

Master Thesis

im Rahmen des Universitätslehrganges

„Geographical Information Science & Systems“

am Interfakultären Fachbereich für Geoinformatik der Paris Lodron-Universität Salzburg

Objektbasierte Change Detection informeller Siedlungen

Ein Post-Classification Vergleich am Beispiel von Kapstadt, Südafrika

vorgelegt von

Sarah C. Fischer

Teilnehmerkennzahl: 103741, UNIGIS MSc. Jahrgang 2014

betreut von

Dr. Peter Hofmann

Danksagung

Ein besonderer Dank geht an den Betreuer meiner Arbeit Dr. Peter Hofmann und natürlich an meine Familie und meine Freunde.

Erklärung zur eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde. Alle Ausführungen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

17.12.2016



Datum, Unterschrift

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Veränderungen der Siedlungsflächen in Teilen Kapstadts mit Hilfe eines Post-Classification Vergleichs untersucht. Ein Hauptaugenmerk galt dabei den flächenmäßigen Veränderungen der informellen Siedlungen. Die Arbeit gibt zunächst einen Überblick über die städtische Entwicklung und die Entstehung informeller Siedlungen. Anschließend wird die Situation in den betreffenden Siedlungsgebieten in Kapstadt beleuchtet. Außerdem werden verschiedene Methoden der Fernerkundung zur Erfassung von Veränderungen auf der Erdoberfläche vorgestellt und diskutiert. Ziel der Arbeit war es, die Entwicklung der Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet im Zeitraum von 2000 bis 2015 darzustellen und die Veränderungen zu identifizieren. Zur Erfassung der Veränderungen wurden die aus einer objektbasierten Klassifizierung resultierenden Polygondatensätze mit Hilfe eines Post-Classification Vergleichs untersucht. Bei der Auswertung der Ergebnisse kamen unterschiedliche Schwellwerte (MMUs) zum Einsatz, ab wann eine Veränderung als solche angesehen wird. Neben den Überlegungen zur Festlegung eines solchen Schwellwertes wird auch auf dessen Auswirkungen eingegangen. Die Veränderungen der Siedlungsflächen konnten mit den zur Verfügung stehenden Daten und den ausgewählten Methoden erfolgreich identifiziert werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass sowohl informelle als auch formelle Siedlungsbereiche im Untersuchungszeitraum zugenommen haben. Abschließend erfolgt eine Bewertung, inwieweit die Polygondatensätze für eine solche Untersuchung geeignet sind, bzw. für die Erfassung welcher Siedlungsform diese Methode besser oder schlechter geeignet ist.

Abstract

This thesis evaluates the changes to settlement areas of Capetown (SA), using a post-classification comparison. One of the main focus was the detection of informal settlements. The thesis provides an overview about city development and the occurrence of informal settlements. Hereinafter, the areas of subject are discussed in relation to social and infrastructural aspects. Furthermore, various remote sensing methods for detecting changes on the earth's surface are presented and discussed. The main objective of this research was to present the development and to detect the changes to settlements during the period 2000 – 2015 within the area of interest. An already existing polygon data set, resulting from an object-based classification has been processed by a post classification comparison to detect changes. For the processing of results, a threshold value (MMU) was defined to narrow down the real changes from errors. The threshold value is discussed respectively its impact and meaning to the context of change detection. An identification and detection of settlement areas was successful conducted by the use of available data and chosen methods. This research comes to the result that both formal and informal settlement areas has increased during the research period. The thesis concludes with an evaluation about the benefit of polygon data sets when conducting a change detection on formal and informal settlements.

Inhalt

Danksagung	I
Erklärung zur eigenständigen Abfassung der Arbeit	II
Zusammenfassung	III
Abstract	IV
Inhalt	V
Abbildungsverzeichnis:	VII
Tabellenverzeichnis:	VIII
Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
2 Städtewachstum & Entwicklung	1
3 Informelle Siedlungen	5
3.1 Begriff & Definition.....	5
3.2 Probleme informeller Siedlungen.....	6
4 Untersuchungsgebiet: Townships in Kapstadt	8
4.1 Gugulethu: Geschichte & Zahlen	8
4.2 Nyanga: Geschichte & Zahlen.....	8
4.3 Crossroads: Geschichte & Zahlen	9
4.4 Philippi: Geschichte & Zahlen	9
5 Change Detection informeller Siedlungen	10
5.1 Fernerkundungsbasierte Erfassung informeller Siedlungen.....	10
5.2 Change Detection: Definition & Methoden	10
5.2.1 Pixelbasierte Methoden	11
5.2.2 Objektbasierte Methoden.....	13
6 Ziele & Leitfragen	15
7 Verwendete Daten	16
8 Methoden	18
8.1 Vorverarbeitung.....	18
8.1.1 Pan-Schärfung	18
8.1.2 Coregistrierung	18
8.1.3 Segmentierung.....	18
8.1.4 Klassifizierung.....	19
8.1.5 Überprüfung und Korrektur der Klassifizierung	21
8.2 Post-Classification-Comparison (PCC).....	27
8.3 Minimum Mapping Unit (MMU) für Veränderungsflächen	28

9	Ergebnisse der Veränderungsanalyse der Siedlungsflächen	35
9.1	Flächensummen allgemein	35
9.2	Veränderungen von Aufnahmedatum zu Aufnahmedatum	36
9.2.1	Veränderungsanalyse der Flächen größer 500 m ² :	37
9.2.2	Veränderungsanalyse der Flächen größer 1000 m ² :	41
10	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	50
11	Abschließende Bewertung & Ausblick	50
	Literaturverzeichnis	54
	Anhang A	57
	Anhang B.....	59

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Entwicklungsländer: Anteil der Slumbewohner an der städtischen Bevölkerung (%)	3
Abbildung 2: Entwicklungsländer: Städtische Slumbewohner (tausend)	3
Abbildung 3: Subsahara Afrika: Anteil der Slumbewohner an der städtischen Bevölkerung (%).....	4
Abbildung 4: Subsahara Afrika: Städtische Slumbewohner (tausend)	4
Abbildung 5: Kapstadt mit Untersuchungsgebiet (rot).....	16
Abbildung 6: Klassenhierarchie am Beispiel der Aufnahme vom 05.12.2002.	19
Abbildung 7: Augenscheinlich informelle Siedlung (im Bild rot) als formell (gelb) klassifiziert.....	21
Abbildung 8: Beispielpolygon (blau) im Jahr 2000 (links) und 2015 (rechts).....	22
Abbildung 9: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" → "formell" MMU: 0 m ²	30
Abbildung 10: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" → "formell" MMU: 10 m ²	31
Abbildung 11: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" → "formell" MMU: 200 m ² ..	31
Abbildung 12: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" → "formell" MMU: 500 m ² ..	32
Abbildung 13: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" → "formell" MMU: 1000 m ²	32
Abbildung 14: Siedlungsfläche formeller und informeller Siedlungen 2000-2015 in km ²	36
Abbildung 15: Veränderung der Siedlungsflächen je Zeitintervall.....	37
Abbildung 16: Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 2000-2015 (MMU 500 m ²).	38
Abbildung 17: Veränderung der informellen Siedlungsfläche 2000-2015 (MMU 500 m ²).....	39
Abbildung 18: Veränderungen der informellen Siedlungsfläche 2002-2013 (MMU 500 m ²).....	40
Abbildung 19: Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 2000-2015 (MMU 1000 m ²). ...	42
Abbildung 20: Veränderungen der informellen Siedlungsfläche 2000-2015 (MMU 1000 m ²).....	43
Abbildung 21: Veränderungen der informellen Siedlungsfläche 2002-2013 (MMU 1000 m ²).....	44
Abbildung 22: Veränderung der formellen Siedlungsfläche 2000-2015.....	48
Abbildung 23: Veränderung der informellen Siedlungsfläche 2000-2015.....	49

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Eigenschaften der einzelnen Szenen,	17
Tabelle 2: Klassenbeschreibung nach Bekkarnayeva (2016)	20
Tabelle 3: Klassifizierung des Beispielpolygons 2000-2015.	22
Tabelle 4: Anzahl und Fläche der im ersten Schritt reklassifizierten Polygone je Aufnahmedatum. ..	23
Tabelle 5: Anzahl und Fläche der im zweiten Schritt reklassifizierten Polygone je Aufnahmedatum. 25	
Tabelle 6: Anzahl und Flächen der insgesamt reklassifizierten Polygone je Aufnahmedatum.....	26
Tabelle 7: Kategorien der Veränderungen.	27
Tabelle 8: Scale-Parameter für die Segmentierung mit eCognition nach Bekkarnayeva (2016)	29
Tabelle 9: Flächenverhältnisse und Anzahl der Veränderungspolygone je nach MMU (in m ²).	34
Tabelle 10: Flächensummen formeller, informeller und insgesamt erfasster Siedlungsfläche je Aufnahmedatum.	35
Tabelle 11: Flächenbilanz informeller Siedlungsfläche je Zeitintervall (MMU 500 m ²).	41
Tabelle 12: Flächenbilanz informeller Siedlungsfläche je Zeitintervall (MMU 1000 m ²).	45
Tabelle 13: Veränderungen nach Kategorien je Zeitintervall (MMU 500 m ² & MMU 1000 m ²).	46

Abkürzungen

ANC	African National Congress
ANN	Artificial Neural Networks
CVA	Change Vector Analysis
EM	Expectation-Maximization-Algorithm
EUSI	European Space Imaging GmbH
GS	Gramm-Schmidt
HCS	Hyperspectral Color Space
KT	Tesselated Cap
LULC	Landuse/Landcover
MDG	Millenium Development Goals
MMU	Minimum Mapping Unit
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PCA	Principal Component Analysis
PCC	Post-Classification-Comparison
UN	Vereinte Nationen
VHR	Very High Resolution Data

1 Einleitung

Mit dem Zuwachs der in Städten lebenden Bevölkerung nimmt auch die Bevölkerung in informellen Siedlungen immer weiter zu. Um die Ausbreitung der informellen Siedlungen zu erfassen und deren Entwicklung verstehen zu können, ist ein Monitoring dieser Siedlungsflächen erklärtes Ziel vieler Untersuchungen. Zahlreiche Studien zur Verwendung von Fernerkundungsdaten zur Entdeckung, Identifizierung oder Überwachung von Veränderungen auf der Erdoberfläche haben das Potenzial dieser Techniken für solche Anwendungen unterstrichen (Coppin et al. 2004). Diese sogenannten Change Detection Methoden finden immer häufiger auch Anwendung in urbanen Räumen und somit in der Detektion von Veränderungen von Siedlungsflächen. Durch die stetige Weiterentwicklung der aufnehmenden Sensoren und der damit verbundenen höheren Auflösung der zur Verfügung stehenden Satellitenbilder, rückt eine pixelbasierte Analyse zunehmend in den Hintergrund und objektbasierte Methoden gewinnen an Bedeutung. Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeiten der Erfassung der Veränderungen informeller Siedlungen am Beispiel eines Stadtteils von Kapstadt mittels objektbasierter Bildanalyse und einem Post-Classification Vergleich des resultierenden Klassifikationsergebnisses. Um die Entstehung informeller Siedlungen zu verstehen wird zunächst auf das globale Städtewachstum und die zahlenmäßige Entwicklung urbaner Räume eingegangen.

2 Städtewachstum & Entwicklung

„Städte wachsen jährlich um rund 70 Millionen Menschen –

das sind 1,4 Millionen pro Woche“ (Perlman 2014).

Im Jahr 2014 lebten erstmals mehr Menschen in Städten als in ländlichen Regionen. Nach einem Bericht des UN-Habitat (2014) waren es 2014 54 % der Weltbevölkerung, die in Städten lebten. Im südlichen Afrika wurde dieser Punkt bereits 1993 überschritten. In Afrika leben außerdem 61,7 % der städtischen Bevölkerung in Slums. Die Vereinten Nationen schätzen, dass sich der Anteil der in Städten lebenden bis 2030 auf 60 %, bis 2050 sogar auf 70 % erhöhen wird (UN-Habitat 2008). Im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts lag das Bevölkerungswachstum in den urbanen Gebieten der Entwicklungsländer bei durchschnittlich 1,2 Mio. Menschen pro Woche. Das entspricht in etwa dem demographischen Wachstum in europäischen Städten im Zeitraum eines ganzen Jahres (United Nations 2012). Aktuellen Prognosen zufolge wird sich das Bevölkerungswachstum in den nächsten 30 Jahren fast ausschließlich in urbanen Gebieten ereignen. Der größte Anteil wird dabei auch weiterhin auf die Entwicklungsländer fallen; urbanes

Wachstum bedeutet hier in der Regel ein Wachstum der informellen Siedlungen. *„Um in den kommenden Jahrzehnten die in den Städten zu erwartenden Menschen zu beherbergen, werden 35 Millionen Wohneinheiten pro Jahr benötigt, das sind rund 96.000 neue Wohnungen pro Tag. Diese werden zum großen Teil selbstgebaute Behausungen auf innerstädtischen Freiflächen sein (...)“ (Perlman 2014).*

In den afrikanischen Ländern südlich der Sahara ziehen nur ca. ein Drittel (etwa 3 Mio.) der 10 Mio. Zuwanderer pro Jahr in „formelle“ Siedlungen und tragen somit zum formellen, städtischen und ökonomischen Wachstum der Stadt bei. Die restlichen zwei Drittel (etwa 7 Mio.) ziehen zunächst in informelle Siedlungen. Von diesen 7 Mio. schaffen es ca. 2 Mio. die informellen Siedlungen hinter sich zu lassen, während etwa 5 Mio. Menschen in den informellen Siedlungen verbleiben; auf der falschen Seite des „Urban Divide“ (UN-Habitat 2008).

Dank der im Jahr 1999 beschlossenen Millennium Development Goals (MDG) der Vereinten Nationen liegt ein besonderes Augenmerk auf der Verbesserung der Lebensbedingungen der armen Bevölkerung in den Städten. Das unter Target 11 des Millennium Goal 7 bekannte Ziel wurde zahlenmäßig auch bereits vor 2015 erreicht. Durch verschiedene Maßnahmen konnte zwar der prozentuale Anteil der in Slums lebenden reduziert werden, die totalen Zahlen sind jedoch weiter gestiegen (UN-Habitat 2008). Für die städtische Entwicklung bedeutet dies, dass, nur weil der prozentuale Anteil der in Slums lebenden sinkt, die informelle Siedlungsfläche nicht zwangsläufig abnimmt. Denn die totalen Zahlen zeigen, dass die Anzahl der Slumbewohner stetig steigt. Da der Anteil der Slumbewohner an der städtischen Bevölkerung abnimmt, muss der Zuwachs formeller Siedlungsfläche den Zuwachs informeller Bebauung überwiegen.

Folgende Abbildungen zeigen für alle Entwicklungsländer einerseits den prozentualen Anteil der in informellen Siedlungen lebenden Bevölkerung an der gesamten urbanen Bevölkerung (Abbildung 1) und andererseits die in Slums lebende Bevölkerung in tausend (Abbildung 2).

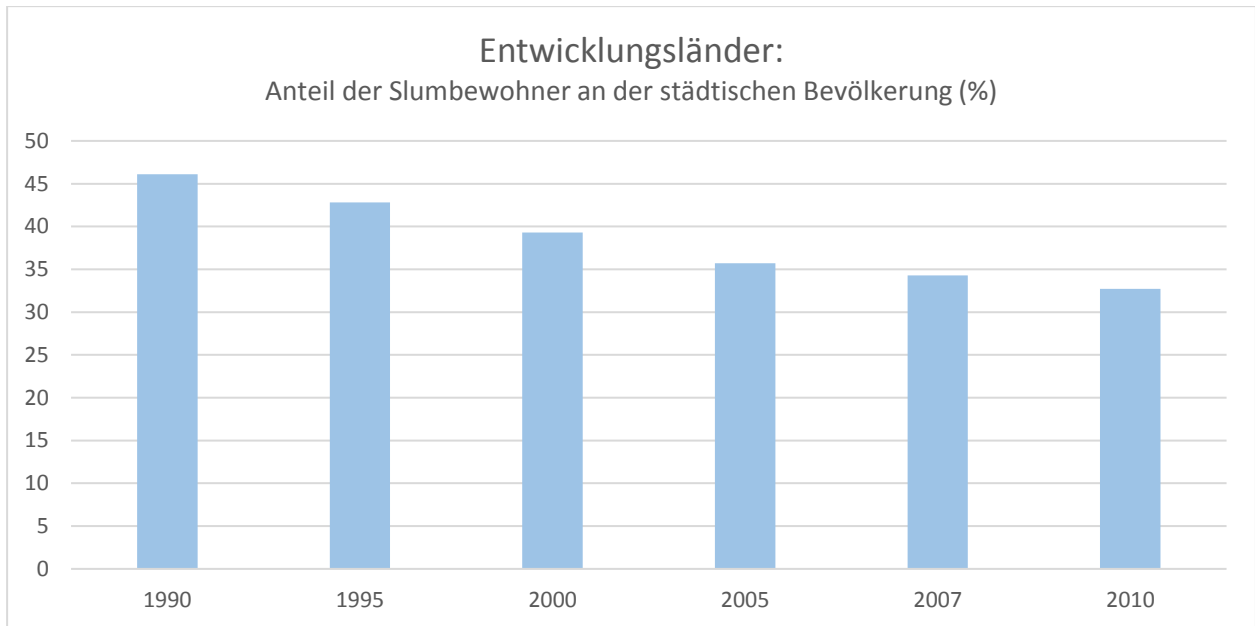


Abbildung 1: Entwicklungsländer: Anteil der Slumbewohner an der städtischen Bevölkerung (%) Quelle: Eigene Darstellung nach UN-Habitat 2008 S.32

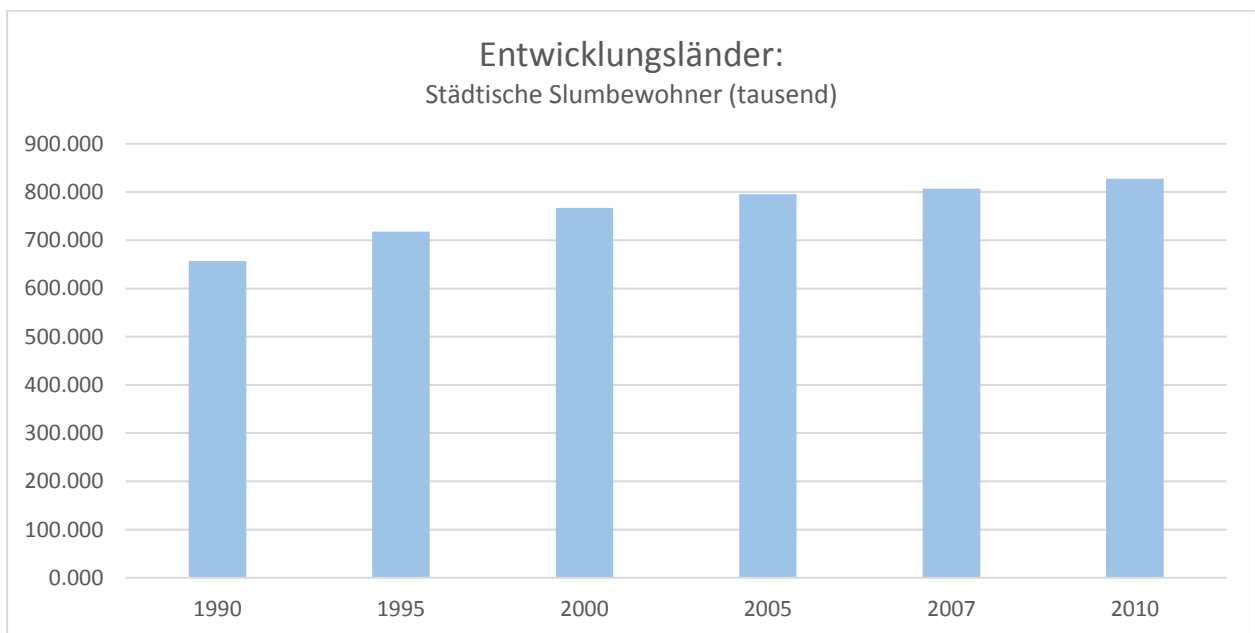


Abbildung 2: Entwicklungsländer: Städtische Slumbewohner (tausend) Quelle: Eigene Darstellung nach UN-Habitat 2008 S.32

Auch im südlich der Sahara gelegenen Gebieten Afrikas konnte Ziel Nummer 7 der Millennium Development Goals der Vereinten Nationen, die Lebensbedingungen der armen Bevölkerung in den Städten zu verbessern, Erfolge verbuchen. Die folgenden Abbildungen zeigen für Subsahara Afrika einerseits den prozentualen Anteil der informellen an der gesamten urbanen Bevölkerung (Abbildung 3) und andererseits die in Slums lebende Bevölkerung in tausend (Abbildung 4). Es zeigt sich auch hier ein Rückgang des prozentualen Anteils der in Slums lebenden Bevölkerung, während die totalen Zahlen stetig steigen. Für die Detektion der Veränderungen informeller

Siedlungsflächen in einem Gebiet in Südafrika bedeutet dies, dass neben den informellen Siedlungsflächen vor allem auch die formellen Siedlungsbereiche über den Untersuchungszeitraum zugenommen haben müssen.

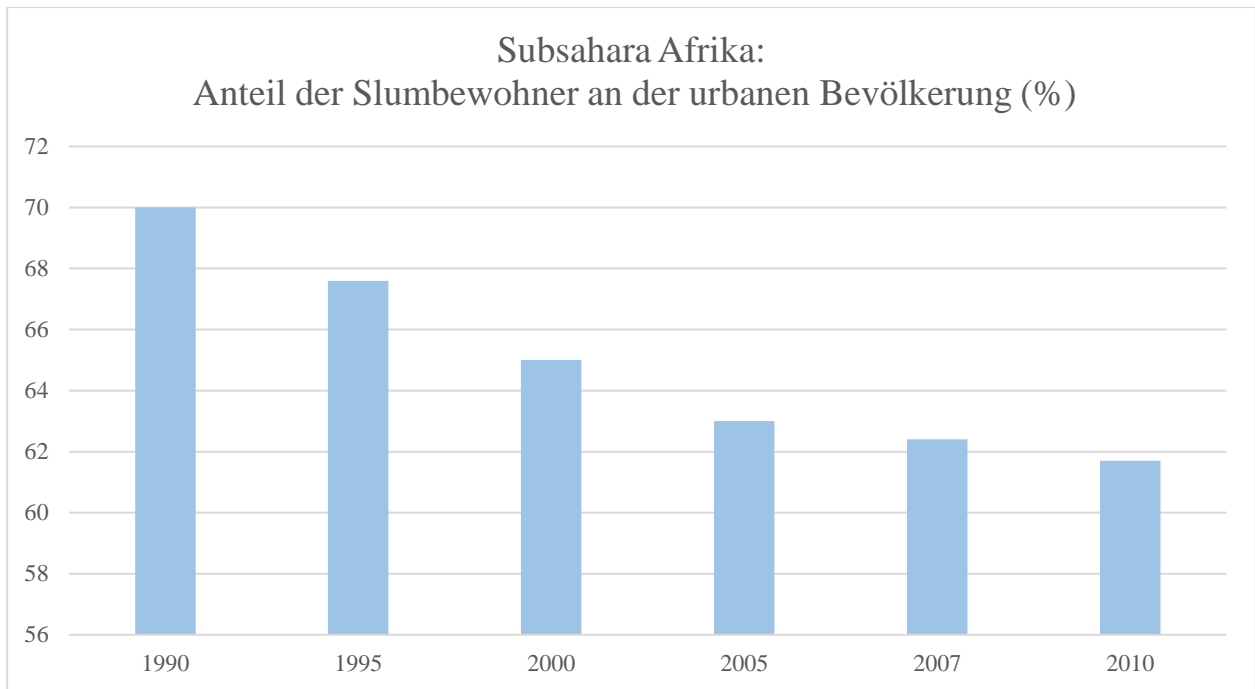


Abbildung 3: Subsahara Afrika: Anteil der Slumbewohner an der städtischen Bevölkerung (%) Quelle: Eigene Darstellung nach UN-Habitat 2008 S. 32

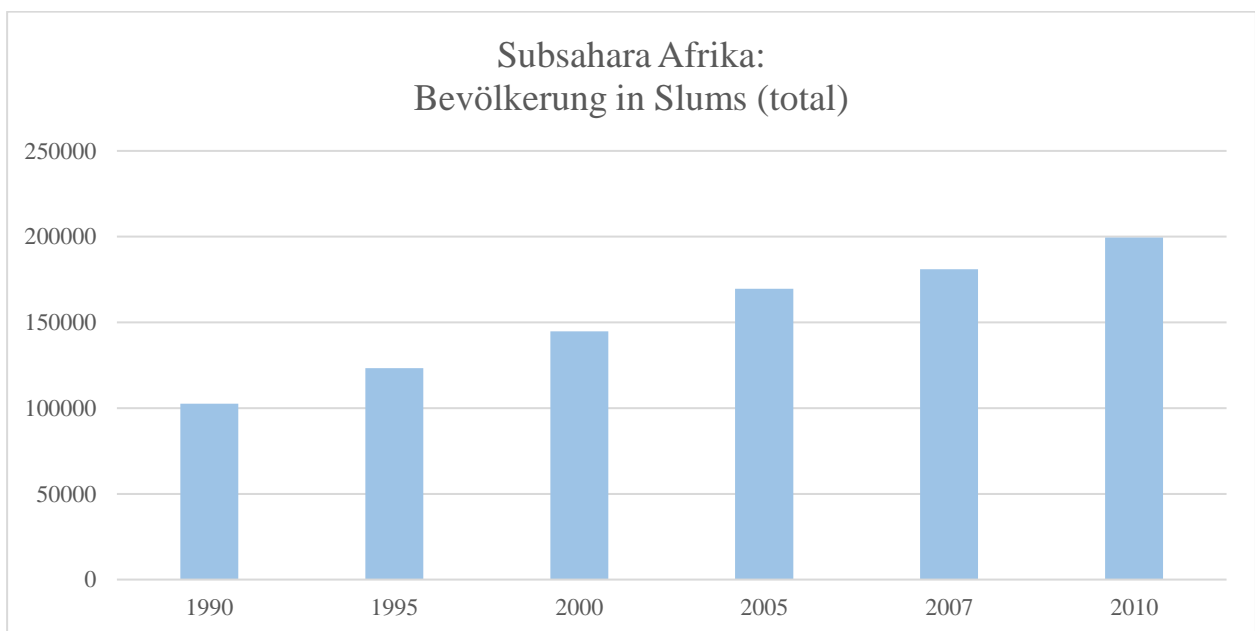


Abbildung 4: Subsahara Afrika: Städtische Slumbewohner (tausend) Quelle: Eigene Darstellung nach UN-Habitat 2008 S. 32

Im folgenden Abschnitt wird der Begriff der informellen Siedlungen zunächst definiert und deren Entwicklung, sowie die resultierenden Probleme näher beschrieben.

