Hildesheimer Geographische Studien Bd. 2	2013	S. 1 – 33

Entwicklung einer Geodatenbank mittels GIS und Erdas Imagine für den Nationalpark Asinara (Sardinien)

Robin Stadtmann, Christine Jung-Dahlke & Martin Sauerwein

Zusammenfassung

Das Ziel dieses Beitrags besteht in der Gewinnung von Landnutzungsinformationen für die Insel Asinara mittels GIS und Methoden der Fernerkundung sowie der Zusammenführung dieser Informationen in einer Geodatenbank. Zuerst werden verfügbare Geodaten für das Untersuchungsgebiet zusammengetragen. Anschließend werden Informationen über die historische Landnutzung mittels Satelliten- und Luftbilder gewonnen. Anhand von Orthofotos wird in einer multitemporalen Analyse die jüngere Landnutzungsentwicklung der Insel rekonstruiert. Neben einer visuellen Interpretation wird eine Change Detection mit Landsat-Aufnahmen zwischen 1972 und 2003 eingesetzt. In einem dritten Schritt wird in einem kleinen Teilgebiet des Nationalparks eine überwachte Klassifikation der Landbedeckung eines Quickbird-Satellitenbildes durchgeführt.

Das Ergebnis ist die Visualisierung der raum-zeitlichen Veränderung der Landnutzung auf der Insel für den durch Daten abgedeckten Zeitraum. Für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts wird eine deutliche Intensivierung der Landnutzung identifiziert. Der Test der Klassifikationsmethodik zeigt, dass deren Umsetzung für die gesamte Insel eine sinnvolle Option zur flächendeckenden Ausweisung von Vegetationseinheiten darstellt. Abschließend wird eine Bewertung der verwendeten Daten und Methoden vorgenommen.

Schlüsselwörter: Fernerkundung, GIS, Landnutzungswandel, Change Detection, überwachte Klassifikation, Nationalpark Asinara (Sardinien)

Summary

The aim of this paper is to gain land use information about the island Asinara using GIS and remote sensing techniques and to merge this information in a geodatabase. In a first step, available geodata is collected. Afterwards information about the historical land use is acquired by using satellite and aerial photos of the research area. In a multitemporal analysis the younger development of the land use is worked out. In addition to a visual interpretation a change detection with Landsat satellite images of the period from 1972 to 2003 is realized. In a third step we implement a supervised classification for a small subarea, based on a Quickbird satellite image.

The result is the visualization of the spatio-temporal land use change on the island for the examined time. For the second half of the 20th century an intensification of land use is revealed. The test of classification methodology shows that an implementation for the whole island is a useful option to classify the vegetation of the island. Finally, an assessment of the used methods and data is made.

Key words: remote sensing, GIS, land use change, change detection, supervised classification, National Park Asinara (Sardinia)

1 Einführung

Übergeordnetes Ziel ist es, durch die Kombination eines Geographischen Informationssystems mit Methoden der Fernerkundung, eine Geodatenbank für den Nationalpark Asinara zu entwickeln. Es sollen sowohl quantitative als auch qualitative Informationen für Asinara zusammengeführt und in Form eines Geographischen Informationssystems bereitgestellt werden. **Teilziel 1** ist es somit, herauszufinden, **welche Datengrundlagen für das Untersuchungsgebiet** (frei) **verfügbar sind**. Daran anschließend sind die **Schwächen und Stärken der jeweiligen Daten und Methoden** zu diskutieren und zu bewerten.

Als weitere konkretisierte **Teilziele** lassen sich ableiten:

1. Die Änderung der Landnutzung auf der Insel soll für einen möglichst weit zurückreichenden Zeitraum ermittelt werden, um die jüngere Entwicklung des Ökosystems nachvollziehen zu können.
2. Um die wichtige Rolle des Reliefs berücksichtigen zu können, muss ein möglichst genaues Digitales Geländemodell (DGM) erstellt und ausgewertet werden. Auch weitere thematische Daten, wie z.B. eine Geologische Karte, sollen eingearbeitet werden.
3. Für eine Visualisierung der Vielfalt Asinaras ist die Ausweisung unterschiedlicher Biotoptypen notwendig. Aus diesem Grund soll exemplarisch eine auf Fernerkundungsdaten basierende digitale Klassifizierung durchgeführt werden.

Abbildung 1 veranschaulicht die Verknüpfung der genannten Teilziele. Da zum einen Informationen für die gesamte Insel, zum anderen aber auch für Teilgebiete der Insel bereitgestellt werden sollen, werden zwei Maßstabsebenen verwendet. Während Teilziel 2 und 3 eindeutig je einer Maßstabsebene zugewiesen werden, bildet das DGM eine Zwischenebene, welche für die Interpretation der Ergebnisse beider Ebenen wichtig ist. Das Teilziel 3 wird exemplarisch für einen ausgewählten Teilraum der Insel durchgeführt.

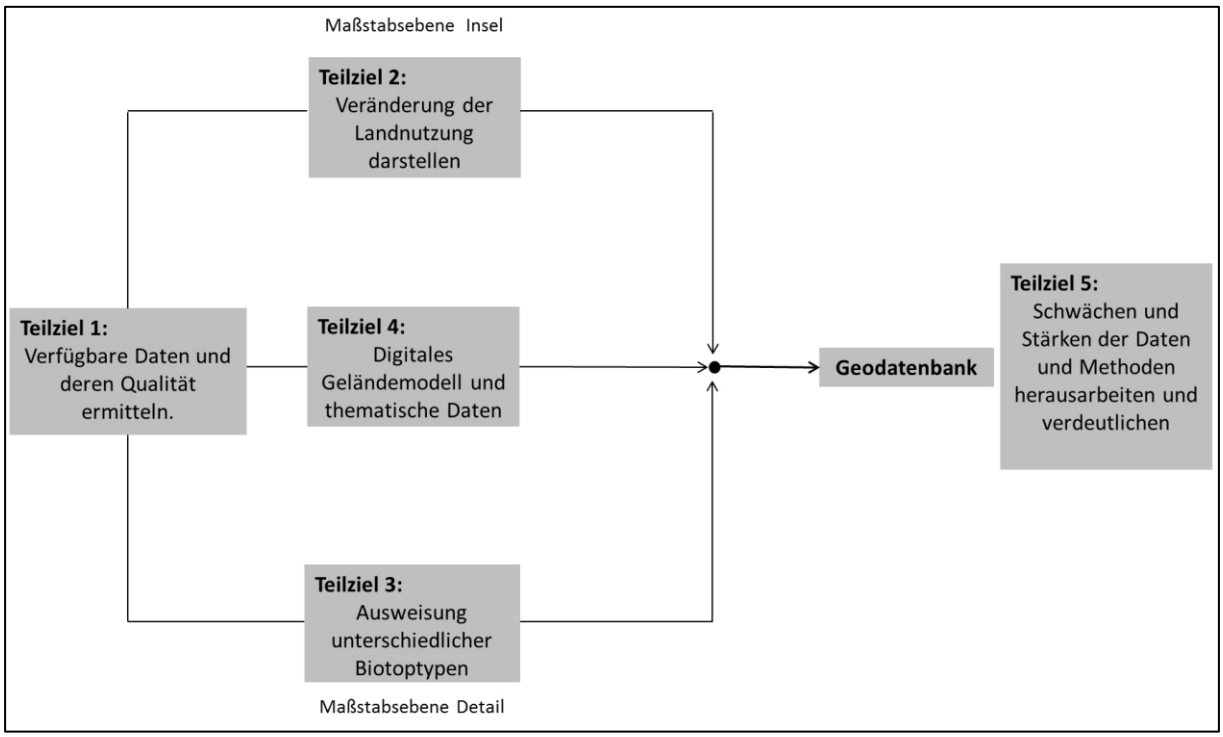

Abb. 1: Überblick zur Verknüpfung der Teilziele.

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Lage und Einordnung

Die Insel Asinara liegt vor der Küste der nordwestlichen Spitze Sardiniens und zählt zu der Provinz Sassari. Die nächst gelegene größere Stadt ist Porto Torres. Seit 1999 ist auf der 51,9 km² großen Insel der Parco Nazionale dell´ Asinara (Nationalpark Asinara) ausgewiesen (UNESCO 2006). Im Jahr 1991 fand bereits die Unterschutzstellung von 107 km² des umgebenden marinen Ökosystems statt (PULINA & MELEDDU 2012:49). Die Nord-Süd-Ausdehnung der Insel beträgt 17,4 km, während die Breite stark zwischen 290 m und 6,4 km variiert (UNESCO 2006, vgl. Abb. 2).

Bis zu der Ausweisung des Nationalparks wurde Asinara seit 1885 als Gefängnisinsel genutzt, auf der im ersten Weltkrieg österreichische und ungarische Kriegsgefangene sowie zuvor und anschließend auch andere Gefangene festgehalten wurden (PULINA & MELEDDU 2012:49). Die auf der Insel zu findenden Ortschaften bestehen folglich vor allem aus ehemaligen Gefängnisgebäuden. Verstreut über die Insel finden sich weiterhin mehrere Einzelgebäude oder kleine Gebäudeansammlungen (Abb. 2). Heute ist die Insel nicht mehr dauerhaft bewohnt (UNESCO 2006).

Das Untersuchungsgebiet weist ein bewegtes Relief auf, was durch mehrere Erhebungen deutlich wird. Die Höchste stellt der Punta d. Scomunica dar (408 m ü. NN), gefolgt von Pta. Maestra Serre (391 m) und Piano Mannu (318 m). Diese Erhebungen befinden sich alle im nördlichen Teil der Insel. Auch die anderen Inselteile weisen mit 241 m (Mittelteil) und 265 m (südlicher Teil) deutliche Erhebungen auf (vgl. Abb. 2). Ein dauerhaft ausgeprägtes Fließgewässer findet man auf Asinara nicht.

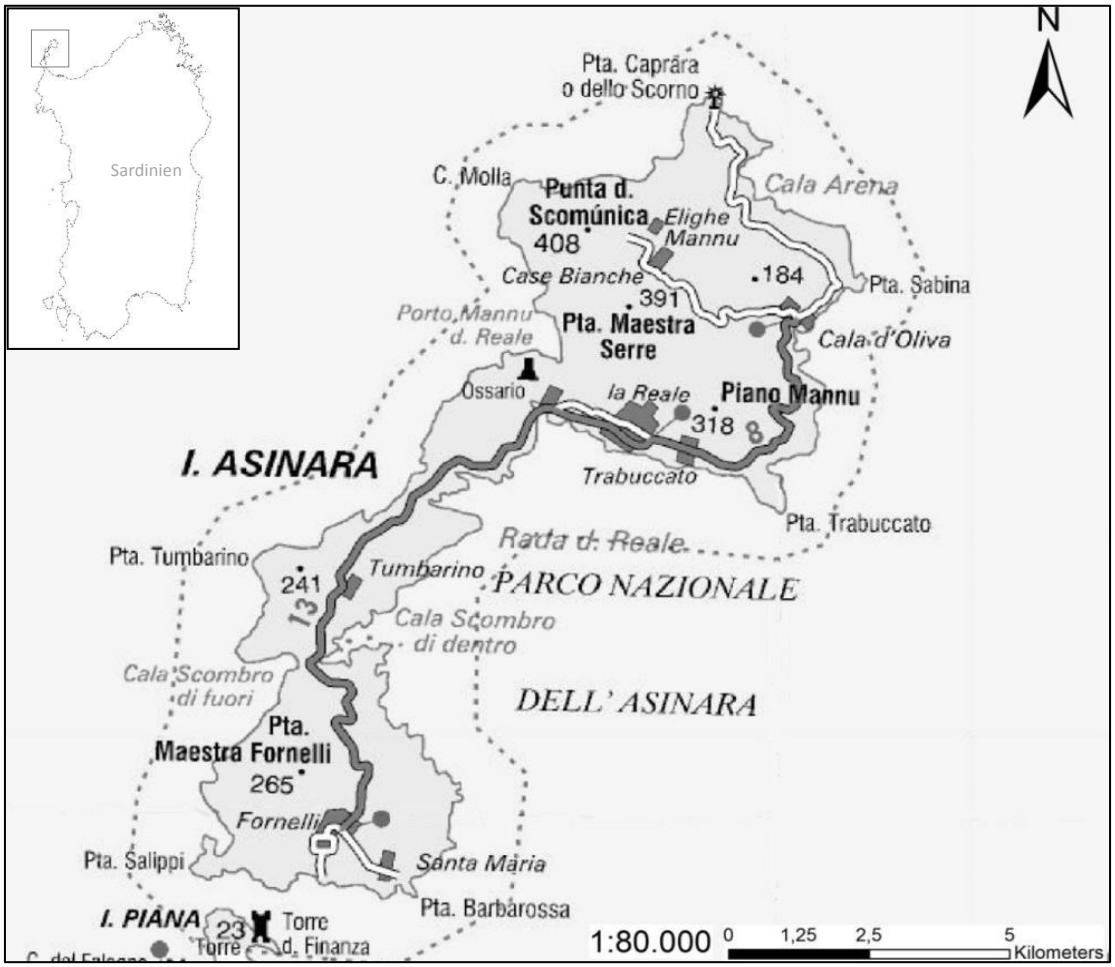

Abb. 2: Übersichtskarten der Inseln Sardinien und Asinara (nach GEOPORTALE NAZIONALE 2013a und 2013e).

2.2 Klima

Sardinien und Asinara sind ökozonal nach SCHULTZ (2008) eindeutig den **winterfeuchten Subtropen** zuzuordnen und weisen ein subtropisch-mediterranes Klima auf, was sich durch deutliche Unterschiede der Bedingungen in Sommer und Winter äußert. Das Sommerhalbjahr weist in diesem Übergangsbereich folglich hohe Temperaturmaxima und geringe Niederschlagsmengen auf, während das Winterhalbjahr durch hohe Niederschläge und kühlere, jedoch milde Temperaturen gekennzeichnet ist (WAGNER 2001:204f).

Die nordwestliche Küste Sardiniens ist als mediterran-semiarid (fünf bis sechs aride Monate) anzusehen (WAGNER 2001:216f). Eine Klimastation auf Asinara zeichnete zwischen 1961 und 1976 Werte auf, die im Mittel einen **Jahresniederschlag von 480 mm** zeigen. Die mittleren Niederschlagssummen der Monate Juli (1,8 mm) und August (3,7 mm) sind besonders gering (MINISTERO DELLA DIFESA 2013). Das Temperaturminimum wird im Februar verzeichnet bei einer mittleren minimalen Monatstemperatur von 8,5 °C. Die höchsten Temperaturen werden im August erreicht, wo der Mittelwert für die Maximaltemperatur bei 25,8 °C liegt. Auch heute erreicht der Jahresniederschlag laut PARCO NAZIONALE DELL' ASINARA (2012a) selten 500 mm, wodurch die Insel einer der trockensten Standorte Sardiniens ist. Auch der Temperaturgang wird mit einem Tiefstand der Monatsmitteltemperatur von 10 °C im Februar und 23 °C im August vergleichbar beschrieben.

2.3 Geologie

Etwa drei Viertel Sardiniens bestehen aus metamorphen Gesteinen oder Intrusivgesteinen des Paläozoikums (EXEL 1986:22). Während die Osthälfte der Insel sehr stark durch diese Gesteine geprägt ist, wird Westsardinien zu großen Teilen (Ausnahme v.a. Südwest-Sardinien) durch Sedimentgesteine aber auch durch Vulkanite des Tertiärs dominiert (EXEL 1986:22; SEUFFERT 1970:10f). Eine der Ausnahmen bildet die nordwestliche Spitze der Insel, wo ebenfalls hauptsächlich kristalline und metamorphe Gesteine zu finden sind und die damit den nordwestlichsten Punkt der sardischen Varisziden darstellt (IACOPINI et al. 2007:79). Zu diesem naturräumlich als „Nurra" bezeichneten Gebiet zählt auch die Insel Asinara.

Ein großer Intrusivgesteinsblock prägt den südlichen Teil Asinaras. Dabei handelt es sich um Granodiorit. Dieser ist auch noch im mittleren und nördlichen Teil Asinaras zu finden. Die südlichste Küste Asinaras hingegen ist vor allem durch Glimmerschiefer und Paragneis geprägt. In den Bereichen die periodischen Abfluss aufweisen finden sich außerdem Alluvionen. Im mittleren Teil der Insel sind vor allem Glimmerschiefer und Paragneis dominant. Die wirkenden Kräfte werden an den pegmatischen Gängen und Bänderungen sowie ebenfalls zu findenden metamorphen Fazies wie Amphibolit oder Quarzit deutlich. Der Übergang zwischen mittlerem und nördlichem Teil der Insel ist durch das nur knapp über dem Meeresspiegel liegende und ebene Relief gekennzeichnet. Dementsprechend finden sich hier Lockergesteine aus Pleistozän und Holozän. Marinen Ursprungs sind die Konglomerate und Sandsteine, die in diesem Bereich ausgewiesen sind. Der nördliche Teil der Insel ist noch stärker durch die Metamorphose geprägt, was an der Vielfalt der metamorphen Gesteine deutlich wird. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Intensität der Metamorphose nach Norden hin zunimmt (CAROSI et al. 2004:311).

2.4 Hydrologie und Gewässer

Das beschriebene Klima bildet die Rahmenbedingungen für die Hydrologie. ROTHER (1985:48) bezeichnet das Abflussregime, welches auch für das Untersuchungsgebiet anzunehmen ist, als **torrentiellen Abflusstyp**. Es ist als einfaches Regime durch einen eindeutigen Gipfel geprägt, der im Winterhalbjahr, im Falle Asinaras in November und Dezember, seinen Höhepunkt findet. Der Großteil der Fließgewässer weist also nur periodischen Abfluss auf (ROTHER 1985:47). Die häufig auftretenden

Starkniederschläge führen oftmals zu der Ausprägung des maximalen Wasserstandes, da bei diesen die Infiltrationskapazität des Bodens schnell überschritten wird und der Direktabfluss folglich ansteigt (ROTHER 1985:49). Abbildung 3 zeigt die temporären Fließgewässer Asinaras. Aufgrund des bewegten Reliefs und der Größe der Insel sind die Fließbahnen kurz. Ausgehend von dem von Nordwest nach Südost streichenden „Höhenzug" auf dem nördlichen Teil der Insel sowie den anderen höher gelegenen Bereichen wird jeweils in Richtung der Küste entwässert. Bei den Standgewässern handelt es sich um künstlich angelegte Stauseen oder Küstengewässer (REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013b).

