

# Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen in Berlin

---

## *Ergebnisdokumentation*

### **Auftraggeber:**

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

Abteilung III Geoinformation Referat III D Geodateninfrastruktur

### **Projektdurchführung und Schriftfassung**

Dipl.-Ing. (FH) Anna Maria Poznanska, Dipl. Geogr. Steven Bayer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.)

Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen am Institut für Optische Sensorsysteme



Senatsverwaltung  
für Stadtentwicklung  
und Umwelt



### **Auftraggeber und Bereitstellung der Vektorbasisdaten:**

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt  
Abt. Geoinformation, Referat III D Geodateninfrastruktur  
Ansprechpartner: Jörn Welsch III D 11  
Fehrbelliner Platz 1, 10707 Berlin  
Tel: +49 (30) 90139-5256  
Fax: +49 (30) 90139-5251  
Email: Joern.Welsch@SenStadtUm.berlin.de

### **Bereitstellung und Prozessierung der Rasterdaten:**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e. V.)  
Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen  
am Institut für Optische Sensorsysteme  
Ansprechpartner: Frank Lehmann (Abteilungsleiter)  
Tel: +49 (30) 67055 – 425  
Fax: +49 (30) 67055 – 602  
Email: Frank.Lehmann@dlr.de

### **Projektdurchführung:**

Dipl.-Ing. (FH) Anna Maria Poznanska, Dipl. Geogr. Steven Bayer  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e. V.)  
Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen  
am Institut für Optische Sensorsysteme  
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin  
Tel.: +49 (30) 67055 – 349  
Fax: +49 (30) 67055 – 602  
Email: Anna-Maria.Poznanska@dlr.de

## Inhaltsverzeichnis

	Inhaltsverzeichnis .....	II
	Abkürzungsverzeichnis .....	IV
<b>1</b>	<b>Einleitung, Projektziel und -Umfeld.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Datengrundlage .....</b>	<b>4</b>
2.1	Digitale Luftbilddaten – UltraCamX.....	5
2.1.1	Das Kamerasystem UltraCamX.....	5
2.1.2	Die Befliegungskampagnen 2009 und 2010.....	7
2.1.3	Datenprozessierung (DOM / TOM Erstellung) .....	10
2.1.4	Datenprodukte und Zusatz-Layer.....	12
2.2	Vektorbasisdaten.....	24
<b>3</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>26</b>
3.1	Segmentierung und objektbasierte Klassifizierung.....	26
3.2	Verwendete Software .....	27
<b>4</b>	<b>Umsetzung der Objektextraktion.....</b>	<b>31</b>
4.1	Definition der Klassen.....	31
4.2	Unterteilung des Datensatzes .....	31
4.3	Ablaufplan – Erfassung der Gebäude- und Vegetationsobjekte .....	33
4.4	Segmentierungsprozesse .....	34
4.4.1	Chessboard Segmentation.....	35
4.4.2	Multiresolution Segmentation .....	36
4.5	Klassifizierungs- und Objektextraktionsprozesse.....	39
4.5.1	ALK-Klasse: geplante oder im Bau befindliche Gebäude.....	39
4.5.2	ALK-Klassen: Garagen, Schuppen, Gartenhäuser .....	40
4.5.3	Erfassung von Vegetation und deren Struktur.....	41
4.5.4	Vegetationshöhenstufen.....	44
4.5.5	Erfassung von Gebäuden (Bestandteil der ALK).....	47
4.5.6	Erfassung von Gebäuden (kein Bestandteil der ALK) .....	48
4.5.7	Begrünte und von der Vegetation verdeckte Dachflächen .....	55
4.5.8	Unterteilung der Dachflächen .....	59

<b>5</b>	<b>Ergebnisse – Qualität der Erfassung .....</b>	<b>62</b>
5.1	Gebäudeobjekte .....	62
5.2	Vegetation .....	67
5.3	Export der Ergebnisse und Erstellung einer Geodatenbank .....	69
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>Quellenverzeichnisse .....</b>	<b>77</b>
	Verwendete Literaturquellen .....	77
	Verwendete Internetquellen .....	80
	Abbildungsverzeichnis .....	82
	Tabellenverzeichnis .....	86

## Abkürzungsverzeichnis

ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
AT	Aerotriangulation
CCD	(engl.) Charge-coupled Device (verwendet bei den Flächenkameras)
CSS	(engl.) Contrast Split Segmentation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DGM	Digitales Geländemodell
DOM / nDOM	Digitales Oberflächenmodell / normiertes DOM
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
FIS-Broker	Fachübergreifendes Informationssystem-Broker / Geoportal des Landes Berlin
GDB	Geodatenbank
GIS	Geoinformationssystem
GPS	(engl.) Global Positioning System
GRS80	Geodätisches Referenzsystem 1980
HRSC	(engl.) High Resolution Stereo Camera
IR / nIR	Infrarot / nahes Infrarot (bezogen auf Bereiche der elektromagnetischen Strahlung)
INS	(engl.) Inertial Navigation System (meistens in Verbindung GPS/INS)
ISU / ISU <sub>5</sub>	Informationssystem Stadt und Umwelt
LOR	Lebensweltlich Orientierte Räume in Berlin (Planungsgrundlagen)
MRS	(engl.) Multiresolution Segmentation
MTS	(engl.) Multi Threshold Segmentation
NDVI	(engl.) Normalized Differenced Vegetation Index
OBIA	(engl.) Object-Based Image Analysis, auch Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA)
OS	Objektschlüssel (in der Automatisierten Liegenschaftskarte)
OSKA	Objektschlüsselkatalog Berlin (auch OSKA Bln)
RGB	Rot Grün Blau (als Kanalkombination im Echtfarnebild)
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SenStadtUm	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt
SGM	(engl.) Semi-Global Matching
TOM	TrueOrtho Mosaik
UCD	UltraCam D
UCX	UltraCam X
UTM	(engl.) Universal Transverse Mercator
VHSR	(engl.) Very High Spatial Resolution (VHSR-Data)

## 1 Einleitung, Projektziel und -Umfeld

In den letzten Jahren ist die Anwendung von sehr hochauflösenden digitalen Fernerkundungsdaten für verschiedenste Analysen im urbanen Raum gestiegen. Dies ist zum einen eine Folge der verstärkten Nutzung digitaler Sensoren, die neue technische Möglichkeiten eröffnen. Zum anderen ist die Entwicklung stark durch die Vorteile getrieben, die diese Daten insbesondere in der automatisierten Informationsextraktion bieten.

Seit mehr als zehn Jahren wird am Institut für Optische Sensorsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.) in Berlin-Adlershof die Kernkompetenz in der Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und True Ortho Mosaiken (TOM) höchster Auflösung sowie in der Verarbeitung und Anwendung hochauflösender digitaler Fernerkundungsdaten entwickelt (LEHMANN ET AL., 2011). Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in der Abteilung für Sensorkonzepte und Anwendungen liegt einerseits in der Entwicklung neuartiger Fernerkundungssensoren, andererseits in der Prozessierung und Verarbeitung der Datenprodukte für praxisorientierte Anwendungen. In den letzten Jahren wurden Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von sehr hochauflösenden Daten (engl. *Very High Spatial Resolution Data* - VHRS) für die Anwendungen in urbanen Gebieten durchgeführt. Ebenfalls wurden geeignete Extraktions- und Analysemethoden getestet. Für eine detaillierte und effiziente Objektextraktion in den urbanen Gebieten stellen die TOM und DOM Daten eine unverzichtbare Datengrundlage dar. Wie in TROSSET ET AL. (2009) beobachtet, bildet eine geometrische Auflösung im Bereich von 30 cm eine optimale Grundlage für die automatisierte Gebäudeextraktion unter Berücksichtigung von Rechenzeit und Genauigkeit der Erfassung. Es konnte gezeigt werden, dass das DOM eine wichtige Rolle für eine stabile Analyse von Gebäudeobjekten darstellt, da es unempfindlich gegen Schatten- und Beleuchtungsunterschiede ist. Ebenfalls ist es entscheidend, dass das DOM auf die Grundhöhe normiert wird, um die absoluten Objekthöhen zu erhalten. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konnte gezeigt werden, dass diese Datengrundlage für urbane Anwendungen sehr gut geeignet ist. Mithilfe von objektbasierter Bildanalyse können Objekte mit semantischen Informationen extrahiert und in ein Geo-Informationssystem (GIS) integriert werden. Anwendungen wie eine Versiegelungsgradberechnung, Analyse von Stadtstrukturen oder klimatische Modellierungen sind auf der vom DLR prozessierten Datengrundlage mit noch nie dagewesener Genauigkeit realisierbar.

Im Rahmen des Projektes soll, beauftragt durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Abteilung Geoinformation, Geodateninfrastruktur (nachfolgend SenStadtUm genannt), ein Konzept für eine automatisierte Extraktion von Gebäude- und Vegetationsobjekten sowie deren Höhenattributierung entwickelt und auf der Grundlage von UltraCamX Daten auf das gesamte Stadtgebietes sowie das angrenzende Umland angewendet werden.

Ziel des Projektes ist die Ableitung von Dächern und Dachgeometrien sowie die Extraktion von Vegetationshöhenstufen. Ein weiteres Ziel ist die Integration der automatisch extrahierten Objekte in eine Geodatenbank sowie die Bereitstellung dieser Daten als Berechnungsgrundlage für weiterführende urbane Analysen. Im Vordergrund steht dabei eine komplexe klimatische

Modellierung, in welche die Objektextraktionsergebnisse aus Berliner Innenstadt- und Umlandgebiet miteinfließen.

### **Beteiligte Institutionen**

Das Projekt wurde vollständig am DLR in Berlin-Adlershof im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt durchgeführt. Nachfolgend werden die beteiligten Institutionen näher beschrieben.

#### **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.**

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.) ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland, das seine Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte in den Bereichen Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit auslegt. Das DLR betreibt Großforschungsanlagen für eigene Projekte und ist in nationale und internationale Kooperationen eingebunden sowie als Dienstleister für Partner in der Wirtschaft tätig. Es hat in Deutschland mit Hauptsitz in Köln insgesamt 16 Standorte und beschäftigt rund 8000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die thematische Vielfältigkeit des DLR äußert sich in mehr als 30 unterschiedlichen Instituten (vgl. DLR, 2013a).

#### **DLR Institut für Optische Sensorsysteme – Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen**

Das Institut für Optische Sensorsysteme (OS) entwickelt geometrisch und/oder spektral hochauflösende Sensorsysteme im sichtbaren und infraroten Bereich der elektro-magnetischen Strahlung. Im Fokus der Aktivitäten der Einrichtung stehen abbildende optische Systeme, die auf Flugzeug- und Satellitenträgern zum Einsatz kommen (vgl. DLR, 2013b).

Die Abteilung für Sensorkonzepte und Anwendungen setzt ihre Schwerpunkte in der Definition und Entwicklung neuartiger Kamerasensoren, deren Verifikation und Validierung sowie der Verarbeitung der Datenprodukte für praxisorientierte Anwendungen. Die Kernkompetenzen der Abteilung erstrecken sich von der gemeinsamen Grundlagenforschung über die Planung und Durchführung von Flugkampagnen bis hin zur Datenprozessierung und Auswertung von Luftbild- und Satellitenaufnahmen (vgl. DLR, 2013c).

Die Prozessierung der vorhandenen digitalen Luftbilddaten erfolgte in der Arbeitsgruppe Photogrammetrie, ebenfalls wurde hier die Generierung der Datenprodukte DOM/nDOM und TOM realisiert. Die automatisierte Objektextraktion und Integration der Ergebnisse in eine Geodatenbank erfolgte in der Arbeitsgruppe Geoinformation und Anwendungen. Die hier vorgestellten Lösungen für die Objektextraktion werden im Rahmen der Promotionsarbeit von A. M. Poznanska (eh. Trosset), die an der Freien Universität Berlin eingereicht wird, entwickelt und weiterverarbeitet.