3 Informelle Siedlungen

3.1 Begriff & Definition

Die Vereinten Nationen definieren informelle Siedlungen als:

1. *“(...) areas where groups of housing units have been constructed on land that the occupants have no legal claim to, or occupy illegally;”* (OECD 2003)
2. *“(...) unplanned settlements and areas where housing is not in compliance with current planning and building regulations (unauthorized housing).”* (OECD 2003)

Es handelt sich dabei also um Bebauungen auf Flächen, für die kein gesetzlicher Anspruch besteht oder die „Besetzung“ illegal erfolgte. Außerdem befinden sich diese ungeplanten Siedlungen auf Flächen, die nicht für Siedlungen vorgesehen sind. Die Bezeichnung „informelle Siedlung“ bezieht sich also auf die Entstehung urbaner Siedlungen jenseits der städtischen Planung.

Mason S. O. & Fraser C. S. (1998) gehen zusätzlich noch auf die Bevölkerung in den informellen Siedlungen ein und erwähnen die resultierenden Probleme. Sie beschreiben informelle Siedlungen als:

“(...) dense settlements comprising communities housed in self-constructed shelters under conditions of informal or traditional land tenure (...). They are a common feature of developing countries and are typically the product of an urgent need for shelter by the urban poor. As such they are characterised by a dense proliferation of small, makeshift shelters built from diverse materials (such as plastic, tin sheeting and wooden planks), by degradation of the local ecosystem (for example, erosion and poor water quality and sanitation) and by severe social problems.”
(Mason & Fraser 1998, S.313)

Auf einen Slumbewohner trifft mindestens eine der folgenden, von UN-Habitat definierten Bedingungen zu: Kein Besitz bzw. ungeklärte Besitzverhältnisse, mangelnder Zugang zu sauberem Wasser, mangelnder Zugang zu verbesserter Hygiene, keine dauerhaften Wohnverhältnisse und beengte Verhältnisse wegen Überfüllung (United Nations 2012). Auch auf die Bewohner informeller Siedlungen treffen diese Bedingungen in den meisten Fällen zu, weshalb „informelle Siedlung“ häufig als Synonym gebraucht wird. Neben den allgemeinen Begriffen „Slums“, „Shanty Towns“ oder „Elendsviertel“ gibt es auch regional unterschiedliche Bezeichnungen, wie die Favelas in Brasilien oder die Townships in Südafrika. Alle diese Viertel haben jedoch gemeinsam, dass sie ungeplant und meist illegal (informell) und ohne jegliche Infrastruktur aufgebaut sind. Die Siedlungen bestehen aus dicht an dicht gebauten Hütten, ohne

Straßen oder Freiflächen (Monheim et al. 2009). Als Baumaterialien dienen Holz, Wellblech und jegliche Art von Müll. In der Regel entstehen informelle Siedlungen durch die starke Zuwanderung aus ländlichen Räumen in die Großstädte, wo sich die Menschen auf freien Flächen, ohne geregelte Besitzansprüche, in der Hoffnung auf Beschäftigung und ein besseres Leben, niederlassen. Faktisch arbeitet der Großteil der Bevölkerung informeller Siedlungen im informellen Sektor, in der Versorgung der Bewohner der eigenen Siedlung, als Händler oder Dienstleister. Die Siedlungen entwickeln sich zunehmend zu eigenen Städten mit eigener Mikroökonomie. Die Standorte solcher Siedlungsstrukturen finden sich häufig in „*Ungunstlagen*“ (Monheim et al. 2009) am Stadtrand, auf schlecht bebaubaren Flächen oder in Hanglagen, an denen sich die Zugewanderten ansiedeln. Laut Busgeeth et al. (2008) machen informelle Siedlungen bis zu 60 % der städtischen Siedlungen in Entwicklungsländern aus.

In Südafrika ist die Entstehung der Townships etwas differenzierter zu betrachten. Die Standorte der informellen Siedlungen sind hier historisch bedingt und zunächst nicht informell. Während der Apartheidpolitik wurde die südafrikanische Bevölkerung gezwungen, getrennt nach Rasse zu siedeln. Zu diesem Zweck wurden den Bevölkerungsgruppen Siedlungsgebiete zugewiesen, in welche sie zwangsumsiedeln mussten. Neben diesen sogenannten Homelands wurden aber auch in den Städten Siedlungsgebiete geplant, um die Verfügbarkeit billiger Arbeitskräfte zu gewährleisten. So entstanden in nahezu jeder südafrikanischen Stadt Townships. Hier wurde die nicht weiße Bevölkerung in kleinen Hütten (shacks) angesiedelt. Bereits während der Apartheid, aber vor allem nach dem Ende der Apartheid nahm die Migration in die Städte dann stark zu. Die Bevölkerung aus den Homelands, aber auch aus Nachbarstaaten machte sich auf der Suche nach Arbeit auf den Weg in die Städte. Durch informelle Bebauung in den Townships wuchsen diese zu immer größer werdenden informellen Siedlungen an. Im folgenden Kapitel soll kurz auf die Probleme eingegangen werden die in informellen Siedlungen auftreten können.

3.2 Probleme informeller Siedlungen

Die Liste der Probleme die sich in solch informellen Siedlungen ergeben können ist lang. Angefangen mit dem nicht Vorhandensein von jeglicher Infrastruktur, über die gesundheitliche Versorgung, bis hin zum Fehlen von Planung und Verwaltung. Hinzu kommen soziale Probleme, sowie ethnische und religiöse Konflikte.

Der Bevölkerung in informellen Siedlungen stehen Infrastruktureinrichtungen wie Straßen, Elektrizität, Trink- und Abwasser oder die Müllentsorgung nicht oder nur sehr begrenzt zur Verfügung. Hinzu kommen oftmals bauliche Mängel an den einfachen Hütten, die auch nur wenig Schutz vor äußeren Einflüssen wie Regen oder Hitze bieten. Gekocht wird in der Regel auf

offenem Feuer, was eine Gefahr für die Siedlung bedeutet, da durch die extrem dichte Bebauung keinerlei Brandschutz besteht. Das Wegenetz (Trampelpfade) ist so schmal und unbefestigt, dass kein Versorgungsfahrzeug die Wege nutzen kann. Die fehlenden Strukturen in der Müllentsorgung und der Ableitung der Abwässer können zum Beispiel in einem Müllproblem und hygienischen Problemen münden. Zusätzlich fehlt die Versorgung mit sauberem Trinkwasser, was dazu führen kann, dass vielerorts mit verseuchtem Wasser gewirtschaftet wird. Diese Umstände und das Fehlen einer Gesundheitsversorgung können in der Folge zu Krankheiten, einer hohen Kindersterblichkeit und geringer Lebenserwartung führen (Surinach 2015). Außerdem spielt AIDS besonders in den dicht besiedelten informellen Siedlungen eine Rolle. Nicht selten kommt es zu Prostitution als Einnahmequelle.

In einer informellen Siedlung können hunderttausende Menschen auf engem Raum zusammenkommen. Dabei handelt es sich sowohl um Menschen, die vom Land in die Stadt ziehen, als auch um politische oder ethnische Flüchtlinge, aber auch um Wanderarbeiter die in der Stadt Arbeit haben oder suchen. Die sozialen Probleme sind geprägt von der Armut der Bevölkerung. Beim Aufeinandertreffen unterschiedlicher Ethnien kommt es nicht selten zu gewaltsamen Konflikten.

In der vorliegenden Arbeit wird es um die Townships Nyanga, Crosroads, Teile von Gugulethu und Philippi in Kapstadt gehen. Im folgenden Kapitel wird deren Entstehung und aktuelle Situation kurz beleuchtet.

4 Untersuchungsgebiet: Townships in Kapstadt

4.1 Gugulethu: Geschichte & Zahlen

Gugulethu wurde 1958 als Township mit dem Namen Nyanga West gegründet. Gugulethu bedeutet in der dort verbreiteten Sprache (Xhosa) „unser Stolz“ (South African History Online 2015). 1986 wurden sieben Mitglieder des African National Congress (ANC) in Gugulethu erschossen. In Erinnerung an den Widerstand gegen das Apartheidregime wurde das Gugulethu Seven Memorial errichtet. Im Jahr 2011 lebten in Gugulethu 98.468 Menschen in 29.577 Haushalten. 52 % der Haushalte lebt in formellen Gebäuden und 58 % haben Zugang zu einer Wasserleitung (im Haus oder auf dem Grundstück) (City of Cape Town 2013b).

4.2 Nyanga: Geschichte & Zahlen

Nyanga ist eines der ältesten Townships in Südafrika. Es wurde 1946 als Folge des Migrant Labour System¹ gegründet. Nach zwei Jahren standen die ersten 210 Häuser: 4 Zimmer, kleiner Garten, Wasser und Strom. Die Miete lag natürlich weit über der einer Wellblechhütte. Nyanga sollte vor allem die stark überfüllten Wohngebiete im Umkreis entlasten. Im Jahr 1953 wurde die zweite Phase von Nyanga fertiggestellt: 350 Doppelhäuser für 700 Familien (South African History Online 2011). 1952 wurde dann von den Stadtbezirken Goodwood, Parow und Bellville gemeinsam mit dem Cape Divisional Council und dem Cape Town City Council eine Umsiedelung aller afrikanischen, informellen Siedler in ein Transit-Camp in Nyanga beschlossen. Zwischen 1953 und 1958 wurden etwa 16.000 Schwarze zur Räumung gezwungen und in Nyanga angesiedelt.

Im Jahr 2011 lebten in Nyanga auf einer Fläche von 3,09 km² 57.996 Menschen in 15.993 Haushalten, darunter 98,79 % Schwarzafrikaner (Frith 2011b). Nach den Zensus Daten von 2011 (City of Cape Town 2013c) lebten 67 % in formellen Gebäuden und 79 % hatten Zugang zu einer Wasserleitung (im Haus oder auf dem Grundstück). Nur 55 % der 15-64 jährigen sind in einem Arbeitsverhältnis und 74 % der Haushalte hat ein monatliches Einkommen von 3.200 ZAR (etwa 195 €) oder weniger.

¹ Das Migrant Labour System bezeichnet die Gesetze und Strukturen unter denen die schwarzen Arbeitsmigranten während der Apartheid aus den ländlichen Regionen (den Homelands), aber auch aus den Nachbarstaaten angestellt wurden, um in den Städten und den Minen zu arbeiten (Oxford Dictionaries 2016). Um die Verfügbarkeit billiger Arbeitskräfte aufrechtzuerhalten führte die Regierung eine „hut tax“ (Hüttensteuer) ein. Um diese zu bezahlen zog es vor allem junge, männliche Arbeitskräfte in die Städte, die dort in kurzen Perioden einer Arbeit nachgingen und wieder zu ihren Familien aufs Land zurückkehrten. Später kamen auch weibliche Arbeitskräfte in die Städte, um in weißen Haushalten zu arbeiten (South African History Online 2011). Das System der Arbeitsmigration sicherte den weißen Besitzern von Minen und später auch Fabriken billige Arbeitskräfte. Für die Unterbringung der Arbeitsmigranten wurden die sogenannten Townships gegründet.

4.3 Crossroads: Geschichte & Zahlen

Crossroads wurde 1970 als informelle Siedlung gegründet, als Arbeiter einer nahegelegenen Farm (Brown's Farm) gezwungen wurden sich dort anzusiedeln (South African History Online 2012). Crossroads liegt zwischen der M22, der M9 und der M36, südlich des Flughafens von Kapstadt. Zu Beginn waren es nur vereinzelt Hütten, unter anderem von Bewohnern des benachbarten, völlig überfüllten Nyanga. In den 1980er Jahren beschloss die Apartheid-Regierung keine weiteren Zuwanderer mehr zuzulassen. Diejenigen, die es doch in die Stadt schafften, siedelten sich in Crossroads an. In regelmäßigen Abständen fanden hier Räumungsaktionen statt, bei denen die illegalen Siedler auf Lkws wieder in die Homelands gebracht und die Hütten abgerissen wurden. Die Siedlung bestand demnach überwiegend aus sehr sporadischen Hütten, die schnell wieder aufgebaut werden konnten.

Im Jahr 2011 lebten in Crossroads auf einer Fläche von 2,35 km² 36.043 Menschen in 10.657 Haushalten, die Mehrheit bilden auch hier die Schwarzafrikaner mit 96,71 % (Frith 2011a). Nach den Zensus Daten von 2011 (City of Cape Town 2013a) lebten 53 % in formellen Gebäuden und 63 % hatten Zugang zu einer Wasserleitung (im Haus oder auf dem Grundstück). Auch in Crossroads sind nur 55 % der 15-64 Jährigen in einem Beschäftigungsverhältnis und 81 % der Haushalte haben ein monatliches Einkommen von 3200 ZAR (etwa 195 €) oder weniger.

4.4 Philippi: Geschichte & Zahlen

Philippi zählt zu den neuesten Townships Kapstadts, entstanden in den 1980er Jahren. Hier findet sich auch der Edith Stephens Wetland Park, die grüne Lunge für die umliegenden Townships (Kapstadtmagazin 2016). Nach dem Zensus für das Jahr 2011 lebten in Philippi 191.025 Menschen in 61.797 Haushalten, etwa 94 % von ihnen sind Schwarzafrikaner. In formellen Gebäuden lebten 44 %, außerdem hatten 67 % der Bewohner Zugang zu einer Wasserleitung (im Haus oder auf dem Grundstück) (City of Cape Town 2013d).

5 Change Detection informeller Siedlungen

5.1 Fernerkundungsbasierte Erfassung informeller Siedlungen

Um die städtische Armut zu bekämpfen und Strategien zu entwickeln die Anzahl der Slumbewohner zu reduzieren ist es notwendig, die Dimensionen der Slums zu erfassen und deren Entwicklung zu überwachen (Hofmann et al. 2015). Ein wichtiger Schritt dabei ist die Kartierung und ständige Aktualisierung dieser Karten. Wenn es um die Überwachung formeller Siedlungsstrukturen geht, ist die Datengrundlage seitens der Stadtplanung, z.B. in Form von Bebauungsplänen, häufig gegeben. Um die dynamischen Entwicklungen informeller Siedlungen zu überwachen sind diese starren, meist unvollständigen Pläne (falls sie überhaupt vorhanden sind) nicht geeignet (Busgeeth et al. 2008). Die Pläne sind oft veraltet, unvollständig und können mit den schnellen Entwicklungen informeller Siedlungen nicht mithalten. Zahlreiche Studien zur Verwendung von Fernerkundungsdaten zur Entdeckung, Identifizierung oder Überwachung von Veränderungen auf der Erdoberfläche haben das Potenzial dieser Techniken für solche Anwendungen unterstrichen (Coppin et al. 2004). Neben den klassischen land use/land cover (LULC) Anwendungen finden die unterschiedlichen Change Detection Methoden auch immer häufiger Anwendung in der Untersuchung von Veränderungen in urbanen Räumen. Hier spielen vor allem Bilddaten mit sehr hoher Auflösung (VHR) eine Rolle, da hieraus die Detektion urbaner Objekte am besten gelingt. Sliuzas et al. (2008) haben eine Reihe von Herausforderungen identifiziert, die bei der Identifizierung von Slums in Satellitenbildern zu bewältigen sind. So gibt es kein universelles Modell für Slums und somit auch keine Standardmethode um diese in Fernerkundungsdaten zu identifizieren. Es variieren z.B. Baumaterialien und die Größe der einzelnen Hütten von Land zu Land. Die Unterschiede können aber auch innerhalb einer Stadt auftreten, was auch auf kleinem Raum Anpassungen an der Identifizierungsmethode verlangt (Sliuzas et al. 2008). Hofmann (2005) und Bekkarnayeva (2016) haben die Herausforderungen bei der Identifizierung von informellen Siedlungen in ihrer Arbeit beschrieben und durch die Anpassung des verwendeten Rulesets versucht zu berücksichtigen.

Um die Veränderungen zu erfassen stehen verschiedene Methoden der Fernerkundung zur Verfügung, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen werden soll.

5.2 Change Detection: Definition & Methoden

Change Detection bezeichnet ein Verfahren der Fernerkundung zur Detektion von Veränderungen auf der Erdoberfläche. Hierfür werden zwei oder mehr aufeinanderfolgende Fernerkundungsaufnahmen des gleichen Gebietes mit Hilfe unterschiedlicher Methoden analysiert (Singh 1989).

„Timely and accurate change detection of Earth’s surface features provides the foundation for better understanding relationships and interactions between human and natural phenomena to better manage and use resources.” (Lu et al. 2004, S.2365)

Häufige Anwendungsgebiete sind das Umweltmonitoring, das Management von Naturressourcen, oder das Messen von urbaner Entwicklung (Blaschke 2010). Change Detection Methoden werden jedoch nicht nur in der Fernerkundung, sondern beispielsweise auch in der medizinischen Diagnose, der Videoüberwachung oder in Fahrerassistenzsystemen angewandt (Radke et al. 2005).

Im Laufe der Zeit wurde eine große Anzahl an unterschiedlichen Methoden entwickelt, die je nach Anwendungsgebiet besser oder schlechter geeignet sind (Lu et al. 2004). Der folgende Abschnitt soll einen knappen Überblick der wichtigsten Methoden geben. Dabei kann man zunächst zwei Gruppen identifizieren, die pixelbasierten Methoden auf der einen Seite und die objektbasierten auf der anderen.

5.2.1 Pixelbasierte Methoden

Wie der Name schon sagt, beziehen sich die folgenden Methoden alle auf die Werte der einzelnen Pixel und deren Veränderung über die Zeit. Die pixelbasierten Methoden lassen sich wiederum in drei Untergruppen zusammenfassen:

1. Algebraische Verfahren
2. Transformationsbasierte Verfahren
3. Klassifikationsbasierte Verfahren

In der Untergruppe der algebraischen Verfahren sei zunächst das Image Differencing genannt, hierbei werden die Pixelwerte der beiden Szenen t_1 und t_2 voneinander abgezogen, dabei wird ein Schwellwert vergeben, ab wann eine Veränderung vorliegt. Das Ergebnis zeigt dann die Veränderung je Pixel (Singh 1989). Es handelt sich dabei um ein leicht anzuwendendes Verfahren auf Grundlage einfacher Algebra. Bei einer derart simplen Methode werden natürlich weder alle Aspekte einer Veränderung berücksichtigt, noch kann man eine Richtung der Veränderung erkennen, es zeigt nur wo eine Veränderung auftritt (Bijeesh 2012). Ein ähnliches Ergebnis erhält man beim Image Rationing. Hierbei werden die einzelnen Pixelwerte der beiden Szenen miteinander dividiert und man erhält das Verhältnis zwischen t_1 und t_2 . Auch hierbei handelt es sich um eine einfache und schnelle Methode Veränderungsflächen festzustellen (Singh 1989). Die Ergebnisse variieren natürlich stark je nach gesetztem Grenzwert, was auch die Schwäche dieser Methode darstellt. Weitere algebraische Methoden sind Image Regression, Vegetation Index Differencing, Change Vector Analysis (CVA) und Background Substraction (Lu et al. 2004). Alle Methoden haben gemein, dass sie mit Hilfe eines Schwellwertes die Veränderungsflächen

ermitteln. Abgesehen von der CVA, sind sie alle relativ einfach in der Anwendung und der Interpretation.

In der zweiten Untergruppe sind die transformationsbasierten Verfahren: Principal Component Analysis (PCA), Tesselled Cap (KT), Gramm-Schmidt (GS) und Chi-Square Transformations zusammengefasst. Um die Veränderungsflächen zu detektieren wird auch bei diesen Methoden ein Schwellwert benötigt, welcher die Ergebnisse beeinflusst. Nach Lu et al. (2004) liegt ein weiterer Nachteil dieser Methoden in der Interpretierbarkeit und der Bezeichnung der Veränderung in den transformierten Szenen. In der Praxis sind aus der Gruppe der transformationsbasierten Methoden die PCA und KT die am häufigsten angewandten Methoden (Lu et al. 2004).

Die letzte Untergruppe bilden die klassifikationsbasierten Verfahren, hierzu gehören Post-Classification Comparison (PCC), Spectral-Temporal Combined Analysis, Expectation-Maximization Algorithm (EM), Unsupervised Change Detection, Hybrid Change Detection und ANN (Artificial Neural Networks) (Lu et al. 2004). Bei diesen Methoden werden die Bilder zunächst klassifiziert und somit thematische Karten erstellt, deren Veränderung wiederum hinterher untersucht werden kann. Der Prozess der Klassifizierung kann viel Zeit in Anspruch nehmen, erfordert Erfahrung und hängt von der Qualität der Bilddaten ab (Lu et al. 2004). Eine zeitliche Abhilfe soll die nicht-überwachte Klassifikation liefern, hier werden die Pixel anhand von eingegebenen Parametern automatisch den Klassen zugeordnet. Die Klassifizierung geht mit diesem Verfahren schneller, dafür kann die Auswertung hinterher durch die Überprüfung der einzelnen Klassen viel Zeit in Anspruch nehmen. Die Genauigkeit der resultierenden Veränderungsflächen hängt bei diesen Methoden vom Klassifikationsergebnis ab, was wiederum von der Qualität der Ausgangsdaten abhängt. Generell liefern die Ergebnisse dieser Methoden aber mehr Informationen als die rein algebraischen.

Neben den genannten Methoden sind auch noch eine Vielzahl an erweiterten Modellen entwickelt worden auf die hier nicht im Detail eingegangen werden soll. Lu et al. (2004) liefern in Ihrer Arbeit einen Überblick über alle genannten Methoden, deren Anwendung und Schwächen. Zusätzlich gehen sie auch auf die erweiterten Modelle ein und diskutieren deren Anwendbarkeit.

