyse im Kontext der Erhebung von Driving Forces für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einzelner Landnutzungstypen an einer bestimmten Rasterzelle i zwar durchführen, würde aber zu keinem sinnvollen und interpretierbaren Ergebnis führen, denn: (1) In Abhängigkeit der Regressionskoeffizienten b_k können keine unterschiedlichen y_i erzeugt werden, da nur die beiden Ausprägungen 0 und 1 möglich sind. Diese 0/1 kodierte abhängige Variable erzielt allerdings nur eine geringfügige Streuung in ihren Beobachtungswerten; (2) Die Voraussetzung einer für lineare Regressionen notwendigen Normalverteilung wird nicht erfüllt, da bei einer zweiwertigen Variable die Residualwerte nicht normalverteilt sein können und (3) die durch die lineare Regression erzeugten Schätzwerte wären teilweise unplausibel, da sowohl negative Werte als auch Werte größer 1 auftreten können. Da Wahrscheinlichkeiten aber nur Werte im Intervall $[0;1]$ annehmen dürfen, ist die Interpretation der Schätzergebnisse nicht möglich (BACKHAUS et al. 2008, S. 248). Zur Erstellung einer Schätzgleichung, die es ermöglicht, die Stärke des Einflusses der unabhängigen Variablen auf eine dichotom ausgeprägte abhängige Variable zu modellieren, also kontinuierliche Veränderungen abzubilden, sind verschiedene Modifikationen der linearen Regression notwendig. Zunächst wird im Folgenden nicht mehr die Zustandszugehörigkeit $y_i = 1$ selbst als abhängige Variable betrachtet, sondern die Wahrscheinlichkeit der Zustandszugehörigkeit $p(y_i = 1)$. Da Wahrscheinlichkeiten jedoch nur im Intervall $[0;1]$ variieren, die abhängige Variable allerdings Werte von $-\infty$ bis $+\infty$ annehmen soll, werden zwei weitere Transformationen durchgeführt. Als abhängige Variable wird nun nicht mehr länger die Wahrscheinlichkeit des Zustandes $p(y_i = 1)$ betrachtet, sondern das Verhältnis der beiden Wahrscheinlichkeiten $p(y_i = 1)$ und $1 - p(y_i = 1)$. Dieses Wahrscheinlichkeitsverhältnis, das die Chance widerspiegelt, den Zustand $y_i = 1$ im Vergleich zum Zustand $y_i = 0$ zu erhalten, wird auch als Odds bezeichnet (FROMM 2005, S. 6 f.):

$$Odds(y_i = 1) = \frac{p(y_i = 1)}{(1 - p(y_i = 1))} \quad (11)$$

Die Wahrscheinlichkeit, $y_i = 1$ anzugehören, wird also dividiert durch die Wahrscheinlichkeit, ihr nicht anzugehören. Hierdurch wird der Wertebereich des Zustandes $y_i = 1$ auf das Intervall $[0; +\infty]$ erweitert (FROMM 2005, S. 7). In einem weiteren Schritt müssen die Odds nun logarithmiert werden, wobei

nach BACKHAUS et al. (2008, S. 359) üblicherweise der Logarithmus naturalis \ln verwendet wird. Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$\ln\left(\frac{p(y_i=1)}{1-p(y_i=1)}\right) = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_kx_{ik} + \dots b_kx_{ik} \quad (12)$$

Diese logarithmierten Odds werden gemeinhin als Logits bezeichnet und stellen eine Linearkombination der unabhängigen Variablen dar. Sie erlauben damit eine Interpretation analog zur linearen Regressionsanalyse. Zudem ist der Wertebereich der Logits auf das Intervall $[-\infty; +\infty]$ ausgedehnt, da der Logarithmus naturalis für Werte zwischen 0 und 1 negativ wird. Formel 12 kann nun wieder nach der Wahrscheinlichkeit $p(y_i = 1)$ aufgelöst werden, wodurch sich folgende Schätzgleichung, auch logistische Funktion genannt, für das Modell der logistischen Regression ergibt:

$$p(y_i = 1) = \frac{1}{1+e^z} \quad \text{mit } z = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_jx_{ij} + \dots b_kx_{ik} \quad (13)$$

Der logistische Regressionsansatz berechnet nun die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Zustands $y_i = 1$ unter Verwendung der logistischen Funktion. Dabei geben der Parameter b_0 und die Regressionskoeffizienten b_k , auch als Logit-Koeffizienten bezeichnet, die Einflussstärke der jeweils erfassten unabhängigen Variablen x_{ik} auf die Höhe der Eintrittswahrscheinlichkeit $p(y_i = 1)$ wieder. Somit stellt diese Funktion eine Wahrscheinlichkeitsbeziehung zwischen dem Zustand $y_i = 1$ und den unabhängigen Variablen x_{ik} her, weshalb sie auch als Linking-Funktion bezeichnet wird (BACKHAUS et al. 2008, S. 246 ff.).

Die mit Hilfe der logistischen Funktion erzeugte Wahrscheinlichkeitsverteilung für $y_i = 1$ weist einen sigmoidalen Verlauf auf und hat die Eigenschaft, dass sich selbst für die kleinsten Werte des Prädiktors $z(x)$ die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis $y_i = 1$ immer innerhalb des Intervalls $[0,1]$ bewegt. Des Weiteren ist die Logit-Funktion immer symmetrisch um den Wendepunkt $p(y_i = 1) = 0,5$.

Die binominale logistische Regression unterstellt nach BACKHAUS et al. (2008, S. 250) letztendlich „[...] einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen der Eintrittswahrscheinlichkeit der binären, abhängigen Variablen $[p(y_i = 1)]$ und den unabhängigen Variablen als Modellprämisse. Demgegenüber wird aber das Zustandekommen der aggregierten Einflussstärke z im Exponenten der Linking Funktion als linear unterstellt.“

In ein logistisches Regressionsmodell können als unabhängige Variable y_i nur metrische oder kategoriale Daten einfließen. Dabei müssen kategoriale Variablen mit mehr als zwei Ausprägungen, beispielsweise verschiedene Bodentypen, für die Analyse in Indikatorvariablen umgewandelt werden, d.h. für jede Ausprägung der ursprünglichen Variable muss eine neue, dichotome Variable gebildet werden. Dieser Vorgang wird als Dummy-Kodierung bezeichnet. Allerdings wird dabei für die jeweils erste Kategorie keine Schätzung des Regressionskoeffizienten vorgenommen. Sie besitzt demnach einen Effekt von 0 auf die Erklärung der abhängigen Variable. Alle weiteren dichotomen Variablen dieser Kategorie werden nun mit der Null-Variable verglichen. Anhand ihres Verhältnisses zu dieser ersten Dummy-Variablen haben die restlichen Variablen einen Einfluss auf die Erklärung der abhängigen Variable. Hierdurch wird eine sonst perfekte Kollinearität der Dummy-Variablen untereinander vermieden (GOETZKE 2010, S. 78; FROMM 2005, S. 5).

Interpretation der Regressionsergebnisse

Unter Beachtung o.g. Rechenansatzes kann festgestellt werden, dass die durch die Regressionskoeffizienten festgelegte aggregierte Einflussstärke auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten des Zustandes $y_i = 1$ (z-Werte), die Logits und die Odds den identischen Sachverhalt beschreiben. Folglich bieten sie verschiedene Möglichkeiten der Ergebnisinterpretation (BACKHAUS et al. 2008, S. 259). Somit gilt:

$$z = \text{Logit} = \ln(\text{Odds}) \quad (14)$$

Anhand der bei der statistischen Analyse erhaltenen Regressionskoeffizienten ist zunächst eine Tendenzangabe möglich, ob diese die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der untersuchten Landnutzung positiv oder negativ beeinflussen. Dies kann anhand deren positiven oder negativen Vorzeichen erfasst werden. Eine detailliertere Aussage über die Höhe der jeweiligen Einflussstärken der unabhängigen Variablen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit kann allerdings erst mit Hilfe der Odds über die so genannten Odds Ratio, auch als Effektkoeffizienten $\text{Exp}(b)$ bezeichnet, erzielt werden (BACKHAUS et al. 2008, S. 260). Erhöht sich eine unabhängige Variable um eine Einheit ($x_{ik}+1$), vergrößert sich das Chancenverhältnis zugunsten des Ereignisses $y_i = 1$ (Odds) um den Faktor e^{b_k} . Dies wird durch folgende Formel verdeutlicht (DIAZ-BONE & KÜNEMUND 2003, S. 8):

$$e^{b_0 + b_k(x_{ik}+1)} = e^{b_0} * e^{b_k * x_{ik} + b_k} = e^{b_0} * e^{b_k * x_{ik}} * e^{b_k} = \frac{p(y_i=1)}{1-p(y_i=1)} * e^{b_k} \quad (15)$$

Der Effektkoeffizient, auch als $\text{exp}(b)$ ausgedrückt, kann nach BACKHAUS et al. (2008, S. 260) nur Werte von 0 bis $+\infty$ annehmen. Werte zwischen 0 und <1 verringern das Wahrscheinlichkeitsverhältnis für $y_i = 1$ gegenüber $y_i = 0$, während Werte >1 das Verhältnis vergrößern. Bei Werten = 1 hat die Erhöhung der unabhängigen Variable keinen Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit $p(y_i = 1)$.

Bestimmung der Modellgüte der logistischen Regression

Bei der Bestimmung der Modellgüte der logistischen Regression steht vor allem die Frage im Vordergrund, wie gut die unabhängigen Variablen zur Trennung der Ausprägungskategorien von y_i beitragen. Hierfür kann auf verschiedene Gütekriterien zurückgegriffen werden. So wird beispielsweise anhand verschiedener Pseudo-R-Quadrat-Statistiken versucht, den Anteil der erklärten Variation des logistischen Regressionsmodells zu berechnen. Sie sind daher vergleichbar mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regressionsanalyse, wobei die Variation der logistischen Regression hier unterschiedlich definiert werden muss. Neben McFaddens- R^2 und Cox & Snell- R^2 zählt insbesondere der Nagelkerke- R^2 zu den Gütemaßen, die eine eindeutige inhaltliche Interpretation erlauben. Genauso wie beim R^2 der linearen Regressionsanalyse kann auch hier ein Maximalwert von 1 erreicht werden. Jedoch lassen sich hier, im Gegensatz zum linearen R^2 , schon Werte größer 0,5 als sehr gut interpretieren (BACKHAUS et al. 2008, S. 263 ff.).

Eine weitere im Bereich der Landnutzungsmodellierung sehr häufig angewendete Gütebestimmungstechnik ist die so genannte „Relative Operating Characteristic-Methode“ (ROC-Methode) (PONTIUS JR. & SCHNEIDER 2001, S. 239). Bei diesem Verfahren wird die Modellgenauigkeit in Form einer Leistungskurve beschrieben. Hierzu werden die True-Positive-Werte den False-Positive-Werten einer spezifischen Anzahl von Wahrscheinlichkeitsklassen gegenübergestellt. In der Darstellung der Werte als Liniendiagramm ergibt sich somit eine Kurve (vgl. Abb. 48). Deren Integral, die Area Under Curve

(AUC), kann nun als Maß für die Güte des Modells herangezogen werden (für detaillierte Informationen zur ROC-Kurve vgl. PONTIUS JR. & SCHNEIDER 2001). Bei einer exakt diagonal verlaufenden Kurve beträgt der AUC-Wert 0,5, wodurch das Modell als zufällig und nicht signifikant bezeichnet werden kann. Je steiler die Kurve ist und somit der AUC-Wert stärker Richtung 1 geht, desto größer ist letztendlich die Modellgüte (JUDEX 2008, S. 94 f.).

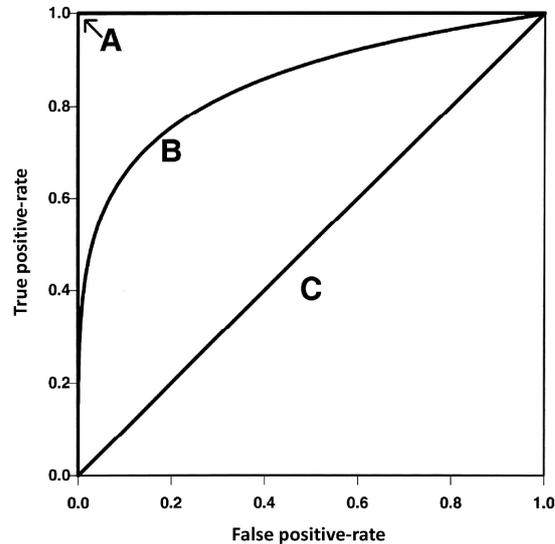


Abb. 48: Drei hypothetische ROC-Kurven mit A) AUC-Wert = 1; B) AUC-Wert = 0,85; C) AUC-Wert = 0,5 (Quelle: Verändert nach Zou et al. 2007, S. 656)

4.3.3.2 Erfassung von Nachbarschaftsinteraktionen

Nachbarschaftsinteraktionen zwischen verschiedenen Landnutzungen zählen in vielen, vor allem CA-basierten Landnutzungsmodellen zu den wichtigsten Driving Forces des Landnutzungswandels (vgl. Kap. 4.1.2.1) und können gerade im Kontext von beispielsweise urbanem Wachstum durch einfache Modellmechanismen wie die Theorie der zentralen Orte von CHRISTALLER (1933) beschrieben werden. Nach dieser Theorie entstehen einheitliche räumliche Muster in Städten und Gemeinden als eine Funktion von Distanzen, die Konsumenten in der umliegenden Region für verschiedene Güter und Dienstleistungen zurücklegen. Auch in der Landwirtschaft spielen Nachbarschaftsinteraktionen eine große Rolle, da landwirtschaftliche Betriebe und deren Produktionsflächen meist in Form von Clustern auftreten, die über verschiedene Beziehungen miteinander vernetzt sind. So bestehen nach KULKE (2004, S. 67 f.) direkte Vernetzungen durch Bezugs-, Absatz- und Dienstleistungsverflechtungen, indirekte Verflechtungen hingegen durch die Nachfrage von landwirtschaftlich Beschäftigten nach Gütern und Dienstleistungen sowie komplementären Beziehungen zu außerlandwirtschaftlichen Aktivitäten, die vom Vorhandensein der Landwirtschaft profitieren, beispielsweise Fremdenverkehr und Naherholung.

Innerhalb des vorliegenden Modells werden Nachbarschaftsinteraktionen auf Grundlage einer empirischen Analyse der Veränderungen von Landnutzungsmustern in Kombination mit den jeweiligen Nachbarschaftseigenschaften eines Standortes erfasst und in Form von Nachbarschaftseignungskarten in die Modellierung mit einbezogen. Diese Nachbarschaftseigenschaften können als „[...]any set of one or more locations that bear a specified distance and/or directional relationship to a particular location, the neighborhood focus“ (VERBURG et al. 2004a, S. 670) verstanden werden.

Der Neighbourhood-Enrichment-Faktor

Zur Charakterisierung der Nachbarschaft eines Standortes innerhalb des Untersuchungsgebietes wird in Dyna-CLUE 2 der so genannte Enrichment-Faktor F herangezogen. Er wird definiert als das Auftreten eines Landnutzungstyps in der Nachbarschaft eines Standortes in Relation zum Auftreten dieses Landnutzungstyps im gesamten Untersuchungsgebiet.

Somit gilt:

$$F_{i,k,d} = \frac{n_{k,d,i}/n_{d,i}}{N_k/N} \quad (16)$$

$F_{i,k,d}$ charakterisiert die Anreicherung einer Nachbarschaft d eines Standortes i mit Landnutzungstyp k . Die Form der Nachbarschaft und ihre Distanz zur zentralen Rasterzelle i wird identifiziert durch d und besteht beispielsweise aus einer Von Neumann- oder Moore-Umgebung mit einer für den jeweiligen Landnutzungstyp spezifischen Distanz (vgl. Abb. 49). $N_{k,d,i}$ ist die Anzahl von Zellen des Landnutzungstyps k in der Nachbarschaft d von Rasterzelle i und $N_{d,i}$ die Gesamtanzahl an Zellen in der Nachbarschaft, während N_k für die Anzahl an Zellen mit Landnutzungstyp k im gesamten Untersuchungsgebiet und N für die Gesamtanzahl an Rasterzellen im Untersuchungsraum steht (VERBURG et al. 2004a, S. 671).

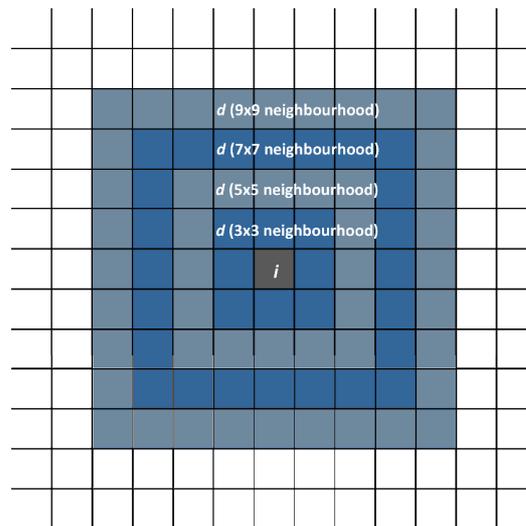


Abb. 49: Konfiguration der Nachbarschaften d einer zentralen Rasterzelle i mit unterschiedlichen Distanzen (Quelle: Verändert nach VERBURG et al. 2004a, S. 671)

So wird beispielsweise eine Rasterzelle i mit 50% Ackerfläche in seiner Nachbarschaft bei einem Prozentanteil der Ackerflächen von 25% im gesamten Untersuchungsgebiet mit einem Enrichment-Faktor von 2 für die Landnutzungs-kategorie Ackerfläche charakterisiert. Die Nachbarschaftseigenschaften für Rasterzelle i resultieren schließlich aus der Serie an Enrichment-Faktoren aller im Untersuchungsgebiet vorkommenden Landnutzungstypen k . Dabei ist es sinnvoll, die Analyse mit unterschiedlichen Nachbarschaftsdistanzen zu wiederholen. So kann bei der anschließenden Regressionsanalyse erfasst werden, welche Nachbarschaftsdistanzen die Beziehung einer spezifischen Landnutzungs-kategorie zu den restlichen Landnutzungs-klassen am besten wiedergeben (VERBURG et al. 2004a, S. 671). Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden nachbarschaftliche Beziehungen der einzelnen Landnutzungstypen auf Basis kreisförmiger Nachbarschaften mit unterschiedlichen Distanzen durch-

geführt. Zur Berechnung des Enrichment-Faktors wird, unter Einbezug der ERDAS IMAGINE 2011 Spatial Modeler Language, ein entsprechender Moving-Window-Algorithmus entwickelt. Hierdurch ist es möglich, den Enrichment-Faktor anhand der o.g. Formel für alle Rasterzellen des Untersuchungsgebietes automatisiert zu berechnen.

Die durchschnittliche Nachbarschaftscharakteristik für eine Landnutzungsklasse l ($\bar{F}_{l,k,d}$) kann anhand des Durchschnitts der Enrichment-Faktoren aller zu einer bestimmten Landnutzung l gehörenden Rasterzellen berechnet werden. Es gilt:

$$\bar{F}_{l,k,d} = \frac{1}{N} \sum_{i \in L} F_{i,k,d} \quad (17)$$

wobei L alle Standorte mit Landnutzungstyp l im Untersuchungsgebiet und N_l die Gesamtanzahl aller Rasterzellen des Untersuchungsgebietes bezeichnet (VERBURG et al. 2004a, S. 672).

Logistische Regression zur Messung der Einflussstärke des Neighbourhood-Enrichment-Faktors

Die Analyse der Nachbarschaften anhand des Enrichment-Faktors allein gibt allerdings nicht wieder, in welchem Ausmaß das räumliche Landnutzungsmuster durch Nachbarschaftscharakteristiken beeinflusst wird. Es muss eine weitere Untersuchung zur Erfassung der Einflussstärke der jeweiligen Enrichment-Faktoren auf die einzelnen Landnutzungsclassen durchgeführt werden. Hierzu wird die Veränderung von Landnutzung zwischen Zeitpunkt t_i und Zeitpunkt t_{i+1} in Beziehung zu den berechneten Enrichment-Faktoren gesetzt. Dies geschieht anhand einer logistischen Regression. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine Rasterzelle zu einer bestimmten Landnutzung konvertiert, als eine Funktion aus der zuvor erfassten Serie an Enrichment-Faktoren berechnet. Folgende Kodierung für y_i wird vorgenommen: 1 = Rasterzelle konvertiert zwischen t_i und t_{i+1} zu Landnutzung k ; 0 = Landnutzung konvertiert zwischen t_i und t_{i+1} nicht zu Landnutzung k . Es gilt:

$$p(y_i = 1) = \frac{1}{1 + e^z}$$

$$\text{mit } z = b_0 + b_{cropland,d=3 \times 3} F_{cropland,d=3 \times 3} + b_{greenhouses,d=3 \times 3} F_{greenhouses,d=3 \times 3} + \dots + b_{k,d} F_{i,k,d} \quad (18)$$

wobei die unabhängigen Variablen $F_{i,k,d}$ die Enrichment-Faktoren der individuellen Rasterzellen in Nachbarschaft d mit Landnutzung k bezeichnen, und $b_{k,d}$ die Regressionskoeffizienten darstellen, die durch die Maximum-Likelihood-Methode geschätzt werden (vgl. Kap. 4.3.3).

Zur Wahl der Idealgröße für d wird für jede Landnutzung eine eigene Regressionsanalyse anhand der zuvor berechneten Enrichment-Faktoren mit unterschiedlichen Nachbarschaftsdistanzen durchgeführt. Durch die ROC-Methode und den entsprechend höchsten AUC-Wert kann schließlich die für den jeweiligen Landnutzungstyp beste Nachbarschaftsgröße ermittelt und das entsprechende Regressionsmodell gewählt werden (VERBURG et al. 2004a, S. 673). Die Resultate dieser logistischen Regression fließen wie die Ergebnisse der Standortfaktoren in Form von Eignungskarten in die Landnutzungsmodellierung mit ein. Dabei ändert sich die Konfiguration der Landnutzung mit jedem Modellschritt. Daher werden die Nachbarschaftswerte stets aktualisiert und neue Wahrscheinlichkeitskarten generiert (JUDEX 2008, S. 75).

4.3.4 Räumliche Bedingungen und Beschränkungen innerhalb des Dyna-CLUE 2 Modells

Landnutzungsveränderungen werden nicht nur durch die jeweiligen Standortfaktoren und Nachbarschaftsabhängigkeiten im Untersuchungsgebiet determiniert. Oftmals können politische Entscheidungen und individuelle Landbesitzrechte das räumliche Verteilungsmuster von Landnutzungsveränderungen stark beeinflussen. Dies kann Auswirkungen in gegenläufige Richtungen haben. Zum einen führen politische Entscheidungen wie die Ausweisung von Naturschutzgebieten oder Nationalparks sowie privater Landbesitz zu Beschränkungen oder Verboten hinsichtlich der Veränderung oder Umnutzung von Land. Solche Maßnahmen und Vorschriften können im vorliegenden Dyna-CLUE 2 Modell durch die Festlegung von Sperrgebieten (Restricted Areas) in Form eines zusätzlichen Rasterdatensatzes miteinbezogen werden. Innerhalb dieser Flächen ist keine Veränderung möglich. Zum anderen können Raumordnungspolitiken aber auch zu einer Zunahme von bestimmten Landnutzungen an spezifischen Standorten des Untersuchungsgebietes führen. So lassen beispielsweise Subventionen zur Unterstützung der Landwirtschaft in Gebirgsregionen mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf schließen, dass hier landwirtschaftliche Nutzflächen erhalten bleiben oder sogar zunehmen werden. Diese im Gegensatz zur übrigen Fläche des Untersuchungsraumes erhöhte ortsspezifische Wahrscheinlichkeit bestimmter Landnutzungstypen kann durch so genannte Specific Location Preference Additions in die Simulation mit einfließen, wodurch deren Auftrittswahrscheinlichkeit in vorab festgelegten Regionen verstärkt wird. Durch eine Ausweisung von Gebieten ähnlich den zuvor genannten Restricted Areas und einer anschließenden Zuweisung von Gewichtungsfaktoren zwischen 0 (keine Erhöhung der Eignungswahrscheinlichkeit) und 1 (starke Erhöhung der Eignungswahrscheinlichkeit) für den entsprechenden Landnutzungstyp im jeweilig festgelegten Gebiet können die ortsspezifischen Wahrscheinlichkeiten im Simulationsmodell berücksichtigt werden (VERBURG 2010, S. 2; VERBURG et al. 2002, S. 396).

4.3.5 Konversionsregeln der spezifischen Landnutzungsklassen

Für jeden Landnutzungstyp müssen schließlich grundsätzliche Regeln und Konditionen festgelegt werden, anhand derer die z.T. sehr unterschiedlichen temporalen Dynamiken der einzelnen Landnutzungstypen im Simulationsmodell charakterisiert werden. Zwei verschiedene Gruppen von Parametern werden hierzu herangezogen: Landnutzungsübergangsregeln in Form einer Konversionsmatrix sowie Konversionselastizitäten (VERBURG 2010, S. 4).

4.3.5.1 Konversionsmatrix

Anhand der Landnutzungsübergangsregeln wird festgelegt, welche Landnutzungstransformationen für die jeweiligen Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet möglich sind und welche zeitlichen Beschränkungen hinsichtlich der Nutzungsdauer eines Landnutzungstyps vorgesehen sind, bevor sich dieser in einen anderen Typ transformieren kann. Diese Informationen werden in Form einer Konversionsmatrix erfasst und in das Modell implementiert (vgl. Abb. 50). In der Matrix wird somit die aktuelle Landnutzung der zukünftigen Landnutzung gegenübergestellt. Dabei wird durch die Ziffern 1 (Konversion erlaubt) und 0 (Konversion nicht erlaubt) festgelegt, welche Landnutzungsveränderungen möglich sind. Zusätzlich kann eine minimale Anzahl an Zeitschritten definiert werden, in denen der jeweilige Landnutzungstyp stabil bleiben muss, bevor eine neue Konversion möglich ist. Dies wird dargestellt durch die Chiffrierung $100 + \text{Anzahl an Zeitschritten}$. Solche zeitlichen Determinationen sind u.a. relevant für die natürliche Sukzession von landwirtschaftlichen Brachflächen. So kann festgelegt werden, dass das jeweilige Land für n -Jahre brachliegen muss, bevor es als Sekundärwald

klassifiziert werden kann. Eine maximale Anzahl an Zeitschritten, dargestellt durch -100 - Anzahl an Zeitschritten, ist dagegen relevant für die Modellierung von beispielsweise Fruchtfolgen. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass eine bestimmte Landnutzung nach einer n-ten Zahl an Zeitschritten zu einer anderen Landnutzung konvertieren muss.

Zukünftige Veränderung	Landnutzung 1	Landnutzung 2	Landnutzung 3	Landnutzung 4
Landnutzung 1	1	105	0	1spec.
Landnutzung 2	0	1	105	105
Landnutzung 3	105	0	1	105
Landnutzung 4	1	1	1	-102

Abb. 50: Beispiel einer Konversionsmatrix von vier Landnutzungstypen mit unterschiedlichen Übergangsregeln (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Regeln der Konversionsmatrix werden in Abb. 50 beispielhaft dargestellt: Landnutzung 1 kann hier erst nach fünf Jahren zu Landnutzung 2 konvertieren (Wert 105), während eine Konversion zu Landnutzung 3 nicht erlaubt ist (Wert 0). In speziellen Fällen ist es auch möglich, spezifische Konversionsgebiete in der Matrix auszuweisen. So ist eine Konversion von Landnutzung 1 zu Landnutzung 4 nur in Gebieten möglich, die durch den Einbezug eines weiteren Rasterdatensatzes vorab definiert wurden (Wert 1spec.). Landnutzung 4 dagegen kann zu allen anderen Landnutzungen konvertieren, darf allerdings nicht länger als zwei Jahre zur selben Landnutzung gehören (Wert -102).

Zur Umsetzung der temporalen Dynamiken in Dyna-CLUE 2 ist es notwendig, die so genannte Land Use History des Untersuchungsgebietes in Form eines Rasterdatensatzes festzulegen. Diese Rasterkarte kann wie in der vorliegenden Arbeit durch Expertenwissen definiert oder zufallsbedingt generiert werden und legt das Alter der Landnutzung im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt t fest. Sie wird bei jedem Modellschritt aktualisiert (VERBURG 2010, S. 4 f.; VERBURG et al. 2005, S. 28).

4.3.5.2 Konversionselastizität

Die Konversionselastizität ist ein Indikator für die Konversionskosten (vgl. Kap. 4.3.5.2), die aufgebracht werden müssen, um die jeweiligen Landnutzungstypen zu konvertieren (WASSENAAR et al. 2007, S. 90). Sie hängt aber auch stark von der Reversibilität der Landnutzungsveränderungen ab. Landnutzungseinheiten mit hohen Kapitalinvestitionen oder irreversiblen Auswirkungen auf die Umwelt, beispielsweise Wohngebiete, können nicht so leicht konvertiert werden und sind eher statisch. Es ist somit eher unwahrscheinlich, dass diese Flächen in absehbarer Zukunft einer neuen Landnutzung unterstehen werden. Andere Flächen können sich hingegen eher verändern, sobald sie für eine andere Nutzung besser geeignet sind. Dies gilt beispielsweise für landwirtschaftliche Nutzflächen und urbane Flächenerweiterungen. Dementsprechend wird die Elastizität für jeden Landnutzungstyp spezifisch festgelegt und kann von 0 (leichte Konversion, Beispiel Landwirtschaft) bis 1 (irreversible Konversion, Beispiel Wohngebiete) reichen. Je höher dabei der entsprechende Wert ist, desto schwieriger ist es, den jeweiligen Landnutzungstyp in einen anderen zu konvertieren. Die Konversionselastizitäten innerhalb des Simulationsmodells beruhen auf Expertenwissen und können

während der Kalibrierung des Modells modifiziert werden (VERBURG 2010, S. 4; VERBURG et al. 2002, S. 397).

4.4 Berechnung der Modellgüte zur Ermittlung von Vorhersagegenauigkeiten

Zur Bestimmung der Vorhersagegenauigkeit oder Güte eines Landnutzungsmodells können sehr unterschiedliche Techniken angewendet werden, die jeweils bestimmte Vor- und Nachteile aufweisen. Zentraler Bestandteil des angewendeten Algorithmus ist dabei immer die Erfassung und Quantifizierung von Unterschieden zwischen dem Modellergebnis und einer oder mehreren Referenzkarten. Die meisten existierenden Algorithmen basieren auf statistischen Verfahren zur Auswertung von Kontingenztabellen, in denen die Gesamtanzahl an Rasterzellen in verschiedenen Kategorien oder Landnutzungsklassen einander gegenübergestellt werden. Bei dieser Cell-by-Cell- Methode werden jedoch die räumlichen Muster und Beziehungen der Landnutzungen nicht berücksichtigt (HAGEN-ZANKER 2006, S. 166; KUHNERT et al. 2005, S. 975). Eine der bekanntesten statistischen Maßeinheiten zur vergleichenden Analyse ist der Kappa-Index, der anhand einer Error-Matrix die Treffer und Nicht-Treffer in verschiedenen Rasterzellen quantifiziert (vgl. Kap. 3.3.2). Dieser wurde von HAGEN (2003) durch den Einbezug von Komponenten aus der Fuzzy-Set-Theorie modifiziert, um die räumlichen Muster und Beziehungen zwischen den Landnutzungstypen zu berücksichtigen. Der so genannte Fuzzy-Kappa-Index K_{Fuzzy} besteht aus zwei verschiedenen Komponenten von Fuzziness: Fuzziness of Location berücksichtigt den Aspekt, dass eine Landnutzungsklasse an einem spezifischen Standort auch als präsent interpretiert werden kann, wenn sie sich in der unmittelbaren Nähe des Standortes befindet. Fuzziness of Category beinhaltet die Feststellung, dass sich manche Landnutzungsklassen ähnlicher sind als andere. Daraus ergibt sich, dass eine Rasterzelle auch verschiedenen Klassen angehören kann.

Eine vergleichende Analyse von Landnutzungskarten kann auch auf dem Konzept der Landschaftsmaße (Landscape Pattern Metrics) basieren. Diese werden aus thematisch-kategorialen Karten gewonnen und können als quantitative und aggregierte Maßeinheiten/Indizes definiert werden, die die räumliche Heterogenität bei einer bestimmten räumlichen Auflösung beschreiben. Die jeweiligen Indizes der Modell- und Referenzkarte werden anschließend miteinander verglichen, um die jeweiligen Unterschiede der beiden Karten zu quantifizieren (KUHNERT et al. 2005, S. 976; LESSCHEN et al. 2005, S. 62 f.; HEROLD et al. 2003, S. 297 f.).

4.4.1 Erfassung der Modellgüte anhand eines Multiple Resolution Comparison

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Modellperformanz ist der so genannte Multiple Resolution Comparison (MRC). Diese Technik, erstmals von CONSTANZA (1989) vorgestellt, ist vor allem durch den Einbezug von Zell-Nachbarschaften sowie der Berücksichtigung von räumlichen Mustern charakterisiert und wird in zahlreichen Arbeiten zur Erfassung der Modellgüte verwendet und empfohlen (vgl. GOETZKE 2010; PONTIUS JR. et al. 2008; OREKAN 2007; PONTIUS JR. & SPENCER 2005; PONTIUS JR. et al. 2004; PONTIUS & MALIZIA 2004; PONTIUS JR. 2002). Bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Ansatz wird die räumliche Auflösung des Modellergebnisses und der Referenzkarte durch eine Moving Windows-Statistik, also dem Bewegen eines „Fensters“ definierter Größe und Form über die Daten hinweg, schrittweise verringert. Dabei werden die einzelnen Landnutzungspixel, die sich unter dem Fensterausschnitt befinden, statistisch aggregiert. Die so entstandenen aggregierten Rasterzellen beinhalten dabei den prozentualen Anteil der verschiedenen Landnutzungsklassen.

Für jeden Standort des Moving Windows wird die prozentuale Übereinstimmung der einzelnen Klassen zwischen Modellergebnis und Referenzkarte berechnet, wobei sich die Größe des Fensters mit jeder Auflösungsstufe verdoppelt, d. h. die Analyse startet mit einem Fenster von 1 x 1 Pixel, was einem „cell-by-cell“-Vergleich entspricht, wird dann auf eine Größe von 2 x 2, schließlich 4 x 4 Pixel etc. erhöht, bis die Fenstergröße dem gesamten Untersuchungsgebiet entspricht (vgl. Abb. 51). Mit zunehmender Aggregationsstufe nimmt der Anteil korrekt modellierter Pixel zu, da der Lagefehler schließlich immer weiter reduziert wird (GOETZKE 2010, S. 94 f.; KUHNERT et al. 2005, S. 977 f.; PONTIUS JR. & SPENCER 2005, S. 218; PONTIUS JR. 2002, S. 1041).

In den meisten Fällen gleicht das Untersuchungsgebiet nicht einem perfekten Quadrat, wodurch während des Aggregationsvorgangs Rasterzellen mit einer unterschiedlichen Anzahl an zugrundeliegenden Pixeln produziert werden. Daher muss jede Rasterzelle bei der Berechnung der Gesamtübereinstimmung der Karten entsprechend ihrer Aussagekraft, die durch die Anzahl an mit einbezogenen Pixeln in der Rasterzelle bestimmt wird, gewichtet werden. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Berechnung der Gesamtübereinstimmung TA zwischen der Referenzkarte R und der Modellkarte M bei Auflösung g :

$$TA_g = \frac{\sum_{n=1}^{Ng} [W_n \sum_{lu=1}^{LU} \text{MIN}(R_{n,lu}, M_{n,lu})]}{\sum_{n=1}^{Ng} W_n} \quad (19)$$

wobei jede Rasterzelle n das Gewicht W_n hat, $R_{n,lu}$ bzw. $M_{n,lu}$ den Anteil der Landnutzungsklasse lu pro Rasterzelle der jeweiligen Karte R / M beschreibt und Ng die Gesamtanzahl an Rasterzellen des Untersuchungsgebietes bei der gegebenen Auflösung definiert (PONTIUS JR. 2002, S. 1044).

Zum besseren Vergleich der Performanz verschiedener Modelle bietet es sich an, eine gewichtete Gesamtgüte TA_w aus den Ergebnissen der verschiedenen Aggregationsstufen zu berechnen. Hierbei ist es möglich, den kleineren Aggregationsstufen, die einen potenziell geringeren Anteil korrekt modellierter Pixel aufweisen, mehr Gewichtung zu verleihen als den größeren. Dies ist vor allem sinnvoll, wenn die Lagegenauigkeit der Landnutzungsklassen von Interesse ist. Nach CONSTANZA (1989, S. 207) kann für die Berechnung der gewichteten Gesamtübereinstimmung folgende Formel angewendet werden:

$$TA_w = \frac{\sum_{g=1}^n TA_g * e^{-k(g-1)}}{\sum_{g=1}^n e^{-k(g-1)}} \quad (20)$$

wobei k eine Konstante ist, die festlegt, wie viel Aussagekraft kleineren oder größeren Aggregationsstufen gegeben werden soll. So bedeutet $k=0$, dass allen Aggregationsstufen dasselbe Gewicht zugeteilt wird. Ist $k=1$, werden vor allem die ersten Aggregationsstufen am stärksten gewichtet. Die Gewichtung der Konstanten hängt eng mit den Zielen zusammen, die mit der Modellierung verfolgt werden sollen. Zum Vergleich von räumlichen Mustern werden meist Werte von $k \approx 0,1$ empfohlen, was allerdings nur als Richtlinie anzusehen ist (CONSTANZA 1989, S. 208).

4.4.2 Bestimmung der Modellperformanz unter Verwendung eines Nullmodells

Neben dem Vergleich der erzeugten Modellkarte mit der Referenzkarte, die das Idealergebnis des Landnutzungsmodells zu Zeitpunkt t_2 darstellt, ist es sinnvoll, das Modellergebnis auch einem so genannten Nullmodell als zweite Vergleichskarte gegenüber zu stellen. Das Nullmodell prognostiziert die pure Persistenz zwischen Zeitpunkt t_1 und t_2 . Zur Bewertung eines Modellergebnisses, das auf t_1

als Modell-Startzeitpunkt beruht, wird somit Zeitpunkt $t1$ als zweite Referenzkarte zur vergleichenden Analyse des Modellergebnisses verwendet. Gründe für die Verwendung eines Nullmodells liegen nach PONTIUS JR. & MALANSON (2005, S. 256) vor allem darin, dass die Modellgüte unter Verwendung eines Nullmodell besser abgeschätzt werden kann. Denn ein hoher Prozentsatz an Genauigkeit impliziert nicht unbedingt, dass das jeweilige Landnutzungsmodell eine gute Vorhersagegenauigkeit besitzt. So liegen typische Raten von Landnutzungsveränderungen bei 10%, was bedeutet, dass das entsprechende Nullmodell eine Genauigkeit von 90% besitzt. Durch den Vergleich mit diesem zusätzlichen Referenzmodell bekannter Güte kann dementsprechend auch bei vermeintlich hohen Genauigkeitswerten abgeschätzt werden, ob das Modell eine wirkliche gute Vorhersagekraft besitzt. Dies ist nicht unbedingt der Fall, wenn die Genauigkeit beispielsweise unter 90% liegt. In vielen Landnutzungsmodellen kann so festgestellt werden, dass das Nullmodell vor allem in kleinen Aggregationsstufen eine höhere Genauigkeit besitzt. Die Aggregationsstufe, bei der die Genauigkeit des Modellergebnisses ebenso hoch ist wie die des Nullmodells, wird als Nullauflösung bezeichnet (vgl. Abb. 45). Die Nullauflösung gibt somit an, ab welcher Aggregationsstufe dem Landnutzungsmodell eine gute Vorhersagekraft zugestanden werden kann (PONTIUS JR. & MALANSON 2005, S. 246; PONTIUS JR. et al. 2004, S. 446 f.).

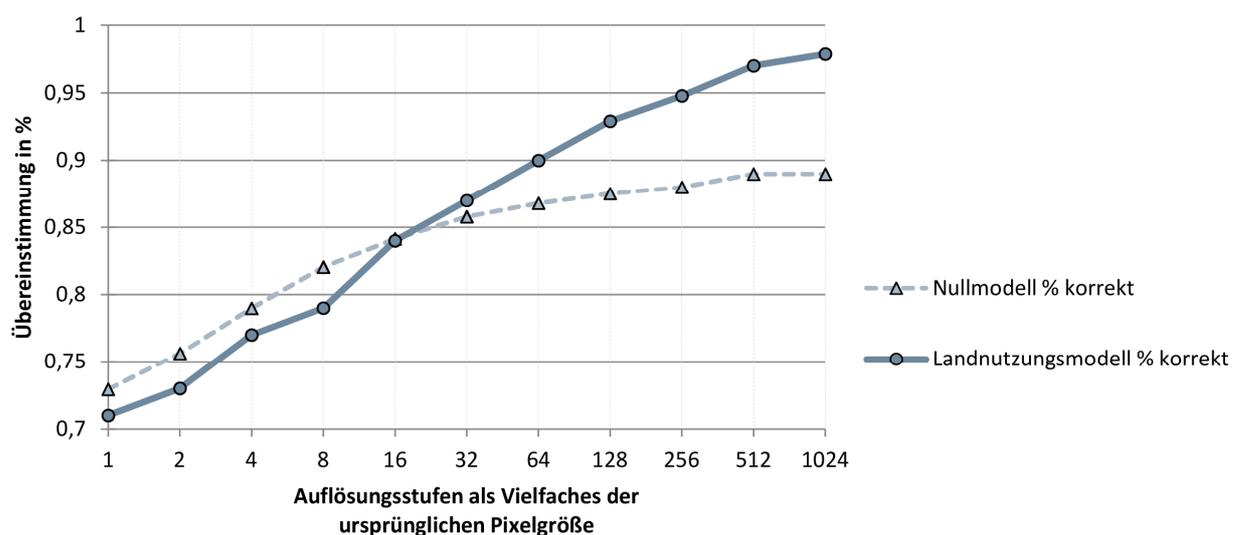


Abb. 51: Übereinstimmung des Modellergebnisses in % mit der Referenzkarte und dem Nullmodell (Quelle: Verändert nach GOETZKE 2010, S. 96 und PONTIUS JR. et al. 2004, S. 455)

4.5 Parametrisierung sowie Kalibrierung und Validierung des Dyna-CLUE 2 Modells

Durch die Erfassung der agrarischen Landnutzung in den Jahren 1986/88, 1998 und 2010 sind optimale Voraussetzungen für die Parametrisierung und Kalibrierung anhand der in Kapitel 4.3 vorgestellten Modellkenngrößen sowie für die Validierung des Simulationsmodells gegeben. Durch die Verwendung eines tri-temporalen Datensets kann eine klare zeitliche Trennung zwischen der Kalibrierung und der Validierung des Modells ermöglicht werden (vgl. Abb. 52), was unerlässlich für ein transparentes und klar nachvollziehbares Landnutzungsmodell ist (PONTIUS JR. et al. 2004, S. 446). Kalibrierung bezeichnet dabei die Schätzung und Einstellung der Modellparameter und Randbedingungen, um die Übereinstimmung zwischen Modell-Output und dem Referenzdatensatz zu verbessern. Die Validierung dient hingegen als Beweis dafür, dass das Modell innerhalb seines Einsatz-

bereiches eine zufriedenstellende Genauigkeit besitzt, die im Einklang mit der beabsichtigten Verwendung des Modells steht (RYKIEL JR 1996, S. 232).

Bei der Kalibrierung wird demnach versucht, die Parameter und Einstellgrößen des Simulationsmodells so anzupassen, dass es die Realität möglichst treffend abzubilden scheint (BERGER 2004, S. 82; LOONEN et al. 2007, S. 2). In der vorliegenden Arbeit werden daher zunächst die agrarischen Landnutzungsveränderungen zwischen 1986/88 und 1998 durch die Erfassung und Justierung der verschiedenen Parameter im Rahmen des Kalibrierungsprozesses nachmodelliert. Die reproduzierten Landnutzungskarten von 1998 werden anschließend mit der realen Referenzkarte 1998 und einem Nullmodell anhand des Multiple Resolution Comparison verglichen, um das Modell mit der höchsten Modellgüte und den somit besten Parametereinstellungen zu erfassen. Dieses wird in einem letzten Schritt schließlich validiert, indem die agrarische Landnutzung 2010 mit den zuvor verwendeten Modelleinstellungen und Parametern modelliert und mit den Referenzdaten 2010 verglichen wird. Ist die Modellgüte ausreichend hoch, kann das Landnutzungsmodell für die Simulation agrarischer Landnutzungsdynamiken auf Teneriffa herangezogen werden.

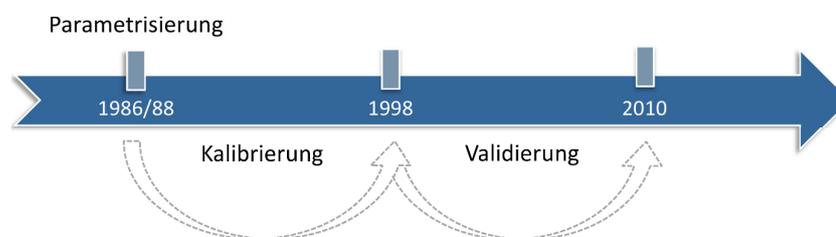


Abb. 52: Verwendung der Fernerkundungsdaten (Referenzdatensätze) zur Parametrisierung sowie Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells (Quelle: Eigene Darstellung)

Im Folgenden werden die Standortfaktoren und räumlichen Beschränkungen als Teil der Parametrisierung sowie die Modellparameter, die zur besten Modellgüte geführt haben, im Detail vorgestellt.

4.5.1 Auswahl und Aufbereitung der Landnutzungsdaten und Antriebskräfte

Landnutzungssimulationen mit CLUE-s werden je nach Datenverfügbarkeit, Größe des Untersuchungsgebietes und Anwendungszweck in sehr unterschiedlicher räumlicher Auflösung durchgeführt. So implementieren BARRETO et al. (2013) und WILLEMEN et al. (2012) Landnutzungsmodelle mit einer Rastergröße von 100 x 100 m, während ZHENG et al. (2012), JUDEX (2008) und CASTELLA et al. (2007) 250 x 250 m, sowie VERBURG & OVERMARS (2009) und WASSENAAR et al. (2007) Modellsimulationen mit einer räumlichen Auflösung von 1000 x 1000 m durchführen.

Das Untersuchungsgebiet Teneriffa ist sowohl in orographischer als auch in biophysikalischer Hinsicht durch sehr kleinräumige Unterschiede gekennzeichnet. Um unter diesen Rahmenbedingungen eine ausreichend genaue Aufnahme von Standortfaktoren für die verschiedenen Landnutzungsklassen zu gewährleisten, wird daher eine räumliche Auflösung von 50 x 50 m für die Simulation der zukünftigen Landschaftsdynamiken auf Teneriffa gewählt. Hierdurch ist eine hohe Genauigkeit hinsichtlich der Abbildung des räumlichen Landnutzungsmusters sowie der detaillierten Erfassung der Modellparameter möglich und die benötigte Rechendauer mit ca. 30 Minuten bis zwei Stunden pro Modelldurchlauf adäquat. Unter Verwendung der Ausgangsauflösung der Fernerkundungsdaten (10 x 10 m) würde die Anzahl der Zellen im Rastergrid des Untersuchungsgebietes von ca. 2 Mio. auf über 10 Mio. Pixel ansteigen und eine Vervielfachung der Rechendauer verursachen. Daher müssen die Landnutzungsdaten der fernerkundlichen Analyse sowie alle weiteren möglichen Standortparameter,

die Eingang in das vorliegende Modell finden, durch entsprechende Aggregations-, Resampling- und weitere Bearbeitungsverfahren so angepasst werden, dass sie dieselbe räumliche Abgrenzung haben, eine räumliche Auflösung von 50 x 50 m besitzen und als ASCII-Format vorliegen.

4.5.1.1 *Aufbereitung sowie Aggregation der agrarischen Landnutzungs-klassifikationen und landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche*

Die Landnutzungsdaten für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells sind auf unterschiedliche Weise generiert worden. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, wurden Informationen zur rezenten landwirtschaftlichen Nutzung innerhalb des Untersuchungsgebietes anhand einer objektbasierten Klassifikation der verschiedenen Satellitenbilddaten von SPOT 1 (1986-88), SPOT 4 (1998) und RapidEye (2010) gewonnen. Die landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche enthält sowohl Informationen über die rezente landwirtschaftliche Nutzung als auch über Langzeitbrachflächen, die aufgrund natürlicher Sukzessionsvorgänge nicht in den Satellitenbilddaten klassifizierbar waren. Sie wurde durch die Analyse hochauflösender Orthophotos aus dem Jahr 2009 erfasst (vgl. Kap. 3.5).

Durch die schrittweise Zusammenführung der rezenten Landwirtschaftsflächen mit der agrarisch beeinflussten Gesamtfläche können die essentiellen Informationen beider Analysetechniken für die Landnutzungsmodellierung bereit gestellt und zusätzliches Wissen über infrastrukturelle Flächenumwandlungen gewonnen werden (vgl. Abb. 53).