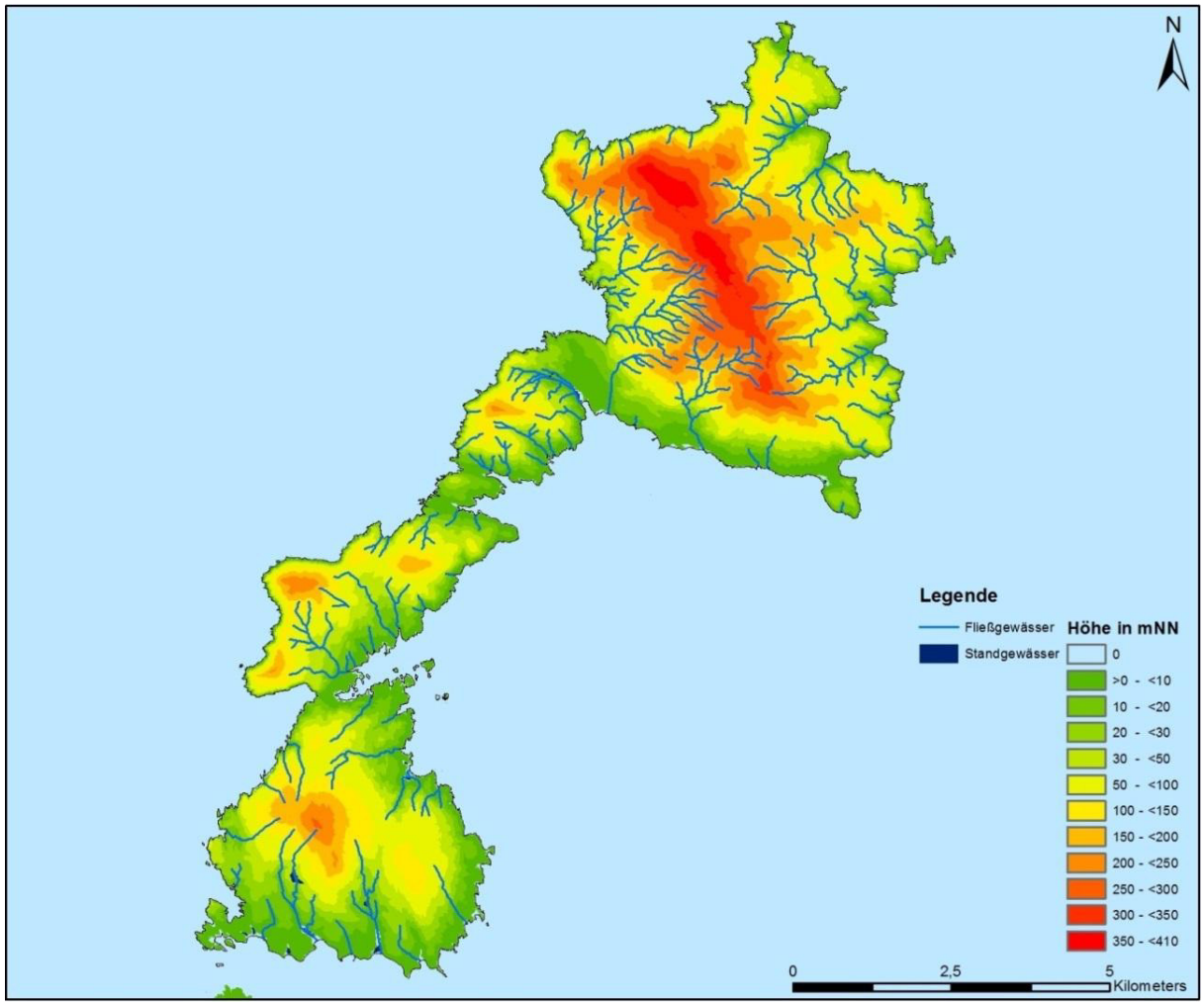

Abb. 3: Relief und Gewässer auf Asinara (Datengrundlage: REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013b und c).

2.5 Geomorphologie

Typische Eigenschaften des Mittelmeerraumes, wie eine hohe Taldichte und hohe Reliefenergie (JAHN 1997:3 und ROTHER 1985:54), lassen sich auch auf Asinara wiederfinden. Ausgehend von den höchsten Bereichen der Insel ziehen sich die Täler in Richtung Küste, welche aus steilen Abschnitten (Westküste) und flacheren Akkumulationsbereichen besteht (Abb. 3). Während des Pliozäns fand eine tektonische Hebung Sardiniens statt, welche die Erosionsbasis tiefer legte und auf der Insel für ausgeprägte Erosion sorgte (PUNGETTI et al. 2008:150). Im Quartär kam es zu eustatischen Meeresspiegelschwankungen, welche laut PUNGETTI et al. (2008:150) ± 120 m betrugen. Wie EXEL (1986:82) betont, fand dabei jedoch keine intensive Transgression Sardiniens statt, weshalb entsprechende Formen und Ablagerungen sich auf die flachsten Bereiche beschränken. Die in der geologischen Karte

ausgewiesenen Alluvionen in den eingeschnittenen Tälern verdeutlichen die fluviale Prägung des Reliefs. Die tektonischen Hebungsprozesse, die sich im Pliozän abspielten (PUNGETTI et al. 2008:150), könnten ein Grund dafür sein, warum zwar unterschiedliche Gesteinsresistenzen deutlich werden, es jedoch trotzdem in einigen Bereichen zu gesteinsübergreifenden Formen kommt. Glaziale oder periglaziale Formen sind aufgrund der fehlenden Vereisung im Quartär sowie der Höhenstufe Asinaras nicht anzutreffen (EXEL 1986:20 und vgl. HUGHES et al. 2006).

2.6 Böden

Die Entstehung von Böden ist abhängig von der Ausprägung verschiedener Bodenbildungsfaktoren, die als eine Bodenbildungsfunktion zusammengefasst werden können. Zu nennen sind Klima, Gestein, Relief, Tiere und Pflanzen, die Verfügbarkeit von Wasser und auch der Mensch, der durch seine Tätigkeit die Bodenbildung beeinflusst. Außerdem entscheidend ist die Zeit, über die diese Faktoren wirken (STAHR et al. 2012:13). Bei der Betrachtung der Bodenentwicklung im Mediterranraum sind mehrere Besonderheiten zu beachten. Nach YAALON (1995:159) zählt dazu das besondere Klima des Mediterranraumes mit dem starken Wechsel der Bedingungen im Jahresverlauf. Die weiteren Faktoren, die YAALON (1995:159) anführt, sind die Berge, Staubeintrag und der lange Nutzungseinfluss des Menschen. Ausgehend von den genannten Faktoren sind auf Asinara, für das bisher keine genaueren bodenkundlichen oder bodengeographischen Arbeiten bekannt sind, durch das diversifizierte Relief und die vielfältige Geologie vor allem substratgenetisch sehr unterschiedliche Böden zu erwarten. Die Einflüsse menschlicher Tätigkeit, welche im weiteren Verlauf thematisiert werden, sind als wichtige Steuerungsgrößen anzusehen. Neben der dadurch zu erwartenden Erosion findet Bodendegradation auch durch den, mit den Abtragsprozessen einhergehenden, Verlust von Nährstoffen und organischer Substanz statt, die sich in den Sedimenten anreichern (MARTÍNEZ-MENA et al. 2012:36f). Die in den Tiefenlinien vorhandenen Alluvialböden können einen hohen Nährstoffgehalt und eine hohe Wasserspeicherkapazität aufweisen. Neben den zu erwartenden Kolluvisolen sind, durch das Fehlen von Carbonatgestein, Bodentypen zu erwarten, die aus carbonatfreiem oder -armem Substrat hervorgehen (AD-HOC-AG BODEN 2005:200ff).

2.7 Flora und Fauna

Insbesondere die Flora des Mittelmeerraumes ist durch eine außerordentlich hohe Artenvielfalt und viele endemische Arten gekennzeichnet (SCHULTZ 2008:230). GREUTER (1995:6) betont, dass gerade die Inseln im Mediterranraum für diese Artenvielfalt von Bedeutung sind, da sich auf diesen unter dem Einfluss des Menschen vielfältige Lebensräume entwickelt haben. Auf Asinara wurden von BOCCHIERI (1988) ca. 700 Pflanzenarten dokumentiert (PARCO NAZIONALE DELL ASINARA 2012b). Über die exakte heutige Artenzusammensetzung und -verteilung liegen bisher keine Informationen vor. Dominant sind mit Macchie (hochwüchsige Hartlaub-Strauchformation) und Garrigue (niedrigwüchsige Zwergstrauchformation) typische Vegetationsformationen des Mittelmeerraums (SCHULTZ 2008:231f). Lediglich ein kleiner Bereich auf der Insel weist noch Waldvegetation auf (PARCO NAZIONALE DELL ASINARA 2012b). Auf Asinara lebt eine Vielzahl unterschiedlicher Weidetiere. Zum einen sind dies Pferde, Esel und Ziegen, welche vom Menschen auf die Insel gebracht wurden und dort verwilderten. Zum anderen finden sich natürlicherweise Mufflons auf der Insel (PARCO NAZIONALE DELL ASINARA 2012c). Es entwickelten sich also verschiedenartige Weidesysteme, über deren Ausprägung und Verbreitung bisher keine genaueren Informationen vorliegen. Allerdings ist die Gefahr gegeben, dass es zu einer Überweidung des Gebietes kommt, da die Tiere sich ohne natürliche Feinde stark vermehren. Neben den Weidetieren finden sich auch Wildschweine, Schildkröten und eine vielfältige Amphibien- und Avifauna auf Asinara (PARCO NAZIONALE DELL ASINARA 2012c).

2.8 Landnutzung

Der anthropogene Einfluss im Mittelmeerraum begann bereits vor über 10.000 Jahren (RUNDEL et al. 1998:8) und auch Asinara weist eine lange Nutzungsgeschichte auf. Bereits Phönizier, Römer und Griechen kannten die Insel (PULINA & MELEDDU 2012:49). Im Mittelalter siedelten Mönche auf Asinara, bis die Insel von sardischen Hirten besiedelt und genutzt wurde (PULINA & MELEDDU 2012:49). Ab 1885 war Asinara Strafkolonie und Quarantäneinsel, was ein Betretungsverbot der Insel und Nutzungsverbot der umliegenden Gewässer nach sich zog (PULINA & MELEDDU 2012:49). Die zuvor auf der Insel ansässige, „spärliche Bevölkerung" (GORGOLINI 2012:91), die laut UNESCO (2006) aus 500 Menschen bestand, wurde evakuiert und neue Gebäude wurden errichtet. Während bei La Reale eine Quarantänestation für besonders ansteckende Krankheiten errichtet wurde, war die Strafkolonie bei Cala d'Oliva angesiedelt (GORGOLINI 2012:91).

Im ersten Weltkrieg wurde die Insel zu einem Gefangenenlager umfunktioniert, in dem in den ersten Monaten bis zu 24.000 größtenteils österreichisch-ungarische Kriegsgefangene untergebracht wurden. Die Funktion Asinaras war dabei zu Beginn als Quarantäneinsel gedacht, auf der die Gefangenen untersucht und geheilt werden sollten, um anschließend in andere Lager verschifft zu werden. Im Laufe des Krieges entwickelte sich Asinara zu einem der größten, Vermutungen von GORGOLINI (2012:110) zufolge sogar zu dem größten, Gefangenenlager auf italienischem Gebiet. Um die Zahl an Gefangenen beherbergen zu können, wurden Zeltlager errichtet. Bezug nehmend auf eine sehr schlechte Versorgung der Gefangenen und hohe Sterberaten berichtet GORGOLINI (2012:91), dass man „auf keine lokalen Ressourcen zurückgreifen [konnte], es gab keine Landwirtschaft – mit Ausnahme einiger kleiner Obstgärten in einer engen Zone ganz im Westen, die von den Häftlingen der Strafkolonie von Cala d'Oliva gepflegt wurden –, es fehlte auch an Wasser, das mit einem Tankschiff aus Portotorres herbeigeschafft und in einen Behälter gepumpt werden musste […]". Für die ersten Jahre der Gefängnisnutzung (1885) bis zum ersten Weltkrieg ist also nicht von einer intensiven Landwirtschaft auf der Insel auszugehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Besonderen eine Form der Subsistenzwirtschaft durch Mönche (UNESCO 2006) und eine Beweidung sowie die Nutzung als Straflager für die Landnutzungsgeschichte Asinaras von Bedeutung sind. Wie Sardinien wurde vermutlich auch Asinara entwaldet und erfuhr somit die bereits beschriebe Degradation der ursprünglichen Vegetationsform.

3 Material und Methoden

3.1 Verwendete Datengrundlagen

3.1.1 Landsat-Satellitenaufnahmen

Die Landsat-Aufnahmesysteme weisen mehrere Vorteile auf, welche hier genutzt werden konnten und folglich zu der Auswahl dieser Datengrundlage führten: Sie stehen **kostenfrei** zur Verfügung und weisen durch den vergleichsweise langen Bestand der Landsat-Missionen und die Eigenschaften als Satellitensystem (Wiederkehrrate zw. 18 (bis Landsat 3) und 16 Tagen) eine verhältnismäßig weit zurückreichende, **gute temporale Auflösung** auf. Ein weiterer Vorteil ist die **Datenaufbereitung**, welche durch die NASA und das United States Geological Survey (USGS) vorgenommen wird. Ein **Nachteil** der Landsat-Aufnahmen liegt in der, im Vergleich zu anderen Satellitensystemen, **geringen räumlichen Auflösung**. Ein weiterer Nachteil liegt in dem ausgefallenen Scan-Line-Corrector (SLC), welcher für die Kompensierung der Vorwärtsbewegung des Satelliten von Bedeutung ist. Am 31.5.2003 fiel der SLC aus und ist seitdem defekt. Dies führt dazu, dass in den Randbereichen der Aufnahmen Lücken entstehen. Im Zentrum sind die Landsat-Aufnahmen weiterhin vergleichbar mit den Aufnahmen mit funktionierendem SLC (NASA 2010:123).

3.1.2 Quickbird-Satellitenaufnahmen

Für ein Teilgebiet der Insel wurde eine Quickbird-Satellitenaufnahme ausgewertet. Der Quickbird-Satellit ist in der Lage, Bilder mit einer sehr **hohen geometrischen Auflösung** aufzunehmen, welche bis zu 65 cm Pixelgröße betragen kann (Panchromatisch). Die hier vorliegende Multispektralaufnahme mit einer geometrischen Auflösung von 2,62 m weist ein blaues (0,43 – 0,545 µm), ein grünes (0,466 – 0,620 µm), ein rotes (0,59 – 0,71 µm) und ein Band im nahen Infrarot auf (0,715 – 0,918 nm) auf. Die radiometrische Auflösung liegt bei 8 Bit. Verwendet wurde eine „Ortho-ready"- Aufnahme, welche bereits einer Georeferenzierung unterzogen wurde. Als Nachteil sind die Kosten für eine Aufnahme zu sehen, welche sie für eine multitemporale Analyse weniger attraktiv machen. Als Satellit mit einer entsprechenden temporalen Auflösung würde sich Quickbird ansonsten auch hierfür sehr gut eignen (DIGITAL GLOBE INC. 2013).

3.1.3 Orthofotos

Durch die beiden Geoportale *Autonome Region Sardinien* und *Italien* wurden jeweils frei zugängliche Orthophotos zur Verfügung gestellt. Während bei dem Geoportal Italiens die Orthofotos Schwarzweiss-Luftbilder aus den Jahren **1989 (5.Mai) und 1997 (Juli)** darstellen, welche für das ganze Land vorliegen und über einen WMS-Dienst in ein GIS eingebunden werden können, stellt das Geoportal Sardiniens die Orthofotos in einem eigenständigen Tool bereit. In Letzterem können die gewünschten Bilder zur Darstellung ausgewählt und auch unterschiedliche Zeitabschnitte nebeneinander zum Vergleich dargestellt werden. Für Asinara lagen Bilder aus den Jahren **1954, 1977, 2000, 2003, 2006 und 2008** vor. Bei den Aufnahmen handelt es sich sowohl um Luftbilder als auch um Satellitenaufnahmen. Genaue Informationen zu den Aufnahmemethoden und –zeitpunkten sind nicht bekannt. Aufgrund der unvollständigen Metadaten sind die Bilder nur eingeschränkt interpretierbar. Für eine automatische digitale Auswertung wurden die Daten aus diesem Grund nicht in Betracht gezogen.

3.1.4 Digitales Geländemodell (DGM)

Über das Geoportal Sardiniens konnte ein Digitales Geländemodell im 1m Raster kostenlos bezogen werden, welches auf der Grundlage eines flugzeuggestützten Laserscanners erstellt wurde (REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013e). Wichtige Arbeitsschritte zur Ableitung eines DGM aus einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM), wie die Filterung von Vegetation und Gebäudehöhen, mussten somit nicht vorgenommen werden (vgl. EHLERS & SCHIEWE 2012:69 und LOHMANN & JACOBSEN 2004:279f).

3.1.5 Thematische Datengrundlagen

Durch online frei zugängliche Geodaten konnte eine breite Datengrundlage für das Gebiet zusammengetragen werden. Folgende Daten wurden in ArcGIS eingearbeitet:

- Geologische Karte im Maßstab 1:25.000 (REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013a), eigene Übersetzung unter Nutzung von SCHWEIZER 2012, MURAWSKI & MEYER 2010, IACOPINI et al. 2007, CAROSI et al. 2004, KLEIN 1990.
- Landnutzungsdaten von 2003 und 2008 im Maßstab 1:25.000 (REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013d).
- Topographische Karte von Italien im Maßstab 1:25.000 (WMS-Dienst des GEOPORTALE NAZIONALE 2013).
- Daten zur Hydrologie Asinaras, darunter Stand- und (temporäre) Fließgewässer (REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013b).
- Daten zu bestehender Infrastruktur, Gebäudebestand sowie ehemaligen Nutzflächen und Gebäuden (REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013b).

3.2 Methoden

3.2.1 Methodische Vorgehensweise

Während die Orthofotos und die Quickbird-Aufnahme als Einzelaufnahmen keine Interpretation des zeitlichen Verlaufs zuließen, lagen bei den Landsat-Aufnahmen Auswahlmöglichkeiten für die multitemporale Untersuchung vor. Es wurden drei Zeitabschnitte für die Veränderungsanalyse des Untersuchungsgebietes gewählt, für die pro Zeitabschnitt 2 Aufnahmen (Anfang und Ende) notwendig waren:

- 1972 – 1987 (Landsat 1 und 5 MSS)
- 1986 – 2002 (Landsat 5 TM)
- 1999 – 2003 (Landsat 7 ETM+)

Abbildung 4 veranschaulicht die verfügbaren Daten und deren Aufnahmezeitpunkte. Insgesamt kann ein **Zeitraum von 59 Jahren** untersucht werden, wobei die Landsat-Daten einen Zeitabschnitt von 31 Jahren abdecken.