Alle pixelbasierten Methoden haben gemeinsam, dass die zu vergleichenden Bilddaten vor der Analyse in irgendeiner Form normiert werden müssen, um z.B. atmosphärische Unterschiede zwischen den zu vergleichenden Aufnahmen auszugleichen (Lu et al. 2004). Durch die Anpassungen, die an den Ausgangsdaten vorgenommen werden müssen, gehen unter Umständen wichtige Detailinformationen verloren.

Durch die Weiterentwicklung der Sensoren hat sich auch die räumliche Auflösung der Fernerkundungsdaten sukzessive verbessert, und somit hat sich auch das Verhältnis der Pixelgröße zu den beobachteten Objekten auf der Erdoberfläche verändert (Veljanovski et al. 2011). Die zu beobachtenden Objekte setzen sich bei Auflösungen im 1m-Bereich in der Regel aus mehreren Pixeln zusammen. Blaschke & Strobl (2001) unterstreichen das Problem, dass viele Untersuchungen sich nur auf einzelne Pixel beziehen, anstatt sich auf die räumlichen Muster zu konzentrieren, die die Gesamtheit der Pixel bilden. Hier kommt die objektbasierte Bildanalyse ins Spiel. Das folgende Kapitel erklärt kurz die Grundlagen der objektbasierten Bildanalyse und geht auf die Methoden zur Veränderungsanalyse ein.

5.2.2 Objektbasierte Methoden

Bei der objektbasierten Bildanalyse werden benachbarte Pixel anhand ihrer spektralen und räumlichen Eigenschaften zu homogenen Gruppen zusammengefasst (Doxani et al. 2008). Die entstandenen Objekte entsprechen so eher der menschlichen Wahrnehmung (Jyothi et al. 2008) als nur Pixel. Bei der Bildung der Objekte spielen, im Gegensatz zu pixelbasierten Methoden nicht nur die spektralen Eigenschaften eine Rolle, sondern es können auch Formmerkmale, Texturmerkmale und räumliche Beziehungen zu anderen Objekten mit einfließen (Hofmann 2005). Außerdem kann nach Hofmann (2005) zur Bildung der Objekte ein hierarchisches Verfahren angewendet werden, so dass die Objekte zusätzlich Beziehungen zu über- bzw. untergeordneten Objekten aufweisen können. Die Objekte werden mit verschiedenen Bildsegmentierungsverfahren erzeugt, auf die hier nicht im Detail eingegangen werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit kommt das von Bekkarnayeva (2016) verwendete und in eCognition² implementierte Multiresolution Segmentation Verfahren von Baatz & Schäpe (2000) zum Einsatz. Die Bildsegmente werden bei diesem Verfahren durch Schwellwerte bestimmt, zu deren Bildung wird *„(...)eine Kombination aus spektraler Homogenität und Formhomogenität der gebildeten Segmente, die durch die Segmentgröße gewichtet wird (...)“* (Hofmann 2005, S.32) verwendet. Die Homogenität der resultierenden Objekte kann durch das Anpassen der Schwellwerte in eCognition bestimmt werden. Außerdem kann durch das Festlegen des „Scale Parameter“ die maximal zulässige Heterogenität der gebildeten Objekte bestimmt werden (Hofmann 2005; Baatz & Schäpe 2000).

Nach der Einteilung des Bildes in einzelne Segmente werden diese klassifiziert und anschließend gegebenenfalls benachbarte Segmente der gleichen Klasse zusammengefasst. Nach Abschluss der

² eCognition ist eine Bildinterpretationssoftware von Trimble zur automatischen, objektbasierten Klassifizierung von Fernerkundungsdaten (eCognition 2016)

Klassifizierung können die Ergebnisse extrahiert und mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems analysiert werden, um die auftretenden Veränderungen zu identifizieren. Dabei ist zum Beispiel die Veränderungsanalyse mittels eines Overlays der einzelnen Zeitschnitte möglich. Durch das Übereinanderlegen mehrerer Zeitschnitte können dann die Veränderungsflächen detektiert werden. Ein bekanntes Problem dabei sind die sog. „Sliver Polygone“, dabei handelt es sich um kleine Überlappungen oder Lücken die beim Übereinanderlegen mehrerer Polygone entstehen (Goodchild 1978). Bei der Detektion von Veränderungen muss für die Auswertung festgelegt werden, bis zu welcher Größe es sich um wirkliche „Sliver Polygone“ handelt, also eigentlich keine Veränderung vorliegt, und ab welcher Größe dieser Polygone tatsächlich eine Veränderung vorliegt. Dieser Schwellwert hängt von verschiedenen Faktoren ab, auf die im Kapitel 8.3 Minimum Mapping Unit (MMU) für Veränderungsflächen eingegangen wird. Eine weitere Möglichkeit bildet die Verknüpfung der Objekte aus einem Zeitschnitt, mit denen aus einem anderen. Für die Verknüpfung der Objekte aus zwei Zeitschnitten stehen in eCognition sog. Link-Klassen zur Verfügung, hierbei können unterschiedliche Verhältnisse zwischen den Objekten von t_0 und t_1 (1:n, n:1, 1:1, 1:0, 0:1) berücksichtigt werden (Hofmann & Blaschke 2012). Bekkarnayeva (2016) hat die Verknüpfung der Objekte mittels Link-Klassen am Beispiel von Kapstadt durchgeführt.

Im folgenden Kapitel werden sowohl die Ziele der durchgeführten Untersuchung, als auch die zugrunde liegenden Leitfragen kurz beleuchtet.

6 Ziele & Leitfragen

In der vorliegenden Arbeit sollen die Veränderungen der Siedlungsflächen in einem Stadtteil Kapstadts identifiziert werden. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Veränderungen der informellen Siedlungsflächen. Zunächst werden hierfür mit Hilfe von ArcMap die Flächensummen erstellt, um die allgemeine Flächenentwicklung der Siedlungen zu erfassen. In einem weiteren Schritt werden die Veränderungen von Aufnahmezeitpunkt zu Aufnahmezeitpunkt beleuchtet, wobei ein festzulegender Schwellwert für die Mindestgröße der Veränderungspolygone angewandt wird. Mit Hilfe der gewählten Methoden sollen in der vorliegenden Arbeit folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie haben sich die Siedlungsflächen im Untersuchungszeitraum von 2000-2015 verändert?
- Wie haben sich speziell die informellen Siedlungen im Zeitraum von 2000-2015 verändert?
- Gab es eine Ausbreitung informeller Siedlungen? Wenn ja zu „Lasten“ welcher Flächennutzung erfolgte die Ausbreitung der informellen Siedlungen?
- Wie erfolgt die Festlegung des Schwellwertes für die Mindestgröße der Veränderungspolygone (MMU = Minimum Mapping Unit) und welche Auswirkungen hat dieser?
- Lassen sich die erzielten Ergebnisse mit denen von Bekkaryaneva (2016) vergleichen?
- Sind die exportierten Polygondatensätze für die Untersuchung geeignet? Bzw. welchen Anforderungen halten die Ergebnisse stand?
- Für die Detektion welcher Siedlungsform sind diese besser geeignet, bzw. welche Veränderungen lassen sich damit abbilden?

In den folgenden Kapiteln werden die für diese Arbeit genutzten Daten und die zum Teil von Bekkaryaneva (2016) durchgeführte Vorverarbeitung beschrieben. Außerdem werden die Methoden erläutert, mit deren Hilfe in der vorliegenden Untersuchung die genannten Fragen beantwortet werden sollen.

7 Verwendete Daten

Bei den von der European Space Imaging GmbH (EUSI) zur Verfügung gestellten Daten handelt es sich um ein Gebiet in Kapstadt (Südafrika), mit einer Fläche von etwa 21,2 km². Das Gebiet umfasst die vier Townships: Gugulethu, Nyanga, Crossroads und Teile von Philippi. Abbildung 5 zeigt die Verortung des Untersuchungsgebietes. Für die Analyse der Veränderungen der informellen Siedlungen innerhalb dieses Gebietes stehen VHR (very high resolution) Satellitenbilder von 2000 bis 2015 zur Verfügung. Durch die stetige Weiterentwicklung der Sensoren ergibt sich bei einer solchen Zeitspanne, dass die Szenen der einzelnen Jahre von verschiedenen Sensoren aufgenommen wurden und auch die Bodenauflösung variiert. Die Eigenschaften der einzelnen Szenen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

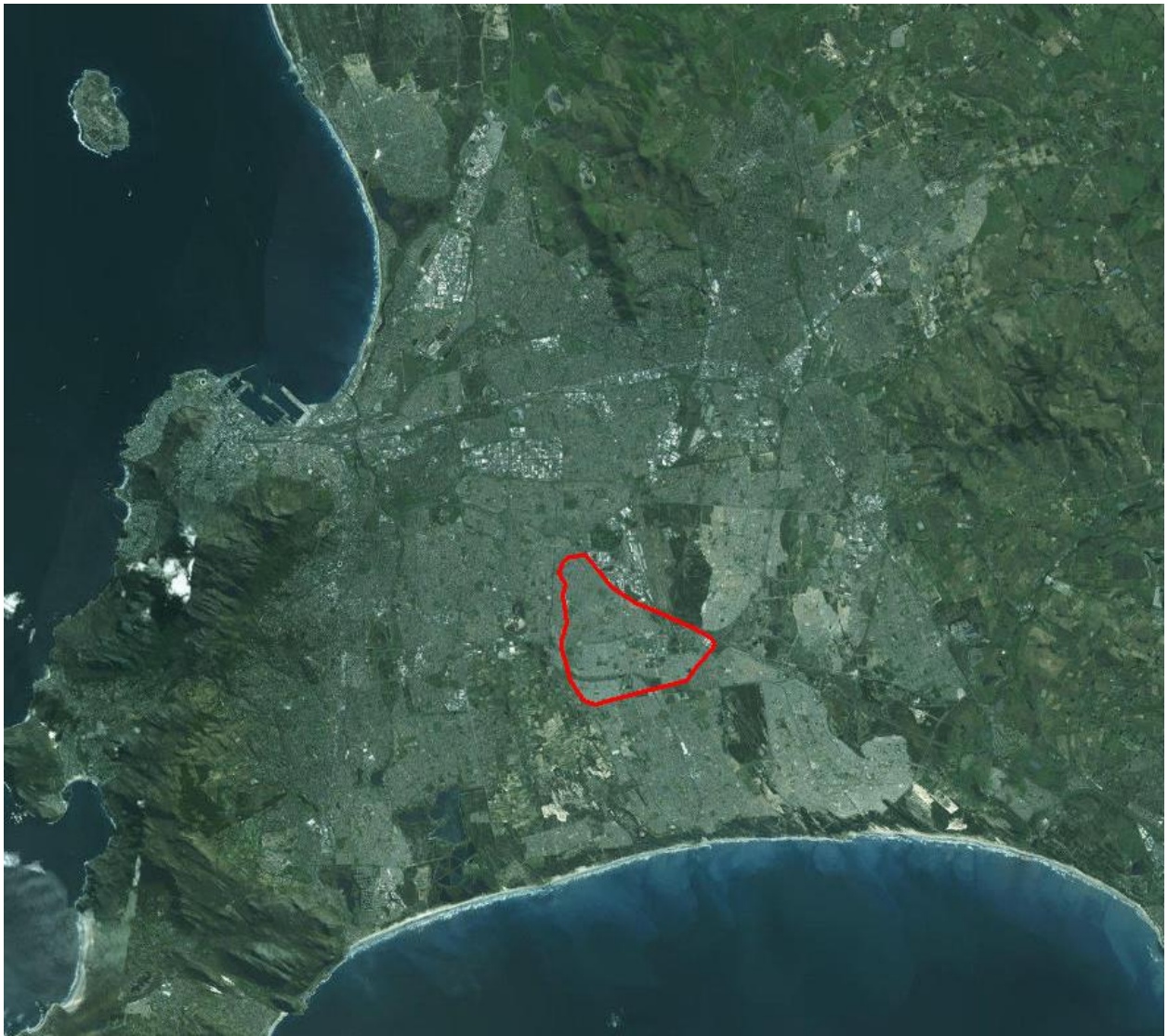


Abbildung 5: Kapstadt mit Untersuchungsgebiet (rot) Quelle: Eigene Bearbeitung nach Esri 2016

Aufnahmedatum	Uhrzeit	Sensor	Auflösung panchromatisch (Meter)	Auflösung multispektral (Meter)	Multispektrale Kanäle
19.03.2000	08:25	Ikonos-2	1	4	4
05.12.2002	08:57:40	QuickBird	0,6	2,4	4
21.01.2004	08:34:20	QuickBird	0,6	2,4	4
22.11.2005	09:21:49	QuickBird	0,6	2,4	4
21.12.2006	09:15:30	QuickBird	0,6	2,4	4
03.01.2008	09:22:17	QuickBird	0,6	2,4	4
30.11.2008	09:13:30	QuickBird	0,6	2,4	4
03.12.2009	08:58:38	QuickBird	0,6	2,4	4
04.01.2011	09:17:37	WorldView-2	0,5	2	8
23.12.2011	08:59:25	WorldView-2	0,5	2	8
18.11.2012	09:05:20	WorldView-2	0,5	2	8
06.12.2013	08:56:59	WorldView-2	0,5	2	8
11.01.2015	09:02:53	WorldView-3	0,4	1,6	8

Tabelle 1: Eigenschaften der einzelnen Szenen, Quelle: Eigene Darstellung

Die Bilddaten liegen alle im WGS 84 UTM 34S vor, es müssen also keine Anpassungen durchgeführt werden, die das Koordinatensystem betreffen.

8 Methoden

8.1 Vorverarbeitung

8.1.1 Pan-Schärfung

Bei der Pan-Schärfung werden die multispektralen Kanäle (geringere Auflösung) einer Szene mit dem panchromatischen Kanal (höhere Auflösung) zusammengeführt. Durch eine radiometrische Transformation entsteht ein multispektraler Datensatz mit der Auflösung des panchromatischen Kanals (Esri 2016). Zur Durchführung der Pan-Schärfung stehen verschiedene Methoden zur Auswahl. Bekkarnayeva (2016) hat sich zur Pan-Schärfung für die Hyperspectral Color Space Resolution Merge entschieden mit Nearest Neighbor als Resamplingmethode. Durch die Nearest Neighbor Methode werden die originalen Pixelwerte im Vergleich zu Cubic Convolution und Bilinear Interpolation nicht verändert. Außerdem kommen Padwick et al. (2010) zu dem Schluss, dass der verwendete HCS-Algorithmus räumlich die besten Ergebnisse erzielt und eine angemessene Farbbalance beibehalten wird.

8.1.2 Coregistrierung

Damit die detektierten Veränderungsflächen in den einzelnen Aufnahmen auch wirklich auf Veränderungen auf der Erdoberfläche beruhen und nicht auf das Übereinanderlegen der einzelnen Szenen zurückzuführen sind, müssen die einzelnen Aufnahmen exakt gegeneinander Referenziert werden. Bekkarnayeva (2016) hat hierfür ein Polynom dritten Grades gewählt, mit Nearest Neighbor als Resamplingmethode und konnte mit 15-20 Passpunkten ein RMS-Fehler $< 0,5$ erzielen.

8.1.3 Segmentierung

Der entscheidende Schritt zur objektbasierten Bildanalyse ist die Segmentierung, bei der benachbarte Pixel anhand ihrer spektralen und räumlichen Eigenschaften zu homogenen Gruppen zusammengefasst werden (Doxani et al. 2008). Bekkarnayeva (2016) wendete die in eCognition implementierte Multiresolution Segmentierung an, mit jeweils an die Auflösung der einzelnen Szenen angepassten Parametern. Durch die Segmentierung entstanden zwei Objektlevel, Level 1 mit kleineren und Level 2 mit größeren Objekten. Hierfür wurden die Parameter für die Form und die Kompaktheit der resultierenden Objekte jeweils angepasst (Bekkarnayeva 2016).

8.1.4 Klassifizierung

Nach der Segmentierung können die entstandenen Objekte klassifiziert werden. Bekkarnayeva (2016) hat hierfür das von Hofmann (2005) entwickelte Ruleset zur Klassifizierung mit eCognition an die Eigenschaften der Sensoren angepasst, um es auf die unterschiedlichen Szenen anwenden zu können. Die Übertragbarkeit des Rulesets wurde im Rahmen der Arbeit ebenfalls beschrieben und bewertet (Bekkarnayeva 2016). Die Objekte wurden mittels einer hierarchischen Klassifikation in Verbindung mit Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen klassifiziert. Die Fuzzy-Klassifikatoren geben dabei den Klassifikationszustand eines Objekts in Form eines Zugehörigkeits- oder Erfüllungsgrades an (Hofmann 2005). Abbildung 6 zeigt die Klassenhierarchie am Beispiel der Aufnahme vom 05.12.2002. Tabelle 2 fasst die Beschreibungen der Klassen zusammen. Welche Ontologie zu den Klassifizierungsparametern geführt hat kann den Arbeiten von Hofmann (2005) und Bekkarnayeva (2016) entnommen werden. An dieser Stelle sei auch auf die Tabelle der Klassenhierarchien (Anhang A) verwiesen.

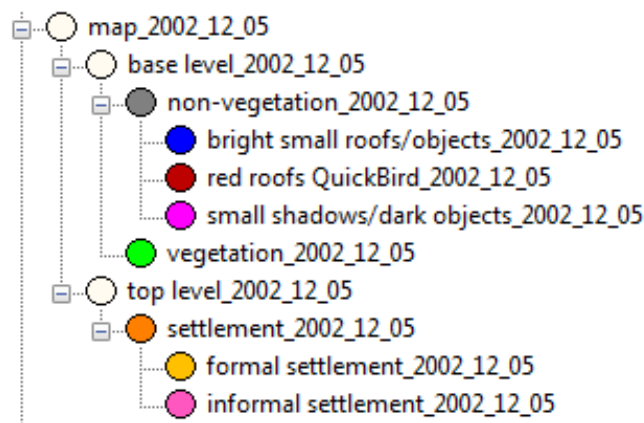


Abbildung 6: Klassenhierarchie am Beispiel der Aufnahme vom 05.12.2002. Quelle: Bekkarnayeva (2016)

Bekkarnayeva (2016) konnte eine Klassifizierungsgenauigkeit von durchschnittlich 70% erreichen, Details zur Methode und die Ergebnisse zum Accuracy Assessment können der Arbeit von Bekkaryaneva (2016) entnommen werden.

Nach der finalen Klassifizierung besteht die Möglichkeit, die Flächen der einzelnen Klassen zu exportieren. Für die vorliegende Arbeit wurden, nach der von Bekkaryaneva (2016) durchgeführten Klassifizierung, jeweils die formellen und die informellen Siedlungsflächen aus den Jahren 2000-2015 als Shapefile exportiert und zur weiteren Bearbeitung in eine Geodatabase in ArcMap geladen.

Level 1 (base level)	
Class	Description
Vegetation / non-vegetation	<ul style="list-style-type: none"> • Mean NDVI • Ratio NIR
Bright small roofs / objects	<ul style="list-style-type: none"> • Area, brightness • Distance to small shadows / dark objects • Elliptic fit • Rectangular fit • Shape index
Small shadows / dark objects	<ul style="list-style-type: none"> • Area • Brightness • Density • Ratio blue
Red roofs	<ul style="list-style-type: none"> • Ratio red / ratio green • Rectangular fit
Level 2 (top level)	
Class	Description
Settlement	<ul style="list-style-type: none"> • Area of sub-objects • Asymmetry • Average mean difference to neighbors of sub-objects NIR • Mean density of sub-objects • Number of sub-objects • Rel. Area of sub-objects small shadows / dark objects • Rel. area of vegetation • Shape index
Formal Settlement	<ul style="list-style-type: none"> • Area • Number of sub-objects bright small roof / objects
Informal Settlement	<ul style="list-style-type: none"> • Area of sub-objects • Asymmetry of sub-objects • Mean density of sub-objects • Number of sub-objects small shadows / dark objects • Rel. area of sub-objects bright small roofs / objects • Rel. area of sub-objects red roofs • Rel. area of sub-objects small shadows / dark objects • Rel. area of vegetation

Tabelle 2: Klassenbeschreibung nach Bekkarnayeva (2016)

8.1.5 Überprüfung und Korrektur der Klassifizierung

Bei der Sichtung der exportierten Shapefiles wurden teilweise großflächige Fehlklassifizierungen festgestellt. So wurden z. B. augenscheinlich informelle Siedlungen als formell klassifiziert (Abbildung 7) oder Gebäude mit großen Dachflächen in einigen Zeitschnitten keiner Klasse zugeordnet, in anderen wiederum als formell klassifiziert.

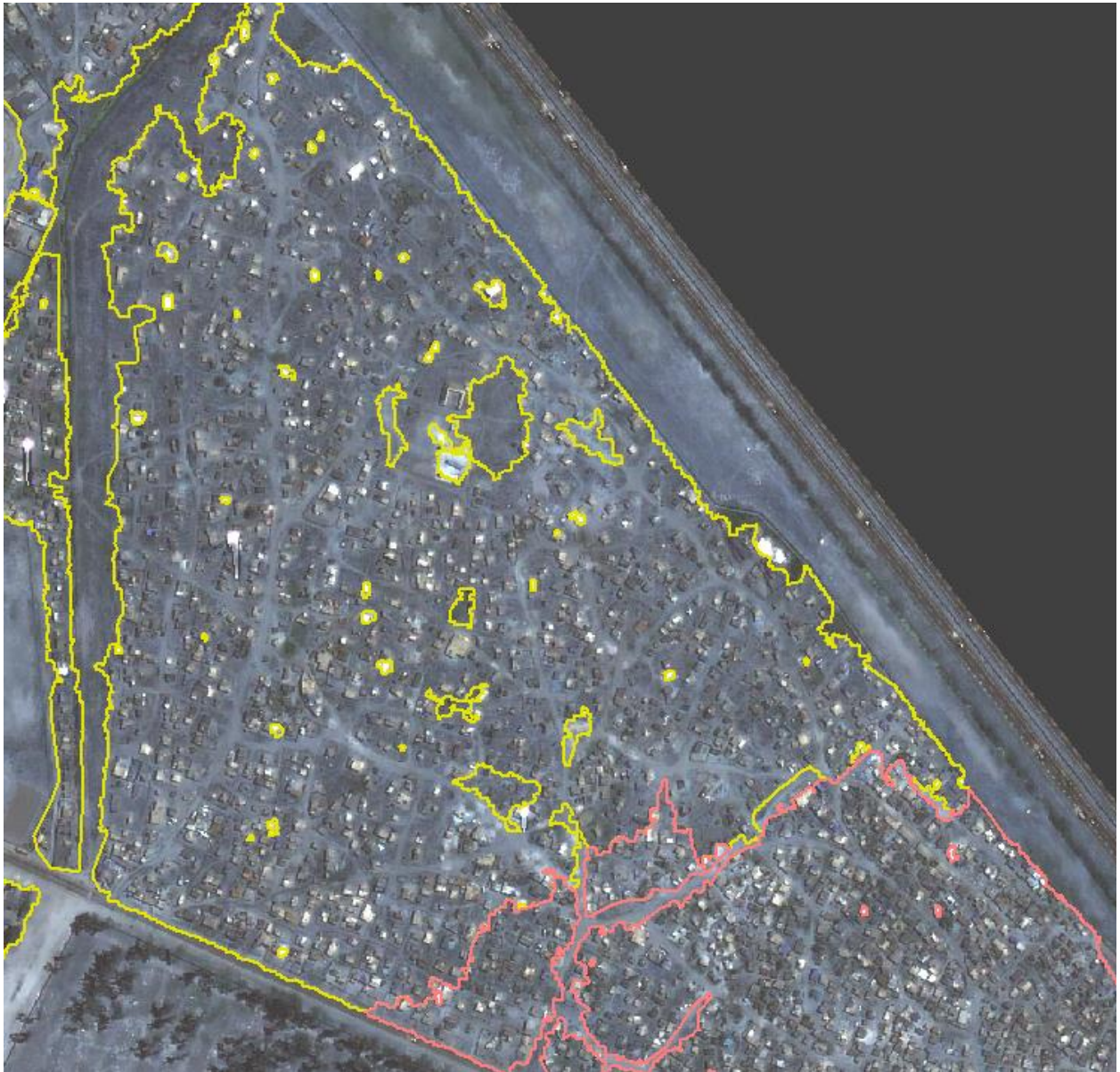


Abbildung 7: Augenscheinlich informelle Siedlung (im Bild rot) als formell (gelb) klassifiziert. Quelle: eigene Darstellung

Als Beispiel soll hier ein Polygon (Abbildung 8) mit einer Fläche von ca. 6000 m² dienen. Die folgende Tabelle (Nr. 3) zeigt für besagtes Polygon für jeden Zeitschnitt die zugeordnete Klasse.