---

## Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm), Abteilung III – Geoinformation, Referat III D Geodateninfrastruktur

Die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm) setzt sich aus zehn unterschiedlichen Abteilungen sowie dem Sonderreferat Klima und Energie zusammen (Stand Juli 2013), deren Aktivitäten in den Bereichen Stadtplanung, Bauwesen, Verkehr, Umweltschutz sowie Abfallwirtschaft liegen. Die Abteilung III Geoinformation ist für die Aufnahme, Verwaltung und Bereitstellung der Geobasis- und Fachdaten zuständig. Der Schwerpunkt des Referats III D Geodateninfrastruktur liegt in der Aufbereitung, Bereitstellung, Bewertung und Visualisierung von Umweltdaten für Berlin, die für die Wirtschaft, Politik, Öffentlichkeit und Behörden freizugänglich und über den FIS-Broker (Fachübergreifendes Informationssystem) erreichbar sind (vgl. ISU, 2013), (vgl. SENSTADTUM, 2013a). Die vorhandenen Basis- und Fachdaten können miteinander kombiniert und im Hinblick auf unterschiedliche Fragestellungen ausgewertet werden.

Im Berliner Umweltatlas werden die vorhandenen Datenbestände und Arbeitsergebnisse aus zahlreichen Bereichen der Berliner Verwaltung sowie wissenschaftlichen Instituten in Form von Karten, Tabellen und Grafiken präsentiert. Die Arbeitsergebnisse, die nach dem Jahr 2000 herausgegeben wurden, sind ausschließlich als Online-Version verfügbar. Der Umweltatlas umfasst insgesamt acht Themenbereiche: Boden, Wasser, Luft, Klima, Biotope, Flächennutzung, Verkehr / Lärm und Energie. Er verfolgt durch die Bereitstellung raumbezogener Grundlagen das Ziel der *„Information der Öffentlichkeit über den Zustand der Umwelt“*. Die meisten Themenbereiche werden in den Fachabteilungen der für Stadtentwicklung und Umweltschutz zuständigen Senatsverwaltung erhoben und in Zusammenarbeit mit Universitäten, Instituten und Partnern aus der Wirtschaft fortwährend aktualisiert (vgl. SENSTADTUM, 2013b).

## 2 Datengrundlage

Die flächendeckende Bearbeitung des Berliner Stadtgebietes und näheren Umlandes wurde in zwei getrennten Bearbeitungsschritten durchgeführt.

Zum einen wurde diese Aufteilung durch die zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung vorliegende Datengrundlage vorgegeben, zum anderen gibt sie aber auch in einem hohen Maß die variierende morphologische Prägung der beiden Projektgebiete wieder. Die sehr hochauflösenden UltraCam X (UCX) Daten in einer Ausdehnung von rund 445 km<sup>2</sup> aus dem Jahr 2010 decken den dicht bebauten heterogenen Bereich des Berliner Innenstadtgebietes ab, während die mit 50 cm weniger aufgelösten Daten aus dem Jahr 2009 das Berliner Stadtrandgebiet sowie das nähere Umland mit dessen zum großen Teil aufgelockerten Siedlungs- und homogeneren Vegetationsstrukturen in einer Ausdehnung von rund 1800 km<sup>2</sup> erfassen. Die Ausdehnungen der beiden Projektgebiete wurden in Abb. 1 dargestellt. Diese Projektgebiete geben die Aufteilung des Projektes in zwei Phasen vor:

- erste Projektphase: Berliner Innenstadtgebiet (Daten 2010)
- zweite Projektphase: restliche Stadtfläche Berlin und Berliner Umland (Daten 2009)

Diese Daten sowie deren Vorprozessierung werden im Kapitel 2.1 detailliert beschrieben.

Seitens der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt wurden für das gesamte Stadtgebiet Vektordaten in Form der Blockkarte 1:5.000 (ISU5) sowie der Gebäude- und Straßenbaumdatei der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) zur Verfügung gestellt. Diese werden im Kapitel 2.2 beschrieben.

Für die Phase II wurden weiterhin ein DGM<sub>1</sub> für Berlin und die angrenzenden Bereiche von Brandenburg bereitgestellt.

Die vorliegenden Raster- und Vektordaten lagen in unterschiedlichen Projektionen vor und wurden in eine einheitliche Projektion transformiert. Als Bezugssystem für die Bearbeitung wurde das als weltweiter Standard verwendete UTM-Koordinatensystem (engl. *Universal Transverse Mercator*) in der Zone 33N mit dem geodätischen Bezugssystem ETRS89 (das *Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989*) eingesetzt.

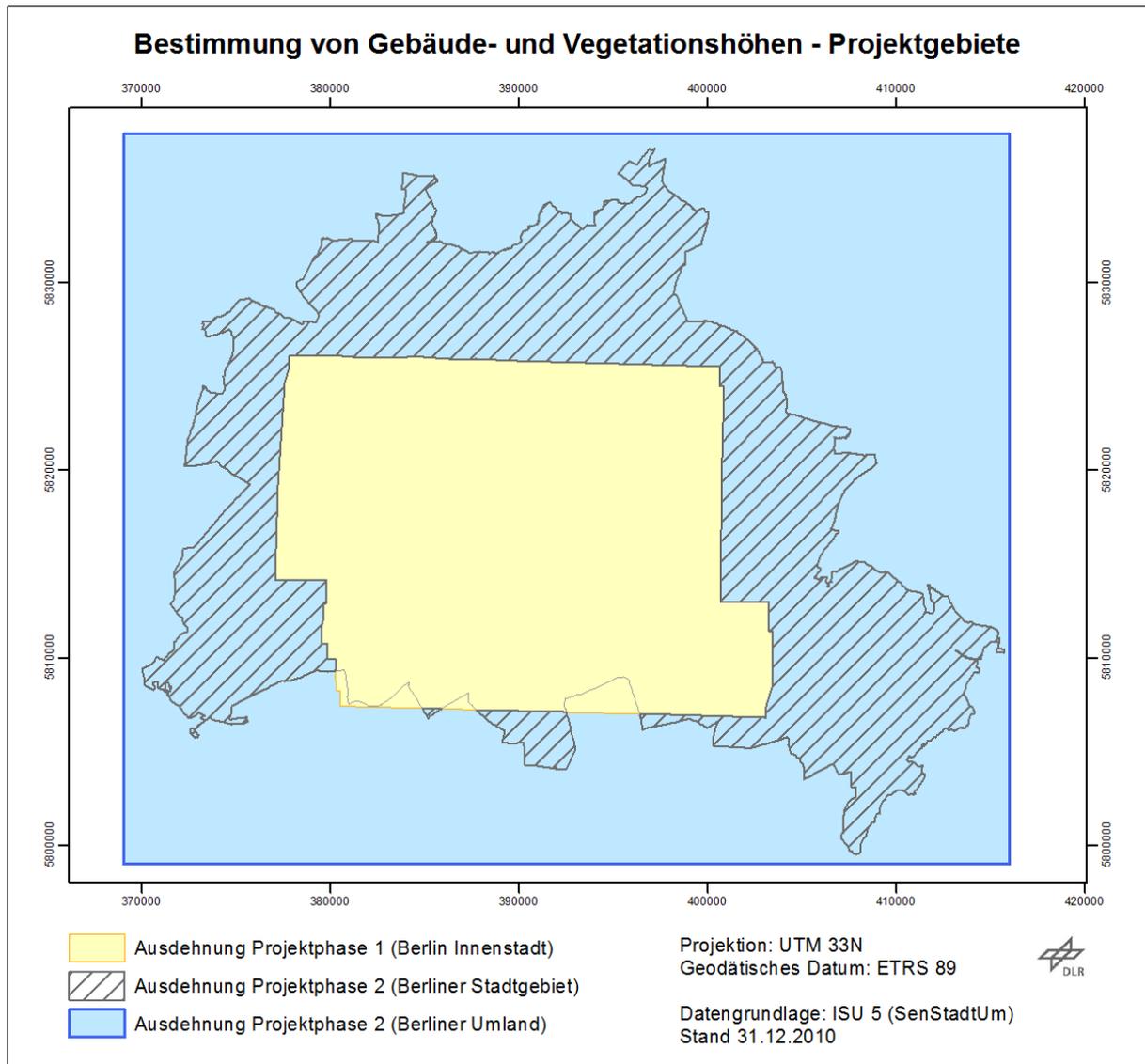


Abb. 1 Ausdehnung der Projektgebiete – Berliner Stadtgebiet und Berliner Umland

## 2.1 Digitale Luftbilddaten – UltraCamX

Für die automatisierte Objektextraktion standen digitale Luftbilddaten der Flächenkamera UltraCamX (UCX) zur Verfügung. Das Kamerasystem, dessen Parameter sowie die Befliegungskampagnen und die Prozessierung der resultierenden Daten werden nachfolgend im Detail beschrieben.

### 2.1.1 Das Kamerasystem UltraCamX

Die digitale Luftbildkamera UltraCamX (UCX) gehört zu den Flächenkameras (auch Matrix- oder Framekameras genannt) und ist eine Weiterentwicklung der Vorgängerin UltraCamD, die von dem österreichischen Technologieunternehmen Vexcel Imaging GmbH (heute Microsoft) konzipiert

worden ist. Die Kamerasysteme der UltraCam haben sich seit 2006 als eines der am meisten eingesetzten flugzeuggestützten Kamerasysteme auf dem Markt etabliert. Die nachfolgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf der Publikation von GRUBER ET AL. (2008).

Flächenkameras für die photogrammetrischen Anwendungen realisieren die Aufnahme eines Luftbildes durch mehrere in der Sensoreinheit angeordnete Matrixsensoren, die eine Zentralperspektive aufweisen. Die UCX besteht aus einer Sensoreinheit mit acht unabhängigen Kameras, die mit insgesamt 13 CCD Sensoren ausgestattet sind. Vier von den Kameras nehmen das höheraufgelöste großformatige panchromatische Bild auf, während die restlichen vier geringer aufgelöste Aufnahmen der spektralen Kanäle Blau, Grün, Rot und nahes Infrarot machen. Alle Daten haben eine radiometrische Tiefe von mehr als 12 Bit.

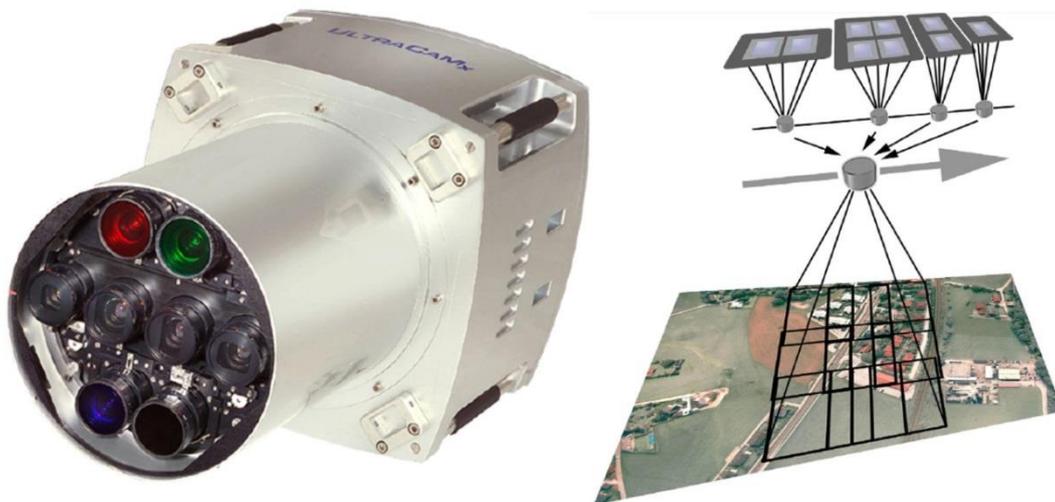


Abb. 2 UltraCamX Kamerakopf (links, Quelle: Gruber et al., 2008, S. 666)  
und das Aufnahmeprinzip (rechts, Quelle: Leberl & Gruber, 2003, S. 74)

Die vier panchromatischen Kameras sind in einer Reihe in Flugrichtung mit parallelen optischen Achsen in dem Kamerasystem montiert. Sie werden zeitversetzt ausgelöst, wodurch pro Aufnahmezyklus neun leicht überlappende Einzelbilder entstehen. Diese werden zu einem finalen hoch aufgelösten panchromatischen Bild in einer Größe von 14.430 x 9.420 Pixeln zusammengefügt. Simultan zeichnen die vier multispektralen Kameras Bilder mit den Maßen von je 4.992 x 3.328 Pixeln auf. Im Rahmen eines *Pan-Sharpening* werden die multispektralen Daten auf die geometrische Auflösung der panchromatischen Daten (14.430 x 9.420 Pixel) gebracht.