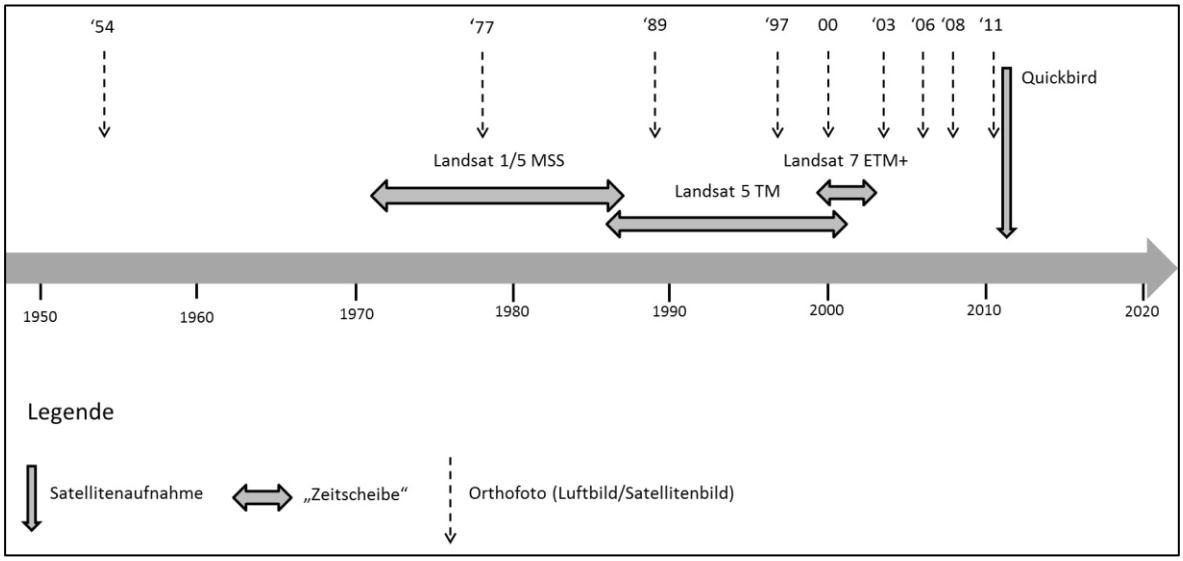

Abb. 4: Verfügbare Datengrundlagen für Asinara.

Durch die Kombination eines visuellen Bildinterpretationsverfahrens mit Methoden der digitalen Bildauswertung sollten Synergieeffekte erzeugt werden. Die Stärken und Schwächen der jeweiligen Methoden sollten dabei möglichst gut ausgeglichen werden, um ein hochwertiges Ergebnis zu erzielen.

Die folgende Abbildung 5 basiert auf den in Abbildung 1 zusammengefassten Teilzielen und verdeutlicht die genutzten Methoden und Datengrundlagen. Die Vorgehensweise bei der multitemporalen Analyse stellt ein interaktives Verfahren dar, bei dem die Ergebnisse der digitalen Bildauswertung immer wieder anhand der Erkenntnisse der visuellen Interpretation evaluiert werden können. So kann z.B. die geringe räumliche Auflösung der Landsat-Daten mit der deutlich höheren Auflösung der Orthofotos ausgeglichen und andererseits die Stärke einer großflächigen Auswertung durch das digitale Auswertungsverfahren genutzt werden. Es wurden zwei Verfahren der digitalen Bildauswertung verwendet: Der Fokus lag zunächst auf der Change Detection, welche die Basis des multitemporalen Ansatzes zur Rekonstruktion der historischen Landnutzung bildet. Als weiteres Verfahren wurde beispielhaft für ein kleines Gebiet eine Klassifizierung durchgeführt, um Methodik und Arbeitsaufwand für eine flächenhafte Klassifizierung der Insel abschätzen zu können.

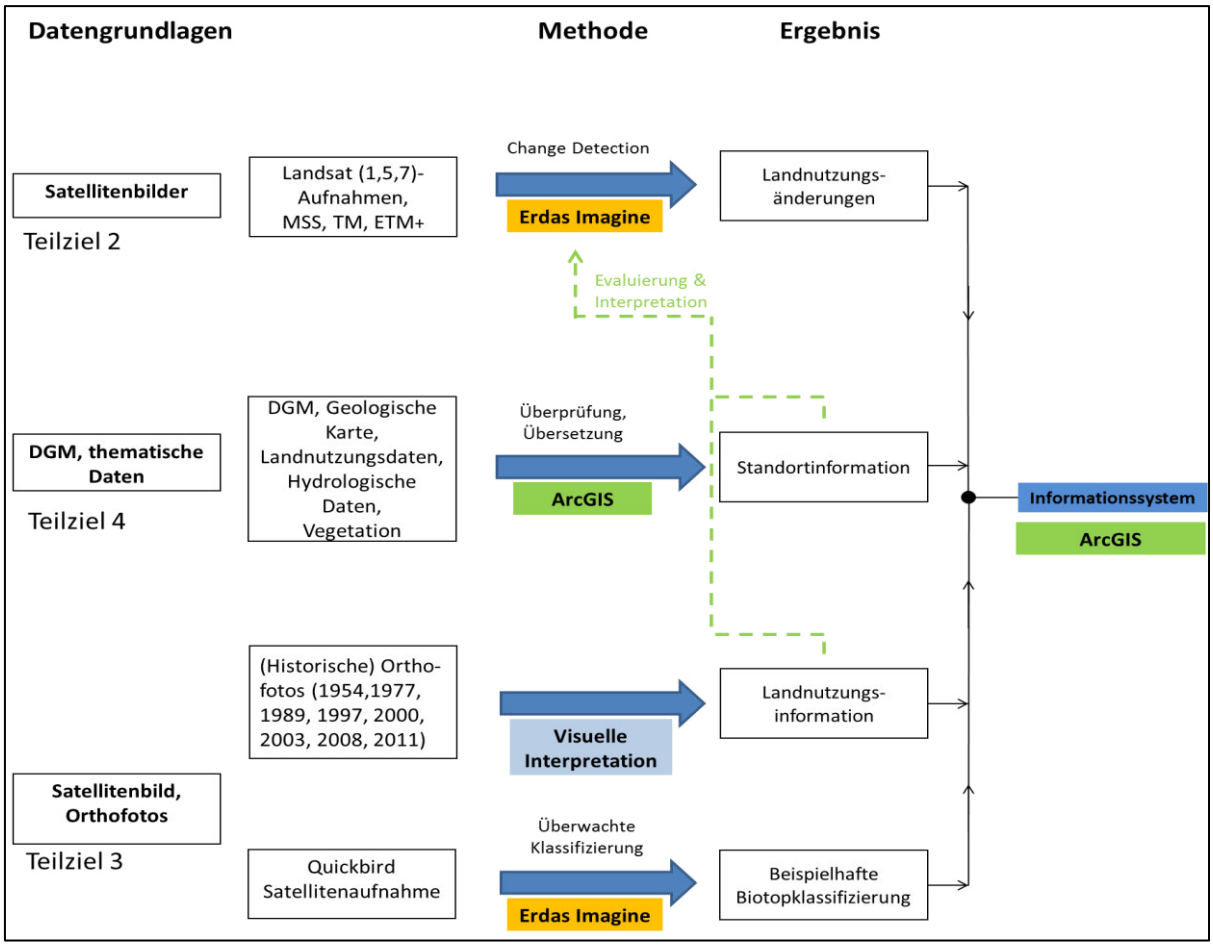

Abb. 5: Methodische Vorgehensweise bei der Erstellung der Geodatenbank Asinara.

3.2.2 Change Detection

Eine Change Detection stellt einen **multitemporalen Ansatz** der digitalen Bildauswertung dar. Dabei geht es darum, durch die Betrachtung von zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstandenen Aufnahmen eines Objektes oder Gebietes, Veränderungen an diesem festzustellen (THÉAU 2012:175). Das den meisten Methoden zugrunde liegende Prinzip der Change Detection ist der Vergleich der Pixel, welche in den zeitlich unterschiedlichen Aufnahmen denselben Ort beschreiben.

Grenzwerte

Einen zentralen Schritt in der Veränderungsanalyse stellt die Auswahl der Grenzwerte (engl. Thresholds) dar, welche festlegen, ob eine Veränderung vorliegt oder nicht. So können unwichtige oder geringfügige Veränderungen von dem Ergebnis ausgeschlossen werden. LU et al. (2011:278) sehen hierfür zwei grundlegende Vorgehensweisen:

1. Das Herausfinden geeigneter Thresholds in einem interaktiven Verfahren, bei dem der Interpret die Werte verändert und so das bestmögliche Ergebnis ermittelt. Der Interpret entscheidet also, welche Veränderung von Interesse ist und welche nicht. Das in dem verwendeten Programm Erdas Imagine enthaltene Tool DeltaCue bietet den großen Vorteil der „Interactive Threshold"-Funktion, bei welcher der Interpret in einem Zwischenschritt der Ergebnisberechnung die Grenzwerte (Minimum und Maximum) variieren und so das für ihn passende Ergebnis ermitteln kann (INTERGRAPH CORPORATION 2013).
2. Die Nutzung statistischer Werte, insbesondere der Standardabweichung vom arithmetischen Mittelwert, um auf diesem Weg die Grenzwerte festzulegen.

Für die hier durchgeführten Change Detections wurde die erste Möglichkeit gewählt, da durch die „Interactive Threshold"- Funktion eine gute Anwendbarkeit gegeben war und durch die geschilderte Kombination mit der visuellen Interpretation der Orthofotos bereits während der interaktiven Grenzwertfindung eine Überprüfung stattfinden konnte. Die Einbeziehung der Histogramme und die Anlegung von spektralen Profilen stellten einen zentralen Schritt in der Grenzwertermittlung dar.

Pre-processing

Wie bereits beschrieben, liegen die Landsat-Daten üblicherweise bereits in geometrisch und radiometrisch korrigierter Form vor. Trotz dieser Korrektur muss, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen, eine Weiterverarbeitung der Daten stattfinden um die bei der multitemporalen Untersuchung gewünschte Erkennung der zeitspezifischen Unterschiede erkennen zu können (DE LANGE 2006:397). Es muss jedoch auch betont werden, dass die Korrektur atmosphärischer Einflüsse nicht für alle Verfahren der Change Detection von Bedeutung ist (vgl. SONG et al. 2001). Insbesondere für die Tasseled Cap Methode ist sie jedoch Voraussetzung (THÉAU 2012:179).

DeltaCue bietet den großen Vorteil, dass elementare Schritte dieser Weiterverarbeitung standardisiert durchgeführt werden. Das Programm ist darauf ausgelegt, auch zuvor nicht kalibrierte Daten zu verarbeiten. Eine radiometrische Korrektur, welche z.B. störende atmosphärische Einflüsse auf den Vergleich der Bilder ausschließen soll, wird mittels einer ‚scene-to-scene normalization' durchgeführt. Dabei wird die Statistik der Grauwerte der Szenen aneinander angepasst um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Genutzt werden hierzu der Mittelwert sowie die Standardabweichung, aus denen ein Koeffizient ermittelt wird, auf dessen Grundlage bandweise eine lineare Transformation durchgeführt wird. Mit dieser wird das Bild, welches den zweiten Zeitabschnitt darstellt, an die Statistik des ersten Bildes angeglichen (INTERGRAPH CORPORATION 2013). Der störende Effekt von Wolken bzw. deren Schatten kann bei der Transformation berücksichtigt werden, was jedoch nicht die grundlegende Detektion von Wolken als Veränderung zwischen zwei Bildern verhindert (INTERGRAPH CORPORATION 2013).

Auch eine geometrische Angleichung („coregistration") der verwendeten Aufnahmen anhand verschiedener Kontrollpunkte kann notwendig sein, um Fehldetektionen aufgrund der räumlich nicht übereinstimmenden Pixel zu vermeiden (INTERGRAPH CORPORATION 2013).

Fehlerquellen

Obwohl die Change Detection ein gutes Mittel darstellt, um Landnutzungsänderungen zu verdeutlichen, ist die Methode doch sehr störanfällig. So werden „[…] die zu erfassenden signifikanten Objektveränderungen meist von vielen kleinen, aber unwichtigen Unterschieden in den Bilddaten überlagert. Es ist schwierig, solche lokalen Störungen durch geeignete Filtertechniken zu eliminieren" (ALBERTZ 2009:120). Auch radiometrische Korrekturen wie eine Normalisierung können durch sensorspezifische Fehler oder auch natürliche Einflüsse, wie unregelmäßig im Bild verteilten Dunst oder Nebel, Ungenauigkeiten aufweisen (INTERGRAPH CORPORATION 2013). Aufgrund der Störanfälligkeit wird die Change Detection laut ALBERTZ (2009:120) häufig als Vorstufe für eine visuelle Bildinterpretation genutzt. Wie bereits deutlich wurde, wird an dieses Prinzip angelehnt, indem die Ergebnisse der Change Detection mit der visuellen Interpretation der verfügbaren Orthofotos kombiniert wurden und auch die beiden einbezogenen Satellitenaufnahmen betrachtet wurden.

Ein methodisches Problem, welches der Grenzwert-Ansatz beinhaltet, liegt in der Subjektivität der Ergebnisse, insbesondere bei der hier verwendeten interaktiven Möglichkeit. Um gute Ergebnisse zu erzielen, ist eine möglichst detaillierte Kenntnis des Untersuchungsgebietes notwendig, um Fehlschlüsse zu vermeiden (LU et al. 2011:278).

Algorithmen-Auswahl

Durch die Nutzung von DeltaCue wurde die Anwendung mehrerer Algorithmen deutlich vereinfacht. Es wurde ein interaktiver Prozess ermöglicht, da der Nutzer in einem ‚Change Display Viewer' das Ergebnis betrachten und direkt den nächsten Iterationsprozess mit einem anderen Algorithmus starten kann. Da die Interpretation der Ergebnisse der Algorithmen häufig nicht einfach ist (vgl. THÉAU 2012, LU et al. 2011), wurde sich auf eine begrenzte Anzahl von Algorithmen beschränkt. Das Ziel hierbei war, durch die Fokussierung auf diese Algorithmen die Qualität der Auswertung zu steigern. Die hierfür ausgewählten Algorithmen waren Image Differencing und Tasseled Cap (TCgreen und TCsoil). Zur genaueren Erläuterung der Algorithmen sei auf KAUTH & THOMAS 1976, RADKE et al. 2005, THÉAU 2012:178 f, Lu et al. 2011:278 und INTERGRAPH CORPORATION 2013 verwiesen.

Das Image Differencing wurde ausgewählt, da die Methode auf der im DeltaCue erstellten Datengrundlage für alle Sensoren angewendet werden konnte und die Ergebnisse aufgrund ihrer eindeutigen Aussage einfacher zu interpretieren sind (LU et al. 2004:2371). Für die Tasseled Cap sprach die Aussagekraft der Ergebnisse, welche konkrete Aussagen zu Boden und Vegetation liefern, die allerdings auch schwieriger zu interpretieren sein können (LU et al. 2004:2374 & INTERGRAPH CORPORATION 2013).

3.2.3 Visuelle Luftbildauswertung

Die visuelle Luftbildauswertung als Methode zu wählen, hatte mehrere Gründe, die hier kurz erläutert werden sollen:

- Aufgrund der Verfügbarkeit zwar zeitlich weit zurückreichender, qualitativ jedoch sehr unterschiedlicher Luftbilder für das Untersuchungsgebiet wurde für die historischen Luftbilder eine visuelle Luftbildauswertung durchgeführt, da die Aufbereitung der Bilder für eine digitale Auswertung sehr aufwendig oder, aufgrund der hohen Qualitätsunterschiede, nicht möglich gewesen wäre. Hinzu kamen fehlende Informationen über Aufnahmesystem, genauen Aufnahmezeitpunkt und Datenaufbereitung. Ohne diese Informationen ist (vor allem) eine digitale Auswertung als bedenklich einzustufen.
- Aus methodischer Sicht war es zum einen sinnvoll, die möglichen Schwächen einer rein digitalen, automatischen Auswertung durch die Stärken der visuellen menschlichen Wahrnehmung auszugleichen.
- Zum anderen diente die visuelle Luftbildauswertung auch als Qualitätskontrolle der Change Detection, da durch die höhere räumliche Auflösung dieser Bilder die detektierten Änderungen gezielt überprüft werden konnten.

Bei der visuellen Interpretation der multispektralen Satellitendaten, welche durch den interaktiven Aufbau Bestandteil der Change Detection ist, können außerdem von vornherein Fehldetektionen erkannt werden, da potenzielle Störfaktoren wie schattenwerfende geomorphologische Strukturen und natürliche Prozesse (wie z.B. jahreszeitliche Unterschiede) erkannt werden (LÖFFLER et al. 2005:192). Allerdings besteht die Möglichkeit von optischen Täuschungen. Während das menschliche Auge z.B. bei benachbarten Flächen Schwärzungs- oder Farbunterschiede gut unterscheiden kann, ist dies bei weiter voneinander entfernten Flächen eine Fehlerquelle (ALBERTZ 2009:125). Insbesondere mit Hinblick auf die in dieser Arbeit genutzten, qualitativ sehr unterschiedlichen Orthofotos ist dies von Bedeutung.

3.2.4 Klassifikation

Für die hier durchgeführte überwachte Klassifikation wurde das **Maximum-Likelihood-Verfahren** verwendet. Im Weiteren wird das Maximum-Likelihood-Verfahren erläutert. Für eine Beschreibung der anderen Verfahren sei auf die entsprechende Literatur (z.B. ALBERTZ 2009 oder BARSCH et al.

2000:125f) verwiesen. Das Maximum-Likelihood-Verfahren nutzt für die Zuweisung der Messwerte zu den Objektklassen Wahrscheinlichkeiten, welche zuvor berechnet werden. Ein Pixel wird dann der Objektklasse zugeordnet, für die die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit am höchsten ist. Die Basis für diese Berechnung bilden die zuvor vom Anwender ausgewählten Referenzflächen, aus denen die Wahrscheinlichkeitsfunktionen berechnet werden. Ist die Wahrscheinlichkeit zu gering, erfolgt keine Klassifizierung des Wertes (ALBERTZ 2009:159). Durch die Anwendung des Maximum-Likelihood-Verfahrens unterstellt man „[…] daß die Grauwerte der zu einer Objektklasse gehörenden Bildelemente in den Aufzeichnungen jedes Spektralkanals eine Gauss'sche Normalverteilung um den jeweiligen Mittelwert der Musterklasse aufweisen […]" (HILDEBRANDT 1996:540). HILDEBRANDT (1996:540) verweist darauf, dass diese Annahme zwar selten exakt, näherungsweise jedoch häufig zutrifft und deshalb als Arbeitshypothese genutzt werden kann. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in einem relativ hohen Rechenaufwand (ALBERTZ 2009:159 und HILDEBRANDT 1996:540).

Für ein Testgebiet, welches sich westlich von Cala d'Oliva befindet, wurde beispielhaft eine überwachte Klassifikation einer multispektralen Quickbird-Aufnahme durchgeführt. Anhand von mehreren Trainingsgebieten wurden fünf zu unterscheidende Merkmalsklassen ausgewiesen: Wasser, höhere grüne Vegetation, niedrige Vegetation, offene Boden-/Gesteinsflächen und die Straße. Durch die Wahl sowohl von sehr unterschiedlichen (Wasser, Vegetation, Boden) als auch ähnlichen (Boden, Straße) Klassen sollten Stärken und Schwächen der Klassifizierung verdeutlicht werden.