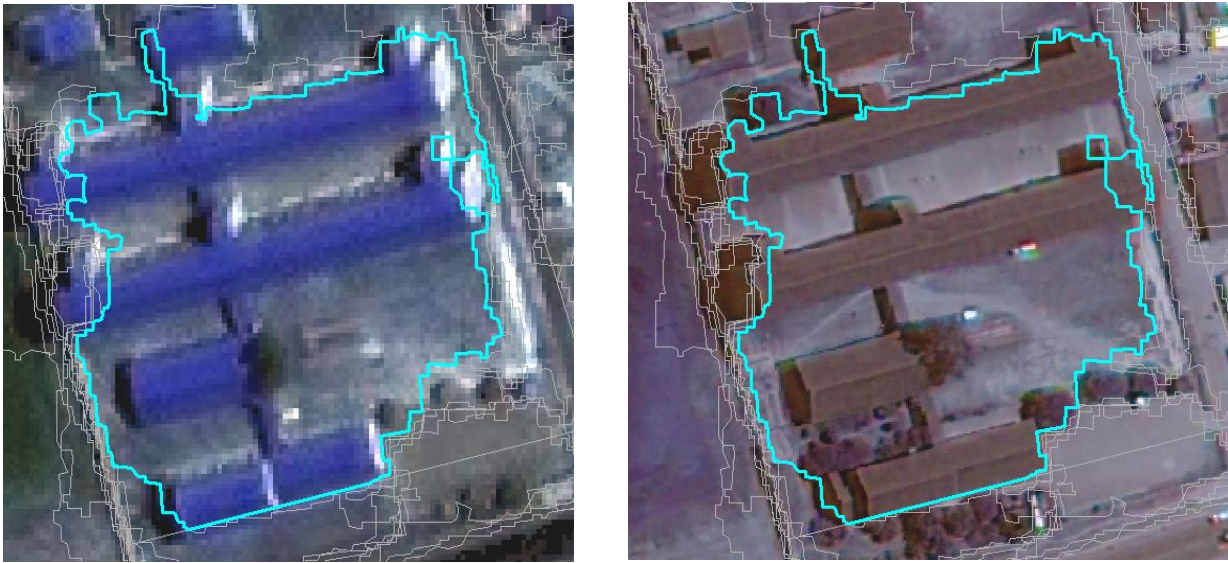


Abbildung 8: Beispielpolygon (blau) im Jahr 2000 (links) und 2015 (rechts). Quelle: Eigene Darstellung

Aus dieser Klassifizierung ergäbe sich in vier Betrachtungszeiträumen (jeweils von Jahr zu Jahr) eine Veränderung der formellen Siedlungsfläche, die ausschließlich auf eine Fehlklassifizierung zurückzuführen ist.

Klassifizierung des Beispielpolygons je Aufnahmedatum												
2000	2002	2004	2005	2006	2008 (Jan)	2008 (Nov)	2009	2011 (Jan)	2011 (Dez)	2012	2013	2015
Keine	Formell	Keine	Formell	Keine	Keine	Formell	Formell	Formell	Formell	Formell	Formell	Formell

Tabelle 3: Klassifizierung des Beispielpolygons 2000-2015. Quelle: Eigene Bearbeitung

Da die genannten Fehlklassifikationen die Ergebnisse teilweise stark verfälschen, müssen diese in der Datenbasis beseitigt werden. Hierfür wurde zunächst die erste Gruppe, die augenscheinlich falsch klassifizierte Siedlungen, für jedes Aufnahmedatum reklassifiziert. Über die Anzahl und die Flächenverhältnisse der reklassifizierten Flächen gibt Tabelle 4 Auskunft.

Reklassifizierung der augenscheinlich falsch klassifizierten Polygone (von → nach)						
Aufnahmedatum	Formell → informell		Informell → formell		Formell → nicht klassifiziert	
	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
19.03.2000	73	687,425.52	3	3,606.56	-	-
05.12.2002	42	616,990.64	-	-	1	3,842.64
21.01.2004	95	598,302.00	-	-	-	-
22.11.2005	59	254,488.32	-	-	-	-
21.12.2006	156	228,353.44	-	-	1	900.40
03.01.2008	72	291,124.64	-	-	-	-
30.11.2008	85	181,189.60	-	-	-	-
03.12.2009	112	193,181.76	-	-	5	2,873.52
04.01.2011	106	187,479.20	-	-	-	-
23.12.2011	129	215,721.04	-	-	-	-
18.11.2012	98	196,970.88	-	-	-	-
06.12.2013	136	188,290.48	-	-	-	-
11.01.2015	150	173,422.16	-	-	-	-

Tabelle 4: Anzahl und Fläche der im ersten Schritt reklassifizierten Polygone je Aufnahmedatum. Quelle: Eigene Bearbeitung

In einem weiteren Schritt wurden alle Siedlungsflächen der einzelnen Aufnahmedaten in einer Featureclass vereint, um hier alle Polygone mit einer Fläche von mehr als 1000 m², die in mindestens einem Zeitschnitt anders klassifiziert wurden als an allen anderen Aufnahmedaten, nochmals manuell auf deren Klassifizierung hin zu überprüfen. Auf diese Weise konnten oben genannte Fehlklassifikationen für Veränderungsflächen größer 1000 m² weitestgehend entfernt werden. Über Anzahl und Fläche der in diesem Schritt reklassifizierten Veränderungspolygone gibt Tabelle 5 Auskunft. In Tabelle 6 sind dann alle vorgenommenen Veränderungen der Klassifizierung zusammengefasst, sowie die jeweilige Gesamtfläche der Fehlklassifikationen ausgewiesen. Die Statistik kann jeweils nur für ein Aufnahmedatum betrachtet werden, da die gleichen Flächen auch in mehreren Aufnahmedaten reklassifiziert sein können, ein und dieselbe Fläche kann also z. B. sowohl in der Flächenbilanz vom 05.12.2002 als auch in der vom 30.11.2008 vorkommen.

So wurden z.B. in der Aufnahme vom 19.03.2000 insgesamt 169 Polygone mit einer Gesamtfläche von fast 900.000 m² umklassifiziert. Flächenmäßig handelt es sich hierbei um das Aufnahmedatum mit den größten Fehlklassifikationen. In der Aufnahme vom 04.01.2011 sind dagegen 180 Polygone mit der geringsten Gesamtfläche von etwa 350.000 m² als Fehlklassifikationen aufgefallen und umklassifiziert worden. Die Tabellen 4-6 geben auch Auskunft über die „Richtung“ der Umklassifizierung, also welcher Klasse das Polygon fälschlicherweise zugeordnet

wurde und zu welcher es eigentlich gehört. Über alle Aufnahmedaten tritt die Umklassifizierung von formell nach informell am häufigsten auf. Hierbei handelt es sich also um Flächen die fälschlicherweise als formell klassifiziert wurden, es sich aber eigentlich um informelle Bebauung handelt. Ebenfalls häufig tritt es auf, dass Flächen nicht klassifiziert wurden, auf denen eigentlich formelle Gebäude stehen. Hierbei handelt es sich vor allem um großflächige Gebäude, deren Ausmaße auf eine gewerbliche Nutzung schließen lassen. Streng genommen handelt es sich bei solch großen Dachflächen also nicht um Siedlungsfläche mit dem Zweck „wohnen“, sondern in der Regel um Gewerbefläche. Dennoch befinden sich hier formelle Gebäude die teilweise als formell klassifiziert wurden. Für die Korrektur der Klassifizierung wurden diese also ebenfalls der Klasse formell zugeordnet. In der Folge bedeutet dies: Für die weitere Untersuchung beinhaltet die formelle Siedlungsfläche nicht nur Flächen mit dem Zweck „wohnen“, sondern auch Flächen mit formeller, gewerblicher Bebauung. Als letzte nennenswerte Kategorie der Umklassifizierung sind Flächen zu nennen, die als formell klassifiziert wurden, aber eigentlich keiner Klasse zugeordnet werden können. Es handelt sich hierbei um Freiflächen, oft durchkreuzt von Trampelpfaden, die fälschlicherweise als formelle Siedlungen detektiert wurden. Alle weiteren Umklassifizierungen (informell → formell, nicht klassifiziert → informell und informell → nicht klassifiziert) fallen weniger ins Gewicht.

Zweiter Schritt der Reklassifizierung (jeweils von → nach)												
Aufnahmedatum	Informell → formell		Nicht klassifiziert → formell		formell → informell		Nicht klassifiziert → informell		formell → nicht klassifiziert		informell → nicht klassifiziert	
	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
19.03.2000	1	1,084.76	74	168,283.56	8	12,464.38	2	4,308.24	7	12,294.02	1	1,306.19
05.12.2002	1	1,084.76	54	118,608.13	8	16,643.07	3	4,123.88	9	12,985.88	7	11,573.68
21.01.2004	-	-	57	130,264.28	10	23,670.79	3	6,060.06	25	46,661.59	1	2,573.32
22.11.2005	-	-	64	151,683.28	4	7,728.97	1	1,734.26	15	21,512.74	-	-
21.12.2006	-	-	75	187,988.59	5	9,300.29	2	3,402.18	4	5,805.29	-	-
03.01.2008	-	-	80	195,103.39	4	7,719.55	3	4,416.40	4	5,305.69	2	4,565.36
30.11.2008	-	-	82	195,926.67	5	9,370.37	2	3,402.18	3	3,973.18	-	-
03.12.2009	-	-	62	148,153.87	5	9,387.47	2	2,960.58	12	26,774.97	2	5,118.08
04.01.2011	-	-	57	136,182.08	2	4,769.63	1	1,667.92	10	16,408.85	4	7,284.32
23.12.2011	2	3,690.71	53	137,182.42	3	5,888.29	3	3,981.63	19	28,778.24	1	1,057.49
18.11.2012	1	1,942.36	59	157,844.27	4	7,047.38	1	1,734.26	8	12,352.01	1	1,033.16
06.12.2013	1	1,942.36	71	176,704.90	2	4,769.63	1	1,734.26	9	12,969.56	2	2,146.20
11.01.2015	1	1,942.36	67	169,161.78	2	4,769.63	1	1,734.26	23	37,883.97	-	-

Tabelle 5: Anzahl und Fläche der im zweiten Schritt reklassifizierten Polygone je Aufnahmedatum. Quelle: Eigene Bearbeitung

Insgesamt reklassifizierte Polygone je Aufnahmedatum (jeweils von → nach)														
Aufnahme datum	informell → formell		Nicht klassifiziert → formell		formell → informell		Nicht klassifiziert → informell		formell → nicht klassifiziert		informell → nicht klassifiziert		Gesamt	
	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
19.03.2000	4	4.691.32	74	168.283.56	81	699.889.90	2	4.308.24	7	12.294.02	1	1.306.19	169	886.081.92
05.12.2002	1	1.084.76	54	118.608.13	50	633.633.71	3	4.123.88	10	16.828.52	7	11.573.68	125	784.767.93
21.01.2004	-	-	57	130.264.28	105	621.972.79	3	6.060.06	25	46.661.59	1	2.573.32	191	807.532.04
22.11.2005	-	-	64	151.683.28	63	262.217.29	1	1.734.26	15	21.512.74	-	-	143	437.147.58
21.12.2006	-	-	75	187.988.59	161	237.653.73	2	3.402.18	5	6.705.69	-	-	243	435.750.19
03.01.2008	-	-	80	195.103.39	76	298.844.19	3	4.416.40	4	5.305.69	2	4.565.36	165	508.235.04
30.11.2008	-	-	82	195.926.67	90	190.559.97	2	3.402.18	3	3.973.18	-	-	177	393.861.99
03.12.2009	-	-	62	148.153.87	117	202.569.23	2	2.960.58	17	29.648.49	2	5.118.08	200	388.450.25
04.01.2011	-	-	57	136.182.08	108	192.248.83	1	1.667.92	10	16.408.85	4	7.284.32	180	353.792.01
23.12.2011	2	3.690.71	53	137.182.42	132	221.609.33	3	3.981.63	19	28.778.24	1	1.057.49	210	392.609.11
18.11.2012	1	1.942.36	59	157.844.27	102	204.018.26	1	1.734.26	8	12.352.01	1	1.033.16	172	376.981.95
06.12.2013	1	1.942.36	71	176.704.90	138	193.060.11	1	1.734.26	9	12.969.56	2	2.146.20	222	386.615.03
11.01.2015	1	1.942.36	67	169.161.78	152	178.191.79	1	1.734.26	23	37.883.97	-	-	244	386.971.80

Tabelle 6: Anzahl und Flächen der insgesamt reklassifizierten Polygone je Aufnahmedatum. Quelle: Eigene Bearbeitung

8.2 Post-Classification-Comparison (PCC)

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Analyse der Veränderungen mit Hilfe eines Post-Classification Comparison (PCC). Für den Vergleich werden die von Bekkarnayeva (2016) erarbeiteten Flächen formeller und informeller Siedlungen mit Hilfe von ArcMap analysiert und visualisiert. Bei einem PCC handelt es sich um den Vergleich der aus einer Klassifizierung resultierenden Ergebnisse, im Hinblick auf die aufgetretenen Veränderungen zwischen zwei Zeitschnitten. Es werden also nach der erfolgten Klassifizierung die Klassen exportiert um anschließend analysiert zu werden.

Nachdem die zur Verfügung stehenden Daten von Fehlklassifikationen bereinigt wurden, können diese zur weiteren Analyse der Veränderungen herangezogen werden. Hierfür wird ein Datensatz mit den Siedlungsflächen aller Aufnahmedaten erstellt, aus dem hinterher die Veränderungen jeweils von Aufnahmezeitpunkt zu Aufnahmezeitpunkt detektiert werden können. Als erstes wird für jedes Aufnahmezeitpunkt die Fläche der Polygone je Klasse aufsummiert, um die Gesamtfläche der jeweiligen Siedlungsart zu erfassen und deren Entwicklung über den Untersuchungszeitraum darzustellen. In einem weiteren Schritt sollen dann die Veränderungen von Aufnahmezeitpunkt (t_0) zu Aufnahmezeitpunkt (t_1) erfasst werden. Hierfür werden alle Polygone, die an t_0 einer anderen Klasse zugeordnet wurden als an t_1 , als Veränderungspolygone zwischen t_0 und t_1 angesehen. Dabei ist auch die „Richtung“ der Veränderungen interessant. So können die Veränderungen in folgende Kategorien (Tabelle 7) eingeteilt werden:

Kategorie	Bedeutung
Nicht klassifiziert → Formelle Siedlung	Bau formeller Siedlung auf vorher nicht besiedelter Fläche
Informelle Siedlung → Formelle Siedlung	Abriss/Rückbau informeller Siedlungen und Aufbau formeller Siedlungen an gleicher Stelle
Nicht klassifiziert → Informelle Siedlung	Informelle Ansiedlung auf vorher nicht besiedelter Fläche
Formelle Siedlung → Informelle Siedlung	Wandel formeller Siedlungen zu informellen, durch Bebauung der Freiräume mit Hütten
Formelle Siedlung → Nicht klassifiziert	Abriss/Rückbau formeller Siedlungen
Informelle Siedlung → Nicht klassifiziert	Abriss/Rückbau informeller Siedlungen

Tabelle 7: Kategorien der Veränderungen. Quelle: Eigene Darstellung

Für Veränderungsflächen von je einem Aufnahmedatum zum darauf folgenden werden die Flächen der einzelnen Veränderungspolygone je Kategorie aufsummiert. Die Summen der Veränderungspolygone (=Veränderungsfläche z.B. zwischen t_0 und t_1) geben in der Folge Auskunft über die Gesamtfläche der Veränderungen in der jeweiligen Kategorie. Es soll zunächst festgestellt werden, wie sich die Flächen allgemein verändert haben, also welche Veränderungen in allen Kategorien aufgetreten sind und wie im Speziellen für informelle Siedlungen. Durch diese Vorgehensweise können nicht nur allgemeine Veränderungen detektiert werden, sondern auch zu „Lasten“ welcher Siedlungsform die jeweils andere Zugenommen hat und wieviel der vorher nicht besiedelte Fläche bebaut wurde. Über den Zuwachs und den Rückgang informeller Siedlungsfläche wird außerdem für jedes Zeitintervall (von t_0 bis t_1 , t_1 bis t_2 , t_n und t_{n+1}) eine Flächenbilanz erstellt, die darüber Auskunft gibt, ob die informelle Siedlungsfläche im jeweiligen Zeitintervall insgesamt ab- oder zugenommen hat. Der Zuwachs der informellen und der formellen Siedlungsfläche über den gesamten Untersuchungszeitraum soll außerdem in je einer Karte dargestellt werden.

Damit nur flächenmäßig relevante Veränderungen in die Analyse einfließen muss ein Minimum Mapping Unit (MMU) festgelegt werden, dieser Schwellwert gibt dann die Größe an, die ein Veränderungspolygon mindestens haben muss um in die Auswertung einzufließen.

8.3 Minimum Mapping Unit (MMU) für Veränderungsflächen

Beim Verschneiden der einzelnen Zeitschnitte entsteht eine Vielzahl an sogenannten „Sliver Polygonen“, die die Veränderungen von Aufnahmedatum zu Aufnahmedatum beschreiben. Durch Ungenauigkeiten bei der Digitalisierung oder der Segmentierung, oder aber bei der Coregistrierung der einzelnen Satellitenbilder, entstehen jedoch auch sehr kleine Polygone, die nicht als Veränderungsfläche gesehen werden. Das Minimum Mapping Unit (MMU) soll hier festlegen, ab welcher Größe dieser Polygone eine Veränderung (im Sinne einer Veränderung der Siedlungsfläche) in die Untersuchung einfließt und welche Polygone als Digitalisierungs-, Segmentierungs- oder Coregistrierungsfehler nicht berücksichtigt werden. Nach Knight & Lunetta (2003) erzielt ein großes MMU genauere Ergebnisse in der Veränderungsanalyse, obwohl dabei kleine aber vorhandene Veränderungen nicht berücksichtigt werden. Mit einem kleinen MMU dagegen können detailliertere Veränderungsanalysen durchgeführt werden, die Unsicherheiten im Ergebnis nehmen dabei aber zu, da oben genannte Fehler mit einfließen können. Bei pixelbasierten Veränderungsanalysen orientiert man sich für die Festlegung einer MMU an der Auflösung des jeweiligen Sensors (Zhang & Zhang 2007; Knight & Lunetta 2003). Da die vorliegenden Daten mittels eCognition segmentiert wurden, muss die generierte Segmentgröße in die Überlegungen

mit einfließen. Der Scale-Parameter bestimmt in eCognition indirekt die Anzahl und somit auch die Größe der Segmente die gebildet werden (Stoinski 2007). Die einzelnen Pixel werden mittels eines Region-Growing-Algorithmus Schritt für Schritt in größere Segmente überführt, der Scale-Parameter gibt dabei an, wie oft dieser Algorithmus wiederholt angewandt wird (Cho 2002) und bestimmt somit die Größe der Segmente. Die von Bekkarnayeva (2016) verwendeten Scale-Parameter (siehe Tabelle 8) ergeben so eine durchschnittliche Segmentgröße von etwa 3000 m² auf Level 2 und etwa 50 m² auf Level 1.

Aufnahmedatum	Scale-Parameter Level 1	Scale-Parameter Level 2
19.03.2000	10	100
05.12.2002	17	167
21.01.2004	17	167
22.11.2005	17	167
21.12.2006	17	167
03.01.2008	17	167
30.11.2008	17	167
03.12.2009	17	167
04.01.2011	20	200
23.12.2011	20	200
18.11.2012	20	200
06.12.2013	20	200
11.01.2015	25	250

Tabelle 8: Scale-Parameter für die Segmentierung mit eCognition nach Bekkarnayeva (2016)

Die Segmente auf Level 1 werden durch die hierarchische Klassifizierung zu größeren Objekten zusammengefasst, um letztendlich die Objekte auf Level 2 zu bilden. Ein MMU mit einer so geringen Fläche würde also bei der Analyse der Siedlungsfläche viele Veränderungen hervorbringen, die durch die angewandte Segmentierungs- und Klassifizierungsmethoden nicht detektiert worden wären.

Zur Veranschaulichung dienen die Abbildungen 9-13, die am Beispiel der Veränderungen zwischen 12.2013 und 01.2015, dargestellt auf der Aufnahme aus 2015, die unterschiedlichen MMUs visualisieren. Man sieht die Polygone einer Veränderungskategorie (im Beispiel „nicht klassifiziert“ nach „formell“) jeweils ab einer bestimmten Größe (MMU) in Rot.



Abbildung 9: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" nach "formell" MMU: 0 m² (rot) Quelle: Eigene Bearbeitung

Abbildung 9 zeigt die Selektion aller Veränderungsflächen der Kategorie „nicht klassifiziert“ → „formell“, ohne Berücksichtigung einer Mindestgröße. Die Veränderungen treten augenscheinlich vor allem entlang der Verkehrswege auf, also am „Rand“ von Siedlungsflächen. Die meisten Polygone zeigen also keine wirkliche Veränderung, sondern sind z.B. auf die Segmentierung zurückzuführen.



Abbildung 10: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" nach "formell" MMU: 10 m² (rot) Quelle: Eigene Bearbeitung

Bei Abbildung 10 wurde eine Mindestgröße von 10 m² berücksichtigt. Die Polygone entlang der Verkehrswege haben deutlich abgenommen, dennoch handelt es sich auch hier augenscheinlich nicht um wirkliche Veränderungen der Siedlungsflächen, sondern ebenfalls um Überschneidungspolygone deren Flächen nicht in die Untersuchung einfließen sollen.



Abbildung 11: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" nach "formell" MMU: 200 m² (rot) Quelle: Eigene Bearbeitung

Bei einer Mindestgröße von 200 m² (Abb. 11) lassen sich diese ungewollten Überschneidungspolygone bereits fast gänzlich ausschließen. Dennoch ist eine Veränderung von 200 m² noch nicht als Veränderung einer Siedlungsfläche zu betrachten.



Abbildung 12: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" nach "formell" MMU: 500 m² (rot) Quelle: Eigene Bearbeitung

Bei einem MMU von 500 m² (Abb. 12) fallen die Veränderungspolygone entlang der Verkehrswege/Siedlungsränder zunehmend weg. Es werden fast ausschließlich wirkliche Veränderungen der Siedlungsflächen berücksichtigt, weshalb in der folgenden Analyse unter anderem mit einem MMU von 500 m² gearbeitet wird.



Abbildung 13: Veränderungspolygone 2013-2015 "nicht klassifiziert" nach "formell" MMU: 1000 m² (rot) Quelle: Eigene Bearbeitung

Abbildung 13 zeigt die Flächen, die bei einem MMU von 1000 m² noch berücksichtigt werden. In der folgenden Analyse wird ebenfalls mit einem MMU von 1000 m² gearbeitet, da z.B. bei der Klassifizierung der gebildeten Segmente durch Bekkarnayeva (2016) formelle Siedlungen eine Größe zwischen 800 m² und 1300 m² haben und außerdem die Klassifizierung für Polygone ab

1000 m² überprüft wurde. In Tabelle 9 sind die Flächenverhältnisse und die Anzahl der Veränderungspolygone je nach MMU dargestellt.

Durch das Verschneiden aller Siedlungspolygone entstanden 768.616 Polygone (etwa 4,2 km²), die zwischen 2000 und 2002 eine Veränderung aufweisen (Detektion ohne Anwendung eines MMU). Die Durchschnittsgröße der so detektierten Veränderungen liegt bei 5,5 m². Berücksichtigt man nur die Polygone mit einer Fläche größer 10 m² verbleiben immer noch 60.125 Veränderungspolygone mit einer Gesamtfläche von ca. 3,4 km². Die durchschnittlich erfasste Veränderungsfläche liegt hier also bei 56,9 m². Bei einem MMU von 200 m² werden noch 2.449 Veränderungspolygone erfasst, mit einer durchschnittlichen Größe von 602,3 m². Eine deutliche Abnahme der erfassten Veränderungsflächen ergibt sich ab einem MMU von 500 m², die Anzahl sinkt auf 674 und die durchschnittliche Größe liegt bei 1.407 m². Ein MMU von 1000 m² ergibt sogar nur noch 276 Veränderungspolygone mit einer Gesamtgröße von 675.632,74 m². Wählt man ein noch größeres MMU (im Beispiel 3000 m²) nimmt die Anzahl und die Fläche weiter ab. Im Zeitintervall 2006-2008_jan treten z.B. bei einem MMU von 3000 m² gar keine Veränderungen mehr auf. Die Durchschnittsgrößen der Veränderungen zwischen 2013 und 2015 stellen hier einen Ausreißer dar, da in diesem Intervall die größten Veränderungen zu erkennen sind (siehe Ergebnisse der Veränderungsanalyse).