Bei einer Flächenkamera wird die Stereofähigkeit durch einen Überlappungsbereich von mindestens je 60 % in Flugrichtung und 30 % quer zur Flugrichtung gewährleistet. Durch diese Überlappung wird jeder Bildpunkt aus mindestens drei unterschiedlichen Blickwinkeln aufgezeichnet. Dies erlaubt ein Zusammenfügen von allen vorhandenen Einzelaufnahmen zu einem Gesamtmosaik sowie eine stereoskopische Erstellung von einem DOM. Die Größe des Überlappungsbereiches der Einzelbilder beeinflusst unmittelbar die Qualität des entstehenden DOM. Aufgrund dessen empfiehlt es sich eine optimale Längsüberlappung von 80 % und eine Querüberlappung von 70 % zu befliegen (HIRSCHMÜLLER & BUCHER, 2010).

### 2.1.2 Die Befliegungskampagnen 2009 und 2010

Die Befliegungskampagne über das Innenstadtgebiet von Berlin fand zu Herbstbeginn 2010 statt. Die Befliegung für die Berliner Randbereiche sowie das Umland wurde Ende August 2009 durchgeführt. Nachfolgend wurden die wichtigsten Flugparameter aus den vorliegenden Flugprotokollen und den technischen Berichten zusammengefasst:

Tab. 1 Zusammenstellung der Befliegungsdaten

	Projektphase I	Projektphase II
Befliegungsfirma:	BSF Swissphoto GmbH	BSF Swissphoto GmbH
Flugdatum:	23.09.2010	24.08.2009
Aufnahmebeginn / -Ende:	8:05 / 11:24 Uhr	7:55-11:50 & 14:05-16:00
Kamera:	UltraCamX (Vexcel GmbH, heute Microsoft)	UltraCamX (Vexcel GmbH, heute Microsoft)
Bodenauflösung:	15 cm	50 cm
Längs- / Querüberlappung:	80 / 60 %	60 / 30 %
Anzahl der Flugstreifen:	17	13
Anzahl Aufnahmen insgesamt:	1793	416
Aerotriangulation	Trimble Inpho	Trimble Inpho
Oberflächengenerierung:	SGM (DLR)	SGM (DLR)
Höhe über Grund:	ca. 2090 m	ca. 7000 m
Koordinatensystem:	UTM, Zone 33N	UTM, Zone 33N
Geodätisches Datum:	ETRS89	WGS 84
GPS-Referenzstation:	SAPOS-Station in Berlin Wilmersdorf	unbekannt
Genauigkeit der GPS-Prozessierung:	Lage und Höhe 5-6 cm (theoretisch), 10 cm (realistisch)	Lage und Höhe 10-15 cm (theoretisch), 15-20 cm (realistisch)

Die Lage der resultierenden Bildaufnahmen (DOM und TOM in Echtfarbendarstellung RGB) aus den Befliegungskampagnen vom 23.09.2010 und 24.08.2009 ist in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt.

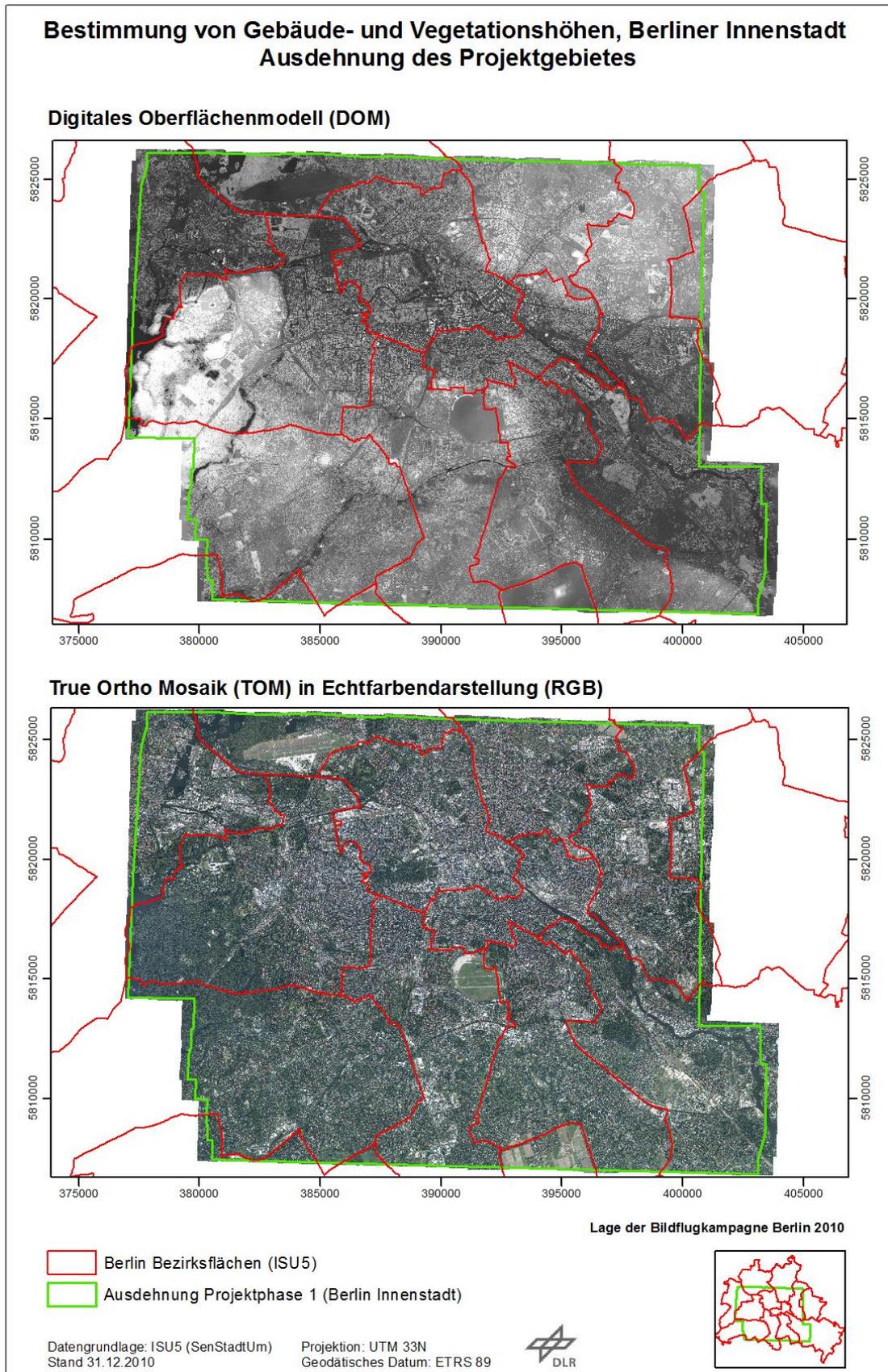


Abb. 3 Berliner Innenstadtgebiet – Lage und Ausdehnung der UCX Daten aus der Befliegungskampagne am 23.09.2010

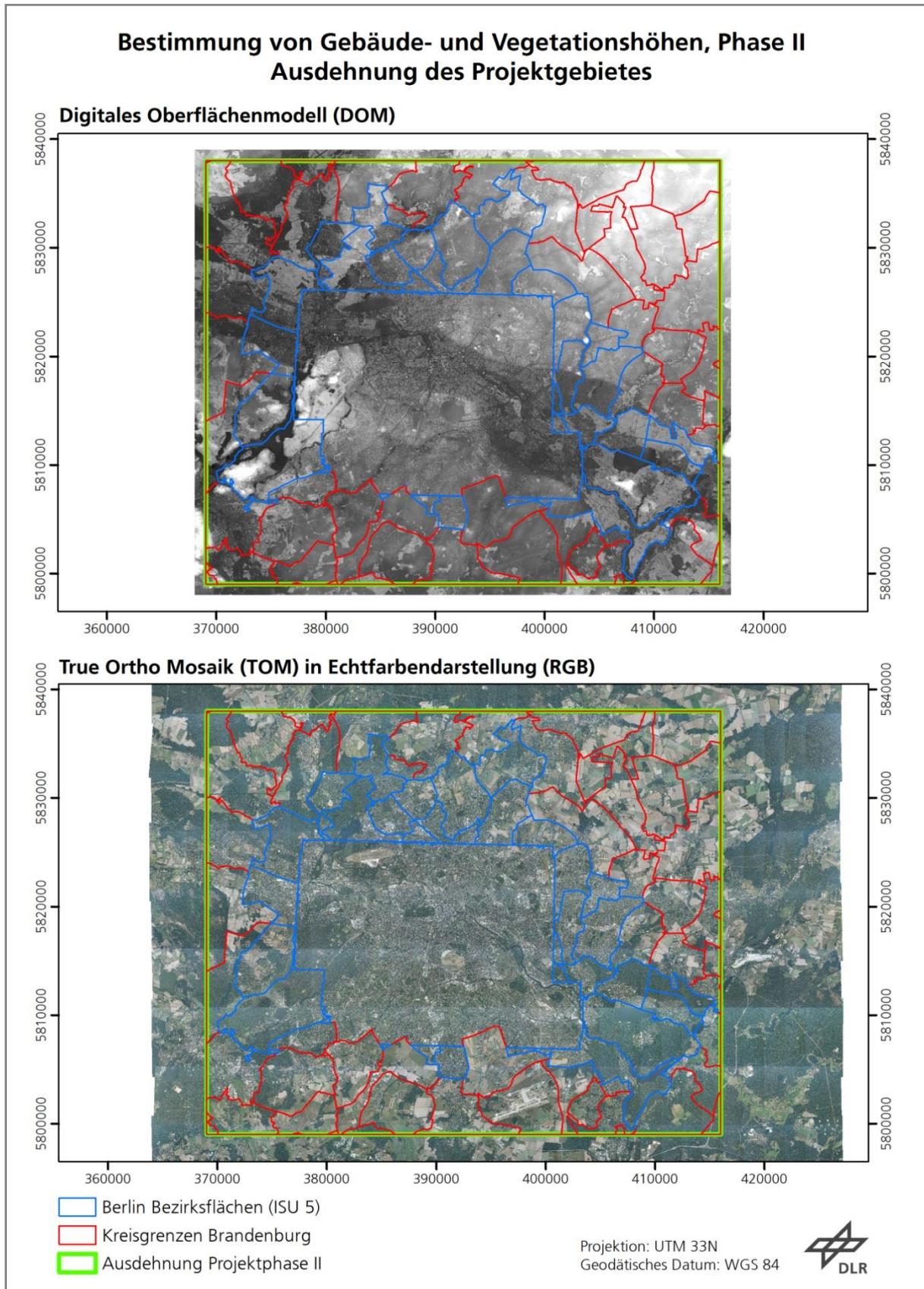


Abb. 4 Projektgebiet Phase II – Lage und Ausdehnung der UCX Daten aus der Befliegungskampagne am 24.08.2009

### 2.1.3 Datenprozessierung (DOM / TOM Erstellung)

Die Prozessierung der Einzelbilder zu einem True Ortho Mosaik (TOM) sowie die Erstellung eines DOM wurde am DLR in der Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen am Institut für Optische Sensorsysteme in Berlin-Adlershof durchgeführt und wird nachfolgend näher beschrieben. Die aus 2009 vorliegenden Bilddaten für Randberlin und Umland weisen unter anderem aufgrund der großen Flughöhe eine schlechte Radiometrie auf, weshalb diese Daten im Vorfeld der DOM und TOM Prozessierung von BSF Swissphoto GmbH radiometrisch korrigiert wurden. Diese Korrektur führt aber nur zu begrenzten Verbesserungen (Abb. 15).