Die Multispektralklassifizierung ist häufig mit Problemen behaftet. Insbesondere sich stark ähnelnde Objektklassen, wie z.B. Flächen mit unterschiedlicher Vegetation, weisen Ähnlichkeit und damit das Potenzial zu Fehlklassifikationen auf. Außerdem ist weder bei den jeweiligen Pixeln noch bei den Objektklassen von einer Homogenität auszugehen. Je nach Pixelgröße kommen in diesen also **Mischsignaturen** vor, welche die Reflexionsanteile von anderen Objektklassen repräsentieren (ALBERTZ 2009:163). Die Objektklassen in sich sind ebenfalls nicht homogen, sondern weisen unterschiedliche Ausprägungen (z.B. in der Vegetation oder dem Feuchtegehalt des Bodens) auf (ALBERTZ 2009:163). Auch wenn eine weitgehende Homogenität vorliegt, kann die **Richtungsabhängigkeit** der Messwerte diese deutlich verfälschen. Je nach Einfallswinkel der Sonnenstrahlen und Beobachtungswinkel des Aufnahmegerätes bilden sich z.B. in einem eigentlich homogenen Vegetationsverband beschattete und sonnige Bereiche sowie außerdem (bei senkrechtem Blickwinkel) Bereiche mit freier Bodenfläche (ALBERTZ 2009:163f). Auch das **Geländerelief** führt zu einer unterschiedlichen Beleuchtung der Erdoberfläche (ALBERTZ 2009:164).

3.2.5 Verarbeitung mittels ArcGIS

Die Zusammenführung der Ergebnisse sowie auch die Bearbeitung des DGM und thematischer Daten wurden mittels ArcGIS durchgeführt. Die Übernahme von aus Fernerkundungsdaten gewonnenen Ergebnissen in Geographische Informationssysteme stellt einen mittlerweile üblichen Schritt in der digitalen Verarbeitungskette dar (ALBERTZ 2009:171), da so die Verwaltung und Auswertung der raumbezogenen Daten gebündelt und vereinfacht wird. Für diese Arbeiten stellen Geodatenbanken das gängige Format zur Speicherung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung der vorhandenen Daten dar (BARTELME 2005:300).

4 Ergebnisse und Interpretation

4.1 Change Detection und visuelle Interpretation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Change Detection dargestellt. Es ist zu betonen, dass flächendeckende Detailaussagen zu Vegetationszustand und -zusammensetzung nicht das Ziel dieser Auswertung sind. Vielmehr sollen Prozesse und Strukturen der Landnutzung und deren Veränderung ermittelt und dargestellt werden. Der erste untersuchte Zeitabschnitt (1972 - 1987) wird u.a. dazu

genutzt, grundlegende Struktureinheiten und wichtige Orte der Insel zu beschreiben, um davon ausgehend die Veränderungen zu verdeutlichen. Die Ergebnisse der visuellen Orthofoto-Interpretation werden im Laufe der jeweiligen Interpretation der Change Detection eingebracht. Der Fokus der Betrachtungen orientiert sich dabei an den zuvor in der Change Detection ermittelten Highlights, da so der Aufwand begrenzt und gleichzeitig das Ergebnis der Change Detection überprüft werden kann.

Zeitraum 1972 – 1987

Die für die Change Detection dieses Zeitabschnitts genutzten Aufnahmen wurden 1972 am 14. August, 09:39 Uhr bzw. 1987 am 03. August, 09:31 Uhr aufgenommen.

Ein prägendes Merkmal Asinaras ist der in Abbildung 6 (NIR-Falschfarbenbild) hell hervorgehobene Streifen, der die gesamte südliche Küste des nördlichen Inselteils hervorhebt und sich von dessen südöstlicher Spitze bis hin zu der Verengung zieht, ab der der langgezogene, mittlere Inselteil beginnt. Ein vergleichbarer Bereich findet sich außerdem an der südlichsten Küste der Insel (**(1)** auf Abb. 6). In beiden Szenen ist der Höhenzug auf dem nördlichen Teil der Insel erkennbar, der von Nordwesten nach Südosten streicht. Sowohl 1972 als auch 1987 erscheinen diese nicht in rötlichen, sondern in bräunlichen Farbtönen. Die Kuppen weisen augenscheinlich weniger Vegetation auf als die Hänge und Tiefenbereiche (mit Ausnahme der bereits beschriebenen Küstenstreifen).

Mehrere Täler, die von den höher gelegenen Bereichen zur Küste hin ziehen, strukturieren die Insel ebenfalls. Auch hier finden sich die deutlichsten Ausprägungen auf dem nördlichen Teil der Insel **(2)**. Die Verbreitung des Granodiorits, der den südlichen Teil der Insel prägt, ist nachvollziehbar, da sich hier keine geschlossene Vegetationsdecke bildet und dementsprechend eine verhältnismäßig starke Reflexion des Gesteins stattfindet **(3)**. Der Übergang an die sich nördlich anschließenden Glimmerschiefer und Paragneise ist anhand der Aufnahmen eindeutig nachzuvollziehen (s. Abb. 6). Gebäude und Siedlungen sind ebenfalls als helle Bereiche zu erkennen. Das deutlichste Beispiel ist die größte Siedlung Cala d'Oliva **(4)**. Eine weitere Auffälligkeit ist eine in beiden Aufnahmen erkennbare, intensive rote Färbung **(5)** südlich des Ortes Elighe Mannu, welche auf eine besonders dichte Vegetation in diesem Talabschnitt hinweist. In der Aufnahme von 1972 sind zwei hellgrüne Bereiche zu finden, welche als Pixelfehler zu sehen sind.

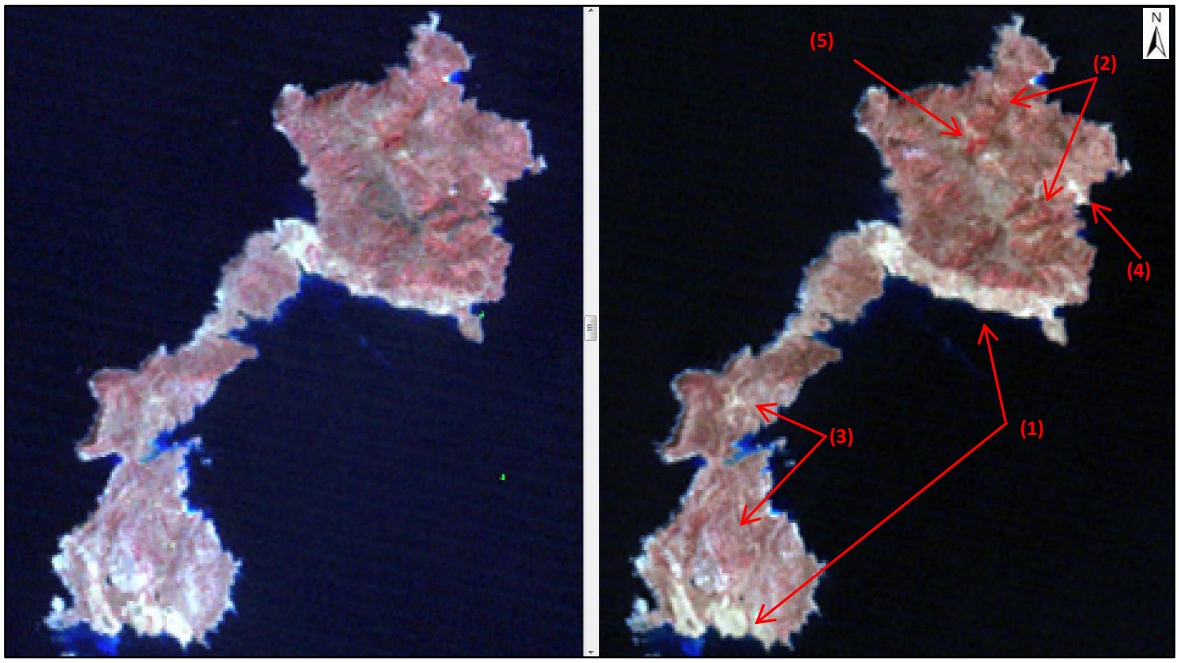

Abb. 6: Falschfarbendarstellung von Landsat-Aufnahmen aus den Jahren 1972 (links) und 1987.

Für die Satellitenaufnahmen, die mit dem Landsat MSS aufgenommen wurden, ist mit DeltaCue keine Auswertung mit den Tasseled Cap Algorithmen möglich. Für die Auswertung wurde die Untersuchung einzelner Bänder mittels Image Differencing genutzt.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der Untersuchung des vierten Bandes (NIR 0,8 – 1,1 µm). Bei dem Grenzwert von ±15% werden mehrere Schwerpunkte der Veränderung deutlich. Zunächst ist der Küstenstreifen des nördlichen Inselteils zu nennen **(1)** (s. Verweis auf Abb. 7), auf dem großflächig positive Veränderungen (grün) ausgewiesen sind. Drei Bereiche weisen eine Veränderung auf, deren Intensität auch bei dem Grenzwert von 20% noch zu sehen ist (s. Pfeile und Abb. 7 linkes Bild). Nördlich davon sind außerdem südlich (bzw. südöstlich oder südwestlich) exponierte Hänge und z.T. auch Kuppen positiv hervorgehoben **(2)**. Der einzige negativ hervorgehobene und außerdem sehr kleine Bereich **(3)** befindet sich im Nordwesten der Insel. Östlich davon finden sich, zentral auf dem nördlichen Inselteil gelegen, ebenfalls positiv ausgewiesene Flächen **(4)**, deren Zentrum auch den Grenzwert von 20% (s. Abb. 7 links) überschreitet. Dies gilt nicht für die Veränderungen, die in der direkten Umgebung und nördlich von Cala d'Oliva gekennzeichnet sind, wohl aber für die südlich gelegenen. Bei dem Ort Tumbarino **(5),** der auf dem mittleren Inselteil liegt, findet sich eine detektierte Veränderung, die eindeutig mit der Lage der dortigen Gebäude übereinstimmt. Ganz im Süden der Insel sind ebenfalls Flächen ausgewiesen. Diese befinden sich zum einen an der flachen Küste, zum anderen jedoch auf dem nördlich davon lokalisierten Granodiorit.

Das durchgeführte Image Differencing der dritten Bänder (NIR, 0,7-0,8 µm) zeigte bei hohen Grenzwerten (±30%) fast keine Veränderungen. Bei Werten von 10% wurde ein gut differenziertes Ergebnis erzielt. Die hier detektierten Veränderungen überschneiden sich sehr stark mit den in Abbildung 7 dargestellten Veränderungen des vierten Bandes.

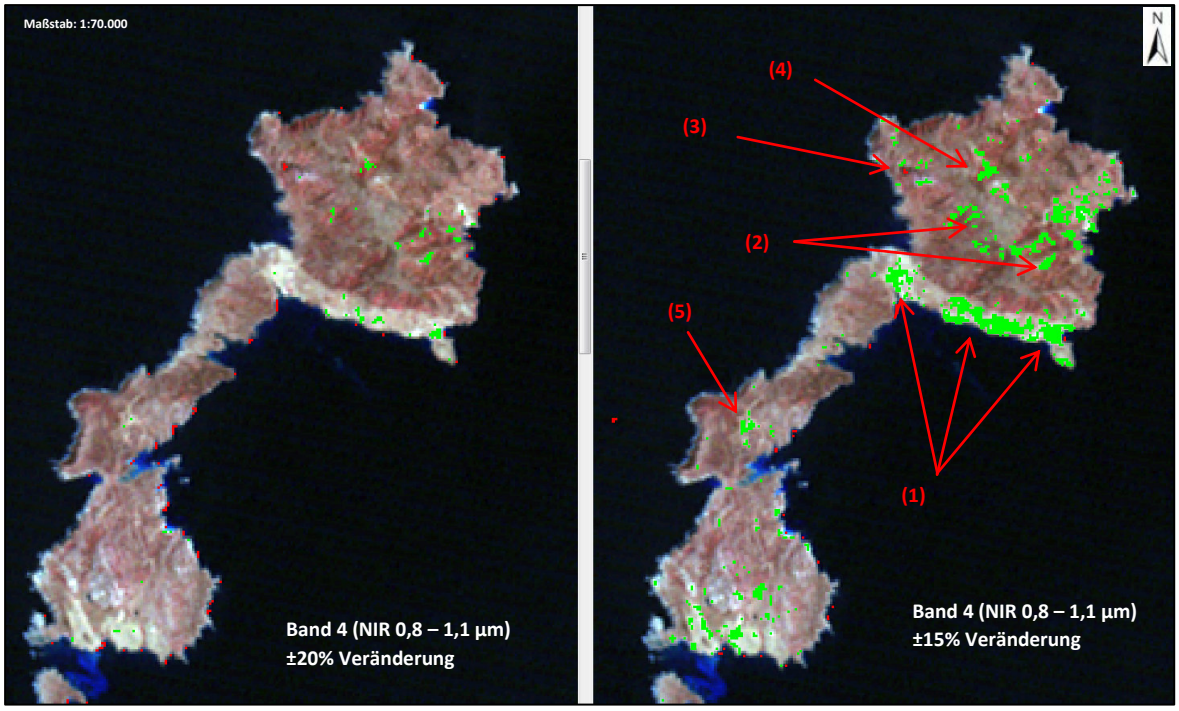

Abbildung 7: Ergebnis des Image Differencings des vierten Bandes (NIR 0,8 – 1,1 µm) dargestellt auf der Grundlage der Landsat-Szene von 1987.

Die detektierten Unterschiede zwischen den Bildern sind zahlreich (zur Ansicht weiterer Analysen vgl. STADTMANN 2013). Entlang der Küste linienhaft angeordnete Veränderungen sind durch Wellengang und einen schwankenden Wasserspiegel zu erklären, die jeweils von den Windverhältnissen abhängig

sind. Auch Schattenwurf ist in diesen Bereichen, vor allem der steilen Westküste Asinaras, ein weiterer möglicher Grund für irrelevante Detektionen ebenso wie auf der Aufnahme von 1987 vorhandene Wolken und deren Schatten.

Bei der Analyse der Change Detection-Ergebnisse wurde noch einmal sehr deutlich, dass die MSS Daten mit der räumlichen Auflösung von 79 Metern nur eine unzureichende Datengrundlage für genaue Betrachtungen bilden. Die Größe der Pixel lässt keine Aussagen über kleinräumige Veränderungen zu. Genaue Gründe für die Veränderung einzelner Pixel können häufig nicht benannt werden, da die Einflüsse, die zu den spektralen Eigenschaften der Pixel führen, in mehreren Faktoren ihren Ursprung haben können, also **Mischsignaturen** darstellen. Dennoch konnten grundlegende Aussagen über die Prozesse auf Asinara in diesem Zeitraum getroffen werden, was im Folgenden verdeutlicht wird.

Das Image Differencing des vierten Bandes (NIR, 0,8-1,1 µm) ergab eine auf mehrere Orte verteilte Zunahme der Reflexion. Besonders in den flachen Küstenbereichen konzentrierten sich diese Zunahmen. Es waren jedoch verschiedenste andere Bereiche davon betroffen (vgl. Abb. 7). Der Wellenlängenbereich des NIR zeigt zum einen Informationen über den Wechsel der Eigenschaften von Blattpigmenten (z.B. Chlorophyllgehalt) an, zum anderen aber auch grundlegende Veränderungen wie den Wechsel zwischen Vegetationsbedeckung und Boden (vgl. BARSCH et al. 2000:103f). Bei der Detailuntersuchung der Küstenbereiche mithilfe der Orthofotos wurde deutlich, dass dort auf mehreren Flächen Landwirtschaft betrieben wurde. Die Zunahme der Reflexion in den Küstenbereichen und vor allem auch in den Bereichen, die nachweislich durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt waren, weist also auf einen menschlichen Einfluss durch Änderungen in der Nutzung hin. Die Flächen wurden jedoch nicht erst in dem untersuchten Zeitraum in Nutzung genommen, was anhand der Luftbilder von 1954 nachgewiesen werden konnte. Das Ergebnis repräsentiert also keine vollständige Umnutzung der Flächen.

Neben dem Küstenstreifen auf der nördlichen Insel wurden auch zwei Bereiche hervorgehoben, die sich im Zentrum der Insel befinden (**(4)** in Abb. 7). Bei genauerer Untersuchung dieser Standorte mit Hilfe der historischen Luftbilder wurde deutlich, dass es sich auch hier um Nutzungsstandorte handelte (s. dazu Abbildung 8). Terrassenstrukturen sind erkennbar, die durchaus charakteristisch für den Mediterranraum sind. Auf dem Orthofoto von 1977 erscheinen diese Terrassen weniger strukturiert und z.T. verwildert, was auf eine Aufgabe oder zumindest Änderung in der Bewirtschaftung hindeutet. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Qualität der Aufnahmen ist diese Interpretation jedoch unsicher, insbesondere weil die genauen Aufnahmezeitpunkte (Monat, Tag) nicht vorliegen.

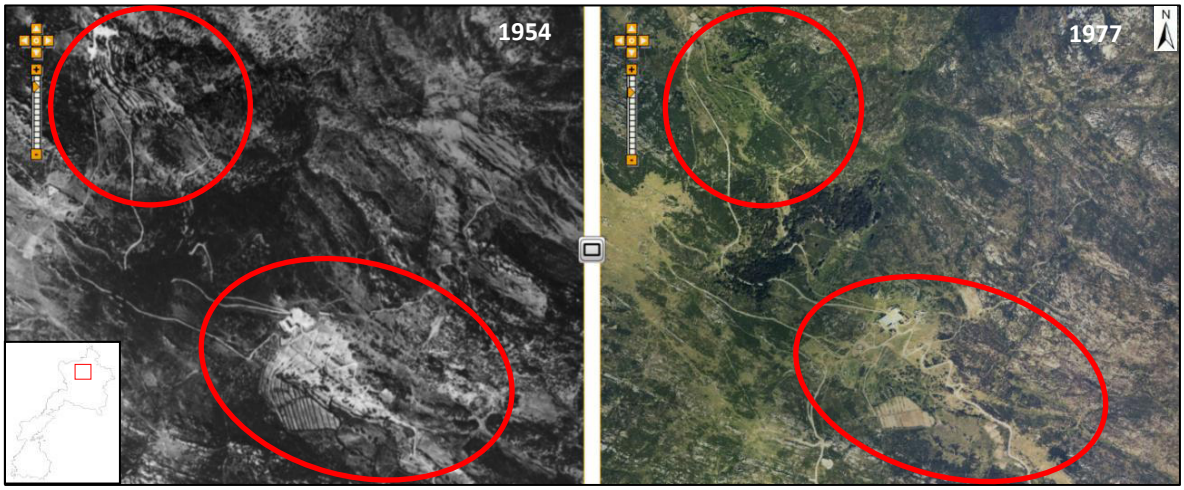

Abb. 8: Luftbilder von 1954 und 1977 mit Terrassenstrukturen. Bilder: REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2012.