Für die Veränderungsanalyse der Siedlungsflächen werden in der vorliegenden Arbeit MMUs von 500 m² und 1000 m² angewandt. Zum einen wird davon ausgegangen, dass die Veränderungen größer 500 m² am ehesten den wirklichen Veränderungen der Siedlungsfläche entsprechen, zum anderen wurde im Vorfeld die Klassifizierung für Polygone größer 1000 m² überprüft und korrigiert. Bei einem MMU von 1000 m² können also Veränderungen durch Fehlklassifikationen nahezu ausgeschlossen werden.

Aufnahmedatum	MMU 0			MMU 10			MMU 200		
	Anzahl	Fläche (m ²)	Ø (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Ø (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Ø (m ²)
2000-2002	768,616	4,260,061.54	5.54	60,125	3,421,480.43	56.91	2,449	1,475,151.61	602.35
2002-2004	714,992	2,991,068.80	4.18	48,885	2,219,050.15	45.39	1,562	703,988.93	450.70
2004-2005	747,348	3,012,990.43	4.03	49,341	2,211,313.35	44.82	1,510	684,442.52	453.27
2005-2006	717,719	2,720,636.65	3.79	46,669	1,954,215.12	41.87	1,238	519,557.09	419.67
2006-2008_jan	733,197	2,612,248.74	3.56	47,675	1,824,028.73	38.26	1,060	373,568.84	352.42
2008_jan-2008_nov	704,474	2,622,047.40	3.72	47,488	1,862,624.90	39.22	1,146	414,219.71	361.45
2008_nov-2009	705,977	2,662,413.99	3.77	47,678	1,905,765.71	39.97	1,222	440,239.13	360.26
2009-2011_jan	710,461	2,576,145.81	3.63	45,790	1,826,495.40	39.89	1,132	423,145.55	373.80
2011_jan-2011_dez	723,647	2,561,701.74	3.54	45,702	1,743,575.04	38.15	1,078	422,920.02	392.32
2011_dez-2012	642,099	2,112,285.36	3.29	37,984	1,441,816.98	37.96	822	315,676.94	384.04
2012-2013	657,506	2,094,755.72	3.19	37,740	1,416,110.90	37.52	832	308,412.03	370.69
2013-2015	672,520	2,685,066.46	3.99	40,875	1,990,828.64	48.71	973	760,438.15	781.54

Aufnahmedatum	MMU 500			MMU 1000			MMU 3000		
	Anzahl	Fläche (m ²)	Ø (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Ø (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Ø (m ²)
2000-2002	674	948,343.91	1,407.04	276	675,632.74	2,447.94	58	318,503.13	5,491.43
2002-2004	354	348,656.71	984.91	74	154,684.77	2,090.33	12	51,757.07	4,313.09
2004-2005	322	285,026.81	885.18	58	145,551.48	2,509.51	15	72,693.09	4,846.21
2005-2006	229	229,219.20	1,000.96	38	88,195.89	2,320.94	10	41,314.78	4,131.48
2006-2008_jan	149	106,199.80	712.75	6	8,259.96	1,376.66	0	0.00	0.00
2008_jan-2008_nov	182	133,270.84	732.26	7	12,972.43	1,853.20	1	3,330.48	3,330.48
2008_nov-2009	197	139,982.80	710.57	6	11,150.39	1,858.40	1	3,802.70	3,802.70
2009-2011_jan	189	144,851.49	766.41	17	29,391.35	1,728.90	1	5,287.74	5,287.74
2011_jan-2011_dez	184	158,571.74	861.80	17	44,258.05	2,603.41	2	10,234.94	5,117.47
2011_dez-2012	156	119,009.18	762.88	13	22,904.68	1,761.90	2	7,295.31	3,647.65
2012-2013	151	108,683.92	719.76	7	13,182.11	1,883.16	1	4,864.18	4,864.18
2013-2015	183	529,626.68	2,894.13	12	414,802.94	34,566.91	4	402,696.17	100,674.04

Tabelle 9: Flächenverhältnisse und Anzahl der Veränderungspolygone je nach MMU (in m²). Quelle: Eigene Darstellung

9 Ergebnisse der Veränderungsanalyse der Siedlungsflächen

9.1 Flächensummen allgemein

Die Flächensummen der einzelnen Aufnahmezeiten zeigen zunächst allgemein die Zunahme der insgesamt erfassten Siedlungsfläche (siehe Tabelle 10) ohne Anwendung eines MMU. So hat auch die Fläche der formellen Siedlungen im Untersuchungszeitraum kontinuierlich zugenommen. Die größte Veränderung fand dabei zwischen 2000 und 2002 statt, hier nahm die formelle Siedlungsfläche um ca. 1,8 km² zu. Die Fläche der informellen Siedlungen nahm dagegen von 2000 bis 2006 leicht ab, um dann bis zum Ende des Untersuchungszeitraums (2015) kontinuierlich zuzunehmen. Den größten Flächenzuwachs gab es demnach von 2013 bis 2015, wobei durch diesen erstmals die ursprüngliche informelle Siedlungsfläche von 2000 wieder erreicht bzw. leicht überschritten wurde.

Aufnahmedatum	Formelle Siedlungsfläche (m ²)	Informelle Siedlungsfläche (m ²)	Erfasste Siedlungsfläche gesamt (m ²)
19.03.2000	6,732,920.18	1,931,804.63	8,664,724.81
05.12.2002	8,553,890.49	1,933,764.91	10,487,655.40
21.01.2004	8,943,509.02	1,700,209.19	10,643,718.21
22.11.2005	9,235,383.47	1,566,774.90	10,802,158.37
21.12.2006	9,216,998.89	1,474,250.06	10,691,248.95
03.01.2008	9,344,954.54	1,574,552.25	10,919,506.79
30.11.2008	9,132,124.84	1,578,027.34	10,710,152.18
03.12.2009	9,496,026.27	1,630,742.49	11,126,768.76
04.01.2011	9,846,362.23	1,628,963.29	11,475,325.51
23.12.2011	9,654,447.86	1,670,650.44	11,325,098.30
18.11.2012	9,872,401.37	1,657,443.33	11,529,844.70
06.12.2013	9,919,057.78	1,667,049.15	11,586,106.93
11.01.2015	10,089,418.05	2,087,326.81	12,176,744.86

Tabelle 10: Flächensummen formeller, informeller und insgesamt erfasster Siedlungsfläche je Aufnahmedatum.
Quelle: Eigene Bearbeitung

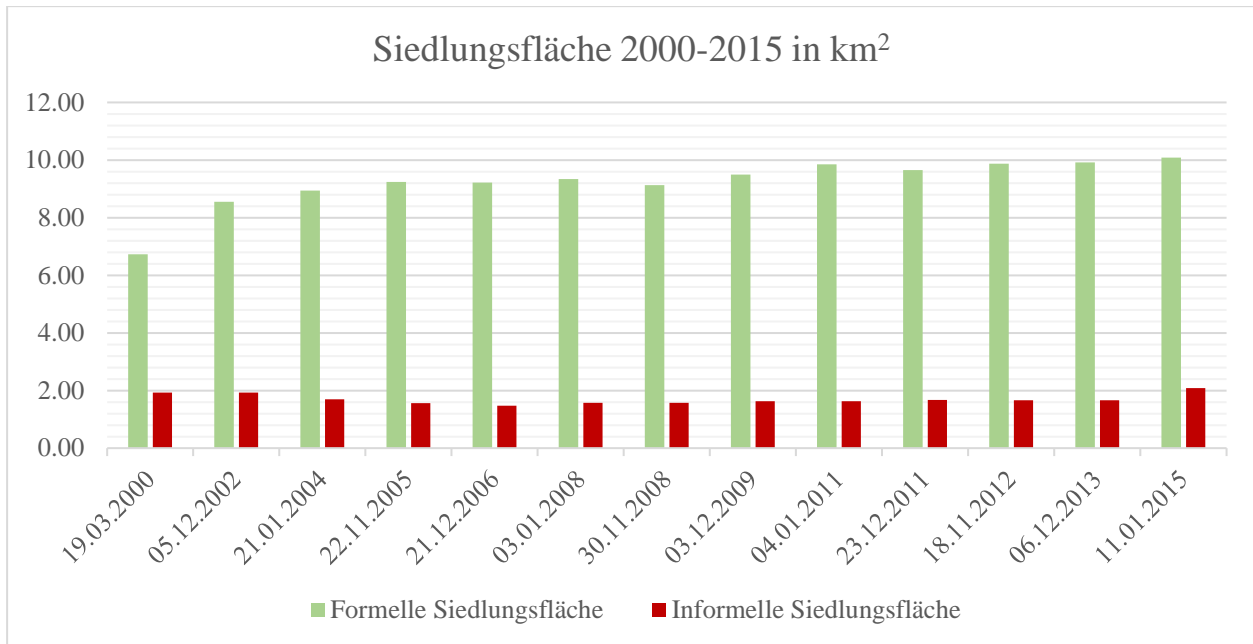


Abbildung 14: Siedlungsfläche formeller und informeller Siedlungen 2000-2015 in km². Quelle: Eigene Darstellung

9.2 Veränderungen von Aufnahmezeitpunkt zu Aufnahmezeitpunkt

Die den Grafiken zugrundeliegenden Werte können den Tabellen im Anhang B entnommen werden. Aus Abbildung 15 gehen die sowohl positiven als auch negativen Veränderungen der einzelnen Siedlungsformen jeweils von Aufnahmezeitpunkt zu Aufnahmezeitpunkt hervor. Man kann den oben bereits beschriebenen, fast durchgehenden Zuwachs formeller Siedlungen über den Untersuchungszeitraum erkennen. In nur zwei der untersuchten Zeitintervalle ist ein nennenswerter Rückgang der formellen Siedlungsfläche verzeichnet. Auch die Abnahme informeller Siedlungsflächen bis 2006 und der anschließende Anstieg lassen sich hier gut erkennen.

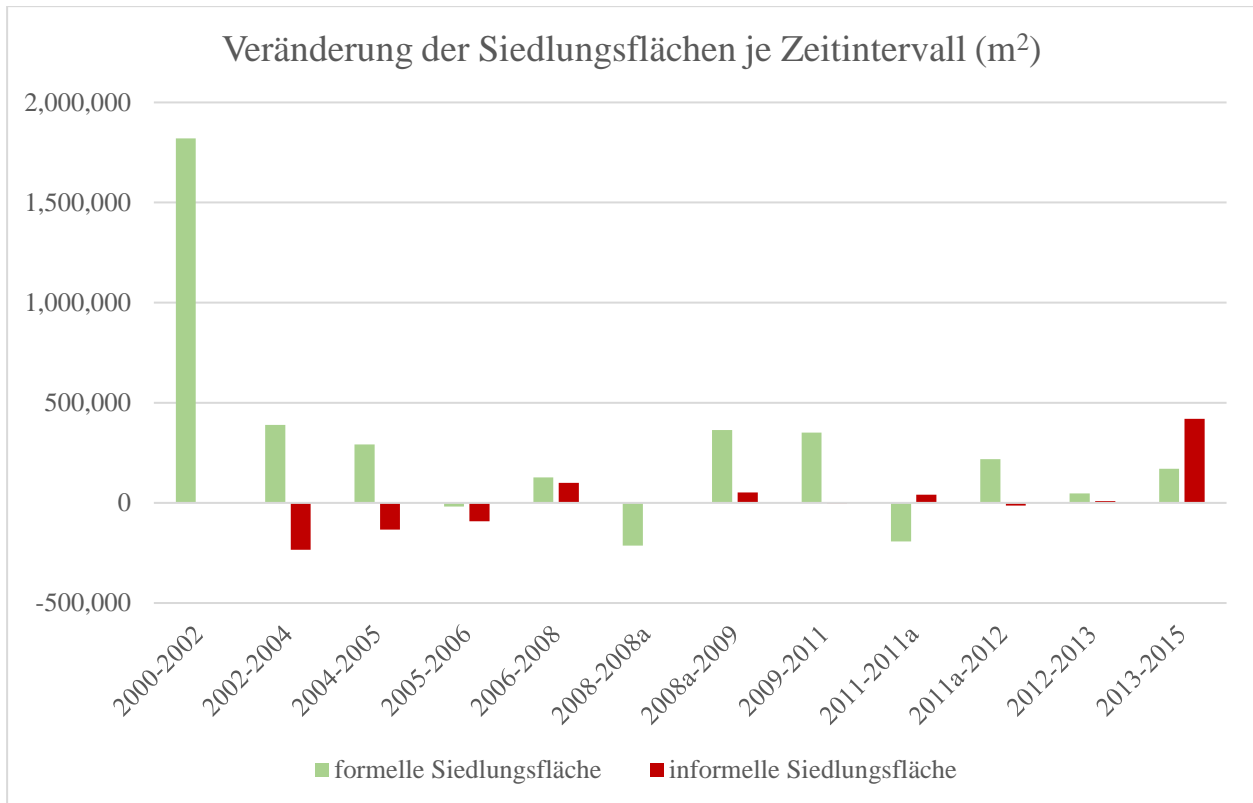


Abbildung 15: Veränderung der Siedlungsflächen je Zeitintervall. Quelle: Eigene Darstellung

Bei der folgenden Analyse der Veränderungen von Aufnahmezeitpunkt zu Aufnahmezeitpunkt kamen die oben diskutierten MMUs von 500 m² und 1000 m² zum Einsatz. Es werden die Ergebnisse differenziert nach den unterschiedlichen MMUs dargestellt und beschrieben. Außerdem werden die Veränderungen der Siedlungsfläche nach den unterschiedlichen Kategorien (siehe Tabelle 7) betrachtet.

9.2.1 Veränderungsanalyse der Flächen größer 500 m²:

Aus Abbildung 16 lassen sich die Veränderungen (von Aufnahmezeitpunkt zu Aufnahmezeitpunkt) der Siedlungsfläche insgesamt, aber auch die „Richtung“ der Veränderungen erkennen. Die größte Veränderung fand demnach von 2000 bis 2002 statt, wo eine Fläche von etwa 480.000 m² von *nicht klassifiziert* in *formelle* Siedlungsfläche übergegangen ist. Also vorher nicht bebaute Fläche mit formellen Siedlungen bebaut wurde. Außerdem nahm im Selben Zeitintervall die Fläche der informellen Siedlungen auf vorher nicht bebautem Gebiet um 232.476,67 m² zu. Auch die Kategorien *informell* → *nicht klassifiziert* und *formell* → *nicht klassifiziert* nehmen mit insgesamt etwa 150.000 m² einen Teil der Veränderungen in diesem Zeitintervall ein. Hierbei handelt es sich vermutlich um geräumte informelle Siedlungen³. Über den gesamten Untersuchungszeitraum ist

³ Eine genaue Untersuchung, um diese Vermutung zu bestätigen würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschreiten

zu erkennen, dass der jeweils größte Anteil der Veränderungen auf den Bau formeller Siedlungen auf in der Aufnahme davor nicht bebauter Fläche zurückzuführen ist. Bei diesen Flächen handelt es sich teilweise um Flächen die im vorherigen Zeitintervall den Klassen *formell* → *nicht klassifiziert* oder *informell* → *nicht klassifiziert* zugeordnet werden können, also für die Entstehung formeller Siedlungen geräumte Flächen. Im letzten betrachteten Zeitintervall (2013-2015) ist auf einer vorher nicht bebauten Fläche ein großer Bereich informeller Bebauung hinzugekommen.

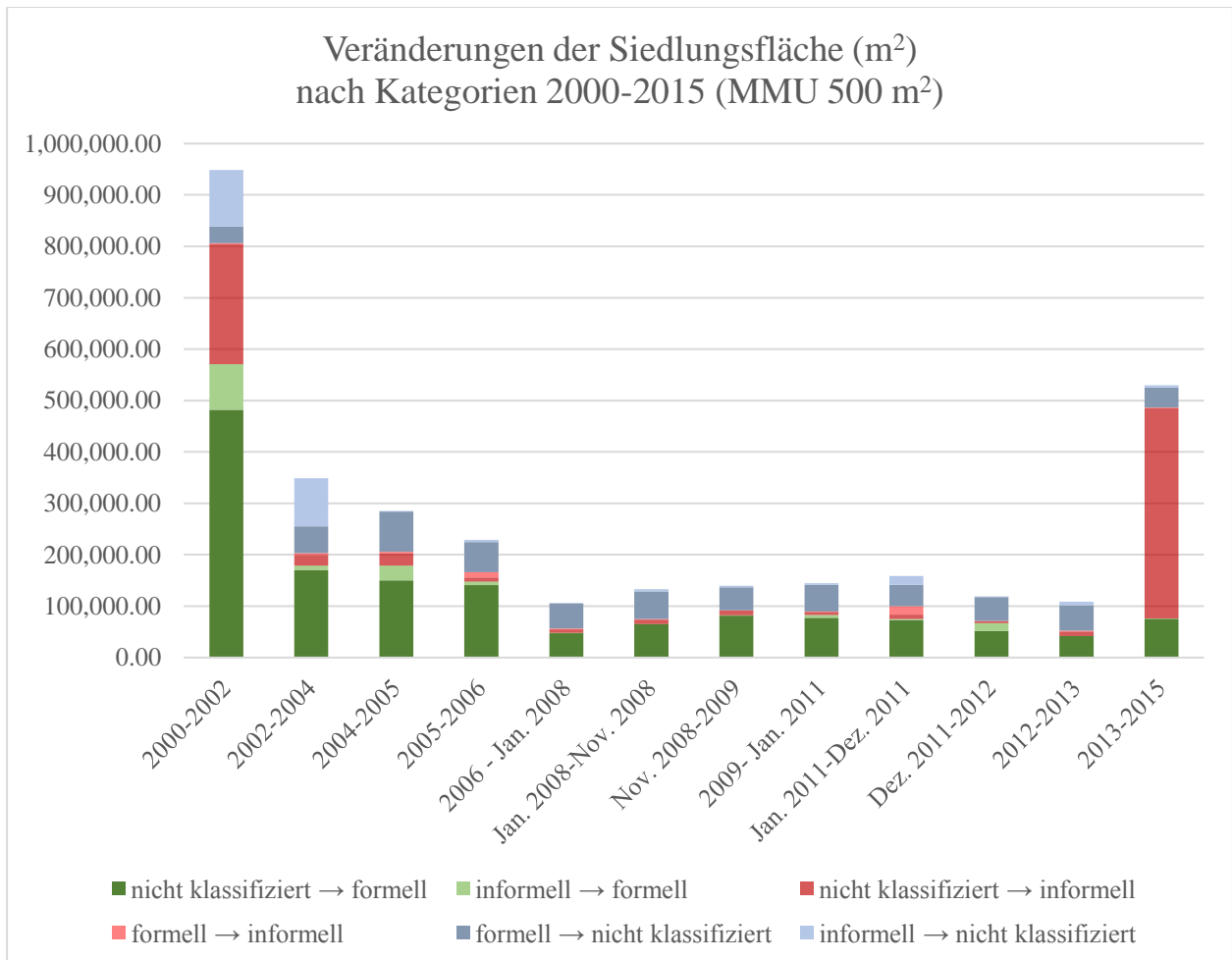


Abbildung 16: Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 2000-2015 (MMU 500 m²). Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Betrachtung der mit einem MMU von 500 m² detektierten Veränderungen macht die Kategorie *formell* → *nicht klassifiziert* in den meisten Zeitintervallen den zweitgrößten Anteil aus. Diese Veränderungsflächen sind in den meisten Fällen den Fehlklassifikationen zuzuschreiben. Aufgrund der Annahme, dass bestehende formelle Siedlungen nicht wieder abgerissen werden, wurden stichprobenhaft Veränderungsflächen der Kategorie *formell* → *nicht klassifiziert* manuell überprüft. Dabei wurde festgestellt das die Flächen entweder fälschlicherweise als *formell* oder aber fälschlicherweise nicht klassifiziert wurden. Im Zuge dieser manuellen Überprüfung konnten

auch die Größen der betroffenen Veränderungsflächen kontrolliert werden, wobei festgestellt wurde, dass es sich um Flächen zwischen 500 m² und 1000 m² handelt. Für Veränderungen ab einer Größe von 1000 m² kann die Detektion solcher, auf Fehlklassifikationen beruhenden Veränderungen ausgeschlossen werden, da hier die Zuordnung der Klassen manuell überprüft und korrigiert wurde.

In der vorliegenden Arbeit gilt das Hauptinteresse den informellen Siedlungen und deren Entwicklung/Veränderung über den Untersuchungszeitraum von 2000 bis 2015.

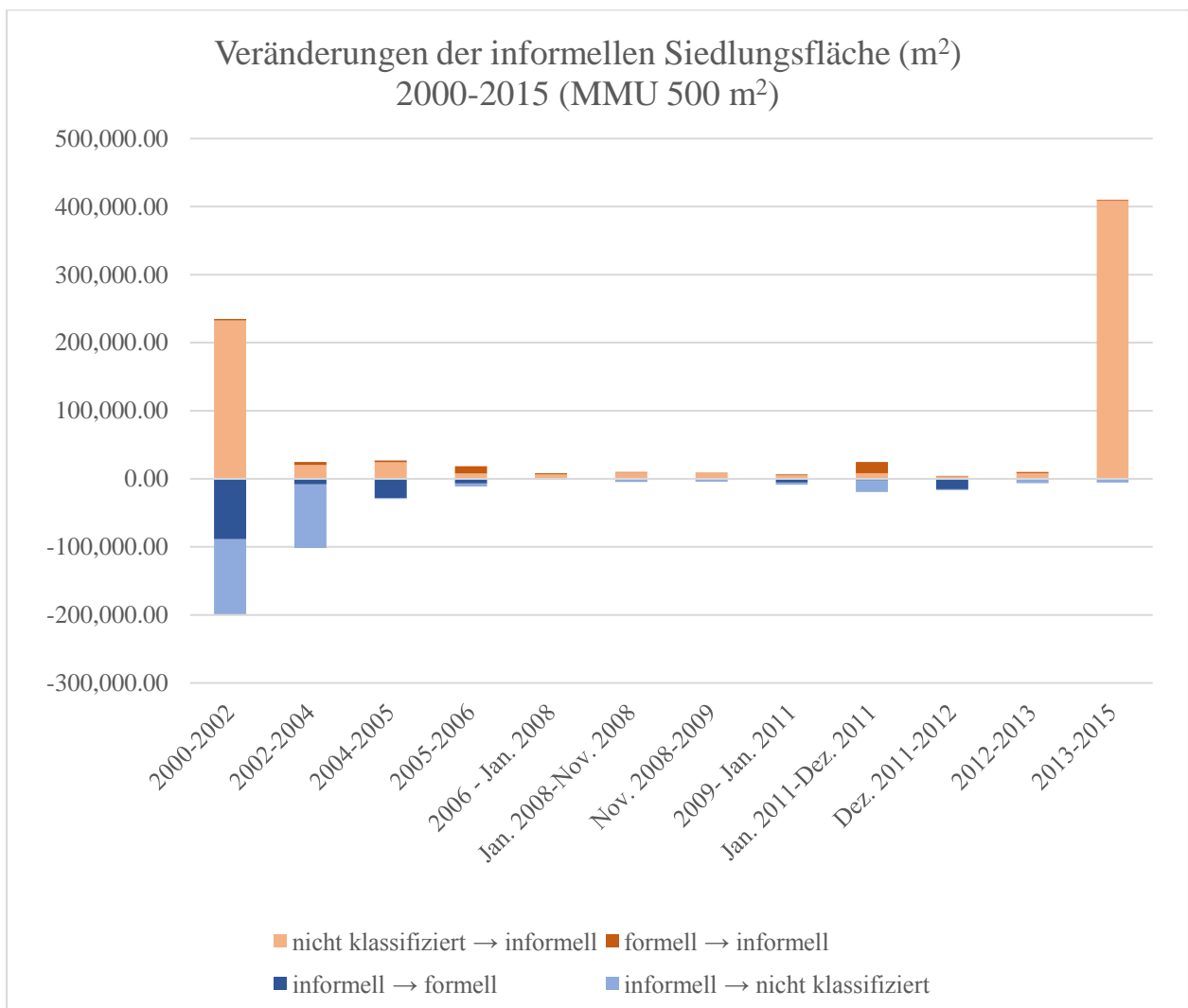


Abbildung 17: Veränderung der informellen Siedlungsfläche 2000-2015 (MMU 500 m²). Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 17 zeigt die sowohl positiven als auch negativen Veränderungen der informellen Siedlungsfläche, jeweils von Aufnahmedatum zu Aufnahmedatum über den gesamten Untersuchungszeitraum, unter Anwendung eines MMU von 500 m². Man kann bei der Betrachtung der informellen Siedlungsflächen erkennen, dass die größten Veränderungen im ersten und im letzten untersuchten Zeitintervall auftreten. Von 2000 bis 2002 lässt sich ein

Zuwachs von etwa 230.000 m² feststellen, aber im gleichen Zeitintervall wurden große Flächen mit informeller Bebauung geräumt. So gleicht sich im Zeitintervall von 2000 bis 2002 der Zuwachs (235,114.82 m²) und Rückgang (-198,967.44 m²) der informellen Siedlungsfläche fast aus. Im folgenden Zeitintervall (2002-2004) überwiegt der Rückgang der informellen Siedlungsfläche über dem Zuwachs. Von 2004 bis 2005 gleichen sich Zuwachs und Rückgang der informellen Bebauung wieder aus. Im Untersuchungszeitraum von 2005 bis 2011 sind nur geringe Veränderungen aufgetreten, die sich jeweils ebenso nahezu ausgleichen. In der Flächenbilanz ist die informelle Siedlungsfläche in diesen Jahren also fast gleich geblieben. Erst im letzten untersuchten Zeitintervall tritt eine extreme Veränderung auf. Die informelle Siedlungsfläche hat einen Zuwachs von etwa 410.000 m² auf vorher nicht klassifizierter Fläche zu verzeichnen. Der Rückgang in besagtem Zeitintervall liegt dagegen nur bei etwa 5.000 m².