Das vorliegende DOM und das auf dessen Grundlage generierte TOM wurden auf Basis von Stereoaufnahmen prozessiert. Bei einer Flächenkamera ändern sich bei der Aufnahme die Eigenschaften der äußeren Orientierung von Bild zu Bild (KRAUS, 2004: 201ff). Die Prozessierung der Orientierungsdaten erfolgte bei der Firma BSF Swissphoto GmbH. Dazu muss die Bildorientierung bekannt sein, d.h. alle Parameter, die nötig sind, um den Bezug zwischen dem Aufnahmegebiet und dem erfassten Luftbild herzustellen, müssen vorhanden sein. Dazu zählen die Daten der inneren und äußeren Orientierung (HEIPKE, 2003: 60ff). Diese haben nach der Auswertung der *Inertial Navigation System* (INS)- und der differentiellen *Global Positioning System* (GPS) -Daten eine sehr gute Lagegenauigkeit. Über das GPS wird fortlaufend die Flugbahn des Sensorträgers und mit Hilfe des INS die ständige Position der Kamera und deren Bewegung während des Bildfluges erfasst. Für die differentielle Prozessierung der Navigationslösung wurden SAPOS-Daten verwendet.

Liegen alle Orientierungsparameter vor, werden die einzelnen breit überlappenden Bilder über sog. Verknüpfungspunkte zueinander als Bildverband in Beziehung gesetzt und in das geforderte Koordinatensystem überführt. Dieser Prozess der sogenannten Aerotriangulation (AT) ermöglicht die Überbrückung weiter Räume, in denen keine terrestrisch eingemessenen Festpunkte oder Passpunkte vorhanden sind. Damit kann eine Lagegenauigkeit von einigen Zentimetern pro Kilometer erreicht werden (KRAUS, 2004: 273ff).

Der vorhandene Bildverband wird nachfolgend einem Bildzuordnungsverfahren, dem *Semi-Global Matching* (SGM), unterzogen, welches am DLR entwickelt wurde (HIRSCHMÜLLER, 2005) und in einem hochgenauen DOM resultiert. Es ist ein pixelbasierter Algorithmus, der die Bildzuordnung mittels einer globalen Kostenfunktion<sup>1</sup> durchführt und eine sehr hohe Kantenschärfe und die Abbildung feiner Details im DOM garantiert. Die Bildzuordnung erfolgt im panchromatischen Kanal, jeweils von einem Bild aus mit den vorherigen und den nächsten in Flugrichtung (bei 80 % Überlappung jeweils zwei, bei 60 % jeweils eines), sowie dem jeweils nächsten aus den beiden benachbarten Fluglinien (nur bei entsprechender Querüberlappung). Ein Bildelement wird dann jeweils paarweise den korrespondierenden, überlappenden Bildelementen zugeordnet. Anschließend werden homologe Strahlen durch das jeweilige Projektionszentrum der Luftbilder aufgespannt, wodurch sie sich in einem gemeinsamen Objektpunkt schneiden. Dadurch ist der Objektpunkt mit den Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  bestimmt. Zur Erstellung des DOM werden die berechneten Höheninformationen ( $z$ -Werte) der jeweiligen Pixel in einem georeferenzierten Raster als Grauwerte

<sup>1</sup> (engl.) *global cost function*, für weitere Informationen vgl. HIRSCHMÜLLER, 2005: 811

abgespeichert. Durch die Verwendung von SGM als pixelweisem Bildzuordnungsverfahren entspricht die Auflösung des DOM der mittleren Bodenauflösung des Bildes, sodass Kanten und feine Strukturen ebenfalls im DOM abgebildet werden. Diese Datengrundlage ermöglicht die Erstellung von einem True Ortho Mosaik (TOM) (HIRSCHMÜLLER, 2008).

Das Ausgangsmaterial der Befliegung ist ein Luftbildverband mit einer zentralperspektivischen Abbildung. Durch diese Projektion kommt es zu geometrischen Verzerrungen der Objekte nach außen, wodurch kein einheitlicher Maßstab im Bild vorhanden ist und keine realistischen Distanzen abgegriffen werden können. Damit die Bilddaten in einem GIS genutzt werden können muss eine Differentialentzerrung unter Zuhilfenahme eines DOM durchgeführt werden. Dieser Vorgang resultiert in einem True Orthophoto. HEIPKE (2003: 62) definiert es wie folgt: *„True Orthos sind Orthophotos, für die bei der Differentialentzerrung ein strenges DOM und nicht wie traditionell ein DGM verwendet wurde, und bei denen die dabei entstehenden sichttoten Räume durch Information aus Nachbarbildern gefüllt werden.“* Die True Ortho Bildgenerierung ist für eine pixelgenaue, geometrisch exakte Lage ausgelegt. Jeder Pixel entspricht geometrisch exakt einer Projektion von oben auf das DOM. Es gibt keine Verkippungen mehr, bei denen man z. B. die Hausfassaden sehen würde.

Die True Ortho Bildgenerierung und die anschließende Mosaikierung erfolgt Bild für Bild, d.h. es werden die einzelnen Bilder entzerrt, wobei die inneren Bildbereiche mit geringem Blickwinkel verwendet werden. Sehr kleine Sichtschattenbereiche im Zentralbereich der Einzelbilder werden interpoliert. Als Resultat erhält man ein Mosaik aus in sich konsistenten, scharfen Einzelbildern, in dem die Lage der erhöhten Objekte korrekt und kantenscharf abgebildet wird. Lediglich in den interpolierten Sichtschattenbereichen können Höhenverfälschungen zustande kommen.

In Abb. 5 werden die Vorteile eines TOM ersichtlich. Während in einem Digitalen Orthophoto (DOP) die erhöhten Gebäudeobjekte gekippt sind und die Straßenflächen verdeckt werden (siehe z. B. DB Tower), bietet das TOM eine korrekte Objektlage und scharfe Kanten, sodass das Messen von Entfernungen, Kanten und Flächen gewährleistet ist. Der Unterschied kommt zustande, da das DOP lediglich unter Zuhilfenahme eines DGM, das nur Geländehöhen enthält, entzerrt wird. Das Vorhandensein eines DOM sowie eines TOM ist demzufolge eine Grundvoraussetzung für genaue Analysen in dicht bebauten, urbanen Räumen und steigert die Zuverlässigkeit der Aussagen.

Die aktuellsten Entwicklungen im Bereich der Bildzuordnung haben die Qualität der DOM so stark verbessert, dass auch eine weitgehend korrekte Abbildung extremer Erhöhungen, sowie verbesserte Bildzuordnung in Sichtschattenbereichen möglich sind (HIRSCHMÜLLER, 2011).

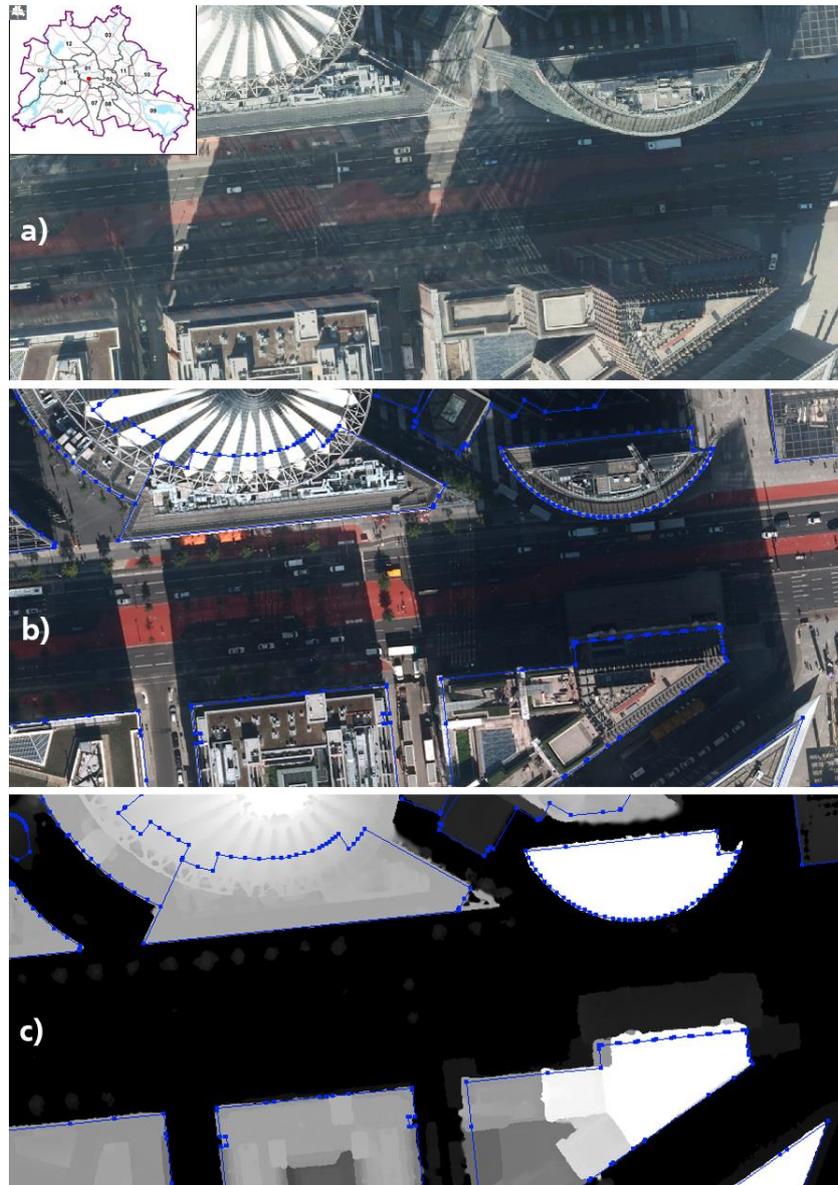


Abb. 5 Vergleich zwischen DOP und TOM; a) DOP 20 RGB, 2011 (Quelle: SenStadtUm, 2013a), b) TOM RGB überlagert mit ALK Gebäudekonturen, c) nDOM überlagert mit ALK Gebäudekonturen

#### 2.1.4 Datenprodukte und Zusatz-Layer

Die Prozessierung der UCX Daten von 2009 und 2010 am DLR in der Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen ergab einen hoch auflösenden und lagegenauen Datensatz, der aus einem DOM und einem TOM besteht. Diese Daten sowie deren abgeleitete Zusatz-Layer werden bei dem Projekt als Eingangsdaten für die automatisierte Erfassung von Gebäude- und Vegetationsobjekten samt deren Höhenattributen verwendet. Alle Daten wurden in eine einheitliche Projektion transformiert (UTM 33N, ETRS89 bzw. WGS84). Nachfolgend werden Charakteristika aller verwendeten Datenprodukte beschrieben und visualisiert.

## DOM und Erstellung des nDOM

Das DOM repräsentiert in Graustufen kodierte Höhen der Erdoberfläche samt aller darauf befindlichen Objekte (Gebäude, Straßen, Vegetationsbewuchs, usw.). Dies bedeutet, dass auf die Objekthöhen die Geländehöhe aufsummiert wird. Die Geländehöhen im Projektgebiet von Phase I erstrecken sich zwischen rund 30 m über NN im Spreetal bis hin zu über 120 m über NN auf dem Teufelsberg im Bezirk Wilmersdorf-Charlottenburg. Für Projektphase II liegen die Geländehöhen in ähnlichen Bereichen.

Da der Höhenunterschied im gesamten Gebiet, aber auch lokal betrachtet, relativ groß ist, kann keine konstante Geländehöhe angenommen werden, um aus dem DOM absolute Objekthöhen zu ermitteln. Dazu bedarf es eines normierten Digitalen Oberflächenmodells (nDOM), bei dem das Gelände auf null normiert wird.