Bei Hinzuziehung einer weiteren Aufnahme vom 5.Mai 1989 – also außerhalb des eigentlich untersuchten Zeitraumes - wird die Auffassung gestützt, dass die Nutzung nachgelassen und folglich Sukzession eingesetzt hat. Die Strukturen erschienen hier noch weniger deutlich.

In der einführenden visuellen Interpretation wurde ein Bereich hervorgehoben, der eine besonders dichte Vegetation vermuten ließ. Dieser liegt in dem Tal zwischen den beiden Terrassenkulturen und wurde bei der Betrachtung der Orthofotos als Wald identifiziert (s. Abb. 8). An keinem anderen Ort auf der Insel findet sich eine vergleichbare Vegetation.

Die Ergebnisse der Bänder drei und vier weisen für diese Waldfläche (ebenso wie für die Terrassen) eine Zunahme aus (s. dazu Abb 7). Da im Wellenlängenbereich des NIR (0,7-1,2 µm) besonders die Eigenschaften der Vegetation (Biomasse, Vitalität, unterschiedliche Pflanzenarten) angezeigt werden (de LANGE 2006:382), wird diese Veränderung als Zunahme an Biomasse interpretiert. Die Untersuchung der Orthofotos ergab, dass der Wald tatsächlich an Fläche zunahm, was auch mit der vermuteten nachlassenden Nutzungsintensität in Verbindung gebracht wird.

Zu diskutieren ist, ob die detektierten Veränderungen auf der ganzen Insel durch eine Sukzession aufgrund nachlassender Nutzung verursacht wurden. Dagegen spricht, dass auch Bereiche betroffen sind, die nach Auswertung der verfügbaren Daten zumindest ab 1954 scheinbar keine Nutzung aufwiesen.

Bezieht man das Relief in die Betrachtung mit ein, wird deutlich, dass nur wenige der Veränderungen in den Tiefenlinien stattfinden. Lediglich auf dem südlichen Teil der Insel in Klüften des Granodiorits ist dies der Fall. Bereits bei der eingehenden visuellen Interpretation wurde eine Konzentration der dichteren Vegetationsstrukturen in den Tiefenlinien deutlich. Begründet werden kann dies durch die bessere Wasserverfügbarkeit, die durch den Abfluss entsteht, der sich in diesen Bereichen konzentriert. Von noch größerer Bedeutung dürften jedoch die Alluvialböden sein, die diese Bereiche prägen. Neben einer verbesserten Gründigkeit gegenüber den flacheren Kuppen- oder Hangböden, aus der auch eine erhöhte Wasserspeicherfähigkeit resultiert, ist häufig auch von einer erhöhten Nährstoffverfügbarkeit auszugehen. Diese entsteht durch andernorts ausgeschwemmte und in den Tiefenlagen akkumulierte Nährstoffe (MARTÍNEZ-MENA et al. 2012:36f). Während sich die Pflanzen auf diesen besseren Standorten nicht veränderten, sind auf den potenziell flachgründigeren und weniger günstigen Standorten positive Veränderungen detektiert worden. Als Grund für diesen Unterschied wird gesehen, dass sich auf den leistungsfähigeren Standorten eine höhere immergrüne Hartlaubvegetation entwickelt hat, welche keiner intensiven jahreszeitlichen Schwankung des Reflexionsverhaltens durch den Verlust der Blätter unterliegt (HILDEBRANDT 1996:46). Bei Betrachtung der Orthofotos wird deutlich, dass es sich hierbei um höhere Strauchformationen handelt, die sich an diesen Gunststandorten entwickeln konnten. Die Veränderungen auf den Kuppen- und Hangstandorten lassen sich im Sinne einer witterungsbedingt höheren Vitalität der Pflanzen interpretieren, da eine solche geringfügige Veränderungen in der Pflanzenvitalität bzw. im Chlorophyllgehalt und damit im Reflexionsverhalten hervorrufen kann, wie sie hier verzeichnet wurden (vgl. HILDEBRANDT 1996:37f).

Ein weiterer Nutzstandort, der ebenfalls Terrassenkulturen aufweist, wurde auf den Hügeln des nördlichen Inselteils detektiert (s. Abb. 7 **(2)** unterer Pfeil). Hier zeigte das Image Differencing des vierten Bandes eine deutliche positive Veränderung an. Die Untersuchung der Orthofotos ergab einen ehemals umfangreich genutzten Standort mit den Grundmauern mehrerer Häuser und Terrassenkulturen, die allerdings zu dem Untersuchungszeitpunkt bereits nicht mehr in Nutzung waren. Die Zunahme kann als eine Sukzession des Standortes interpretiert werden. Es ist davon auszugehen, dass sowohl ein verändertes Verhalten des Menschen an einigen Standorten, als auch eine natürlicherweise veränderte (vitalere) Vegetation für die umfangreichen Ergebnisse dieser Change Detection sorgten. Dass diese hauptsächlich einem in den vorliegenden Daten enthaltenen Fehler,

z.B. trotz der ergriffenen Maßnahmen verbliebene radiometrische Störungen, zuzuschreiben sind, ist insofern unwahrscheinlich, als dass sich die Veränderungen bestimmten Reliefeinheiten oder Orten zuordnen lassen, für die auch mithilfe der Orthofotos plausible Veränderungsgründe gefunden werden können.

Eine weitere, bei Hinzuziehung des Luftbildes von 1954 auffallende Veränderung sind vier Stauseen, welche somit zwischen 1954 und 1972 (erste Landsat-Aufnahme) angelegt wurden. Einer dieser Seen befindet sich westlich von Cala d'Oliva. Der zweite Stausee ist bei dem als Campu Perdu bezeichneten Übergang zwischen nördlichem und mittlerem Inselteil lokalisiert. Zwei weitere Stauseen liegen ganz im Süden der Insel an dem Übergang zwischen dem Granodiorit und den sich südlich anschließenden flachen, landwirtschaftlich genutzten Flächen. In ausgeprägten Abflussrinnen, die offensichtlich den periodisch auftretenden Abfluss führen, wurden Staumauern errichtet, was durch eine jeweils vorhandene lineare Begrenzung der Seen deutlich wird. Der offensichtliche Zweck besteht in der Speicherung des fallenden Niederschlags zur Nutzung in der Defizitperiode im Sommer. Die direkte Nähe zu den landwirtschaftlichen Nutzflächen und zu Cala d'Oliva verdeutlicht dies. Dementsprechend wird die Anlegung der Stauseen im Sinne einer Nutzungsintensivierung in diesem Zeitraum interpretiert. Aus den Interpretationen der detektierten Veränderungen ergibt sich zum einen eine intensivierte Landwirtschaft auf den in der Ebene gelegenen Ackerstandorten, zum anderen jedoch eine – an einigen Standorten – aufgegebene oder nachlassende Nutzung der Terrassenkulturen.

Zeitraum 1986 – 2002

Die für die Change Detection dieses Zeitabschnitts genutzten Aufnahmen wurden am 12. Mai 1986 um 09:30 Uhr und am 25. Juni 2002 um 09:42 Uhr aufgenommen.

Da in DeltaCue für Landsat 5-Aufnahmen sensorspezifische Werte zur Berechnung der Tasseled Cap enthalten sind, konnte diese hier angewendet werden. Es wurde sowohl TCgreen als auch TCsoil berechnet. Außerdem wurde für einzelne Bänder das Image Differencing durchgeführt. Neben den zusätzlich verfügbaren Algorithmen, welche weitere Auswertungen ermöglichten, kam auch die verbesserte räumliche Auflösung des TM Sensors hinzu.

Der TCgreen Algorithmus ist darauf ausgelegt, Veränderungen der grünen Vegetation zu verdeutlichen. Abbildung 9 zeigt die detektierten Veränderungen zwischen 1986 und 2002. Sehr deutliche negative Veränderungen wurden in den flachen Küstenbereichen des nördlichen und südlichen Inselteils ermittelt, die in der ersten Untersuchung als landwirtschaftliche Nutzflächen identifiziert wurden **(1)**. Neben diesen wurden mehrere Pixel hervorgehoben, die sich stark an dem Höhenzug auf dem nördlichen Inselteil orientieren **(2)**. Positive Veränderungen weist auch das bereits im vorherigen Abschnitt thematisierte Waldstück auf **(3)**. Hinzu kommen auf allen Inselteilen Bereiche an der West- bzw. Nordwestküste. Kleinräumige, jedoch sehr intensive, positive Veränderungen finden sich außerdem im Bereich der Stauseen, vor allem westlich von Cala d'Oliva und westlich von Campu Perdu. Außerdem hervorzuheben ist eine der im vorherigen Kapitel identifizierten Terrassenstrukturen **(4)**, in deren Bereich eine negative Veränderung detektiert wurde.

Das TCSoil-Ergebnis, welches Informationen zu der Veränderung der Reflexion von Böden liefern soll, hebt Zunahmen in ähnlichen Bereichen hervor, in denen der TCgreen Algorithmus Abnahmen aufzeigt. Dies ist z.B. in den flachen Küstenbereichen sowie auch auf dem Höhenzug auf dem nördlichen Inselteil der Fall. Hinzu kommen neben einer linearen Struktur auf dem mittleren und südlichen Teil der Insel auch ausgedehnte Flächen im Bereich des Granodiorits. Außerdem werden auf dem Wasser sehr viele Veränderungen (positiv und negativ) detektiert.

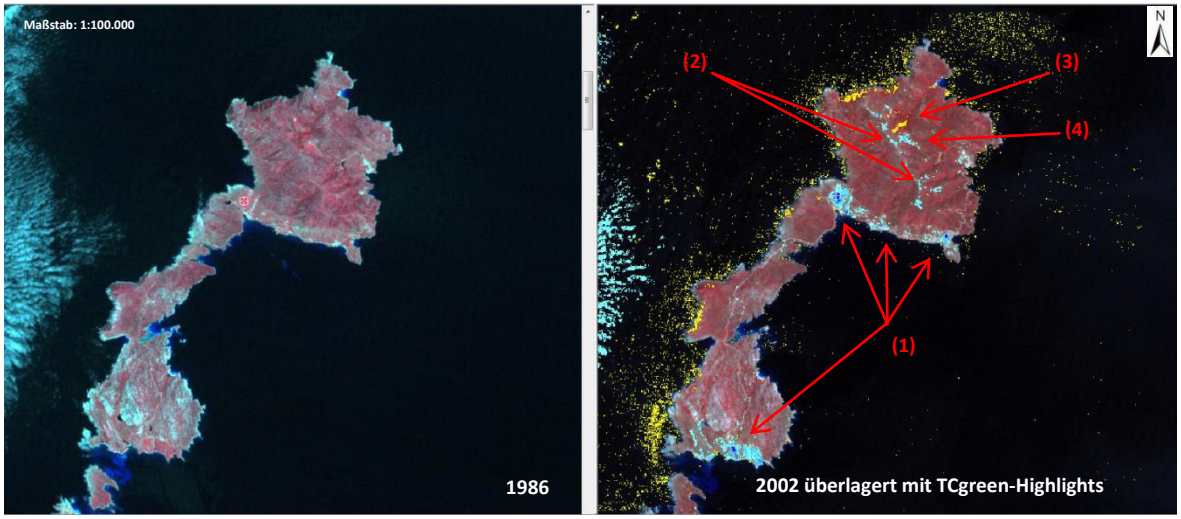

Abb. 9: Ergebnis der Change Detection. Grenzwerte: +10% (Gelb) / -20% (Blautöne, Intensität zunehmend).

Die Ergebnisse der Untersuchungen des NIR (Abnahme) und des Kanals im sichtbaren Rot (Zunahme) heben ebenfalls die Bereiche hervor, in denen das TCgreen- Ergebnis die höchsten negativen Veränderungen anzeigte (vgl. Abb. 9 und vgl. STADTMANN 2013).

Eine Veränderung, die an der Westküste etwas unterhalb von Campu Perdu lokalisiert ist und sowohl bei TCgreen als auch bei TCsoil positiv hervorgehoben wurde, ist auf eine Wolke zurückzuführen, die sich in diesem Bereich auf der 1986er Aufnahme befindet. Die lineare Struktur, die vor allem auf dem südlichen und mittleren Inselteil deutlich wird, stellt eine Straße dar. Auf dem nördlichen Teil der Insel ist die Straße lediglich in dem flachen Küstenbereich detektiert, nicht jedoch im weiteren Verlauf an der Ostküste in Richtung Cala d'Oliva. Ob die Veränderung durch einen möglichen Ausbau der Straße hervorgerufen wurde, konnte nicht geklärt werden. Die umfangreichen Ergebnisse auf dem Wasser können durch verschiedenste Einflüsse, wie eine Trübung oder unterschiedliche Windverhältnisse, entstanden sein.

Bei der Betrachtung der anderen Ergebnisse wird deutlich, dass sich gerade die intensiven Veränderungen eindeutig bestimmten Reliefeinheiten zuordnen lassen: Zum einen den flachen Bereichen, in denen Landwirtschaft praktiziert wurde und zum anderen den Kuppenbereichen, insbesondere dem von Nordwest nach Südost streichenden Höhenzug auf dem nördlichen Teil der Insel sowie außerdem einer der Terrassenstrukturen. Die TCgreen-Ergebnisse zeigen eine deutliche Abnahme von vegetationsspezifischer Reflexion auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen, sowohl in den Küstenbereichen als auch bei den angelegten Terrassen. Dies wird durch das TCsoil- Ergebnis und auch durch das Image Differencing des NIR-Bandes und des Kanals im sichtbaren Rot gestützt (vgl. STADTMANN 2013). Die detektierte Zunahme im sichtbaren Rot bestätigt die Annahme, dass in diesen Positionen eine deutliche Veränderung der Vegetation stattgefunden hat: Chlorophylle absorbieren im Rotbereich, weshalb dieser bei einer dichten Vegetation gering ausgeprägt ist. Wird die Vegetation entfernt, sinkt die Absorption und die Reflexion im sichtbaren Rot nimmt zu (HILDEBRANDT 1996:33).

Die Veränderung ist dadurch zu erklären, dass zum Zeitpunkt der Aufnahme von 2002 bereits der Nationalpark ausgewiesen war und somit keine Landwirtschaft mehr auf Asinara betrieben wurde. Auch ohne die Ausweisung des Nationalparks wäre ein vergleichbares Ergebnis jedoch möglich: Während bei der Aufnahme von 1986 (Mai) die Felder noch bestellt waren, was durch die intensive rote Färbung der Flächen auf dem NIR-Falschfarbenbild deutlich wird, ist eine bereits durchgeführte Ernte und damit brach liegende Flächen Ende Juni (Zeitpunkt der zweiten Aufnahme) vorstellbar.

Der Aufnahmezeitpunkt ist auch als Erklärung für die zu großen Teilen geringfügigen, jedoch großflächigen Unterschiede im Bereich des NIR heranzuziehen. Dass die detektierten Abnahmen größtenteils von geringer Ausprägung sind, deutet darauf hin, dass keine grundlegende Veränderung in der Vegetationszusammensetzung stattgefunden hat. Im Mai ist die Vegetation aufgrund einer besseren Wasserverfügbarkeit als vitaler anzusehen als Ende Juni. Auch hier ist wieder zu erkennen, dass diese geringfügigen Veränderungen weniger die Täler betreffen, sondern die Hänge und Kuppen.

Letztere sind jedoch auch durch deutlichere Veränderungen geprägt, wie es die TC-Ergebnisse zeigen. Aufgrund der exponierten Lage kann dort zum einen eine Veränderung durch Erosion eintreten, zum anderen kann auch hier der jahreszeitliche Unterschied als Begründung herangezogen werden, da die in den Kuppenbereichen ohnehin spärliche Vegetation im Sommer wegen der Trockenheit weniger ausgeprägt sein dürfte. Als „Beleg“ für diese unterschiedliche Wasserverfügbarkeit kann der Zustand der Stauseen herangezogen werden, die in der Juli- Aufnahme deutlich weniger Wasser aufweisen. Dies ist einerseits bei einer visuellen Interpretation der Multispektralaufnahmen erkennbar, wird jedoch auch durch die TC-Algorithmen angezeigt.

Auf den aktuelleren Luftbildern ist eindeutig zu erkennen, dass auf bestimmten Gesteinen eine deutlich spärlichere Vegetation angesiedelt ist als auf anderen. Dies ist z.B. auf dem Granodiorit der Fall, was auch in den Landsat-Aufnahmen deutlich wird. Eine Begründung könnte die Resistenz des Gesteins sein, welche die Bodenbildung und die Ansiedlung von Pflanzen erschwert. Doch auch auf anderen Gesteinen wie dem Cala d’Oliva-Orthogneis wird dies deutlich. Es erscheint plausibel, dass die Pflanzen auf diesen ‚Extremstandorten‘ aufgrund der geringeren Wasserspeicherfähigkeit des Untergrundes bereits frühzeitiger vertrocknen als Pflanzen auf günstigeren Standorten, wie sie z.B. die Tiefenbereiche darstellen.

Der Trend der Zunahme an Vegetation im Bereich des Waldstückes scheint sich auch in diesem zweiten Zeitabschnitt fortgesetzt zu haben, was die per TCgreen identifizierte Vegetationszunahme in diesem Bereich und in der Umgebung zeigt. Auch auf dem südostexponierten Hang des Tales, der sich also nördlich des Waldes befindet, ist eine solche Zunahme verzeichnet (vgl. STADTMANN 2013).

Zeitraum 1999 – 2003

Die für die Change Detection dieses Zeitabschnitts genutzten Aufnahmen wurden zu folgenden Zeitpunkten aufgenommen: 11. Juli 1999, 09:59 Uhr und 19. Mai 2003, 09:54 Uhr.Das Ergebnis des TCsoil zeigt deutliche Zunahmen in unterschiedlichen Bereichen der Insel. Ein eindeutiger Schwerpunkt ist der im Süden der Insel anstehende Granodiorit **(1)** (s. Abb. 10). Hinzu kommen ausgedehnte Bereiche an der steilen Westküste der Insel, welche sich sowohl auf die felsigen Klippen als auch auf das Meer beziehen. In geringer ausgeprägter Form findet sich dieses Ergebnis an der gesamten Küste. Die intensivste Zunahme wird jedoch auf dem nördlichen Teil der Insel, westlich von Elighe Mannu ausgewiesen **(3)** (s. Abb. 10). In unmittelbarer Nähe zu diesen finden sich auch Pixelcluster, die Abnahmen anzeigen. Eine ähnliche, jedoch flächenmäßig kleinere Variante findet sich bei Tumbarino. Ebenfalls auffallend sind Abnahmepixel in den Bereichen, die, wie in den vorherigen Kapiteln verdeutlicht, zuvor unter landwirtschaftlicher Nutzung standen **(4)** sowie in der Umgebung der Stauseen.