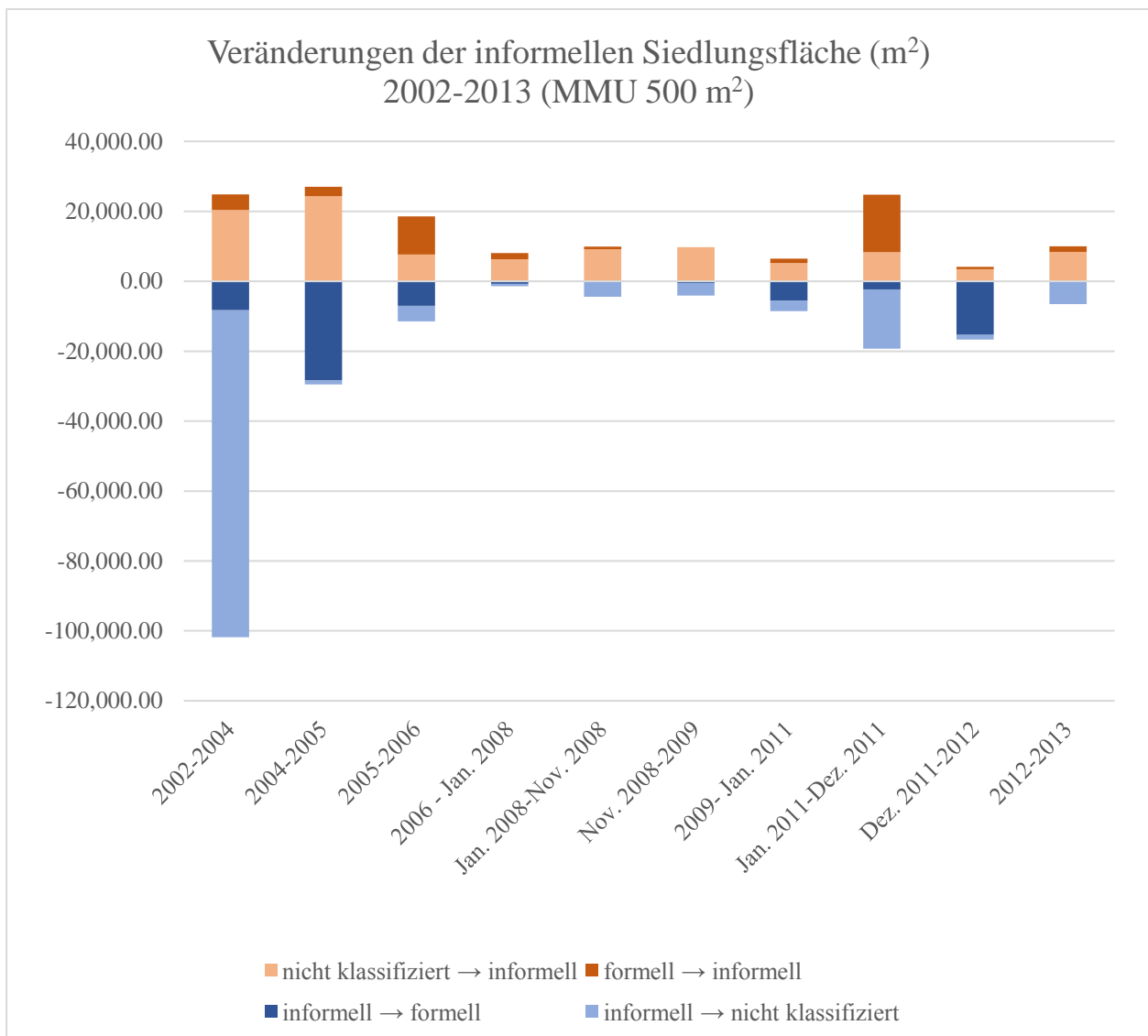


Abbildung 18: Veränderungen der informellen Siedlungsfläche 2002-2013 (MMU 500 m²). Quelle: Eigene Darstellung

Um die Veränderungen im Zeitraum von 2002 bis 2013 besser darstellen zu können, wurden für Abbildung 18 die beiden Ausreißer 2000-2002 und 2013-2015 aus der Darstellung genommen. Für die verbleibenden 10 Zeitintervalle lassen sich die Veränderungen je Kategorie gut erkennen. Die Kategorie *formell* → *informell* (dunkelrot) sticht besonders in den Zeitintervallen 2005-2006 und Jan. 2011-Dez. 2011 hervor. Da die Veränderung formeller Siedlungen hin zu informellen ungewöhnlich ist, wurden auch diese Flächen stichprobenartig überprüft. Hierfür wurden die betreffenden Polygone der Kategorie *formell* → *informell* im Datensatz selektiert und absteigend nach Größe sortiert um anschließend die ersten 20 Objekte der resultierenden Tabelle zu überprüfen. Dabei konnte festgestellt werden, dass es sich hierbei ebenfalls teilweise um Fehlklassifikationen handelt. Die Klassifikation der restlichen Kategorien (*nicht klassifiziert* → *informell*, *informell* → *formell* und *informell* → *nicht klassifiziert*) dagegen hielt einer manuellen, stichprobenartigen Überprüfung weitestgehend stand. Diese Veränderungen entsprechen also überwiegend tatsächlichen Veränderungen der Siedlungsfläche. Für die Flächenbilanz der einzelnen Zeitabschnitte (Tabelle 11) bedeutet dies, dass z.B. in einem weiteren Zeitintervall der Rückgang der informellen Siedlungsfläche überwiegt.

Die Flächenbilanzen über alle Zeitintervalle sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Flächenbilanz informeller Siedlungsfläche je Zeitintervall (MMU 500 m²)				
Zeitintervall	Zuwachs (m²)	Rückgang (m²)	Flächenbilanz (m²)	Flächenbilanz (m²) (ohne formell → informell)
2000-2002	235,114.82	-198,967.44	36,147.37	33,509.23
2002-2004	24,795.60	-101,776.49	-76,980.89	-81,346.89
2004-2005	27,053.03	-29,483.89	-2,430.87	-5,164.04
2005-2006	18,578.19	-11,494.84	7,083.35	-3,827.27
2006 - Jan. 2008	8,044.87	-1,384.46	6,660.42	4,875.75
Jan. 2008-Nov. 2008	9,907.78	-4,433.33	5,474.44	4,700.34
Nov. 2008-2009	9,724.31	-4,082.33	5,641.98	5,641.98
2009- Jan. 2011	6,507.33	-8,530.06	-2,022.73	-3,304.29
Jan. 2011-Dez. 2011	24,767.11	-19,278.20	5,488.91	-10,969.07
Dez. 2011-2012	4,093.96	-16,637.43	-12,543.47	13,167.09
2012-2013	9,994.06	-6,545.01	3,449.06	1,818.69
2013-2015	409,803.86	-5,362.14	404,441.73	403,292.93

Tabelle 11: Flächenbilanz informeller Siedlungsfläche je Zeitintervall (MMU 500 m²). Quelle: Eigene Bearbeitung

9.2.2 Veränderungsanalyse der Flächen größer 1000 m²:

Aus Abbildung 19 geht hervor, dass sich auch bei einer Mindestgröße von 1000 m² die Veränderungen auf die Zunahme formeller Siedlungen auf vorher nicht klassifizierter Fläche

konzentrieren. Einige Veränderungskategorien treten in mehreren Zeitintervallen gar nicht auf. So tritt von 2006 bis Jan. 2008 nur eine Veränderungskategorie auf, nämlich *nicht klassifiziert* → *formell*, es sind in diesem Zeitraum also flächenwirksam nur formelle Siedlungen auf vorher nicht klassifizierten Gebiet entstanden. Im Gegensatz steht das Zeitintervall von 2004-2005, hier treten in allen Kategorien Veränderungen auf. So wurden in diesem Zeitintervall etwa 83.500 m² formelle Siedlung auf vorher nicht klassifiziertem Gelände geschaffen und 20.895 m² informelle Siedlungsfläche in formelle umgewandelt. Außerdem wurden in diesem Zeitintervall 26.136 m² der informellen Siedlungsfläche geräumt. Der Zuwachs informeller Siedlungen auf vorher nicht klassifizierten Flächen ist vor allem in den Zeitintervallen 2000-2002 und 2013-2015 zu erkennen.

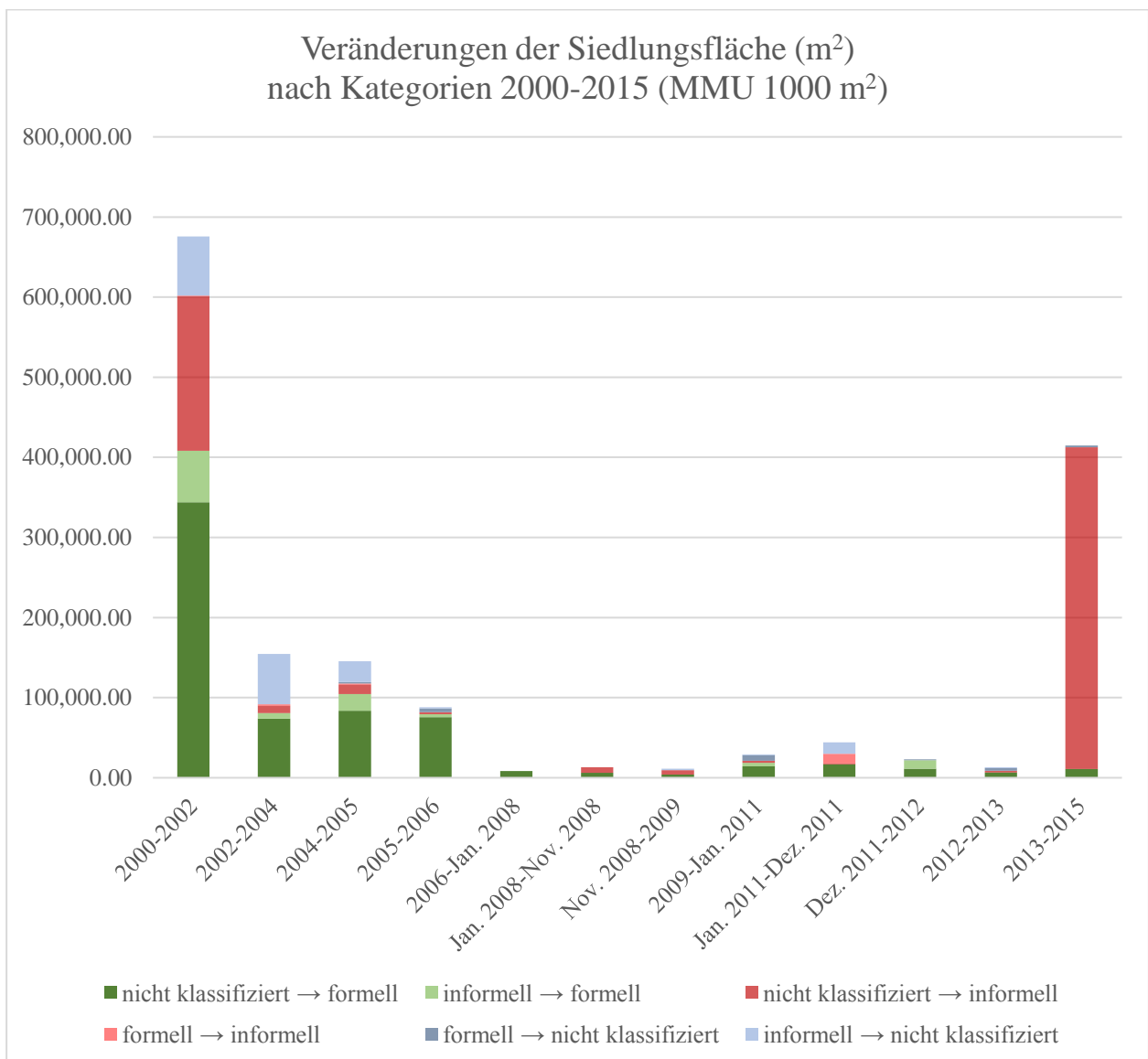


Abbildung 19: Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 2000-2015 (MMU 1000 m²). Quelle: Eigene Darstellung

Auch bei einer Mindestgröße von 1000 m² liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf den Veränderungen der informellen Siedlungsflächen. Abbildung 20 zeigt die sowohl negativen als auch positiven Veränderungen jeweils von Aufnahmezeitraum zu Aufnahmezeitraum bei einem MMU von 1000 m².

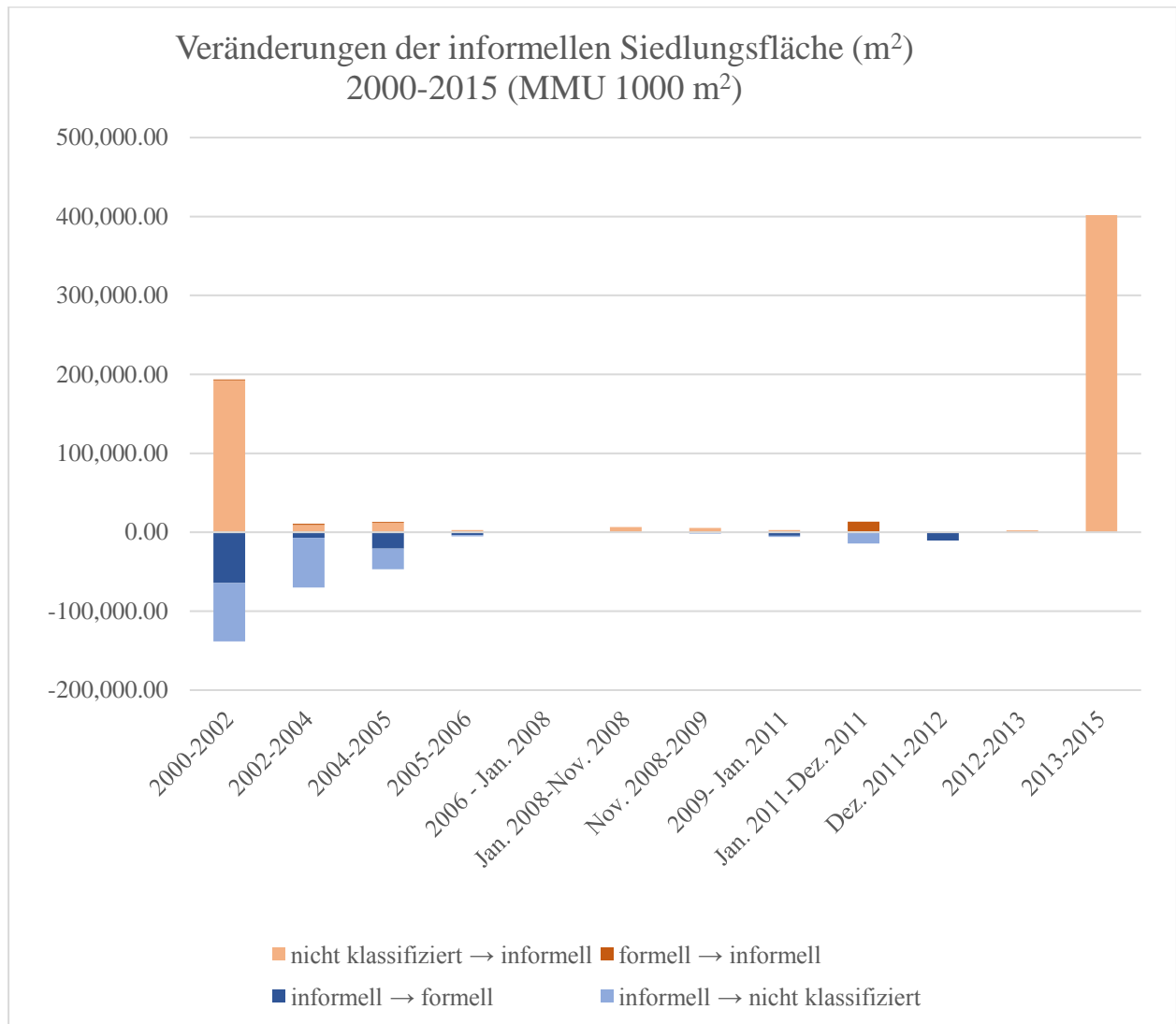


Abbildung 20: Veränderungen der informellen Siedlungsfläche 2000-2015 (MMU 1000 m²). Quelle: Eigene Darstellung

Auch hier lässt sich erkennen, dass die größten Veränderungen im ersten und letzten untersuchten Zeitintervall auftreten. Bei einem MMU von 500 m² haben sich Zuwachs und Rückgang der informellen Siedlungsfläche von 2000 bis 2002 nahezu ausgeglichen. Bei der Auswertung mit einem MMU von 1000 m² überwiegt jedoch der Zuwachs (193,457.25 m²) deutlicher über den Rückgang (-138,304.72 m²). In den drei folgenden Zeitintervallen dagegen überwiegt der Rückgang der informellen Bebauung und im Zeitintervall 2006 bis Jan. 2008 ist gar keine Veränderung aufgetreten. Im Untersuchungszeitraum von 2005 bis 2013 sind auch bei einem MMU von

1000 m² insgesamt kaum Veränderungen der informellen Siedlungsfläche aufgetreten. Der extreme Zuwachs informeller Bebauung tritt auch hier im letzten untersuchten Zeitintervall auf. Von 2013 bis 2015 erfolgte ein Zuwachs von rund 400.000 m², ein Rückgang wird bei einem MMU von 1000 m² keiner erkannt.

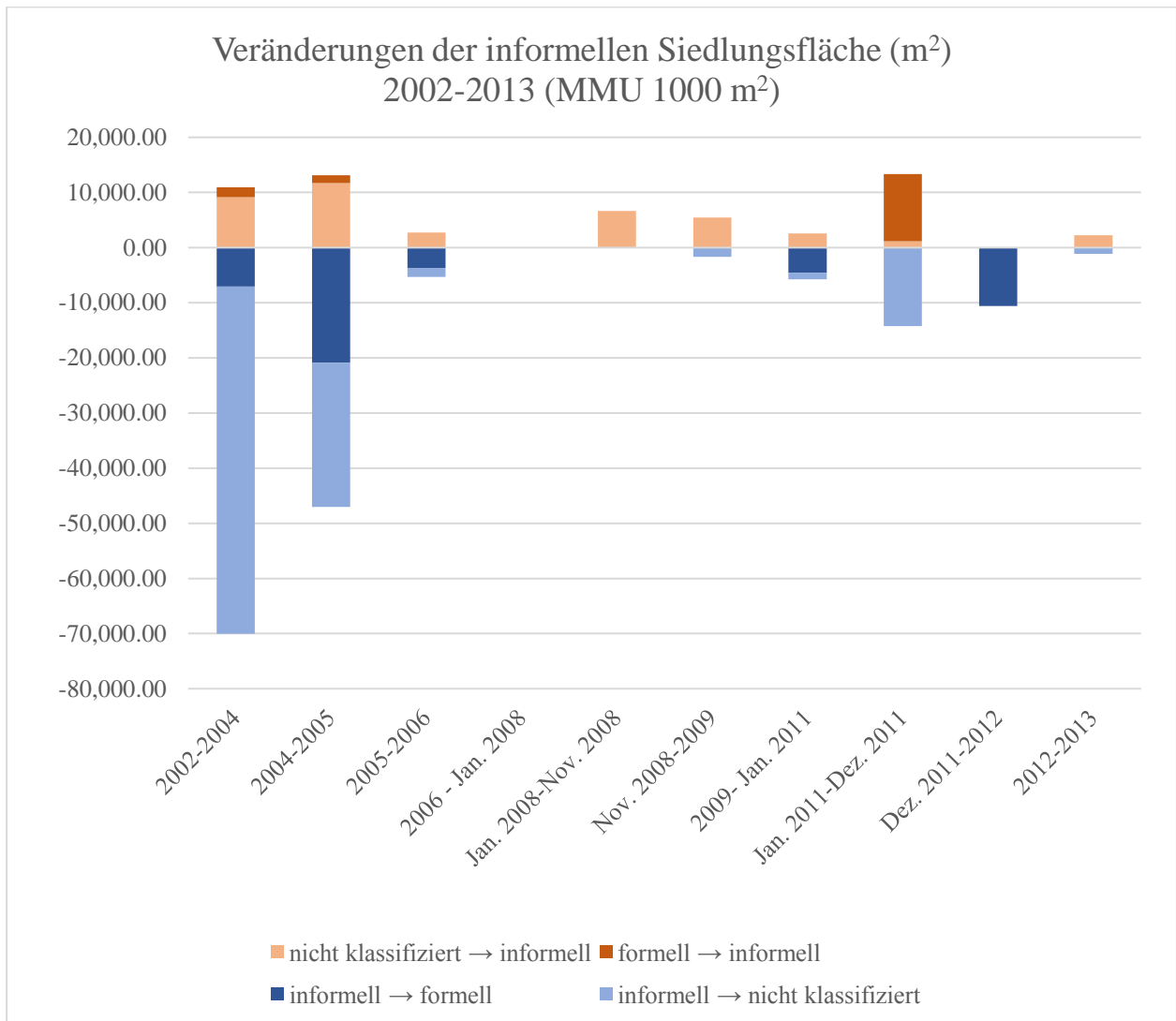


Abbildung 21: Veränderungen der informellen Siedlungsfläche 2002-2013 (MMU 1000 m²). Quelle: Eigene Darstellung

Da die beiden Zeitintervalle 2000-2002 und 2013-2015 solche Ausreißer darstellen, wurden diese zur Darstellung der Veränderungen zwischen 2002 und 2013 aus Abbildung 21 entfernt. Auch in dieser Darstellung fällt die Kategorie *formell* → *informell* (dunkelrot) im Zeitintervall Jan. 2011-Dez. 2011 auf. Hierbei handelt es sich um 6 Polygone mit einer Gesamtfläche von 12,176.24 m² (vgl. Tabelle 13) die bei einer manuellen Überprüfung in diesem Zeitraum keine Veränderung aufweisen. Es handelt sich also um eine fälschlicherweise als Veränderung detektierte Fläche aufgrund einer Fehlklassifikation. Hier werden die Grenzen einer manuellen Korrektur der automatischen Klassifizierung sichtbar. Obwohl die Veränderungsflächen größer 1000 m²

händisch korrigiert wurden, können einzelne Fehlklassifikationen trotzdem nicht ausgeschlossen werden. Für die Flächenbilanz in diesem Zeitintervall bedeutet dies, dass im Zeitraum von Jan. 2011 bis Dez. 2011 der Rückgang der informellen Bebauung deutlicher überwiegt (Tabelle 12).