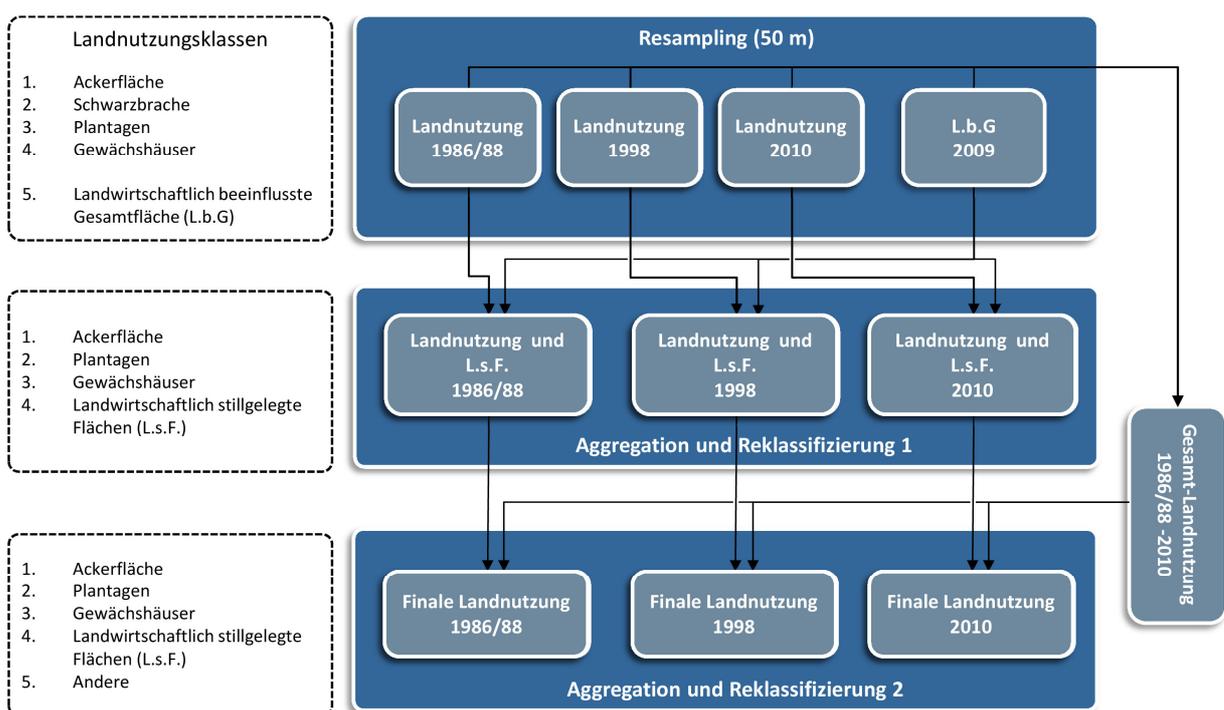


Abb. 53: Verfahren zur Zusammenführung und Aufbereitung der agrarischen Landnutzungs-klassifikationen und landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche (Quelle: Eigene Darstellung)

Hierfür müssen zunächst alle vier Datensätze einem Resampling-Verfahren unterzogen werden. Nach umfassender Analyse gängiger Filter-Techniken wie Cubic Convolution, Nearest Neighbourhood, Bilinear Interpolation und Majority-Resampling (LILLESAND et al. 2008, S. 487 f.; CAMPBELL 2006, S. 310 f.) wird letztgenannter Algorithmus zur Umrechnung der Daten auf 50 x 50 m verwendet. Dieser gibt die Verteilungsstruktur und den prozentualen Anteil der einzelnen Klassen im Vergleich zum originalen Landnutzungsmuster am besten wieder.

Anschließend werden die Landnutzungsdaten und die Informationen aus den Orthophotos aggregiert. So kann für jeden Aufnahmezeitpunkt ein einzelner Geodatenatz generiert werden, der es ermöglicht, die jeweilig rezente landwirtschaftliche Nutzung und landwirtschaftlich stillgelegte Flächen (Langzeitbrachflächen) pro Zeitabschnitt zu betrachten. Dies ist bei der separaten Betrachtung der einzelnen Datensätze nicht möglich. Die Satellitenbilddaten liefern keine Informationen zu den Langzeitbrachflächen der einzelnen Zeiträume und die Luftbildaufnahmen beinhalten neben den Langzeitbrachen auch rezente Nutzungen, die für die vorliegende Auswertung jedoch nicht von Interesse sind. Sie können durch das verwendete texturbasierte Verfahren jedoch nicht von den stillgelegten Agrararealen getrennt werden. Durch die Kopplung der Datensätze entsteht somit eine Landnutzungskarte mit den zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt rezent genutzten Ackerflächen und den vorhandenen Langzeitbrachen. Denn Gebiete, die beispielsweise nach der Überlagerung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche durch die Landnutzungsdaten von t_1 noch verbleiben, können schließlich als Langzeitbrachflächen des Zeitraums t_1 bezeichnet werden.

Nach der Aggregation werden die einzelnen Datensätze reklassifiziert. Hierbei müssen die zwei Landnutzungsklassen Ackerflächen und Schwarzbrache zur Hauptklasse Ackerfläche fusioniert werden. Wie in Kapitel 3.2.3 dargestellt, fanden die Aufnahmen der Satellitenbilddaten während sehr unterschiedlicher saisonaler Bedingungen (sowohl im Frühjahr als auch im Herbst) statt, wodurch Anbauermine und Erntezeitpunkte der Feldfrüchte in der Gesamtbetrachtung der Insel stark variieren und eine ganzheitliche Erfassung von Standortfaktoren für Schwarzbrachen unmöglich ist. Zudem ist die zeitliche Auflösung der vorliegenden Landnutzungsmodellierung mit Jahresintervallen zu gering für eine Modellierung von Brachzeiten. Somit sind nach der Aggregation und der Reklassifikation vier verschiedene Landnutzungstypen vorhanden: Ackerflächen, Plantagen, Gewächshäuser und Langzeitbrachflächen.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass einige landwirtschaftlichen Nutzflächen im Laufe des Analysezeitraumes nicht nur brachgefallen sind, sondern auch für gewerbliche Zwecke eine Umnutzung erfahren haben. So ist gerade in küsten- und siedlungsnahen Gebieten des Untersuchungsgebiets auf zahlreichen Ackerflächen Wohn- und Industrieraum geschaffen worden. Solche Flächen spielen für die Untersuchung der agrarischen Landnutzungsdynamik auf Teneriffa eine große Rolle, da auch in Zukunft Siedlungserweiterungen auf Teneriffa stattfinden werden (vgl. NAUMANN 2008). Um letztendlich auch diese Flächenumwidmungen in die Modellierung mit einbeziehen zu können, werden zunächst alle originalen Landnutzungsklassifikationen zu einer Gesamt-Landnutzungsfläche (1986/88-2010) aggregiert und anschließend mit den bereits modifizierten Landnutzungsklassifikationen fusioniert. Hierdurch erhalten alle Klassifikationen eine einheitliche räumliche Untersuchungsgebietsabgrenzung²⁰. Alle Flächen, die innerhalb dieser Abgrenzung nicht zu den bereits aufgeführten Landnutzungstypen gehören, werden zur Klasse Andere reklassifiziert (vgl. Abb. 54.). Diese Klasse enthält nun für jeden Untersuchungszeitraum die Flächen, die zu Zeitpunkt t_1 als landwirtschaftliche Nutzflächen detektiert wurden, zu Zeitpunkt t_2 allerdings nicht mehr klassifiziert werden konnten, da zwischenzeitlich eine Konversion zu Siedlungsflächen stattfand. Somit sind sie folglich auch nicht bei der Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche erfasst worden. Zu einem sehr geringen Prozentsatz beinhaltet diese Klasse zudem Ackerflächen, die zu Zeitpunkt t_1 noch nicht

²⁰ Die Untersuchungsgrenze auf die ganze Insel zu erweitern, ist für den vorliegenden Fall nicht notwendig, da landwirtschaftliche Flächenzunahmen auf Teneriffa fast ausschließlich durch die Reaktivierung von Langzeitbrachflächen stattfinden. Hierdurch können Kosten eingespart werden, da die für die Landwirtschaft dringend benötigten Trockenmauern zur Terrassierung der Hänge bereits angelegt sind.

vorhanden waren, zu Zeitpunkt t_2 jedoch als Ackerfläche klassifiziert wurden, also Ackerflächenzunahmen, die ebenfalls nicht bei der Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche registriert wurden.

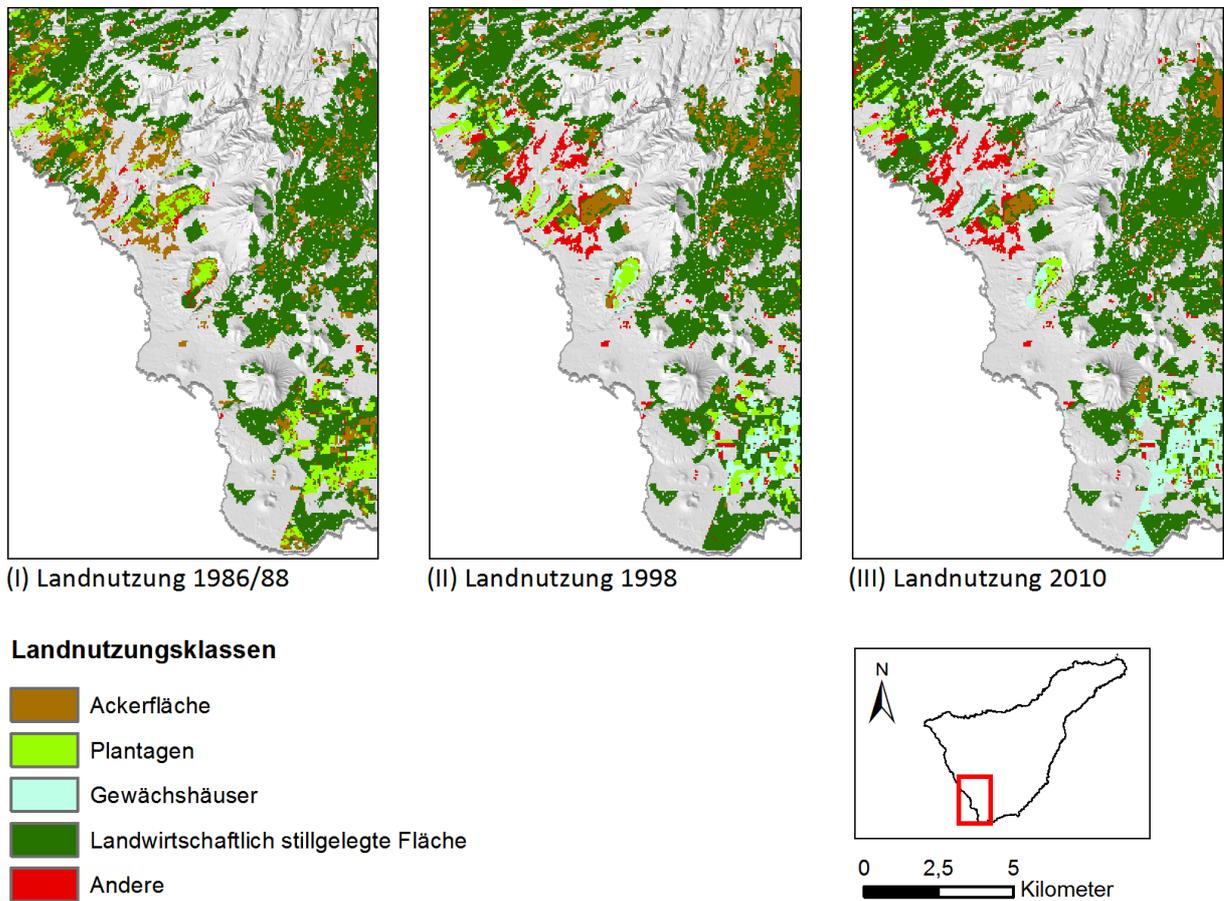


Abb. 54: Exemplarische Darstellung der agrarischen Landnutzung 1986/88, 1998 und 2010 (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

4.5.1.2 Auswahl und Aufbereitung der sozioökonomischen sowie biophysikalischen Eingangsparameter

Die Selektion möglicher determinierender Antriebskräfte der agrarischen Landnutzungsveränderungen basiert zum einen auf Expertenwissen, das z.B. durch Geländebegehungen erworben wurde. Zum anderen geben allgemein verbreitete Theorien (vgl. WALKER 2004; LAMBIN et al. 2001) zu Landnutzungsveränderungen sowie Untersuchungen in klimatisch und ökonomisch vergleichbaren Regionen Hinweise auf tatsächlich relevante Parameter. So konnten CORBELLE-RICO et al. (2012) und REY BENAYAS (2007) durch umfassende Literaturrecherchen sowie Analysen agrarischer Landnutzungsveränderungen in Galizien (Spanien) verschiedene biophysikalische, strukturelle und sozioökonomische Parameter ausmachen, die auch für das vorliegende Untersuchungsgebiet einen hohen Stellenwert besitzen. Ergebnisse aus anderen Arbeiten, beispielsweise von DÍAZ et al. (2011) und PARCERISAS et al. (2012) zu Landnutzungsveränderungen in Südchile und der spanischen Mittelmeerküste, tragen des Weiteren zu einer Eingrenzung der wichtigsten Einflussfaktoren bei.

Für die vorliegende Arbeit wurden zahlreiche potenzielle Antriebskräfte ausgewählt, von denen angenommen werden konnte, dass sie zur Erklärung des Landnutzungsmusters und dessen Veränderungen beitragen. Im Laufe der statistischen Analysen wurden die Determinanten hinsichtlich ihrer

tatsächlichen Relevanz für die agrarische Dynamik auf Teneriffa verifiziert, einige jedoch auch falsifiziert. Da diese Daten aus sehr unterschiedlichen Quellen stammen, besitzen sie zum Teil verschiedene räumliche Auflösungen und einen unterschiedlichen Informationsgehalt. Für eine quantifizierte und vor allem raumbezogene Analyse unter der Prämisse, den höchstmöglichen Detailgrad zu erhalten, müssen einige Datensätze daher entsprechend aufbereitet und schließlich auf die Untersuchungsgebietsabgrenzung in Form eines Subsets zugeschnitten werden.

a. Biophysikalische Parameter

Die räumliche Lage des Untersuchungsgebiets im Wirkungsbereich des Nordost-Passats, die hypso-metrischen Gegebenheiten sowie die geologische Entwicklungsgeschichte bewirken sehr vielfältige und kleinräumige Unterschiede in Bezug auf das Klima, die Qualität des Bodens und das Relief. Durch die komplexe Interaktion dieser biophysikalischen Merkmalsbereiche werden grundlegende Gunst- und Ungunsträume für die Landwirtschaft geschaffen und landwirtschaftliche Anbausysteme entsprechend an den Raum angepasst. Tab. 8 gibt einen Überblick über die in der Modellierung verwendeten biophysikalischen Antriebskräfte. Hierbei, wie auch bei der Beschreibung der übrigen Parameter, beziehen sich alle Wertbereiche auf die Untersuchungsgebietsabgrenzung, also auf die landwirtschaftlich beeinflusste Gesamtfläche.

Die Geländehöhe und die Hangneigung sind generell eng gekoppelt mit der jeweiligen landwirtschaftlichen Produktionstechnik. Während an steileren Hängen nur Terrassenfeldbau mit entsprechenden Anbaufrüchten realisiert werden kann, wird auf ebenen und küstennahen Flächen Plantagenwirtschaft betrieben. Die beiden Parameter werden aus einem Geländemodell mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 m abgeleitet und durch ein räumliches Aggregationsverfahren, bei dem der Mittelwert aller Input-Zellen innerhalb einer angegebenen Distanz für das Resampling herangezogen wird, auf eine Pixelauflösung von 50 x 50 m reduziert.

Daten zur Ertragsfähigkeit der Böden können nur indirekt durch den kombinierten Einbezug der Hauptbodentypen (klassifiziert nach USDA Soil Taxonomy, vgl. Kap. 2.1.1.2) und magmatischen Gesteine als Rasterdatensatz in das Landnutzungsmodell mit einfließen. Durch ihre unterschiedliche Bodenfruchtbarkeit begünstigen oder erschweren sie die landwirtschaftliche Inwertsetzung. So werden beispielsweise Vertisole aufgrund ihrer humus- und tonreichen Erde häufig als fruchtbare Ackerböden genutzt, während Inceptisole aufgrund ihres schwach ausgebildeten vertikalen Profils nur bedingt für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignet sind.

Klimatische Informationen sind über die WorldClim Database, einer Open-Source-Plattform für globale klimatische Daten mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km, erhältlich und können als Raster in die Modellierung miteinbezogen werden (vgl. VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1173; HUMANS et al. 2005). Hier spielen vor allem drei Variablen eine statistisch signifikante Rolle, die auf Grundlage der Durchschnittswerte der Zeitperiode 1950 bis 2000 berechnet wurden. Die Jahresdurchschnittstemperatur hat vor allem auf die vertikale Verteilung der Anbaufrüchte einen großen Einfluss. Während in küstennahen Gebieten subtropische Früchte wie Bananen, Zitrusfrüchte etc. angebaut werden können, konzentriert sich die Landwirtschaft in höher gelegenen Teilen der Insel auf den Anbau von Früchten gemäßigter Zonen wie beispielsweise Kartoffeln und Wein. Die Temperatur-Saisonalität, definiert als „[...] *the amount of temperature variation over a given year (of averaged years) based on the standard deviation (variation) of monthly temperature averages*“ (O'DONNELL & IGNIZIO 2012, S. 5), kann als Maßeinheit für die Temperaturvariabilität im Untersuchungsgebiets über das Jahr hinweg angesehen werden. Je größer die Standardabweichung ist, desto größer ist die Variabilität der

Temperatur. Die Höhe des durchschnittlichen Jahresniederschlags besitzt durch das zentral gelegene Vulkanmassiv des Teide-Pico-Viejo-Komplexes und dem Einfluss des Nordost-Passates an der Nordseite des Untersuchungsgebiets eine sehr hohe Spannweite und kann als eine weitere essentielle Determinante für die agrarischen Landnutzungsdynamiken angesehen werden.

Determinanten	Beschreibung	Maßeinheit und Wertebereich	Datenquelle
DTM_ELEVATION	Geländehöhe	Meter ü. NN (metrisch); 0 bis 1.806 m	GRAFCAN
DTM_SLOPE	Hangneigung	Prozent (metrisch) 0 bis 57,2%	GRAFCAN
SOIL_TYPE	Hauptbodentypen und magmatische Gesteine	Klassen (nominal); 0: Urbane Gebiete 1: Alfisole 2: Andisole 3: Aridisole 4: Entisole 5: Entisole und Sorribas* 6: Inceptisole 7: Lavastrom rezent + anstehendes Gestein 8: Anstehendes Gestein und Entisole 9: Sorribas 10: Sorribas und Entisole 11: Sorribas und Tuff 12: Tuff 13: Tuff und Entisole 14: Tuff und Sorribas 15: Vertisole	FERNANDEZ CALDAS et al. 1982
TEMP_ANNMEAN	Jahresdurchschnitts- Temperatur	Grad Celsius (metrisch); 11,6 bis 21°C	www.worldclim.org
TEMP_SAISONALITY	Temperatur-Saisonalität	Standard deviation *100 (metrisch); 254 bis 402 °C	www.worldclim.org
PRECIPITATION_ANNMEAN	Durchschnittlicher Jahres- niederschlag	Milimeter (metrisch); 250 bis 585 mm	www.worldclim.org
<p>Weitere biophysikalische Parameter, die aufgrund fehlender statistischer Signifikanz nicht in das Modell miteinbezogen wurden: Durchschnittliche monatliche und jährliche Spannweite der Temperatur, Niederschlag-Saisonalität, Hangexposition, Geländeoberflächenkrümmung * bei zwei Einheiten pro Klasse dominiert Erstgenannte.</p>			

Tab. 8: Übersicht über die in der Modellierung verwendeten biophysikalischen Antriebskräfte (Quelle: Eigene Darstellung)

b. Sozioökonomische Parameter

Die sozioökonomischen Parameter (vgl. Tab. 9) umfassen in der vorliegenden Modellierung zunächst Bevölkerungsverteilungsmaße in Form von Bevölkerungsanzahl und -dichte. Diese Zensus-Daten liegen für das Gebiet der Kanarischen Inseln auf Gemeindeebene vor und bieten somit kaum Informationen über die tatsächliche räumliche Verteilung der Bevölkerung. Um dennoch eine höhere räumliche Auflösung der Daten zu erhalten, müssen sie in eine administrative Untereinheit der Gemeindeebene, die so genannten Nuklei der Bevölkerung, disaggregiert werden. Diese Nukleus-Ebene hat keinen offiziellen Status, wird in Spanien dennoch zur detaillierteren Darstellung der

Zensusdaten verwendet. Ein Nukleus wird definiert als eine Gruppe von mindestens zehn Gebäuden, die über Straßen oder Plätze miteinander in Verbindung stehen (vgl. GRUPO ALARCOS, ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA DE CIUDAD REAL 2005).

Zur Disaggregation der Bevölkerungsdaten in die genannte Unterebene sind entsprechende Zusatzinformationen in Form von Vektordaten zur Abgrenzung der einzelnen Nuklei und Informationen aus einer digitalen Straßenkarte nötig. Letztere enthält Daten zu Straßennamen und insbesondere Hausnummern bzw. den zugehörigen Hauseingängen innerhalb des Untersuchungsgebiets in Form eines Punkt-Vektordatensatzes (vgl. Abb. 55). Anhand dieser Hauseingänge kann nun festgestellt werden, wie sich die Bevölkerung auf die einzelnen Nuklei innerhalb einer Gemeinde verteilt.

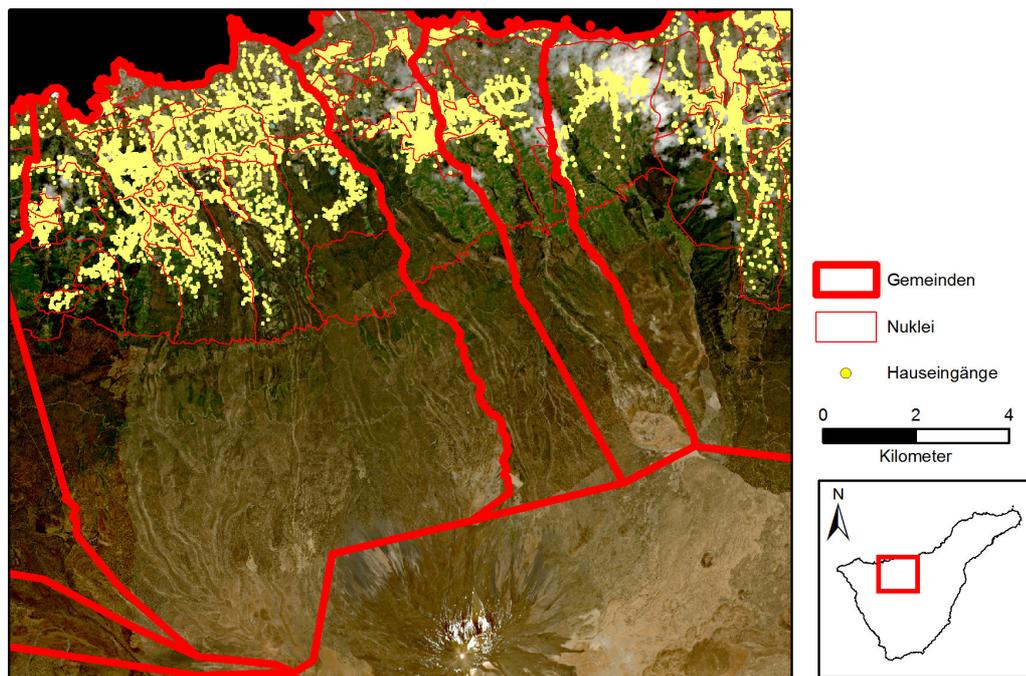


Abb. 55: Darstellung der benötigten Gemeinde-, Nuklei- und Hauseingangsdaten zur Disaggregation der Zensusinformationen (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN, RapidEye-Daten bereitgestellt durch das DLR 2010)

Hierfür wird zunächst die jeweilige Gesamtanzahl der Hauseingänge pro Gemeinde Ent_{mun} sowie die Gesamtzahl der Hauseingänge pro Nukleus Ent_{nuc} durch eine Verschneidung der vorliegenden Datensätze erfasst. Die Bevölkerungsanzahl eines Nukleus errechnet sich dann aus dessen relativem Anteil an Hauseingängen an der Gesamtzahl der Hauseingänge der Gemeinde i , multipliziert mit der Gesamtbevölkerung innerhalb der Gemeinde i . Die Gesamtbevölkerung Pop_{mun} der Gemeinde i setzt sich demnach aus den Populationszahlen der einzelnen Nuklei Pop_{nuc} zusammen. Es gilt somit folgende Formel:

$$Pop_{mun,i} = Pop_{nuc,i1} + Pop_{nuc,i2} + \dots + Pop_{nuc,ij} + \dots + Pop_{nuc,ik}$$

mit: $Pop_{nuc,ik} = Pop_{mun,i} * \frac{Ent_{nuc,ik}}{Ent_{mun,i}}$ (21)

Die genannte Formel dient zur Berechnung der Bevölkerungsanzahl pro Gemeinde, wird aber ebenso auf die Bevölkerungsdichte angewendet, da auch diese demographische Einheit stark abhängig von der räumlichen Verteilung der Bevölkerung ist.

Als weiteren sozioökonomischen Parameter werden Arbeitskräfte im primären Sektor in die Landnutzungsmodellierung miteinbezogen. Diese Determinante, die direkte Verknüpfungen zur Verfügbarkeit von in der Landwirtschaft Beschäftigten in den einzelnen Gemeinden zulässt, kann durch o.g. Formel nicht in die Nukleus-Ebene disaggregiert werden. Arbeitskräfte sind im Vergleich zu den vorgestellten Bevölkerungsparametern nicht ortsgebunden und können somit nicht in Beziehung zur Verteilung der Hauseingänge gesetzt werden. Diese Antriebskraft ist demnach nur auf Gemeinde-Ebene vorhanden.

Determinanten	Beschreibung	Maßeinheit und Wertebereich	Datenquelle
POP_NUCLEO	Bevölkerungszahl auf Nukleus-Ebene	Personen (metrisch); 0 bis 123.065	Instituto Canario de Estadística
POP_DENSITY_NUCLEO	Bevölkerungsdichte	Personen/km ² (metrisch); 0 bis 8.884	Instituto Canario de Estadística
EMP_Sec1	Arbeitskräfte im primären Sektor	Personen (metrisch); 68 bis 1.661	Instituto Canario de Estadística
Weitere sozioökonomische Parameter, die aufgrund fehlender statistischer Signifikanz nicht in das Modell miteinbezogen wurden: Veränderung der Bevölkerungsdichte, -anzahl zwischen 1986 und 2010, Arbeitskräfte im sekundären und tertiären Sektor, Summe aller Arbeitskräfte, Arbeitslose im primären, sekundären und tertiären Sektor			

Tab. 9: Übersicht über die in der Modellierung verwendeten sozioökonomischen Antriebskräfte (Quelle: Eigene Darstellung)

c. Strukturelle Parameter

Die strukturellen Parameter beinhalten ausnahmslos Distanzmaße, die die Entfernung zu landwirtschaftlich relevanten Einheiten im Untersuchungsgebiet widerspiegeln. Im Sinne des Modells nach VON THÜNEN (1986) spielt bei dieser Art von Parametern vor allem die Rentabilität der landwirtschaftlichen Parzellen eine Rolle. Flächen, die beispielsweise weit entfernt von Hauptverkehrsstraßen und lokalen Absatzmärkten liegen, werden eher aufgegeben als solche, die leicht erreichbar sind und in geringer Distanz zur nächsten Stadt liegen. Diese somit sehr profitbezogenen Determinanten können in gewisser Weise als Variablen für Opportunitätskosten von Agrarland und Arbeitskräften angesehen werden. Je höher diese Kosten aufgrund der räumlichen Lage sind, desto eher werden marginale und arbeitsaufwendige Flächen aufgegeben (DÍAZ et al. 2011, S. 211; EIDG. FORSCHUNGSANSTALT WSL 2005, S. 2). Die im Simulationsmodell verwendeten strukturellen Antriebskräfte sind in Tab. 10 aufgeführt. Die Daten werden durch die Berechnung der euklidischen Distanz jeder Rasterzelle zu den entsprechenden Kernzellen ermittelt und in das benötigte Datenformat konvertiert.

Zur Berechnung der Distanz zu Dörfern und Städten als Indikatorvariable für Ruralität werden alle Orte mit einer Einwohnerzahl größer 500 hinzugezogen. Sie sind lokale Absatzmärkte, dienen als Zwischenlager für landwirtschaftliche Exportprodukte und stellen zugleich Arbeitskräfte für den primären Sektor. Die Distanz zu Straßen bezieht sich auf die Autobahnen und größeren Landstraßen, die den Abtransport der Anbauprodukte sicherstellen und den schnellen Zugang zu den landwirtschaftlichen Parzellen ermöglichen. Generell finden Landaufgaben eher in Gebieten statt, die keinen unmittelbaren oder nur erschwerten Zugang zu Straßen, beispielsweise über kleine Feldwege und Pfade, haben (DÍAZ et al. 2011, S. 211).

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Zugang zu Wasser. Mit einem Anteil von über 50% am Gesamtwasserverbrauch im Jahr 2000 ist die Landwirtschaft, vor allem die exportorientierte Plantagenwirt-

schaft, der größte Konsument der generell sehr knappen Ressource auf der Insel (AGUILERA-KLINK et al. 2000, S. 235). Neben dem in den letzten Jahren verstärkten Einsatz von Wasserentsalzungsanlagen wird für die Bewässerung der Ackerflächen vor allem Wasser aus den Aquiferen der Insel genommen. Die Grundwasserentnahme geschieht dabei traditionell auf zwei Wegen: Zum einen werden waagrechte oder leicht geneigte Stollen, so genannte Galerías, in den Fels gehauen, bis in wasserführende Schichten getrieben und das Wasser mittels gemauerter Kanäle abgeleitet. Diese Galerías sind durchschnittlich drei, teilweise bis zu fünf Kilometer lang. Zum anderen dienen Brunnen zur Entnahme von Wasser aus oberflächenfernen Gesteinsschichten. Diese Bohrungen können zwischen 170 und 300 m tief sein. Zudem finden auch Kombinationen aus beiden Vorgehensweisen statt, wenn beispielsweise Galerías am Grund von Brunnen angelegt werden (POTT et al. 2003, S. 197 f.; AGUILERA-KLINK et al. 2000, S. 235). Die Distanz zu Brunnen sowie zu Wasserentnahmestellen der Galerías wird als weiterer Antriebsfaktor in die Modellierung mit einbezogen. Je weiter die landwirtschaftlichen Nutzflächen vom Zugang zu Wasser entfernt liegen, desto größerer und damit kostenintensiverer Aufwand muss zur Bewässerung der Felder betrieben werden.

Determinanten	Beschreibung	Maßeinheit und Wertebereich	Datenquelle
DIST_SETTLEMENT	Distanz jeder Rasterzelle zu Dörfern und Städten	Meter (metrisch); 0 bis 6.000 m	Ableitung aus Fernerkundungsdaten
DIST_ROADS	Distanz jeder Rasterzelle zu Hauptverkehrsstraßen	Meter (metrisch); 0 bis 5.755 m	Ableitung aus Daten von GRAFCAN
DIST_WELLS	Distanz jeder Rasterzelle zu Grundwasserbrunnen	Meter (metrisch); 0 bis 6.515 m	Ableitung aus Daten von Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF)
DIST_GALERIAS	Distanz jeder Rasterzelle zu Galerías	Meter (metrisch); 0 bis 6.937m	Ableitung aus Daten von CIATF

Tab. 10: Übersicht über die in der Modellierung verwendeten strukturellen Antriebskräfte (Quelle: Eigene Darstellung)

4.5.2 Einfluss der ermittelten Driving Forces auf die landwirtschaftliche Flächendynamik

Für die einzelnen Landnutzungsklassen müssen logistische Regressionsanalysen anhand des Datensatzes 1986/88 durchgeführt werden, um die Beziehungen zwischen deren Auftreten im Raum und den determinierenden Antriebskräften zu analysieren. Durch diese Parametrisierung kann zunächst festgestellt werden, welche unabhängigen Variablen die Auftrittswahrscheinlichkeiten der spezifischen Landnutzung sowohl positiv als auch negativ beeinflussen und wie stark dieser Einfluss letztendlich ist. Des Weiteren kann auf Grundlage der erfassten Antriebskräfte eine Eignungs- oder Wahrscheinlichkeitskarte für jede Landnutzungsklasse generiert werden, die als Input für das Landnutzungsmodell dient.

Bei jeder einzelnen statistischen Analyse müssen die jeweiligen erklärenden Variablen vorab einer Korrelationsanalyse unterzogen werden. Auftretende Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten $> 0,6$ zwischen zwei Variablen werden schließlich durch den Ausschluss einer der beiden Determinanten aus der Analyse beseitigt. Zur Vermeidung von räumlichen Autokorrelationen werden zudem Stichproben von 10% der Pixel jeder Landnutzungsklasse in das statistische Modell miteinbezogen, wodurch sich Fallzahlen N zwischen 9.500 und 12.600 für die Klassen Ackerflächen, Plantagen, landwirtschaftlich stillgelegte Flächen und Andere sowie, aufgrund eines geringeren Auftretens im Untersuchungsraum, eine Fallzahl von 2.500 für Gewächshäuser ergeben. Die Auswahl der Stichpro-

be erfolgt ausgeglichen, d.h. es wird eine ähnliche Anzahl an Pixeln mit dem Wert 0 (Landnutzung tritt nicht auf) und dem Wert 1 (Landnutzung tritt auf) für die statistische Analyse ausgewählt. Die einzelnen Determinanten und ihre wichtigsten Kennzahlen werden in Tab. 11 detailliert aufgelistet.

Variable	Ackerflächen		Plantagen		Gewächshäuser		L.s.F.*		Andere	
KONSTANTE	-1,365	+++	1,275	+	-1,902	+++	1,584	+++	-0,642	+++
	0,255		3,578		0,149		4,873		0,526	
DTM_SLOPE	-0,074	+++	-0,142	+++	-0,207	+++	0,135	+++	-	-
	0,929		0,867		0,813		1,144			
DTM_ELEVATION	-0,001	+++	-0,12	+++	-0,006	+++	0,005	+++	-0,001	+++
	0,999		0,988		0,994		1,005		0,999	
SOIL_TYPE_1 ALFISOL	1,639	+++	-2,698	+++	-1,547	++	2,062	+++	-	-
	5,150		0,067		0,213		7,861			
SOIL_TYPE_2 ANDISOL	-0,612	++	-17,32	+	-16,86	+	1,833	+++	-	-
	0,542		0,000		0,001		6,250			
SOIL_TYPE_3 ARIDISOL	-2,081	+++	-0,413	++	0,660	+	3,493	+++	-	-
	0,125		0,661		1,934		32,88			
SOIL_TYPE_4 ENTISOL	-1,610	+++	0,292	+	1,352	+++	2,567	+++	-	-
	0,200		1,339		3,867		13,033			
SOIL_TYPE_5 ENTISOL + SORRIBA	-0,357	+	-0,406	+	-18,92	+	1,660	+++	-	-
	0,700		0,667		0,001		5,261			
SOIL_TYPE_6 INCEPTISOL	-1,585	+++	-0,353	+	-19,14	+	3,383	+++	-	-
	0,205		0,703		0,001		29,459			
SOIL_TYPE_7 LAVASTROM_REZENT + ANSTEHENDES GESTEIN	-22,61	+	-0,589	+	-0,642	+	5,673	+++	-	-
	0,001		0,555		0,526		291,03			
SOIL_TYPE_8 ANSTEHENDES GESTEIN + ENTISOL	-1,790	+++	0,141	+	1,377	++	3,554	+++	-	-
	0,167		1,151		3,964		34,965			
SOIL_TYPE_9 SORRIBA	2,051	+++	-0,512	+	-17,03	+	0,805	+	-	-
	7,775		0,599		0,001		2,236			
SOIL_TYPE_10 SORRIBA + ENTISOL	0,086	+	0,065	+	-17,97	+	1,173	+++	-	-
	1,090		1,068		0,001		3,232			
SOIL_TYPE_11 SORRIBA + TUFF	-1,030	+++	-1,365	++	-18,18	+	2,381	+++	-	-
	0,357		0,255		0,001		10,815			
SOIL_TYPE_12 TUFF	-21,84	+	-1,149	+++	0,336	+	3,994	+++	-	-
	0,001		0,317		1,399		54,269			
SOIL_TYPE_13 TUFF + ENTISOL	-21,87	+	-1,439	+	1,005	+	4,600	+++	-	-
	0,001		0,237		2,733		99,495			
SOIL_TYPE_14 TUFF + SORRIBA	-1,176	+++	-0,648	+	-18,80	+	4,313	+++	-	-
	0,308		0,523		0,000^e		74,637			
SOIL_TYPE_15 VERTISOL	-2,304	+++	-0,018	+	0,436	+	3,789	+++	-	-
	0,099		0,982		1,546		44,231			

Variable	Ackerflächen		Plantagen		Gewächshäuser		L.s.F.*		Andere	
TEMP_ANNMEAN	-	-	-0,469	+++	-	-	-	-	-	-
	-		0,626		-		-			
TEMP_SAISONALITY	-	-	0,048	+++	-	-	-	-	-	-
	-		1,049		-		-			
PRECIPITATION_ANNMEAN	0,011	+++	-	-	-0,011	+++	-0,020	+++	0,004	+++
	1,011		-		0,988		0,980		1,004	
POP_NUCLEO	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,001	+++
	-		-		-		0,999			
POP_DENSITY_NUCLEO	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	+++
	-		-		1,001					
EMP_SEC1	-	-	0,001	+++	-	-	-	-	-	-
	-		1,000^b		-		-			
DIST_SETTLEMENT	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,001	+++
	-		-		-		0,999			
DIST_ROADS	-0,001	+++	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,999		-		-					
DIST_WELLS	-	-	-0,001	+++	-	-	-	-	-0,001	+++
	-		0,999		-		0,999			
DIST_GALERIAS	-	-	-0,001	+++	-	-	-	-	-	-
	-		1,000^a		-		-			
AUC-WERT	0,821		0,935		0,906		0,858		0,735	
*Landwirtschaftlich stillgelegte Flächen ^a Wert ist < 1 ^b Wert ist > 1 Signifikanz-Level: p < 0,001 = +++; p < 0,01 = ++; p < 0,05 = +										

Tab. 11: Regressionsparameter der einzelnen Landnutzungsklassen 1986/88. Kennzahlen innerhalb eines Blocks: links oben - Regressionskoeffizienten β ; links unten - Effektkoeffizienten $Exp(B)$; rechts - Signifikanz-Niveau der einzelnen Variablen; in der letzten Zeile - AUC-Wert zur Darstellung der Modellgüte der einzelnen Regressionsmodelle (Quelle: Eigene Darstellung)

Im Folgenden werden die Antriebskräfte der jeweiligen Landnutzungsklassen entsprechend ihres Wirkungsgefüges (vgl. Tab. 11) interpretiert und anschließend in Form von Eignungskarten der Landnutzung dargestellt.

4.5.2.1 Antriebskräfte der Klasse Ackerfläche

Das Auftreten der agrarischen Landnutzungsklasse Ackerfläche wird vornehmlich durch naturräumliche Gegebenheiten wie Hangneigung, Geländehöhe, Bodentyp und Niederschlagshöhe bestimmt. Daneben spielt auch die Nähe zu Hauptverkehrsstraßen eine Rolle. So kann festgestellt werden, dass Hangneigung und Geländehöhe einen negativen Einfluss hinsichtlich der Auftrittswahrscheinlichkeit der Klasse ausüben (vgl. Tab. 11). Je höher und vor allem steiler das Gelände wird, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Ackerbau auf diesen Flächen betrieben wird. Nimmt beispielsweise die

Hangneigung um 1% zu, so ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Ackerfläche $y_i = 1$ gegenüber dem Nicht-Auftreten $y_i = 0$ um das 0,929-fache verringert. Dies wird ersichtlich durch den Effektkoeffizienten $Exp(B)$ von 0,929. Im Umkehrschluss kann festgehalten werden, dass sich durch den Anstieg der Hangneigung die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Ackerfläche um 7,1% reduziert ($1,00 - 0,929$).

Die räumliche Verteilung verschiedener Bodentypen wirkt sich erwartungsgemäß sehr unterschiedlich auf das Vorkommen der Ackerflächen aus. So begünstigen lehmige, fruchtbare Böden wie Alfisole oder Sorribas die agrarische Inwertsetzung massiv, während vulkanische Förderprodukte wie rezente Lavaströme und Tuffflächen sowie nährstoffarme Aridisole und Inceptisole die Auftrittswahrscheinlichkeit von Ackerflächen stark minimieren. Einen weiteren Faktor bildet der durchschnittliche Jahresniederschlag. Dieser hat mit einem Odds Ratio von 1,011 einen positiven Effekt auf die Auftrittswahrscheinlichkeit und bewirkt bei zunehmendem durchschnittlichem Jahresniederschlag zugleich ein erhöhtes Vorkommen der genannten Landnutzungs-kategorie. Die Entfernung zur nächstgelegenen Hauptverkehrsstraße ist schließlich die letzte Variable, die einen signifikanten Einfluss ausübt. So nimmt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Ackerflächen mit größerer Distanz zur nächsten Straße immer mehr ab, da der Aufwand zur Unterhaltung der Flächen hinsichtlich der Bearbeitung des Feldes sowie des Warenabtransportes ansteigt.

Das statistische Modell zur Vorhersage der räumlichen Verteilung von Ackerflächen kann mit einem AUC-Wert von 0,821 als gut bezeichnet werden. In der Eignungskarte der Klasse Ackerfläche wird deutlich, dass hohe Auftrittswahrscheinlichkeiten besonders an der feuchten Nordseite der Insel zu finden sind (vgl. Abb. 56). Hier sind im Gegensatz zum trockenen Süden ausreichend hohe Niederschlagsintensitäten und gut entwickelte Böden zur landwirtschaftlichen Inwertsetzung vorhanden, was die Eignung für diese agrarische Landnutzungs-kategorie stark begünstigt. Einige Flächen besonders hoher Eignung lassen sich auch im Süden feststellen. Dies ist vornehmlich auf die künstlich geschaffenen Sorribas zurückzuführen, für deren Anlegung Bodenmaterial aus mittleren Höhenlagen der Insel, meist bestehend aus Andisololen, zur Kultivierung von landwirtschaftlichen Exportprodukten herantransportiert wurde (ARMAS-ESPINEL et al. 2003, S. 298).

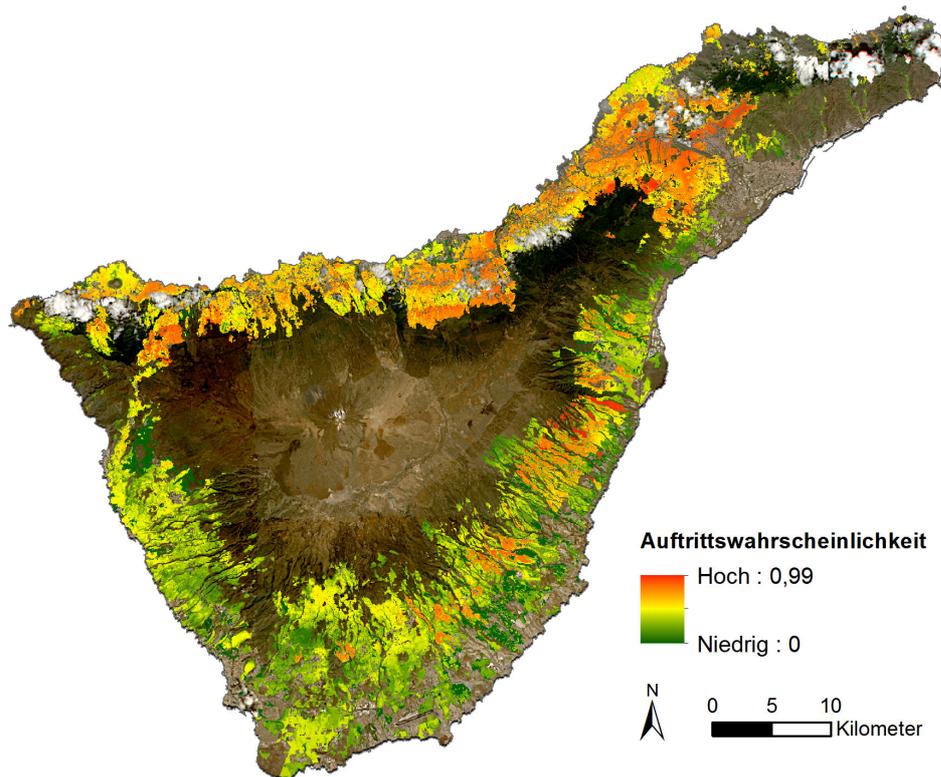


Abb. 56: Eignungskarte der Landnutzungsclassse Ackerfläche (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Bereitgestellt durch das DLR 2010)

4.5.2.2 Antriebskräfte der Klasse Plantagen

Für das Vorkommen der Landnutzungsclassse Plantagen spielen, ähnlich wie bei den Ackerflächen, die naturräumlichen, vor allem aber die klimatischen Umstände eine wichtige Rolle. Es wird auch hier eine negative Einwirkung von Gefälle und Geländehöhe auf das Vorkommen von Plantagen ersichtlich. Gleichsam bedingt die Bodenfruchtbarkeit der verschiedenen Bodentypen sowie vulkanischen Gesteins- und Sedimentflächen das Auftreten von Plantagenwirtschaft, allerdings in geringerem Umfang. Ein großer Unterschied im Vergleich zu Ackerflächen ist der positive Einfluss von Entisolen sowie Bodenassoziationen mit Entisolen (Soiltype_8 und Soiltype_10) hinsichtlich der Auftrittswahrscheinlichkeit dieser Art von Intensivlandwirtschaft. So wird diese bei reinen Entisolen um das 1,339-fache erhöht, was durch die besonders gute Eignung dieser Böden für die plantagentypische landwirtschaftliche Produktionstechnik, den Bewässerungsfeldbau, erklärt werden kann (AKHAND & AL ARAJ 2013, S. 717). Des Weiteren konnte zwei klimatischen Aspekten ein signifikanter Einfluss auf die Verteilung von Plantagen nachgewiesen werden: der Jahresdurchschnittstemperatur und der Temperatur-Saisonalität. So wird durch die Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur um 1°C die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Landnutzungsclassse um das 0,624-fache verringert, während sie durch den Anstieg der Temperatur-Saisonalität leicht erhöht wird ($Exp(b) = 1,049$). Dies lässt sich dadurch begründen, dass eine zunehmende Jahresmitteltemperatur im Untersuchungsgebiet vor allem durch eine erhöhte Strahlungsexposition sowie einen geringeren Bewölkungsgrad mit reduzierter Luftfeuchtigkeit bedingt wird (HÖLLERMANN 1982, S. 43 ff.). Hierdurch benötigen die ohnehin schon sehr bewässerungsintensiven Plantagen vergleichsweise mehr Wasser und entwickeln somit eine gewisse Unrentabilität. Durch eine erhöhte Temperatur-Saisonalität kann zudem angenommen werden, dass der Temperaturverlauf des Jahres eher inkonstant ist und bewölkungsreichere, niederschlagsintensivere Monatsverläufe vorhanden sind. Dies wirkt sich positiv auf die Bewirtschaftung

dieser Landnutzungseinheit aus. Die Eignungskarte der Landnutzungs­klasse Plantagen (vgl. Abb. 57) macht deutlich, dass die höchsten Auftretswahrscheinlichkeiten im feuchten und gemäßigerem Nordteil der Insel zu finden sind, denn hier liegen die Jahresmitteltemperaturen um ca. 2 bis 3 °C niedriger als im Süden (HÖLLERMANN 1982, S. 43 ff.). Einen zusätzlichen Einfluss auf die Verteilung der arbeitsintensiven Plantagen bilden die Erwerbstätigen im landwirtschaftlichen Sektor. Alleine auf den Bananenplantagen der Kanarischen Inseln werden 30% aller Arbeitskräfte des primären Sektors beschäftigt (GONZALEZ-CONCEPCIÓN et al. 2008, S. 89), wodurch das Auftreten dieses agrarischen Landnutzungstyps eng an die Beschäftigtenzahlen in der Landwirtschaft gekoppelt ist. Schließlich spielt auch die Entfernung zu Galerías und Brunnen eine Rolle. Je weiter die Landnutzungsflächen entfernt sind von den Wasserentnahmestellen, desto geringer wird deren Auftretswahrscheinlichkeit. Die vorgestellten Parameter liefern eine hohe Erklärungsgüte hinsichtlich der Verteilung der Plantagen im Untersuchungsgebiet. Dies drückt sich in einem AUC-Wert von 0,935 aus. Bei Betrachtung der Eignungskarte wird deutlich, dass die höchsten Auftretswahrscheinlichkeiten in küstennahen Gebieten des feuchten Nordens unter 300 m ü. NN bestehen. Im Süden liegen diese Flächen ebenfalls sehr küstennah auf entsprechend geeigneten Böden. Geringe Auftretswahrscheinlichkeiten können dagegen im Südosten der Insel und in höheren Regionen mit zu starkem Gefälle ausgemacht werden.

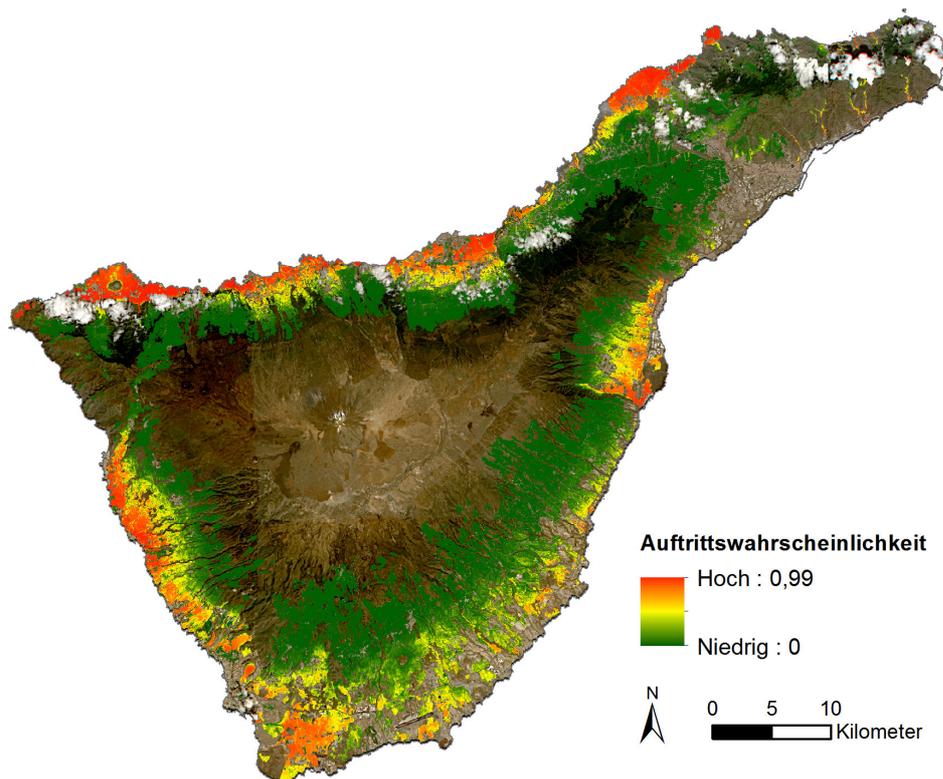


Abb. 57: Eignungskarte der Landnutzungs­klasse Plantagen (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Bereit­gestellt durch das DLR 2010)

4.5.2.3 Antriebskräfte der Klasse Gewächshäuser

Die Einflussfaktoren, die zur Erklärung der Verteilung von Gewächshäusern beitragen, sind annähernd identisch mit denen der Plantagen. Dies hängt hauptsächlich damit zusammen, dass bestimmte Anbauprodukte auf den Plantagen, insbesondere die Banane, auch verstärkt in Gewächshäusern ge­züchtet werden. Somit sind sich diese beiden Landnutzungs­klassen grundsätzlich sehr ähnlich. Ansteigende Geländehöhen und -neigungen wirken sich auch hier negativ auf die Auftretswahr-

scheinlichkeit der Landnutzungs-kategorie aus und verschiedene Bodenqualitäten werden für den Anbau bevorzugt. Die negative Einflussstärke bestimmter Bodentypen, beispielsweise der Inceptisole, ist jedoch stärker ausgeprägt. Weiter ist feststellbar, dass Tuffsedimente im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Klassen das Auftreten begünstigen. Die Verteilung von Gewächshäusern wird zudem leicht negativ durch den durchschnittlichen Jahresniederschlag beeinflusst. Mit zunehmendem Jahresniederschlag nimmt die Auftrittswahrscheinlichkeit geringfügig ab. Dies hängt vor allem mit der Rentabilität dieser Art von Produktionstechnik zusammen. In Regionen mit ausreichend Niederschlag kann auf Gewächshäuser verzichtet werden. Die Nutzung von Gewächshäusern in ariden Regionen des Untersuchungsraumes begünstigt jedoch die Produktivität, da Bewässerung, Luftfeuchte und Sonnenexposition besser geregelt und überwacht werden können.