Der TCgreen-Algorithmus ermittelt für die Abnahme pflanzenbürtiger Reflexion Flächen, die sich stark mit den Zunahmen des TCsoil-Ergebnisses überschneiden. Auch hier ist ein Schwerpunkt auf dem südlichen Inselteil vorhanden, der sehr deutlich ausgeprägt ist. Weiterhin ist der Küstenstreifen des nördlichen Inselteils von Bedeutung ebenso wie Cala d’Oliva und Umgebung**.** Außerdem ergeben sich ebenfalls dort intensive Zunahmen, wo diese auch im TCsoil-Ergebnis verzeichnet wurden. Ebenso hervorgehoben wird ein Hang, an dem in den vorherigen Kapiteln eine Terrassenstruktur beschrieben wurde.

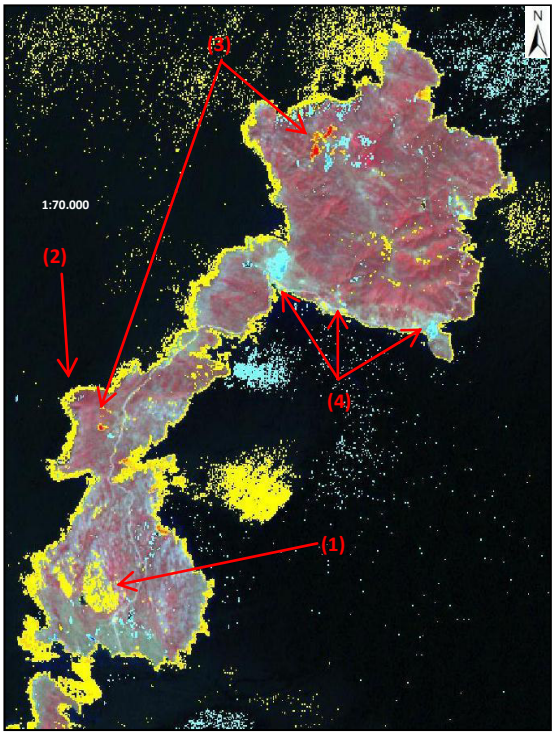

Abb. 10: TCsoil Ergebnis der Szene von 2003.

Auch in dem Ergebnis des Image Differencings des NIR-Kanals finden sich Überschneidungen mit den anderen Erkenntnissen. Es treten zudem einige steile Bereiche der Westküste besonders hervor. Abnahmen finden sich außerdem auf den ehemaligen Landwirtschaftsflächen, insbesondere bei Campu Perdu und Trabuccato ebenso wie bei Cala d'Oliva.

Im Bereich des sichtbaren Rots ergab das Image Differencing eine Zunahme der Reflexion von weitgehend vegetationsfreien Flächen wie freiliegenden Gesteinen, Stränden und Gebäuden. Sowohl der im Süden der Insel freiliegende Granodiorit als auch Gebäudeansammlungen wie Cala d'Oliva und die größeren Strände der Insel werden hervorgehoben. Auch das ebenfalls mittels Image Differencing untersuchte panchromatische Band, welches bei dem Landsat 7 mit einer räumlichen Auflösung von 15 Metern vorliegt, weist (ausschließlich) diese Bereiche als verändert aus.

Die vorliegenden Ergebnisse sind aus mehreren Gründen schwer zu interpretieren: Die in den Landsat-Szenen enthaltenen Unterschiede sind erheblich. Die relativ deutlich abweichende Jahreszeit könnte ein Grund hierfür sein. Während die Uhrzeit der Aufnahme annähernd identisch war, war der Winkel der Sonneneinstrahlung ein anderer, was zu sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Aufnahmen führen kann. Hauptgrund dürften jedoch die in der Szene enthaltenen Wolken sein, welche die Change Detection, trotz der Berücksichtigung bei der Normalisation der Bilder, negativ beeinflussen können. Durch Wolken und deren Schatten entstehende Fehldetektionen liegen südöstlich des Ortes Elighe Mannu vor und bei Tumbarino vor (**(3)** in Abb. 10). Die Veränderungen im Bereich der Stauseen sind durch den unterschiedlichen Wasserstand zu erklären, welcher aufgrund des früheren Aufnahmezeitpunktes bei der Szene aus dem Jahr 2003 höher ist. Die Abnahmen auf den ehemaligen Landwirtschaftsflächen hingegen können für eine Veränderung in den ersten Jahren nach der Aufgabe der Landnutzung stehen.

Trotz der festgestellten Störeinflüsse und des jahreszeitlichen Unterschieds, aufgrund derer bei einer Interpretation vorsichtig vorgegangen werden muss, kann die Aussage getroffen werden, dass in dem untersuchten Zeitraum keine intensiven Eingriffe auf Asinara stattgefunden haben, wie es aufgrund der Ausweisung als Nationalpark zu vermuten war. Die Veränderungen auf den ehemaligen Nutzflächen weisen auf eine Änderung der Vegetation hin, welche als eine ablaufende Sukzession mit einem von Gräsern dominierten Anfangsstadium interpretiert wird, die an die Stelle der zuvor vorhandenen Nutzpflanzen bzw. deren Erntereste treten.

4.2 Überwachte Klassifikation

Das Ergebnis der Klassifikation ist in Abbildung 11 zu sehen. Die dunkelgrünen Flächen stellen die immergrüne Vegetation dar, während Hellgrün für die niedrigere Vegetation steht. Der sehr hell erscheinende Weg soll in Rot dargestellt werden und offene Boden- oder Gesteinsflächen in Beige. Alle Pixel wurden auf der Grundlage der berechneten Wahrscheinlichkeiten einer der durch die Trainingsgebiete vorgegebenen Merkmalsklassen zugewiesen. Das Ergebnis zeigt, neben einer großen

Zahl korrekt klassifizierter Pixel, auch offensichtliche Fehlklassifikationen. Diese betreffen einerseits die Wasserfläche, auf der einige Pixel als Vegetation klassifiziert wurden. Dies kommt zum einen am Rand des Gewässers vor, wo Pflanzen vom Ufer bis über das Wasser ragen. Es finden sich zum anderen jedoch auch Fehldetektionen auf der freien Wasserfläche, wo in dem Originalbild möglicherweise Wasserpflanzen zu finden sind. Darüber hinaus finden sich auf der Landfläche Pixel, die als Wasser klassifiziert werden. Dieser Fehler tritt vor allem dort auf, wo größere Pflanzen Schatten werfen. Auf diese Problematik wurde in Kapitel 3.2.4 hingewiesen. Ein Fehler, der ebenfalls dort aufgeführt wurde, ist die Überlappung der Punkthaufen bei ähnlichen Merkmalsklassen. Dies ist hier bei den Pixeln der Fall, die irrtümlich als Weg klassifiziert wurden, so z.B. südwestlich des Sees. Die spektralen Signaturen des Weges und der offenen Bodenflächen sind sich ähnlich. Aus diesem Grund kommt es in den Bereichen, in denen der Boden besonders stark reflektiert, zu der Fehlklassifikation. Dieses Beispiel veranschaulicht die Probleme, die bei einer Klassifikation auftreten können. Obwohl hier eigentlich gut zu unterscheidende Objektklassen gewählt wurden, kam es trotzdem zu Fehlklassifizierungen. Soll eine genauere Einteilung von unterschiedlichen Vegetationsklassen erfolgen, deutet dies auf einen sehr hohen Arbeitsaufwand bei der Definition der Trainingsgebiete und der Überprüfung des Ergebnisses hin. Nur so kann eine Datengrundlage geschaffen werden, mit der verlässliche flächenhafte Aussagen zu der Verbreitung von Biotoptypen getroffen werden können.

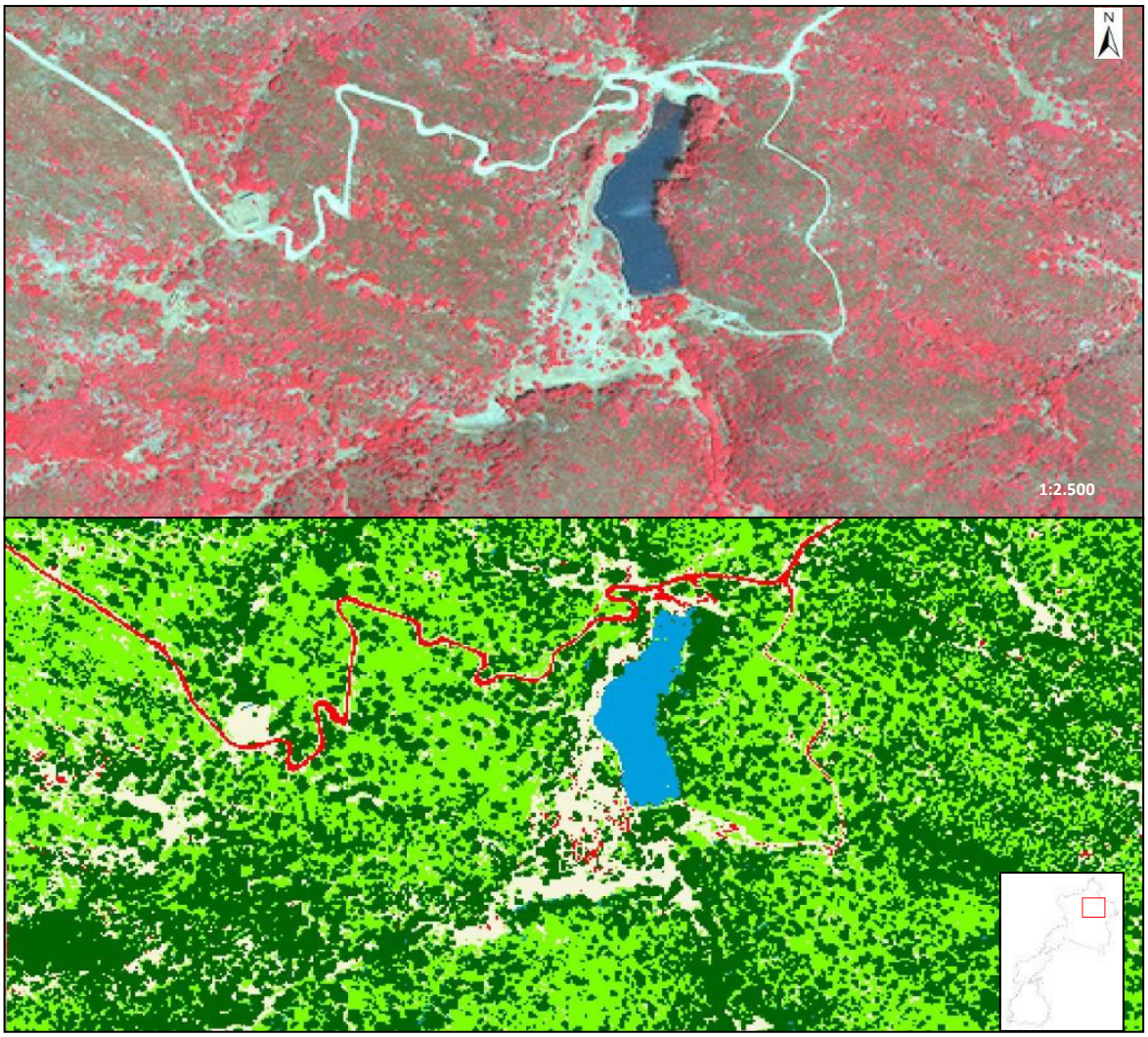

Abb.11: Ausgangsbild (oben) und Ergebnis (unten) der Multispektralklassifizierung mittels Maximum-Likelihood-Verfahren.

5 Diskussion

5.1 Landnutzungsentwicklung

Mehrere, für den Mittelmeerraum charakteristische Eigenschaften der Landnutzung konnten auch für Asinara bestätigt werden:

- Lange Nutzungsgeschichte
- Degradierung der ehemaligen Vegetation
- Gefahr der Bodenerosion
- Wasserknappheit im Sommerhalbjahr
- Intensive Nutzung der wenigen Gunsträume
- Terrassenkulturen

Die lange und intensive Nutzung des Mittelmeerraums und die daraus hervorgehende Degradierung der Ökosysteme ist vielfach diskutiert und dokumentiert (vgl. ROHDENBURG & SABELBERG 1973, BRÜCKNER 1986, RUNDEL et al. 1998, VOGIATZAKIS et al. 2008). Als grundlegender Faktor wird dabei die Entfernung der natürlichen Vegetation gesehen, der weitere Folgen, wie die Bodenerosion, ermöglichte. Auch Asinara war den Kulturen, welche die Veränderung der Ökosysteme vorantrieben, wohlbekannt (PULINA & MELEDDU 2012:49).

Für die Zeit vor 1885, als die Gefängnisnutzung begann, ist eine landwirtschaftliche Nutzung der Insel durch im Mittelalter siedelnde Mönche und anschließend dort lebende Hirten bekannt (PULINA & MELEDDU 2012:49). Die lange Geschichte der Nutzung kann anhand alter Siedlungsspuren verdeutlicht werden. Neben den noch bestehenden Gebäuden, die laut GORGOLINI (2012:91) 1885 erbaut wurden und von denen heute viele bereits nicht mehr in Nutzung sind, wurden bei der visuellen Interpretation der Orthofotos auf der ganzen Insel verteilt die Grundmauern ehemaliger Gebäude identifiziert. Dass Asinara, wie von mehreren Autoren angeführt (vgl. PULINA & MELEDDU 2012, UNESCO 2006), über einen längeren Zeitraum bis hin zu der Räumung der Insel von Hirten bewohnt wurde, bestätigt eine im Mittelmeerraum weit verbreitete Nutzungsform: Weidenutzung. Insbesondere die für Ackerbau wenig attraktiven Flächen wurden als Weidegebiete genutzt (PUNGETTI et al. 2008:156). Es sind allerdings keine Angaben über die Intensität der Weidenutzung bekannt.

Bei der visuellen Interpretation der Luftbilder und bei der Auswertung verfügbarer Geodaten wurde deutlich, dass sich neben den Grundrissen von Gebäuden weitere Nutzungsspuren finden. Verteilt über die ganze Insel wurden Steinmauern identifiziert (Abb. 13, links oben). Eine mögliche Interpretation zu deren Nutzung wäre, dass sie als Weideumgrenzungen dienten. Für diese Ansicht spricht, dass sie sich auf der ganzen Insel – außer auf dem zerklüfteten Granodiorit - finden und vor allem Bereiche betreffen, die aufgrund ihrer Lage und des Untergrundes nicht für eine ackerbauliche Nutzung sprechen. Trotzdem ist auch extensiv betriebener Ackerbau vorstellbar. Es erscheint naheliegend, dass die Mauern aus Lesesteinen errichtet wurden. Neben der dadurch erleichterten Bearbeitbarkeit wurden so eine Begrenzung sowie auch ein Erosionsschutz geschaffen. Unabhängig von der genauen Nutzung der Flächen lässt sich hieraus ableiten, dass Asinara flächendeckend genutzt wurde und – ebenfalls unabhängig ob für einen Ackerstandort oder eine Weide – **die natürliche Vegetation entfernt wurde**.

Prägende Elemente der Insel, für die auch mehrfach Veränderungen detektiert wurden, sind die flachen Küstenbereiche. Auf Asinara finden sich in diesen Bereichen zum einen Siedlungen, zum anderen aber dort, wo der Untergrund es zulässt, ehemals landwirtschaftlich genutzte Flächen. Besonders die in der Geologischen Karte ausgewiesenen quartären Sedimente bieten sich zur Nutzung an, da hier Lockergesteine vorliegen und die Bodenbildung aufgrund des vorhandenen, tiefgründigeren Mineralkörpers schneller voranschreiten konnte als auf den Intrusivgesteinen und Metamorphen Gesteinen. In der Auswertung wurde deutlich, dass die am intensivsten genutzten Standorte sich auf diese Flächen konzentrierten. Die angelegten Terrassen weisen zum einen auf Wasserknappheit auf

der Insel sowie auf einen gewissen Nutzungsdruck hin. Andererseits konnte die Anlage von Terrassen zur Verringerung der fluvialen Bodenerosion beitragen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass auf der Insel während der Zeit nach dem 1. Weltkrieg, spätestens – wie durch das Luftbild belegt werden konnte - ab 1954, Landwirtschaft betrieben wurde. GORGOLINI (2012:91) betont, dass dies jedoch zumindest in der Zeit bis zum 1. Weltkrieg nur in sehr geringen Ausmaßen der Fall war. Die visuelle Interpretation ergab das Bild einer Nutzung, die zwischen 1954 (1. Luftbild) und 1972 (1. Landsat- Aufnahme) intensiviert wurde, was die in diesem Zeitraum neu angelegten vier Stauseen verdeutlichen (s. Abb. 13).

Der klimatisch bedingte Wassermangel ist auf der Insel in den anthropogenen Hinterlassenschaften allgegenwärtig: Die Stauseen und auch die Terrassenkulturen zeugen noch heute von den Versuchen, die Produktivität der Landwirtschaft auch bei Zeiten des Wasserdefizits aufrecht zu erhalten. Die Exposition einiger Terrassierungen, die nordwestlich ausgerichtet sind, scheint zur Verringerung der Wasserverluste durch Verdunstung gewählt worden zu sein. Abbildung 12 zeigt eine südexponierte Terrassenstruktur zwischen Periodo Secondo und Trabuccato, welche das aus den höheren Lagen bei Niederschlag abfließende Wasser auffängt und über mehrere Terrassenstufen bis hin zur Küste leitet. Während in dem linken Bild (2008) deutlich wird, dass keine Nutzung mehr stattfindet, sind die Felder im rechten Bild (1977) noch bestellt. Eine vergleichbare Terrassenkultur konnte nordöstlich von Trabuccato identifiziert werden.

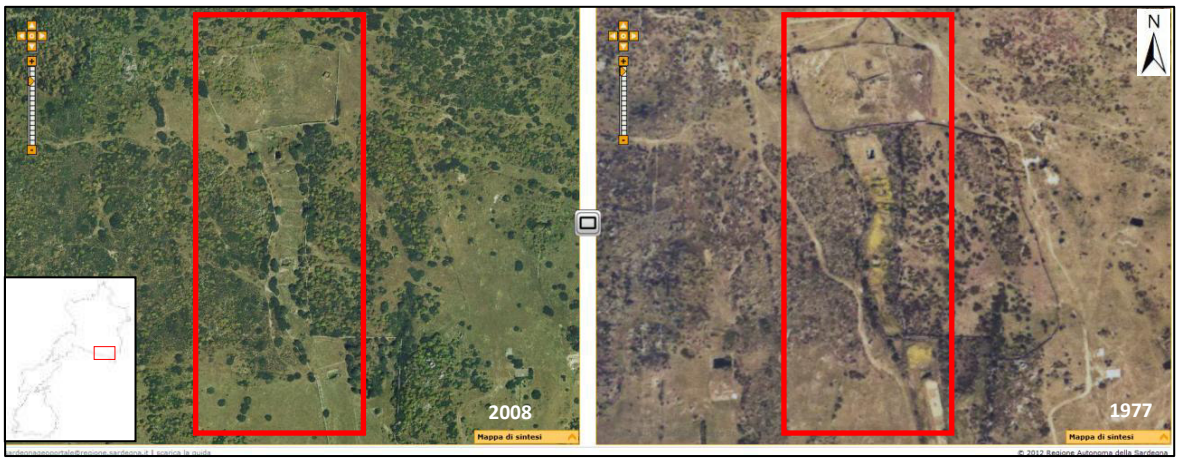

Abb.12: Terrassen mit Bewässerung an der südlichen Küste des nördlichen Inselteils. Bild : REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2012.