Das nDOM entsteht demzufolge durch die Subtraktion des digitalen Geländemodells (DGM) vom DOM:

$$nDOM = DOM - DGM$$

Das aus dem DOM abgeleitete nDOM stellt daher neben einem TOM die unabdingbare Grundlage für eine automatisierte Objektextraktion in städtischen Gebieten dar. Am DLR wurde bereits für die Aufnahmen der *High Resolution Stereo Camera* (HRSC)-Kamerareihe ein semi-automatisiertes Verfahren zur Erstellung von DGM und Berechnung von nDOM entwickelt (MAYER, 2000). Diese Methode wurde an die aktuellen Datengrundlagen angepasst und verwendet. Hierbei wird die Tatsache genutzt, dass sich die erhöhten Objekte im DOM durch einen größeren Höhenwert und abrupte (Höhen-)Kantensprünge von ihrer Umgebung unterscheiden. Durch eine Matrix, die das gesamte Bild durchsucht, werden erhöhte Pixel im DOM gefunden und gleichzeitig durch einen Höhen-Schwellenwert eindeutig als Grund- oder Nicht-Grundpixel definiert. Für die Suche können mehrere Suchmatrizen mit unterschiedlicher Größe kombiniert werden, um den variierenden Objektgrößen gerecht zu werden. Aus den identifizierten Grundpixeln, sofern diese ausreichend vorhanden sind, kann ein lückenloses DGM interpoliert werden. Das resultierende DGM wird vom DOM subtrahiert, was zum endgültigen Objekthöhenmodell – einem nDOM – führt, bei dem der Grund auf null normiert ist und präzise, absolute Objekthöhen abgelesen werden können.

Diese Methode führt vor allem in bebauten Gebieten, wie der Berliner Innenstadt zu einem genauen DGM. In Bereichen mit geschlossenen Waldbeständen werden aufgrund der Aufnahmemethode nur noch vereinzelt Grundpunkte für die DGM Erstellung gefunden. In der Folge müssen große Bereiche unter Wald interpoliert werden, was vor allem in bewegtem Gelände zu Fehlern im DGM führt. Da im gesamten Randbereich von Berlin sowie auch im Umland große und geschlossene Waldbestände vorzufinden sind, wurde für die finale Berechnung der Daten in Phase II nicht auf die beschriebene Methode nach Mayer (2000) zurückgegriffen. Anstelle eines photogrammetrisch erzeugten DGM wurde auf ein 1 m aufgelöstes Laser DGM der Landesvermessung zurückgegriffen, welches von der Senatsverwaltung zur Verfügung gestellt wurde.

Abb. 6 zeigt schematisch sowie am Beispiel eines Ausschnitts in Berlin (Teufelsberg in Berlin-Grünwald im Westen bis Berlin-Friedrichshain im Osten) die Berechnung eines nDOM. Vergleicht man die Bildbeispiele von DOM und nDOM, so ist deutlich zu erkennen, dass Objekte, die sich auf einer Geländeerhöhung befinden im DOM deutlich größere Höhenwerte aufweisen (sehr helle Bereiche) als es der Objekthöhe entspricht und als sie im nDOM wiedergegeben werden. Im nDOM erkennt man, dass die Objekthöhen auf das Gelände normiert wurden und dadurch die absoluten Höhen abgelesen werden können (siehe z. B. Teufelsberg im roten Kreis, oder Geländeerhebung in Berlin-Prenzlauer Berg oben rechts).

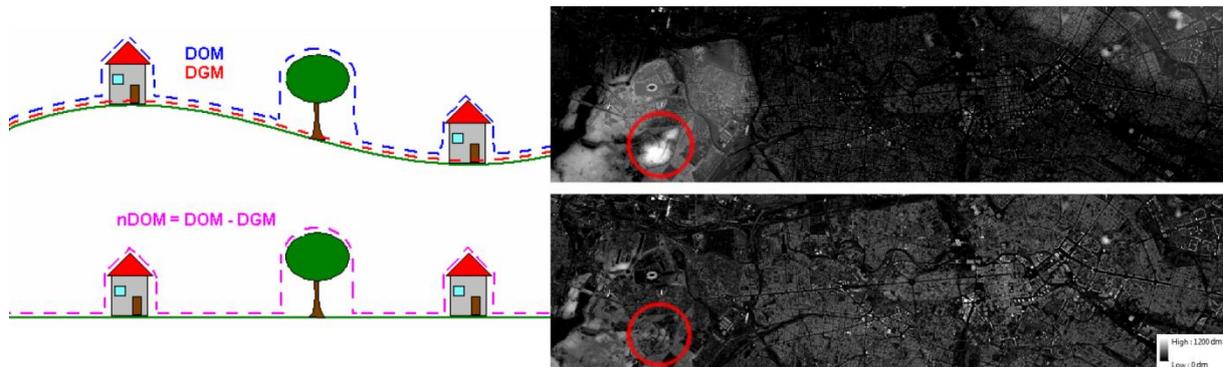


Abb. 6 nDOM – schematische Darstellung der Berechnung (links); Bildbeispiele: DOM (rechts oben) und das berechnete nDOM (rechts unten), (Quelle: eigene Darstellung nach Mayer, 2004)

Für die Gebiete von Phase I beträgt die initial berechnete geometrische Bodenauflösung (x/y) 15 cm, die Höhenauflösung (z) beträgt 10 cm. Um die enorme Datenmenge im Projektgebiet zu reduzieren, wurde die Auflösung aller Rasterlayer (TOM, DOM und abgeleitete Produkte) auf 30 cm in x/y reduziert. Die Höhenauflösung bleibt dabei unverändert. Für die Gebiete von Phase II liegt die geometrische Auflösung bei 50 cm, die Höhendarstellung erfolgt wie in Phase I in 10 cm Schritten..

Das nDOM zeichnet sich vor allem in Phase I durch eine hohe Kantenschärfe aus. In ist deutlich zu erkennen, dass die Gebäudekanten sowie Dach- und Vegetationsstrukturen gut wiedergegeben werden. Dies ist dem Bildzuordnungsverfahren – SGM (vgl. Kapitel 2.1.3) – zu verdanken. Auf dieser Grundlage sind detailgenaue Objektklassifizierungen sowie eine präzise Ermittlung von Objekthöhen möglich. Da das nDOM in den Segmentierungsprozess einbezogen wird, hat dessen Qualität einen positiven und stabilisierenden Einfluss auf die Form der Segmente, insbesondere bei der Unterteilung der Objekte in deren Höhenstufen (vgl. Kapitel 4.5.4).

Bedingt durch die schlechtere Auslösung und Radiometrie der Bilddaten sowie die geringere Überlappung der Bilddaten von Phase II weist auch das nDOM eine deutlich geringere Qualität und Kantenschärfe auf. Diese Verschlechterung der Qualität des nDOM hat auch einen großen Einfluss auf die Segmentierungs- und Extraktionsgenauigkeit. Vor allem kleinere Objekte und Objekte mit einem geringen Höhenunterschied können schlechter voneinander getrennt werden.

Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen im Berliner Stadtgebiet

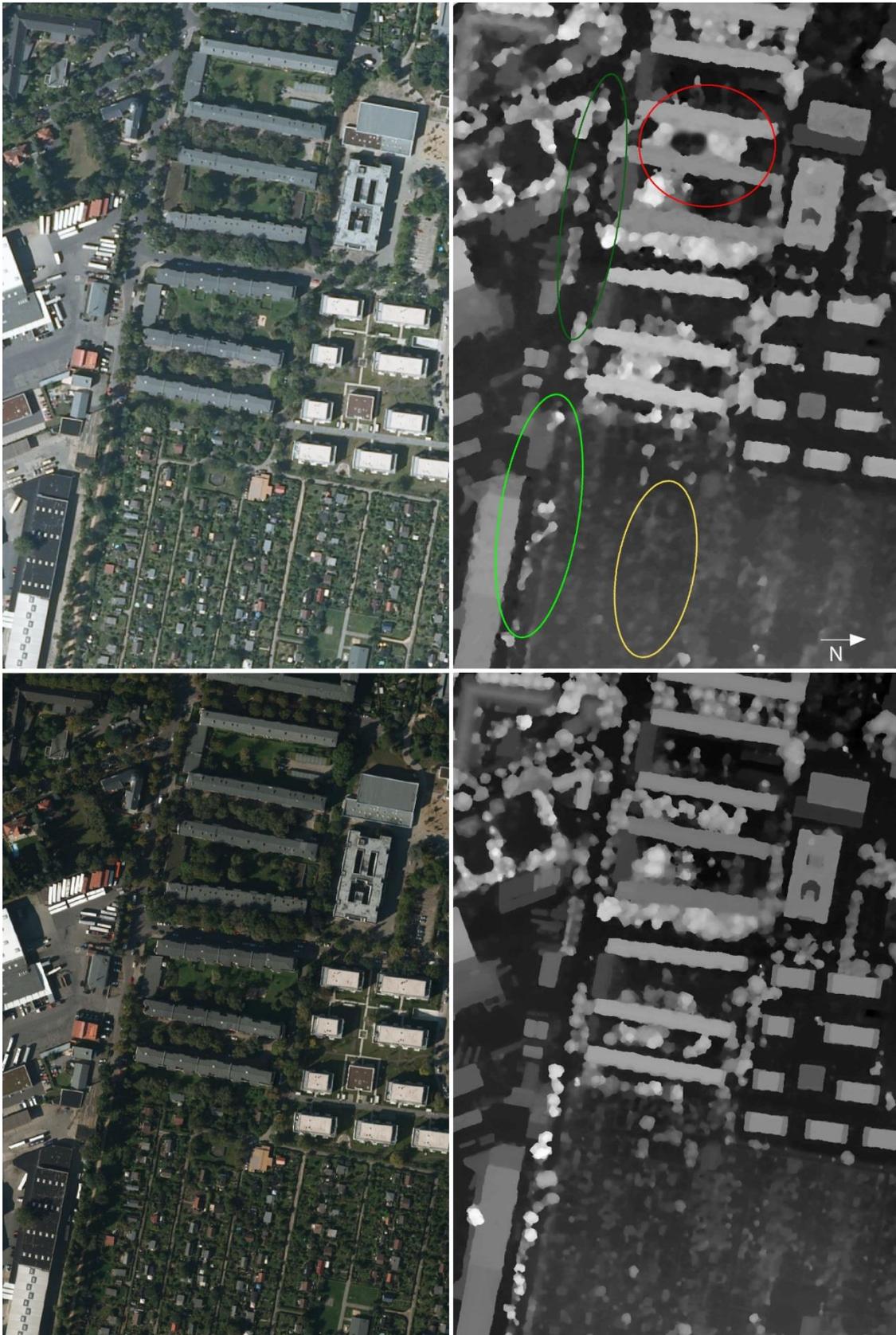


Abb. 7 Vergleich TOM und DOM der Befliegungen von 2009 (oben, 50 cm) und 2010 (15 cm), südl. Tempelhofer Feld. Das DSM von 2010 hat eine deutlich bessere Qualität, Erläuterungen zu Markierungen im Text.

Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen im Berliner Stadtgebiet

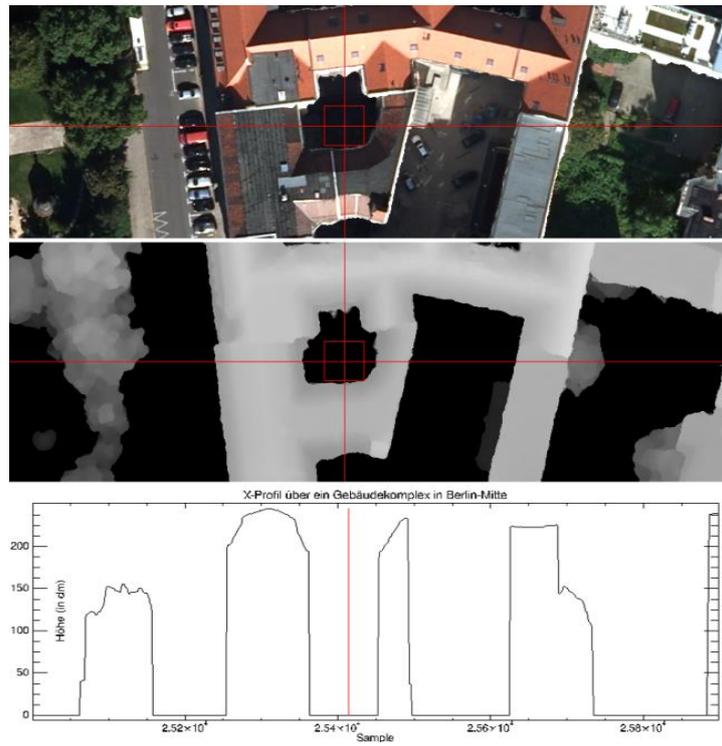


Abb. 8 Höhenprofil des nDOM von Phase I (Höhen dargestellt in dm). Zu erkennen sind unterschiedliche Dachformen und Vegetationsstrukturen

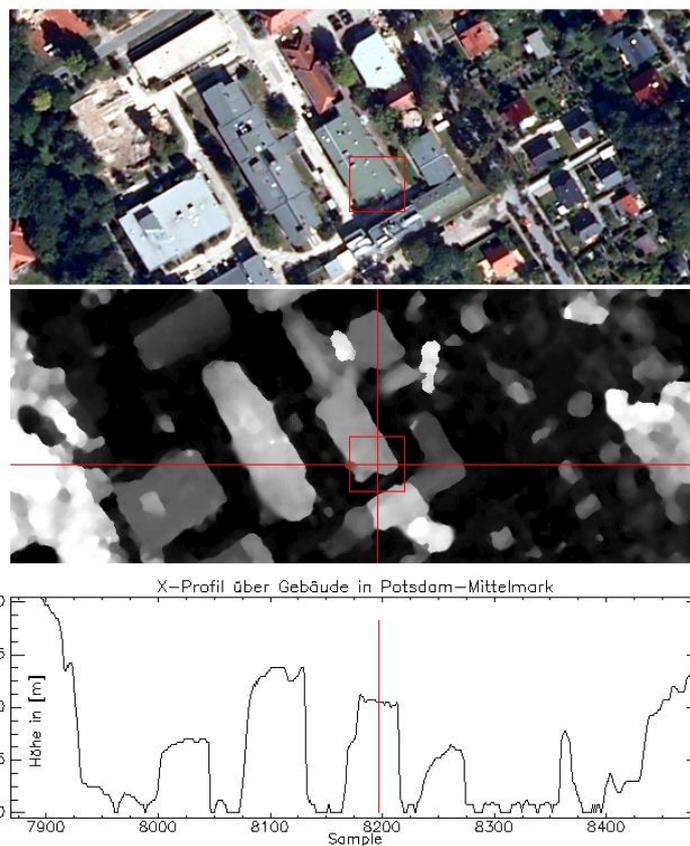


Abb. 9 Höhenprofil des nDOM von Phase II, schlechtere Qualität (Rauschen, Kantenschärfe) als in Phase I

Deutlich wird dies in Abb. 7 an den weniger scharfen Gebäudekanten, mehr Verschmierung durch Interpolation (rote Ellipse), z.T. fehlenden Bäumen (dunkelgrün: Baumbestand gut erfasst, helles grün: Baumbestand unvollständig), und unscharfen kleinen Objekten (Kleingarteninventar, gelb). Auch die Qualität der Höheprofile der 2010 Daten ist deutlich besser (Abb. 8 und 9).

Trotz der hohen Genauigkeit und Qualität des in Phase I genutzten photogrammetrisch abgeleiteten nDOM weist es einige Schwächen auf, die in geringem Umfang das Objektextraktionsergebnis beeinflussen können.

Während der nDOM Berechnung wird, wie oben beschrieben, eine Maske für Grund- und Nicht-Grund-Pixel erstellt. Dafür wird ein Hörschwellenwert definiert, damit keine sehr niedrigen Geländeerhebungen als erhöhte Objekte deklariert werden (Abb. 10 Schematische Darstellung des Vorgehens zur Detektion erhöhter Punkte für die Grundhöheninterpolation an einem Höhenprofil (Quelle: Mayer, 2004: 49))

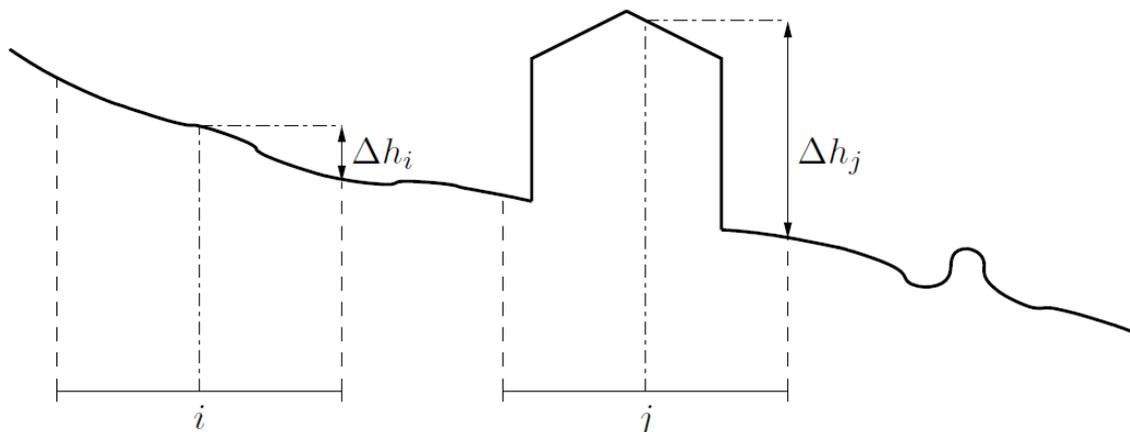


Abb. 10 Schematische Darstellung des Vorgehens zur Detektion erhöhter Punkte für die Grundhöheninterpolation an einem Höhenprofil (Quelle: Mayer, 2004: 49)

Durch die Festlegung eines zu hohen Schwellenwertes ist eine Fehlzurordnung von kleinen und niedrigen Objekten zu Grundpixeln möglich. Das beschriebene Verfahren ermöglicht dabei einerseits die Behebung von Geländestörungen, verursacht aber andererseits auch das Verschwinden von kleinen und flachen Objekten, wie beispielsweise niedrigen Gebüsch, kleinen Gartenlauben oder Garagen (Abb. 11). Gleichzeitig werden aber auch störende Kleinobjekte wie parkende Autos eliminiert und die Höhe auf das Wesentliche reduziert.

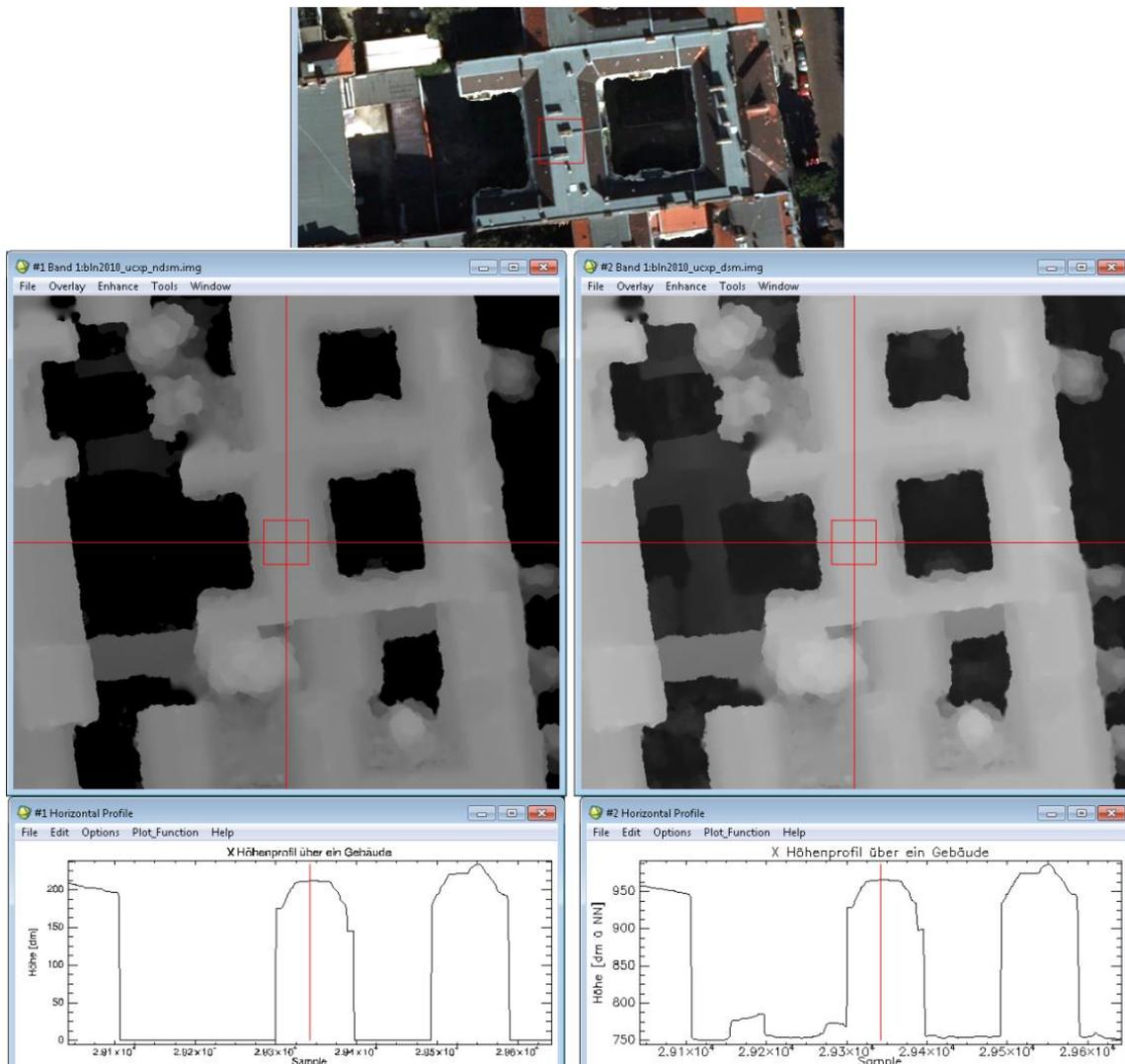


Abb. 11 Vergleich zwischen nDOM (links) und DOM-Höhenprofilen (rechts); durch die Schwellenwertbildung verschwinden kleine und niedrige Objekte im nDOM (hier Innenhofgaragen)

Zu einer weiteren Problemzone des nDOM gehören die interpolierten Bereiche. Aufgrund der frühen Uhrzeit während der Befliegungskampagne für Phase I (vgl. Flugparameter, Kapitel 2.1.2), sind in den aufgenommenen Bilddaten viele Schattenbereiche vorhanden. Dies übt, wie im Kapitel 2.1.3 beschrieben, einen Einfluss auf die Qualität des generierten DOM aus, da bei zu wenigen korrespondierenden Punkten (bei Schatten, homogenen Flächen und Sichtschatten) die Höhen interpoliert werden. Dies kann verfälschte Objekthöhen verursachen. In Abb. 12 ist deutlich zu erkennen, dass die Gebäudekante nicht scharf dargestellt wird, sondern mit dem nebenan stehenden Baum verschwimmt. Diese Fehler treten verstärkt an sehr hohen Gebäudeobjekten auf, da an solchen Stellen die meisten Sichtschatten zustande kommen.