Die Regressionsanalyse zur Erfassung von Standortfaktoren für Gewächshäuser wird mit einem sehr hohen AUC-Wert von 0,906 bewertet. Wie die Eignungskarte erkennen lässt, finden sich die höchsten Auftrittswahrscheinlichkeiten in den Küstenbereichen mit einer Geländehöhe unter 150 m ü. NN. Flächen mit einer Geländehöhe über 150 m ü. NN. besitzen dagegen nur geringe Auftrittswahrscheinlichkeiten (vgl. Abb. 58). Sie finden sich fast ausschließlich im südlichen Teil der Insel.

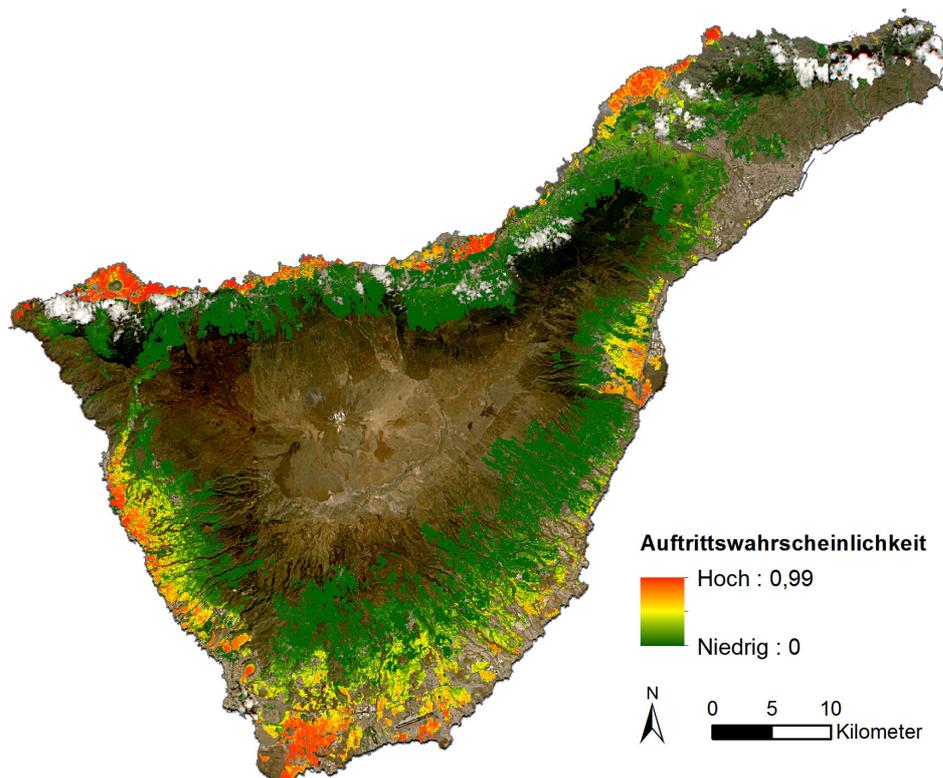


Abb. 58: Eignungskarte der Landnutzungs-kategorie Gewächshäuser (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Bereitgestellt durch das DLR 2010)

4.5.2.4 Antriebskräfte der Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Flächen

Diese Landnutzungs-kategorie ist maßgeblich gekennzeichnet durch hohe Auftrittswahrscheinlichkeiten auf jenen Flächen, die sich vor allem hinsichtlich naturräumlicher Eigenschaften wie Geländehöhe, Hangneigung, Bodenqualität und Niederschlag in höchstem Maße als landwirtschaftlich unrentabel erweisen. So bewirken ansteigende Hangneigung und Geländehöhe eine Zunahme der Auftrittswahrscheinlichkeit. Verschiedene Bodentypen, die eine geringe Ertragsfähigkeit versprechen, finden zudem mit extrem hohen Effektkoeffizienten Einzug in das Regressionsmodell. Rezente Lavaströme

weisen beispielsweise einen Odds Ratio von 291,03 und Tuffe einen Odds Ratio von 54,269 auf. Währenddessen üben die fruchtbaren Böden einen vergleichsweise geringen positiven Einfluss auf die Verteilung der Brachflächen aus. Der Jahresniederschlag als wichtiger Faktor für Trockenfeldbau spielt mit einem negativen Einfluss ebenfalls eine Rolle, allerdings nur gering. Denn die meisten Flächen dieser Klasse mit hohen Auftrittswahrscheinlichkeiten befinden sich in montanen Gebieten, in denen der Niederschlag tendenziell höher ist als an der Küste.

Mit einem AUC-Wert von 0,858 besitzt auch dieses Regressionsmodell eine hohe Modellgüte. Die Verteilung der Auftrittswahrscheinlichkeiten für die Brachflächen wird bei Betrachtung der Eignungskarte ersichtlich (vgl. Abb. 59). Neben den Gebirgsregionen erreichen auch küstennahe Flächen im Süden sehr hohe Wahrscheinlichkeitswerte.

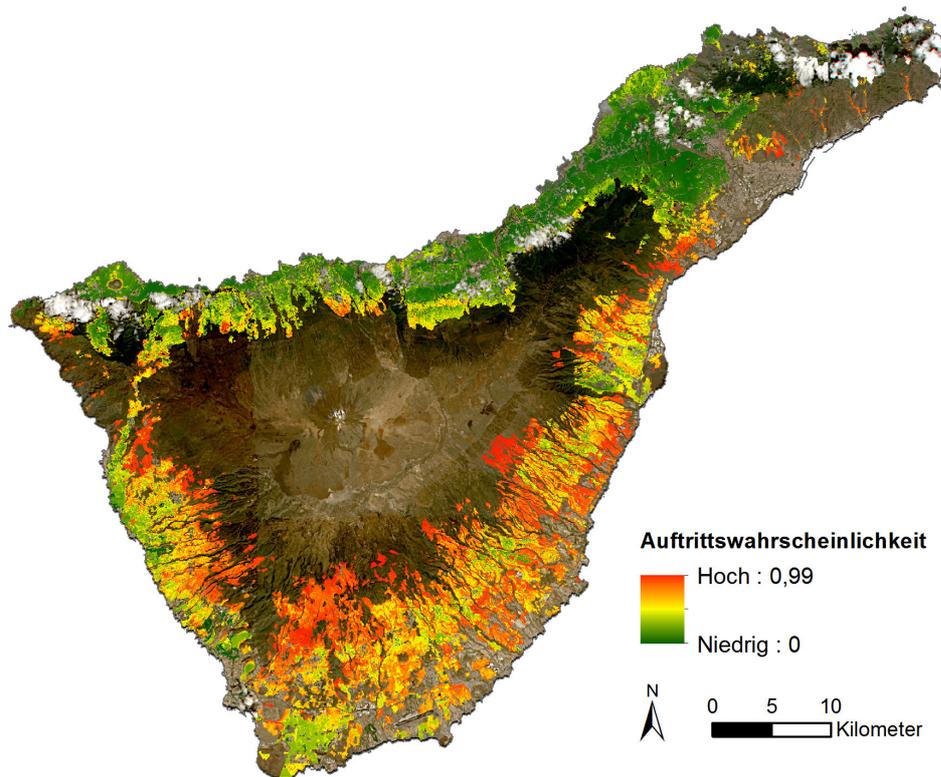


Abb. 59: Eignungskarte der Landnutzungs-kategorie Landwirtschaftlich stillgelegte Flächen (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Bereitgestellt durch das DLR 2010)

4.5.2.5 Antriebskräfte der Klasse Andere

Die Landnutzungs-kategorie Andere als Misch-kategorie aus hauptsächlich infrastrukturellen Konversionsgebieten und vereinzelt landwirtschaftlichen Konversionsflächen (vgl. Kap. 4.5.1.1) wird durch die Ausprägung von naturräumlichen sowie verschiedenen sozioökonomischen und strukturellen Parametern determiniert. So wirkt sich eine zunehmende Höhe der Flächen ü. NN und ansteigender Jahresniederschlag negativ auf die Verteilung aus. Eine zunehmende Populationsdichte hingegen bewirkt einen Anstieg der Auftrittswahrscheinlichkeit, da hierdurch der Bedarf an Siedlungsfläche erhöht wird. Die Entfernung der Flächen zu bestehenden Siedlungen sowie die Distanzen zu Grundwasserbrunnen zählen bei der Verteilung dieser Landnutzungs-kategorie als die beiden letzten Einflussfaktoren. Sie wirken sich beide negativ auf die Auftrittswahrscheinlichkeit aus, was durch den großen Bedarf dieser Klasse an Trinkwasser und der Anbindung an bestehende Infrastrukturen erklärt werden kann.

Die Modellgüte kann mit einem AUC-Wert von 0,735 als noch akzeptabel bewertet werden, ist im Vergleich zu den anderen Klassen jedoch eher niedrig. Da es sich hierbei um eine Mischklasse handelt und die zugrundeliegenden Klassen durch unterschiedliche Standortfaktoren gesteuert werden, kann anhand des Regressionsmodells nur eine verminderte Modellqualität erreicht werden. Dies liegt darin begründet, dass die Verschiedenartigkeit der Klassen naturgemäß nicht berücksichtigt wird. Abb. 60 zeigt auf, dass die höchste Auftrittswahrscheinlichkeit dieser Klasse vor allem im Agglomerationsraum der Städte Santa Cruz, San Cristóbal de La Laguna und Puerto de La Cruz im Nordteil des Untersuchungsraumes zu finden ist. Im restlichen Teil der Insel sind die Flächen auf die unmittelbare Umgebung kleinerer Städte und Dörfer beschränkt.

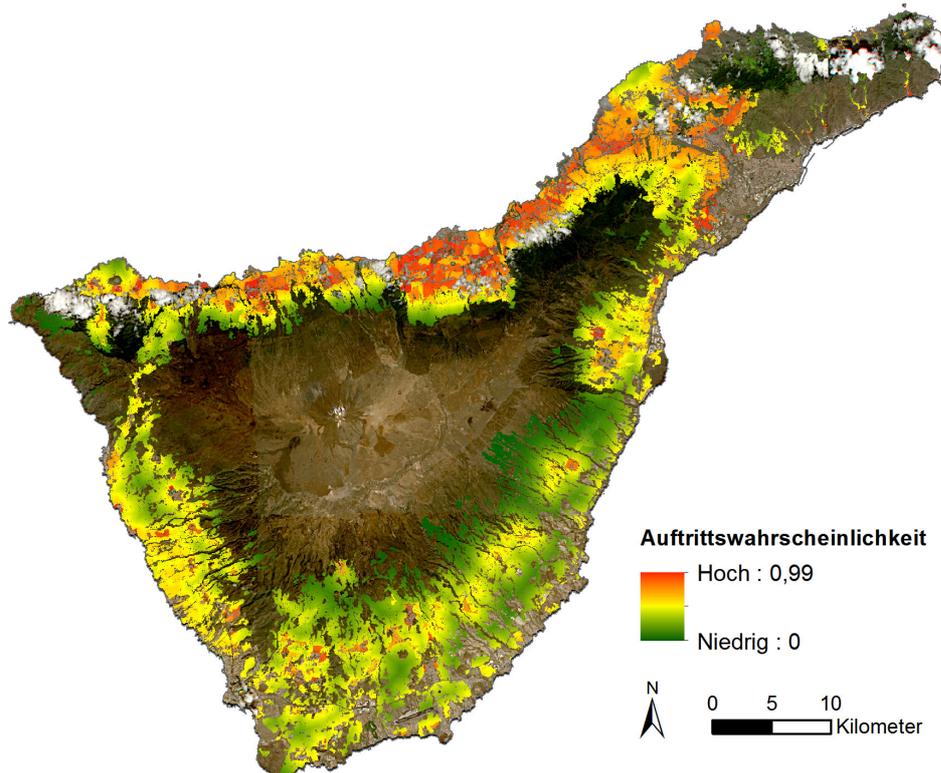


Abb. 60: Eignungskarte der Landnutzungsklasse Andere (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Bereitgestellt durch das DLR 2010)

4.5.3 Einfluss der Nachbarschaftseffekte auf die räumliche Dynamik der Landnutzungsklassen

Neben den eigentlichen Antriebskräften müssen auch die Nachbarschaftsbeziehungen unter den einzelnen Landnutzungsklassen in der Modellierung berücksichtigt werden, da diese ebenfalls einen großen Einfluss auf die Veränderungen der Landnutzungsklassen im Raum haben können (vgl. Kap. 4.3.3.2). Dafür wird die Veränderung der einzelnen Landnutzungsklassen zwischen 1986/88 und 1998 mit den zuvor berechneten Enrichment-Faktoren von 1986/88 in Beziehung gesetzt. Hierdurch kann erfasst werden, welche nachbarschaftlichen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen agrarischen Klassen für die Veränderung der Landnutzungstypen signifikant sind und welche nicht.

Daher muss zunächst eine Veränderungskarte der Landnutzungsdaten 1986/88 und 1998 im Sinne eines Post Classification Comparison produziert und die so gewonnenen Veränderungsklassen der Veränderungsmatrix reklassifiziert werden (vgl. SINGH 1989, S. 996). Durch die Reklassifikation ist es möglich, die für die logistische Regression benötigten dichotomen Ausprägungen der Landnutzungstypen zu bilden: die Rasterzelle y_i ist zwischen 1986/88 und 1998 zur entsprechenden Landnutzung konvertiert $y_i = 1$ und die Rasterzelle y_i ist nicht konvertiert $y_i = 0$. Zur Ermittlung der Idealgröße der

Nachbarschaftsdistanzen werden für jeden Landnutzungstyp mehrere Regressionsanalysen durchgeführt. Dabei werden Enrichment-Faktoren mit immer größeren, kreisförmigen Nachbarschaftsdistanzen gewählt, nämlich 3 x 3, 7 x 7, 11 x 11, 15 x 15, 19 x 19 sowie 23 x 23 Pixeln.

Wie bei der Analyse zur Erfassung von Standortfaktoren wird für die Regressionsanalysen eine ausgeglichene Stichprobe von 10% gewählt. Durch die ROC-Methode und den entsprechend höchsten AUC-Wert ist die für den jeweiligen Landnutzungstyp beste Nachbarschaftsgröße ermittelt und das entsprechende Regressionsmodell identifizierbar (VERBURG et al. 2004a, S. 673). Die Ergebnisse der logistischen Regression zum Einfluss von Nachbarschaftseffekten zwischen den einzelnen Klassen sind in Tab. 12 aufgeführt. Die auf Basis der Regressionskoeffizienten errechneten Eignungskarten der Nachbarschaftseinflüsse fließen direkt in die Landnutzungsmodellierung mit ein und werden während jedem Modellschritt aktualisiert.

Variable	P(Konversion zu Ackerflächen)		P(Konversion zu Plantagen)		P(Konversion zu Gewächsh.)		P(Konversion zu L.s.F. *)		P(Konversion zu Andere)	
	β	Signif.	β	Signif.	β	Signif.	β	Signif.	β	Signif.
KONSTANTE	-1,051	+++	-1,068	+++	-1,241	+++	-1,913	+++	4,977	+++
	0,350	11 x 11	0,344	23 x 23	0,289	23 x 23	0,148	3 x 3	145,09	3 x 3
F (ACKERFLÄCHE)	0,434	+++	-0,069	+	-1,622	+++	1,805	+++	-1,194	+++
	1,544	11 x 11	0,933	23 x 23	0,198	23 x 23	6,081	3 x 3	0,303	3 x 3
F (PLANTAGEN)	0,107	+++	1,066	+++	0,838	+++	0,144	+++	-0,409	+++
	1,113	11 x 11	2,903	23 x 23	2,312	23 x 23	1,155	3 x 3	0,664	3 x 3
F (GEWÄCHSH.)	0,271	+++	0,004	+	0,200	+++	0,005	+++	-0,010	+++
	1,016	11 x 11	1,004	23 x 23	1,221	23 x 23	1,005	3 x 3	0,990	3 x 3
F (L.S.F.)	-	-	-0,304	+++	-	-	-	-	-2,191	+++
	-	-	0,738	23 x 23	-	-	-	-	0,112	3 x 3
F (ANDERE)	0,271	+++	0,161	+++	0,188	+++	-0,017	+++	-0,018	+++
	0,350	11 x 11	1,175	23 x 23	1,207	23 x 23	0,983	3 x 3	0,983	3 x 3
AUC-WERT	0,730		0,888		0,915		0,850		0,914	
*Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche Signifikanz-Level: $p < 0,001 = +++$; $p < 0,01 = ++$; $p < 0,05 = +$										

Tab. 12: Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der klassenspezifisch berechneten Enrichment-Faktoren F auf die Konversionswahrscheinlichkeit P der Landnutzungsklassen zwischen 1986/88 und 1998. Kennzahlen innerhalb eines Blocks: links oben - Regressionskoeffizienten β ; links unten - Effektkoeffizienten $Exp(\beta)$; rechts oben - Signifikanz-Niveau; rechts unten - zugrundeliegende Nachbarschaftsgrößen der Enrichment-Faktoren (Quelle: Eigene Darstellung)

Die fünf finalen Regressionsmodelle weisen akzeptable bis sehr gute Modellgüten mit AUC-Werten zwischen 0,730 bis 0,915 auf. Es wird deutlich, dass die Nachbarschaftsdistanzen sowie die Einflussstärken bei den einzelnen Klassen sehr unterschiedlich sind. So wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine Rasterzelle zu den Landwirtschaftsklassen Ackerflächen, Plantagen und Gewächshäuser konvertiert, ausnahmslos positiv durch das Vorhandensein derselben Klasse in der Nachbarschaft beeinflusst. Bei den zwei weiteren Landnutzungstypen Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche und Andere hat dies eine negative Auswirkung. Es ist somit eine deutliche Clusterbildung der rezenten Agrarflächen erkennbar, wobei vor allem die räumliche Nähe zwischen Plantagen und Gewächshäusern einen

entscheidenden Einfluss hat. Zudem wird die Auftrittswahrscheinlichkeit dieser beiden Typen intensiver landwirtschaftlicher Nutzung durch die Nachbarschaft zur Klasse Andere positiv beeinflusst. Innerhalb des Dyna-CLUE 2 Modells muss schließlich eine Gewichtung vorgenommen werden, wie stark die Nachbarschaftseffekte in der Modellierung berücksichtigt werden sollen. Diese wird anhand verschiedener Modelldurchläufe im Rahmen der Modellkalibrierung durchgeführt. Durch die schrittweise Justierung und anschließende Genauigkeitsanalyse mittels des Multiple Resolution Comparison können die optimalen Nachbarschaftsgewichtungen ermittelt werden (vgl. Kap. 4.4). Bei einem Wertebereich von 0 bis 1 wurden folgende Gewichtungen für die einzelnen Klassen vorgenommen: Ackerflächen 0,3; Plantagen 0,1; Gewächshäuser 0,1; Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche 0,5 und Andere 0,5.

4.5.4 Festlegung der räumlichen Bedingungen sowie der Konversionsoptionen und des Landnutzungsbedarfs

Weitere Modellkenngrößen, die im Rahmen der Kalibrierung ermittelt werden müssen, sind die Erfassung des Landnutzungsbedarfs, die räumlichen Bedingungen, anhand derer die Güte des Modells erhöht werden kann, sowie die Konversionsoptionen, die grundlegende Entscheidungsregeln hinsichtlich des Übergangs von einer Landnutzungsklasse zur anderen definieren. Vor allem die Einstellungen letztgenannter, aus Konversionsmatrix und Konversionselastizität bestehende Parametergruppe, müssen ebenso wie die Nachbarschaftsgewichtungen in einem iterativen Kalibrierungsprozess erfasst werden.

4.5.4.1 Definition der Landnutzungsübergangsregeln in Form einer Konversionsmatrix

Die Landnutzungsübergangsregeln, dargestellt als Konversionsmatrix, dienen zur Festlegung möglicher klassenspezifischer Landnutzungstransformationen im Untersuchungsgebiet. Des Weiteren wird anhand der Matrix festgelegt, wie lange die Nutzungsdauer eines Landnutzungstyps anhält, bevor eine Transformation in eine andere Klasse stattfinden kann (vgl. Kap. 4.3.5.1). Abb. 61 zeigt auf, welche Konversionen und zeitlichen Beschränkungen innerhalb des vorliegenden Modells definiert sind. So wird deutlich, dass sich Ackerflächen beispielsweise erst nach einer Nutzungsdauer von zwei Jahren in einen anderen Landnutzungstyp verändern können, während bei Plantagen erst nach fünf Jahren Nutzung eine Umwidmung der Flächen stattfinden darf. Die Klasse Andere, überwiegend zusammengesetzt aus infrastrukturellen Flächen, kann mit Ausnahme der Klasse Ackerfläche nicht zu den übrigen Klassen transformiert werden und gilt für diese somit als irreversibel. Durch die Konversionsmöglichkeit der Klasse Andere zu Ackerfläche mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahren wird berücksichtigt, dass dieser Landnutzungstyp neben reinen Siedlungsflächen einen minimalen Prozentsatz an Ackerflächen beinhaltet (vgl. Kap. 4.5.1.1). Während des Kalibrierungsprozesses wurde zudem festgelegt, dass die Klasse Gewächshäuser nicht zu Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche konvertieren kann und umgekehrt. Denn in den küstennahen Gebieten kann die Stilllegung vor allem von Treibhausflächen aufgrund der hohen Rentabilität hinsichtlich räumlicher Lage und Bodenqualität bis auf wenige Ausnahmen ausgeschlossen werden. Die Neuanlage von Gewächshäusern auf stillgelegten Flächen wird auf Grund ihrer meist ungünstigen Höhenlage und Hangneigung ebenfalls nicht zugelassen. Hierdurch konnte die Modellgüte maßgeblich erhöht werden.

Zukünftige Veränderung	Ackerfläche	Plantagen	Gewächshäuser	L.s.F.	Andere
Ackerfläche	1	102	102	102	102
Plantagen	105	1	105	105	105
Gewächshäuser	105	105	1	0	105
L.s.F.	102	102	0	1	1
Andere	115	0	0	0	1

Abb. 61: Konversionsmatrix des Dyna-CLUE 2 Modells mit fünf verschiedenen Landnutzungsklassen (Quelle: Eigene Darstellung)

4.5.4.2 Bestimmung der Konversionselastizitäten der einzelnen Landnutzungsklassen

Die Konversionselastizität als weiterer elementarer Parameter hinsichtlich der Festlegung von Landnutzungsübergängen bestimmt, wie leicht oder schwer die einzelnen Landnutzungsklassen konvertiert werden können. Sie kann Werte von 0 bis 1 annehmen (vgl. Kap. 4.3.5.2). Hierbei bedeutet 0, dass sich der Landnutzungstyp bei benötigtem Bedarf jederzeit ändern kann, unabhängig von der aktuellen Landnutzung eines Standortes. Werte zwischen >0 und <1 besagen, dass er sich jederzeit ändern kann, allerdings wird mit zunehmendem Wert verstärkt jenen Flächen der Konversionsvorzug gegeben, die bereits durch diese Klasse repräsentiert werden. Für Werte mit 1 gilt, dass die Rasterzellen des Landnutzungstyps keinesfalls zu anderen Landnutzungen konvertieren können (VERBURG 2010, S. 31). Folgende Elastizitäten wurden für die einzelnen Klassen im Rahmen des iterativen Kalibrierungsvorganges festgelegt: Ackerfläche 0,25; Plantagen 0,8; Gewächshäuser 0,25; Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche 0,9; Andere 0,5.

4.5.4.3 Standortspezifische Erhöhung der Auftrittswahrscheinlichkeit einzelner Landnutzungstypen durch Location Specific Preference Additions (LSPA)

Durch den Einbezug von Location Specific Preference Additions können die Auftrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Landnutzungsklassen standortspezifisch angehoben werden, um beispielsweise raumordnungspolitische Rahmenbedingungen oder eine wirtschaftliche Prosperität bestimmter Regionen im Untersuchungsgebiet zu berücksichtigen (vgl. Kap. 4.3.4). Auch einer standortspezifischen Unterrepräsentation bestimmter Klassen kann durch den Einbezug von LSPAs entgegengewirkt werden. Innerhalb der vorliegenden Modellierung können verschiedene Aspekte des Raumordnungsplans PIOT 2011 (Plan Insular de Ordenación de Tenerife) zur Erhöhung der Modellierungsgenauigkeit aufgegriffen werden. Der PIOT dient als Grundlage für alle Aktivitäten der Bodennutzung und Verwendung von Ressourcen im Untersuchungsgebiet und regelt so auch die Erhaltung der landwirtschaftlich hochwertigsten Böden und landwirtschaftlichen Anbauzonen sowie den Expansionsprozess der bestehenden Kernstädte (CABILDO DE TENERIFE 2013a). Dabei werden die agrarischen Anbaugebiete in verschiedene ökonomische Schutzzonen unterteilt, die Anbauregionen intensiver landwirtschaftlicher Nutzung mit Exportproduktion, aber auch Subsistenzkulturen beinhalten (CABILDO DE TENERIFE 2012). Aufgrund von Unterrepräsentationen der Klasse Plantagen im Südwesten der Insel werden die Intensivlandwirtschaftszonen der Gemeindebezirke Santiago del Teide, Guía de

Isora, Adeje, Arona und San Miguel de Abona herangezogen, um die Auftrittswahrscheinlichkeit der Klasse entgegen der eigentlichen Standortgüte in diesem Teilbereich der Insel mit einer Gewichtung von 0,25 geringfügig zu erhöhen. Zur Regulation städtischer Modernisierungs- und Expansionsprozesse und zur Verhinderung unkontrollierter Baumaßnahmen werden des Weiteren urbane Flächen und urbane Expansionsgebiete im PIOT-Plan ausgewiesen. Diese werden ebenfalls in der Modellierung berücksichtigt. Zur Erhöhung der in starkem Maße stadtplanerisch gesteuerten Auftrittswahrscheinlichkeit der Klasse Andere in der Nähe zu bestehenden urbanen Gebieten wird hierfür ein Gewichtungsfaktor von 0,7 verwendet.

4.5.4.4 Ermittlung des Landnutzungsbedarfs zur Kalibrierung und Validierung des Landnutzungsmodells

Der Landnutzungsbedarf als zentrales Modul des Modellierungsansatzes wird einerseits durch die Berechnung der Gesamtfläche der einzelnen Landnutzungsklassen in den Jahren 1986/88, 1998 und 2010 erfasst und für das Bedarfsmodul aufbereitet (vgl. Kap. 4.3.2). Dabei wird ein linearer Verlauf der Landnutzungsänderungen zwischen 1986/88 und 1998 für die Kalibrierung sowie zwischen 1998 und 2010 im Rahmen der Validierung angenommen. Andererseits können in Dyna-CLUE 2 auch verschiedene Teilregionen mit jeweils eigenem Landnutzungsbedarf gebildet werden, wobei die regionalen Demands in derselben Weise wie bei der Erfassung eines Gesamtbedarfs berechnet werden. Dies ist sinnvoll, wenn die räumliche Entwicklung der jeweiligen Landnutzungseinheiten durch regionale räumliche Disparitäten unterschiedlich beeinflusst wird. Aufgrund der ausgeprägten klimatischen und sozioökonomischen Unterschiede kann dies für das vorliegende Untersuchungsgebiet als sehr wahrscheinlich angenommen werden. Daher wird der Untersuchungsraum zusätzlich in drei unterschiedliche Subregionen mit jeweils eigenem Landnutzungsbedarf aufgeteilt (vgl. Abb. 62). Im Rahmen der Modellgüte-Analyse kann dann festgestellt werden, welcher Ansatz zur Berechnung des Landnutzungsbedarfs bessere Ergebnisse liefert.

Die Unterteilung in einzelne Regionen findet durch die Zusammenfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche benachbarter Gemeindebezirke statt. Region 1 ist dabei gekennzeichnet durch maßgeblich touristische Inwertsetzung, wodurch sich Nutzungskonflikte hinsichtlich infrastruktureller Flächenerweiterungen und landwirtschaftlichen Nutzflächen ergeben. Hier findet verstärkt Intensivlandwirtschaft statt. Region 2 umfasst die restlichen Gemeindebezirke im Süden der Insel und ist durch extreme Trockenheit geprägt. Hierdurch ergeben sich entsprechende Anpassungen hinsichtlich landwirtschaftlicher Anbautechniken, beispielsweise der Anlegung von Sorribas. Region 3 beinhaltet alle nördlichen, humid geprägten Gemeindebezirke und beinhaltet die größten Anbaugebiete der Insel. Neben Intensivlandwirtschaft wird in dieser Region auch Trockenfeldbau bis in Höhen von 1.200 m ü. NN betrieben.

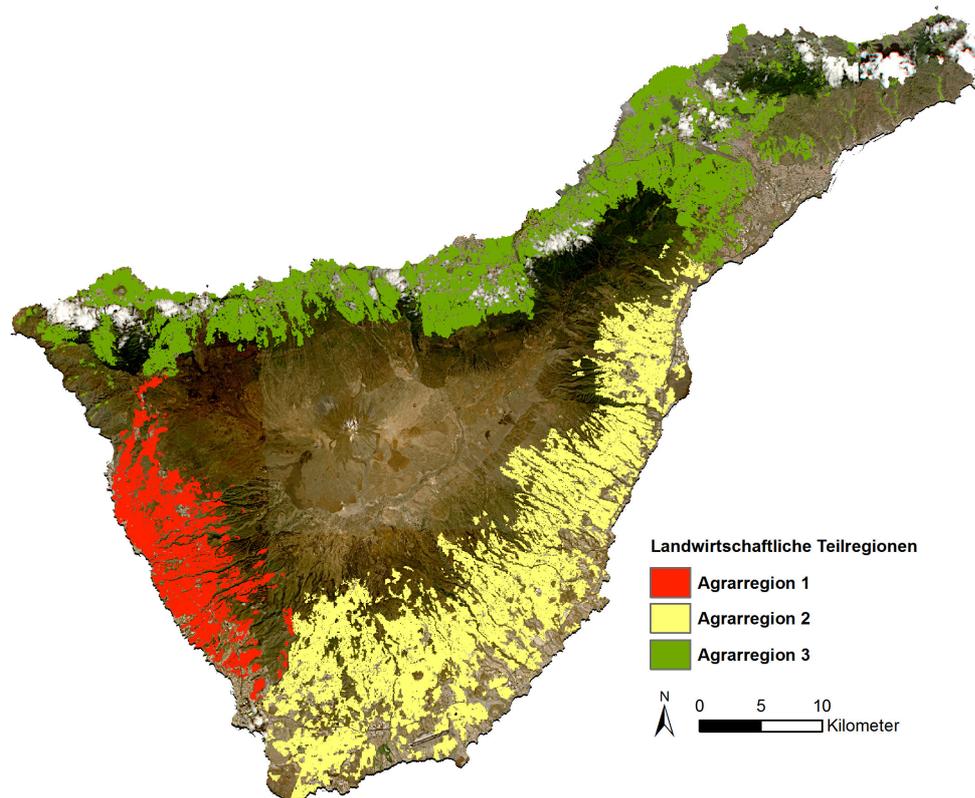


Abb. 62: Einteilung des Untersuchungsraums in landwirtschaftliche Teilregionen als Grundlage zur Berechnung eines regionalen Landnutzungsbedarfs (Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: Bereitgestellt durch das DLR 2010)

4.5.5 Ergebnisse der Modellkalibrierung und -validierung

Das Landnutzungsmodell wurde unter Einbezug der erläuterten Parameter stufenweise kalibriert. Innerhalb jedes Implementierungsvorgangs wurde die entsprechende Modellgüte anhand eines Multiple Resolution Comparison identifiziert, wobei die einzelnen Modellergebnisse mit der realen Referenzkarte 1998 und dem Nullmodell verglichen wurden (vgl. Kap. 4.4). Das Resultat mit den jeweilig besten Modellergebnissen wurde anschließend für weitere Modifikationen herangezogen. Zur Durchführung des MRC konnte das Map Comparison Kit des Research Institute for Knowledge Systems (RIKS) verwendet werden (vgl. VISSER & DE NILS 2006).

4.5.5.1 Kalibrierungsergebnis

Die Ergebnisse der stufenweisen Kalibrierung sind in Abb. 63 dargestellt. Neben der Übereinstimmung der Modelle in den einzelnen Auflösungsstufen wird zudem die jeweilige gewichtete Gesamtübereinstimmung aufgeführt. Diese wurde durch eine Gewichtung von $k = 0,01$ ermittelt, wodurch eine ausreichend hohe Gewichtung der unteren Aggregationsstufen, auch unter dem Aspekt der mit 50×50 m räumlicher Auflösung pro Pixel sehr detaillierten Modellierung, gegeben ist (vgl. Kap. 4.4.1). Das Modell wurde in einem ersten Schritt zunächst nur durch den Einbezug der erfassten Driving Forces und den daraus resultierenden Eignungskarten sowie anhand eines Gesamtbedarfs kalibriert, um die besten Parametereinstellungen innerhalb der Konversionsregeln zu determinieren (Kalibrierung 1). Anschließend wurde eruiert, inwieweit die Modellgüte durch die Unterteilung des Gesamtbedarfs in drei verschiedene Teilregionen mit jeweils eigenem Landnutzungsbedarf erhöht werden kann (Kalibrierung 2). Schließlich wurde das Landnutzungsmodell durch den Einbezug von Nachbar-

schaftsbeziehungen und LSPA erweitert und jeweils mit einem Gesamtbedarf (Kalibrierung 3) sowie einem regionalen Bedarf (Kalibrierung 4) hinsichtlich der besten Vorhersagekraft analysiert.

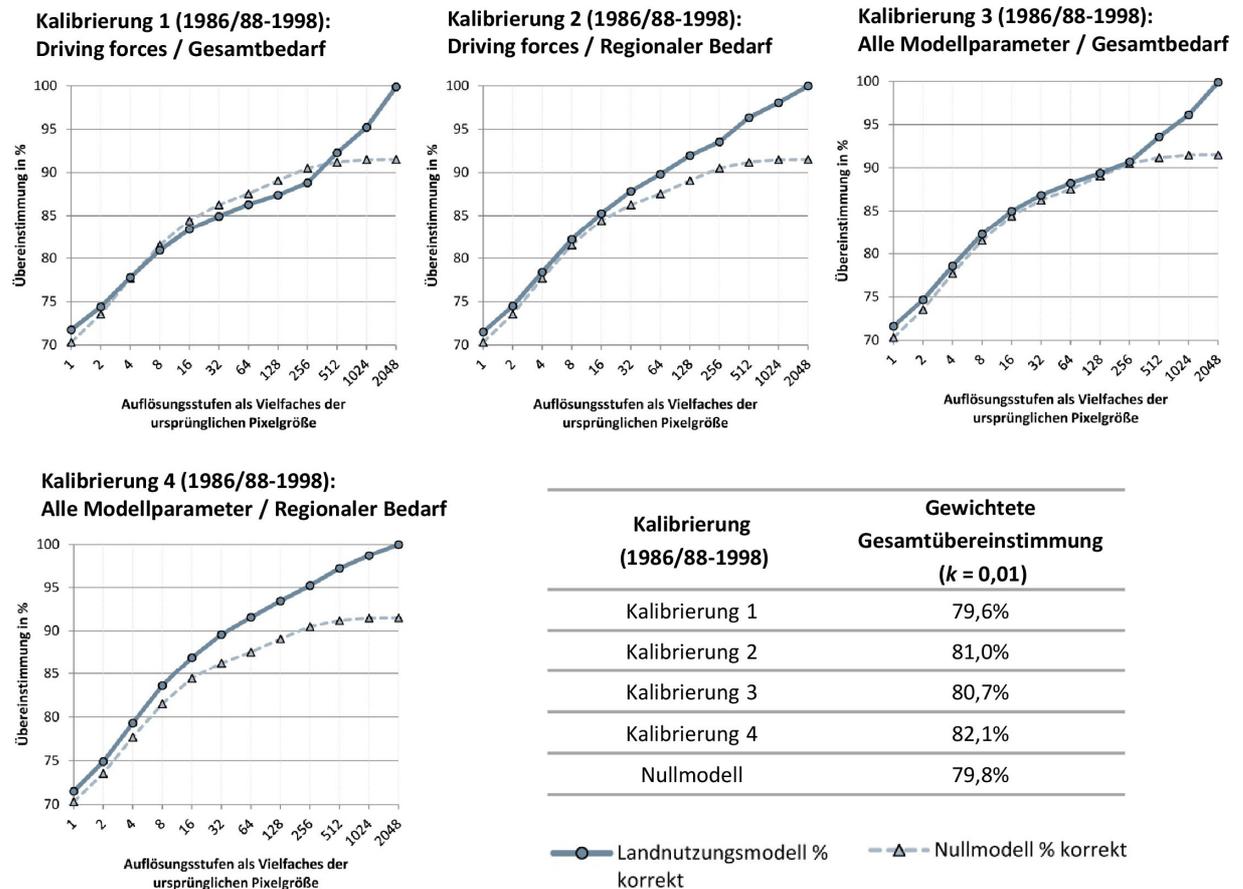
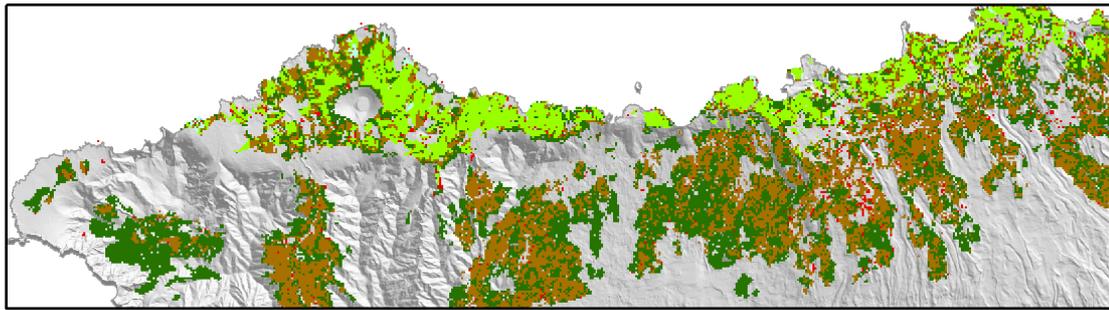
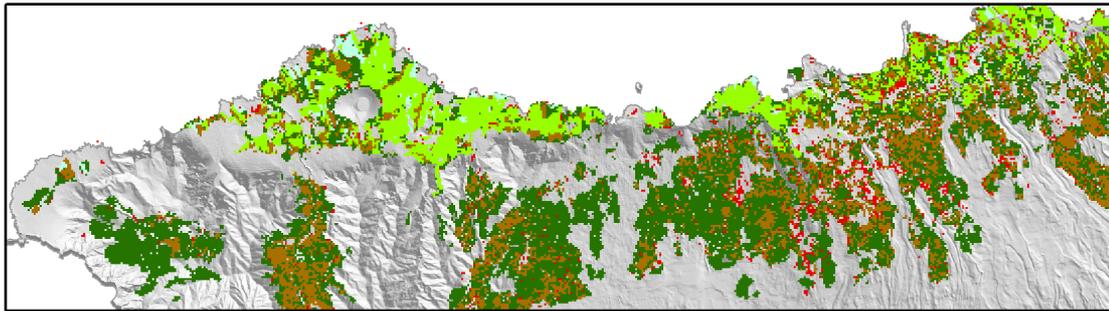


Abb. 63: Ergebnisse Modellkalibrierung mit verschiedenen Parametereinstellungen (Quelle: Eigene Darstellung)

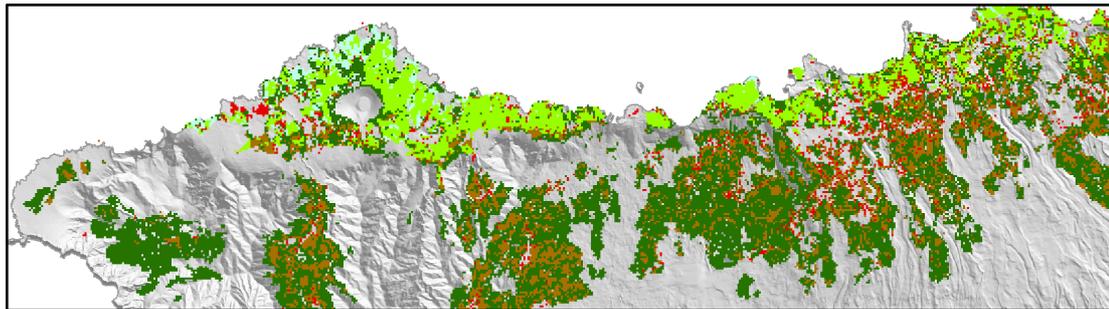
Es kann festgestellt werden, dass bis auf Kalibrierung 1 die Übereinstimmung des Modellergebnisses mit der Referenzkarte 1998 in allen Auflösungsstufen höher ist als das Nullmodell. Zugleich wird ersichtlich, dass die Güte des Landnutzungsmodells durch die Verwendung eines regionalen Bedarfs (Kalibrierung 2) hinsichtlich der Lagegenauigkeit der Pixel vor allem in den geringen Auflösungsstufen signifikant gesteigert wird. Das Modell mit der besten Güte ist Kalibrierung 4. Es weist eine gewichtete Gesamtübereinstimmung von 82,1% auf und liegt damit deutlich höher als das Nullmodell. Auch innerhalb der unteren Auflösungsstufen wird eine hohe Güte erreicht. So beträgt die Genauigkeit bei einer räumlichen Auflösung von 4 x 4 Pixeln, was einer tatsächlichen Rasterzellengröße von 200 x 200 m entspricht, annähernd 80%. Mit einer quantitativen Gesamtübereinstimmung von 100% bei einer räumlichen Auflösung von 2048 x 2048 Pixeln deckt es zudem die gesamte reale Änderungsrate zwischen 1986/88 und 1998 ab.



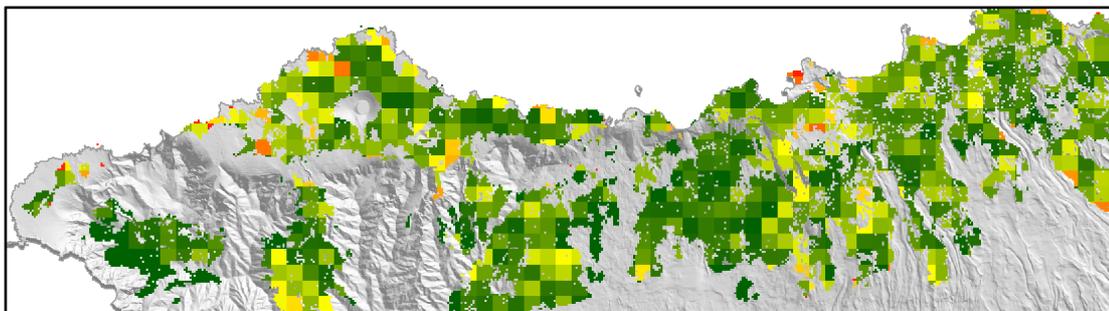
(I) Landnutzung 1986/88



(II) Landnutzung 1998



(III) Modellierung 1998 mit allen Parametereinstellungen und regionalem Bedarf (Kalibrierung 4)



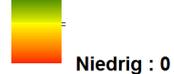
(IV) Darstellung der Gesamtübereinstimmung bei einer räumlichen Auflösung von 8 x 8 Pixeln (400 x 400 m) zwischen Referenzkarte 1998 (II) und Modellergebnis (III)

Landnutzungsklassen

	Ackerfläche
	Plantagen
	Gewächshäuser
	L.s.F.
	Andere

Übereinstimmung

Hoch : 1



Niedrig : 0

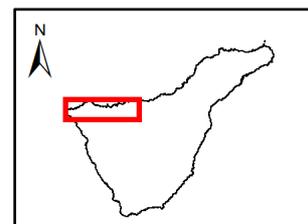
0 2,5 5
Kilometer

Abb. 64: Exemplarische Darstellung der Landnutzungen 1986/88 und 1998 sowie der modellierten Landnutzung 1998 (Karten I-III) und der entsprechenden Gesamtübereinstimmung im Vergleich zur Referenzkarte 1998 (Karte IV) (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Am Beispiel der Region um Buenavista del Norte und Los Silos im Nordteil des Untersuchungsgebietes wird das Modellergebnis von Kalibrierung 4 noch einmal exemplarisch dargestellt (vgl. Abb. 64). Hierdurch wird deutlich, dass die Lagegenauigkeit einzelner Klassen im Vergleich zum Referenzmodell variiert. Beispielsweise ist die Klasse Gewächshäuser überrepräsentiert, während Ackerflächen und Plantagen sehr gut mit der Realität übereinstimmen. Wie sich diese unterschiedlichen Verteilungen der Landnutzungsklassen auf die Modellgüte auswirken, wird zusätzlich durch die entsprechende Darstellung der Gesamtübereinstimmung bei einer räumlichen Auflösung von 8 x 8 Pixeln belegt.

4.5.5.2 Validierungsergebnis

Bei der Validierung des vorgestellten Landnutzungsmodells anhand der Datensätze 1998 und 2010 werden dieselben Parametereinstellungen verwendet wie sie zuvor bei der Kalibrierung ermittelt wurden. Einzige Ausnahme bildet die Modifikation der sozioökonomischen Rasterdatensätze zur Bevölkerungsanzahl und -dichte. Diese wurden entsprechend des Modell-Startzeitpunktes 1998 aktualisiert. Die Modellergebnisse zur Erfassung der Güte werden ebenso wie bei der Kalibrierung einem Referenz- sowie dem entsprechenden Nullmodell gegenübergestellt. Dabei sind die jeweiligen Übereinstimmungen innerhalb der verschiedenen Auflösungsstufen und als gewichtete Gesamtübereinstimmung dargestellt. Letztere wurde auch mit einer Gewichtung von $k = 0,01$ ermittelt.

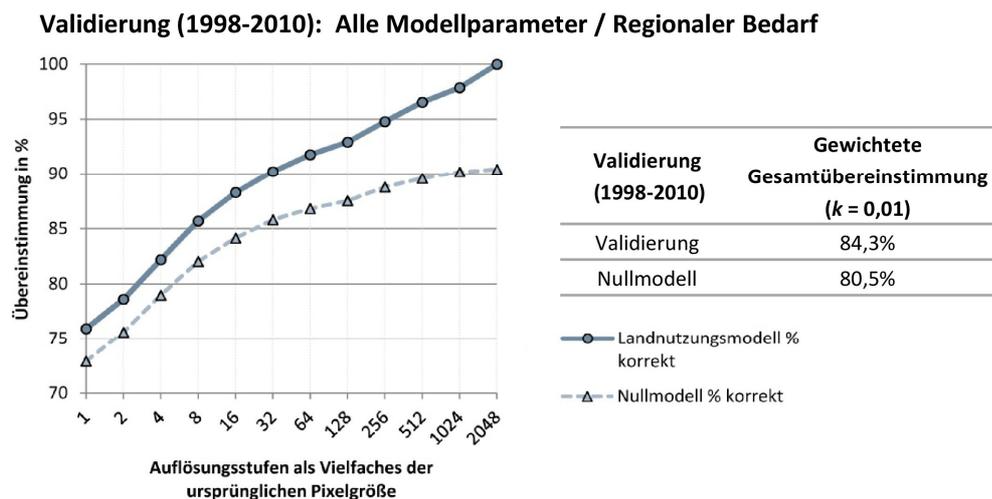


Abb. 65: Ergebnisse der Modellvalidierung (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Güte des Landnutzungsmodells ist bei der Validierung mit einer gewichteten Gesamtübereinstimmung von 84,3% noch einmal um mehr als 2% höher als die des Kalibrierungsmodells und liegt bei jeder Auflösungsstufe über dem Nullmodell. Das Modell ist somit für die Simulation zukünftiger agrarischer Landnutzungsdynamiken auf Teneriffa sehr gut geeignet. Mit einer Übereinstimmung von ca. 83% bei einer Auflösung von 4 x 4 Pixeln (200 x 200 m) kann zudem von einer sehr hohen Lagegenauigkeit des entwickelten Landnutzungsmodells ausgegangen werden.