Neben dem Klimagang ist auch die Variabilität der Niederschläge, welche sich negativ auf die Ertragssicherheit auswirkt, als Grund für die Anlegung der Stauseen zu sehen (WAGNER 2001:219). Da es keine ergiebigen Quellen auf der Insel gibt, mussten zu Zeiten der Gefängnisnutzung und insbesondere zu der Zeit, als die Kriegsgefangenen auf der Insel waren, Tankschiffe die Insel mit Wasser versorgen (GORGOLINI 2012:91). GHIGLIERI et al. (2010:8) verdeutlichen dieses Problem in ihrer Arbeit zur Gefahr der Desertifikation in der Nurra, der Küstenregion in NW-Sardinien, welcher auch Asinara zuzuordnen ist. Diese benennt neben der anthropogenen Übernutzung der Wasserressourcen auch den Klimawandel als Faktor für eine zunehmende Wasserknappheit. Auch für Asinara ist also von einer zunehmenden Verknappung der Wasserressourcen auszugehen.

Eine sehr intensive Nutzung stellten die Kriegsgefangenenlager dar, die an vier Standorten angelegt wurden und jeweils zwischen 1200 und über 6000 Gefangene beherbergten (GORGOLINI 2012:109). Neben den bekannten Orten Campu Perdu, Tumbarino und Fornelli ist hier das Piano gli

Stretti zu nennen. Auf diesem relativ kleinen, flachen Bereich wurden über 5500 Gefangene festgehalten (GORGOLINI 2012:109). Die Positionen der Lager sind in Abbildung 13 verdeutlicht.

Die Flächen, die bis zu der Nationalparkausweisung landwirtschaftlich genutzt wurden, weisen heute eine Vegetation auf, die wohl hauptsächlich von Gräsern dominiert ist. Verbuschungsstadien, wie sie einige bereits länger nicht mehr genutzte Terrassen zeigen, sind hier auch auf den aktuellsten Orthofotos (2008, 2012) und auch der Quickbird-Satellitenaufnahme (2012) noch nicht oder nur in einem Initialstadium festzustellen. Allerdings ist bei den Terrassen auch eine schnellere Sukzession vorstellbar, da die Strukturen nach wie vor die anthropogen geschaffenen Vorteile (Wasserverfügbarkeit und Erosionsschutz) aufweisen. Um die raumzeitliche Veränderung der Landnutzung zu visualisieren, wurden die Ergebnisse digitalisiert und in der Geodatenbank hinterlegt. Abbildung 13 am Ende dieses Kapitels zeigt eine zeitliche Differenzierung der vorgefundenen Landnutzungsstrukturen.

Eindeutige Aussagen zur Vegetationsentwicklung der Insel lassen sich mit den gewonnenen Ergebnissen nur bedingt machen. Es wurde klar, dass sich die Vegetation im Bereich des Waldstückes bei Elighe Mannu seit 1954 verdichtete und ausbreitete. Die Standortfaktoren ermöglichen also zumindest auf bestimmten Standorten die Entwicklung einer Waldvegetation. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die nordexponierten Hänge (v.a. im Südosten des nördlichen Inselteils) eine dichtere Vegetation tragen als südlich exponierte Hänge. Dies wird auf die unterschiedliche Evapotranspiration zurückgeführt und unterstreicht die Bedeutung des Wasserhaushaltes der Standorte für die dort wachsenden Pflanzen.

Auf dem Granodiorit entwickelt sich nur eine sehr spärliche Vegetation, die sich vor allem auf die Kluftflächen konzentriert. Begründet werden kann dies mit der Verwitterungsresistenz des Gesteins, welche Bodenbildung und die Ansiedlung von Pflanzen deutlich einschränkt (STAHR et al. 2012:32ff). Die steile und felsige Westküste weist ebenfalls nur eine sehr lückenhafte Vegetationsbedeckung auf, ebenso wie die Bereiche, an denen die Gesteine auf anderen Teilen der Insel an die Oberfläche treten. Wie in Kapitel 2 verdeutlicht, sind neben den Einflüssen des Menschen also auch natürliche Gradienten, die durch Geofaktoren wie das Relief beeinflusst werden, für die Vegetationsentwicklung ausschlaggebend (vgl. auch CARMEL & KADMON 1999:243ff). Diese Ergebnisse ließen sich auch mit den recherchierten thematischen Daten zu Landnutzung und Vegetation abgleichen und bestätigen.

Abgesehen von solch markanten Bereichen ist die Aussagemöglichkeit begrenzt, da aufgrund fehlender Geländeergebnisse und der nicht flächendeckend durchgeführten Klassifikation keine exakten Veränderungen zwischen Vegetationsklassen aufgezeigt werden können. Auch für genaue Aussagen zu den Gründen der Vegetationsentwicklung fehlt die Kenntnis über elementare Einflüsse wie die Beweidung. Auf der Insel gibt es verschiedene Weidesysteme, über die Anzahl und Verbreitung der Tiere ist jedoch wenig bekannt. CARMEL & KADMON (1999:243ff) verdeutlichen, dass der Einfluss von Weidesystemen sowohl auf die Entwicklung krautartiger als auch hölzerner Vegetation erheblich ist und die Sukzession beeinflusst. Letztere verläuft abhängig von der Intensität der Degradierung. Bei der Betrachtung der nachweislich bereits länger nicht mehr in Nutzung stehenden Bereiche wird deutlich, dass die Umgebung der heute verfallenen Gebäude auch heute noch eindeutig von der ehemaligen Funktion geprägt ist. Eine intensive Nutzung scheint also zu einer nachhaltigen Degradierung zu führen, von der - je nach Degradierungsstufe - nur eine sehr langsame Erholung erfolgt. Weitere ehemalige Siedlungsplätze, die ähnliche Eigenschaften aufweisen wie die hier thematisierten, sind in Abbildung 13 verzeichnet. Gerade in den Küstenbereichen ist von einer Überprägung älterer Strukturen auszugehen. Die in der ersten Abbildung (links oben) dargestellten Mauern stellen lediglich die gut erhaltenen Überreste dar. Insgesamt sind die Strukturen noch deutlich umfangreicher. Die „alten“ Terrassenstrukturen waren lediglich auf dem ersten Luftbild (1954) noch zu erkennen und verschwanden auf den neueren Aufnahmen z.T. vollständig. In der Change Detection fielen sie nicht auf.

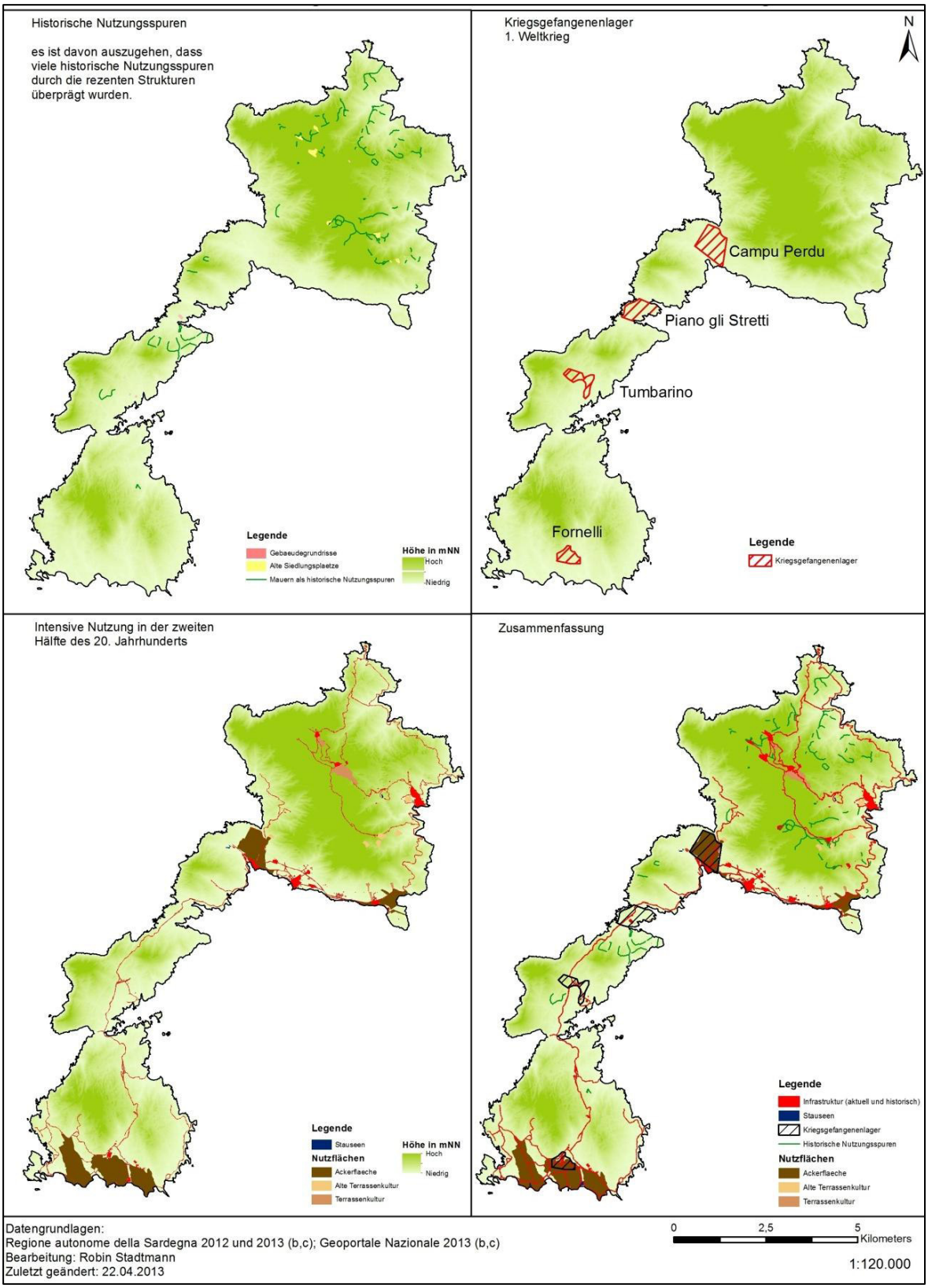

Abb. 13: Raumzeitliche Veränderung der Landnutzungsstrukturen auf Asinara.

Die vorliegenden Landnutzungsdaten aus den Jahren 2003 und 2008 (REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA 2013d) zeigen eine großflächige Ausbreitung der Macchie im nordöstlichen Bereich der

Insel auf zuvor als Garrigue ausgewiesenen Flächen. Dies konnte anhand der Orthofotos und der Quickbird-Szene nicht nachvollzogen werden.

Auch die Auswertung von verfügbaren CORINE- Landcover Daten aus den Jahren 1990, 2000 und 2006 (GEOPORTALE NAZIONALE 2013f) ergab keine nützlichen Informationen. Ein zwischen 1990 und 2000 stattfindender Verlust von als Laubwald charakterisierter Vegetation auf mehreren nordexponierten Hängen sowie dem Tal, in dem das im Rahmen dieser Arbeit identifizierte Waldstück liegt, konnte durch die Ergebnisse widerlegt werden. Die für Detailaussagen nicht ausreichende Genauigkeit der CORINE-Daten zeigt sich auch in der Ausweisung von nur einer Vegetationsklasse – einer von Sklerophyllen dominierten Vegetation - für den Großteil der Insel.

5.2 Methodik und Datengrundlage

Die genaue Kenntnis der Qualität der Datengrundlage ist entscheidend für jede datenbasierte Arbeit insbesondere bei der Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise bei der Auswertung. Wie bereits beschrieben, ist die temporale Auflösung der **Landsat-Daten** prinzipiell als gut zu bezeichnen, da die Wiederkehrrate des Satelliten vorliegt. Allerdings wurde bei der Datenakquirierung deutlich, dass viele Aufnahmen, insbesondere der älteren Landsat-Modelle, nicht den gewählten Qualitätsansprüchen entsprachen. Hinzu kommt, dass das Landsat-Programm deutliche zeitliche Aufnahmelücken über Europa (und auch anderen Kontinenten) aufweist (USGS 2012), sodass neben dem SLC-off-Problem eine weitere Einschränkung der Auswahl stattfand. Die Verfügbarkeit von Bildern für den gewünschten Zeitraum und zu vergleichbaren jahreszeitlichen Aufnahmebedingungen ist eingeschränkt. Wie in der Auswahl der genutzten Landsat-Szenen deutlich wird, konnte diese Problematik nicht vollständig umgangen werden und musste durch eine sorgfältige Interpretation und die Wahl der Grenzwerte kompensiert werden. Gründe für die Wahl des Sommers als Aufnahmezeitpunkt sind die bessere Datenverfügbarkeit, die Strahlungsverhältnisse und eine relative Stabilität der Phänologie der Pflanzen (THÉAU 2012:177). Die Länge der Zeitschreiben orientierte sich neben der Verfügbarkeit von Daten außerdem an den Startzeitpunkten neuer Landsat-Satelliten mit qualitativ hochwertigeren Scannersystemen.

Die Bedeutung von Metadaten kam bei der Bearbeitung der Fragestellungen zur Geltung. Während die Dokumentation von Aufnahme und Verarbeitung bei den Landsat-Daten sehr gut war, konnten die Metadaten für mehrere Orthofotos nicht ermittelt werden. Somit war deren digitale Auswertung nicht möglich, da sie ohne die fehlenden Informationen eine zu hohe Fehlerquelle dargestellt hätte. Ein digitaler multitemporaler Ansatz wäre hier jedoch aufgrund der hohen Qualitätsunterschiede ohnehin schwierig gewesen. Auch der **Quickbird**-Satellit kam für diese Art der Analyse bei der hier vorliegenden Zielstellung, die Landnutzungsänderungen für einen **möglichst weit zurückreichenden Zeitraum zu** ermitteln, nicht in Frage, da er erst im Jahr 2001 startete. Zu der Verwendung der Landsat-Daten gab es somit keine Alternative. Aus diesem Grund musste die geringe räumliche Auflösung der Datengrundlagen zugunsten des großen zu betrachtenden Zeitraumes akzeptiert werden. Die Orthofotos sowie auch die Quickbird-Daten wogen diese Nachteile vor allem durch die deutlich höhere räumliche Auflösung auf, welche erst detailliertere Interpretationen ermöglichte. Durch die spektrale Auflösung verbesserte die Quickbird-Aufnahme außerdem die Aussagemöglichkeiten für das Jahr 2012.

Tabelle 2 fasst die Vor- und Nachteile der jeweiligen Datengrundlagen zusammen. „Historie“ bezieht sich auf die Verfügbarkeit möglichst weit zurückreichender Aufnahmen. In der Spalte „Zeitaufwand“ wird die für die Auswahl der Szenen und deren Aufbereitung zu investierende Zeit bewertet. Zu der negativen Kennzeichnung der Landsat-Daten in der Spalte „Zeitaufwand“ führte die große Menge an verfügbaren Aufnahmen, von denen jedoch viele aus Qualitätsgründen nicht zu gebrau-

chen waren. Trotz der Filtermöglichkeiten bei der Auswahl musste hier viel Zeit investiert werden, um die passenden Szenen zu finden.

Tab. 2: Übersicht zu den genutzten Fernerkundungsdaten sowie deren Vor (+)- u. Nachteilen (-).

Daten-grundlage	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung	Temporale Auflösung	Historie	Kosten	Softwarekauf notwendig	Zeitauf-wand
Orthofotos	+	/	-	+	+	+	+
Landsat	-	+	+	+	+	-	-
Quickbird	+	+	+	-	-	-	+

Change Detection

Durch die Kombination von visueller Interpretation und digitaler Auswertung konnten einige Schwächen der jeweiligen Methoden ausgeglichen werden. Die Stärken der menschlichen Wahrnehmung (vgl. ALBERTZ 2009:155f) in der Erkennung von Formen, Strukturen und vor allem Zusammenhängen, gepaart mit der Genauigkeit digitaler Auswertungsmethoden ermöglichten eine, für die hier verfügbaren Datengrundlagen, gute Interpretation der Landnutzungsentwicklung.

Es ist jedoch zu betonen, dass die generellen Probleme, die in der Literatur hinlänglich beschrieben sind, auch hier Hindernisse darstellten. Zu nennen wären Probleme wie Mischsignaturen (ALBERTZ 2009:163), phänologische Unterschiede in der Vegetation aufgrund der Variabilität des Klimas oder unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte (HILDEBRANDT 1996:39f) sowie trotz radiometrischer Korrektur auftretende Störungen der Datengrundlage (ALBERTZ 2009:120). Trotz der Aufbereitung der Landsat-Daten durch das USGS und des mittels DeltaCue durchgeführten pre-processings wurden, insbesondere bei dem letzten Zeitabschnitt, Störeinflüsse deutlich. Letztlich kann in der Praxis nicht davon ausgegangen werden, perfekte geometrische und radiometrische Übereinstimmung zu erreichen (THÉAU 2012:177). Daher ist die Wahl der Grenzwerte und die entsprechende Interpretation von zentraler Bedeutung um mögliche Restfehler zu minimieren. Auch durch die Beschränkung auf aufnahmesysteminterne multitemporale Vergleiche der Daten wurden mögliche systematische Fehler begrenzt.

Die Auswertung der Change Detection, wie sie hier durchgeführt wurde, muss ebenfalls diskutiert werden. Die Entscheidung darüber, welche als Highlight aus der Change Detection hervorgehenden Pixel wirklich von Interesse für eine Detailuntersuchung sind, ist subjektiv. Da aufgrund des erheblichen Aufwands nicht jedes Pixel einzeln betrachtet werden konnte, fand durch die Highlights eine Fokussierung auf Regionen statt, die eine interessante Veränderung vermuten ließen. Gründe hierfür konnte die Intensität oder Großflächigkeit des Highlights sein, ebenfalls jedoch Faktoren wie die Lage im Relief. Das Vorwissen des Interpreten über natürliche Prozesse oder anthropogene Aktivitäten in dem Gebiet waren sehr wichtig, um mit dieser Methodik gute Ergebnisse erzielen zu können. Die Wahl fiel vor allem aufgrund der vielen unterschiedlichen Datengrundlagen auf diese Herangehensweise (RICHARDS 2013:448ff). So war es möglich, in dem Entscheidungsprozess genau die Datengrundlagen zu nutzen, die in diesem Fall die höchste Aussagekraft versprachen.