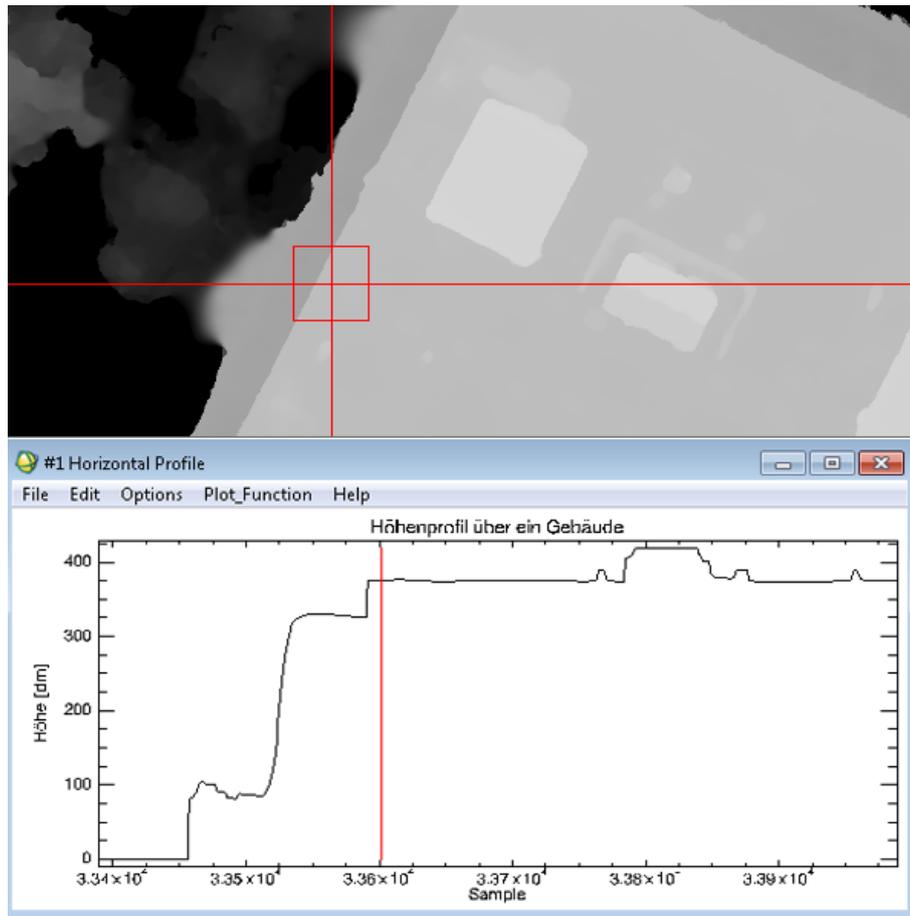


Abb. 12 Interpolationsfehler im nDOM: auslaufende Gebäudekante im Schatten

## TOM

Der vorhandene TOM Datensatz besteht aus vier Kanälen: Rot, Grün, Blau (Echtfarben RGB) und nahem Infrarot (nIR) in einer geometrischen Auflösung in x/y von 15 cm in Phase I. Ähnlich wie das nDOM wurden die spektralen Daten auf eine Auflösung von 30 cm reduziert. Dies dient in erster Linie der Reduktion der Datenmenge, aber auch der spektralen und geometrischen Heterogenität der zu erfassenden Objekte (TROSSET ET AL., 2009).

Wie schon erwähnt, weisen die spektralen Daten aufgrund der späten Jahreszeit und einer frühen Befliegungszeit (vgl. Flugparameter, Kapitel 2.1.2), einen relativ hohen Grad an Verschattung auf. Dank der hohen radiometrischen Auflösung von mehr als 12 Bit und des simultan generierten DOM lassen sich trotzdem viele Objekte in den Schattenbereichen korrekt identifizieren (Abb. 13). Insbesondere durch den nIR Kanal, in dem Vegetation hohe spektrale Werte aufweist, lässt sie sich zuverlässig erfassen (Abb. 14).

Das in Phase II verwendete TOM verfügt ebenfalls über die vier Spektralkanäle Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot. Aufgrund der großen Flughöhe liegt hier die geometrische Auflösung bei 50 cm. Bedingt durch die lange Befliegungszeit mit einer Unterbrechung, die Flughöhe und den stärkeren Einfluss der Atmosphäre ist die radiometrische Qualität des in Phase II eingesetzten TOM schlechter

als in Phase I. Dies äußert sich in deutlichen Helligkeitssprüngen zwischen den einzelnen Flugstreifen, aber auch in schwächeren Helligkeitssprüngen innerhalb der einzelnen Flugstreifen, was vor allem einen Einfluss auf die Extraktion der Vegetationsflächen hat (Abb. 15). Eine nachträglich durchgeführte radiometrische Korrektur der Eingangsdaten führte nur zu geringfügigen Verbesserungen.

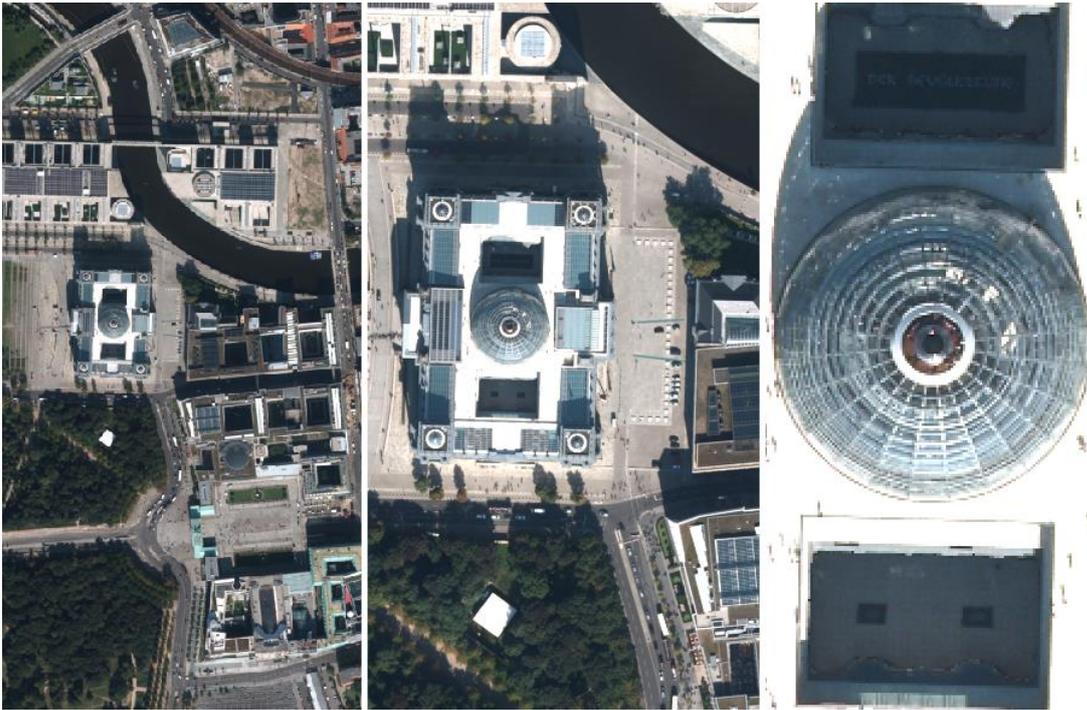


Abb. 13 TOM Daten in Echtfarben-Darstellung in drei unterschiedlichen Detailstufen



Abb. 14 TOM Daten: nahes-Infrarot Kanal (unten); Vegetation weist hohe spektrale Werte auf (helle Bereiche)

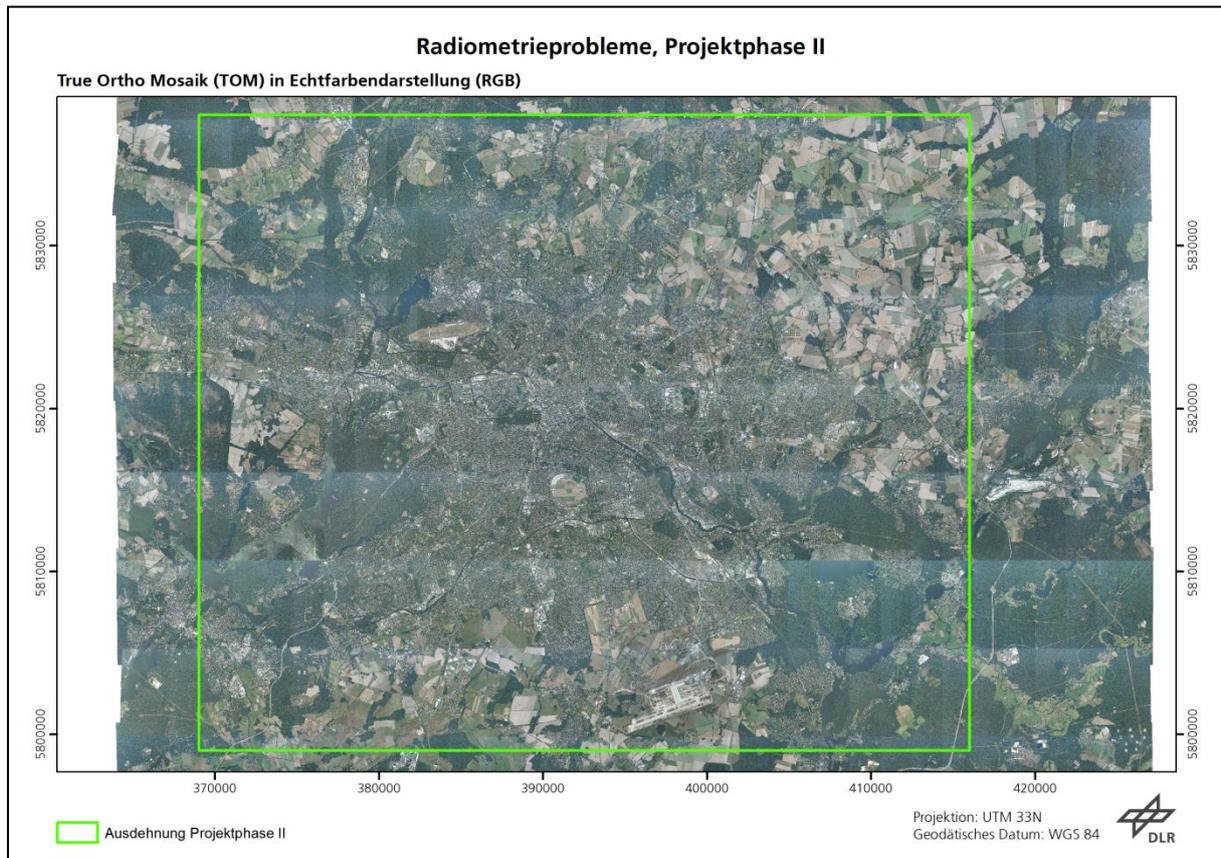


Abb. 15 Helligkeitssprünge zwischen den Flugstreifen sowie innerhalb der Flugstreifen

### Count Maske

Während des SGM Prozesses (vgl. Kapitel 2.1.3) wird zusätzlich die sog. *Count* Maske erstellt. In dieser Datei wird für jedes einzelne Bildelement die Anzahl der korrespondierenden Punkte während des Bildzuordnungsverfahrens gespeichert. Für die nicht zugeordneten Bereiche wird z. B. ein Wert Null gesetzt. Dies ermöglicht die Erkennung der *NoData* Bereiche, die im DOM interpoliert werden. In Abb. 16 ist zu sehen, dass in Schatten bzw. Sichtschattenbereichen, z.B. hinter hohen Häusern (vgl. a) sehr wenige korrespondierende Punkte zu Verfügung stehen – schwarze Bereiche in der *Count* Maske (vgl. c). Es kann somit keine korrekte Höheninformation generiert werden (vgl. b), die Höhe wird aus den Nachbarn interpoliert. Diese Information kann während der Klassifizierung genutzt werden, um falsche Höhenstufen zu korrigieren (vgl. d).