5 Simulation agrarischer Landnutzungsdynamiken bis 2030

Landnutzungsmodelle können im Allgemeinen nicht dazu verwendet werden, zukünftige Landnutzungsveränderungen, sei es die urbane Expansion von Städten oder die räumliche Entwicklung landwirtschaftlicher Dynamiken wie in der vorliegenden Arbeit, vorherzusagen. Hingegen ist es möglich, unter der Annahme verschiedener sozioökonomischer Entwicklungen und zukünftiger umweltbezogener Veränderungen zu erforschen, wie die Zukunft unter klar definierten Bedingungen aussehen könnte. Dies geschieht durch die Konstruktion von Szenarien, die je nachdem, welche wissenschaftlichen Sachverhalte gegeben sind, für sehr unterschiedliche Zielsetzungen eingesetzt werden (ROUNSEVELL et al. 2005, S. 117; CARTER & LA ROVERE 2001, S. 147). Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (CARTER et al. 1994, S. 16) versteht ein Szenario als “[...] *a coherent, internally consistent and plausible description of a possible future state of the world*”. Es beschreibt also nicht was zukünftig passieren wird, sondern was passieren kann. Dabei muss für eine entsprechend hohe Aussagekraft und Güte des Szenarios die inhaltliche Plausibilität, logische Konsistenz und inhaltliche Transparenz gewährleistet sein (MEYER 2000, S. 25 f.). Des Weiteren wird zur Abdeckung der Bandbreite möglicher Unsicherheiten in der Prognose zukünftiger Veränderungen oftmals ein Set an mehreren Szenarien aufgestellt, um verschiedene Wege der zukünftigen Entwicklung aufzuzeigen. Die Grundidee des Szenario-Ansatzes ist somit der Gebrauch multipler Perspektiven zur Erforschung eines spezifischen Problems (ROUNSEVELL et al. 2005, S. 118; CARTER & LA ROVERE 2001, S. 150).

Die aktuelle wirtschaftliche Situation der kanarischen Landwirtschaft ist geprägt durch verschiedene Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken, wie die Ergebnisse einer durch das GOBIERNO DE CANARIAS (2013a, S. 293 ff.) durchgeführten SWOT-Analyse (Analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) aufzeigen (vgl. Abb. 66). Diese Analysetechnik dient der Identifizierung von internen und externen Schlüsselkomponenten einer spezifischen Angelegenheit, in diesem Fall der Entwicklungsmöglichkeiten der kanarischen Landwirtschaft und des ländlichen Raums (KUKRETY et al. 2013, S. 45).

<p style="text-align: center;">Strenghts (Stärken)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exklusivität spezifischer landwirtschaftlicher Produkte • Klimatische Eigenschaften begünstigen die landwirtschaftliche Produktion über das gesamte Jahr hinweg • Tradition und Erfahrung im Umgang mit Wasser als knapper Ressource • Begrenzter Raum durch Insellage führt zu Nähe der lokalen Märkte • Starker Anstieg der Tourismuswirtschaft - Zusätzliche Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten und ländlichem Tourismus • Bevorzugte Behandlung im Rahmen verschiedener EU-Programme 	<p style="text-align: center;">Opportunities (Chancen)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zunahme der wirtschaftlichen Zusammenarbeit mit afrikanischen und amerikanischen Ländern • Stärkung der Handelsbeziehungen mit anderen Teilen Europas • Steigende Nachfrage nach Qualitätsprodukten und ökologischen Erzeugnissen • Steigender Export von landwirtschaftlichen Produkten in die Heimatländer der Touristen
<p style="text-align: center;">Weaknesses (Schwächen)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Natürliche Grenzen durch Geländebeschaffenheit und Verknappung der Wasserressourcen beschränken landwirtschaftliche Produktion • Mehrheitlich kleine Betriebsgrößen durch Geländebeschaffenheit sowie durch Erbrechte • Hohe Abhängigkeit von ausländischen Rohstoffen, vor allem Energieerzeugnissen • Geringe Wettbewerbsfähigkeit durch hohe Produktionskosten (Arbeitskosten, Transportkosten, Düngemittel und Pestizide) • Hohe Arbeitslosenquote 	<p style="text-align: center;">Threats (Risiken)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlicher Abschwung verursacht eine Reduktion des Verbrauchs von Produkten und Dienstleistungen im ländlichen Raum • Abwanderung von Fachkräften infolge der aktuellen Wirtschaftslage • Begrenzt Potenzial bei der Umsetzung neuer Technologien • Wirtschaftliche und ökologische Risiken in Bezug auf den Klimawandel • Import von landwirtschaftlichen Erzeugnissen mit niedrigeren Preisen

Abb. 66: SWOT-Analyse zur aktuellen Situation der kanarischen Landwirtschaft (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 293 ff.)

Die SWOT-Analyse lässt erahnen, dass die zukünftige Dynamik der Landwirtschaft in sehr differenzierter Weise ablaufen kann. Dies hängt maßgeblich davon ab, ob die spezifischen Chancen und Stärken des kanarischen Agrarsektors berücksichtigt und sinnvoll umgesetzt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die mögliche zukünftige Entwicklung des Agrarsektors daher durch zwei Entwicklungsszenarien dargestellt, die die landwirtschaftliche Dynamik Teneriffas bis ins Jahr 2030 sehr unterschiedlich beschreiben. So wird zum einen ein Trendszenario entwickelt, das durch die Analyse der historischen Entwicklung im Untersuchungsgebiet aufzeigt, welche agrarischen Landnutzungsveränderungen erfolgen, wenn sich der bisherige Trend mit einer Steigerung der Intensivlandwirtschaft und einer weiteren räumlichen Abnahme von Ackerflächen in Peripheriegebieten fortsetzt. Zum anderen zeigt ein zweites Szenario auf, welche landwirtschaftlichen Veränderungen durch eine erfolgreiche Umsetzung von Förderprogrammen und -maßnahmen der Europäischen Union zur Unterstützung der kanarischen Landwirtschaft entstehen können. Grundlage zur Entwicklung dieses Szenarios sind vor allem zwei spezifische Förderinstrumente der Europäischen Union, die insbesondere auf eine Erhöhung der wirtschaftlichen Autarkie, eine Wiederbelebung des lokalen Marktes sowie auf eine generelle Modernisierung des primären Sektors abzielen: das Programm zur Lösung der spezifisch auf die Abgelegenheit und Insellage zurückzuführenden Probleme (POSEICAN) sowie das Programm zur Entwicklung des ländlichen Raums der Kanarischen Inseln 2007/2013 und 2014/2020 (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2011, S. 27). Im Folgenden werden die beiden Szenarien hinsichtlich ihrer konzeptuellen Entwicklung detailliert vorgestellt sowie die jeweiligen Resultate der Landnutzungssimulationen erörtert und bewertet.

5.1 Szenario 1 – Trendszenario

Zur Berechnung der zukünftigen Entwicklung der Landwirtschaft unter der Annahme einer Fortführung des historischen Verlaufs der einzelnen Landnutzungsklassen, dem so genannten Trendszenario, muss zunächst die bisherige Entwicklung der Landwirtschaft quantifiziert werden. Hierzu werden Techniken der Trendanalyse angewendet, die „[...]als mathematische Verfahren zur Bestimmung von regelhaften (deterministischen) Tendenzen (=Trends) in einer Zeitreihe“ (BRUNOTTE et al. 2002) definiert werden. In der Regel werden diese Trends durch die Gauß'sche Methode der kleinsten Quadrate ermittelt (VON DER LIPPE 1993, S. 401; BRUNOTTE et al. 2002). Anhand dieser auch bei der Regressionsanalyse verwendeten Schätzmethode wird zunächst der mathematische Funktionstyp bzw. die Trendfunktion festgelegt, die den erkannten Trendverlauf des Beobachtungszeitraums möglichst gut wiedergibt (BOURIER 2008, S. 167 ff.). Hierbei können unter anderem lineare, exponentielle sowie logarithmische Trendfunktionen verwendet werden (JANSSEN & LAATZ 2007, S. 481):

Linearfunktion: $\hat{y} = b_0 + b_1x$

Exponentialfunktion: $\hat{y} = b_0 * b_1^x$

Logarithmische Funktion: $\hat{y} = b_0 + b_1 \ln(x)$

mit:

\hat{y} = Trendwert

b_0, b_1 = zu schätzende Koeffizienten

x = unabhängige Variable oder Zeit/Jahr mit $x = 0, 1, 2, \dots$

\ln = natürlicher Logarithmus (zur Basis $e \approx 2,7183$)

(22)

Die Koeffizienten b_0 und b_1 müssen für den definierten Funktionstyp so bestimmt werden, dass die jeweilige Trendfunktion, visuell dargestellt als eine Trendlinie, den tatsächlichen Verlauf der Zeitreihenwerte möglichst exakt nachbildet. Dabei ist diejenige Trendlinie am besten geeignet, bei der die Summe der quadrierten Entfernungen von Zeitreihenwert und Trendwert minimal ist. Anhand der jeweils berechneten Funktionen ist es nun möglich, Prognosen für die zukünftige Entwicklung der einzelnen Landnutzungsklassen zu ermitteln. Diese stützt sich naturgemäß allein auf die aus der Zeitreihenanalyse ermittelten Gesetzmäßigkeiten, wodurch bei einer Fortschreibung der Zeitreihe angenommen werden muss, dass diese Gesetzmäßigkeiten auch im zu prognostizierenden Zeitraum Bestand haben (BOURIER 2008, S. 155 ff.).

Für die Simulation der agrarischen Dynamik bis ins Jahr 2030 wird der Landnutzungsbedarf der einzelnen Landnutzungsklassen in den drei Teilregionen benötigt (vgl. Kap. 4.5.4.4). Der nun folgenden Ermittlung des zukünftigen Landnutzungsbedarfs ging daher eine umfassende Analyse der direkten Trendberechnung in den einzelnen Subregionen voraus. Hierdurch konnte allerdings keine sinnvolle Prognose, vor allem bei der Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche, durchgeführt werden, da diese in Region 1 und Region 2 stark unter- bzw. überrepräsentiert war. Daher erfolgt die Trendanalyse zunächst auf Basis des gesamten Untersuchungsgebietes. Der so berechnete Landnutzungsbedarf wird schließlich in einem zweiten Schritt den einzelnen Teilregionen anteilig zugewiesen.

5.1.1 Trendanalyse der spezifischen Landnutzungsklassen und Ableitung des Landnutzungsbedarfs bis 2030

Für jede Landnutzungsklasse wird der bisherige Trend für das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen 1986 und 2010 analysiert²¹, die entsprechende Trendlinienfunktion ausgewählt und die benötigten Koeffizienten berechnet (vgl. Abb. 67). Die Auswahl der geeignetsten Funktion kann durch die jeweilige Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2 als Gütekriterium des geschätzten Trends bestimmt werden. Anschließend wird durch das Einsetzen des entsprechenden Jahreswertes in die Trendlinienfunktion für die Landnutzungstypen Ackerfläche, Plantagen, Gewächshäuser und Andere der zu erwartende Bedarfswert im Jahr 2030 bestimmt. Für die Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche wird keine Trendanalyse durchgeführt, da deren Landnutzungsbedarf vornehmlich aus den Dynamiken der genannten Landnutzungstypen und folglich mit der Veränderung der restlich bedarfsorientierten Landnutzungstypen zusammenhängt (vgl. Kap. 4.2). Dieser Demand resultiert somit ausschließlich aus der maximalen Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets abzüglich der Bedarfswerte der restlichen Landnutzungsklassen. Für den Zeitraum zwischen 2010 und 2030 wird für alle fünf Landnutzungsklassen ein linearer Verlauf vorausgesetzt, da bei einer jährlichen Trendberechnung mittels der Trendfunktion vor allem für die ersten Prognosejahre unlogische Bedarfswerte entstehen würden. Dies gilt insbesondere für die Landnutzungsklasse Plantagen. Hier wäre der Bedarf für das Jahr 2011 um annähernd 500 ha höher als im Vorjahr, was anhand der entsprechenden Trendlinie ersichtlich wird (vgl. Abb. 67).

²¹ Zur besseren Berechnung der Landnutzungsbedarfs werden die erfassten Werte der Landnutzungsklassifikation 1986/88 als Landnutzungsbedarf 1986 bezeichnet. Der Landnutzungsbedarf zwischen 1986 und 1988 beinhaltet daher eine nicht quantifizierbare Ungenauigkeit.

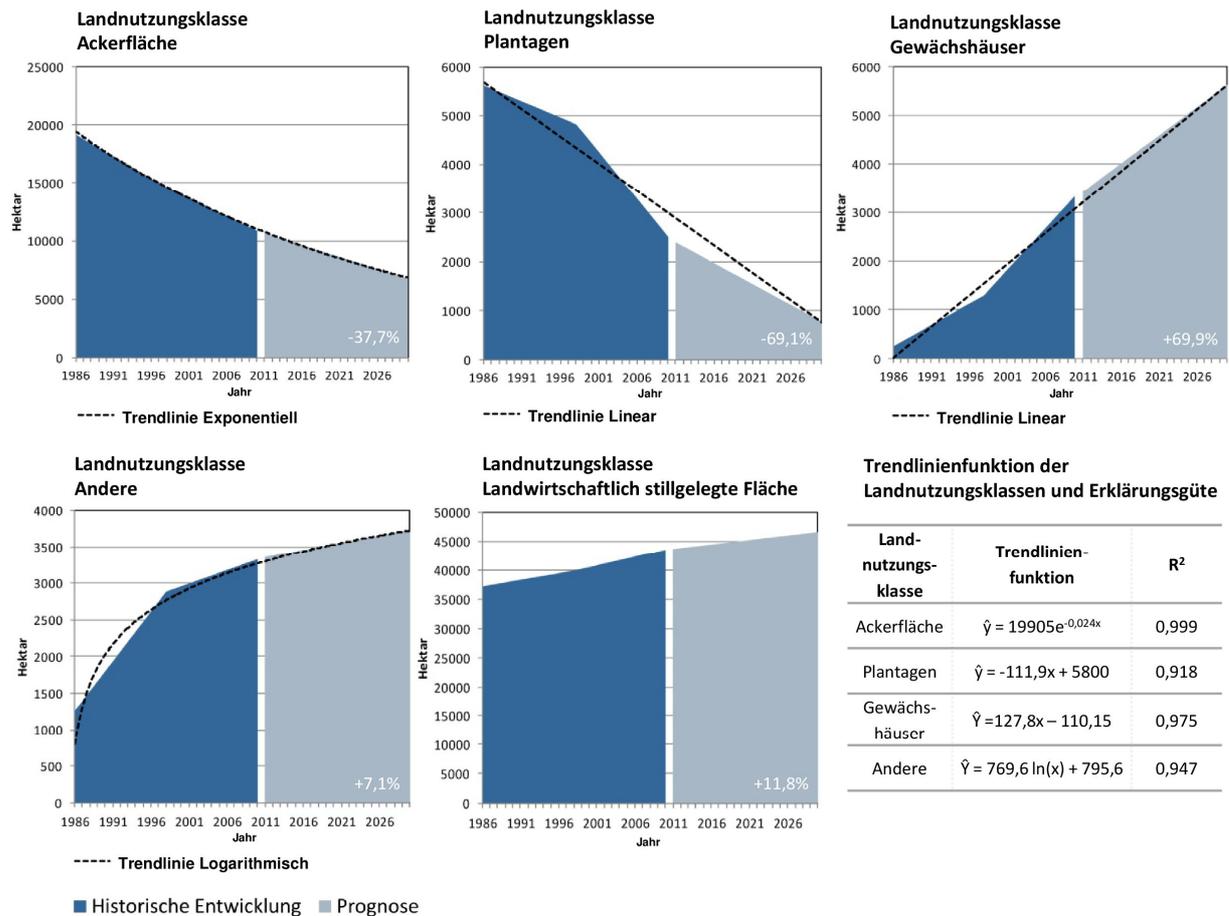


Abb. 67: Auf Grundlage des historischen Verlaufs (dunkelblau eingefärbt) berechnete Entwicklungstrends (schwarze Trendlinie) und prognostizierte Bedarfswerte der einzelnen Landnutzungsklassen zwischen 2011 und 2030 (hellblau eingefärbt) im gesamten Untersuchungsgebiet sowie die klassenspezifischen Trendlinienfunktionen und Bestimmtheitsmaße. Der Bedarfswert der Landnutzungsklasse Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche resultiert aus der maximalen Gesamtfläche des Untersuchungsraumes minus den Bedarfswerten der restlichen Landnutzungsklassen (Quelle: Eigene Darstellung)

Letztlich muss der ermittelte Gesamtbedarf für die Jahre 2011 bis 2030 den drei Teilregionen anteilig zugewiesen werden. Der prozentuale, regionspezifische Anteil der Landnutzungsklassen im Jahr 2010 an der Gesamtfläche der Landnutzungsklassen 2010 im Untersuchungsgebiet dient hierbei zur Orientierung und wird zur Berechnung der regionspezifischen Verteilung der Klassen im Jahr 2030 herangezogen. Er spiegelt im Gegensatz zur regionspezifischen Verteilung der Landnutzungen in den Jahren 1986 und 1998 die aktuellen räumlichen Flächendynamiken im Untersuchungsgebiet wider²². Ebenso wie bei der Berechnung des Gesamtbedarfs wird auch hier eine lineare Flächenentwicklung zwischen 2010 und 2030 erwartet. Der jeweilige regionale Bedarf der Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche resultiert schließlich in gleicher Weise wie bei der Berechnung des Gesamtbedarfs aus der maximalen Gesamtfläche der jeweiligen Teilregion abzüglich der Bedarfswerte der vier restlichen Landnutzungsklassen²³. Somit können folgende in Abb. 68 dargestellten Entwicklungstrends prognostiziert werden.

²² Dieser Berechnung ging eine Analyse zur Erfassung des gemittelten regionalen Anteils der Klassen in den Jahren 1986, 1998 und 2010 an der jeweiligen Gesamtverteilung voraus, um den Bedarf des gesamten Untersuchungsgebietes prozentual aufzuteilen. Jedoch konnte durch diese Methode kein zufriedenstellendes bzw. realistisches Ergebnis erreicht werden.

²³ Die Summe der drei regionalen Demands für alle Landnutzungsklassen stimmt dabei mit der in Abb. 67 dargestellten jährlichen Gesamtsumme der Klassen zwischen 2010 und 2030 überein.

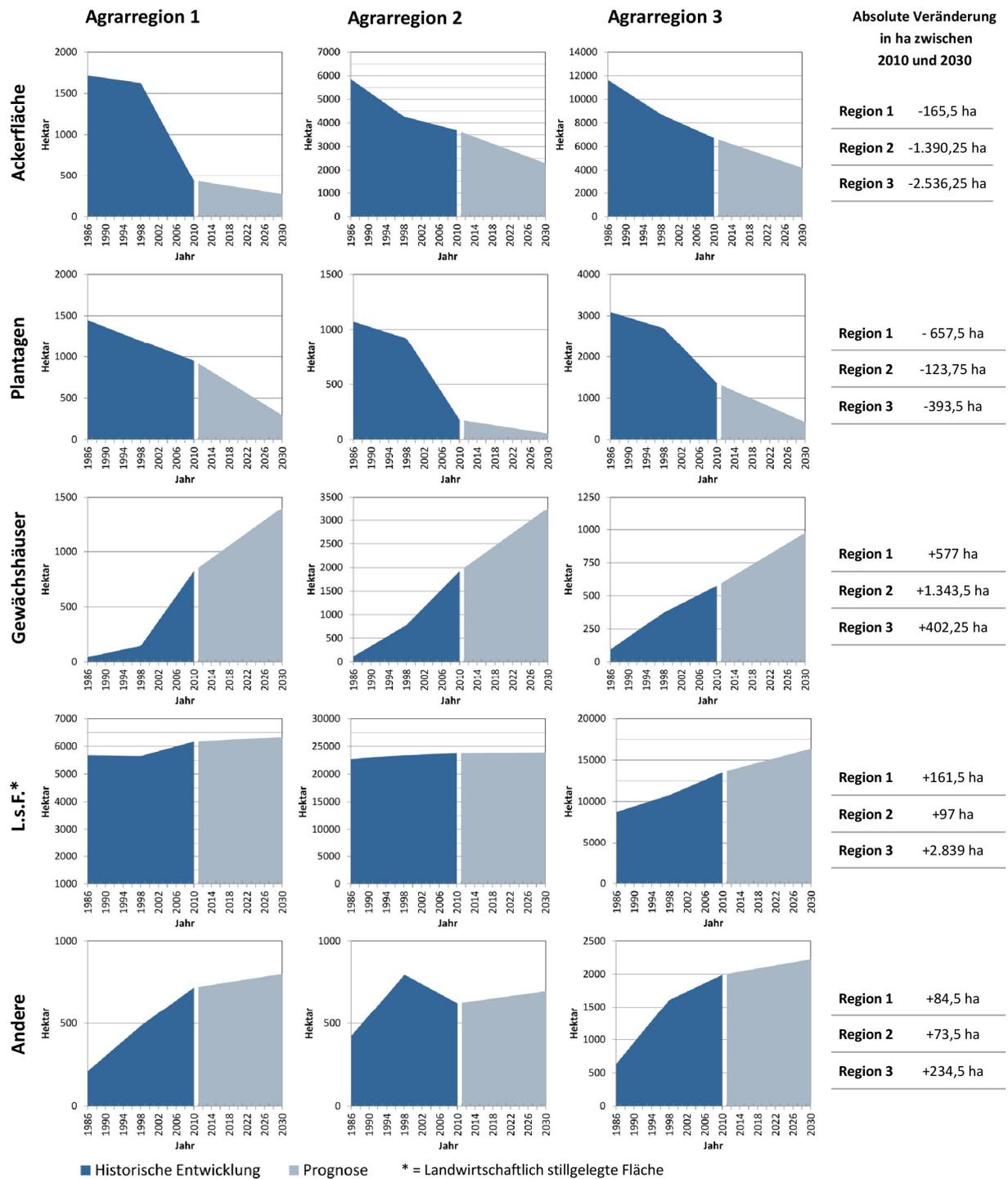


Abb. 68: Regionsspezifische Entwicklungstrends der einzelnen Landnutzungsklassen unter Szenario 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

Auffallend ist, dass die bisher starke Abnahme des Landnutzungstyps Ackerfläche in Region 1 für den Modellierungszeitraum 2011 bis 2030 geringer ausfällt. Würde der Bedarf der regionalen Trendkurve folgen, wäre diese Klasse schon nach wenigen Jahren nicht mehr präsent. Dies ist gerade vor dem Hintergrund, dass auch in diesem touristisch geprägten Teil der Insel nach wie vor Subsistenzwirtschaft existiert und kleinere Landwirtschaftsbetriebe Anbaufrüchte für den lokalen Markt produzieren, nicht realistisch. Ähnliche Entwicklungen lassen sich auch für die Klasse Plantagen in Region 2 und 3 feststellen. Ein völliger Flächenrückgang dieser Klasse wäre auch hier nicht plausibel. Solche

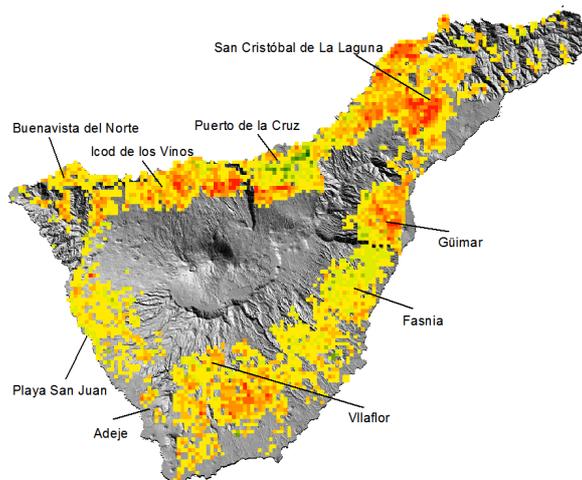
extremen Abwärtstrends, und auch in umgekehrter Weise zu starke Aufwärtstrends der Landnutzungsklassen in den verschiedenen Regionen, können durch die hier verwendete Methodik zur Bestimmung des Flächenbedarfs relativiert werden, wodurch sich ein realistischeres Abbild der möglichen zukünftigen Entwicklung ergibt.

5.1.2 Darstellung und Bewertung der Modellierungsergebnisse

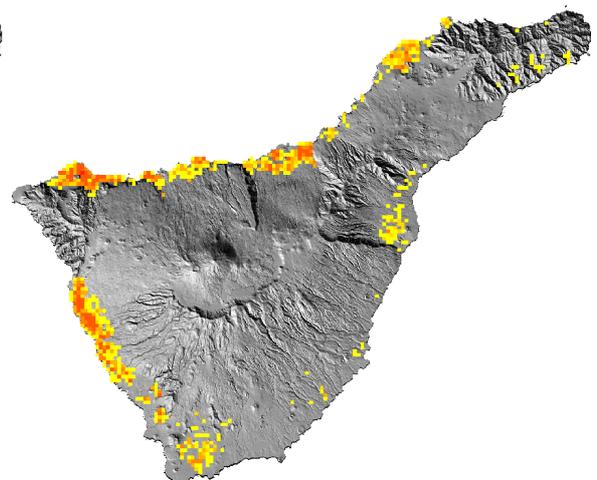
Zur räumlich expliziten Simulation der agrarischen Landnutzung bis ins Jahr 2030 wird der ermittelte Landnutzungsbedarf des Trendszenarios im Bedarfsmodul des kalibrierten Dyna-CLUE 2 Modells bereitgestellt und die sozioökonomischen Rasterdatensätze zur Bevölkerungsanzahl und -dichte entsprechend des Modellstartzeitpunktes 2010 aktualisiert. Das Modellergebnis gibt eine sehr unterschiedliche Entwicklungsdynamik der einzelnen Landnutzungsklassen wieder, wie in Abb. 69 ersichtlich wird. Diese zeigt die simulierte Veränderung der einzelnen Klassen zwischen 2010 und 2030 in ha pro Rastergrid mit einer Zellgröße von 500 x 500 m. Durch diese quantitative Darstellungstechnik wird, ähnlich wie bei der Change Detection-Analyse in Kap. 3.4.2, eine direkte Ermittlung der räumlichen Veränderungsintensität der einzelnen Landnutzungsklassen ermöglicht.

Es wird deutlich, dass die Klasse Ackerfläche nur sehr wenige Gebiete mit einer Flächenzunahme aufweist. Diese befinden sich in unmittelbarer Nähe zu Puerto de la Cruz im Norden sowie in mittleren Höhenlagen um Fasnía, dem traditionellen Obst- und Gemüseanbauggebiet im Süden. Daneben kristallisieren sich vier zentrale Kerngebiete heraus, für die ein deutlicher Flächenrückgang prognostiziert wird. Hierzu zählen die im Norden der Insel gelegenen montanen Gebiete zwischen Puerto de la Cruz und Icod de Los Vinos, die Wein- und Gemüseanbaugebiete um San Cristóbal de La Laguna sowie die südlichen Anbauregionen um Güímar und Vilaflor. Die Klasse Plantagen weist die größten Rückgänge vornehmlich im touristisch geprägten Westen und im humiden Norden auf. Im Rahmen der Landnutzungssimulation wird dabei, ähnlich der Agrarflächendynamiken zwischen 1986 und 2010 (vgl. Kap. 3.4.2), ein Großteil durch Gewächshauskulturen ersetzt. Dies bedeutet nicht unmittelbar einen Rückgang von typischen Monokulturen wie Bananen, sondern vielmehr eine weitere landwirtschaftliche Intensivierung, wovon sich unter anderem Ertragssteigerungen und Kostenersparnisse durch geringeren Wasserverbrauch versprochen werden (ROBINSON & SAUCO 2010, S. 154). Dementsprechend können bei der Klasse Gewächshäuser die höchsten Flächenzunahmen auf den ehemaligen Plantagenflächen sowie vermehrt in der gesamten Südregion ausgemacht werden. Auch hier liegen die Gründe für diese räumliche Entwicklung in der Kostenersparnis und Ertragssteigerung. Die Flächenrückgänge der bisher erläuterten Klassen, insbesondere der Ackerflächen, spiegeln sich in einer deutlichen Zunahme des Landnutzungstyps Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche wider. Es wird ersichtlich, dass fast der gesamte humide Nordteil der Insel durch starke Brachflächenzunahmen geprägt ist. Insbesondere in den peripheren und höher gelegenen Regionen zwischen Buenavista del Norte und Puerto de la Cruz sind Hot Spots der Flächenzunahme mit über 7,5 ha pro Rasterzelle und z.T. weit darüber hinaus erkennbar. Dies bietet gerade für das Ökosystem Lorbeerwald eine gute Voraussetzung zur Regeneration durch sekundäre Sukzessionsprozesse, wie in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert wird.

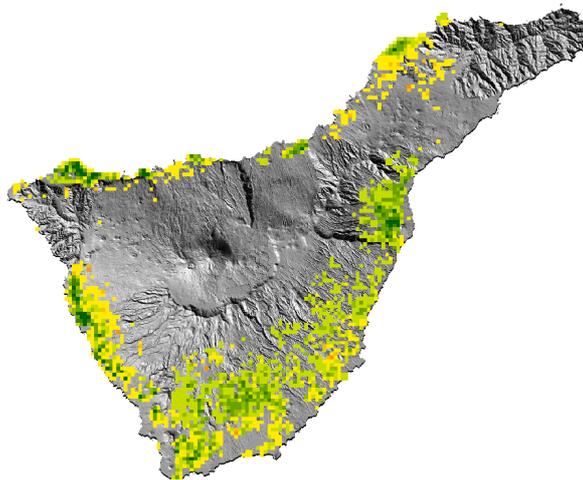
Klasse Ackerfläche



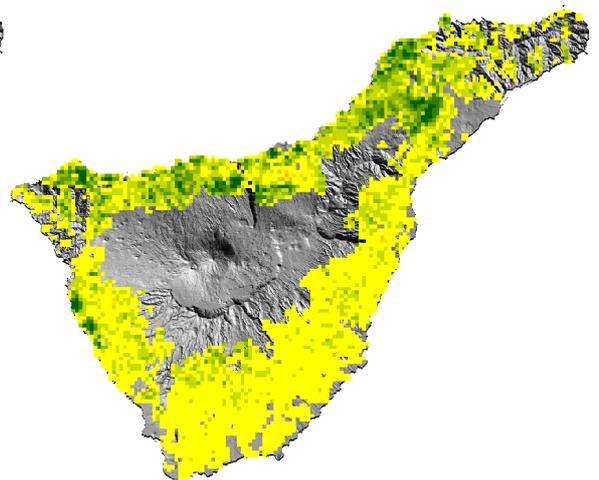
Klasse Plantagen



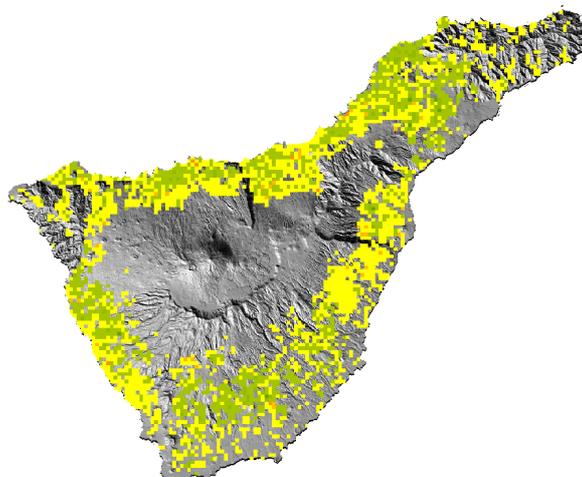
Klasse Gewächshäuser



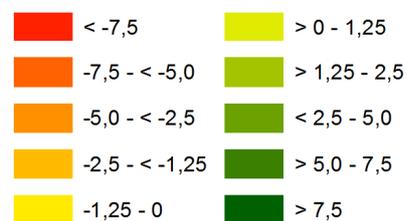
Klasse L.s.F.*



Klasse Andere



Simulierte Veränderung zwischen 2010 und 2030
in ha pro Rasterzelle
(Rasterzellengröße: 500 x 500 m)



0 5 10 20 30
Kilometer



* Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche

Abb. 69: Modellierungsergebnis der Landnutzungssimulation unter Szenario 1 (Trendzenario) – dargestellt als klassenspezifische Veränderung in ha pro Rasterzelle zwischen 2010 und 2030 (Rasterzellengröße: 500 x 500 m; entspricht 25 ha) (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Flächenzunahmen der stark infrastrukturell geprägten Klasse Andere entstehen meist in unmittelbarer Nähe zu bestehenden Siedlungen, beispielsweise bei Icod de los Vinos und La Laguna im Norden sowie bei Fasnia und Vilaflor im Süden. Vereinzelt Flächenabnahmen dieser eigentlich irreversiblen Landnutzungs-kategorie sind dem Umstand geschuldet, dass es sich hierbei um eine Mischklasse handelt, die in geringem Maße auch Ackerflächen beinhaltet (vgl. Kap. 4.5.1.1 und 4.5.4).

Die Intensivierungsprozesse, der Rückgang der Ackerflächen sowie die damit verbundenen Flächenstilllegungen werden in Abb. 70 noch einmal exemplarisch verdeutlicht. Dargestellt ist zum einen die Region um Buenavista del Norte im äußersten Westen. Hier sind großflächige Flächenumwidmungen der Klasse Plantage zur Klasse Gewächshäuser in Küstennähe sowie die Stilllegung von Ackerflächen in der montanen Region erkennbar. Letztgenannter Prozess wird des Weiteren noch einmal anhand der Region westlich von Puerto de la Cruz veranschaulicht. Hier sind zahlreiche landwirtschaftliche Flächenstilllegungen sichtbar, wodurch in höher gelegenen Regionen eine zusammenhängende Fläche von Brachland entsteht.

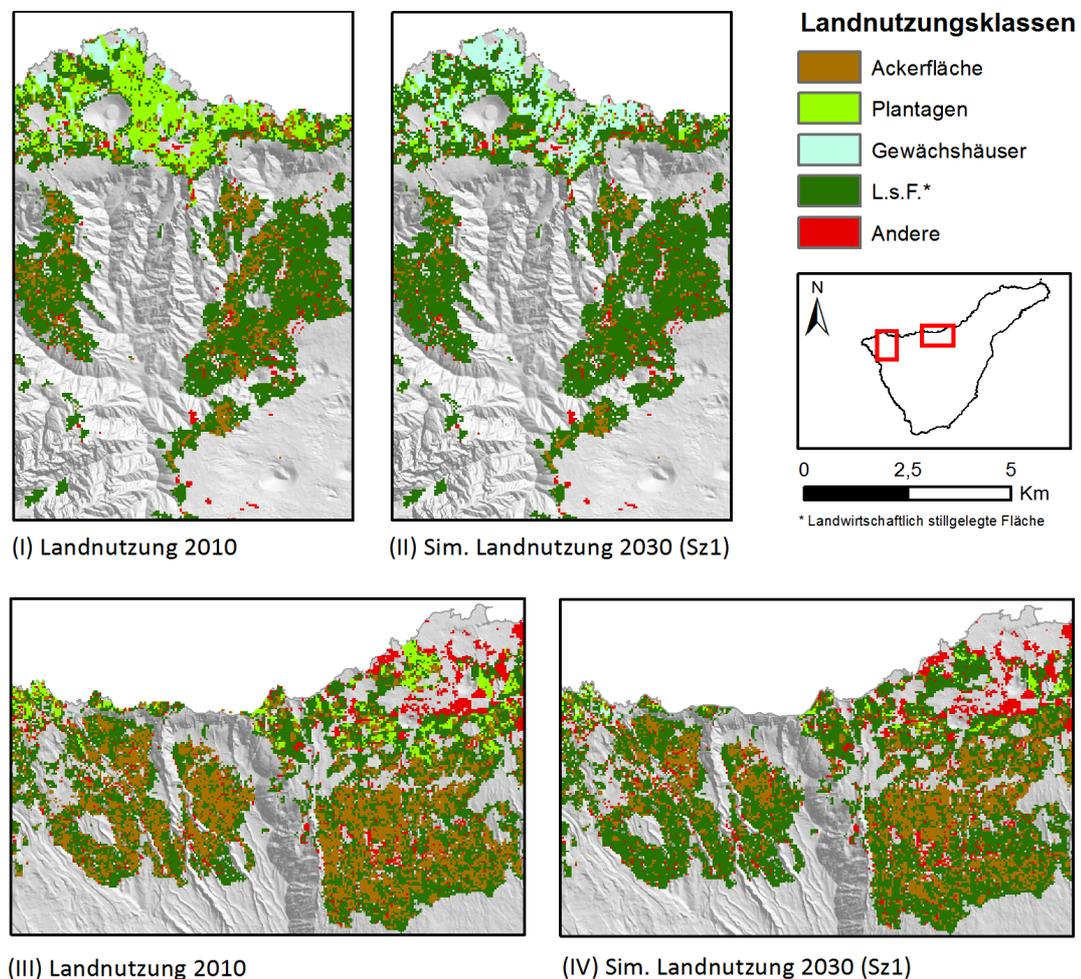


Abb. 70: Exemplarische Darstellung des Modellierungsergebnisses 2030 von Szenario 1 im Vergleich zur Ausgangssituation 2010 (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Insgesamt wird deutlich, dass die im Rahmen des Trendszenarios exportorientierte Ausrichtung der Landwirtschaft zu Lasten landwirtschaftlicher Produkte für den lokalen Markt in klar abgrenzbaren Regionen stattfindet. Während der Norden am stärksten geprägt ist von landwirtschaftlichen Flächenstilllegungen der vornehmlich kleinen, montan gelegenen landwirtschaftlichen Betriebe, wird

der Süden und Südwesten durch massive Intensivierungsprozesse, erkennbar an einem starkem Anstieg der Klasse Gewächshäuser, weiter landwirtschaftlich ausgebaut.

5.2 Szenario 2 – EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft

Mehr als die Hälfte der Bevölkerung in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union lebt in ruralen Gebieten. Auf diese entfallen insgesamt 90% des Gesamtterritoriums, weshalb die Entwicklung des ländlichen Raumes ein zentraler Politikbereich der Europäischen Union ist. Die Land- und Forstwirtschaft spielt im Hinblick auf die Bewirtschaftung und als Plattform für die wirtschaftliche Diversifizierung dieses Raumes eine Kernrolle (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2006, S. 3). Die Kanarischen Inseln als eine von 17 autonomen Gemeinschaften Spaniens profitieren daher von verschiedenen Instrumenten und Förderprogrammen der EU, die durch spezifische Maßnahmen zur unterstützenden Entwicklung des ländlichen Raumes beitragen sollen. Zudem zählt der Archipel zu einem von acht Gebieten in äußerster Randlage der Europäischen Union, deren soziale und wirtschaftliche Entwicklung durch „[...]die Faktoren Abgelegenheit, Insellage, geringe Größe, schwierige Relief- und Klimabedingungen und wirtschaftliche Abhängigkeit von einigen wenigen Erzeugnissen“ (EUROPÄISCHE UNION 2012, Artikel 349) stark erschwert wird. Sie unterliegen damit zusätzlichen, speziell auf die Bedürfnisse dieser Regionen abgestimmten Unterstützungsprogrammen, die darauf abzielen, die Infrastrukturen zu verbessern und diejenigen Produktionssektoren zu fördern, die Arbeitsplätze schaffen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2013). Im Folgenden werden die beiden Hauptinstrumente der EU zur Förderung der kanarischen Landwirtschaft detailliert vorgestellt. Auf Grundlage dieser Förderprogramme wird anschließend das Szenario der landwirtschaftlichen Optimierung Teneriffas als Alternative zum vorherigen Trendszenario entwickelt.

5.2.1 Förderprogramme zur Unterstützung der kanarischen Landwirtschaft

Die wirtschaftliche und soziale Unterstützung der Kanarischen Inseln durch die Europäische Union zielt im Allgemeinen auf drei Ziele ab: 1) Verbesserung der Erreichbarkeit, 2) Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und 3) Stärkung der regionalen Integration. Hauptinstrumente zur Umsetzung dieser Ziele sind die EU-Strukturfonds sowie zwei speziell auf den Agrarsektor ausgerichteten Förderprogramme. Hierzu zählen der „Europäische Garantiefonds für die Landwirtschaft (EGFL)“ einschließlich des auf die Regionen in äußerster Randlage (Régions ultrapériphériques, RUP) zugeschnittenen Agrarprogramms „Programm zur Lösung der spezifisch auf die Abgelegenheit und Insellage zurückzuführenden Probleme (POSEI)“ sowie der „Europäische Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER)“ (EUROPÄISCHE UNION 2010).

5.2.1.1 Das EG-Programm zur Lösung der spezifisch auf die Abgelegenheit und Insellage der Kanarischen Inseln zurückzuführenden Probleme (POSEICAN)

Die Kanarischen Inseln sind Teil der POSEI-Programme, die durch entsprechende EG-Verordnungen 1992 und 2001 instrumentiert wurden (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2001). Das im Rahmen der Verordnung (EG) Nr. 1454/2001 speziell auf die Abgelegenheit und Insellage der Kanarischen Inseln entworfene Programm POSEICAN definiert dabei konkrete Ziele und Maßnahmen für die zukünftige Entwicklung des kanarischen Agrarsektors (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2006a). Es befindet sich gegenwärtig in der dritten Periode der Agrarpolitik zur Förderung der landwirtschaftlichen Produkte der Regionen in äußerster Randlage und erhält eine gleichbleibende jährliche Finanzierung aus dem EGFL

in Höhe von 268,4 Mio. Euro (vgl. EUROPÄISCHES PARLAMENT 2011, S. 31; EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2006a, 2006b). Im Jahr 2010 wurde ein weiteres Gemeinschaftsprogramm zur Unterstützung der Agrarproduktion der Kanarischen Inseln im Rahmen der POSEICAN-Vereinbarungen durch die Europäische Kommission beschlossen (vgl. GOBIERNO DE CANARIAS 2013c). Zusammenfassend bestehen folgende Hauptanliegen:

- Erhöhung des Anteils landwirtschaftlicher Autarkie;
- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit einheimischer Erzeugung gegenüber externer Konkurrenz durch Verbesserung der Betriebsproduktivität und Produktqualität sowie Investitionen in Unternehmen, die landwirtschaftliche Erzeugnisse aus überwiegend lokaler Produktion verarbeiten und vermarkten;
- Erhaltung der traditionellen landwirtschaftlichen Tätigkeiten, insbesondere des Anbaus von Wein, Kartoffeln und Tomaten;
- Erhaltung und Unterstützung der Bananenproduktion sowie
- Verhinderung des Tomatenproduktionsrückgangs durch Verbesserung der Anbaubedingungen in Gewächshäusern und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit.

Zur Umsetzung der genannten Ziele werden drei verschiedene Instrumente angewendet: 1) Eine Sonderregelung zur Kompensation von Versorgungsmehrkosten, die sich aus der Insellage und der Abgelegenheit des Archipels ergeben. Hierzu zählen Einfuhrkontingente für spezifische Agrarerzeugnisse aus Drittländern sowie Lieferbeihilfen für eingelagerte Gemeinschaftsprodukte. 2) Maßnahmen für die Entwicklung und den Erhalt der lokalen Agrarproduktionen, die aus flächenbezogenen Beihilfen für die Nutzpflanzenproduktion, Beihilfen für die Bananenproduzenten sowie Beihilfen für die Tierproduktion bestehen. Gerade die Erhaltung der traditionellen Anbauprodukte spielt dabei eine herausragende Rolle, da beispielsweise die Produktion von Kartoffeln sowohl aus wirtschaftlicher Sicht als auch hinsichtlich ihrer sozialen und ökologischen Dimension als lebenswichtig angesehen wird. Daher soll der in Terrassenfeldbau betriebene Kartoffelanbau, der aufgrund seiner Lage in mittlerer Höhe mit geringen Bodenbeschaffenheiten sehr hohe Produktionskosten aufweist, anhand entsprechender Sonderbeihilfen und Beihilfen zur Förderung der örtlichen Vermarktung unterstützt werden. Ebenso ist die Erhaltung von Rebflächen neben wirtschaftlichen Gründen auch aus ökologischer Perspektive unerlässlich, da die Anbaugelände meist in Trockengebieten und auf stark erosionsgefährdeten Böden liegen. Zudem dient der Weinbau durch die Schaffung von Arbeitsplätzen dem Erhalt des ländlichen Raumes und wirkt der allgemeinen Verödung der peripheren Regionen entgegen. Aufgrund dessen werden auch für diesen Agrarsektor pauschale Hektarbeihilfen gewährt (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2006a). Der Bananensektor gilt ebenfalls als wichtiges Element zur Aufrechterhaltung des sozialen und wirtschaftlichen Gefüges. Er birgt eine große Zahl an Arbeitsplätzen und fördert zugleich die Entwicklung anderer Wirtschaftszweige wie Düngerproduzenten, Transportunternehmen und Herstellern für landwirtschaftliche Geräte, die als Dienstleister an diesen Sektor gebunden sind. 3) Weitere begleitende Maßnahmen beinhalten beispielsweise ein spezifisches Erzeugerlogo zur Zertifizierung kanarischer Produktionen, ein Paket von Befreiungen und Ausnahmeregelungen gegenüber den allgemeinen Regeln zur Entwicklung des ländlichen Raumes sowie staatliche Beihilfen (GOBIERNO DE CANARIAS 2013c; EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2006a).

5.2.1.2 Das EG-Programm für die Entwicklung des ländlichen Raums der Kanarischen Inseln 2007/2013 sowie 2014/2020

Der zweite, maßgeblich auf die Förderung der kanarischen Landwirtschaft bezogene Gemeinschaftsfonds ist das Programm zur Entwicklung des ländlichen Raums der Kanarischen Inseln für 2007/2013 und dessen Fortführung im neuen mehrjährigen Finanzrahmen 2014/2020. Die öffentlichen Gesamtausgaben des Fonds für 2007/13 liegen bei etwa 334,8 Mio. Euro, die zu 47% aus dem ELER sowie von der Zentralregierung des Staates und der Regionalregierung finanziert werden. Das Programm ist durch verschiedene Achsen gekennzeichnet, wobei vor allem Achse 1, Maßnahmen zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Land- und Forstwirtschaft, mit 63% der Gesamtausgaben die höchste Priorität zukommt. Die zweite Achse umfasst die Verbesserung der Umwelt und des ländlichen Raums. Sie hat mit 19% Gesamtausgaben die zweithöchste Priorität und soll vor allem Beihilfen für Agrarumweltmaßnahmen bereitzustellen. Die dritte Achse dient schließlich der Förderung der Lebensqualität in den ländlichen Gegenden sowie der Diversifizierung der ländlichen Wirtschaft und verfügt über 11,1% der Gesamtausgaben (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2011, S. 31 f.).

Die geplante Fortführung der finanziellen Anstrengungen durch die EU ist gerade vor dem Hintergrund der spanischen Wirtschaftskrise und Absatzproblemen kanarischer Hauptexportprodukte wie Tomaten von hoher Notwendigkeit und führt im Rahmen des neuen Planungszeitraumes 2014/2020 zu umfangreichen Modifikationen in der Ausrichtung der zu erreichenden Ziele und der Entwicklung weiterer Prioritätsachsen (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2011, S. 33). Zusammenfassend können im Rahmen des EG-Programms 2007/2013 sowie für den neuen Planungszeitraum 2014/2020 folgende für die landwirtschaftliche Entwicklung relevanten Ziele aufgeführt werden (GOBIERNO DE CANARIAS 2012, 2013a):

- Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und der Betriebsrentabilität der kanarischen Landwirtschaft durch Qualitätssteigerungen und -regelungen von Agrarerzeugnissen sowie der Förderung ökologischer Landwirtschaft;
- Förderung lokaler Agrarproduktion;
- Hektarbeihilfen für Gebiete mit naturbedingten Nachteilen (montane Gebiete) zur Wiederbelebung der Landwirtschaft, zur Förderung des regionalen Gleichgewichts sowie zur Aufrechterhaltung des Agrarsektors in ländlichen Gebieten;
- Vermeidung von Landflucht und anschließender Erosion;
- Verbesserung des Einkommens bei landwirtschaftlich Beschäftigten zur Steigerung der Arbeitsplatzattraktivität;
- Steigerung der landwirtschaftlichen Arbeitsproduktivität;
- Wiederherstellung des landwirtschaftlichen Potenzials nach Naturkatastrophen und Einführung geeigneter vorbeugender Aktionen durch die Bildung von Erzeugergemeinschaften und Versicherungen sowie
- Wiederherstellung, Erhaltung und Verbesserung von Ökosystemen, die von der Landwirtschaft und Forstwirtschaft abhängig sind sowie Maßnahmen zur Ressourceneffizienz und Förderung kohlestoffarmer und klimaresistenter Landwirtschaft.

Neben diesen spezifisch auf die Landwirtschaft ausgerichteten Programmen bestehen weitere Maßnahmen der EU, die indirekt zur Entwicklung des Agrarsektors und des ländlichen Raums der Kanarischen Inseln beitragen. Hierzu zählt der „Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)“,

der mit seinen Investitionen in Infrastrukturen zur Stützung der gesamten Ökonomie des Archipels beiträgt und indirekt auch Auswirkungen auf die Exportkapazität der Landwirtschaft und auf die Entwicklung des ländlichen Raums hat (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2011, S. 32).

5.2.2 Definition des Simulationsszenarios und Ableitung des Landnutzungsbedarfs bis 2030

Ausgehend von den genannten Förderprogrammen zur Unterstützung und Optimierung der kanarischen Landwirtschaft muss nun evaluiert werden, wie der zukünftige Flächenbedarf der Anbauprodukte unter Berücksichtigung der angestrebten Ziele aussehen könnte. Hierbei muss die Prämisse verfolgt werden, eine möglichst realistische Zukunftsprognose zu erstellen, bei der die jeweiligen Maßnahmen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit, zur Förderung der lokalen Produktion und zur Unterstützung der ländlichen Bergregionen berücksichtigt werden und damit zum wirtschaftlichen Aufschwung des kanarischen Agrarsektors beitragen. Dieser wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand des flächenbezogenen Zuwachses der agrarischen Landnutzungsklassen gemessen. Intensivierungsprozesse im Sinne von Ertragssteigerungen pro Hektar können, auch wenn sie generell einen nicht unerheblichen Teil der Produktionssteigerung ausmachen, im Rahmen des verwendeten Landnutzungsmodells nicht berücksichtigt werden.