Die Flächenbilanzen über Zuwachs und Rückgang der informellen Bebauung jeweils von Aufnahmedatum zu Aufnahmedatum sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Flächenbilanz informeller Siedlungsfläche je Zeitintervall (MMU 1000 m²)				
Zeitintervall	Zuwachs (m²)	Rückgang (m²)	Flächenbilanz (m²)	Flächenbilanz (m²) (ohne formell → informell)
2000-2002	193,457.25	-138,304.72	55,152.53	54,113.01
2002-2004	10,918.68	-70,028.60	-59,109.92	-60,904.20
2004-2005	13,111.66	-47,032.37	-33,920.71	-35,310.02
2005-2006	2,719.16	-5,341.48	-2,622.31	-2,622.31
2006 - Jan. 2008	-	-	-	-
Jan. 2008-Nov. 2008	6,651.87	-	6,651.87	6,651.87
Nov. 2008-2009	5,424.56	-1,650.81	3,773.74	3,773.74
2009- Jan. 2011	2,593.81	-5,756.98	-3,163.17	-3,163.17
Jan. 2011-Dez. 2011	13,335.34	-14,208.49	-873.16	-13,049.40
Dez. 2011-2012	-	-10,595.50	-10,595.50	-10,595.50
2012-2013	2,233.21	-1,118.65	1,114.56	1,114.56
2013-2015	401,727.35	-	401,727.35	401,727.35

Tabelle 12: Flächenbilanz informeller Siedlungsfläche je Zeitintervall (MMU 1000 m²). Quelle: Eigene Bearbeitung

Bei der Anwendung der unterschiedlichen Mindestgrößen für die Veränderungsdetektion fällt auf, dass bei einem größeren MMU zunehmend Veränderungskategorien rausfallen. Bei der Analyse der Veränderungen größer 1000 m² z.B. sind in der Kategorie *formell* → *informell* in nur 4 von 12 Zeitintervallen Veränderungen zu verzeichnen. Da die Wahrscheinlichkeit einer Degradierung der formellen Siedlung hin zur informellen Bebauung aber gering ist, und wie oben beschrieben in den meisten Fällen auf Fehlklassifikationen zurückzuführen ist, ist diese Kategorie bei der Analyse der Veränderung der Siedlungsflächen unbedeutend.

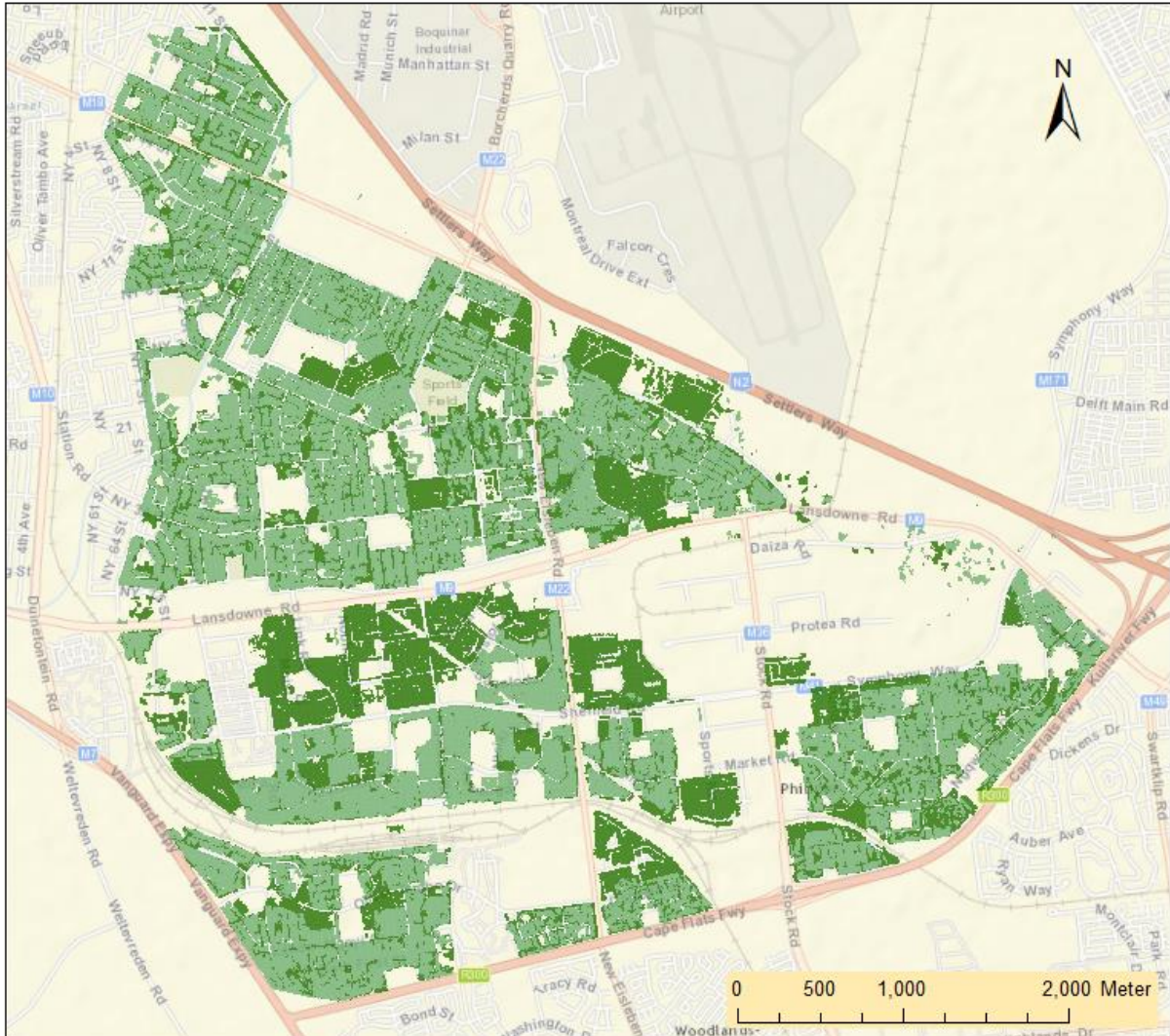
Alle Veränderungen in den jeweiligen Kategorien für jedes Zeitintervall unter Anwendung der Mindestgrößen (500 m² und 1000 m²) sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Veränderungen nach Kategorien je Zeitintervall (MMU 500 & 1000)										
Zeitintervall	MMU	nicht klassifiziert → formell (m ²)	informell → formell (m ²)	nicht klassifiziert → informell (m ²)	Formell → informell (m ²)	formell → nicht klassifiziert (m ²)	informell → nicht klassifiziert (m ²)			
2000-2002	MMU 500	482,071.59	88,985.93	232,476.67	2,638.15	32,190.06	109,981.52			
	MMU 1000	343,870.77	64,434.14	192,417.73	1,039.51	-	73,870.58			
2002-2004	MMU 500	170,311.93	8,304.19	20,429.60	4,366.00	51,772.69	93,472.30			
	MMU 1000	73,737.49	7,063.06	9,124.40	1,794.28	-	62,965.54			
2004-2005	MMU 500	150,253.43	28,351.02	24,319.85	2,733.18	78,236.45	1,132.88			
	MMU 1000	83,503.13	20,895.40	11,722.35	1,389.31	1,904.32	26,136.98			
2005-2006	MMU 500	140,750.13	7,022.05	7,667.57	10,910.62	58,396.05	4,472.78			
	MMU 1000	75,449.43	3,696.19	2,719.16	-	4,685.82	1,645.28			
2006-2008_jan	MMU 500	47,596.63	774.10	6,260.21	1,784.66	49,173.84	610.35			
	MMU 1000	8,259.96	-	-	-	-	-			
2008_jan-2008_nov	MMU 500	64,909.22	-	9,133.67	774.10	54,020.50	4,433.33			
	MMU 1000	6,320.56	-	6,651.87	-	-	-			
2008_nov-2009	MMU 500	81,560.40	531.41	9,724.31	-	44,615.76	3,550.92			
	MMU 1000	4,075.02	-	5,424.56	-	-	1,650.81			
2009-2011_jan	MMU 500	77,460.06	5,498.52	5,225.77	1,281.56	52,354.04	3,031.54			
	MMU 1000	1,650.81	4,530.66	2,593.81	-	6,945.59	1,226.32			
2011_jan-2011_dez	MMU 500	72,898.02	2,349.49	8,309.13	16,457.98	41,628.41	16,928.71			
	MMU 1000	16,714.22	-	1,159.09	12,176.24	-	14,208.49			
2011_dez-2012	MMU 500	51,821.64	15,306.36	3,470.34	623.62	46,456.15	1,331.07			
	MMU 1000	11,264.38	10,595.50	-	-	1,044.80	-			
2012-2013	MMU 500	42,081.35	-	8,363.70	1,630.36	50,063.50	6,545.01			
	MMU 1000	6,669.20	-	2,233.21	-	3,161.05	1,118.65			
2013-2015	MMU 500	75,399.06	992.13	408,655.07	1,148.79	39,061.61	4,370.01			
	MMU 1000	10,901.70	-	401,727.35	-	2,173.89	-			

Tabelle 13: Veränderungen nach Kategorien je Zeitintervall (MMU 500 m² & MMU 1000 m²). Quelle: Eigene Bearbeitung

Zur Visualisierung wurde die Klassifizierung von 2000 und 2015 auf einer Karte dargestellt. Abbildung 22 zeigt die Ausbreitung der formellen Siedlungsfläche über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg. Aus Abbildung 23 geht die Entwicklung der informellen Siedlungsfläche hervor. Sowohl die formelle als auch die informelle Bebauung hat sich im untersuchten Zeitraum verändert. Während die informelle Siedlungsfläche kontinuierlich über die einzelnen Zeitintervalle zugenommen hat, ist die Ausbreitung der informellen Bebauung vor allem im ersten und letzten Untersuchungsintervall aufgetreten.

Veränderung der formellen Siedlungsfläche in Teilen Kapstadts zwischen 2000 und 2015



Legende

- Zuwachs formeller Siedlungsfläche bis 2015
- formelle Siedlungsfläche 2000
- Untersuchungsgebiet

Grundkarten

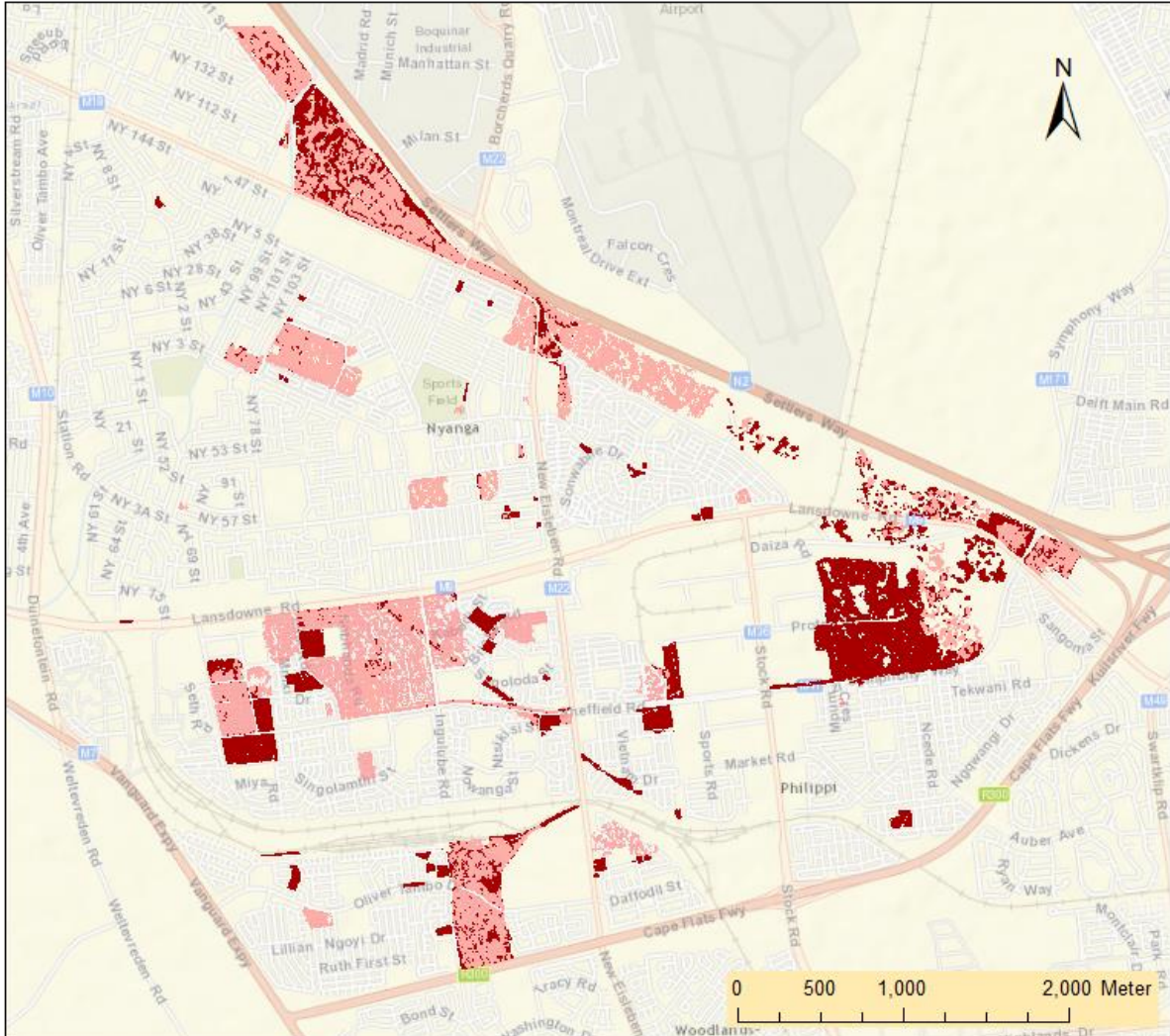
- World Street Map (Quelle Esri 2016)
- National Geographic World Map (Quelle Esri 2016)



Sarah C. Fischer
Dezember 2016

Abbildung 22: Veränderung der formellen Siedlungsfläche 2000-2015. Quelle: Eigene Darstellung

Veränderung der informellen Siedlungsfläche in Teilen Kapstadts zwischen 2000 und 2015



Legende

- Zuwachs informeller Siedlungsfläche bis 2015
- informelle Siedlungsfläche 2000
- Untersuchungsgebiet

Grundkarten

- World Street Map (Quelle Esri 2016)
- National Geographic World Map (Quelle Esri 2016)



Sarah C. Fischer
Dezember 2016

Abbildung 23: Veränderung der informellen Siedlungsfläche 2000-2015. Quelle: Eigene Darstellung

10 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die durchgeführte Untersuchung hat gezeigt, dass sowohl die Fläche der formellen Siedlungen als auch die Fläche der informellen Siedlungen im Untersuchungszeitraum zugenommen haben. Die formelle Bebauung hat von 2000-2015 fast durchgehend einen Zuwachs zu verbuchen, während die informellen Siedlungsflächen eher Schwankungen unterliegen. Der Zuwachs der formellen Siedlungsfläche fand überwiegend auf vorher nicht bebauter Fläche statt, oder aber auf Flächen, die vorher von informeller Bebauung geprägt waren. Die Ausbreitung der informellen Siedlungen erfolgte größtenteils zu Lasten vorher nicht genutzter Fläche. Die Ergebnisse können die einleitend beschriebene Definition von informellen Siedlungen also bestätigen, nach der es sich bei informellen Siedlungen meistens um Ansiedlungen auf innerstädtischen Freiflächen handelt. Die teilweise Ausbreitung informeller Siedlungen zu Lasten formeller Siedlungsfläche konnten im Rahmen der Untersuchung weitestgehend als Fehlklassifikationen ausgeschlossen werden.

11 Abschließende Bewertung & Ausblick

Bei der Analyse der Veränderungen sind vor allem die zahlreichen Fehlklassifikationen aufgefallen, durch die eine einfache Auswertung fast unmöglich wird. Bevor die Veränderungen mittels verschiedener Overlay-Operationen in ArcMap analysiert werden konnten, musste die Klassifizierung der einzelnen Polygone überprüft und korrigiert werden, um eine saubere Datenbasis für die Analyse zu erhalten. Da die zu überprüfende Datenbasis aus über 1,7 Mio. Polygonen besteht, mit Größen von $0,000003 \text{ m}^2$ bis über 380.000 m^2 , musste für diese manuelle Überprüfung eine Größe festgelegt werden, die ein zu prüfendes Polygon mindestens hat. Im Zuge dieser Untersuchung wurden also alle Veränderungspolygone größer 1000 m^2 überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Die von Bekkarnayeva (2016) erzielte Klassifizierungsgenauigkeit von 70 % (Ergebnis des Accuracy Assessment) ist für die Weiterverarbeitung ohne manuelle Überprüfung der Klassifizierung also eher weniger geeignet. Zwar wurden von Bekkarnayeva (2016) ebenfalls manuelle Anpassungen durchgeführt, die Arbeit gibt aber keine Auskunft über das Vorgehen hierbei und das Ausmaß dieser Anpassungen. Bei den für die vorliegende Untersuchung verwendeten Daten handelt es sich um einen Export der Klassen *formelle Siedlung* und *informelle Siedlung* vor der manuellen Anpassung der Klassifizierung.

Diese Ungenauigkeiten sind unter anderem auf die Detektion der Siedlungsfläche aus Bildern von unterschiedlichen Aufnahmesensoren zurückzuführen. Wie bereits erwähnt, stammen die Daten bei solch großen Untersuchungszeiträumen (2000-2015) von unterschiedlichen Sensoren, die in

der Folge auch unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Das macht eine einheitliche Detektion der Siedlungsflächen aus diesen unterschiedlichen Bilddaten schwierig. Es wurde zwar versucht die unterschiedlichen Eigenschaften bei der Segmentierung und der Klassifizierung zu berücksichtigen, dennoch sollte die Segmentierung und die Klassifizierung mittels eines einzigen Rulesets erfolgen. Ob bei einer umfangreicheren Anpassung und Anwendung auf Daten jeweils eines einzelnen Sensors weniger Fehlklassifikationen auftreten, oder aber wie die auftretenden Fehlklassifikationen reduziert werden können, bleibt zu prüfen.

Die vorliegende Arbeit konnte zeigen, dass Fehlklassifikationen vor allem auftreten, wenn informelle Bebauung nicht dicht an dicht steht (fälschlicherweise als formell klassifizierte informelle Gebäude), sondern sich auf freier Fläche vereinzelt Hütten befinden. Dies ist zurückzuführen auf die Klassifizierungsparameter, die besonders die dichte Bebauung informeller Siedlungsbereiche berücksichtigen. Außerdem werden große Dachflächen teilweise als Freiflächen erkannt, und somit nicht klassifiziert, obwohl es sich um formelle Gebäude handelt. Der Grund hierfür liegt ebenfalls in den Parametern die für die Klassifizierung herangezogen werden. Da diese großen Dachflächen nicht als Siedlungsfläche gelten, handelt es sich streng genommen nicht um eine Fehlklassifizierung, denn die Einteilung in keine Klasse ist durchaus gewollt. Trotzdem werden diese Flächen teilweise als formell klassifiziert. In der vorliegenden Arbeit wurden die nicht klassifizierten, großen Dachflächen als formelle Bebauung angesehen und werden somit zur formellen Siedlungsfläche gezählt. Um die formelle Bebauung genauer zu betrachten, müsste man bei der Klassifizierung eine weitere Klasse „Gewerbe“ umsetzen, in der eben solche Gebäude zusammengefasst werden. Für die vorgenommene Betrachtung der informellen Siedlungsfläche ist jedoch die Umsetzung einer weiteren Subklasse der formellen Klasse nicht relevant. Eine weitere Quelle für Fehlklassifikationen sind von „Mustern“ (z.B. Trampelpfade) durchzogene Freiflächen, die als formelle Bebauung erkannt werden, obwohl keine Gebäude vorhanden sind. Selten kommt es vor, dass dicht bebaute formelle Siedlungsflächen als informell klassifiziert werden oder Freiflächen auf denen z.B. Autos parken als informelle Siedlungen erkannt werden. Wenn sich zudem besonders kleine, informelle Hütten vereinzelt auf großen Flächen befinden, kommt es teilweise nicht zur Detektion der gleichen, eigentlich informelle Bebauung fällt also unter „nicht klassifiziert“. Diese einzelnen Hütten sind bei der Betrachtung von Siedlungsflächen jedoch nicht relevant, eventuell auftretende Fehlklassifizierungen also unbedeutend.

Bei der durchgeführten Analyse hat sich außerdem die Untersuchung einzelner Veränderungskategorien als wenig sinnvoll erwiesen. Wohingegen andere als verlässlich

bezeichnet werden können. So ist die Kategorie *formell* → *nicht klassifiziert* weitestgehend auf Fehlklassifikationen zurückzuführen. Ein Rückbau formeller Bebauung ist auch mindestens ungewöhnlich, wenn nicht ausgeschlossen. Um solche, auf Fehlklassifikationen beruhende Veränderungen ausschließen zu können, wurde die Klassifizierung zwar überprüft und korrigiert, jedoch nur für Flächen ab einer Größe von 1000 m². Dieser Schwellwert spiegelt sich auch in den gewählten Minimum Mapping Units (MMUs) wieder. Je größer das MMU gewählt wird, desto mehr, der für eine Veränderungsanalyse irrelevanten Veränderungskategorien fallen raus, bzw. treten nur noch selten auf. Das Rausfallen bestimmter Kategorien zwischen einem MMU von 500 m² und 1000 m² ist aber in der Konsequenz überwiegend auf die manuelle Umklassifizierung der falsch klassifizierten Polygone zurückzuführen.

Dagegen sind die Veränderungen der Kategorien *nicht klassifiziert* → *formell* und *informell* → *formell* in der Regel auch als solche aufgetreten. Die Entstehung informeller Siedlungen auf vorher nicht bebauter Fläche wird ebenso zuverlässig detektiert und kann somit gut für die Veränderungsanalyse herangezogen werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Zuwachs der einzelnen Siedlungsformen durch die beschriebene Vorgehensweise gut analysiert werden kann. Alle Veränderungen die einen Rückgang der formellen Siedlungsform bedeuten, sind nicht selten auf Fehlklassifikationen zurückzuführen, entsprechen also nicht der Realität. Die Veränderung von informeller zu formeller Bebauung kann ebenfalls gut detektiert werden. Zwar handelt es sich dabei um den Rückgang einer Siedlungsform, die Ergebnisse zeigen dennoch, dass diese Veränderungen der Realität entsprechen. Der Rückbau von informellen Siedlungen zu Gunsten der formellen Siedlungsentwicklung ist auch weitaus wahrscheinlicher, bzw. erklärtes Ziel der Stadtplanung. Zuletzt bleibt die Kategorie *informell* → *nicht klassifiziert*. Diese Veränderung bedeutet in der Regel den Zwischenschritt, zwischen informeller und formeller Siedlung. Also Flächen die zunächst von informeller Bebauung geräumt werden um an gleicher Stelle formelle Gebäude zu errichten.

Bei der Betrachtung der kleineren Veränderungspolygone fällt deren Lage entlang der Siedlungsränder und Verkehrswege auf. Diese fälschlicherweise als Veränderung erkannten Polygone sind in der Regel auf die Coregistrierung im Vorfeld der weiteren Analysen zurückzuführen. Ob sich diese jedoch durch eine noch bessere Coregistrierung reduzieren ließen, müsste überprüft werden. In der durchgeführten Untersuchung konnten sie nur durch die Wahl eines ausreichend großen MMU ausgeschlossen werden.