Bei der Bewertung des Ergebnisses der Change Detection muss die Qualität der Datengrundlage berücksichtigt werden, da diese über die Aussagemöglichkeiten entscheidet. Dementsprechend kann die **Aussagegenauigkeit** der Change Detection für den Zeitraum 1972-1987 nicht als optimal bezeichnet werden. Asinara als Untersuchungsgebiet ist, durch die reliefbedingte kleinräumige Kammerung der Insel, nicht für eine Untersuchung mit dieser Datengrundlage prädestiniert, da die

Stärken der Landsat-Aufnahmen (und besonders des MSS-Sensors) eben nicht in kleinräumigen Aussagen liegen. Allerdings konnten Strukturen und Prozesse der Landnutzung erkannt und mit den anderen Datengrundlagen verdeutlicht werden. Die Verbesserung der Landsat-Aufnahmen mit der Inbetriebnahme des TM-Sensors ermöglichte detailliertere Aussagen, deren Qualität außerdem durch die Verfügbarkeit der Tasseled Cap Algorithmen eindeutig verbessert wurde. Eine Schwäche der Herangehensweise liegt darin, dass nicht exakt für Beginn und Ende der „Zeitscheiben" Orthofotos zur Kontrolle vorlagen. So konnten einige Highlights nicht eindeutig interpretiert werden, da in den zur Verfügung stehenden Aufnahmen keine Veränderung zu erkennen war.

Das Ergebnis dieser Untersuchung wird unter diesen Voraussetzungen positiv bewertet, da trotz der zum Teil suboptimalen Voraussetzungen die zuvor entworfene Vorgehensweise, mittels Change Detection interessante Räume hervorzuheben und diese mithilfe der Orthofotos genauer zu analysieren, erfolgreich war und die formulierten Teilziele erreicht werden konnten.

Klassifikation

Das interaktive Verfahren der überwachten Klassifikation ermöglicht es, bei einer visuellen Interpretation oder bei Geländebegehungen gewonnene Erkenntnisse über die Auswahl der Trainingsgebiete in die Klassifikation einzubringen (s. dazu auch ALBERTZ 2009:158) So kann auch die gewünschte Klasseneinteilung vorgegeben werden, um die Klassifikation zielorientiert zu gestalten. Die in Kapitel 4 verdeutlichten Fehlklassifizierungen zeigten aber auch die zuvor bereits in der Theorie geschilderten methodischen Probleme auf (Schattenwurf, Fehlklassifizierung aufgrund ähnlicher spektraler Signaturen). Obwohl für jede gewünschte Objektklasse mehrere Trainingsgebiete ausgewählt wurden, ließen sich die Fehler nicht vollständig umgehen.

Eine Multispektralklassifizierung bietet große Möglichkeiten zur Schaffung einer flächendeckenden Datengrundlage, beinhaltet allerdings auch viele Fehlerquellen. „Aus diesem Grunde verlangt die Anwendung der Methoden Sorgfalt, Sachkenntnis und praktische Erfahrung" (ALBERTZ 2009:164). Die Erkenntnisse der durchgeführten Klassifikation erfüllten das Ziel, den notwendigen Aufwand sowie Stärken und Schwächen des Verfahrens hervorzuheben.

6 Fazit und Ausblick

Es wurde sehr deutlich, dass die Möglichkeiten, die sich durch Methoden der Fernerkundung ergeben, heutzutage nicht unbedingt technisch, sondern **durch den notwendigen zeitlichen und finanziellen Aufwand sowie die Datenverfügbarkeit beschränkt** sind. Wie es die Quickbird-Daten zeigen, sind sehr hochwertige Daten vorhanden, die auch kleinräumige Aussagen ermöglichen und mit (kostenpflichtiger) Software wie Erdas Imagine ausgewertet werden können.

Die anfangs formulierten Teilziele konnten erreicht werden, indem ein den Möglichkeiten entsprechend qualitativ und quantitativ hoher Informationsgehalt zusammengeführt wurde. Die Nutzung unterschiedlichster Datengrundlagen ermöglichte die **Rekonstruktion der Landnutzungsentwicklung für die jüngere Vergangenheit Asinaras**. Auch für die Zeit davor konnten Informationen gewonnen und so die Vorstellung über die anthropogene Prägung der Insel verbessert werden. Diese Grundlage bietet die Möglichkeit, rezente Prozesse und Strukturen besser nachvollziehen zu können.

Ebenfalls als förderlich für weitere Untersuchungen erscheint eine **flächenhafte Umsetzung der hier exemplarisch durchgeführten Klassifikation**, da auf dieser Grundlage auch quantitative Aussagen zur Verbreitung von Biotoptypen gemacht werden können. Um ein genaues Ergebnis zu erhalten, welches eine brauchbare Datengrundlage (z.B. im Sinne einer Biotoptypenkartierung) darstellt, ist von einem erheblichen zeitlichen Aufwand auszugehen, der sich aus der Auswahl geeigneter Trainingsgebiete für die Klassifikation, deren Auswertung und Validierung („Accuracy Assessment") und Überarbeitung zusammensetzt (vgl. z.B. RICHARDS 2013:396). Hinzu kämen die Kosten für weitere

Quickbird-Szenen, um die ganze Insel abzudecken. In Kombination mit im Gelände gewonnenen Erkenntnissen bietet sich dann allerdings die Möglichkeit für eine hochwertige Klassifikation.

Die bereits zusammengeführten Datengrundlagen bilden ein gutes Gerüst für weitere Arbeiten. Hervorzuheben ist das **Digitale Geländemodell**, welches hier zur Unterstützung für die visuelle Interpretation genutzt wurde und durch vielfältige Auswertungsmöglichkeiten ein großes Potenzial für weitere Untersuchungen beinhaltet.

Literatur

AD-HOC-AG BODEN (2005[5]): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Verbesserte und erweiterte Auflage. Hannover: BGR & NLfB.

ALBERTZ, J. (2009[4]): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

BARSCH, H., BILLWITZ, K. & BORK, H.-R. (2000): Arbeitsmethoden in Physiogeographie und Geoökologie. Gotha: Justus Perthes Verlag.

BARTELME, N. (2005[4]): Geoinformatik. Modelle Strukturen Funktionen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

BOCCHIERI, E. (1988): L'isola Asinara (Sardegna nord-occidentale) e la sua flora.- Webbia **42**:227-268.

BRÜCKNER, H. (1986): Man's Impact on the Evolution of the Physical Environment in the Mediterranean Region in Historical Times. – Geojournal **13**:7-17.

CARMEL, Y. & KADMON, R. (1999): Effects of grazing and topography on long-term vegetation changes in a Mediterranean ecosystem in Israel. – Plant Ecology **145** (1999): 243-254.

CAROSI, R., DI PISA, A., IACOPINI, D., MONTOMOLI, C. & OGGIANO, G. (2004): The structural evolution of the Asinara Island (NW Sardinia, Italy). - Geodinamica Acta **17/5**:309-329.

EHLERS, M. & SCHIEWE, J. (2012): Geoinformatik. Geowissen kompakt. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

EXEL, R. (1986): Sardinien. Geologie, Mineralogie, Lagerstätten, Bergbau. Sammlung Geologischer Führer. Band **80**. Berlin: Borntraeger.

GHIGLIERI, G., BARBIERI, G., VERNIER, A., CARLETTI, A., PITTALIS, D. (2010): Sustainable Water Resources Management to Combat Desertification in the Nurra Region, Northwestern Sardinia, Italy. - Italian Journal of Agronomy **3** (2010):7-14.

GORGOLINI, L. (2012): Kriegsgefangenschaft auf Asinara. Österreichisch-ungarische Soldaten des Ersten Weltkriegs in italienischem Gewahrsam. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner.

GREUTER, W. (1995): Origin and peculiarities of Mediterranean island floras. – Ecologia Mediterranea **XXI** (1/2) (1995):1-10.

HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung. Für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Heidelberg: Wichmann.

HUGHES, P.D., WOODWARD, J.C. & GIBBARD, P.L. (2006): Quarternary glacial history of the Mediterranean mountains. –Progress in Physical Geography **30**:334-364.

IACOPINI, D., CAROSI, R., MONTOMOLI, C. & PASSCHIER, C.W. (2007): Strain analysis and vorticity flow in the Northern Sardinian Variscan Belt: Recognition of a partitioned oblique deformation event. - Tectonophysics. Heft **446**: 77-96.

INTERGRAPH CORPORATION (2013): ERDAS Imagine 2013. DeltaCue User Guide.

JAHN, R, (1997): Bodenlandschaften subtropischer mediterraner Zonen. – Handbuch der Bodenkunde. 2. Erg. Lfg. **3/97**; S. 1-28, Kapitel 3.4.5.4.

KAUTH, R.J. & THOMAS, G.S. (1976): The Tasselled Cap -- A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. - LARS Symposia. Paper **159**.

KLEIN, J. (1990[6]): Herder-Lexikon Geologie und Mineralogie. Freiburg i.Br, Basel: Herder Verlag.

DE LANGE, N. (2006²): Geoinformatik in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

LOHMANN, P. & JACOBSEN, K. (2004): Filterung segmentierter Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation Nr. **4** (2004):279-287.

LÖFFLER, E., HONECKER, U. & SABEL, E. (2005): Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten. Berlin/Stuttgart: Bornträger.

LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZIO, E. & MORAN, E. (2004): Change detection techniques. – International Journal of Remote Sensing Vol. **25**:2365-2407.

LU, D., MORAN, E., HETRICK, S. & LI, G. (2011): Land-Use and Land-Cover Change Detection. In: WENG, Q. (Hrsg.) (2011): Advances in Environmental Remote Sensing. Boca Raton: CRC Press.

MARTÍNEZ-MENA, M., LÓPEZ, J., ALMAGRO, M., ALBALADEJO, J., CASTILLO, V., ORTIZ, R. & BOIX-FAYOS, C. (2012): Organic carbon enrichment in sediments: Effects of rainfall characteristics under different land uses in a Mediterranean Area. – Catena **94** (2012):36-42.

MURAWSKI, H. & MEYER, W. (2010[12]): Geologisches Wörterbuch. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

PULINA, M. & MELEDDU, M. (2012): Defining a marine protected area strategy: A stakeholder perspective. – Ocean & Costal Management **66** (2012):46-55.

PUNGETTI, G., MARINI, A. & VOGIATZAKIS, I.N. (2008): Sardinia. In: VOGIATZAKIS, I.N., PUNGETTI, G. & MANNION, A.M. (Hrsg.) (2008): Mediterranean Island Landscapes. Natural and Cultural Approaches. Landscape Series, Volume 9. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.

RADKE, R., ANDRA, S. AL-KOFAHI, O. & ROYSAM, B. (2005): Image Change Detection Algorithms: A Systematic Survey. – IEEE Transactions on Image Processing **14**:394-307.

RICHARDS, J. A. (2013[5]): Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.

ROHDENBURG. H. & SABELBERG, U. (1973): Quartäre Klimazyklen im westlichen Mediterrangebiet und ihre Auswirkungen auf die Relief- und Bodenentwicklung. – Catena **1**:71-180.

ROTHER, K. (1985): Die mediterranen Subtropen. In: EHLERS, E. & LESER, H. (Hrsg.): Geographisches Seminar Zonal. Mittlere Breiten. Braunschweig: Westermann; Höller und Zwick.

RUNDEL, P. W.; MONTENEGRO, G. & JAKSIC, F. M. (1998): Landscape disturbance and biodiversity in Mediterranean-type ecosystems. Berlin, New York: Springer. - Ecological Studies **136**.

SEUFFERT, O. (1970): Die Reliefentwicklung der Grabenregion Sardiniens. Ein Beitrag zur Frage der Entstehung von Fußflächen und Fußflächensystemen. – Würzburger Geographische Arbeiten, Heft **24**.

SCHULTZ, J. (2008[4]): Die Ökozonen der Erde. Stuttgart: Verlag E. Ulmer.

SCHWEIZER, V. (2012): Wörterbuch der Geologie. Deutsch-Englisch = Dictionary of Geology : English-German. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

SONG, C., WOODCOCK, C.E., SETO, K.C., LENNEY, M.P & MACOMBER, S.A. (2001): Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmosheric Effects? – Remote Sensing of Environment **75**:230-244.

STADTMANN, R. (2013): Entwicklung einer Geodatenbank mittels GIS und Erdas Imagine für den Nationalpark Asinara (Sardinien). Masterarbeit

STAHR, K., KANDELER, E., HERRMANN, L. & T. STRECK (2012²): Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Stuttgart: Ulmer.

THÉAU, J. (2012): Change Detection. In: KRESSE, M., DANKO, D.M. (2012): Springer Handbook of Geographic Information. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.

VOGIATZAKIS, I.N., PUNGETTI, G. & MANNION, A.M. (Hrsg.) (2008): Mediterranean Island Landscapes. Natural and Cultural Approaches. Landscape Series, Volume 9. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.

WAGNER, H.-G. (2001): Mittelmeerraum. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

YAALON, D.H. (1995): Soils in the Mediterranean region: what makes them different? – Catena **28** (1997): 157-169.

Internetquellen

DIGITAL GLOBE INC. (2013): Quickbird Data Sheet. http://www.digitalglobe.com/downloads/QuickBird-DS-QB-Web.pdf (Stand: 2013) (letzer Zugriff: 09.04.2013).

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA): Landsat 7 Science Data Users Handbook. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf (Stand: 2010) (Letzter Zugriff: 20.03.2013).

PARCO NAZIONALE DELL ASINARA (2012a): Geografia e clima. http://www.parcoasinara.org/?modulo=contenuti&id=303&pag=371 (Stand: 2012) (letzter Zugriff: 04.12.2013).

PARCO NAZIONALE DELL ASINARA (2012b): Flora e vegetazione. http://www.parcoasinara.org/?modulo=contenuti&id=306&pag=376 (Stand: 2012) (letzter Zugriff: 04.12.2013).

PARCO NAZIONALE DELL ASINARA (2012c): Fauna terrestre. http://www.parcoasinara.org/?modulo=contenuti&id=314&pag=386 (Stand: 2012) (letzter Zugriff: 04.12.2013).

REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA (2013e): Modelli digitali del terreno. http://www.sardegnageoportale.it/index.php?xsl=1594&s=40&v=9&c=8936&na=1&n=100 (Stand: 2013) (letzter Zugriff: 19.04.2013).

UNESCO: Island of Asinara. http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5002/ (Stand: 01.06.2006) (letzter Zugriff: 20.01.2013).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2013): Landsat Processing Details. http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php (Stand: 16.01.2013) (letzter Zugriff: 20.03.2013).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2012): State of the archive. http://landsat.usgs.gov/documents/StateOfTheArchive_web.pdf (Stand: 2012) (Letzter Zugriff: 20.03.2013).

Verwendete Karten & Daten

DIGITAL GLOBE INC.(2012): Digitaler Quickbird Datensatz. „ortho-ready“ 4-Band Multispektralaufnahme aus dem Jahr 2012. https://browse.digitalglobe.com/imagefinder

GEOPORTALE NAZIONALE (2013a): WMS- Dienst Cartografia di Base – DeAgostini. http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/raster/de_agostini.map (Stand: 2013) (letzter Zugriff: 20.04.2013).

GEOPORTALE NAZIONALE (2013b): WMS- Dienst Ortofoto in bianco e nero anni 1988-1989 con relative date del volo. http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/raster/ortofoto_bn_88.map& (Stand: 05.05.1989) (letzter Zugriff: 21.04.2013).

GEOPORTALE NAZIONALE (2013c): WMS- Dienst Ortofoto in bianco e nero anno 1994-1998 con relative date del volo. http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/raster/ortofoto_bn_94.map& (Stand: 7/1997) (letzter Zugriff: 21.04.2013).

GEOPORTALE NAZIONALE (2013d): WMS- Dienst Cartografia di Base. Topographische Karte von Italien im Maßstab 1:25.000. http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/raster/IGM_25000.map (Stand: 05.05.1989) (letzter Zugriff: 20.01.2013).

GEOPORTALE NAZIONALE (2013e): WMS- Dienst Unitá administrative 2011. http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/Vettoriali/LimitiAmministrativi_2011.map& (Stand: 05.05.1989) (letzter Zugriff: 15.04.2013).

GEOPORTALE NAZIONALE (2013f): WMS- Dienst CORINE Landcover Daten aus den Jahren 1990, 2000 und 2006. http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/Vettoriali/Corine_Land_Cover1990.map; http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/

Vettoriali/Corine_Land_Cover 2000.map; http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ ms_ogc/ WMS_v1.3/Vettoriali/Corine_Land_Cover2006.map (Stand: 1990, 2000, 2006) (letzter Zugriff: 15.04.2013).

REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA (2012): Sardegna Foto Aeree. http://www.sardegnageoportale.it/webgis/fotoaeree/ (Stand: 2012) (Letzter Zugriff: 22.04.2013).

REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA (2013a): Sardegna Geoportale. Geologische Karte im Maßstab 1:25.000. (Stand: 2008) (Letzter Zugriff: 22.03.2013).

REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA (2013b): Sardegna Geoportale. Database Multiprecision (DBMP). (Stand: 2013) (Letzter Zugriff: 22.03.2013).

REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA (2013c): Sardegna Geoportale. Modello digitale del Terreno, 1m. DGM. http://www.sardegnageoportale.it/index.php?xsl=1598&s=161741&v =2&c=8936&t=1 (Stand: 2013) (Letzter Zugriff: 22.03.2013).

REGIONE AUTONOME DELLA SARDEGNA (2013d): Sardegna Geoportale. Landnutzungsdaten aus 2003 und 2008. http://www.sardegnageoportale.it/catalogodati/download/ (Stand: 2008) (Letzter Zugriff: 22.03.2013).

MINISTERO DELLA DIFESA (2013): Servizio climatologia meteorologico. CLINO (Climate Normals) http://clima.meteoam.it/Clino61-90.php (Stand: 2013) (letzter Zugriff: 20.01.2013).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2013): Earth explorer. Landsat Archive. Digitale Landsat (1, 5 und 7) Datensätze aus den Jahren 1972 (LM12080311972226AAA05), 1986 (LT51930321986132XXX01), 1987 (LM51930321987215AAA03), 1999 (LE71930321999192EDC00), 2002 (LT51930322002176MTI00), 2003 (LE71930322003139EDC00). http://earthexplorer.usgs.gov/ (Letzter Zugriff: 20.03.2013).

Anschrift der Autoren:

M.Sc. Robin Stadtmann
Universität Hildesheim
Institut für Geographie
Marienburger Platz 22
D-31141 Hildesheim
robin.stadtmann@uni-hildesheim.de

Dr. Christine Jung-Dahlke
Universität Hildesheim
Institut für Geographie
Marienburger Platz 22
D-31141 Hildesheim
dahlkec@uni-hildesheim.de

Prof. Dr. Martin Sauerwein
Universität Hildesheim
Institut für Geographie
Marienburger Platz 22
D-31141 Hildesheim
martin.sauerwein@uni-hildesheim.de