Zur Ableitung des Landnutzungsbedarfs 2030 wird daher zunächst die historische Entwicklung der Anbaufrüchte eruiert und unter Beachtung der jeweiligen produktspezifischen EU-Maßnahmen ein Szenario für die einzelnen Anbauprodukte entworfen. Anschließend wird der prognostizierte Landnutzungsbedarf der einzelnen Feldfrüchte in den zukünftigen Bedarf der ihnen entsprechenden Landnutzungstypen transformiert. Hierdurch kann die prozentuale Flächenveränderung der Landnutzungstypen bis 2030 ermittelt und anschließend der tatsächliche Gesamtbedarf der Klassen für das Bedarfsmodul berechnet werden. Nach der anteiligen Zuweisung des Gesamtbedarfs in einen regionalen Demand kann schließlich die Dynamik der agrarischen Landnutzung bis ins Jahr 2030 simuliert werden.

5.2.2.1 Prognose des zukünftigen Flächenbedarfs der spezifischen Anbauprodukte

Vor dem Hintergrund der genannten Förderprogramme und unter Beachtung der historischen Flächennutzung lassen sich sehr unterschiedliche Prognosen für den zukünftigen Bedarf der einzelnen Anbaufrüchte im Untersuchungsgebiet aufstellen. Die hektarbezogene Veränderung der Anbauflächen bis ins Jahr 2030 beruht dabei auf folgenden Annahmen:

a. Bananenproduktion

Die Flächennutzung im Bananensektor ist seit 1987 trotz des in den letzten Jahren verstärkten Imports von Bananen aus den AKP-Staaten²⁴ nach Europa, dem Hauptabsatzmarkt der kanarischen Banane, auf annähernd stabilem hohem Niveau. Dies hängt nicht zuletzt maßgeblich mit den EU-Beihilfen aus dem POSEICAN zusammen (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 102 ff.; GOBIERNO DE CANARIAS 2013c, S. 61 ff.). Durch weitere Sonderbeihilfen, verbesserte Werbekampagnen und Vertriebsketten wird für das Jahr 2030 eine leichte Zunahme hin zur ursprünglichen Ausdehnung von 1987 prognostiziert.

²⁴ Gruppe der afrikanischen, karibischen und pazifischen Staaten (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 106).

b. Weinproduktion

Die Produktion von Wein erlebte in den letzten Jahrzehnten einen starken Rückgang, der vor allem den hohen Produktionskosten infolge schwieriger Geländebeziehungen in den Anbauregionen und somit erschwerten Bedingungen hinsichtlich einer notwendigen Mechanisierung zuzuschreiben ist. Seit 1998 ist jedoch wieder ein enormer Anstieg zu verzeichnen. Aufgrund einer steigenden Nachfrage nach lokal produziertem Wein durch Touristen, deren zukünftige Anzahl auf 11 Mio. pro Jahr für die gesamten Kanaren geschätzt wird, sowie durch umfangreiche Hektarbeihilfen, wird für 2030 ein starker Zuwachs auf die ursprüngliche Ausdehnung 1987 prognostiziert (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 132 f.; GOBIERNO DE CANARIAS 2013c, S. 143).

c. Kartoffelproduktion

Der Kartoffelanbau erlitt seit 1987 die größten Flächeneinbußen von annähernd 7.000 ha. Als Gründe für diesen enormen Rückgang können die hohen Produktionskosten, die Abwanderung von Arbeitskräften infolge der Wirtschaftskrise und insbesondere das vermehrte Auftreten von Schädlingen genannt werden. Hierdurch entstanden Ernteverluste von zum Teil über 90%, wodurch zahlreiche betroffene Landwirte den Anbau einstellen mussten. Diesem für die kanarische Kultur sehr wichtigen Anbauprodukt soll jedoch zukünftig durch die einzelnen europäischen Förderinstrumente eine verstärkte Unterstützung zukommen (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 127 ff.; GOBIERNO DE CANARIAS 2013c, S. 40 f.). Durch Sonderbeihilfen für den Speisekartoffelanbau, durch Beihilfen für den Anbau in benachteiligten Gebieten sowie durch eine verstärkte Mechanisierung und Modernisierungen der Betriebe wird für diesen Sektor eine Erholung der Anbaufläche auf das Niveau von 1998 angenommen.

d. Produktion von Getreide und Leguminosen sowie von Obst und Gemüse (ohne Tomaten und Kartoffeln)

Nach einem deutlichen Einbruch zwischen 1987 und 1998 erholt sich die Produktion von Getreide und Hülsenfrüchten sowie von Obst und Gemüse zunehmend. Durch eine verstärkte finanzielle Unterstützung des Anbaus für den lokalen Markt wird eine Wiederbelebung der peripheren und montanen Regionen forciert (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 116 ff.; GOBIERNO DE CANARIAS 2013c, S. 132). Daher ist auch hier ein jeweils mittelstarker Anstieg zu erwarten.

e. Tomatenproduktion

Der Tomatensektor erfuhr insbesondere zwischen 1998 und 2010 starke Flächeneinbußen, die durch einen wachsenden Arbeitskräftemangel sowie durch Pflanzenschädlinge und -krankheiten hervorgerufen wurden. Hierzu tragen auch verstärkte Preiserückgänge aufgrund der Konkurrenz zu anderen Märkten in Spanien bei. Durch die Züchtung resistenter Sorten und Qualitätssteigerungen aufgrund von Modernisierungen der Gewächshäuser soll auch dieser Agrarbereich in Zukunft stark subventioniert und das Exportvolumen gesteigert werden (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 108 ff.; GOBIERNO DE CANARIAS 2013c, S. 32, 142). Daher wird auch hier eine Zunahme der Anbaufläche auf die ursprüngliche Ausdehnung 1987 prognostiziert.

f. Zierpflanzen

Der exportorientierte Zierpflanzensektor, bestehend aus Blumen und Schnittblumen, befindet sich seit 1987 auf annähernd stabilem Niveau. Trotz hoher Produktionskosten sowie einem verstärkten Aufkommen von neuen internationalen Märkten wird durch Hektarbeihilfen der EU, durch die Herstellung neuer Sorten und durch neue Bewässerungssysteme für Zierpflanzen eine annähernd gleichbleibende Stabilität bis 2030 vorausgesagt (GOBIERNO DE CANARIAS 2013a, S. 108 ff.; GOBIERNO DE CANARIAS 2013c, S. 22).

g. Andere

Der Bereich Andere ist zusammengesetzt aus weiteren Knollenfrüchten, Futterpflanzen und Industripflanzen wie Sonnenblumen, Zuckerrüben, Baumwolle und Tabak. Nach einer starken Zunahme zwischen 1987 und 1998 sowie einem darauffolgenden Flächenrückgang wird diesem Sektor eine leichte Zunahme für das Jahr 2030 unterstellt.

Darauf aufbauend werden folgende in Abb. 71 dargestellten Prognosen hinsichtlich des künftigen Flächenbedarfs der jeweiligen Feldfrüchte definiert. Ebenfalls aufgeführt ist die historische Entwicklung der Flächennutzung in den Jahren 1987, 1998 und 2010.

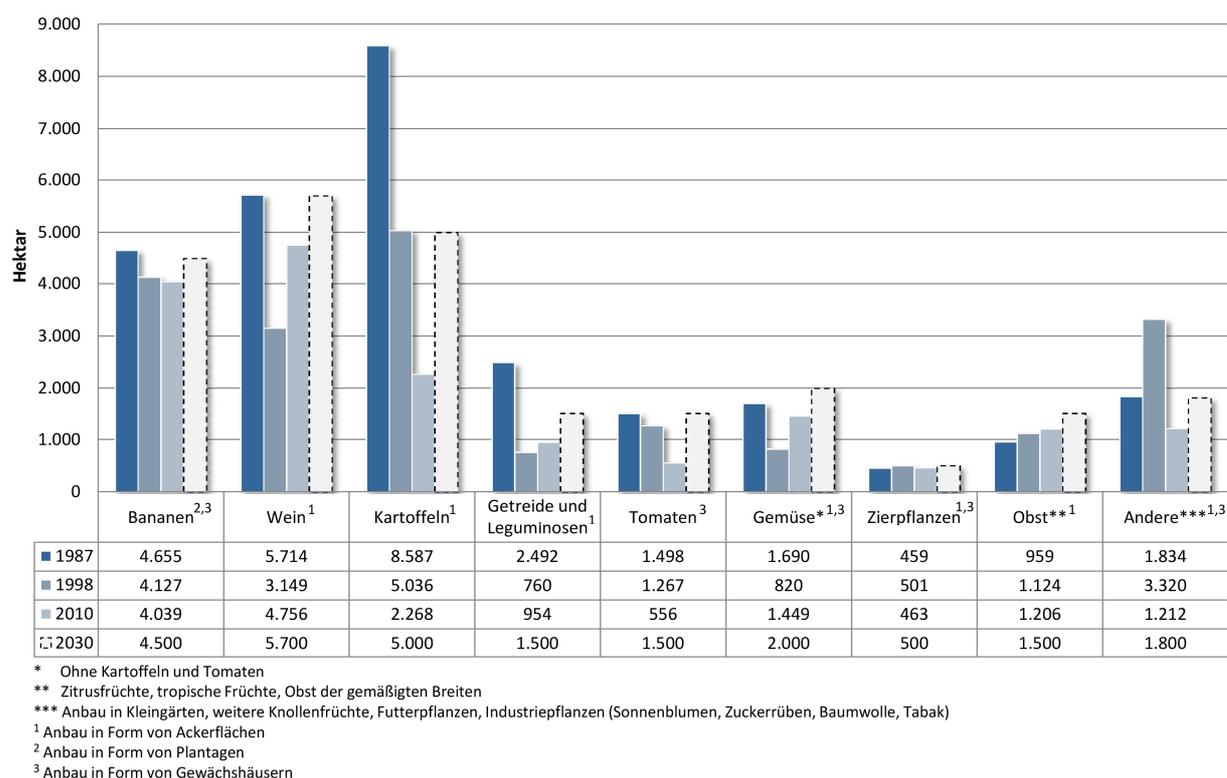


Abb. 71: Historische und prognostizierte Entwicklung der Anbauflächen in ha für spezifische kanarische Feldfrüchte (Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: GOBIERNO DE CANARIAS 2013b, aufgrund von Darstellungsunterschieden einzelner Statistiken wurden verschiedene Feldfrüchte zu Klassen zusammengefasst)

5.2.2.2 Umwandlung der produktspezifischen Prognosewerte in den zukünftigen regionalen Bedarf der Landnutzungsklassen

Die in Abb. 71 aufgeführten produktspezifischen Prognosen bis 2030 können nun, unter Beachtung der den Produkten entsprechenden Anbauformen bzw. kongruierenden Landnutzungstypen, in die Bedarfswerte der einzelnen Landnutzungsklassen transformiert werden. Zur Erfassung der prognostizierten, prozentualen Flächenveränderung zwischen 2010 und 2030 wird zugleich der klassenspezifische Flächenbedarf aus den produktspezifischen Anbauflächen im Jahr 2010 benötigt und muss ebenfalls berechnet werden. Hierzu werden die Hektarbeträge der verschiedenen Anbaufrüchte mit jeweils gleicher Anbauform addiert. Aufgrund der Kultivierung einzelner Feldfrüchte in verschiedenen Anbausystemen, beispielsweise bei Gemüse, wird für diese eine spezifische Gewichtung angewandt, die in etwa die jeweilige Verteilung der einzelnen Produkte in den entsprechenden Landnutzungsklassen widerspiegelt:

- Anbaufläche von Bananen: 70% Klasse Plantagen; 30% Klasse Gewächshäuser,
- Anbaufläche von Gemüse: 50% Klasse Ackerfläche; 50% Klasse Gewächshäuser,
- Anbaufläche von Zierpflanzen: 50% Klasse Ackerfläche; 50% Klasse Gewächshäuser,
- Anbaufläche von Andere: 40% Klasse Ackerfläche; 60% Klasse Gewächshäuser.

Zur Überprüfung der durch diese Gewichtung erzielten Verteilungsgenauigkeit der Anbauprodukte auf die Landnutzungsklassen wird zunächst der klassenspezifisch berechnete Flächenbedarf aus den produktbezogenen Anbauflächen im Jahr 2010 mit den Hektarbeträgen aus der Landnutzungsklassifikation 2010 verglichen (vgl. Abb. 72). Durch diesen Vergleich mit der realen Landnutzungsverteilung (Referenzbedarf) ist ersichtlich, ob die gewählte Übertragungsart eine ausreichende Genauigkeit besitzt und ob das oben erläuterte Zukunftsszenario sinnvoll in das für die Landnutzungssimulation benötigte Format transformiert werden kann. Anschließend wird die prozentuale Veränderungsrate der berechneten Hektarbeträge 2010 und 2030 erhoben und zur Ermittlung des klassenspezifischen Flächenbedarfs 2030 herangezogen.

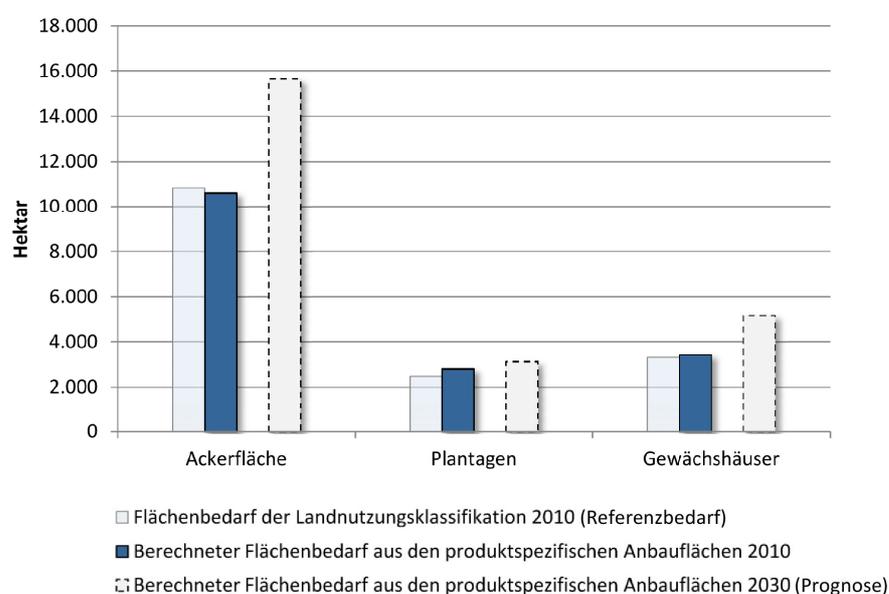


Abb. 72: Detektierter Flächenbedarf 2010 der Landnutzungsklassen Ackerfläche, Plantagen und Gewächshäuser (Referenzbedarf) sowie deren berechnete Flächenbedarfe aus den produktspezifischen Anbauflächen 2010 und dem Szenario 2030 (Quelle: Eigene Darstellung)

Beim Vergleich des berechneten Flächenbedarf 2010 mit dem Referenzbedarf wird ersichtlich, dass durch die hier angewandte Gewichtung eine hohe Verteilungsgenauigkeit der produktspezifischen Hektarbeträge auf die drei Landnutzungsklassen erzielt wird. Infolgedessen ist eine sinnvolle Transformation der einzelnen Entwicklungsszenarien kanarischer Anbaufrüchte in ein klassenspezifisches Szenario gewährleistet. Der Vergleich zwischen berechnetem Flächenbedarf 2010 und prognostiziertem Flächenbedarf 2030 zeigt sehr unterschiedliche prozentuale Veränderungsraten für die drei Landnutzungsklassen:

- Ackerfläche: Zunahme um 47,5%
- Plantagen: Zunahme um 11,5%
- Gewächshäuser: Zunahme um 50%

Diese prozentualen Zuwachsraten werden nun zur Berechnung des Gesamtbedarfs 2030 der Klassen Ackerfläche, Plantagen und Gewächshäuser verwendet, indem die aus der Landnutzungs-klassifikation ermittelten Hektarbeträge aus dem Jahr 2010 mit den prognostizierten Zuwachsraten verrechnet werden. Für die Klasse Andere wird ein linearer Verlauf wie in Szenario 1 angenommen. Der Gesamtbedarf der Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche berechnet sich schließlich auch in diesem Szenario aus der maximalen Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets abzüglich den Bedarfs-werten der restlichen Landnutzungsklassen. Damit ergeben sich folgende in Abb. 73 dargestellte Prognosen für den Gesamtbedarf 2030.

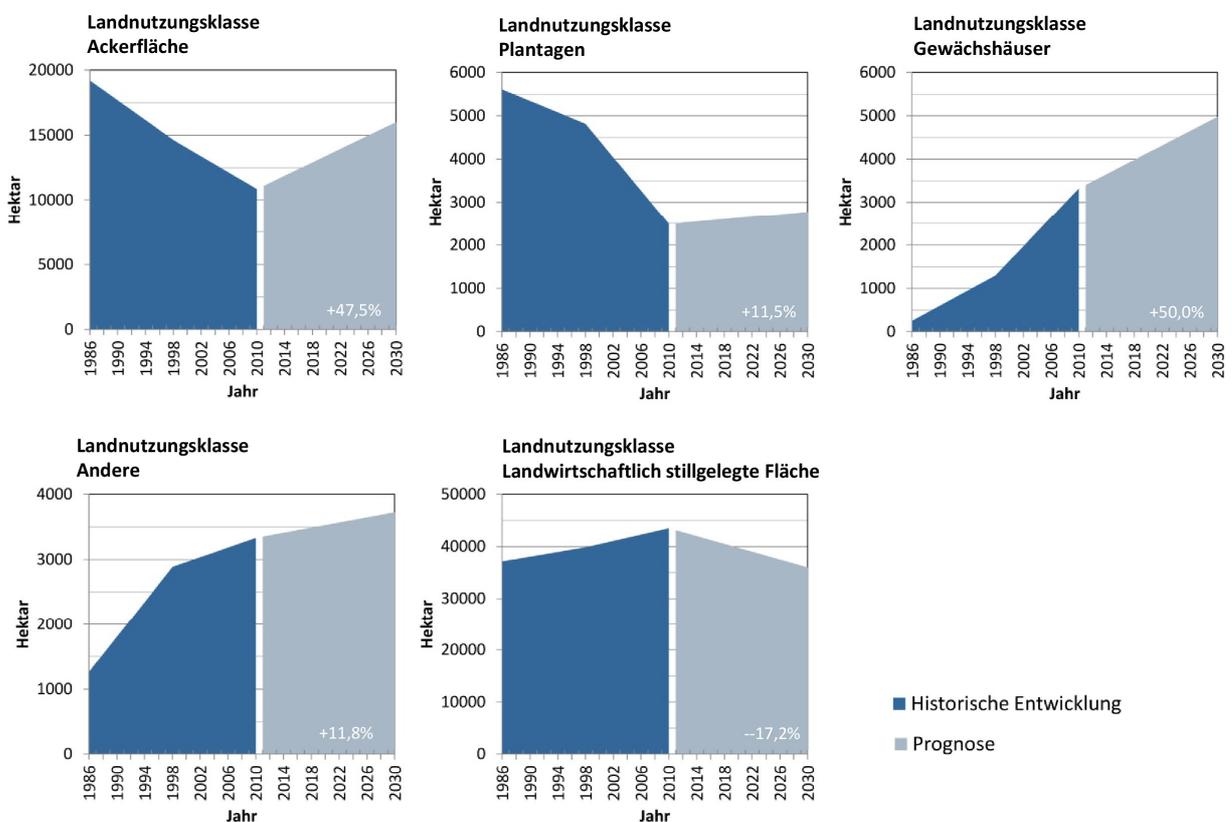


Abb. 73: Prognostizierte Bedarfswerte der einzelnen Landnutzungsklassen des gesamten Untersuchungsgebiet im Rahmen des Szenarios EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft (Quelle: Eigene Darstellung)

Es wird deutlich, dass durch die Zunahme landwirtschaftlicher Nutzflächen zahlreiche ehemals brachliegende Flächen wieder kultiviert werden, wodurch der ehemals starke Anstieg der Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche bis ins Jahr 2030 um 17,2% abnimmt. Der höchste absolute Zuwachs ist mit 5.420 ha für die Klasse Ackerfläche prognostiziert.

Schließlich wird auch bei Szenario 2 der zu erwartende Gesamtbedarf den drei verschiedenen Agrarregionen anteilig zugewiesen (Abb. 74).

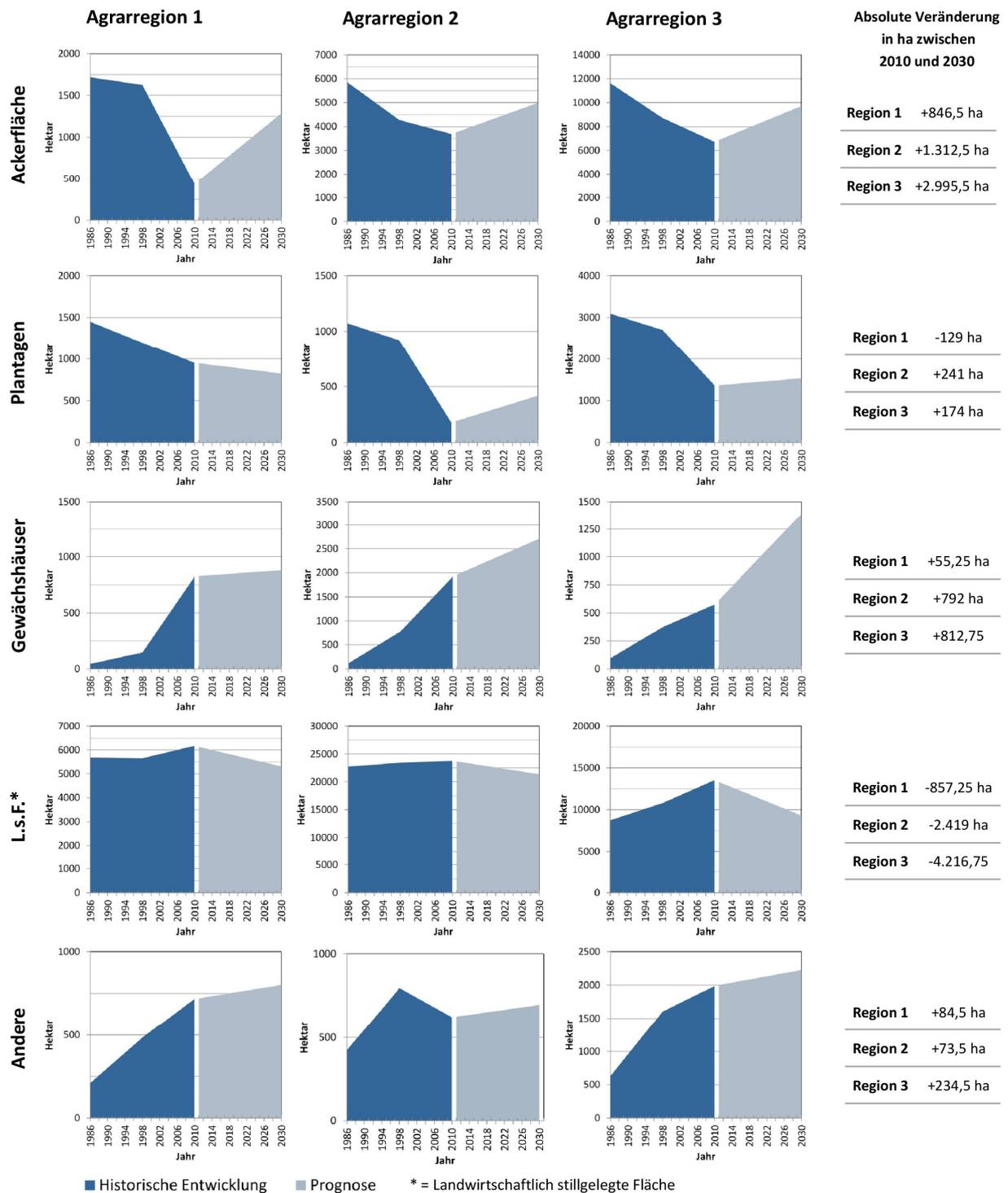


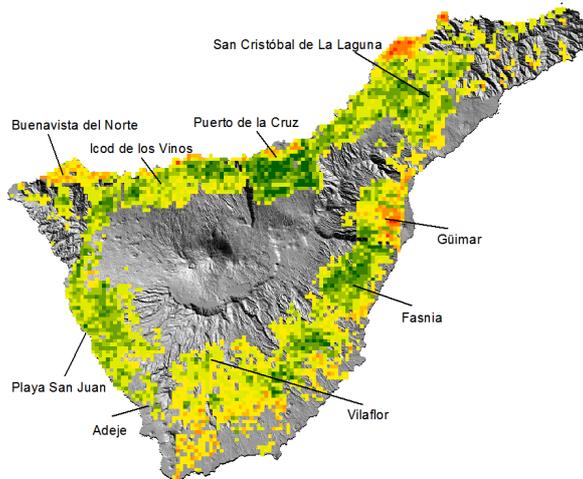
Abb. 74: Regionsspezifische Entwicklungsprognose der einzelnen Landnutzungsklassen unter Szenario 2 (Quelle: Eigene Darstellung)

Dies geschieht, im Gegensatz zu Szenario 1, bei dem die zukünftigen Flächennutzungsdynamiken den aktuellen Entwicklungstrend widerspiegeln, auf Basis des durchschnittlichen regionalen Anteils der Klassen in den Jahren 1986, 1998 und 2010 an der jeweiligen Gesamtverteilung. Hierdurch wird erreicht, dass die prognostizierte landwirtschaftliche Regeneration der einzelnen Agrarregionen nicht alleinig von den Flächenentwicklungen der letzten Jahre beeinflusst ist. Durch den Einbezug eines gemittelten regionalen Anteils über den Beobachtungszeitraum hinweg wird zudem gewährleistet, dass die Regionen statt spezifischer Extremzuwächse eher ausgewogene Veränderungsraten einzelner Landnutzungsklassen aufweisen. Neben der Annahme einer linearen Flächenentwicklung in den drei Teilregionen wird auch hier der regionale Bedarf der Klasse Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche in Abhängigkeit zu den übrigen Landnutzungsklassen erfasst.

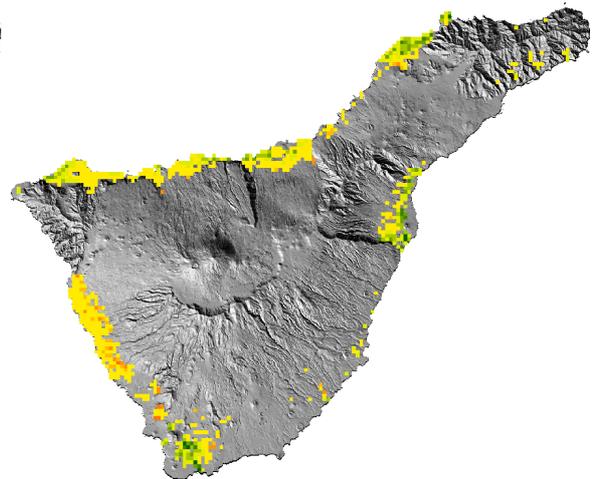
5.2.3 Darstellung und Bewertung der Modellierungsergebnisse

Das unter Einbezug des zuvor ermittelten Zukunftsbedarfs erzeugte Simulationsergebnis weist grundlegende Unterschiede im Vergleich zu Szenario 1 auf (vgl. Abb. 75). Bei Betrachtung der räumlichen Entwicklung einzelner Landnutzungsklassen finden sich jedoch auch Ähnlichkeiten. So sind bei der Klasse Ackerfläche neben kleineren, verstreuten Gebieten mit Flächenzunahme zwei zentrale Kerngebiete der landwirtschaftlichen Inwertsetzung erkennbar, die auch im vorigen Szenario ähnliche Tendenzen aufwiesen, allerdings in deutlich geringerem Ausmaß. Hierzu zählt zum einen die Region um Fasnía, deren stillgelegte Brachflächen vor allem für die lokale Obst- und Gemüseproduktion von besonderer Relevanz sind. Zum anderen findet eine verstärkte Rekultivierung von Ackerflächen in einem der fruchtbarsten Täler der Insel statt, dem südlich von Puerto de La Cruz gelegenen Orotavatal. Hier liegt eines der größten Anbaugelände für Kartoffeln, Wein sowie Obst und Gemüse. Trotz der zunehmenden Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen im gesamten Untersuchungsgebiet können auch kleinere Areale erfasst werden, in denen eine Abnahme der Klasse Ackerfläche erkennbar ist, beispielsweise nördlich von La Laguna sowie rund um Güímar. Jedoch beruht dieser Rückgang vornehmlich auf Intensivierungsprozessen, was durch einen gleichzeitigen Anstieg der Klassen Plantagen und Gewächshäuser in den genannten Gebieten erkennbar ist. Weiter wird deutlich, dass die in wirtschaftlicher Hinsicht positive Entwicklung des Agrarsektors dazu führt, dass zahlreiche ehemals stillgelegte Agrarflächen wieder unter Nutzung stehen. Davon betroffen sind vor allem die höher gelegenen Areale im Südosten der Insel sowie fast der gesamte Norden. Hier befinden sich die größten zusammenhängenden Gebiete des bisherigen landwirtschaftlichen Flächenrückgangs. Insbesondere die sich nördlich befindlichen stillgelegten Gebiete beinhalten dabei zum Teil sehr alte Brachflächen und haben dadurch in der Vergangenheit stark an ökologischer Bedeutung gewonnen, vor allem durch ihre Funktion als Regenerationsraum für umliegende sensitive Ökosysteme. So entstanden im Rahmen natürlicher Sukzessionsprozesse auf zahlreichen Flächen Sekundärformationen des ursprünglich für die Landwirtschaft gerodeten Lorbeerwaldes, die im Rahmen des hier beschriebenen Szenarios teilweise wieder entfernt werden müssen (vgl. Kap. 6.3). Die Klasse Andere weist hinsichtlich ihrer Flächenzunahme keine bedeutenden Kerngebiete auf. Dies liegt vor allem daran, dass das Auftreten der Landnutzungsklasse in einer starken nachbarschaftlichen Abhängigkeit zu den Klassen Ackerfläche, Plantagen und Gewächshäuser steht. Der verstärkte Zuwachs dieser drei Landnutzungstypen im gesamten Untersuchungsgebiet führt zu einem leichten Anstieg dieser Klasse, ohne dass spezifische Ballungszentren entstehen.

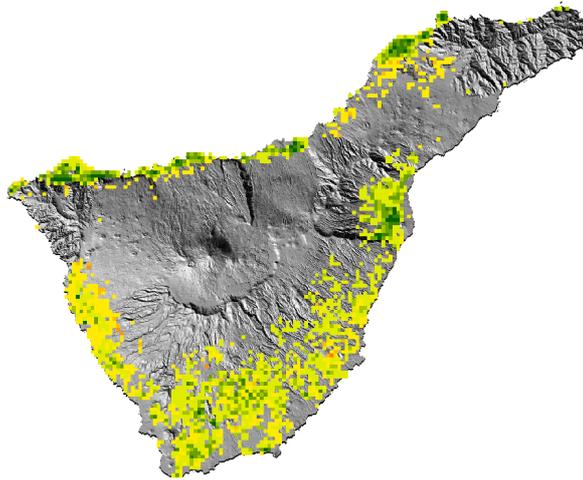
Klasse Ackerfläche



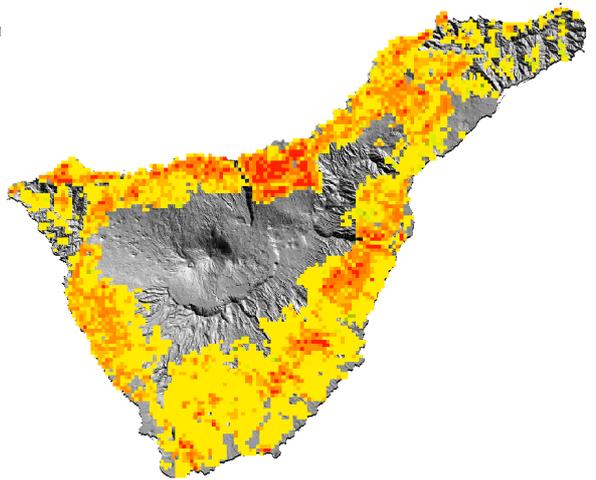
Klasse Plantagen



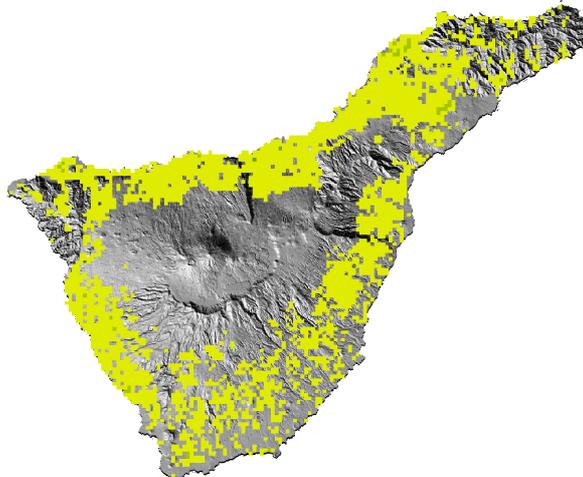
Klasse Gewächshäuser



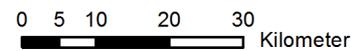
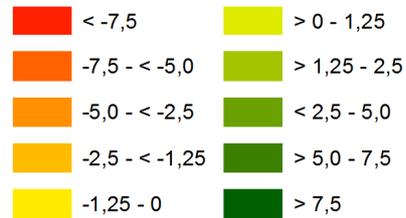
Klasse L.s.F.*



Klasse Andere



**Simulierte Veränderung zwischen 2010 und 2030
in ha pro Rasterzelle
(Rasterzellengröße: 500 x 500 m)**



* Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche

Abb. 75: Modellierungsergebnis der Landnutzungssimulation unter Szenario 2 (Optimierung der kanarischen Landwirtschaft) – dargestellt als klassenspezifische Veränderung in ha pro Rasterzelle zwischen 2010 und 2030 (Rasterzellengröße: 500 x 500 m - entspricht 25 ha) (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Die massive landwirtschaftliche Inwertsetzung ehemaliger Brachflächen und die Intensivierung durch Gewächshäuser und Plantagen im Rahmen von Szenario 2 wird noch einmal anhand eines exemplarischen Beispiels aus der Region um Buenavista del Norte im Nordwesten der Insel sowie anhand des Orotavatal nördlich von Puerto de la Cruz dargestellt (vgl. Abb. 76). Erkennbar ist vor allem die deutliche Zunahme von Agrarflächen in mittleren Höhen sowie die küstennahe Inanspruchnahme und Umnutzung von Brach- bzw. Ackerflächen.

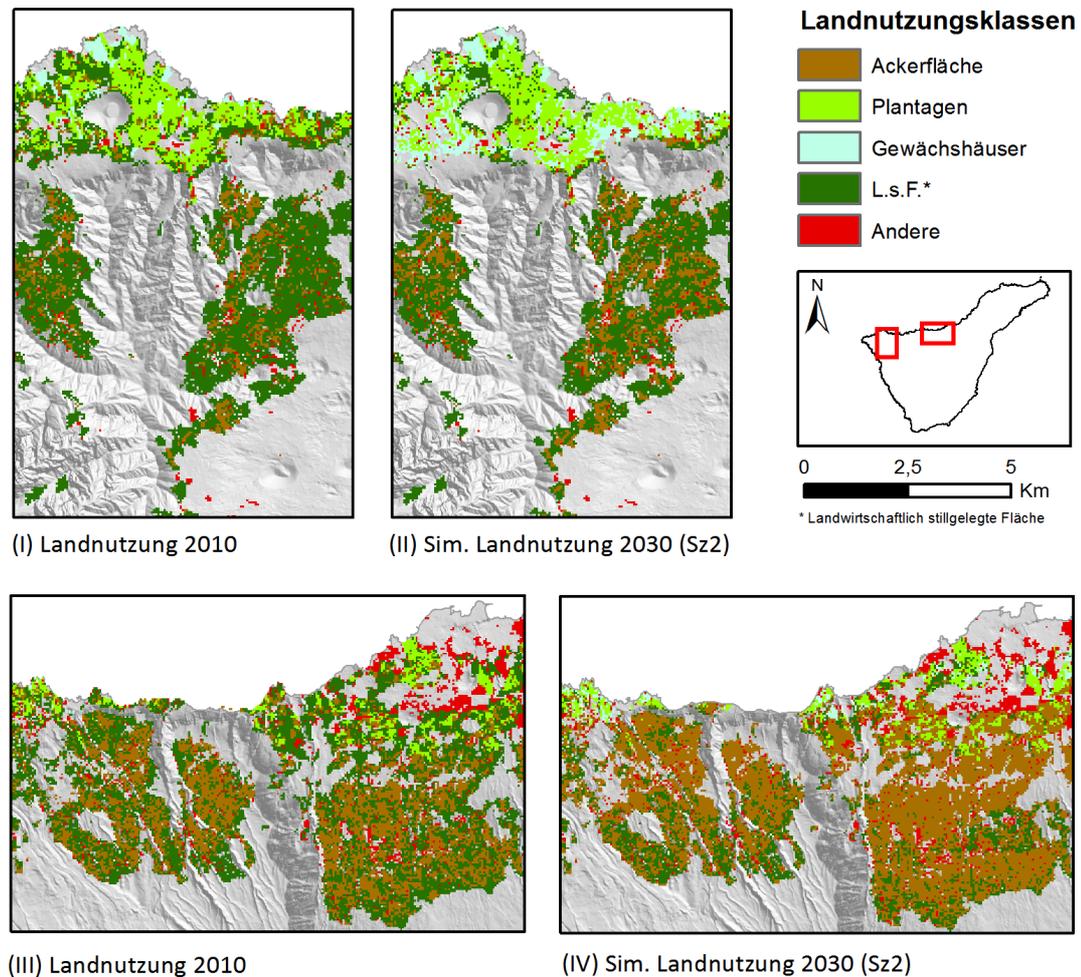


Abb. 76: Exemplarische Darstellung des Modellierungsergebnisses 2030 von Szenario 2 im Vergleich zur Ausgangssituation 2010 (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Insgesamt ist festzustellen, dass die EU-gestützten Fördermaßnahmen zu einem Anstieg der landwirtschaftlichen Nutzfläche im gesamten Untersuchungsgebiet führen. Insbesondere die vormals benachteiligten Bergregionen verzeichnen hohe Flächenzuwachsrate, während schon bestehende landwirtschaftliche Kerngebiete weiter intensiviert werden. Dies ist für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung der Insel, auch hinsichtlich der Schaffung von neuen Arbeitsplätzen rund um den Agrarsektor und einer Wiederbelebung des lokalen Marktes, von großer Bedeutung. Aus einer geökologischen Perspektive könnte diese räumliche Prognose jedoch auch als Worst-Case-Szenario angesehen werden, da ökologisch wertvolle Flächen mit neu entstandenen Waldbeständen zur Reaktivierung alter Brachflächen durch erneute Rodungen bedroht sind (vgl. Kap. 6.3).

6 Die Zukunft des kanarischen Naturraums – Ökologische Auswirkungen der landwirtschaftlichen Flächendynamiken

Die Kanarischen Inseln besitzen aufgrund ihrer isolierten räumlichen Lage, ihrer besonderen klimatischen und orographischen Gegebenheiten eine hohe floristische Diversität, die sich durch einen außerordentlichen Reichtum an Paläo- und Neoendemiten sowie einer Vielzahl an seltenen oder vom Aussterben bedrohten Arten auszeichnet (vgl. Kap. 2.1.3). Aufgrund dessen ist dieser Naturraum besonders anfällig gegenüber äußeren Einflüssen und menschlichen Nutzungsaktivitäten, die sich zwangsläufig durch die reliefbedingte Begrenzung des Siedlungs- und Wirtschaftsraumes ergeben (FERNÁNDEZ-PALACIOS & WHITTAKER 2008, S. 381; NAUMANN 2008, S. 129; POTT et al. 2003, S. 8, 104). Seit Beginn der europäischen Kolonialisierung im 15. Jahrhundert wurden große Gebiete innerhalb der Vegetationszonen der thermophilen Buschwälder (Bosque termófilo und Sabinares), der Baumheidegebüsche und Lorbeerwälder (Fayal-Brezal und Laurisilva, zusammenfasst als Monteverde) sowie Kiefernwälder und Sukkulenteformationen (Pinar, Tabaibal/Cardonal) zur infrastrukturellen bzw. land- und forstwirtschaftlichen Inwertsetzung beansprucht. Diese kontinuierliche, räumlich mehr oder weniger stark ausgeprägte Ausbeutung des Naturraums dauerte bis Mitte des 20. Jahrhunderts an, wobei vor allem im letzten Jahrhundert ganze Wälder, insbesondere des thermophilen Buschwalds, durch die rapid ansteigende Ausdehnung von Siedlungen und landwirtschaftlichen Nutzflächen verloren gingen (vgl. Kap. 2.2) (ARNDT 2006, S. 394; POTT et al. 2003, S. 186).

Seit den letzten 20 Jahren gibt es jedoch verstärkte Bemühungen durch die kanarischen Behörden, die verbliebenen Flächen zu schützen, um der bis dahin immer weiter fortschreitenden Fragmentierung und Isolation der Restareale entgegenzuwirken. Im Falle des Lorbeerwaldes finden seit 1987 zahlreiche Aufforstungsmaßnahmen statt, um alte Flächen zu regenerieren und isolierte Waldrelikte zu verbinden. Im Rahmen verschiedener Projekte wurden hierdurch bis ins Jahr 2003 insgesamt 153 ha Wald aufgeforstet. Zudem konnten zahlreiche Schutzgebiete unterschiedlicher Kategorien zur Erholung der Restbestände ausgewiesen werden, darunter vier von der Zentralregierung verwaltete Nationalparks (ARNDT 2006, S. 396 f.). Neben diesen naturschutzfachlichen Bemühungen bedingt der seit den 1960er Jahren einsetzende sozioökonomische Wandel von einer Agrar- zur Dienstleistungsgesellschaft weitere Transformationsprozesse im kanarischen Landschaftsgefüge, die sich durchaus positiv auf die Regeneration sensibler Ökosysteme wie Lorbeerwälder auswirken (FERNÁNDEZ-PALACIOS & WHITTAKER 2008, S. 382). Durch die in Kap. 3.4 dargestellten massiven Stilllegungen landwirtschaftlicher Nutzflächen in den peripheren und montanen Gebieten als Folge verstärkter wirtschaftlicher Forcierungen auf die Tourismusindustrie und den damit verbundenen Dienstleistungssektor entsteht neuer Raum, indem sich angrenzende Ökosysteme durch sekundäre Sukzessionsprozesse wieder regenerieren können (GÜNTHERT et al. 2012, S. 853804-1; FERNÁNDEZ-PALACIOS & WHITTAKER 2008, S. 383).

Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, welche Auswirkungen die massiven landwirtschaftlichen Flächenaufgaben der letzten Jahre auf die räumliche Entwicklung bestimmter Ökosysteme haben und welche zukünftigen ökosystemaren Entwicklungen unter Beachtung der szenario-basierten Landnutzungssimulationen zu erwarten sind. Anhand der Auswertung einer qualitativen Feldstudie wird daher zunächst exemplarisch aufgezeigt, welches Potenzial landwirtschaftliche Brachflächen für eine natürliche Regeneration degradierter Ökosysteme bieten. Anschließend wird die Wiederbesiedlung der zwischen 1986 und 2010 entstandenen Brachflächen durch verschiedene

Vegetationsformationen bilanziert. Welche zukünftigen Ausbreitungstendenzen für die einzelnen Vegetationsformationen bei einer weiteren Stilllegung landwirtschaftlicher Flächen bzw. bei einer Zunahme der Ackerflächen im Rahmen der EU-geförderten Optimierung der Landwirtschaft zu erwarten sind, wird letztlich durch einen Vergleich der szenariospezifischen Agrardynamiken mit Daten zur Verbreitung der potenziellen natürlichen Vegetation aufgezeigt.

6.1 Qualitative Untersuchungen zum Regenerationspotenzial von landwirtschaftlich stillgelegten Flächen für verschiedene Pflanzenformationen

Die folgende Studie war Teil einer 2011 durchgeführten, interdisziplinären Geländekampagne von Geographen, Geologen und Biologen der Universität Heidelberg und hatte unter anderem zwei verschiedene Forschungsaspekte zum Ziel. Zunächst sollte erfasst werden, welche Genauigkeit mit der in Kapitel 3.5 erläuterten Methode zur Detektion der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche inklusive Langzeitbrachflächen erreicht werden kann. Ein weiteres Ziel bestand darin, die hierfür aufgesuchten Testflächen im Gelände einer ersten Analyse hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung und Abundanz zu unterziehen (vgl. Abb. 77). So können erste Rückschlüsse auf Sukzessionsprozesse durch benachbarte Pflanzenformationen gezogen werden.

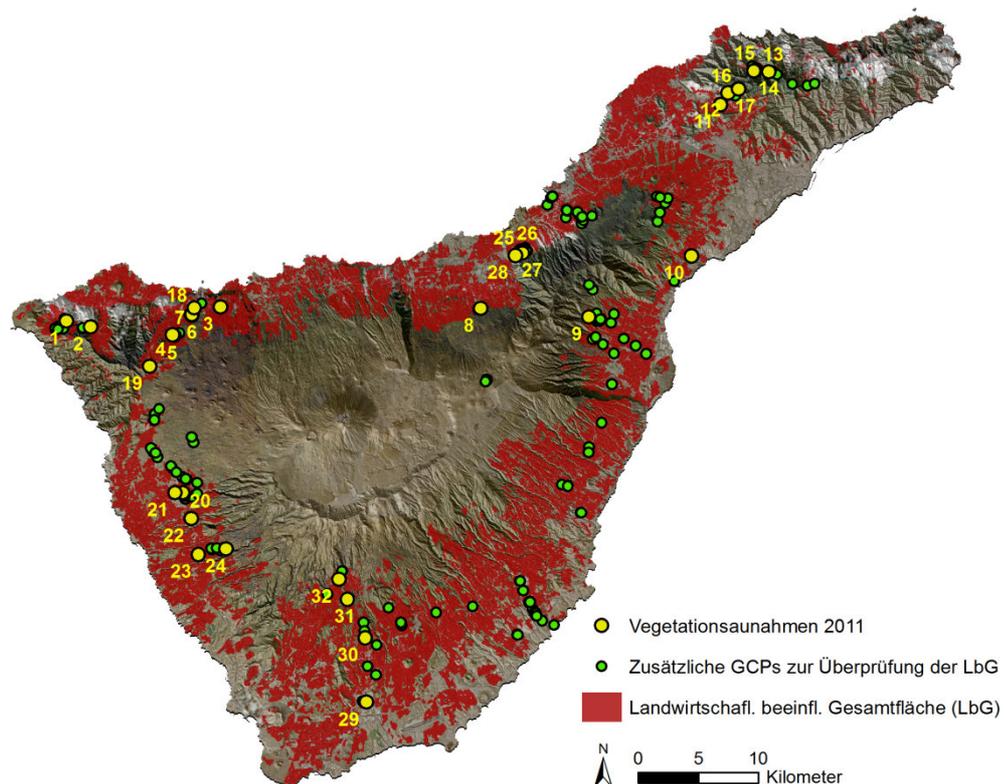


Abb. 77: Verortung der Vegetationsaufnahmen und zusätzlichen GCPs aus der Geländekampagne 2011 zur Untersuchung der Regenerationsfähigkeit verschiedener Ökosysteme auf landwirtschaftlich stillgelegten Flächen (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage DTM: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Die insgesamt 32 Aufnahmen wurden in den Vegetationszonen des Monteverde, Pinar und Tabai-bal/Cardonal auf unterschiedlich alten Brachflächen erhoben. Die Auswahl und Größe der Plots erfolgte dabei unter dem Gesichtspunkt einer möglichst repräsentativen Wiedergabe der im jeweiligen Brachgebiet vorliegenden Pflanzenformation und hing stark von deren Heterogenität ab. Im

Folgenden werden verschiedene Testflächen aus den drei Vegetationszonen hinsichtlich ihrer Arten- dominanz vorgestellt und erste qualitative Rückschlüsse auf das Wiederbesiedlungspotenzial der verschiedenen Vegetationsformationen gezogen. Die Kartierung der Vegetation auf den Testflächen erfolgte durch Anja BETZIN und Manja KRAMER vom Centre for Organismal Studies der Universität Heidelberg.

6.1.1 Natürliche Regeneration von Lorbeerwald und Baumheide-Gebüsch (Monteverde)

Die Vegetationszone des Lorbeerwaldes und Baumheide-Gebüschs befindet sich in einer Höhe von 500 bis 1.500 m ü. NN und liegt damit teilweise inmitten der landwirtschaftlichen Kernzone des Untersuchungsgebietes (vgl. Kap. 2.1.3.4). Durch die intensive ackerbauliche und forstwirtschaftliche Nutzung kam es in der Vergangenheit zu einer massiven Flächenreduktion dieser Wälder, wodurch heute nur noch ca. 10% der potenziellen Lorbeerwaldfläche existent sind (GUIMARÃES & OLMEDA 2008, S. 6). Von den insgesamt 32 erfassten Testflächen, innerhalb derer die Relikte ehemaliger landwirtschaftlicher Nutzung in Form von Trockenmauern klar erkennbar sind, werden 12 Areale von Vertretern des Lorbeerwaldes und Baumheidegebüschs dominiert. Jedoch weisen die anthropogen degradierten Flächen, auch wenn sie in unmittelbarer Nähe zu intakten Lorbeerwaldflächen stehen, oftmals vermehrt Elemente des Baumheide-Buschwaldes in Form von Individuen der Baumheide (*Erica arborea*) und des Gagelbaums (*Myrica faya*) auf. Diese klassischen Sekundärwaldgehölze scheinen durch unterschiedliche Anpassungsstrategien wie der Fähigkeit, Wasser mit ihren Nadelblättern aus Nebelwolken auszukämmen (*E. arborea*) sowie Luftstickstoff zu fixieren (*M. faya*), auch nährstoffärmere Standorte vergleichsweise schneller besiedeln zu können als die Lorbeergewächse (*Lauraceae*). So kommt es bei zu stark degradierten Flächen auch zur Bildung von Tertiärwäldern, die ausschließlich aus den Arten des Baumheide-Buschwaldes bestehen (DEL ARCO AGUILAR et al. 2010, S. 395 ff.; ARNDT 2006, S. 395 ff.).