In der vorliegenden Arbeit konnten außerdem nur die als formelle bzw. informelle Siedlungsflächen exportierten Polygondatensätze untersucht werden. Folglich können die

Polygone nur drei Ausprägungen des Attributs „Siedlungsform“ annehmen: formell, informell und nicht klassifiziert. Die Klassifizierungsergebnisse der Segmente auf Level 1 konnten in die Untersuchung nicht einfließen. Bei der von Bekkarnayeva (2016) angewandten Methode der Veränderungsanalyse mittels Link-Klassen können auch die Parameter die zur finalen Klassifizierung der Flächen geführt haben mit in die Analyse einfließen. So z.B. die Dichte der Bebauung, oder der Anteil an kleinen Schattenflächen. Ob eine Analyse der Klassifizierung der unteren Segmentebene zu besseren Ergebnissen führen kann, bleibt zu überprüfen. Wobei durch die vorliegende Analyse die Flächenentwicklung der Siedlungsformen gut erfasst werden kann. Die Link-Klassen-Methode macht laut Bekkarnayeva (2016) ein Monitoring der informellen Siedlungen möglich, da die Veränderungen von Zeitschnitt zu Zeitschnitt je Klasse untersucht werden können. Die durchgeführte Analyse gibt hingegen nur Auskunft über die flächenmäßige Entwicklung der verschiedenen Siedlungsformen, ein Monitoring ist also nur in Bezug auf die Siedlungsfläche möglich. Was aber muss eine Veränderungsanalyse bieten? Reicht die, durch die vorliegende Untersuchung erzielte Darstellung der flächenhaften Entwicklung oder sollen weitere Details einfließen? Je nachdem welche Details in die Analyse einfließen sollen empfiehlt sich demnach eine andere Methode. Durch eine Auswertung mit eCognition und eine Verlinkung der einzelnen Zeitschnitte können mehr Details in die Untersuchung mit einfließen. So kann z.B. die Dichte der Bebauung einer informellen Siedlung zusätzlich Auskunft über die Anzahl der dort lebenden Bevölkerung geben. Durch die Auswertung mittels eines Post-Classification-Vergleichs lässt sich die flächenhafte Entwicklung darstellen, was in der Regel ausreicht.

Aufgrund der durchgeführten manuellen Umklassifizierung und der nicht dokumentierten Anpassung der Klassifizierung durch Bekkarnayeva (2016) ist ein zahlenmäßiger Vergleich der Ergebnisse nicht aussagekräftig. Bei den in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Daten handelt es sich um einen Export der Klassifizierungsergebnisse bevor die manuellen Anpassungen durchgeführt wurden. Also um das Ergebnis der automatischen Klassifizierung nach Anwendung des angepassten Rulesets.

Literaturverzeichnis

- BAATZ, M., & SCHÄPE, A. (2000), Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*, J. STROBL, Ed. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 12–23.
- BEKKARNAYEVA, G. (2016), Object Based Change Detection of Informal Settlements in Very High Resolution data. Paris-Lodron-Universität Salzburg
- BIJEESH, K. (2012), A Comparative Study of Urban Change Detection Techniques Using High Spatial Resolution Quickbird and Worldview-2 Images. In *Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésia e Tecnologias da Geoinformacao*, 6, 1–8.
- BLASCHKE, T. (2010), Object based image analysis for remote sensing. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 1, 2–16.
- BLASCHKE, T., & STROBL, J. (2001), What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. In *GIS -Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, 6, 12–17.
- BUSGEETH, K., BRITS, A., & WHISKEN, J. (2008), Potential Application of Remote Sensing in Monitoring Informal Settlements in Developing Countries Where Complimentary Data Does Not Exist. In *Planning Africa Conference*. Johannesburg
- CHO, H. (2002), Untersuchungen über die Erfassung von Waldflächen und deren Veränderungen mit Hilfe der Satellitenfernerkundung und segmentbasierter Klassifikation. Am Beispiel des Untersuchungsgebietes "Pyeong-Chang" in Korea, Georg-August-Universität Göttingen.
- CITY OF CAPE TOWN (2013a), City of Cape Town - 2011 Census Suburb Crossroads. Kapstadt
- CITY OF CAPE TOWN (2013b), City of Cape Town – 2011 Census Suburb Gugulethu. Kapstadt
- CITY OF CAPE TOWN (2013c), City of Cape Town - 2011 Census Suburb Nyanga. Kapstadt
- CITY OF CAPE TOWN (2013d), City of Cape Town – 2011 Census Suburb Philippi. Kapstadt
- COPPIN, P., JONCKHEERE, I., NACKAERTS, K., MUYS, B., & LAMBIN, E. (2004), Digital change detection methods in ecosystem monitoring. A review. In *International Journal of Remote Sensing* 25, 9, 1565–1596.
- DOXANI, G., SIACHALOU, S., & TSAKIRI-STRATI, M. (2008), An object-oriented approach to urban land cover change detection. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, B7, 1655–1660.
- ESRI (2016), Grundlagen zu Pan-Sharpning - Hilfe | ArcGIS for Desktop. Online verfügbar unter: <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-of-panchromatic-sharpening.htm>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.

- FRITH, A. (2011a), Census 2011 — Crossroads. Online verfügbar unter: <http://census2011.adrianfrith.com/place/199032>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- FRITH, A. (2011b) Census 2011 — Nyanga. Online verfügbar unter: <http://census2011.adrianfrith.com/place/199031>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- GOODCHILD, M. (1978), Statistical aspects of the polygon overlay problem. In *Harvard Papers on Geographic Information Systems*, 6, 1–22.
- HOFMANN, P. (2005), Übertragbarkeit von Methoden und Verfahren in der objektorientierten Bildanalyse - das Beispiel informelle Siedlungen. Paris-Lodron-Universität Salzburg.
- HOFMANN, P., & BLASCHKE, T. (2012), Object Based Change Detection Using Temporal Linkages. In *Proceedings of the 4th GEOBIA Conference -Rio de Janeiro - Brazil*, 634–638.
- HOFMANN, P., TAUBENBOCK, H., & WERTHMANN, C. (2015), Monitoring and modelling of informal settlements - A review on recent developments and challenges. In *Joint Urban Remote Sensing*, 1–4.
- JYOTHI, B.N., BABU, G.R., & KRISHNA, I.M. (2008), Object Oriented and Multi-Scale Image Analysis. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats-A Review. In *J. of Computer Science* 4, 9, 706–712.
- KAPSTADTMAGAZIN (2016), *Townships in Kapstadt und Südafrika*. Online verfügbar unter: <http://www.kapstadtmagazin.de/cape-flats-township-kapstadt>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- KNIGHT, J.F., & LUNETTA, R.S. (2003), An experimental assessment of minimum mapping unit size. In *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 41, 9, 2132–2134
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, E., & MORAN, E. (2004), Change detection techniques. In *International Journal of Remote Sensing* 25, 12, 2365–2401. Online verfügbar unter: http://www.indiana.edu/~act/files/publications/2004/04-03_ChangeDetectionTechniques.pdf. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- MASON, S.O., & FRASER, C.S. (1998), Image Sources for Informal Settlement Management. In *Photogrammetric Record* 16, 92, 313–330.
- MONHEIM, H. Prof., NEBE, J. Dr., & FALLIS, P. (2009), Favelasyndrom. Trends, Probleme, Strategien. Online verfügbar unter: <https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb6/prof/RAU/Downloads/VL-Favelasyndrom.pdf>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- OECD (2003), OECD Glossary of Statistical Terms - Informal settlements Definition. Online verfügbar unter: <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=1351>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- PADWICK, C., DESKEVICH, M., PACIFICI, F., & SMALLWOOD, S. (2010), Worldview-2 Pan-Sharpener. In *ASPRS 2010 Annual Conference San Diego. California*.

- PERLMAN, J. (2014), Urbanisierung, Megastädte und informelle Siedlungen | bpb. Online verfügbar unter: <http://www.bpb.de/apuz/183456/urbanisierung-megastaedte-und-informelle-siedlungen?p=all>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- RADKE, R.J., ANDRA, S., AL-KOFAHI, O., & ROYSAM, B. (2005), Image change detection algorithms. A systematic survey. In *IEEE Trans. on Image Process.* 14, 3, 294–307.
- SINGH, A. (1989), Digital change detection techniques using remotely-sensed data. In *International Journal of Remote Sensing* 10, 6, 989–1003. Online verfügbar unter: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431168908903939>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- SLIUZAS, R., MBOUP, G., & SHERBININ, A. de. (2008), Report of the Expert Group Meeting on Slum Identification and Mapping.
- SOUTH AFRICAN HISTORY ONLINE (2011), Land, Labour and Apartheid. Online verfügbar unter: <http://www.sahistory.org.za/article/land-labour-and-apartheid>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- SOUTH AFRICAN HISTORY ONLINE (2012), Crossroads Township. Online verfügbar unter: <http://www.sahistory.org.za/place/crossroads-township>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- SOUTH AFRICAN HISTORY ONLINE (2015), Gugulethu Township. Online verfügbar unter: <http://www.sahistory.org.za/place/gugulethu-township>. Zuletzt geprüft am 13.12.2016.
- STOINSKI, S. (2007), Möglichkeiten der objektorientierten Klassifizierung von Waldgebieten aus CIR-Luftbildern, Technische Universität Berlin.
- SURINACH, R. (2015), Habitat III Issue Papers. 22 Informal Settlements.
- UN-HABITAT (2014), WHD 2014 Background Paper.
- UN-HABITAT (2008), State of the world's cities 2010/2011. Bridging the urban divide. UN-Habitat, London.
- UNITED NATIONS (2012), State of the world's cities 2012-2013. Prosperity of cities. United Nations Pubns, [S.l.].
- VELJANOVSKI, T., KANJIR, U., & OŠTIR, K. (2011), Object-based Image Analysis of Remote Sensing Data. In *Geodetski vestnik* 55, 04, 665–688.
- ZHANG, J., & ZHANG, Y. (2007), Remote sensing research issues of the National Land Use Change Program of China. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62, 6, 461–472.

Anhang A

Klassenhierarchien nach Bekkarnayeva (2016) Teil 1

Class	Feature	IKONOS-2 2000-03-19		QuickBird 2002-12-05		QuickBird 2004-01-21		QuickBird 2005-11-22		QuickBird 2006-12-21		QuickBird 2008-01-03		QuickBird 2008-11-30		QuickBird 2009-12-03		WorldView-2 2011-01-04		WorldView-2 2011-12-23		WorldView-2 2012-11-18		WorldView-2 2013-12-06		WorldView-3 2015-01-11			
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Vegetation	Mean NDVI	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Ratio nir	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	Mean NDVI	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Ratio nir	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Non-vegetation	Area	60	70	90	100	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120	110	120
	Brightness	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710	700	710
	Distance to small shadows/dark objects	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25
	Elliptic fit	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Bright small roofs/objects	Rectangular fit	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	Shape index	1.68	1.7	1.6	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7	1.68	1.7
	Ratio red/ratio green	1.02	1.0	0.9	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.98
	Rectangular fit	0.75	0.8	0.7	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8	0.75	0.8
Red roofs	Area	80	90	10	110	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90	80	90
	Brightness	390	40	41	420	440	450	39	400	450	46	440	45	440	450	44	440	45	440	45	440	45	440	45	440	45	440	45	440
	Density	0.9	2	0.9	2.2	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1	0.9	2.1
	Ratio blue	0.23	0.2	0.1	0.19	0.18	0.19	0.1	0.19	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1	0.18	0.1
Settlement	Area of sub-objects	50	60	65	70	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80	70	80
	Asymmetry	0.97	0.9	0.9	0.99	0.97	0.99	0.9	0.99	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9	0.97	0.9

Klassenhierarchien nach Bekkarnayeva (2016) Teil 2

	Avg.-mean neighbors of sub-objects nir	60	26	80	430	80	350	60	350	80	42	80	40	80	450	80	40	50	30	60	55	50	3	50	40	80	75
	Density of sub-objects: mean	1.28	1.3	1.4	1.42	1.46	1.52	1.5	1.5	1.48	1.4	1.46	1.4	1.42	1.4	1.4	1.46	1.54	1.56	1.54	1.56	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Number of sub-objects	18	20	15	17	15	17	15	17	15	17	15	17	15	17	15	17	15	17	15	17	15	1	15	17	15	17
	Rel. area of sub-objects small shadows/dark objects	0.00	0.0	0.0	0.01	0.00	0.01	0.0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rel. area of vegetation	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.6	0.5	0.0
	Shape index	4	4.1	4.5	4.6	4.5	4.6	4.5	4.6	4.5	4.6	4.5	4.6	4.5	4.4	4.5	4.4	3.8	4	4	4	4	4	4	4	4.2	4.0
Formal settlement	Area	1100	12	12	1300	1100	1200	11	1200	900	10	900	10	900	100	90	10	110	12	80	90	100	1	90	10	800	90
	Not informal settlement																										
	Number of sub-objects bright small roofs/objects	1	2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Shape index	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.5	3.3	3.3	3.3	3.5	3.5	3.5	3.6	3.65	3.0
Informal settlement	Area of sub-objects	41	42	46	48	55	57	55	57	48	50	50	52	42	45	52	54	52	54	54	56	55	5	54	56	50	52
	Asymmetry of sub-objects	0.58	0.5	0.5	0.57	0.56	0.57	0.5	0.57	0.56	0.5	0.56	0.5	0.57	0.5	0.5	0.54	0.54	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.5	0.56	0.0
	Density of sub-objects: mean	1.31	1.3	1.5	1.55	1.6	1.62	1.5	1.6	1.52	1.5	1.52	1.5	1.52	1.5	1.5	1.64	1.64	1.1	1.1	1.1	1.7	1.1	1.7	1.7	1.7	1.0
	Number of sub-objects small shadows/dark objects	7	8	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	6	8	1	2	1	2	1	2	1	2
	Rel. area of sub-objects bright small roofs/objects	0.05	0.0	0.0	0.1	0.09	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.14	0.1	0.12	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0
	Rel. area of sub-objects red roofs	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0
	Rel. area of sub-objects small shadows/dark objects	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.12	0.1	0.12	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.06	0.0	0.06	0.06	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.3	0.02	0.0
	Rel. area of vegetation	0.18	0.2	0.2	0.28	0.25	0.28	0.2	0.28	0.25	0.2	0.25	0.2	0.25	0.2	0.0	0.15	0.15	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0

Anhang B

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien je Zeitintervall

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 19.03.2000-05.12.2002 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse 19.03.2000	Klasse 05.12.2002	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	378741	2,216,869.02	31213	1,801,725.75	1,327	769,978.23	351	482,071.59	148	343,870.77	37	164,643.79
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	86076	658,047.28	7813	557,426.12	349	305,004.44	109	232,476.67	51	192,417.73	14	128,683.54
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	191132	630,235.62	10833	436,639.96	286	102,669.00	48	32,190.06	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	75229	429,119.48	6102	345,188.55	260	158,874.43	93	109,981.52	41	73,870.58	4	12,774.99
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	7922	45,726.62	749	35,274.51	24	9,997.72	3	2,638.15	1	1,039.51	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	29516	280,063.52	3415	245,225.55	203	128,627.79	70	88,985.93	35	64,434.14	3	12,400.82
Gesamt		768616	4,260,061.54	60125	3,421,480.43	2,449	1,475,151.61	674	948,343.91	276	675,632.74	58	318,503.13

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 05.12.2002-21.01.2004 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse 05.12.2002	Klasse 21.01.2004	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	305490	1,305,853.69	20651	977,601.31	732	333,920.97	179	170,311.93	41	73,737.49	4	12,644.69
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	51667	204,754.85	3786	147,414.22	76	37,316.75	20	20,429.60	4	9,124.40	1	5,253.12
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	257130	910,534.14	15872	641,390.54	428	155,014.05	75	51,772.69	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	80362	444,011.59	6474	351,325.64	241	143,216.57	69	93,472.30	24	62,965.54	7	33,859.26
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	11112	65,807.77	1181	52,685.61	39	13,654.90	5	4,366.00	1	1,794.28	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	9231	60,106.75	921	48,632.83	46	20,865.70	6	8,304.19	4	7,063.06	-	-
Gesamt		714992	2,991,068.80	48885	2,219,050.15	1,562	703,988.93	354	348,656.71	74	154,684.77	12	51,757.07

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 22.11.2005-21.12.2006 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse 22.11.2005	Klasse 21.12.2006	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	274798	1,133,807.85	18055	841,774.67	584	277,812.60	125	140,750.13	30	75,449.43	10	41,314.78
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	44254	140,509.84	2802	92,786.88	32	13,493.22	10	7,667.57	2	2,719.16	-	-
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	323398	1,179,716.50	20802	835,234.13	522	188,798.57	80	58,396.05	3	4685.81793	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	59312	205,510.61	4085	139,734.83	64	22,220.84	5	4,472.78	1	1,645.28	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	5917	16,783.89	307	10,910.62	8	3,352.40	3	10,910.62	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	10040	44,307.96	618	33,773.99	28	13,879.46	6	7,022.05	2	3,696.19	-	-
Gesamt		717719	2,720,636.65	46669	1,954,215.12	1,238	519,557.09	229	229,219.20	38	88,195.89	10	41,314.78

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 21.12.2006-03.01.2008 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse 21.12.2006	Klasse 03.01.2008	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	331460	1,181,371.31	21376	828,027.57	478	169,445.34	64	47,596.63	6	8,259.96	-	-
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	58464	217,486.54	4316	151,212.47	65	22,879.91	8	6,260.21	-	-	-	-
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	281091	1,041,121.51	18487	738,186.45	483	170,221.09	72	49,173.84	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	47239	129,478.49	2743	78,850.64	17	4,760.52	1	610.35	-	-	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	8313	27,542.52	444	18,961.22	14	4,962.86	3	1,784.66	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	6630	15,248.38	309	8,790.39	3	1,299.12	1	774.10	-	-	-	-
Gesamt		733197	2,612,248.74	47675	1,824,028.73	1,060	373,568.84	149	106,199.80	6	8,259.96	0	0.00

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 03.01.2008-30.11.2008 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse	Klasse 30.11.2008	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	267248	1,008,541.92	17628	723,422.98	470	178,988.70	86	64,909.22	3	6,320.56	1	3,330.48
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	53648	181,041.97	3621	122,244.75	34	16,279.58	8	9,133.67	4	6,651.87	-	-
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	320315	1,226,173.77	22092	880,216.31	582	198,346.01	81	54,020.50	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	50959	172,764.73	3506	115,860.96	52	17,396.31	6	4,433.33	-	-	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	6383	14,361.43	270	8,141.95	1	1,008.13	1	774.10	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	5921	19,163.59	371	12,737.94	7	2,200.98	-	-	-	-	-	-
Gesamt		704474	2,622,047.40	47488	1,862,624.90	1,146	414,219.71	182	133,270.83	7	12,972.43	1	3,330.48

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 30.11.2008-03.12.2009 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse 30.11.2008	Klasse 03.12.2009	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	332123	1,325,912.79	23100	965,731.90	690	248,747.46	118	81,560.40	3	4,075.02	-	-
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	56328	193,896.28	3692	132,335.19	66	26,023.19	9	9,724.31	2	5,424.56	1	3,802.70
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	254880	946,288.99	16956	678,543.67	415	148,206.32	65	44,615.76	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	49449	156,903.50	3232	103,664.99	29	10,654.26	4	3,550.92	1	1,650.81	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	7928	27,567.40	479	18,981.34	18	5,318.87	-	-	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	5269	11,845.03	219	6,508.62	4	1,289.05	1	531.41	-	-	-	-
Gesamt		705977	2,662,413.99	47678	1,905,765.71	1,222	440,239.13	197	139,982.80	6	11,150.39	1	3,802.70

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 03.12.2009-04.01.2011 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse	Klasse 04.01.2011	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	313867	1,249,664.28	21789	912,255.18	597	224,998.02	99	77,460.06	7	14,094.96	1	5,287.74
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	54824	182,248.56	3775	122,922.02	37	14,217.58	6	5,225.77	2	2,593.81	-	-
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	275422	914,012.39	15829	633,739.96	422	155,128.39	74	52,354.04	4	6945.5923	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	50206	169,343.69	3381	113,892.61	48	15,337.59	4	3,031.54	1	1,226.32	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	6930	23,096.41	421	15,924.21	11	4,044.47	2	1,281.56	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	9212	37,780.48	595	27,761.42	17	9,419.50	4	5,498.52	3	4,530.66	-	-
Gesamt		710461	2,576,145.81	45790	1,826,495.40	1,132	423,145.55	189	144,851.49	17	29,391.35	1	5,287.74

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 04.01.2011-23.12.2011 (unterschiedliche MMUs)																			
Klasse 04.01.2011	Klasse 23.12.2011	MMU 0 m ²			MMU 10 m ²			MMU 200 m ²			MMU 500 m ²			MMU 1000 m ²			MMU 3000 m ²		
		Anzahl	Fläche (m ²)	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	252722	981,129.14	712,143.10	509	196,835.22	90	72,898.02	8	16,714.22	1	6,743.23							
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	52548	178,139.50	118,951.90	57	21,303.05	12	8,309.13	1	1,159.09	-	-							
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	339414	1,125,465.04	767,321.19	423	148,447.13	60	41,628.41	-	-	-	-							
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	58423	184,030.82	123,580.77	40	27,038.72	6	16,928.71	2	14,208.49	-	-							
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	13225	70,257.86	5,807.92	36	23,785.05	12	16,457.98	6	12,176.24	1	3491.70865							
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	7315	22,679.39	15,770.16	13	5,510.84	4	2,349.49	-	-	-	-							
Gesamt		723647	2,561,701.74	1,743,575.04	1,078	422,920.02	184	158,571.74	17	44,258.05	2	10,234.94							

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 23.12.2011-18.11.2012 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse 23.12.2011	Klasse 18.11.2012	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	281358	965,769.10	17360	669,528.36	381	144,670.45	67	51,821.64	7	11,264.38	1	3,803.60
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	54339	157,809.71	3226	102,001.83	32	11,169.70	6	3,470.34	-	-	-	-
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	245263	793,204.11	13909	539,897.16	348	129,167.74	67	46,456.15	1	1044.8	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	44244	125,628.30	2493	77,550.11	26	8,237.38	2	1,331.07	-	-	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	5197	12,242.80	229	7,338.49	3	1,288.77	1	623.62	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	11698	57,631.33	767	45,501.02	32	21,142.89	13	15,306.36	5	10,595.50	1	3,491.71
Gesamt		642099	2,112,285.36	37984	1,441,816.98	822	315,676.94	156	119,009.18	13	22,904.68	2	7,295.31

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 18.11.2012-06.12.2013 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse	Klasse 06.12.2013	MMU 0 m ²		MMU 10 v		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	294129	903,922.20	16096	605,833.68	364	133,059.94	55	42,081.35	2	6,669.20	1	4,864.18
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	49194	146,260.05	2690	95,463.15	46	18,207.84	11	8,363.70	2	2,233.21	-	-
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	252595	845,190.21	14992	582,179.76	366	136,555.64	72	50,063.50	2	3161.04855	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	45900	148,729.82	3012	98,114.65	37	14,597.04	10	6,545.01	1	1,118.65	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	9487	31,364.51	570	21,540.77	13	4,627.60	3	1,630.36	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	6201	19,288.93	380	12,978.89	6	1,363.96	-	-	-	-	-	-
Gesamt		657506	2,094,755.72	37740	1,416,110.90	832	308,412.03	151	108,683.92	7	13,182.11	1	4,864.18

Veränderungen der Siedlungsfläche nach Kategorien 06.12.2013-11.01.2015 (unterschiedliche MMUs)													
Klasse	Klasse 11.01.2015	MMU 0 m ²		MMU 10 m ²		MMU 200 m ²		MMU 500 m ²		MMU 1000 m ²		MMU 3000 m ²	
		Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)	Anzahl	Fläche (m ²)
Nicht klassifiziert	Formelle Siedlung	312449	1,062,134.52	18491	734,561.99	472	184,529.54	98	75,399.06	3	10,901.70	1	7,486.28
Nicht klassifiziert	Informelle Siedlung	46892	555,572.63	3006	503,999.30	63	422,067.78	19	408,655.07	8	401,727.35	3	395,209.88
Formelle Siedlung	Nicht klassifiziert	251023	886,456.24	15863	634,601.11	390	136,006.77	56	39,061.61	1	2173.89159	-	-
Informelle Siedlung	Nicht klassifiziert	47485	140,612.98	2764	92,308.93	38	13,337.71	7	4,370.01	-	-	-	-
Formelle Siedlung	Informelle Siedlung	8933	22,804.04	416	13,634.05	6	2,450.52	2	1,148.79	-	-	-	-
Informelle Siedlung	Formelle Siedlung	5738	17,486.03	335	11,723.26	4	2,045.84	1	992.13	-	-	-	-
Gesamt		672520	2,685,066.46	40875	1,990,828.64	973	760,438.15	183	529,626.68	12	414,802.94	4	402,696.17