Generell wird stillgelegten Ackerflächen ein sehr hohes Potenzial zur Regeneration dieses sensitiven und stark fragmentierten Ökosystems zugerechnet, bedarf aber, je nachdem welche Sukzessionsmuster auf den degradierten Flächen entstehen, eines weiteren Forstmanagements (GUIMARÃES & OLMEDA 2008, S. 11). SERRADA et al. (2013) entwickelten diesbezüglich eine Klassifikation mit sieben verschiedenen Sukzessionstypen des Lorbeerwaldes und Baumheide-Gebüschs, für die sie entsprechende Aufforstungsvorschläge und -maßnahmen zur Förderung der Biodiversität aufstellen.

Den Charakter eines qualitativ hochwertigen Lorbeer-Sekundärwaldes, für den im Hinblick auf SERRADA et al. (2013) zunächst keine Forstmaßnahmen anzuwenden sind, weist Testfläche 6 auf. Dessen letzte landwirtschaftliche Nutzung kann nach einer Auswertung historischer Luftbilder auf mehr als 30 Jahre zurückdatiert werden. Das Areal wird dominiert durch eine Baumschicht (70% Bedeckung), die vornehmlich aus dem kanarischen Lorbeer (*Laurus novocanariensis*) und *Erica arborea* zusammengesetzt ist, sowie einer aus Adlerfarn (*Pteridium aquilinum*) bestehenden Strauchschicht (30% Bedeckung).



Abb. 78: Regenerierter Lorbeer-Sekundärwald auf einer ehemals landwirtschaftlich genutzten Fläche (Testfläche 6) (Fotos: S. Günthert, 10/2011)

6.1.2 Natürliche Regeneration des Kiefernwaldes (Pinar)

Die Vegetationszone des Kiefernwaldes befindet sich oberhalb der agrarisch genutzten Zone in einer Höhe von 1.500 bis 2.000 m ü. NN auf der Nordseite der Insel, sowie zwischen 900 und 2.250 m ü. NN im Süden (vgl. Kap. 2.1.3.5). Hierdurch wird diese Formation von den landwirtschaftlichen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte nur mäßig beeinflusst. Als Hauptgrund für die massiven Kiefernwaldverluste in der Vergangenheit ist hier vor allem der hohe Bedarf an Holz für den Schiffsbau, für die lokale Industrie und für die Errichtung von Siedlungen zu nennen (ARNDT 2006, S. 394). Jedoch wird dieser rückläufigen Entwicklung seit den 1950er Jahren durch massive Aufforstungen entgegengewirkt (FERNÁNDEZ-PALACIOS & WHITTAKER 2008, S. 382 f.).

Neben dem vereinzelt Anbau verschiedener Gemüsesorten findet in dieser Höhe vor allem der Weinbau statt, da das gemäßigttere und feuchtere Klima für das Wachstum bestimmter Rebsorten von Vorteil ist. Im Rahmen der Geländeuntersuchungen wurden drei Testflächen im Süden der Insel analysiert, die auf stillgelegten Weinbergen in unterschiedlicher Nähe zum Randbereich des Kiefernwaldes lagen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass jene Areale, die weiter entfernt zur Waldgrenze lagen, eine naturgemäß geringere Dominanz von Kiefernbeständen aufweisen und vor allem von Vertretern des Sukkulentenbuschs geprägt sind.

So lässt Testfläche 32 mit ihrer unmittelbar zum Kiefernwald grenzenden Lage eine hohe Dominanz von *Pinus canariensis* (Kanarische Kiefer) mit Baumhöhen von zum Teil über 9 m erkennen. Dies weist auf eine recht lange Brachephase des Areals hin. Währenddessen beinhaltet Testfläche 24 einen sehr jungen Bestand an Kiefern mit einer stark dominierenden Strauchschicht. Sie besteht vornehmlich aus Vertretern des Kanarischen Beifußes (*Artemisia thuscula*) sowie *Euphorbia obtusifolia*, einer endemischen Charakterart des kanarischen Sukkulentenbuschs.

Insgesamt weisen alle Testareale eine im Gegensatz zu intakten Kiefernwäldern recht geringe Bestandsdichte von *Pinus canariensis* oder anderen Kiefernarten wie beispielsweise *Pinus radiata* auf, obwohl die landwirtschaftliche Nutzung schätzungsweise mehrere Dekaden zurück liegt. Ein Grund hierfür könnte die hohe Mortalitätsrate der Kiefern-Keimlinge sein, wodurch sich die Regeneration solcher Flächen ohne menschliche Eingriffe in Form von Pflanzungen und Durchforstungsmaßnahmen als sehr langwierig herausstellt (ARÉVALO & FERNÁNDEZ-PALACOIS 2008, S. 59; DE NAVASCUÉS MELERO 2005, S. 28).



Abb. 79: Natürliche Sukzessionsprozesse auf ehemaligen Rebflächen in unmittelbarer Umgebung zum Kiefernwald (Testfläche 24 und 32) (Fotos: S. Günthert, 10/2011)

6.1.3 Natürliche Regeneration des Sukkulentenbuschs (Tabaibal/Cardonal)

Die Vegetationszone des Sukkulentenbuschs reicht auf der Nordseite der Insel bis in Höhen von 400 m ü. NN, während auf der Südseite auch Höhen von 700 m ü. NN erreicht werden können (vgl. Kap. 2.1.3.2). Sie liegt somit in der landwirtschaftlichen Kernzone, wodurch starke anthropogene Überprägungen erkennbar sind. Zahlreiche mit Sukkulenten bewachsene und von Trockenmauern durchzogene Ackerbrachen prägen heute das Landschaftsbild vor allem des südlichen Teils der Insel. Untersuchungen durch OTTO (2003) zeigen, dass sich der Sukkulentenbusch auf landwirtschaftlich stillgelegten Arealen sehr langsam, aber wahrscheinlich komplett innerhalb eines Zeitraums von 100 bis 200 Jahren regenerieren kann. Bedingungen hierfür sind vor allem, dass der Mensch nicht erneut eingreift, die Bodenerosion der jeweiligen Fläche gering und genügend naturnahe Vegetation in der Umgebung vorhanden ist. Die Artenzusammensetzung, die Struktur sowie das Lebensformenspektrum verändern sich allerdings während der Sukzession auf Ackerbrachen stark. Diese Entwicklung läuft im feuchteren Norden der Insel wesentlich dynamischer ab als im Süden. Hier nehmen die Artenanzahl, die Gesamtbedeckung, die Bestandshöhe sowie die Biomasse schneller zu. Nachhaltige Störungen durch exotische Pflanzenarten stellen des Weiteren keine Gefahr für die Regeneration der Areale dar. So sind beispielsweise die weit verbreiteten Feigenkaktusarten (*Opuntia spec.*) gegenüber einheimischen Sukkulenten nicht konkurrenzfähig und werden im Verlauf der Sukzession verdrängt (OTTO 2003, S. 274 f.).

Insgesamt wurden acht Testflächen inmitten des Sukkulentenbuschs erfasst und bestätigen die oben vorgestellten Untersuchungsergebnisse. Testfläche 10 wird maßgeblich durch *Euphorbia obtusifolia* dominiert, beinhaltet jedoch auch eine kleinere Anzahl an invasiven Arten wie *Opuntia ficus-indica* und *Agave americana*. Der Gesamtbedeckungsgrad beläuft sich bei diesem Areal auf 70%, wobei diese zur Hälfte aus einer Kraut- bzw. Strauchschicht besteht. Testfläche 29 wird neben *Euphorbia obtusifolia* durch einen weiteren endemischen Vertreter des Sukkulentenbuschs, *Kleinia nerifolia*, dominiert. Bei dieser, der Artenanzahl zufolge sehr lange brachliegende Ackerfläche konnten keine Neophyten erfasst werden. Die Strauchschicht weist einen Bedeckungsgrad von 70% auf, während die Krautschicht einen Anteil von 20% besitzt.

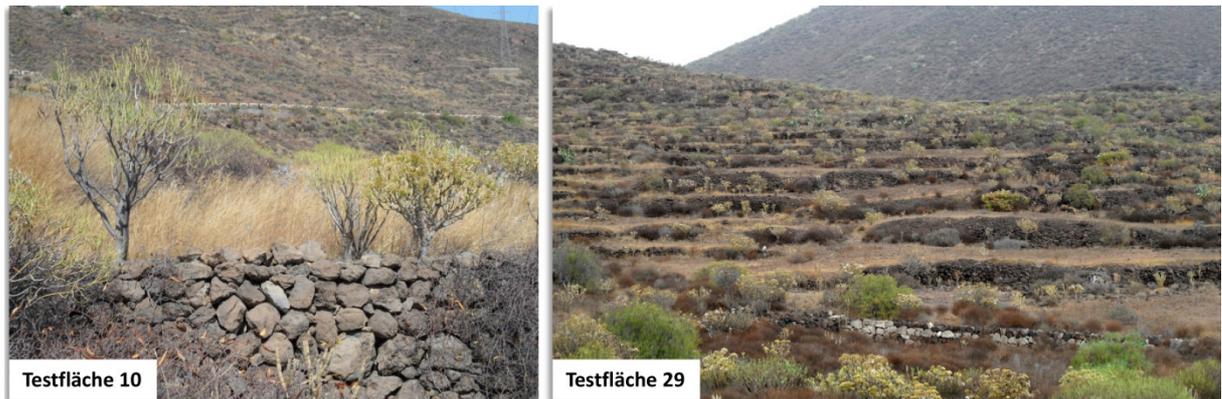


Abb. 80: Natürliche Sukzessionsprozesse auf ehemaligen Ackerflächen innerhalb des Sukkulentenbuschs (Testfläche 10 und 29) (Fotos: S. Günthert, 10/2011)

Die Regeneration brachliegender Flächen hängt neben der Intensität der anthropogenen Degradation eng mit der Populationsdynamik der vorhandenen Arten in der Umgebung zusammen. Die zugrunde liegenden Prozesse können dabei unter anderem auf den individuellen Eigenschaften der Pflanzen hinsichtlich ihres generativen oder vegetativen Ausbreitungs-, Reproduktions-, und Etablierungsvermögens sowie auf den jeweiligen Wachstumsraten, Lebensstrategien oder Konkurrenzkräften basieren (OTTO 2003, S. 26). So weisen gerade die Testflächen in den Übergangsbereichen der Vegetationszonen oder in Gebieten starker anthropogener Inwertsetzung neben Elementen der vorherigen ackerbaulichen Nutzung zahlreiche Charakterarten verschiedener Pflanzenformationen sowie vermehrt Ruderalisierungserscheinungen auf. Hierdurch ist keine direkte Zuordnung zu einer bestimmten Pflanzenformation möglich. Unter der Bedingung, dass in den nächsten Jahrzehnten keine weiteren anthropogenen Eingriffe stattfinden, werden fortschreitende Sukzessionsprozesse möglicherweise zur langfristigen Etablierung der für den jeweiligen Standort konkurrenzstärksten Pflanzenformation führen.

Durch die vorgestellte Studie wurde aufgezeigt, dass Brachflächen ein hohes Potenzial bieten, um der Fragmentierung und Isolation der Ökosysteme entgegenzuwirken. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die natürliche Renaturierung solcher Areale zwar nicht – oder zumindest nicht in absehbarer Zeit – zu einer Rückbildung der Flächen mit dem Charakter eines Primärökosystems führt, die entstandenen Sekundärformationen in vielen Gebieten aber dennoch eine gute Qualität hinsichtlich ihrer Artenvielfalt besitzen (DEL ARCO AGUILAR et al. 2010, S. 3137; ARNDT 2006, S. 397). Teilweise ist jedoch Unterstützung in Form von Aufforstungsmaßnahmen nötig, um artenarme Sekundärformationen zu fördern.

6.2 Auswirkungen der historischen Brachflächenentstehung auf die Regeneration von Monteverde und Pinar sowie Tabaibal/Cardonal

Nach einer qualitativen Analyse des Regenerationspotenzials verschiedener Vegetationsformationen wird nun eruiert, welche Gebiete des Monteverde, Pinar sowie Tabaibal/Cardonal in der Vergangenheit unter landwirtschaftlichem Einfluss standen und somit als Regenerationsflächen bezeichnet werden können. Hierdurch ist es einerseits möglich, das tatsächliche ökologische Potenzial abzuschätzen, das sich durch die historisch entstandenen Brachflächen bietet. Gleichzeitig stellt dies eine

Möglichkeit dar, Flächen auszuweisen, die hinsichtlich ihres Sukzessionsmusters typisiert werden sollten, um gegebenenfalls spezifische Aufforstungsmaßnahmen einzuleiten.

Zur Erfassung der Sekundärformationen wird die Landnutzung und -bedeckung des Untersuchungsgebietes aus dem Jahr 2010 (vgl. Kap. 3.3.3) mit den aufbereiteten agrarischen Landnutzungskarten (vgl. Kap. 4.5.1.1) und den darin ausgewiesenen landwirtschaftlich stillgelegten Flächen der Jahre 1986/88, 1998 und 2010 verglichen. Hierdurch kann die gesamte Regenerationsfläche ausgewählter Pflanzenformationen, also die Überlappungsbereiche zwischen der aktuellen Landbedeckung²⁵ und den detektierten Landwirtschaftsbrachen, erfasst sowie detaillierte Informationen zu den Brachezeiten der wiederbesiedelten Areale bereitgestellt werden (vgl. Abb. 81 und Abb. 82).

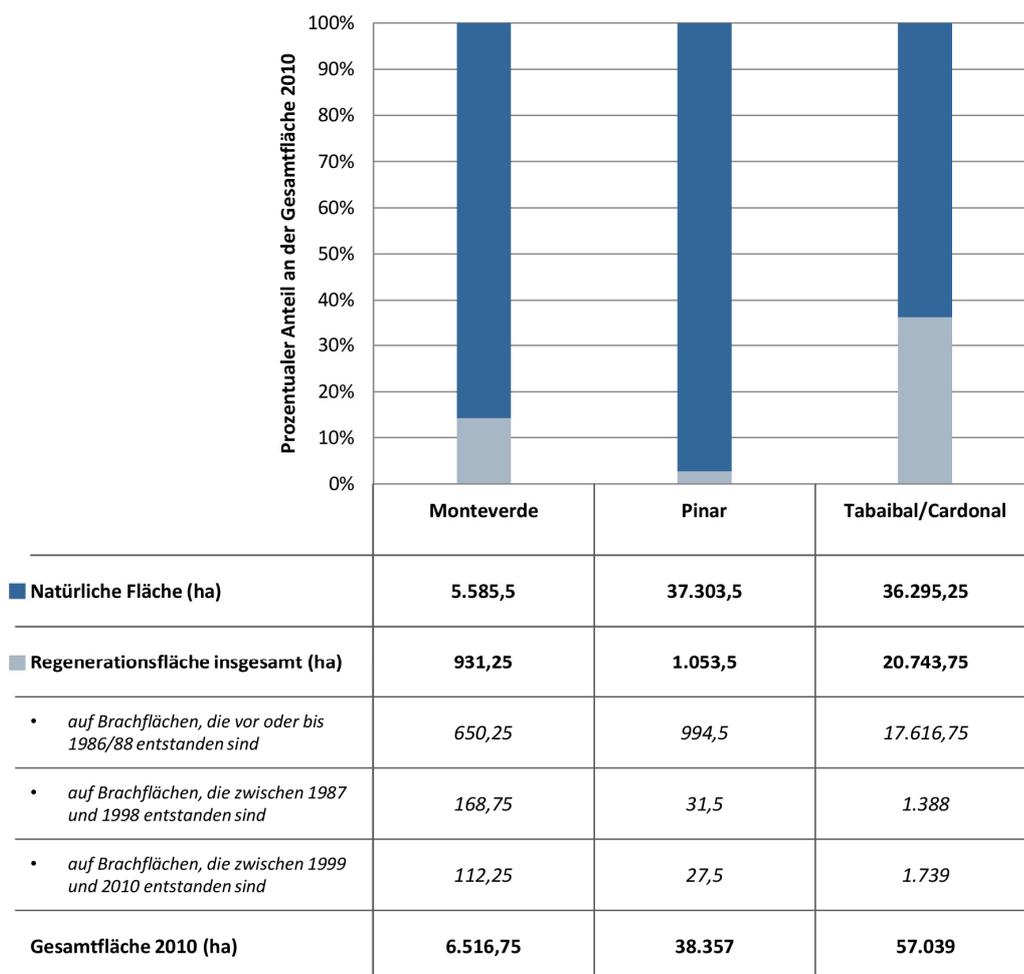


Abb. 81: Prozentualer Anteil der Regenerationsfläche ausgewählter Pflanzenformationen an der jeweiligen Gesamtfläche im Jahr 2010 sowie detaillierte Informationen zur bisherigen Brachezeit der wiederbesiedelten Areale in ha (Quelle: Eigene Darstellung)

²⁵ Die zugrundeliegenden Satellitendaten wiesen einige Wolkenflächen auf. Diese Areale konnten folglich keiner Landbedeckung zugewiesen werden (vgl. Kapitel 3.3.3). Dies muss bei den folgenden Auswertungen und Darstellungen, insbesondere bei *Monteverde*, beachtet werden. Sie beziehen sich auf die detektierten Flächen, nicht auf die mögliche reale Verbreitung.

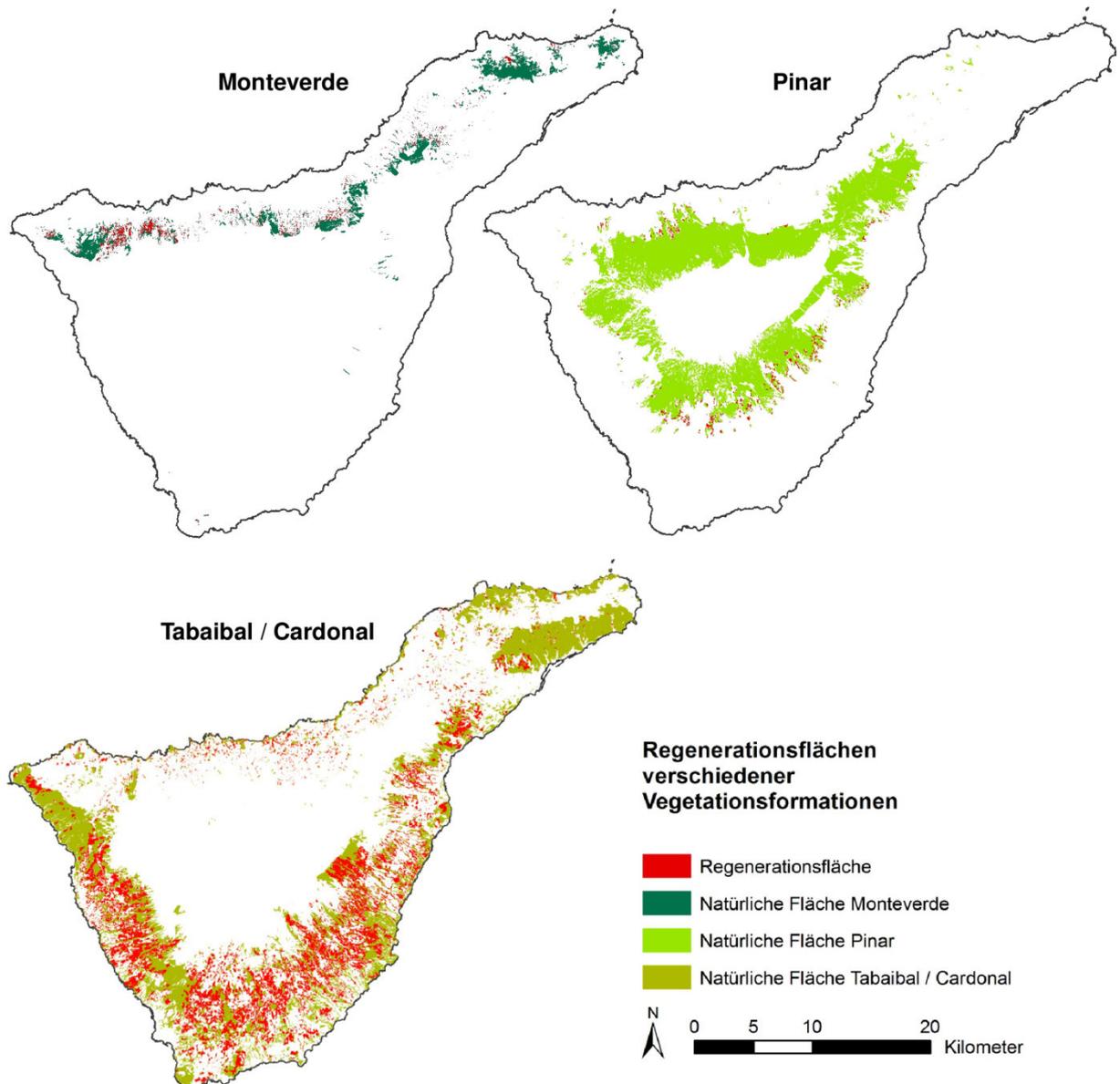


Abb. 82: Landwirtschaftlich unbeeinflusste Areale und Verortung der erfassten Regenerationsflächen verschiedener Vegetationsformationen im Jahr 2010 (Quelle: Eigene Darstellung)

Es wird deutlich, dass der Sukkulentenbusch mit ca. 36% den höchsten regenerativen Anteil an der Gesamtfläche besitzt. Die Regenerationsflächen verteilen sich über die gesamte Vegetationszone, bestehen jedoch vorwiegend aus Arealen, die bereits vor oder bis 1986 stillgelegt wurden. Zudem können bei Tabaibal/Cardonal mit einem Zuwachs von ca. 8,6% der Gesamtfläche zwischen 1987 und 2010 die höchsten rezenten Flächenzunahmen detektiert werden – trotz der Tatsache, dass in den küstennahen Gebieten seit 1986 verstärkt agrarische Intensivierungsprozesse ablaufen. Denn hierdurch kommt es eher zu einer Umnutzung als zu einer Aufgabe von Agrarflächen.

Die Lorbeerwald- und Baumheidegebüsche weisen mit ca. 12% Regenerationsfläche einen ebenfalls sehr hohen Anteil an der Gesamtfläche auf. Knapp zwei Drittel befinden sich auf Brachflächen, die vor oder bis 1986 entstanden sind. Die seit Beginn des sozioökonomischen Wandels kontinuierliche Zunahme von landwirtschaftlichen Flächenaufgaben betrifft zudem mehrheitlich die peripheren und montan gelegenen Regionen in der Monteverde-Vegetationszone, wodurch auch zwischen 1987 und

2010 eine beständige Regeneration dieser Vegetationsformation zu verzeichnen ist. Ein Hot Spot der Flächenregeneration befindet sich im nordwestlich gelegenen Teno-Gebirge (vgl. Abb. 82).

Die Kiefernwälder bestehen nur zu einem sehr geringen Anteil aus Regenerationsflächen und beschränken sich fast ausschließlich auf den Süden der Insel. Mit einer absoluten Fläche von 1.053,5 ha sind diese sekundären Waldareale dennoch größer als die regenerierten Lorbeerwälder- und Baumheidegebüsche. Fast alle wiederbesiedelten Kiefernwaldflächen sind vor oder bis 1986 brachgefallen und liegen hauptsächlich auf sehr alten Weinbergen, wie durch Geländebegehungen ersichtlich wurde. Seit 1987 wurden jedoch nur insgesamt 59 ha als regenerierter Kiefernwald auf Brachflächen klassifiziert. Dies kann neben einer langen Wachstumsphase dieser Vegetationsformation auf den zunehmenden Anstieg des Weinanbaus und die damit verringerte Verfügbarkeit von Regenerationsflächen seit 1998 zurückzuführen sein.

Insgesamt wird deutlich, dass die Verbreitungsareale der vorgestellten Vegetationsformationen zu einem mehr oder weniger beträchtlichen Teil aus Regenerationsflächen bestehen. Die historische Brachflächenentwicklung birgt somit ein hohes ökologisches Potenzial hinsichtlich der Ausbreitung bestehender Ökosysteme und bestätigt die Erkenntnis, „[...] dass die kanarische Flora über auffallende Kapazitäten zur Wiederbesiedlung gestörter Lebensräume und zur Reetablierung entsprechender Vegetationseinheiten verfügt“ (POTT et al. 2003, S. 207). Inwieweit die hier erfassten Flächen auf natürlichem Wege oder durch menschliche Unterstützung in Form von Aufforstungsmaßnahmen regeneriert wurden, kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht quantifiziert werden. Die detektierten Flächen können jedoch als Grundlage für weitere Analysen und Projekte dienen.

6.3 Zukünftiges Regenerationspotenzial von Monteverde und Pinar sowie Tabaibal/ Cardonal unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Entwicklungsszenarien

Die zukünftige Regenerationsfähigkeit der kanarischen Ökosysteme ist stark abhängig von der weiteren Entwicklung des kanarischen Agrarsektors und damit verbundenen Flächendynamiken. Die szenariospezifische Simulation der Agrardynamiken bis ins Jahr 2030 gibt Aufschluss darüber, wo neue Brachflächen entstehen und welche bis dato stillgelegten Flächen einer erneuten landwirtschaftlichen Nutzung unterliegen könnten. Hierdurch ist es möglich, das zukünftige Regenerationspotenzial für die jeweiligen Vegetationsformationen unter Berücksichtigung der in Kapitel 5 konstruierten Szenarien abzuschätzen.

Für die Analyse des künftigen Regenerationspotenzials werden daher zunächst die zu erwartenden Flächenrückgänge der Pflanzenformationen durch landwirtschaftliche Inwertsetzungsprozesse ermittelt. Dazu müssen die prognostizierten Ackerflächen-Neubildungen mit der aktuell bestehenden Landbedeckung des Untersuchungsgebiets aus dem Jahr 2010 verglichen werden.

Des Weiteren werden jene Areale erfasst, die für eine mögliche Regeneration der Lorbeerwälder und Baumheidegebüsche sowie der Kiefernwälder und Sukkulenteformationen von Bedeutung sind. Hierzu dient ein Abgleich der neu entstehenden Ackerbrachen bis 2030 mit Daten zur Verbreitung der potenziellen natürlichen Vegetation der Kanarischen Inseln (vgl. Kap. 2.1.3). In den jeweils erfassten Überschneidungsbereichen ist eine Wiederbesiedlung durch die untersuchten Pflanzenformationen aufgrund der vorherrschenden bioklimatischen Standortbedingungen als wahrscheinlich einzustufen. Abb. 83 fasst die szenariospezifischen Ergebnisse hinsichtlich des zukünftigen Regenerationspotenzials der Vegetationsformationen Monteverde und Pinar sowie Tabaibal/ Cardonal zusammen.

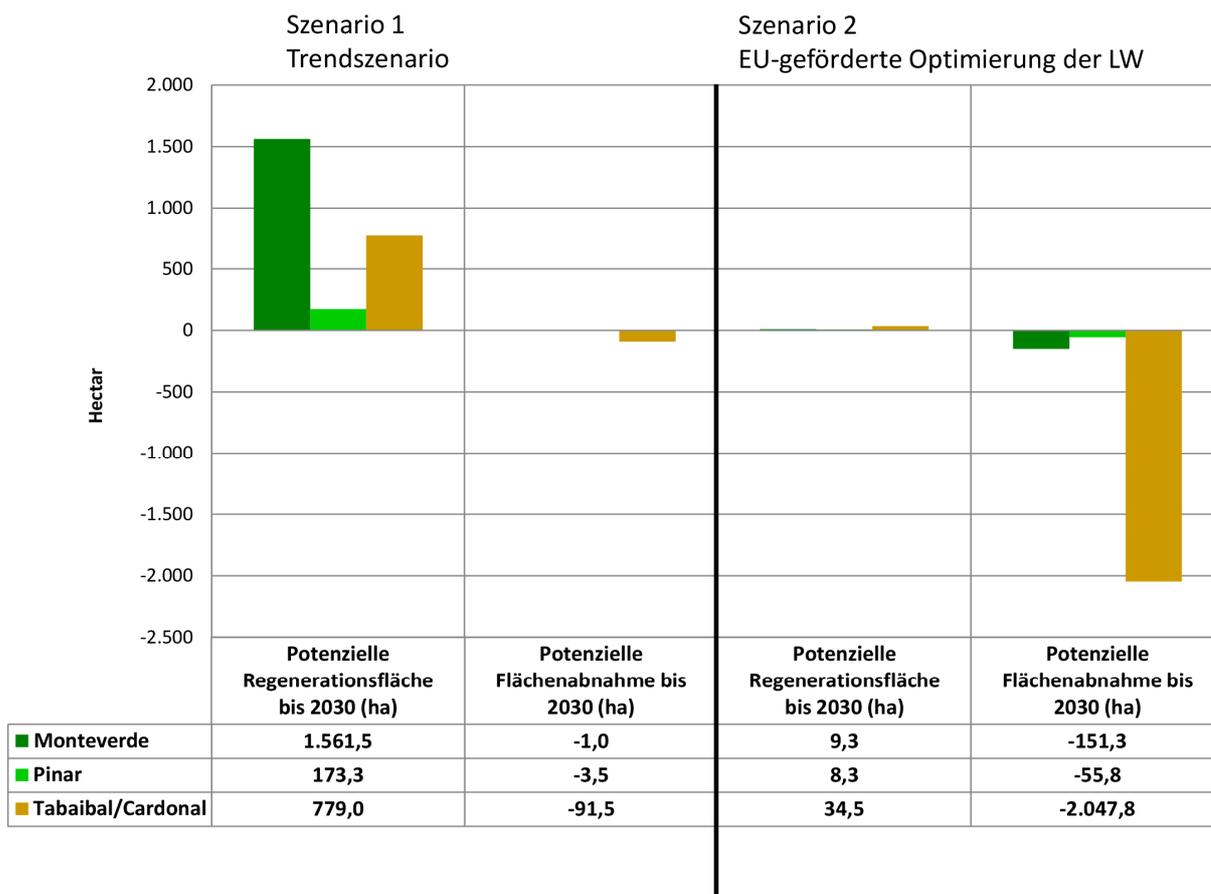


Abb. 83: Potenzielle Flächenveränderungen spezifischer Vegetationsformationen bis 2030 unter Berücksichtigung der konzipierten agrarischen Entwicklungsszenarien Trendscenario (Szenario 1) und EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft (Szenario 2) (Quelle: Eigene Darstellung)

Es wird deutlich, dass sich die potenzielle vegetationszonenspezifische Flächenentwicklung in beiden Szenarien grundlegend unterscheidet. Im Rahmen des Trendscenario, das eine weitere Steigerung der Intensivlandwirtschaft und einen weiteren Rückgang der Landwirtschaft in Peripheriegebieten annimmt, zeigt sich ein klar erhöhtes Regenerationspotenzial innerhalb der einzelnen Vegetationszonen. So beläuft sich die mögliche Regenerationsfläche des Monteverde auf knapp über 1.500 ha, was einer weiteren Zunahme von ca. 24% der rezenten Fläche entspricht. Inwieweit diese Flächen tatsächlich durch Lorbeerwald und Baumheidegebüsche wiederbesiedelt werden können, hängt jedoch maßgeblich von der Distanz zu bestehenden Monteverde-Flächen ab. Zahlreiche Areale, vor allem in unmittelbarer Umgebung der Städte Santa Cruz und La Laguna im Nordosten der Insel, befinden sich weit entfernt zu intakten Lorbeerwaldarealen, weshalb in diesen Bereichen nicht von einer direkten Wiederbesiedlung durch Lorbeerwald und Baumheidegebüsche ausgegangen werden kann (vgl. Abb. 84). Vielmehr ist wahrscheinlich, dass sich zunächst unmittelbar angrenzende Vegetationseinheiten im Rahmen sekundärer Sukzessionsprozesse ausbreiten.

Der Sukkulentenbusch verzeichnet eine potenzielle Regenerationsfläche von 779 ha, was in etwa 1,3% seiner rezenten Fläche gleichkommt. Durch die sich verstärkenden Intensivierungsprozesse in den Küstenbereichen und überwiegenden Flächenaufgaben fernab der Vegetationszone des Tabaibal/Cardonal sind hier nur begrenzte Möglichkeiten für weitere Sukzessionsprozesse gegeben. Durch

weitere Zunahmen von Ackerflächen und infrastrukturellen Arealen in der Basalstufe wird zudem eine potenzielle Flächenabnahme von 91,5 ha prognostiziert.

Für den Kiefernwald ergibt sich mit einer Regenerationsfläche von 173,25 ha ein im Vergleich zur bisherigen Entwicklung (vgl. Kap. 6.2) erhöhtes Wiederbesiedlungspotenzial. Flächenabnahmen tendieren bei Pinar, ähnlich wie bei Monteverde, gegen Null.

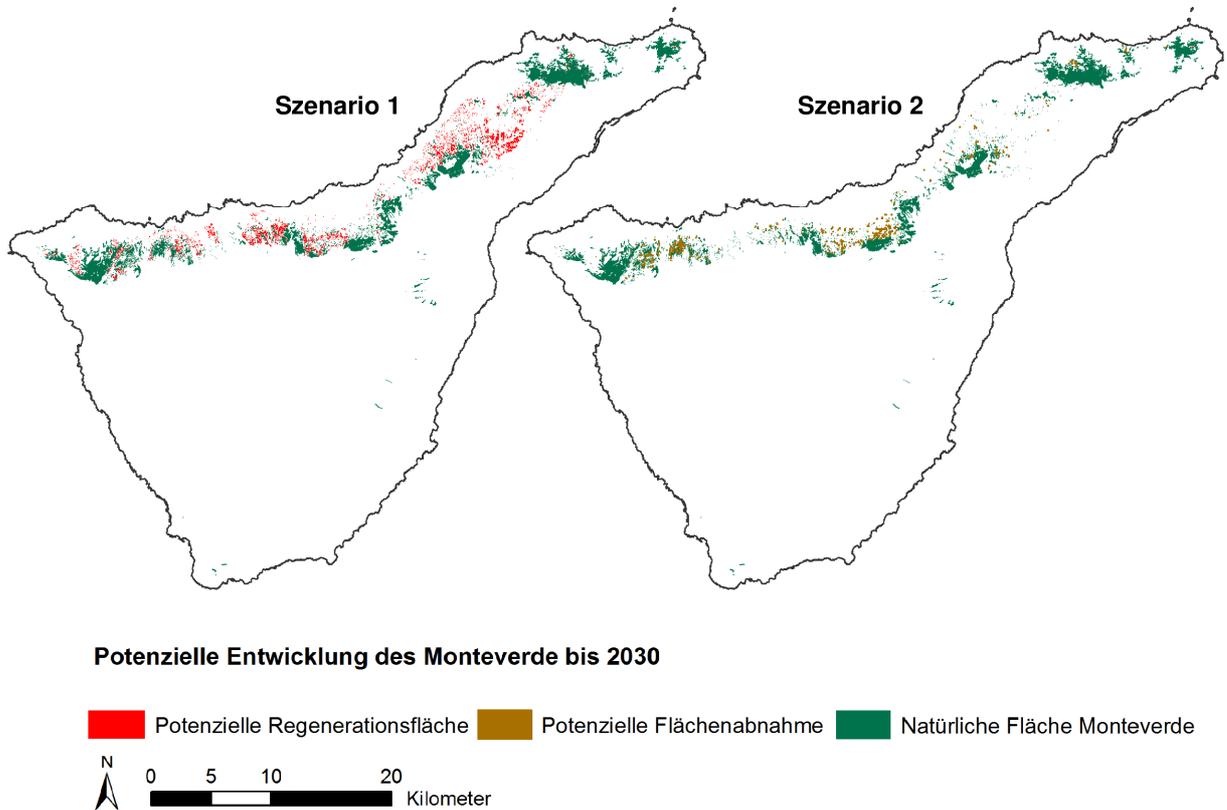


Abb. 84: Potenzielle Flächenentwicklung des Monteverde unter Berücksichtigung der konzipierten agrarischen Entwicklungsszenarien Trendszenario (Szenario 1) und EU-geförderte Optimierung der kanarischen Landwirtschaft (Szenario 2) (Quelle: Eigene Darstellung)

Eine stark gegenläufige Tendenz hinsichtlich der Regenerationsfähigkeit kanarischer Vegetationsformationen ist unter Szenario 2, der EU-geförderten Optimierung der kanarischen Landwirtschaft mit einer Steigerung der lokalen Produktion und Förderung benachteiligter Bergregionen, gegeben. Die prognostizierten Regenerationsflächen der drei Vegetationsformationen können hier als verschwindend gering angesehen werden, während durch die Flächenausdehnung der Agrarlandschaft zum Teil sehr hohe Flächeneinbußen möglich sind. So beläuft sich die potenzielle Flächenabnahme bei Monteverde auf insgesamt 151,25 ha, wobei sich maßgeblich zwei Hots Spots der Flächenabnahme im Norden und Nordwesten herausbilden (vgl. Abb. 84). Der Sukkulentenbusch ist von der Wiederbelebung der kanarischen Landwirtschaft am deutlichsten betroffen. Die über die gesamte Vegetationszone in etwa gleichverteilten Flächenabnahmen betragen hier 2.047,75 ha. Dies entspricht einer prozentualen Abnahme von 3,59% der rezenten Fläche. Der Kiefernwald ist letztendlich auch in Szenario 2 nur marginal betroffen. Für diese Pflanzenformation wird ein Flächenrückgang von 55,75 ha prognostiziert.

6.4 Diskussion der Ergebnisse sowie potenzieller raumplanerischer Maßnahmen zum Schutz des Lorbeerwaldes

Die prognostizierte räumliche Entwicklung der Vegetationsformationen zeigt auf, dass der weitere Rückgang der Landwirtschaft, wie er im Rahmen des Trendszenarios prognostiziert wird, sehr positive Auswirkungen auf die räumliche Ausdehnung der untersuchten Pflanzenformationen Teneriffas hat. Insbesondere für den Lorbeerwald und die Baumheidegebüsche bedeutet dies eine kontinuierliche Ausbreitung bestehender Bestände. Jedoch müssen gleichzeitig unterstützende Aufforstungsmaßnahmen durch die kanarischen Behörden in die Wege geleitet werden, um einen adäquaten Artenreichtum innerhalb der Sekundärwälder zu erhalten. Die Analyse verdeutlicht auch, dass durch eine verstärkte Förderung der kanarischen Landwirtschaft Flächen reaktiviert werden müssten, die aufgrund artenreicher Sekundärvegetation eine hohe ökologische Bedeutung für den Naturraum besitzen.

Für die gesamtwirtschaftliche Zukunft Teneriffas ist es daher sinnvoll, eine ökonomische Entwicklung zu verfolgen, die zwischen den hier vorgestellten Extremen verläuft, d.h. es sollte die richtige Balance zwischen einer Weiterentwicklung und Wiederbelebung der Agrarökonomie, aber auch dem Schutz der Natur und dem Erhalt der Biodiversität gefunden werden. Die International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) fordert für die Kanarischen Inseln daher eine stärkere Integration des Naturschutzgedankens in spezifische sektorale Bereiche wie Landnutzung und Raumplanung (BENZAKEN & RENARD 2011, S. 32). Im Hinblick auf eine weitere Regeneration beispielsweise des Lorbeerwaldes sollten deshalb gerade die Hot Spots landwirtschaftlicher Flächenstilllegung mit hohem Wiederbesiedlungspotenzial für eine mögliche Neuausweisung als Schutzgebiet überprüft werden. Landschaftsgebiete mit einem hohen Anteil an bereits regenerierten Arealen und weiteren potenziellen Regenerationsflächen in unmittelbarer Nähe zu bestehenden Schutzgebieten könnten so eine weitere Ausbreitung der bestehenden Lorbeerwaldareale und eine allmähliche Zusammenführung isolierter Bestände gewährleisten.

Die Kanarischen Inseln verfügen über insgesamt 147 Schutzgebiete, wovon allein 42 auf Teneriffa etabliert sind. Diese vor allem zwischen 1987 und 1989 gegründeten Naturschutzgebiete sind in acht verschiedenen Kategorien eingeteilt, in denen bereits große Flächen des Monteverde unter Schutz stehen: Naturdenkmäler, Nationalparks, Naturparks, Landschaftsschutzgebiete (Landschaftsparks), Naturschutzgebiete, Artenschutzgebiete, geschützte Landschaftsbestandteile und Orte von wissenschaftlichem Interesse (POTT et al. 2003, S. 206 f.). Insbesondere durch die Ausweisung von zusätzlichen Landschaftsparks, in denen „[...]die Erhaltung der Umwelt mit der Nutzung der Gebiete durch die Bevölkerung zu Erholungszwecken und mit der lokalen Entwicklung in Einklang gebracht wird“ (CABILDO DE TENERIFE 2013b), bietet sich eine Möglichkeit, oben genannte Vorschläge zu verwirklichen. In diesen Schutzarealen „[...]steht die Land- und Viehwirtschaft [...] im engen Zusammenhang mit den ökologischen Prozessen“, wodurch „einzigartige Natur- und Kulturlandschaften“ entstehen (CABILDO DE TENERIFE 2013b). Gebiete dieser Schutzkategorie resultieren also aus einer ausgewogenen Interaktion zwischen anthropogenen, abiotischen und biotischen Prozessen. Sie sind nach DUDLEY (2008, S. 20 f.) unter anderem durch folgende grundlegenden Charakteristiken gekennzeichnet: hohe landschaftliche Qualität, die maßgeblich auf einer bedeutungsvollen Flora und Fauna sowie spezifischen kulturellen Eigenschaften beruht; einzigartige oder traditionelle Landnutzungsmuster, beispielsweise geprägt durch nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Systeme sowie Siedlungsgebiete, die sich in einer Balance zur umliegenden Landschaft entwickelt haben. Als wünschenswer-

tes Charakteristikum wird des Weiteren explizit das Potenzial für eine ökologische und/oder landschaftliche Wiederherstellung genannt. Solche Naturschutzareale werden daher oftmals auch als Puffer um eine oder mehrere streng geschützte Zonen errichtet, um sicherzustellen, dass exogene Einflüsse deren Intaktheit nicht bedrohen. Ebenso fungieren sie als Verbindungshabitat zwischen mehreren geschützten Gebieten. Im Gegensatz zu Zonen mit strengeren Schutzrichtlinien bestehen bei dieser relativ flexiblen Kategorie somit Schutzoptionen, die kontrollierte anthropogene Eingriffe in den Naturraum zulassen und dennoch zu dessen Erhalt beitragen (DUDLEY 2008, S. 21). Durch die gezielte Ausweitung oder Neugründung von Landschaftsparks in Arealen mit hohem Wiederbesiedlungspotenzial für spezifische Vegetationsformationen könnte eine ausgewogene Fortführung sowie Intensivierung der Kulturlandschaft und eine gleichzeitige Wiederherstellung der naturnahen Vegetation erreicht werden.

Eine potenzielle Schutzgebietszone findet sich beispielsweise in unmittelbarer Nähe zum Parque Rural del Teno, einem von zwei Landschaftsparks innerhalb des Untersuchungsgebietes (vgl. Abb. 85). In dieser von kleineren Ortschaften durchzogenen Agrarregion, die durch den Anbau vor allem traditioneller Gemüsesorten wie Kartoffeln und verschiedenen Leguminosen geprägt ist, finden sich zahlreiche landwirtschaftlich stillgelegte Flächen (vgl. Abb. 86), die als direkte Regenerationszonen des Lorbeerwaldes klassifiziert werden konnten.

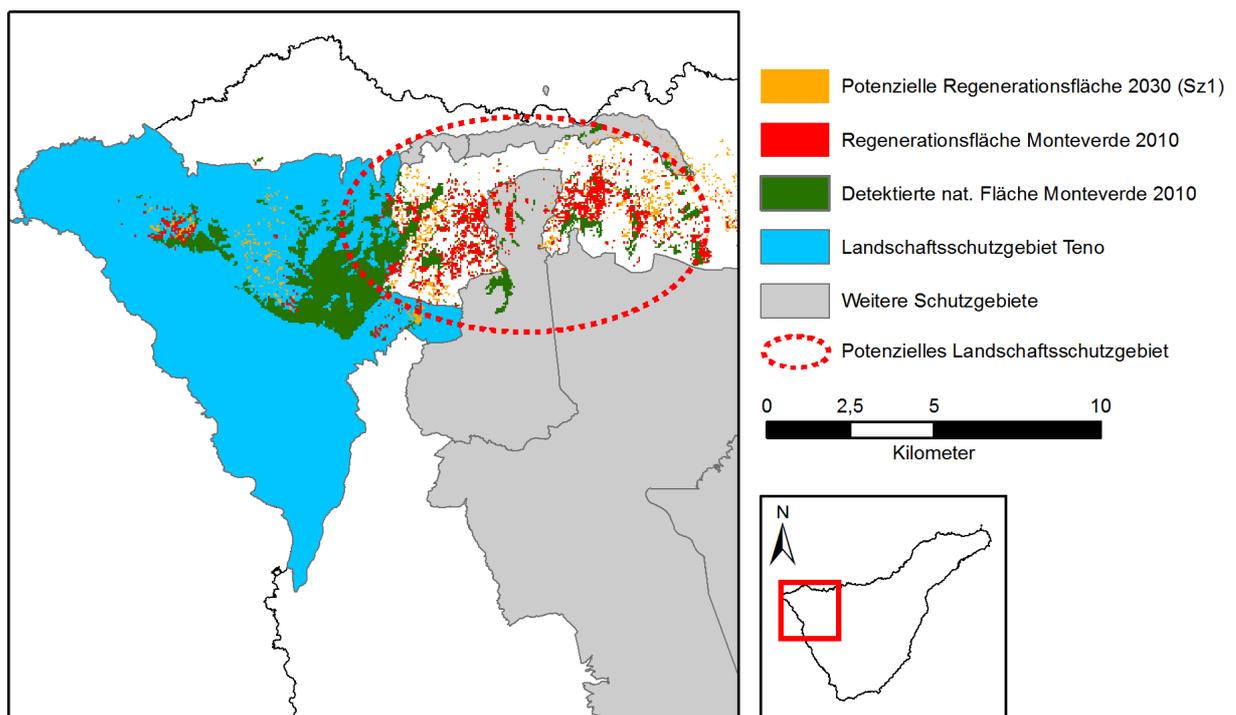


Abb. 85: Darstellung eines potenziellen Gebietes zur Ausweitung des Landschaftsparks Teno (Quelle: Eigene Darstellung; Datengrundlage: Cartografica de Canarias S.A. GRAFCAN)

Das Gebiet weist des Weiteren zahlreiche potenzielle Regenerationsflächen auf und bietet somit Raum für eine weitere sukzessive Ausbreitung der Lorbeerwaldbestände. Es kann daher ein hohes Potenzial für den Erhalt und die natürliche Regeneration des Lorbeerwaldes in dieser Region angenommen werden, weshalb eine umfassende Untersuchung zur möglichen Ausweisung als Schutzgebiet vorgenommen werden sollte.



Abb. 86: Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche inmitten der Übergangszone zwischen Pinar und Monteverde. Das Foto wurde in unmittelbarer Nähe zu Testfläche 18 (vgl. Kap. 6.1) aufgenommen (Foto: S. Günthert, 10/2011)

Bei einer entsprechenden Anpassung der Schutzgebietsverordnung würde die Bildung eines Schutzgebietes in dieser, wie auch in weiteren Regionen mit ähnlichen Bedingungen zum Erhalt der ökologischen Vielfalt Teneriffas und zur weiteren Steigerung der regionalen, möglicherweise auch touristischen Attraktivität beitragen. Hierdurch ist letztendlich auch eine Verbesserung der Lebensumstände der lokalen Bevölkerung möglich, was neben der ökologischen Komponente einen weiteren Hauptgrund für die Bildung insbesondere von Landschaftsparks darstellt (CABILDO DE TENERIFE 2013b).

7 Schlussbetrachtung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine umfassende Analyse, Simulation und ökologische Bewertung landwirtschaftlicher Flächendynamiken auf der Kanarischen Insel Teneriffa durchgeführt. Grundlage zur Untersuchung dieser dynamischen Raumprozesse bildete die Verwendung bzw. Entwicklung kombinierter fernerkundungs- und GIS-basierter Analysetechniken, statistischer Auswertungsmethoden und Verfahren zur räumlich expliziten Modellierung sowie Simulation von agrarischen Landnutzungsveränderungen. Die daraus resultierenden Ergebnisse lieferten ein ganzheitliches Bild zur bisherigen sowie möglichen zukünftigen Entwicklung der kanarischen Landwirtschaft und den damit verbundenen ökologischen Auswirkungen bzw. Konsequenzen für den kanarischen Naturraum.

Ein übergeordnetes Ziel der Studie lag zudem in der Erfassung sowie deterministischen Analyse von landwirtschaftlich stillgelegten Arealen bzw. Brachflächen und der Bewertung des Potenzials, das sich durch deren Entstehung für die Regeneration teilweise stark fragmentierter Pflanzenformationen wie Lorbeerwald, Kiefernwald und des Sukkulentenbuschs bietet.

Nachfolgend werden die in verschiedene Themenkomplexe unterteilten Analyseverfahren der vorliegenden Arbeit, ihre jeweiligen methodischen Besonderheiten und die aus den Analysen resultierenden Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert. Darüber hinaus werden mögliche zukünftige Forschungsansätze zur Erweiterung und praktischen Fortführung der themenspezifischen Untersuchungen aufgezeigt.

7.1 Räumlich explizite Detektion und Bewertung historischer Agrardynamiken mittels Fernerkundung und GIS

Grundlage zur Detektion und Bewertung der bisherigen Agrardynamiken auf Teneriffa bildete die Erstellung detaillierter Landnutzungs- und Landbedeckungskarten auf Basis multitemporaler und multisensoraler Fernerkundungsdaten (vgl. Kap. 3.3). Durch die Entwicklung eines objektbasierten Klassifikationsalgorithmus wurde für die Zeiträume 1986/88 (SPOT 1), 1998 (SPOT 4) und 2010 (RapidEye) die jeweilige Verteilung der agrarischen Landnutzung sowie zusätzlich für 2010 die verbleibende Landnutzung und Landbedeckung im Untersuchungsgebiet erfasst. Hauptaugenmerk des Klassifikationsverfahrens lag auf der separaten Analyse von thematischen Objektgruppen in voneinander unabhängigen Sub-Projekten, die eine spezifische Segmentierung und Klassifikation von Objektklassen in bis zu drei Segmentierungsebenen ermöglichten. Unter Miteinbeziehung landwirtschaftlicher Katasterinformationen in den Segmentierungsprozess der thematischen Objektgruppe Landwirtschaft konnten insgesamt vier verschiedene agrarische Landnutzungsklassen differenziert werden: Ackerflächen, Plantagen, Schwarzbrachen und Gewächshäuser.

Die erzeugten Agrarklassifikationen dienten zunächst als Basis für eine erste quantitative Beurteilung der landwirtschaftlichen Veränderungen in Form von Agrarflächen-Bilanzierungen. Es zeigte sich, dass die gesamtlandwirtschaftliche Entwicklung Teneriffas von einem deutlichen Flächenrückgang innerhalb der letzten 25 Jahre geprägt ist. Mit einer Reduzierung der landwirtschaftlichen Anbaufläche von ca. 25.000 ha im Jahr 1986/88 auf etwa 16.700 ha im Jahr 2010 umfasst das derzeitige Agrarland des Untersuchungsgebietes somit nur etwa zwei Drittel der ursprünglichen Ausdehnung 1986/88. Ferner wurde deutlich, dass insbesondere Ackerflächen und Schwarzbrachen, auf denen

überwiegend traditioneller Bewässerungs- und Trockenfeldbau zur Produktion von Feldfrüchten für den lokalen Markt betrieben wird, mit über 8.000 ha die höchsten Flächenverluste im Untersuchungszeitraum aufweisen. Plantagen, die den intensivlandwirtschaftlichen Anbau von Bananen repräsentieren, sind ebenfalls durch eine deutliche Flächendezimierung von etwa 55% auf insgesamt 2.500 ha Gesamtfläche im Jahr 2010 gekennzeichnet. Ein stetiger Flächenanstieg konnte hingegen bei den Gewächshauskulturen verzeichnet werden. Für diese hauptsächlich zum exportorientierten Anbau von Monokulturen wie Bananen, Tomaten und Schnittblumen angelegten Treibhausareale konnte ein Flächenzuwachs von knapp 250 ha im Jahr 1986/88 auf über 3.300 ha im Jahr 2010 detektiert werden.

Zur quantitativen Erfassung der räumlichen Veränderungsintensität und -dynamik der agrarischen Landnutzungsklassen wurden die gewonnenen Datensätze anschließend einer Change Detection-Analyse unterzogen (vgl. Kap. 3.4). Das zu diesem Zweck entwickelte, halbautomatisierte Verfahren zählt grundlegend zur Kategorie der Post Classification Comparisons (PCC), weist jedoch im Gegensatz zu den traditionellen PCC-Techniken einige Besonderheiten auf. Die Auswertung der thematischen Daten erfolgt in verschiedenen, hierarchisch abhängigen Analyseebenen, die neben der pixelgenauen Erfassung von verschiedenen Arten landwirtschaftlicher Veränderung sowohl bi- als auch tri-temporale Informationen über klassenspezifische und gesamtlandwirtschaftliche Veränderungsintensitäten auf lokaler bis regionaler Ebene zulassen. Darüber hinaus können zusätzlich Aussagen über die Veränderungshistorie, insbesondere bezüglich der Kontinuität und Dynamik der Agrarveränderungen, getroffen werden.

Die klassenspezifischen Ergebnisse der Change Detection-Analyse zeigten auf, dass die landwirtschaftliche Flächendynamik zwischen 1986/88 und 1998 durch enorme Flächenstilllegungen innerhalb der Klasse Ackerflächen und Schwarzbrachen sowie durch eine schrittweise Intensivierung²⁶ bestehender Anbauflächen geprägt ist. So wurden bis ins Jahr 1998 ca. 1.750 ha Agrarland intensiviert, wovon etwa 40% auf Konversionen von Ackerflächen und Schwarzbrachen zu Plantagen zurückzuführen sind – trotz eines allgemeinen Rückgangs der Plantagen im genannten Zeitraum. Bestehende Plantagen dienten hingegen oftmals als Konversionsfläche für neue Gewächshäuser. Flächen-Neuentstehungen in Form von Gewächshäusern waren in diesem Zeitraum jedoch selten. Zwischen 1998 und 2010 zeigte sich ein weiterer Flächenrückgang von Ackerflächen und Schwarzbrachen insbesondere an der Randzone des landwirtschaftlichen Anbaugürtels im Südwesten der Insel sowie ein verstärkter Rückgang der Plantagenflächen im gesamten Untersuchungsgebiet. Diese wurden teilweise extensiviert²⁷, durch Gewächshäuser ersetzt und insbesondere im Norden der Insel großflächig stillgelegt. Die küstennahen Areale des Untersuchungsgebietes, besonders entlang des gesamten ariden Südens, dienten auch in diesem Zeitraum zur weiteren räumlichen Ausdehnung der Intensivlandwirtschaft in Form von neu errichteten Gewächshäusern. Auf Plantagenwirtschaft ausgelegte Intensivierungsprozesse konnten im Gegensatz zum Zeitraum 1986/88 bis 1998 jedoch kaum erfasst werden.

Die Untersuchung des agrarischen Wandels zwischen 1986/88 und 2010 in Form einer finalen Gesamt-Nettoveränderungskarte der Landwirtschaft unter Berücksichtigung der Veränderungshisto-

²⁶ Hierunter werden jene Veränderungen verstanden, bei denen eine mögliche Steigerung des Flächenertrags im betreffenden Areal angenommen werden kann, beispielsweise Konversionen der Klasse Ackerfläche zu Plantage oder Gewächshäuser.

²⁷ Hierzu zählen jene, bei denen eine mögliche Verringerung des Flächenertrags im betreffenden Areal angenommen werden kann, beispielsweise Konversionen der Klasse Gewächshäuser zur Klasse Ackerfläche.

rie zeigte das enorme Gesamtausmaß der agrarischen Flächenveränderungen Teneriffas. So sind zahlreiche großflächig zusammenhängende Areale, insbesondere im humiden Norden, durch kontinuierliche Flächenstilllegungen 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 Anbaugesbiet rund um La Laguna. Der Südwesten als touristisches Haupt-Ballungsgebiet Teneriffas zeigt im Vergleich dazu ebenfalls kontinuierliche Arealverluste. Diese fallen jedoch absolut betrachtet deutlich geringer aus. Gründe hierfür liegen vor allem in der oben beschriebenen Intensivierung von Agrarland durch Gewächshäuser. Der detektierten negativen Flächenentwicklung stehen vereinzelte Hot Spots kontinuierlicher Agrarflächenzunahme, hauptsächlich im Süden des Untersuchungsraums, 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 Reb- bzw. Ackerflächen für die Weinproduktion zusammen.

Ein weiterer, texturbasierter Klassifikationsprozess diente schließlich zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche Teneriffas in hochauflösenden RGB-Orthophotos (vgl. Kap. 3.5). Diese thematische Klasse setzt sich neben rezenten landwirtschaftlichen Nutzflächen, wie sie in den satellitenbildbasierten Klassifikationen erfasst wurden, aus Langzeitbrachflächen zusammen, deren aktive Nutzung zum Teil schon mehrere Dekaden vor 1986/88 zurückreicht. Aufgrund fortgeschrittener ökologischer Sukzessionsprozesse konnten diese Areale in den multispektralen Satellitenbilddaten nicht von der natürlichen Landbedeckung unterschieden werden. Das Grundprinzip des hierfür entwickelten Algorithmus liegt in der räumlichen Detektion linearer Agrarstrukturen wie Trockenmauern und Feldgrenzen, die als so genannte Agrarproxys eine Unterscheidung zwischen landwirtschaftlich beeinflussten und unbeeinflussten Arealen im Untersuchungsgebiet ermöglichen. Das Verfahren ist durch eine halbautomatisierte Kombination von sechs verschiedenen Teilanalysen gekennzeichnet: 1) einer Canny-Kantendetektion, 2) einer anschließenden Segmentierung der kantengefilterten Orthophotos, 3) der Klassifikation von linearen Agrarstrukturen, 4) der Transformation dieser linearen zu flächenhafter Information anhand einer Line Density-Analyse, 5) einer erneuten Segmentierung der Orthophotos und 6) der finalen Klassifikation der landwirtschaftlich beeinflussten Areale.

Die texturbasierte Klassifikation der landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche zeigte auf, 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 erlaubte darüber hinaus eine klare Differenzierung zwischen rezent genutzten und landwirtschaftlich stillgelegten Agrarflächen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass der Anteil rezent genutzter Areale an der ermittelten Gesamtfläche nur etwa 28% beträgt. Die restlichen 72% bestehen demnach aus landwirtschaftlich stillgelegten Arealen, die sich vornehmlich in den topographisch und klimatisch benachteiligten Regionen der Insel befinden.

Die Kombination der vorgestellten Analyseverfahren zur Erfassung und Bewertung der historischen Agrardynamiken kann unter der Prämisse, möglichst detaillierte und akkurate Informationen zum agrarischen Landnutzungswandel zu generieren, als außerordentlich geeignet angesehen werden. Die verwendeten Satellitenbilddaten lieferten aufgrund ihrer hohen räumlichen Auflösung eine

optimale Basis zur exakten Erfassung der agrarischen Landnutzungsklassen. Einzig die SPOT 1-Daten wiesen im Hinblick auf ihre geringere spektrale Auflösung leichte Defizite während des Klassifikationsprozesses auf. Durch verschiedene arithmetische Pixeloperationen sowie durch die Verwendung landwirtschaftlicher Katasterinformationen während des Segmentierungsprozesses konnte jedoch auch für diesen Datensatz ein sehr gutes Klassifikationsergebnis erreicht werden. Die räumlichen Veränderungsprozesse der agrarischen Landnutzungstypen ließen sich durch den implementierten, halbautomatisierten Change Detection-Algorithmus in vielfältiger Weise – sowohl bi- und multitemporal als auch klassenspezifisch und gesamtlandwirtschaftlich – untersuchen, wodurch ein sehr detailliertes Bild über die landwirtschaftlichen Raumprozesse der letzten 25 Jahre gewonnen werden konnte. Der anschließende texturbasierte Klassifikationsprozess zur Erfassung der landwirtschaftlich beeinflussten Fläche in RGB-Orthophotos ermöglichte letztlich eine genaue Detektion selbst sehr alter und somit stark überwuchelter Brachflächen. Dies konnte durch ein quantitatives Accuracy Assessment sowie eine qualitative Untersuchung der detektierten Flächen vor Ort überprüft werden. Die so gewonnenen Flächeninformationen stellten in Synthese mit den agrarischen Landnutzungs-klassifikationen eine in diesem Detailgrad einzigartige Grundlage für die darauffolgende Modellierung bzw. Simulation von Agrarflächendynamiken sowie zur Bewertung des ökologischen Potenzials von Brachflächen für den Naturraum Teneriffas dar.

7.2 Aufbau eines räumlich expliziten Landnutzungsmodells zur Ursachenanalyse und Simulation landwirtschaftlicher Flächendynamiken

Im Anschluss an die Detektion und Bewertung der bisherigen Agrardynamiken erfolgte der Aufbau eines räumlich expliziten Landnutzungsmodells anhand des Dyna-CLUE 2 Modellansatzes (Dynamic Conversion of Land Use and its Effects Model, Version 2) (vgl. VERBURG & OVERMARS 2009). Ziel dieser Landnutzungsmodellierung war es, die dem agrarischen Landnutzungswandel zugrunde liegenden Antriebskräfte und Parameter zu ermitteln (vgl. Kap. 4) sowie zukünftige, szenario-basierte Agrardynamiken im Untersuchungsraum bis ins Jahr 2030 zu simulieren (vgl. Kap. 5). Dyna-CLUE 2 ist durch eine hybride Architektur charakterisiert, die neben statistischen Modellierungstechniken zugleich Prozess- und Expertenwissen sowie nachbarschaftsbezogene Interaktionen zwischen den zu modellierenden Landnutzungsklassen berücksichtigt. Das zu den Top Down-Ansätzen zählende Modell kann grundlegend in zwei Module unterteilt werden (VERBURG 2010, S. 2). Durch ein Bedarfsmodul wird die Quantität der Veränderungen für die Landnutzungsklassen im jeweiligen Untersuchungszeitraum in Form eines überregionalen, absoluten Flächenbedarfs vorab festgelegt. Ein räumliches Allokationsmodul weist diesen klassenspezifischen Hektarbedarf durch einen iterativen Prozess den individuellen Rasterzellen zu, bis die Nachfrage an vordefinierten Landnutzungsveränderungen im jeweiligen Zeitabschnitt erfüllt ist. Dies geschieht auf Basis verschiedener Modellkenngrößen, nämlich der Standorteignung, Nachbarschaftseignung, Konversionselastizität, standortbedingten Präferenzen und Beschränkungen sowie einem iterativ festgelegten Konkurrenzvorteil (VERBURG & OVERMARS 2009, S. 1169; GROOT et al. 2009, S. 150).

Die Grundlage zum Aufbau des Landnutzungsmodells bildeten die agrarischen Landnutzungs-klassifikationen 1986/88, 1998 und 2010. Diese wurden im Vorfeld mit der thematischen Karte zur landwirtschaftlich beeinflussten Gesamtfläche aggregiert und entsprechend aufbereitet. Nach diesem Pre-Processing wies jede Landnutzungskarte eine räumliche Auflösung von 50 x 50 m auf und bestand aus folgenden Klassen: Ackerfläche (zusammengefasst aus den bisherigen Klassen Ackerfläche und

Schwarzbrache), Plantagen, Gewächshäuser, Landwirtschaftlich stillgelegte Fläche und Andere (hauptsächlich zusammengesetzt aus Konversionsflächen von Agrarland zu Siedlungsgebiet). Die Verfügbarkeit dreier Landnutzungskarten ließ eine klare zeitliche Trennung zwischen der Kalibrierung und der Validierung des Modells zu.

Während des Parametrisierungs- und Kalibrierungsprozesses wurden zunächst die agrarischen Landnutzungsveränderungen von 1986/88 bis 1998 nachmodelliert und mit der Referenzkarte 1998 verglichen. Die dabei erfassten und justierten Modellkenngrößen, die zur besten Modellgüte führten, wurden anschließend im Rahmen einer Modellierung der agrarischen Landnutzungsveränderungen von 1998 bis 2010 validiert. Der zur Kalibrierung und Validierung benötigte Flächenbedarf konnte durch die Berechnung der Gesamtfläche der einzelnen Landnutzungsklassen in den Jahren 1986/88, 1998 und 2010 erfasst und für das Bedarfsmodul aufbereitet werden.

Die Modellparametrisierung umfasste zunächst die Ableitung und Quantifizierung biophysikalischer, sozioökonomischer sowie struktureller Standortfaktoren bzw. Antriebskräfte mittels logistischer Regressionsanalysen. Durch diese statistischen Analysen konnte erfasst werden, welche Determinanten die Auftrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Landnutzungstypen im Raum sowohl positiv als auch negativ beeinflussen und wie stark dieser Einfluss letztendlich ist. Es zeigte sich, dass insbesondere naturräumliche Gegebenheiten wie Hangneigung, Geländehöhe, Bodentyp und klimatische Verhältnisse, aber auch strukturelle Distanzmaße wie die Nähe zu Hauptverkehrsstraßen, Siedlungen und Wasserressourcen das Auftreten der Landnutzungsklassen bestimmen. Darüber hinaus ließ sich bei verschiedenen sozioökonomischen Parametern, nämlich der Bevölkerungszahl und -dichte sowie der Arbeitskräfteeanzahl im primären Sektor ein signifikanter Einfluss nachweisen. Inwieweit sich Nachbarschaftseffekte auf die räumliche Dynamik der Landnutzungsklassen auswirken, konnte ebenfalls durch logistische Regressionen ermittelt werden. Hierdurch wurde ersichtlich, dass sich die Konversionswahrscheinlichkeit von Rasterzellen zu Ackerflächen, Plantagen oder Gewächshäusern durch die Existenz der identischen Klasse in einem spezifischen Nachbarschaftsradius maßgeblich erhöht. Darüber hinaus zeigte sich, dass insbesondere die räumliche Nähe zwischen Plantagen und Gewächshäusern einen positiven Einfluss auf deren Entstehung ausübt. Somit konnte vornehmlich bei den intensivlandwirtschaftlichen Klassen eine starke Tendenz zur Bildung von räumlichen Clustern festgestellt werden. Die während der regressionsanalytischen Erfassung von Standortfaktoren und Nachbarschaftsbeziehungen ermittelten Regressionskoeffizienten stellten schließlich die Grundlage zur modellinternen Berechnung von landnutzungsspezifischen Standort- bzw. Nachbarschaftseignungskarten.

Weitere Modellkenngrößen wie Konversionsoptionen und -elastizitäten wurden während des iterativen Kalibrierungsvorganges definiert. Sie dienten der Definition grundlegender Entscheidungsregeln hinsichtlich des Übergangs von einer Landnutzungsklasse zur anderen. Zur standortspezifischen Erhöhung einzelner Landnutzungstypen wurden letztlich verschiedene Aspekte des Raumordnungsplans PIOT 2011 (Plan Insular de Ordenación de Tenerife) in das Modell integriert. Innerhalb ausgewiesener Intensivlandwirtschaftszonen und urbaner Expansionsgebiete konnte so die Auftrittswahrscheinlichkeit von Plantagen und der Klasse Andere geringfügig erhöht werden. Dies führte zu einer deutlichen Steigerung der Modellgüte.

Die räumlich explizite Simulation der zukünftigen agrarischen Entwicklung anhand des kalibrierten Landnutzungsmodells erfolgte durch spezifische Berechnungen zur Ermittlung des zukünftigen Flächenbedarfs im Rahmen zweier Entwicklungsszenarien. Durch ein Trendszenario wurde aufge-

zeigt, welche agrarischen Landnutzungsveränderungen bis ins Jahr 2030 zu erwarten sind, wenn sich der bisherige Trend mit einer Steigerung der Intensivlandwirtschaft und einer weiteren räumlichen Abnahme von Ackerflächen vor allem in den Peripheriegebieten fortsetzt. Zur Kalkulation dieser Fortführung des historischen Verlaufs der einzelnen Landnutzungsklassen wurde eine umfassende, klassenspezifische Trendanalyse auf Basis der Gauß'schen Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt.

Das Szenario verdeutlichte, dass bei einer Trendfortführung die intensivlandwirtschaftliche und exportorientierte Ausrichtung der Landwirtschaft zu Lasten von Agrarprodukten für den lokalen Markt in klar abgrenzbaren Regionen stattfindet. Während der Norden am stärksten von landwirtschaftlichen Flächenstilllegungen in vornehmlich peripheren und höher gelegenen Regionen zwischen Buenavista del Norte und Puerto de la Cruz geprägt ist, wird der Süden und Südosten, erkennbar durch massive Flächenneuentstehungen der Klasse Gewächshäuser, weiter intensivlandwirtschaftlich ausgebaut. Der ebenfalls hohe Anstieg von Gewächshäusern in den Küstenregionen des Nordens und Nordwestens ist hingegen, ähnlich der Agrarflächendynamiken zwischen 1986 und 2010, auf die großflächige Konversion von Plantagenflächen zurückzuführen. Für diese Klasse konnten massive Flächenverluste prognostiziert werden.

Als Alternative zum Trendszenario zeigte ein zweites Szenario auf, welche räumlichen Flächenveränderungen durch eine erfolgreiche Umsetzung von Förderprogrammen der Europäischen Union zur Unterstützung der kanarischen Landwirtschaft entstehen können. Im Rahmen dieser durch entsprechende EG- bzw. EU-Verordnungen instrumentierten Vereinbarungen sind spezifische Sonderregelungen und Maßnahmen für die zukünftige Entwicklung des kanarischen Agrarsektors, beispielsweise die Förderung der lokalen Agrarproduktion sowie Hektarbeihilfen für spezifische Agrarprodukte und Gebiete mit naturbedingten Nachteilen, definiert. Auf Grundlage dessen wurden möglichst realistische Szenarios für den zukünftigen Hektarbedarf einzelner Anbauprodukte entworfen. Der prognostizierte Bedarf der verschiedenen Feldfrüchte wurde anschließend in den zukünftigen Gesamtbedarf der ihnen entsprechenden Landnutzungstypen transformiert.

Das im Rahmen des Szenarios „Optimierung der kanarischen Landwirtschaft“ erzeugte Simulationsergebnis zeigte auf, dass die EU-gestützten Fördermaßnahmen zu einem Anstieg der landwirtschaftlichen Nutzfläche im gesamten Untersuchungsgebiet führen. Insbesondere die vormals benachteiligten Bergregionen verzeichnen hohe Flächenzuwachsrate, während schon bestehende landwirtschaftliche Kerngebiete in Form von Gewächshäusern und Plantagen weiter intensiviert werden. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die in wirtschaftlicher Hinsicht positive Entwicklung des Agrarsektors zu einer erneuten Flächenreaktivierung zahlreicher ehemals stillgelegter Agrarflächen führt. Davon betroffen sind vor allem die höher gelegenen Areale im Südosten der Insel sowie fast der gesamte Norden.

Entgegen eines für räumlich explizite Modelle oftmals typischen Charakters einer Black Box ist DynaCLUE 2 durch sehr transparente Modellmechanismen gekennzeichnet, die sich durch die Verknüpfung mit weiteren externen Methoden in vielfältiger Weise modifizieren lassen. Durch die Parametrisierung des Landnutzungsmodells im Rahmen modellexterner statistischer Analysen konnten die den agrarischen Landnutzungsdynamiken zugrundeliegenden Antriebskräfte detailliert analysiert und vorab auf ihre Güte hin überprüft werden. Zudem ließen sich auch Parameter unterschiedlicher räumlicher Maßstabsebenen zur Ableitung und Quantifizierung von Standortfaktoren der zu modellierenden Landnutzungstypen mit einbeziehen. Dies gewährleistete eine insgesamt sehr detaillierte

Erfassung der determinierenden Antriebskräfte und letztlich eine hohe räumliche Genauigkeit bei der Modellierung der Landnutzungsveränderungen. Die mittels eines Multiple Resolution Comparison erhobene gewichtete Gesamtübereinstimmung zwischen Modellergebnis und jeweiliger Referenzkarte lag sowohl bei der Validierung als auch bei der Kalibrierung bei über 82%.

Die Simulation von agrarischen Landnutzungsveränderungen im Rahmen zwei verschiedener Szenarios erfolgte vor dem Hintergrund, die zukünftige Dynamik der Landwirtschaft bis ins Jahr 2030 in einer möglichst unterschiedlichen, aber dennoch realitätsnahen Weise zu darzustellen. Hierdurch sollte die Bandbreite möglicher Unsicherheiten in der Prognose der zukünftigen Agrarveränderungen weitestgehend abgedeckt werden. Bei der Berechnung des jeweiligen Zukunftsbedarfs wurde insbesondere die inhaltliche Plausibilität, logische Konsistenz und Transparenz der Szenarien berücksichtigt, um auch hier eine hohe Aussagekraft und Güte des Modells zu gewährleisten.

Die Kopplung des Dyna-CLUE 2 Modells mit spezifischen ökonomischen und klimatischen Modellen könnte in diesem Zusammenhang sowohl für eine weitere Steigerung der Aussagekraft zukünftiger Prognosen beitragen als auch agrarwirtschaftlich relevante Aspekte in den Simulationsprozess mit einbeziehen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht behandelt werden konnten. In diesem Zusammenhang sind insbesondere makroökonomische Entwicklungsaspekte und ihren Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit kanarischer Anbauprodukte zu nennen. Durch die Verknüpfung des Landnutzungsmodells mit einem makroökonomischen Simulationsmodell könnten beispielsweise Weltmarktpreis-Prognosen für Agrarprodukte, aber auch die preisliche Entwicklung benötigter Ressourcen wie Wasser, Düngemittel und verschiedener Energieerzeugnisse in die Berechnung des zukünftigen agrarischen Landnutzungsbedarfs mit einfließen. Die Verwendung von Klimaszenarien bei der modellinternen Berechnung der Standorteignungskarten²⁸ könnte darüber hinaus aufzeigen, ob und wie sich veränderte klimatische Bedingungen im Zuge des globalen Klimawandels auf die agrarischen Landnutzungsdynamiken Teneriffas auswirken. So zeigen aktuelle Untersuchungen, dass in den letzten Jahrzehnten neben einem leichten Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperaturen von etwa $0,17 \pm 0,09$ °C/Dekade (für die Periode zwischen 1970 und 2010) und einer erhöhten Temperaturvariabilität ein leichter, aber signifikanter Rückgang der durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge auf Teneriffa zu verzeichnen war (SAUTER et al. 2013a, S. 13; MARTÍN et al. 2012, S. 348). Dieser Trend wird sich nach derzeitigen Prognosen in den nächsten Jahrzehnten noch verstärken. So wird für das Untersuchungsgebiet ein Temperaturanstieg von ca. 1 °C und ein Rückgang der jährlichen Niederschlagsmenge von etwa 10 bis 15% bis ins Jahr 2040 prognostiziert (SAUTER et al. 2013b, S. 8; GOBIERNO DE CANARIAS 2013d; GOBIERNO DE CANARIAS 2009, S. 81).

7.3 Ökologische Bewertung der agrarischen Landnutzungsveränderungen im Hinblick auf die räumliche Entwicklung spezifischer Pflanzenformationen

Die bisherigen sowie simulierten agrarischen Landnutzungsveränderungen stellen die Grundlage zur Untersuchung der mit den landwirtschaftlichen Flächendynamiken und insbesondere Flächenstilllegungen einhergehenden ökologischen Auswirkungen für spezifische Pflanzenformationen auf Teneriffa dar (vgl. Kap. 6). In diesem Zusammenhang wurde zunächst eine qualitative Feldstudie aus dem

²⁸ Anstelle der derzeit verwendeten klimatischen Variablen, die die aktuelle klimatische Situation wiedergeben, könnten die klimatischen Trendszenarien in Form dynamischer Variablen integriert werden. Hierdurch kann sich die räumliche Ausprägung der Klimadaten pro Zeitabschnitt ändern, während die statistischen Beziehungen zwischen den Landnutzungstypen und den Antriebskräften gleichbleiben.

Jahr 2011 ausgewertet, um das Potenzial landwirtschaftlicher Brachflächen für eine natürliche Regeneration degradierter Ökosysteme exemplarisch aufzuzeigen (vgl. Kap. 6.1). Anschließend wurde eruiert, welche heutigen Verbreitungsareale des Lorbeerwaldes und Baumheidegebüschs (Monteverde), des Kiefernwaldes (Pinar) sowie des Sukkulentenbuschs (Tabaibal/Cardonal) in der Vergangenheit unter agrarischer Nutzung standen und somit als Regenerationsflächen bezeichnet werden können. Zur Detektion dieser landwirtschaftlich beeinflussten Areale wurde das jeweilige Verbreitungsareal aus dem Jahr 2010 – erfasst durch die Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation der RapidEye-Daten – mit den aufbereiteten agrarischen Landnutzungskarten und den darin ausgewiesenen landwirtschaftlich stillgelegten Flächen der Jahre 1986/88, 1998 und 2010 verglichen. Überlappungsbereiche zwischen den thematischen Datensätzen stellten die jeweilige Regenerationsfläche der einzelnen Pflanzenformationen dar (vgl. Kap. 6.2).

Anhand der Analyse wurde deutlich, dass die Verbreitungsgebiete der vorgestellten Vegetationsformationen zu einem beträchtlichen Teil aus Regenerationsflächen bestehen. So setzt sich das aktuelle Areal des Sukkulentenbuschs zu etwa 36% aus regenerierten Agrarflächen zusammen. Die Lorbeerwald- und Baumheidegebüsche weisen mit ca. 12% Regenerationsfläche einen ebenfalls sehr hohen Anteil auf, während Kiefernwälder nur zu einem sehr geringen Prozentsatz auf ehemaligen Ackerflächen entstanden sind. Durch die vorgestellte Analyse konnte somit festgestellt werden, dass die Brachflächenentwicklung auf Teneriffa ein hohes ökologisches Potenzial hinsichtlich der räumlichen Regeneration bestehender Ökosysteme birgt.

Im Anschluss daran erfolgte die Untersuchung des zukünftigen Regenerationspotenzials der verschiedenen Vegetationsformationen unter Berücksichtigung der szenario-basierten Landnutzungssimulationen bis ins Jahr 2030 (vgl. Kap. 6.3). In diesem Zusammenhang wurden zum einen jene Vegetationsareale erfasst, die aufgrund landwirtschaftlicher Inwertsetzungsprozesse zukünftig verlorengehen könnten. Hierzu diente ein Vergleich der prognostizierten Ackerflächen-Neubildungen bis 2030 mit der aktuell bestehenden Landbedeckung des Untersuchungsgebiets aus dem Jahr 2010. Zum anderen konnten durch die räumliche Überlagerung der prognostizierten Brachflächen-Neubildungen bis 2030 mit den Daten zur Verbreitung der potenziellen natürlichen Vegetation (vgl. DEL ARCO AGUILAR et al. 2010) jene Gebiete detektiert werden, die für eine mögliche Regeneration der einzelnen Vegetationsformationen von Bedeutung sind.

Das Ergebnis zeigte auf, dass sich das zukünftige Regenerationspotenzial in beiden Szenarien grundlegend unterscheidet. So konnte für das Trendszenario, das eine weitere Steigerung der Intensivlandwirtschaft und einen weiteren Rückgang der Landwirtschaft in Peripheriegebieten annimmt, ein sehr hohes Regenerationspotenzial insbesondere für den Lorbeerwald und die Baumheidegebüsche ermittelt werden. Die potenzielle Regenerationsfläche für diese Pflanzenformation beläuft sich auf etwa 1.500 ha, was einer weiteren Zunahme von ca. 24% der rezenten Fläche entspricht. Flächenverluste durch landwirtschaftliche Inwertsetzung fielen hingegen gering aus. Eine stark gegenläufige Tendenz zeigte sich jedoch unter Szenario 2, der EU-geförderten Optimierung der kanarischen Landwirtschaft mit einer Steigerung der lokalen Produktion und Förderung benachteiligter Bergregionen. Durch die Flächenausdehnung der Agrarlandschaft konnten zum Teil enorme Flächeneinbußen von mehr als 150 ha für den Lorbeerwald sowie annähernd 2.050 ha für den Sukkulentenbusch prognostiziert werden. Relevante Regenerationspotenziale für die einzelnen Pflanzenformationen ließen sich hingegen nicht ermitteln.

Eine abschließende Diskussion der Ergebnisse machte deutlich, dass es für die zukünftige Raumentwicklung sinnvoll ist, eine ökonomische Entwicklung zu verfolgen, die zwischen den prognostizierten

Extremen verläuft (vgl. Kap. 6.4). In diesem Zusammenhang wurde erörtert, dass die weitere räumliche Ausweitung oder Neugründung von Landschaftsparks eine raumplanerische Maßnahme darstellen könnte, die zu einer Balance zwischen Weiterentwicklung und Wiederbelebung der Agrarökonomie, aber auch zum Schutz der Natur und dem Erhalt der Biodiversität beiträgt. Denn im Gegensatz zu Schutzgebietszonen mit strengeren Schutzrichtlinien lässt diese relativ flexible Kategorie kontrollierte anthropogene Eingriffe in den Naturraum zu und trägt dennoch zu dessen Erhalt bei.

Die vorgestellten Untersuchungen liefern bislang einzigartige quantitative Ergebnisse zur Wiederbesiedlung von Brachflächen durch benachbarte Pflanzenformationen auf Teneriffa. Aufgrund der hohen Güte, die bei der Klassifikation der in die Analyse mit einbezogenen Fernerkundungsdaten erreicht wurde, können die dabei erfassten Regenerationsflächen als absolut repräsentativ für das gegenwärtige Ausmaß landwirtschaftlicher Flächenregenerierung angesehen werden. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten daher die als Regenerationsflächen ausgewiesenen Areale eingehender hinsichtlich ihres Sukzessionsgrades untersuchen. In diesem Zusammenhang wäre es sinnvoll, eine quantitative Kategorisierung der erfassten Sukzessionsflächen im Hinblick auf potenziell notwendige Aufforstungsmaßnahmen zur Förderung der Biodiversität vorzunehmen. Hyperspektraldaten sowie sehr hoch auflösende Multispektraldaten (VHR-Daten) bieten aufgrund ihrer hohen spektralen bzw. räumlichen Auflösung optimale Voraussetzungen zur quantitativen Unterscheidung und Typisierung von spezifischen Vegetationsmustern. Durch eine Auswertung dieser Fernerkundungsdaten im Rahmen eines objektbasierten Klassifikationsansatzes könnten die spezifischen Eigenschaften der genannten Fernerkundungsdaten nicht nur kombiniert, sondern auch weitere Klassifikationsparameter wie Textur- und Formattribute in den Kategorisierungsprozess mit einbezogen werden. Für die Differenzierung der verschiedenen, vornehmlich aus dem Artenspektrum und der damit verbundenen Physiognomie resultierenden Sukzessionsmuster bietet dies möglicherweise einen elementaren Mehrgewinn.

In Bezug auf das ermittelte Regenerationspotenzial, das sich durch zukünftige Agrarflächendynamiken bietet, stehen verschiedene Unsicherheiten im Raum. Der in diesem Zusammenhang möglicherweise gewichtigste Kritikpunkt liegt in der Verwendung der potenziellen natürlichen Vegetation (PNV) zur Detektion möglicher Regenerationsflächen. Das Konzept der PNV ist Gegenstand zahlreicher aktueller Diskurse, in denen vor allem dessen Gültigkeit und Nützlichkeit in Frage gestellt wird (vgl. LOIDI et al. 2012; SOMODI et al. 2012; CHIARUCCI et al. 2010). Kernkritikpunkte zielen vor allem auf methodologische Probleme bei der Datengenerierung der PNV ab, beispielsweise die Generalisierung von subjektiv erhobenen phytosoziologischen Datensätzen, die Wahl des räumlichen Maßstabs, oder die Annahme, dass die ökologische Sukzession unter stabilen Konditionen ein finales Stadium erreicht (CHIARUCCI et al. 2010, S. 1173 ff.). Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird die PNV jedoch einzig als die theoretische Verbreitung der natürlichen Vegetation im Untersuchungsraum verstanden, die sich aus den jeweiligen geographischen, ökologischen (geophysikalischen) und biotischen (Indikatorarten und Pflanzengemeinschaften) Standorteigenschaften ergibt (LOIDI et al. 2012, S. 601; BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 2008). Inwieweit die potenziellen Brachflächen letztlich wirklich von den untersuchten Pflanzenformationen besiedelt werden, hängt von der Nähe zu bestehen Vegetationsbeständen sowie von zahlreichen weiteren populationsdynamischen Faktoren ab, die im Kontext weiterer statistischer Analysen spezifiziert werden sollten. Daher müssen die ermittelten Flächenzahlen eher als Richtwert angesehen werden, der gewissermaßen eine Tendenz zukünftiger Flächenregeneration unter den jeweiligen agrarischen Raumentwicklungsszenarien aufzeigt.

Im Hinblick auf die Ausweisung oder Erweiterung von Schutzgebieten, beispielsweise auf detektierten Hot Spot-Arealen landwirtschaftlicher Flächenstilllegung mit hohem Wiederbesiedlungspotenzial, sollte darüber hinaus erarbeitet werden, welche gesetzlichen Bestimmungen und Kriterien erfüllt sein müssen, um eine Region unter Schutz zu stellen. Eine detaillierte Analyse der einzelnen Schutzgebietskategorien, insbesondere der Kategorie „Landschaftsparks“ bzw. „Landschaftsschutzgebiete“ ist in diesem Kontext unerlässlich. Auf Basis entsprechend existierender Kriterien-Kataloge ließen sich letztlich Aussagen darüber treffen, inwieweit potenziell schützenswerte Areale die einzelnen Bedingungen erfüllen. Die kategorisierten Sukzessionsareale und die gewonnenen Kenntnisse über die Determinanten vegetationspezifischer Sukzessionsprozesse könnten diesbezüglich als erste Grundlage dienen, da sie umfangreiche Informationen sowohl zum Ist-Zustand als auch zur räumlichen Entwicklungstendenz des jeweiligen Ökosystems liefern. Nicht unberücksichtigt bleiben darf in diesem Zusammenhang die generelle Frage, welche aktuellen Bestrebungen der kanarischen Regierung und weiterer Interessensgemeinschaften zum zukünftigen Schutz des kanarischen Naturraums verfolgt werden und wie sich die regionsspezifischen Vorschläge zum Ausweis von Schutzgebieten mit diesen jeweiligen politischen Rahmenbedingungen vereinbaren lassen.

Literaturverzeichnis

- ADHIKARI, S. & SOUTHWORTH, J. (2012): Simulating Forest Cover Changes of Bannerghatta National Park Based on a CA-Markov Model: A Remote Sensing Approach. In: *Remote Sensing*, 4(12), S. 3215–3243.
- AGARWAL, C., GREEN, G. M., GROVE, J. M., EVANS, T. P. & SCHWEIK, C. M. (2002): A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human Choice Choice. General Technical Report NE-297. Indiana University. Center for the Study of Institutions, Population, and Environmental Change.
- AGUILERA-KLINK, F., PÉREZ-MORIANA, E. & SÁNCHEZ-GUARCÍA, J. (2000): The social construction of scarcity. The case of water in Tenerife (Canary Islands). In: *Ecological Economics*, 34, S. 233–245.
- AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J., SEIJMONSBERGEN, A. C. & DUIVENVOORDEN, J. F. (2012): Optimizing land cover classification accuracy for change detection, a combined pixel-based and object-based approach in a mountainous area in Mexico. In: *Applied Geography*, 34, S. 29–37.
- AKHAND, M. N. A. & AL ARAJ, B. (2013): Exploring Soil Salinity Management in Entisols Using Trickle Irrigation System. In: SHAHID, S. A., ABDELFATTAH, M. A. & TAHA, F. K. (Hg.): *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 717–722.
- ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3. Auflage. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft WBG.
- ALCANTARA, C., KUEMMERLE, T., PRISHCHEPOV, A. V. & RADELOFF, V. C. (2012): Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data. In: *Remote Sensing of Environment*, 124, S. 334–347.
- ANGELSEN, A. (2010): Climate Mitigation and Food Production in Tropical Landscapes Special Feature: Policies for reduced deforestation and their impact on agricultural production. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(46), S. 19639–19644.
- ARAÑA, V., FELPETO, A., ASTIZ, M., GARCÍA, A., ORTIZ, R. & ABELLA, R. (2000): Zonation of the main volcanic hazards (lava flows and ash fall) in Tenerife, Canary Islands. A proposal for a surveillance network. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1-4), S. 377–391.
- ARÉVALO, J. R. & FERNÁNDEZ-PALACOIS, J. M. (2008): Natural Regeneration of *Pinus canariensis* Chr. Sm. Ex DC in Buch in Forest Plantations After Thinning. In: *The Open Forest Science Journal*, (1), S. 54–60.
- ARMAS-ESPINEL, S., HERNÁNDEZ-MORENO, J., MUÑOZ-CARPENA, R. & REGALADO, C. (2003): Physical properties of “sorriba”-cultivated volcanic soils from Tenerife in relation to andic diagnostic parameters. In: *Geoderma*, 117(3-4), S. 297–311.
- ARNDT, E. (2006): Die Lorbeerwälder der Kanarischen Inseln: Ökologische Probleme und Naturschutz. In: *Natur und Landschaft*, 81(8), S. 393–399.
- ASSENG, S., DRAY, A., PEREZ, P. & SU, X. (2010): Rainfall-human-spatial interactions in a salinity-prone agricultural region of the Western Australian wheat-belt. In: *Ecological Modelling*, 221(5), S. 812–824.

- AURBACHER, J. (2010): Fruchtfolgengenerierung mit Markov-Ketten – eine statistische Simulation. In: Österreichische Gesellschaft für Agrarökonomie ÖGA (Hg.): Land- und Ernährungswirtschaft 2020. 20. Jahrestagung der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie. Wien, 23.-24.09. 2010, S. 43–44.
- AURBACHER, J. & DABBERT, S. (2011): Generating crop sequences in land-use models using maximum entropy and Markov chains. In: *Agricultural Systems*, 104(6), S. 470–479.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000): Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag, S. 12–23.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (2008): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 12., vollständig überarb. Auflage. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).
- BALDACCHINO, G. (2004): Sustainable use practices, including tourism, in/for small islands. In: *INSULA*, Special Issue February 2004, S. 15–20.
- BALDENHOFER, K. & MARSCHALL, N. (2013): Lexikon der Fernerkundung. Online verfügbar unter <http://www.fe-lexikon.info>, zuletzt geprüft am 19.08.2013.
- BALMANN, A. (1997): Farm-based modelling of regional structural change: A cellular automata approach. In: *European Review of Agricultural Economics*, 24(1), S. 85–108.
- BARRETO, L., SCHOORL, J. M., KOK, K., VELDKAMP, T. & HASS, A. (2013): Modelling potential landscape sediment delivery due to projected soybean expansion: A scenario study of the Balsas sub-basin, Cerrado, Maranhão state, Brazil. In: *Journal of Environmental Management*, 115, S. 270–277.
- 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. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3-4), S. 239–258.
- BENZAKEN, D. & RENARD, Y. (2011): Future directions for biodiversity action in Europe overseas. Outcomes of the Review of the Implementation of the Convention on Biological Diversity, December 2010. Gland, Schweiz: IUCN.
- BERGER, T. (2004): Agentenbasierte Modellierung von Landnutzungsdynamiken und Politikoptionen. In: *Agrarwirtschaft*, 53(2), S. 77–87.
- BLANZIERI, E. & MELGANI, F. (2008): Nearest Neighbor Classification of Remote Sensing Images With the Maximal Margin Principle. In: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 46(6), S. 1804–1811.
- BLASCHKE, T. (2010): Object based image analysis for remote sensing. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), S. 2–16.
- BORG, E., DAEDELLOW, H., MIßLING, K.-D. & APEL, M. (2012): Das RESA-Projekt: Bereitstellung von RapidEye-Daten für die deutsche Wissenschaft. In: BORG, E., DAEDELLOW, H. & JOHNSON, R. (Hg.): Vom Algorithmus zum Produkt. Tagungsband zum 4. RESA-Workshop; Neustrelitz, 21. - 22. März 2012, Orangerie Neustrelitz. Berlin: GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, S. 3–16.
- BÖRNER, M. (2004): Die Flächenstilllegung als Lebensraum im Wandel der Agrarreform. In: *Beiträge zur Jagd & Wildtierforschung*, 29, S. 327–332.

- BORSBOOM-VAN BEURDEN, J., BAKEMA, A. & TIJBOSCH, H. (2007): A Land-Use Modelling System for Environmental Impact Assessment. In: *The GeoJournal Library*, 90, S. 281–296.
- BOURIER, G. (2008): Beschreibende Statistik. Praxisorientierte Einführung; mit Aufgaben und Lösungen. 7., überarb. Auflage. Wiesbaden: Gabler (Lehrbuch).
- BOVOLO, F., MARCHESI, S. & BRUZZONE, L. (2012): A Framework for Automatic and Unsupervised Detection of Multiple Changes in Multitemporal Images. In: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 50(6), S. 2196–2212.
- BREIMANN, L. (2001): Random Forests. In: *Machine Learning*, 45, S. 5–32.
- BRITZ, W., VERBURG, P. H. & LEIP, A. (2011): Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(1-2), S. 40–50.
- BRUNOTTE, E., GEBHARDT, H., MEURER, M., MEUSBURGER, P. & NIPPER, J. (2002): Lexikon der Geographie. CD-ROM. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2008): Vegetationskartierung. Online verfügbar unter http://www.bfn.de/0302_vegetationskartierung.html, zuletzt geprüft am 30.07.2013.
- CABILDO DE TENERIFE (2009): Mapa de Cultivos de la Isla de Tenerife. Campagna Agrícola 2007/2008. Hg. v. Gobierno de Canarias. Online verfügbar unter http://www.agrocabildo.org/publica/mapa_cultivo/Metodologia.pdf, zuletzt geprüft am 01.05.2013.
- CABILDO DE TENERIFE (2012): Plan Insular de ordenación de Tenerife. Online verfügbar unter <http://www.tenerife.es/planes/PIOT/PIOTindex.htm>, zuletzt geprüft am 11.06.2013.
- CABILDO DE TENERIFE (2013a): Der Bodenbewirtschaftungsplan auf Teneriffa. Online verfügbar unter http://atlastenerife.es/portalweb/index.php?option=com_content&view=article&id=30&Itemid=38&lang=de, zuletzt geprüft am 11.06.2013.
- CABILDO DE TENERIFE (2013b): Naturschutzgebiete. Online verfügbar unter http://www.tenerife.es/wps/portal/!ut/p/c1/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3g_f3NDM0MvIwMDL2dnA09PL0c__6AQQwMPE6B8pFm8oZ-FZ6i3u6GBv4eXq4Gnu4-Tj1mgv5GBkTEB3cEpqfEurvp-Hvm5qfoFuRHIAPbeNfw!/dl2/d1/L2dJQSEvUUt3QS9ZQnB3LzZfTk83MTYxSjIwMEpDQzBJSUpBTK9SVDEwOTY!/, zuletzt geprüft am 01.08.2013.
- CALDAS, M., WALKER, R., ARIMA, E., PERZ, S., ALDRICH, S. & SIMMONS, C. (2007): Theorizing Land Cover and Land Use Change: The Peasant Economy of Amazonian Deforestation. In: *Annals of the Association of American Geographers*, 97(1), S. 86–110.
- CAMPBELL, J. B. (2006): Introduction to remote sensing. 4. Auflage. London: Taylor & Francis.
- CANNY, J. (1986): Computational approach to edge detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI*, 8(6), S. 679–698.
- CARTER, T. R. & LA ROVERE, E. L. (2001): Developing and Applying Scenarios. In: MC CARTHY, J. J., CANZIANI, O. F., LEARY, N. A., DOKKSEN, D. J. & WHITE, K. S. (Hg.): Climate change 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge, U.K, New York: Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 145–190.

- CARTER, T. R., PARRY, M. L., HARASAWA, H. & NISHIOKA, S. (1994): IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptation. Part of the IPCC Special Report to the First Session of the Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change, Working Group II, Intergovernmental Panel on Climate Change. London, UK, Tsukuba, Japan: Dept. of Geography, University College London; Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies.
- CASTELLA, J.-C., PHENG KAM, S., DINH QUANG, D., VERBURG, P. H. & THAI HOANH, C. (2007): Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. In: *Land Use Policy*, 24(3), S. 531–545.
- CASTELLANO GIL, J. M. & MACÍAS MARTÍN, F. J. (1999): Die Geschichte der Kanarischen Inseln. 4. Auflage. Santa Cruz de Tenerife: Centro de la Cultura Popular Canaria, CCPC (166).
- CEBALLOS, L. & ORTUÑO MEDINA, F. (1976): Estudio sobre la vegetación y flora forestal de las Canarias Occidentales. 2. Auflage. Santa Cruz de Tenerife: Excmo. Cabildo Insular.
- CELIK, T. (2009): Unsupervised Change Detection in Satellite Images Using Principal Component Analysis and *k*-Means Clustering. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(4), S. 772–776.
- CHAPIN III, F. S., ZAVALETA, E. S., EVINER, V. T., NAYLOR, R. L., VITOUSEK, P. M., REYNOLDS, H. L., HOOPER, D. U., LAVOREL, S., SALA, O. E., HOBBIE, S. E., MACK, M. C. & DÍAZ, S. (2000): Consequences of changing biodiversity. In: *Nature*, 405(6783), S. 234–242.
- CHAVEZ JR., P. S., SIDES, S. C. & ANDERSON, J. A. (1991): Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3), S. 195–303.
- CHEN, H. & PONTIUS, R. G. (2010): Diagnostic tools to evaluate a spatial land change projection along a gradient of an explanatory variable. In: *Landscape Ecology*, 25(9), S. 1319–1331.
- CHIARUCCI, A., ARAÚJO, M. B., DECOCQ, G., BEIERKUHNEIN, C. & FERNÁNDEZ-PALACIOS, J. M. (2010): The concept of potential natural vegetation: an epitaph? In: *Journal of Vegetation Science*, 21(6), S. 1172–1178.
- CHRIST, H. (1885): Vegetation und Flora der Canarischen Inseln. In: *Bot. Jahrb.*, 6, S. 458–526.
- CHRISTALLER, W. (1933): Die zentralen Orte in Sueddeutschland: eine oekonomisch - geographische Untersuchung ueber die Gesetzmaessigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit staedtischen Funktionen. Jena.
- CHUBEY, M. S., FRANKLIN, S. E. & WULDER, M. A. (2006): Object-based Analysis of Ikonos-2 Imagery for Extraction of Forest Inventory Parameters. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4), S. 383–394.
- CONRAD, C., FRITSCH, S., ZEIDLER, J., RÜCKER, G. & DECH, S. (2010): Per-Field Irrigated Crop Classification in Arid Central Asia Using SPOT and ASTER Data. In: *Remote Sensing*, 2(4), S. 1035–1056.
- CONSTANZA, R. (1989): Model Goodness of Fit: A Multiple Resolution Procedure. In: *Ecological Modelling*, 47, S. 199–215.

- COPPIN, P., JONCKHEERE, I., NACKAERTS, K., MUYS, B. & LAMBIN, E. (2004): Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. In: *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), S. 1565–1596.
- CORBELLE-RICO, E., CRECENTE-MASEDA, R. & SANTÉ-RIVEIRA, I. (2012): Multi-scale assessment and spatial modelling of agricultural land abandonment in a European peripheral region: Galicia (Spain), 1956–2004. In: *Land Use Policy*, 29(3), S. 493–501.
- DANSON, F. & BOWYER, P. (2004): Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. In: *Remote Sensing of Environment*, 92(3), S. 309–321.
- DE JONG, S. M. & VAN DER MEER, F. (2004): Remote sensing image analysis. Including the spatial domain. Dordrecht, London: Kluwer Academic (Remote sensing and digital image processing v. 5).
- DE KOK, R. (2001): Objektorientierte Bildanalyse. Ein Lösungsansatz für den automatisierten Einsatz sehr hoch auflösender Satellitendaten für forstliche Fragestellungen. Dissertation. Technische Universität München. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt.
- DE KOK, R., BUCK, A., SCHNEIDER, T. & AMMER, U. (2000): Analysis of image objects from VHR imagery for forest GIS updating in the Bavarian Alps. In: *ISPRS, XXXII, Amsterdam*, S. 1–8.
- DE LANGE, N. (2013): Geoinformatik. In Theorie und Praxis. 3. vollst. überarb. u. akt. Auflage. Berlin: Springer (Lehrbuch).
- DE NAVASCUÉS MELERO, M. (2005): Genetic Diversity of the Endemic Canary Island Pine Tree, *Pinus canariensis*. Dissertation. University of East Anglia, Norwich, England. School of Biological Sciences.
- DEL ARCO AGUILAR, M. J. (2006): Mapa de vegetación de Canarias. Mapas, memoria general, CD-Rom. 1. Auflage. La Laguna, Tenerife: Grafcan Ed.
- DEL ARCO AGUILAR, M.-J., GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, R., GARZÓN-MACHADO, V. & PIZARRO-HERNÁNDEZ, B. (2010): Actual and potential natural vegetation on the Canary Islands and its conservation status. In: *Biodiversity and Conservation*, 19(11), S. 3089–3140.
- DEL ARCO AGUILAR, M.-J., PÉREZ-DE-PAZ, P. L., ACEBES, J. R., GONZÁLEZ-MANCEBO, J. M., REYES-BETANCOURT, J. A., BERMEJO, J. A., DE-ARMAS, S. & GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, R. (2006): Bioclimatology and climatophilous vegetation on Tenerife (Canary Islands). In: *Ann. Bot. Fennici*, 43, S. 167–192.
- DÍAZ, G. I., NAHUELHUAL, L., ECHEVERRÍA, C. & MARÍN, S. (2011): Drivers of land abandonment in Southern Chile and implications for landscape planning. In: *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4), S. 207–217.
- DIAZ-BONE, R. & KÜNEMUND, H. (2003): Einführung in die binäre logistische Regression. Freie Universität Berlin, Institut für Soziologie (Mitteilungen aus dem Schwerpunktbereich Methodenlehre 56).
- DINGLE ROBERTSON, L. & KING, D. J. (2011): Comparison of pixel- and object-based classification in land cover change mapping. In: *International Journal of Remote Sensing*, 32(6), S. 1505–1529.
- DLR (2013): Atmosphärenkorrektur. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). Online verfügbar unter http://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-5450/10028_read-20715/, zuletzt geprüft am 21.08.2013.

- DUDLEY, N. (Hg.) (2008): Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. Gland, Schweiz: IUCN.
- EHLERS, J. (2008): Ensemble Methoden zur automatisierten Klassifikation von NMR-Spektren. Diplomarbeit. Technische Universität Dortmund. Fakultät für Informatik, Lehrstuhl 12, Mustererkennung in Eingebetteten Systemen.
- EHRIG, F. R. (1998): Die Hauptvegetationseinheiten der Kanarischen Inseln im bioklimatischen Kontext. In: *Kieler Geographische Schriften*, 97, S. 67–115.
- EIDG. FORSCHUNGSANSTALT WSL (Hg.) (2005): Walddynamik Programm 9. Birmersdorf, Schweiz (Inf.schr. Prog. Walddynamik 9).
- EISENBACH, D. (2005): Künstliche Neuronale Netze zur Prognose von Zeitreihen. Diplomarbeit. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Institut für Informatik.
- ENCLONA, E. A., THENKABAIL, P. S., CELIS, D. & DIEKMANN, J. (2004): Within-field wheat yield prediction from IKONOS data: a new matrix approach. In: *International Journal of Remote Sensing*, 25(2), S. 377–388.
- ESRI (2013): ArcGIS 10.2 - Line Density (Spatial Analyst). Online verfügbar unter <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#/009z0000000t000000>, zuletzt geprüft am 08.11.2013.
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2001): VERORDNUNG (EG) Nr. 1454/2001 DES RATES vom 28. Juni 2001 zur Einführung von Sondermaßnahmen für bestimmte landwirtschaftliche Erzeugnisse zugunsten der Kanarischen Inseln und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 1601/92 (Poseican). Fundstelle: ABl. L 198/45 vom 21.07.2001.
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2006a): VERORDNUNG (EG) Nr. 247/2006 DES RATES vom 30. Januar 2006 über Sondermaßnahmen im Bereich der Landwirtschaft zugunsten der Regionen in äußerster Randlage der Union. Fundstelle: ABl. L 42 vom 14.2.2006, S. 1.
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2006b): VERORDNUNG (EG) Nr. 793/2006 DER KOMMISSION vom 12. April 2006 mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EG) Nr. 247/2006 des Rates über Sondermaßnahmen im Bereich der Landwirtschaft zugunsten der Regionen in äußerster Randlage der Union. Fundstelle: ABl. L 145 vom 31.5.2006.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006): Die EU-Politik zur Förderung der Entwicklung des ländlichen Raums 2007-2013. Fact Sheet. Luxemburg: Amt für Amtliche Veröff. der Europ. Gemeinschaften.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2013): Regionalpolitik und Gebiete in äußerster Randlage. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/regional_policy/activity/outermost/index_de.cfm, zuletzt geprüft am 12.11.2013.
- EUROPÄISCHE UNION (2010): Sonderbericht Nr. 10/2010 „Sondermaßnahmen zugunsten der Landwirtschaft der Regionen in äußerster Randlage und der kleineren Inseln des Ägäischen Meeres“. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52010SA0010:DE:HTML>, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

- EUROPÄISCHE UNION (2012): Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union. Konsolidierte Fassung vom 26. Oktober 2012. Fundstelle: ABl. C 326/47 vom 26.10.2012. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2012:326:0047:0200:DE:PDF>, zuletzt geprüft am 12.11.2013.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT (2011): Die Landwirtschaft der Kanarischen Inseln. Vermerk. Unter Mitarbeit von MASSOT, A. UND MORVAN, C. Generaldirektion Interne Politikbereiche, Fachabteilung B: Struktur- und Kohäsionspolitik.
- EYERS, R., MOORE, J. M., HERVAS, J. & LIU, J. G. (1998): Integrated use of Landsat TM and SPOT panchromatic imagery for landslide mapping: case histories from southeast Spain. In: *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 15(1), S. 133–140.
- FERNANDEZ CALDAS, E., QUANTIN, P. & TEJEDOR SALGUERO, M. L. (1982): Suelos de regiones volcanicas: Tenerife, Islas Canarias. La Laguna: Secretariado de publicaciones, Univ. (Coleccion Viera y Clavijo 4).
- FERNÁNDEZ-PALACIOS, J. M. & WHITTAKER, R. J. (2008): The Canaries: an important biogeographical meeting place. In: *Journal of Biogeography*, 35(3), S. 379–387.
- FERNÁNDEZ-STEEGER, T. M. (2002): Erkennung von Hangrutschungssystemen mit Neuronalen Netzen als Grundlage für Georisikoanalysen. Dissertation. Universität Karlsruhe. Fakultät für Bio- und Geowissenschaften.
- FISHER, E. (2004): Island Ecosystems Conservation and Sustainable Use: Problems and Challenges. In: *INSULA*, Special Issue February 2004, S. 10–14.
- FOLEY, J. A. (2005): Global Consequences of Land Use. In: *Science*, 309(5734), S. 570–574.
- FOX, J., VOGLER, J. B., SEN, O. L., GIAMBELLUCA, T. W. & ZIEGLER, A. D. (2012): Simulating Land-Cover Change in Montane Mainland Southeast Asia. In: *Environmental Management*, 49(5), S. 968–979.
- FRANCO-LOPEZ, H., EK, A. R. & BAUER, M. E. (2001): Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method. In: *Remote Sensing of Environment*, 77(3), S. 251–274.
- FRANKE, J., MENZ, G. & HEINZE, V. (2006): NDVI- Unterschiede aufgrund der sensor-spezifischen spectral response functions. In: MICHEL, U. & BEHNCKE, K. (Hg.): Veröffentlichungen des AK Fernerkundung 2006 (gi-reports@igf 5), S. 11–23.
- FREY, W. & LÖSCH, R. (2010): Lehrbuch der Geobotanik. Pflanze und Vegetation in Raum und Zeit. 3. Auflage. München: Spektrum Akademischer Verlag.
- FROMM, S. (2005): Binäre logistische Regressionsanalyse. Eine Einführung für Sozialwissenschaftler mit SPSS für Windows. In: *Bamberger Beiträge zur empirischen Sozialforschung*, 2005(11).
- GAO, B. (1996): NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. In: *Remote Sensing of Environment*, 58(3), S. 257–266.
- GAUBE, V., REISINGER, H., ADENSAM, H., AIGNER, B., COLARD, A., HABERL, H., LUTZ, J., MAIER, R., PUNZ, W. & SMETSCHKA, B. (2009): Agentenbasierte Modellierung von Szenarien für Landwirtschaft und Landnutzung im Jahr 2020, Traisental, Niederösterreich. In: *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Österreich*, 146, S. 79–101.

- GEOSYSTEMS GMBH (2009): ATCOR for ERDAS Imagine 2010. Haze Reduction, Atmospheric and Topographic Correction. Online verfügbar unter <http://www.geosystems.de/atcor/>, zuletzt geprüft am 20.10.2013.
- GIBBS, H. K., RUESCH, A. S., ACHARD, F., CLAYTON, M. K., HOLMGREN, P., RAMANKUTTY, N. & FOLEY, J. A. (2010): Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38), S. 16732–16737.
- GISLASON, P. O., BENEDIKTSSON, J. A. & SVEINSSON, J. R. (2006): Random Forests for land cover classification. In: *Pattern Recognition Letters*, 27(4), S. 294–300.
- GITELSON, A. A., KAUFMAN, Y. J. & MERZLYAK, M. N. (1996): Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. In: *Remote Sensing of Environment*, 58(3), S. 289–298.
- GOBIERNO DE CANARIAS (2009): Estrategia Canaria de lucha contra el cambio climático. Agencia Canaria de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático. Online verfügbar unter <http://climaimpacto.eu/wp-content/uploads/2012/03/ESTRATEGIA-CANARIA-DE-LUCHA-CONTRA-EL-CAMBIO-CLIM%C3%81TICO.pdf>, zuletzt geprüft am 02.12.2013.
- GOBIERNO DE CANARIAS (2012): Programa de Desarrollo Rural de Canarias. FEADER 2007-2013. Online verfügbar unter http://www.pdrcanarias.org/images/pdr%202012%20_vigente_x.pdf, zuletzt geprüft am 02.08.2013.
- GOBIERNO DE CANARIAS (2014): Catalogue Service. WMS-Services. Online verfügbar unter <http://www.idecan.grafcan.es/idecan/en/home/catalogue-service.html#titulo1>, zuletzt geprüft am 10.02.2014.
- GOBIERNO DE CANARIAS (2013a): Avance de Programa de Desarrollo Rural de Canarias 2014-2020. Online verfügbar unter http://www.pdrcanarias.org/images/stories/pdr2014-2020/Avance_PDR_2014-2020.pdf, zuletzt geprüft am 01.05.2013.
- GOBIERNO DE CANARIAS (2013b): Estadística Agraria de Canarias 1985 - 2010. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. Online verfügbar unter <http://www2.gobiernodecanarias.org/agricultura/otros/estadistica/resupdf.htm>, zuletzt geprüft am 01.05.2013.
- GOBIERNO DE CANARIAS (2013c): Programa Comunitario de Apoyo a las Producciones Agrarias de Canarias (Reglamento (CE) N° 247/2006 del Consejo, de 30 de Enero). Modificación del Programa para 2013. Online verfügbar unter http://www.gobcan.es/agricultura/doc/otros/posei/POSEI_Canarias_Consolidado_27-09-2010.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2013.
- GOBIERNO DE CANARIAS (2013d): Proyecto Clima•Impacto. Consejería de Educación, Universidades y Sostenibilidad; Viceconsejería de Medio Ambiente; Observatorio de Desarrollo Sostenible. Online verfügbar unter <http://climaimpacto.eu/>, zuletzt geprüft am 20.11.2013.
- GOETZKE, R. (2010): Entwicklung eines fernerkundungsgestützten Modellverbundes zur Simulation des urban-ruralen Landnutzungswandels in Nordrhein-Westfalen. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- GONZALEZ-CONCEPCIÓN, C., GIL-FARINA, M. C. & PESTANO-GABINO, C. (2008): Multivariate Modelling of the Canary Islands Banana Output. The Role of Farmer Income Expectation. In: *Journal of Social Sciences*, 4(2), S. 88–97.

- GRAF, R. J. & WEGENKITTL, S. (2012): Integration von Support Vector Machines in die objektbasierte Bildklassifizierung am Beispiel der Entwicklung eines Plug-Ins für eCognition. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hg.): *Angewandte Geoinformatik 2012. Beiträge zum 24. AGIT-Symposium Salzburg*. Berlin, Offenbach: Wichmann, S. 52–61.
- GROOT, J. C., ROSSING, W. A., TICHIT, M., TURPIN, N., JELLEMA, A., BAUDRY, J., VERBURG, P. H., DOYEN, L. & VAN DE VEN, G. W. (2009): On the contribution of modelling to multifunctional agriculture: Learning from comparisons. In: *Journal of Environmental Management*, 90, S. S147.
- GRUPO ALARCOS, ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA DE CIUDAD REAL (2005): AUDES - Áreas Urbanas de España 2005. Definiciones. Online verfügbar unter <http://alarcos.inf-cr.uclm.es/per/fruiz/audes5/info/definiciones.htm>, zuletzt geprüft am 29.05.2013.
- GUIMARÃES, A. & OLMEDA, C. (2008): Management of Natura 2000 habitats. 9360 * Macaronesian laurel forests (*Laurus*, *Ocotea*). Directive 92/43/EEC on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora: European Commission.
- 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. In: Proc. SPIE 8538, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications III, S. 853804–853804-7.
- GÜNTHERT, S., SIEGMUND, A. & NAUMANN (2010): Modeling and valuation of ecological impacts of land cover and land use changes on Tenerife (Canary Islands). In: Proc. SPIE 7831, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications, S. 783111–783111-7.
- GÜNTHERT, S., SIEGMUND, A., THUNIG, H. & MICHEL, U. (2011a): Object-based detection of LUCC with special regard to agricultural abandonment on Tenerife (Canary Islands). In: Proc. SPIE 8181, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II, S. 818111 - 818111-7.
- GÜNTHERT, S., WIELAND, M. & SIEGMUND, A. (2011b): Change Detection Analysis for Assessing the Vulnerability and Protective Effect of Beach Forests in Case of the Tsunami 2004 in Thailand. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG*, 2011(4), S. 247–260.
- HAGEN, A. (2003): Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3), S. 235–249.
- HAGEN-ZANKER, A. (2006): Map comparison methods that simultaneously address overlap and structure. In: *Journal of Geographical Systems*, 8(2), S. 165–185.
- HASSAN, R. M., SCHOLLES, R. & ASH, N. (2005): Ecosystems and human well-being. Current state and trends, volume 1: findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC: Island Press (The millennium ecosystem assessment series version 1).
- HERBST, P. & MOSIMANN, T. (2010): Prognose ökologisch wichtiger Waldbodeneigenschaften mit Random Forest in der Nordschweiz. Vergleich der Vorhersagen mit wissensbasierter empirisch-statistischer Modellierung. In: *Géomatique Suisse*, 4, S. 140–144.
- HEROLD, M., GOLDSTEIN, N. C. & CLARKE, K. C. (2003): The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. In: *Remote Sensing of Environment*, 86(3), S. 286–302.

- HESE, S. (2007): Working Note: „Using Definiens Professional and Developer Software“. Lehrstuhl für Fernerkundung, Friedrich-Schiller-Universität Jena. Online verfügbar unter <http://www.eo.uni-jena.de/fileadmin/Fernerkundung/c2heso/WN-Using-Definiens-Pro-05032007.pdf>, zuletzt geprüft am 16.08.2013.
- HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G. & JARVIS, A. (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. In: *International Journal of Climatology*, 25(15), S. 1965–1978.
- HÖLLERMANN, P. (1982): Studien zur aktuellen Morphodynamik und Geoökologie der Kanareninseln Teneriffa und Fuerteventura. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht (Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse 3. Folge, Nr. 34).
- HOLZER-POPP, T., BITTNER, M., BORG, E., DECH, S., ERBERTSEDER, T., FICHELTMANN, B. & SCHROEDTER, M. (2002): Das automatische Atmosphärenkorrekturverfahren „DurchBlick“. In: BLASCHKE, T. (Hg.): Fernerkundung und GIS. Neue Sensoren - innovative Methoden. Heidelberg: Wichmann.
- HUETE, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). In: *Remote Sensing of Environment*, 25(3), S. 295–309.
- HUETZ DE LEMPS, A. (1969): Le Climat des Iles Canaries. In: *Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Paris-Sorbonne*, 54, S. 1–224.
- HUGHES, M. L., MCDOWELL, P. F. & MARCUS, W. A. (2006): Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. In: *Geomorphology*, 74(1-4), S. 1–16.
- HUNT, J. D., KRIGER, D. S. & MILLER, E. J. (2005): Current operational urban land-use–transport modelling frameworks: A review. In: *Transport Reviews*, 25(3), S. 329–376.
- HUNT JR., E. R. & ROCK, B. N. (1989): Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. In: *Remote Sensing of Environment*, 30, S. 43–54.
- HÜRLIMANN, M., GARCIA-PIERA, J. O. & LEDESMA, A. (2000): Causes and mobility of large volcanic landslides: application to Tenerife, Canary Islands. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1-4), S. 121–134.
- HUSSAIN, M., CHEN, D., CHENG, A., WEI, H. & STANLEY, D. (2013): Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80, S. 91–106.
- INSTITUTO CANARIO DE ESTADÍSTICA (2013): Estadísticas de la Comunidad Autónoma de Canarias. Online verfügbar unter http://www.gobiernodecanarias.org/istac/temas_estadisticos, zuletzt geprüft am 27.11.2013.
- ISHIDA, T., ITAGAKI, S., SASAKI, Y. & ANDO, H. (2004): Application of wavelet transform for extracting edges of paddy fields from remotely sensed images. In: *International Journal of Remote Sensing*, 25(2), S. 347–357.
- JACOBI, J. (2005): Teilflächige Diagnose von Pilzbefall und Stickstoffmangel an Weizen mit Hilfe der optischen Fernerkundung. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Institut für Pflanzenbau.

- JALAN, S. & SOKHI, B. S. (2012): Comparison of different pan-sharpening methods for spectral characteristic preservation: multi-temporal CARTOSAT-1 and IRS-P6 LISS-IV imagery. In: *International Journal of Remote Sensing*, 33(18), S. 5629–5643.
- JANSSEN, J. & LAATZ, W. (2007): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul exakte Tests; mit 193 Tabellen. 6., neu bearb. und erw. Auflage. Berlin [u.a.]: Springer.
- JENSEN, J. R. (2005): Introductory digital image processing. A remote sensing perspective. 3. Auflage. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall (Prentice Hall series in geographic information science).
- Ji, C. Y. (1996): Delineating agricultural field boundaries from TM imagery using dyadic wavelet transforms. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 51(6), S. 268–283.
- JOKAR ARSANJANI, J., HELBICH, M., KAINZ, W. & DARVISHI BOLOORANI, A. (2013): Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, S. 265–275.
- JUDEX, M. (2008): Modellierung der Landnutzungsdynamik in Zentralbenin mit dem XULU-Framework. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- JUNEJA, M. & SANDHU, P. (2009): Performance evaluation of edge detection techniques for images in spatial domain. In: *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 1(5), S. 614–621.
- KAMH, S., ASHMAWY, M., KILIAS, A. & CHRISTARAS, B. (2012): Evaluating urban land cover change in the Hurghada area, Egypt, by using GIS and remote sensing. In: *International Journal of Remote Sensing*, 33(1), S. 41–68.
- KAPLAN, M. (2011): Agent-based modeling of land-use changes and vulnerability assessment in a coupled socio-ecological system in the coastal zone of Sri Lanka. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- KARSLI, F. & KAHYA, O. (2012): Detecting the Buildings from Airborne Laser Scanner Data by Using Fourier Transform. In: *Experimental Techniques*, 36(1), S. 5–17.
- KLONUS, S. (2011): Optimierung und Auswirkungen von ikonischen Bildfusionsverfahren zur Verbesserung von fernerkundlichen Auswerteverfahren. Dissertation. Universität Osnabrück. Fachbereich Mathematik/Informatik.
- KLONUS, S. & EHLERS, M. (2007): Image Fusion Using the Ehlers Spectral Characteristics Preservation Algorithm. In: *GIScience & Remote Sensing*, 44(2), S. 93–116.
- KLONUS, S. & EHLERS, M. (2012): Potential von RapidEye Bilddaten für das Wattenmeermonitoring. In: BORG, E., DAEDELLOW, H. & JOHNSON, R. (Hg.): Vom Algorithmus zum Produkt. Tagungsband zum 4. RESA-Workshop; Neustrelitz, 21. - 22. März 2012, Orangerie Neustrelitz. Berlin: GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, S. 241–253.
- KLONUS, S., TOMOWSKI, D., EHLERS, M., REINARTZ, P. & MICHEL, U. (2012): Combined Edge Segment Texture Analysis for the Detection of Damaged Buildings in Crisis Areas. In: *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing*, 5(4), S. 1118–1128.
- 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. In: *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), S. 55–63.

- KOOMEN, E. & STILLWELL, J. (2007): Modelling Land-Use Change. Theories and methods. In: KOOMEN, E., STILLWELL, J., BAKEMA, A. & SCHOLTEN, H. (Hg.): Modelling land-use change. Progress and applications. Dordrecht: Springer (GeoJournal library 90), S. 1–21.
- KOTSIANTIS, S. B. (2007): Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. In: *Informatica*, 31, S. 249–268.
- KUHNERT, M., VOINOV, A. & SEPPELT, R. (2005): Comparing Raster Map Comparison Algorithms for Spatial Modeling and Analysis. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(8), S. 975–984.
- KUKRETY, S., DWIVEDI, P., JOSE, S. & ALAVALAPATI, J. R. (2013): Stakeholders' perceptions on developing sustainable Red Sanders (*Pterocarpus santalinus* L.) wood trade in Andhra Pradesh, India. In: *Forest Policy and Economics*, 26, S. 43–53.
- KULKE, E. (2004): Wirtschaftsgeographie. Paderborn, München, Wien, Zürich: Schöningh (UTB für Wissenschaft 2434).
- LABASCH, M. (2007): Prognose der Vegetationsentwicklung mit Markov-Ketten. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen. Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement.
- LAMBIN, E., ROUNSEVELL, M. & GEIST, H. (2000): Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1-3), S. 321–331.
- LAMBIN, E. F. & MEYFROIDT, P. (2011): Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(9), S. 3465–3472.
- LAMBIN, E. F., TURNER, B., GEIST, H. J., AGBOLA, S. B., ANGELSEN, A., BRUCE, J. W., COOMES, O. T., DIRZO, R., FISCHER, G., FOLKE, C., GEORGE, P., HOMEWOOD, K., IMBERNON, J., LEEMANS, R., LI, X., MORAN, E. F., MORTIMORE, M., RAMAKRISHNAN, P., RICHARDS, J. F., SKÅNES, H., STEFFEN, W., STONE, G. D., SVEDIN, U., VELDKAMP, T. A., VOGEL, C. & XU, J. (2001): The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. In: *Global Environmental Change*, 11(4), S. 261–269.
- LANGAR, F. (2007): Ausweisung und Ansprache von Waldlebensraumtypen mit Hilfe von Fernerkundung und GIS. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg. Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften.
- LEHMANN, I., WEBER, R. & ZIMMERMANN, H.-J. (1992): Fuzzy set theory. In: *OR Spektrum*, 14(1), S. 1–9.
- LESSCHEN, J. P., VERBURG, P. H. & STAAL, S. J. (2005): Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. Nairobi (Kenia): ILRI (LUCC Report Series Nr. 7).
- LI, W. & ZHANG, C. (2011): A Markov Chain Geostatistical Framework for Land-Cover Classification With Uncertainty Assessment Based on Expert-Interpreted Pixels From Remotely Sensed Imagery. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(8), S. 2983–2992.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. & CHIPMAN, J. W. (2008): Remote sensing and image interpretation. 6. Auflage. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- LIN, Y.-P., CHU, H.-J., WU, C.-F. & VERBURG, P. H. (2011): Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling – a case study. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 25(1), S. 65–87.

- LIU, H. & JEZEK, K. C. (2004): Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods. In: *International Journal of Remote Sensing*, 25(5), S. 937–958.
- LIU, Z., GONG, P., SHI, P., CHEN, H., ZHU, L. & SASAGAWA, T. (2010): Automated building change detection using UltraCamD images and existing CAD data. In: *International Journal of Remote Sensing*, 31(6), S. 1505–1517.
- LOIDI, J., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F. & PALMER, M. (2012): Potential natural vegetation: reburying or reborning? In: *Journal of Vegetation Science*, 23(3), S. 596–604.
- LOONEN, W., KOOMEN, E. & KUIJPERS-LINDE, M. (2007): Calibrating and validating the Land Use Scanner algorithms. In: 15th European colloquium on theoretical and quantitative geography. Proceedings: 7-11 September 2007, City of Montreux, Switzerland. European Colloquium on theoretical and quantitative geography. Lausanne: Institute of Geography-Univ. of Lausanne.
- LOOSVELT, L., PETERS, J., SKRIVER, H., LIEVENS, H., VAN COILLIE, F. M., BAETS, B. DE & VERHOEST, N. E. (2012): Random Forests as a tool for estimating uncertainty at pixel-level in SAR image classification. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, S. 173–184.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, E. & MORAN, E. (2004): Change detection techniques. In: *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), S. 2365–2401.
- MAEDA, E. E., FORMAGGIO, A. R., SHIMABUKURO, Y. E., ARCOVERDE, G. F. B. & HANSEN, M. C. (2009): Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(4), S. 265–272.
- MAIRS, K. A. (2007): Islands and human impact: Under what circumstances do people put unsustainable demands on island environments? Evidence from the North Atlantic. Dissertation. University of Edinburgh. School of Geosciences.
- MARÇAL, A. R. S., BORGES, J. S., GOMES, J. A. & PINTO DA COSTA, J. F. (2005): Land cover update by supervised classification of segmented ASTER images. In: *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), S. 1347–1362.
- MARTÍN, J. L., BETHENCOURT, J. & CUEVAS-AGULLÓ, E. (2012): Assessment of global warming on the island of Tenerife, Canary Islands (Spain). Trends in minimum, maximum and mean temperatures since 1944. In: *Climatic Change*, 114(2), S. 343–355.
- MAS, J. (2004): Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. In: *Environmental Modelling & Software*, 19(5), S. 461–471.
- MATZNETTER, J. (1958): Die Kanarischen Inseln. Wirtschaftsgeschichte und Agrarentwicklung. Gotha: VEB Hermann Haack.
- MEYER, M. (2000): Entwicklung und Modellierung von Planungsszenarien für die Landnutzung im Gebiet der Bornhöveder Seenkette. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität Kiel. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- MOUNTRAKIS, G., IM, J. & OGOLE, C. (2011): Support vector machines in remote sensing: A review. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), S. 247–259.
- MUELLER, M., SEGL, K. & KAUFMANN, H. (2004): Edge- and region-based segmentation technique for the extraction of large, man-made objects in high-resolution satellite imagery. In: *Pattern Recognition*, 37(8), S. 1619–1628.

- MULARZ, S., DRZEWIECKI, W. & PIROWSKI, T. (2000): Merging Landsat TM Images and airborne photographs for monitoring of open-cast mine area. Online verfügbar unter http://home.agh.edu.pl/~zfiit/publikacje_pliki/Mularz_Drzewiecki_Pirowski_2000a.pdf, zuletzt geprüft am 01.03-2013.
- MÜLLER, R., SCHIERHORN, F., ROHDE, S. & GEROLD, G. (2011): Modellierung von Landnutzungsänderungen und Entwaldung am Beispiel des bolivianischen Tieflands. In: *Innsbrucker Geographische Studien*, 38, S. 27–41.
- NAUMANN, S. (2008): Modellierung der Siedlungsentwicklung auf Tenerife (Kanarische Inseln). Eine fernerkundungsgestützte Analyse zur Bewertung des touristisch induzierten Landnutzungswandels. Heidelberg: Geographisches Institut (Heidelberger Geographische Arbeiten 125).
- NAUMANN, S. & SIEGMUND, A. (2008): Modellierung der Siedlungsentwicklung auf Teneriffa auf Basis von multikriteriellen Entscheidungsverfahren und Zellulären Automaten. In: *Salzburger Geographische Arbeiten*, 43, S. 41–58.
- NEUBERT, M. (2005): Bewertung, Verarbeitung und segmentbasierte Auswertung sehr hoch auflösender Satellitenbilddaten vor dem Hintergrund landschaftsplanerischer und landschaftsökologischer Anwendungen. Dissertation. Technische Universität Dresden. Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften.
- NEUBERT, M. & MEINEL, G. (2005): Atmosphärische und topographische Korrektur von IKONOS-Daten mit ACTOR. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hg.): *Angewandte Geoinformatik 2005. Beiträge zum 17. AGIT-Symposium*, Salzburg. Heidelberg: Wichmann, S. 503–512.
- O'DONNELL, M. S. & IGNIZIO, D. A. (2012): Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States (U.S. Geological Survey Data Series 691).
- OCZIPKA, M. E. (2007): Objektbasierte Klassifizierung hochauflösender Daten in urbanen Räumen unter besonderer Berücksichtigung von Oberflächenmodellen. Dissertation. Freie Universität Berlin. Fachbereich Geowissenschaften.
- OEHMICHEN, G. (2004): Auf Satellitendaten basierende Ableitungen von Parametern zur Beschreibung terrestrischer Ökosysteme. Methodische Untersuchungen zur Ableitung des Blattflächenindex aus Fernerkundungsdaten. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme.
- OREKAN, V. (2007): Implementation of the local land-use and land-cover change model CLUE-s for Central Benin by using socio-economic and remote sensing data. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- OTTO, R. (2003): Räumliche und zeitliche Variabilität des Sukkulantenbuschs auf Tenerife und ihre ökologische Interpretation. Dissertation. Universität Zürich, Schweiz. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- OTTO, R., KRÜSI, B. & KIENAST, F. (2007): Degradation of an arid coastal landscape in relation to land use changes in Southern Tenerife (Canary Islands). In: *Journal of Arid Environments*, 70(3), S. 527–539.
- OVERMARS, K., KONING, G. DE & VELDKAMP, A. (2003): Spatial autocorrelation in multi-scale land use models. In: *Ecological Modelling*, 164(2-3), S. 257–270.

- PAEGELOW, M. & CAMACHO-OLMEDO, M. T. (2008): Advances in geomatic simulation for environmental dynamics. In: PAEGELOW, M. & CAMACHO-OLMEDO, M. T. (Hg.): Modelling environmental dynamics. Advances in geomatic solutions. Berlin, London: Springer (Environmental science and engineering, Environmental science), S. 3–54.
- PANEQUE-GÁLVEZ, J., MAS, J.-F., MORÉ, G., CRISTÓBAL, J., ORTA-MARTÍNEZ, M., LUZ, A. C., GUÈZE, M., MACÍA, M. J. & REYES-GARCÍA, V. (2013): Enhanced land use/cover classification of heterogeneous tropical landscapes using support vector machines and textural homogeneity. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, S. 372–383.
- PARCERISAS, L., MARULL, J., PINO, J., TELLO, E., COLL, F. & BASNOU, C. (2012): Land use changes, landscape ecology and their socioeconomic driving forces in the Spanish Mediterranean coast (El Maresme County, 1850–2005). In: *Environmental Science & Policy*, 23, S. 120–132.
- PARKER, D. C., MANSON, S. M., JANSSEN, M. A., HOFFMANN, M. J. & DEADMAN, P. (2003): Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. In: *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2), S. 314–337.
- PEÑA-BARRAGÁN, J. M., NGUGI, M. K., PLANT, R. E. & SIX, J. (2011): Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. In: *Remote Sensing of Environment*, 115(6), S. 1301–1316.
- PETERS, J., DE BAETS, B., VAN DONINCK, J., CALVETE, C., LUCIENTES, J., DE CLERCQ, E., DUCHEYNE, E. & VERHOEST, N. (2011): Absence reduction in entomological surveillance data to improve niche-based distribution models for *Culicoides imicola*. In: *Preventive Veterinary Medicine*, 100(1), S. 15–28.
- PIJANOWSKI, B. C., ALEXANDRIDIS, K. & MULLIERE, D. (2006): Modelling urbanization patterns in two diverse regions of the world. In: *Journal of Land Use Science*, 1(2-4), S. 83–108.
- PIJANOWSKI, B. C., PITHADIA, S., SHELLITO, B. A. & ALEXANDRIDIS, K. (2005): Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), S. 197–215.
- PINTO, N. N. & ANTUNES, A. P. (2007): Cellular automata and urban studies: a literature survey. In: *ACE: architecture, city and environment*, 1(3).
- POHL, C. & VAN GENDEREN, J. L. (1998): Review article Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications. In: *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), S. 823–854.
- PONTIUS, R. G. & MALIZIA, N. R. (2004): Effect of Category Aggregation on Map Comparison. In: HUTCHINSON, D., KANADE, T., KITTLER, J., KLEINBERG, J. M., MATTERN, F., MITCHELL, J. C., NAOR, M., NIERSTRASZ, O., PANDU RANGAN, C., STEFFEN, B., SUDAN, M., TERZOPOULOS, D., TYGAR, D., VARDI, M. Y., WEIKUM, G., EGENHOFER, M. J., FREKSA, C. & MILLER, H. J. (Hg.): Geographic Information Science, Bd. 3234. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Computer Science), S. 251–268.
- PONTIUS JR., R. G. (2002): Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(10), S. 467–484.

- PONTIUS JR., R. G., BOERSMA, W., CASTELLA, J.-C., CLARKE, K., NIJS, T., DIETZEL, C., DUAN, Z., FOTSING, E., GOLDSTEIN, N., KOK, K., KOOMEN, E., LIPPITT, C. D., MCCONNELL, W., MOHD SOOD, A., PIJANOWSKI, B., PITHADIA, S., SWEENEY, S., TRUNG, T. N., VELDKAMP, A. T. & VERBURG, P. H. (2008): Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. In: *The Annals of Regional Science*, 42(1), S. 11–37.
- PONTIUS JR., R. G., HUFFAKER, D. & DENMAN, K. (2004): Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. In: *Ecological Modelling*, 179(4), S. 445–461.
- PONTIUS JR., R. G. & MALANSON, J. (2005): Comparison of the structure and accuracy of two land change models. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), S. 243–265.
- PONTIUS JR., R. G. & SCHNEIDER, L. C. (2001): Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), S. 239–248.
- PONTIUS JR., R. G. & SPENCER, J. (2005): Uncertainty in extrapolations of predictive land-change models. In: *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(2), S. 211–230.
- POTT, R., HÜPPE, J. & WILDPRET DE LA TORRE, W. (2003): Die Kanarischen Inseln. Natur- und Kulturlandschaften. Stuttgart: Ulmer.
- PRISHCHEPOV, A. V., MÜLLER, D., DUBININ, M., BAUMANN, M. & RADELOFF, V. C. (2013): Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia. In: *Land Use Policy*, 30(1), S. 873–884.
- QI, J., CHEBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR, Y. H. & SOROOSHIAN, S. (1994): A modified soil adjusted vegetation index. In: *Remote Sensing of Environment*, 48(2), S. 119–126.
- RAHMANI, S., STRAIT, M., MERKURJEV, D., MOELLER, M. & WITTMAN, T. (2010): An Adaptive IHS Pan-Sharpener Method. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(4), S. 746–750.
- RALHA, C. G., ABREU, C. G., COELHO, C. G., ZAGHETTO, A., MACCHIAVELLO, B. & MACHADO, R. B. (2013): A multi-agent model system for land-use change simulation. In: *Environmental Modelling & Software*, 42, S. 30–46.
- RENWICK, A., JANSSON, T., VERBURG, P. H., REVOREDO-GIHA, C., BRITZ, W., GOCHT, A. & MCCRACKEN, D. (2013): Policy reform and agricultural land abandonment in the EU. In: *Land Use Policy*, 30(1), S. 446–457.
- REY BENAYAS, J. (2007): Abandonment of agricultural land: an overview of drivers and consequences. In: *CAB Reviews*, 2(57).
- RITTER, M., MÖLLER, M. & SCHELLMANN, G. (2012): Objektbasierte Klassifikation landwirtschaftlicher Nutzflächen. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hg.): *Angewandte Geoinformatik 2012. Beiträge zum 24. AGIT-Symposium Salzburg*. Berlin, Offenbach: Wichmann, S. 72–77.
- RIVAS MARTÍNEZ, S., DÍAZ GONZÁLEZ, T., FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, F., IZCO SEVILLANO, J., LOIDI ARREGUI, J., FERNANDES LOUSÃ, M. & PENAS MERINO, A. (2002): Vascular plant communities of Spain and Portugal: addenda to the syntaxonomical checklist of 2001. (*Itinera geobotanica* 15).
- RIVAS MARTÍNEZ, S., WILDPRET DE LA TORRE, W., DÍAZ GONZÁLEZ, T., PÉREZ DE PAZ, P. L., DEL ARCO AGUILAR, M. J. & RODRÍGUEZ DELGADO, O. (1993): Excursion guide. Outline vegetation of Tenerife Island (Canary Islands). In: *Itinera geobotanica*, 7, S. 5–167.

- ROBINSON, J. & SAUCO, V. G. (2010): Bananas and plantains. Crop production science in horticulture. 2. Auflage. Wallingford: CABI Publishing.
- ROCK, B. N., WILLIAMS, D. L. & VOGELMANN, J. E. (1985): Field and airborne spectral characterization of suspected acid deposition damage in red spruce (*Picea rubens*) from Vermont. In: Machine processing of remotely sensed data - Quantifying global process: Models, sensor systems, and analytical methods; Proceedings of the Eleventh International Symposium, West Lafayette, Indiana, USA, S. 71–81.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M. & BARET, F. (1996): Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. In: *Remote Sensing of Environment*, 55, S. 95–107.
- ROTHER, P. (1996): Kanarische Inseln. Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife, Gomera, La Palma, Hierro. 2. völlig neubearbeitete. Auflage. Berlin: Borntraeger (Sammlung geologischer Führer Bd. 81).
- ROUNSEVELL, M. D. A., EWERT, F., REGINSTER, I., LEEMANS, R. & CARTER, T. R. (2005): Future scenarios of European agricultural land use. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107(2-3), S. 117–135, zuletzt geprüft am 22.04.2013.
- ROUSE, J., HAAS, R., SHELL, J. & DEERING, D. (1974): Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS-1. In: *3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, 1, S. 309–317.
- RUPELLAND, D., TRIBOTTE, A., PUECH, C. & DIEULIN, C. (2011): Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. In: *International Journal of Remote Sensing*, 32(6), S. 1747–1777.
- RYDBERG, A. & BORGEFORS, G. (2001): Integrated method for boundary delineation of agricultural fields in multispectral satellite images. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11), S. 2514–2520.
- RYKIEL JR, E. (1996): Testing ecological models: the meaning of validation. In: *Ecological Modelling*, 90, S. 229–244.
- SALBERG, A.-B. (2011): Land Cover Classification of Cloud-Contaminated Multitemporal High-Resolution Images. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), S. 377–387.
- SANTÉ, I., GARCÍA, A. M., MIRANDA, D. & CRECENTE, R. (2010): Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. In: *Landscape and Urban Planning*, 96(2), S. 108–122.
- SAUTER, R., TEN BRINK, P., WITHANA, S., MAZZA, L., PONDICHIE, F., CLINTON, J., LOPES, A. & BEGO, K. (2013a): Impacts of climate change on all European islands. A report by the Institute for European Environmental Policy (IEEP) for the Greens/EFA of the European Parliament. Final Report. Institute for European Environmental Policy, Brüssel.
- SAUTER, R., TEN BRINK, P., WITHANA, S., MAZZA, L., PONDICHIE, F., CLINTON, J., LOPES, A. & BEGO, K. (2013b): Five case studies on the impacts of climate change on European islands. Annex II to the final report 'Impacts of climate change on all European islands' by the Institute for European Environmental Policy (IEEP) for the Greens/EFA of the European Parliament. Draft Final Report. Institute for European Environmental Policy, Brüssel.
- SCHEIDEGGER, A. E. (2002): Morphometric analysis and its relation to tectonics in Macaronesia. In: *Geomorphology*, 46(1-2), S. 95–115.

- SCHMIDT, H. (1997): Pflanzen auf Teneriffa. Ein naturkundlicher Führer. 2., überarb. und erw. Auflage. Marburg an Der Lahn: Basilisken-Press.
- SCHMITZ, A. (2005): Eignung berührungsloser Messverfahren zur Erkennung des Befalls von Zuckerrüben durch *Heterodera schachtii* (Schmidt) und Möglichkeiten der teilflächenspezifischen integrierten Bekämpfung. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Hohe Landwirtschaftliche Fakultät.
- SCHÖNFELDER, P. & SCHÖNFELDER, I. (1997): Die Kosmos-Kanarenflora. Über 850 Arten der Kanarenflora und 48 tropische Ziergehölze. Stuttgart: Franckh-Kosmos (Kosmos-Naturführer).
- SCHREINEMACHERS, P. & BERGER, T. (2011): An agent-based simulation model of human–environment interactions in agricultural systems. In: *Environmental Modelling & Software*, 26(7), S. 845–859.
- SCHROJENSTEIN LANTMAN, J., VERBURG, P. H., BREGT, A. & GEERTMAN, S. (2011): Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review. In: KOOMEN, E. & BORSBOOM-VAN BEURDEN, J. (Hg.): *Land-Use Modelling in Planning Practice*, Bd. 101. Dordrecht: Springer Netherlands (101), S. 35–57.
- SERRADA, R., GIL-MUÑOZ, P. & DÍAZ, S. (2013): Mejoras selvícolas a aplicar en el Monteverde de la isla de Tenerife. In: *Sociedad Espanola de Ciencias Forestales (Hg.): 6° Congreso Forestal Espanol*. Vitoria-Gasteiz.
- SIDDIQUI, Y. (2003): The Modified IHS Method for Fusing Satellite Imagery. ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings, Alaska, USA.
- SIEGMUND, A. & NAUMANN, S. (2001): Der Einsatz satellitenbildgestützter Klassifikationsverfahren zur Analyse von Landnutzungsstrukturen auf Teneriffa. In: *Geoöko*, 22(2-3), S. 103–116.
- SINGH, A. (1989): Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. In: *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), S. 989–1003.
- SINHA, P. & KUMAR, L. (2013): Independent two-step thresholding of binary images in inter-annual land cover change/no-change identification. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 81, S. 31–43.
- SIVANPILLAI, R. & MILLER, S. N. (2008): Benefits of pan-sharpened Landsat imagery for mapping small waterbodies in the Powder River Basin, Wyoming, USA. In: *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 13(1), S. 69–76.
- SOIL SURVEY STAFF (1999): Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2. Auflage (Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture Handbook).
- SOMODI, I., MOLNÁR, Z., EWALD, J. & PALMER, M. (2012): Towards a more transparent use of the potential natural vegetation concept - an answer to Chiarucci et al. In: *Journal of Vegetation Science*, 23(3), S. 590–595.
- STIENE, S. (2006): Konturbasierte Objekterkennung aus Tiefenbildern eines 3D-Laserscanners. Masterarbeit. Universität Osnabrück. Fachbereich Informatik.
- STUMPF, A. & KERLE, N. (2011): Combining Random Forests and object-oriented analysis for landslide mapping from very high resolution imagery. In: *Procedia Environmental Sciences*, 3, S. 123–129.

- SYMEONAKIS, E., CACCETTA, P., KOUKOULAS, S., FURBY, S. & KARATHANASIS, N. (2012): Multi-temporal land-cover classification and change analysis with conditional probability networks: the case of Lesbos Island (Greece). In: *International Journal of Remote Sensing*, 33(13), S. 4075–4093.
- SZUSTER, B. W., CHEN, Q. & BORGER, M. (2011): A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. In: *Applied Geography*, 31(2), S. 525–532.
- THINH, N. X. (2002): Simulation von kompakten städtischen Siedlungsmustern mit einem zellulären Mehrebenen-Automatenmodell. In: TAVANGARIAN, D. & GRÜTZNER, R. (Hg.): 16. Symposium Simulationstechnik. ASIM 2002, Rostock, 10.09. bis 13.09.2002; Tagungsband. Erlangen [u.a.]: SCS-Europe BVBA (Fortschritte der Simulationstechnik 12), S. 38–45.
- TIWARI, P. S. (2009): Potential of IRS P-6 LISS IV for agriculture field boundary delineation. In: *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), S. 33528.
- TOBLER, W. R. (1979): Cellular Geography. In: GALE, S. & OLSSON, G. (Hg.): *Philosophy in geography*. Dordrecht, Boston: D. Reidel Pub. Co. (Theory and decision library 20), S. 379–386.
- TURKER, M. & KOK, E. H. (2013): Field-based sub-boundary extraction from remote sensing imagery using perceptual grouping. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, S. 106–121.
- TURNER II, B. L., LAMBIN, E. & REENBERG, A. (2008): The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), S. 20666–20671.
- TURNER II, B. L., ROSS, R. H. & SKOLE, D. L. (1994): Relating land use and global land cover change. The Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm (IGDP Report 24, HDP Report 5).
- TURNER II, B. L., SKOLE, D. L., SANDERSON, S., FISCHER, G., FRESCO, L. & LEEMANS, R. (1995): Land-use and land-cover change: science/research plan. The Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm (IGBP Report 35, HDP Report 7).
- VELDKAMP, A. & FRESCO, L. (1996): CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects. In: *Ecological Modelling*, 85(2-3), S. 253–270.
- VELDKAMP, A. & LAMBIN, E. (2001): Predicting land-use change. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), S. 1–6.
- VERBURG, P. H. (2010): The CLUE Modelling Framework. Course material. University of Amsterdam, Institute for Environmental Studies IVM. Online verfügbar unter http://www.ivm.vu.nl/en/Images/Exercises_tcm53-284019.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2012.
- VERBURG, P. H., NIJS, T. C. DE, VAN RITSEMA ECK, J., VISSER, H. & JONG, K. DE (2004a): A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. In: *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(6), S. 667–690.
- VERBURG, P. H. & OVERMARS, K. P. (2009): Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. In: *Landscape Ecology*, 24(9), S. 1167–1181.
- VERBURG, P. H., OVERMARS, K. P., HUIGEN, M. G., GROOT, W. T. DE & VELDKAMP, A. (2006): Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. In: *Applied Geography*, 26(2), S. 153–173.

- VERBURG, P. H., SCHOT, P. P., DIJST, M. J. & VELDKAMP, A. (2004b): Land use change modelling: current practice and research priorities. In: *GeoJournal*, 61, S. 309–324.
- VERBURG, P. H., SOEPBOER, W., VELDKAMP, A., LIMPIADA, R., ESPALDON, V. & MASTURA, S. S. (2002): Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model. In: *Environmental Management*, 30(3), S. 391–405.
- VERBURG, P. H., VAN DE STEEG, J. & SCHULP, N. (2005): Manual for the CLUE-Kenya application. Online verfügbar unter http://www.trajectories.org/download/CLUE_manual.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2012.
- VERBURG, P. H., VAN ECK, J. R. R., NIJS, T. C. M. D., DIJST, M. J. & SCHOT, P. (2004c): Determinants of land-use change patterns in the Netherlands. In: *Environ. Plann. B*, 31(1), S. 125–150.
- VISSER, H. & DE NILS, T. (2006): The Map Comparison Kit. In: *Environmental Modeling & Software*, 21, S. 346–358.
- VON DER LIPPE, P. (1993): Deskriptive Statistik. Stuttgart, Jena: G. Fischer (UTB für Wissenschaft 1632: Wirtschaftswissenschaften).
- VON THÜNEN, J. H. (1886): Der isolirte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie oder Untersuchungen über den Einfluss den die Getreidepreise, der Reichthum des Bodens und die Abgaben auf den Ackerbau ausüben. Auflage von 1826. Düsseldorf, Darmstadt: Verlag Wirtschaft u. Finanzen (Klassiker der Nationalökonomie).
- WAGNER, P. & WEGENER, M. (2007): Urban Land Use, Transport and Environment Models. In: *disP - The Planning Review*, 43(170), S. 45–56.
- WALKER, R. (2004): Theorizing Land-Cover and Land-Use Change: The Case of Tropical Deforestation. In: *International Regional Science Review*, 27(3), S. 247–270.
- WASKE, B. & BRAUN, M. (2009): Classifier ensembles for land cover mapping using multitemporal SAR imagery. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(5), S. 450–457.
- WASSENAAR, T., GERBER, P., VERBURG, P., ROSALES, M., IBRAHIM, M. & STEINFELD, H. (2007): Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. In: *Global Environmental Change*, 17(1), S. 86–104.
- WEAR, D. N. & BOLSTAD, P. (1998): Land-Use Changes in Southern Appalachian Landscapes: Spatial Analysis and Forecast Evaluation. In: *Ecosystems*, 1, S. 575–594.
- WEICHEL, H., ROSSO, P., MARX, A., REIGBER, S., DOUGLASS, K. & HEYNEN, M. : White Paper: The RapidEye Red Edge Band. RAPIDEYE AG. Online verfügbar unter http://www.rapideye.com/upload/Red_Edge_White_Paper.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2013.
- WILLEMEN, L., VELDKAMP, A., VERBURG, P., HEIN, L. & LEEMANS, R. (2012): A multi-scale modelling approach for analysing landscape service dynamics. In: *Journal of Environmental Management*, 100, S. 86–95.
- WOLF, N. (2013): Object Features for Pixel-based Classification of Urban Areas Comparing Different Machine Learning Algorithms. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG*, 2013(3), S. 149–161.
- WU, S., SILVÁNHYPHEN, J., CÁRDENAS, J. & WANG, L. (2007): Per-field urban land use classification based on tax parcel boundaries. In: *International Journal of Remote Sensing*, 28(12), S. 2777–2801.

- ZHENG, X.-Q., ZHAO, L., XIANG, W.-N., LI, N., LV, L.-N. & YANG, X. (2012): A coupled model for simulating spatio-temporal dynamics of land-use change: A case study in Changqing, Jinan, China. In: *Landscape and Urban Planning*, 106(1), S. 51–61.
- ZHU, G. & BLUMBERG, D. G. (2002): Classification using ASTER data and SVM algorithms;. In: *Remote Sensing of Environment*, 80(2), S. 233–240.
- ZHU, Z., LIU, L., CHEN, Z., ZHANG, J. & VERBURG, P. H. (2010): Land-use change simulation and assessment of driving factors in the loess hilly region—a case study as Pengyang County. In: *Environmental Monitoring and Assessment*, 164(1-4), S. 133–142.
- ZOU, K. H., O'MALLEY, A. J. & MAURI, L. (2007): Receiver-Operating Characteristic Analysis for Evaluating Diagnostic Tests and Predictive Models. In: *Circulation*, 115(5), S. 654–657.