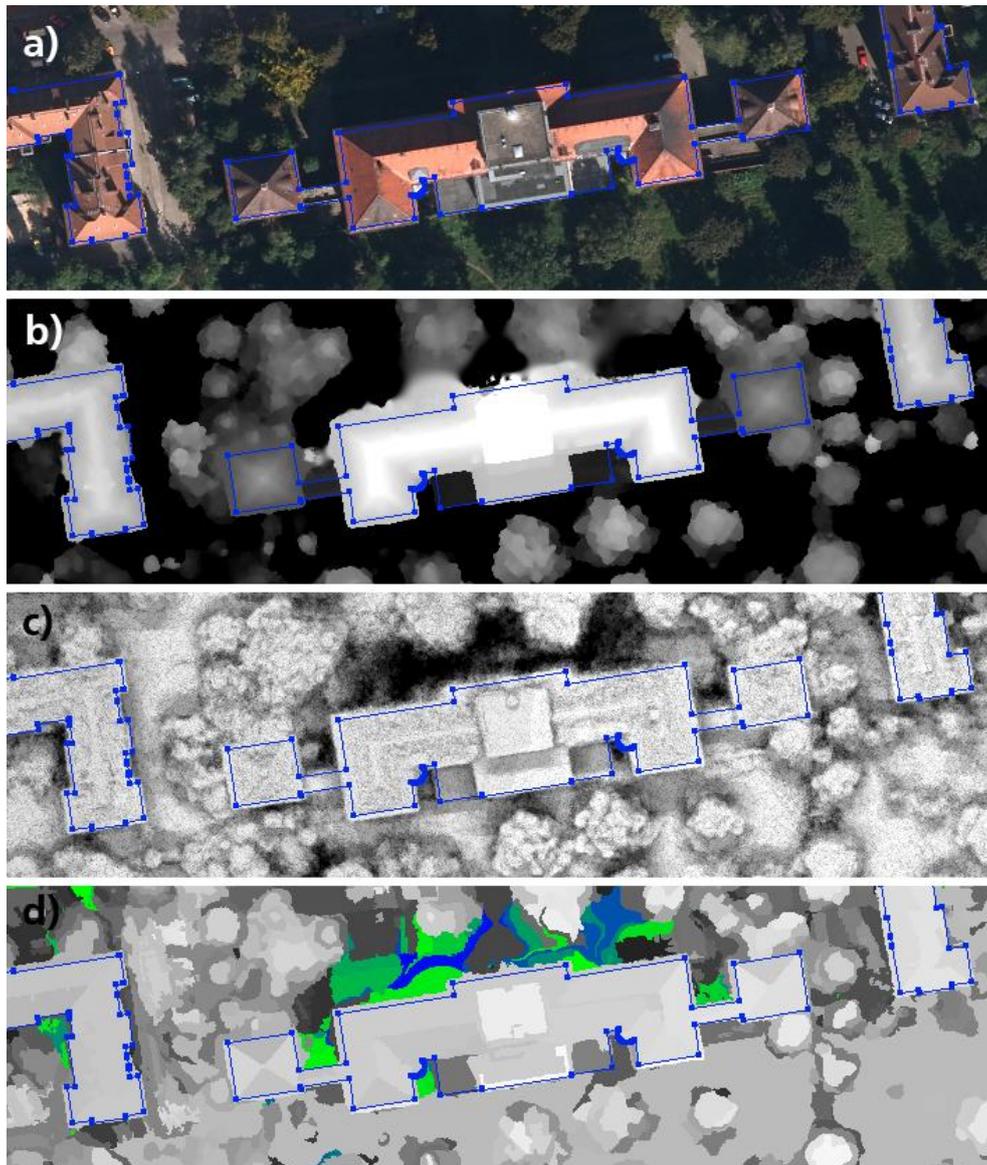


Abb. 16 Schatten / Sichtschatten hinter einem hohen Haus: a) TOM RGB, b) nDOM mit Interpolationsfehlern, c) Count Maske, d) durchschnittlicher Count-Wert pro Segment, niedrige Werte farblich kodiert von 0 (dunkelblau) bis 4 (hellgrün); alle Layer wurden mit der ALK (blaue Linien) überlagert

### Neigungs- und Ausrichtungs-Layer

Die Neigungs- und Ausrichtungs-Layer wurden in ESRI ArcGIS auf der Grundlage des vorliegenden nDOM berechnet.

Die Ausrichtung (engl. *Aspect*) bestimmt die Neigungsrichtung eines Pixels im Vergleich zu seinen benachbarten Pixeln in einer Pixelmatrix. Die Werte jedes Pixels im Ausgabe-Raster geben die Kompassrichtung an, in welche die Oberfläche an dieser Position ausgerichtet ist. Die Ausrichtung wird im Uhrzeigersinn in Grad von 0 (genau Norden) bis 360 (wieder genau Norden) gemessen. Ebene Flächen haben keine Neigungsrichtung. Ihnen wird der Wert -1 zugewiesen (vgl. ESRI RESOURCES, 2013a).

Die Neigung (engl. *Slope*) drückt die Änderung der Höhe eines Pixels im Vergleich zu seinen Nachbarpixeln in einer Pixelmatrix aus. Sie beschreibt also den Winkel zwischen der Höhe und einer horizontalen Ebene, der in Grad ausgedrückt wird (ESRI RESOURCES, 2013b).

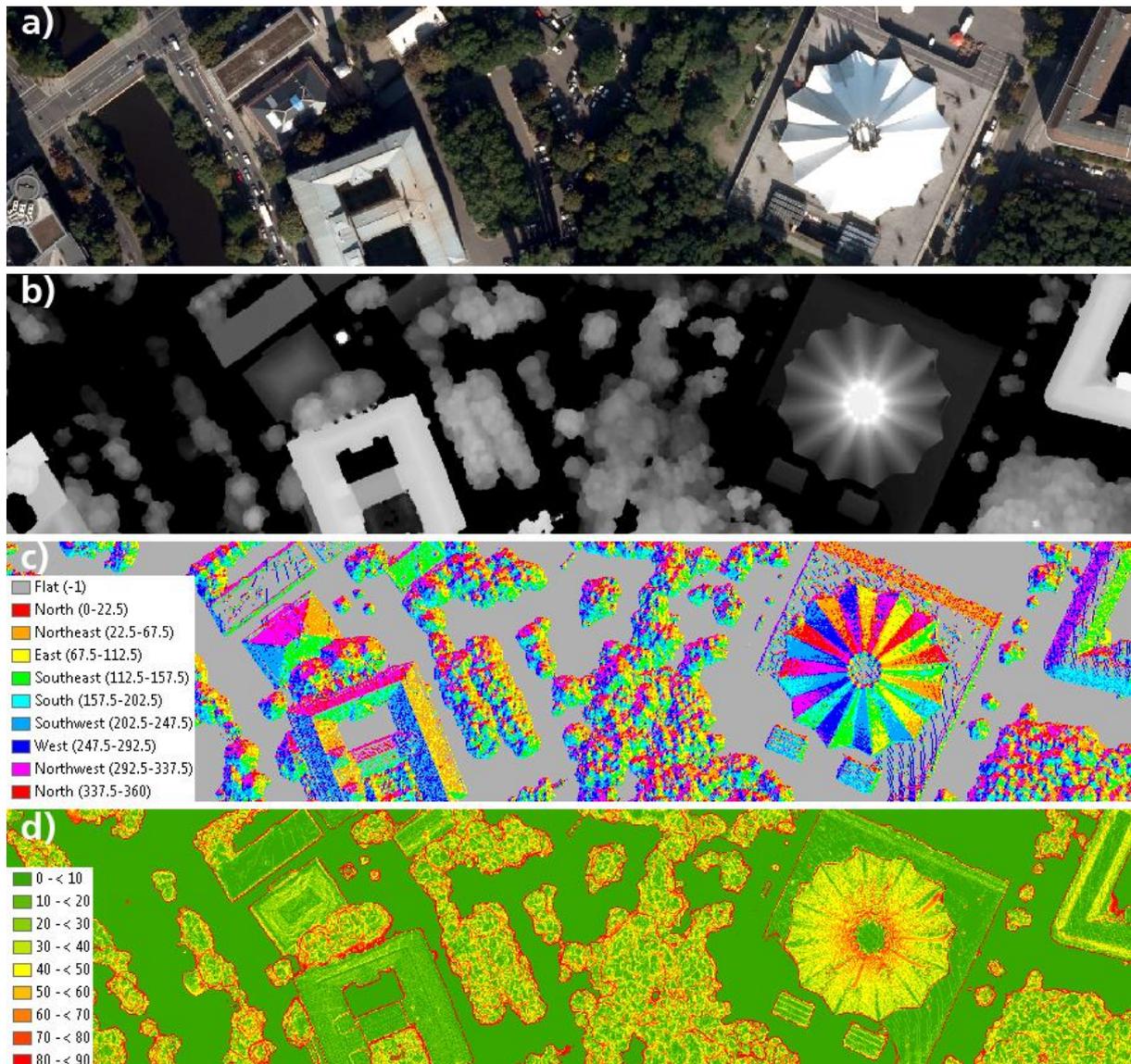


Abb. 17 Ausrichtungs- (c)- und Neigungs-Layer (d)

Beide Layer wurden zusätzlich mit einem Median-Filter geglättet um eventuelle Ausreißer zu beseitigen. Der Ausrichtungs-Layer wird zur Unterteilung der Dächer in geometrische und Höhenstrukturen eingesetzt, während der Neigungs-Layer unterstützend bei der Verfeinerung der Gebäudeklassifizierung, insbesondere bei der Identifizierung von begrünten Dächern zum Einsatz kommt.

## 2.2 Vektorbasisdaten

Die Vektordaten wurden von der SenStadtUm flächendeckend für ganz Berlin zur Verfügung gestellt und umfassen folgende Layer:

- Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK), (Stand 06.2012):
  - o Gebäude-Layer (bestehende, geplante oder im Bau befindliche Gebäude)
  - o Straßenbaum-Layer Erfassungsstand 10.2009 (Straßenbäume werden nicht mehr zentral in der ALK als Datenbestand geführt)
  - o Topographie-Layer (mit Basis- und Ergänzungstopographie)
- Informationssystem Stadt und Umwelt 1:5000 (ISU5), (Stand 31.12.2010):
  - o Landes- und Bezirks-Layer
  - o ProgRaum-Layer
  - o Block-Layer (mit Haupt- und Teilblöcken)

Die Vektordaten wurden im Landeskoordinatensystem Soldner-ALK Berlin EPSG 3068 geliefert und in das UTM ETRS89 Koordinatensystem transformiert.

Der gesamte Datenbestand der ALK-Berlin enthält laut SENSTADTUM (2013c) insgesamt ca. 2,2 Millionen Objekte. In dem Projektgebiet Berliner Innenstadt innerhalb der Gebäude- und Topographieebene befinden sich rund 270.000 Gebäude- und 263.000 Straßenbaumobjekte. Die ALK wurde mit Sachdaten geliefert, sodass die Objekte wichtige Attribute, wie einen eindeutigen Objektschlüssel (OS), Gebäude- oder Straßenbaumschlüssel sowie Informationen zur Gebäudenutzung, enthalten. Des Weiteren tragen die Gebäude Informationen über die Anzahl der vorhandenen Geschosse. Der ALK-Layer wird zur Klassifizierung von Gebäuden eingesetzt (vgl. Kapitel 4.5)

Der Straßenbaum-Layer enthält darüber hinaus Attribute zu Baumnummer, -Art, und -Lage (x/y Koordinaten) sowie Angaben zu Straßenummer und Straßename, auf welcher der Baum sich befindet. Im Straßenbaum-Layer ist nur der Baumbestand im öffentlichen Straßenland, nicht aber auf Privatgrundstücken (Gärten, Hinterhöfe) sowie in öffentlichen Parkanlagen erfasst. Dieser wird lediglich zur Verschneidung mit den Sachdaten, aber nicht zur Klassifizierung der Baumobjekte benutzt.

Die vorhandene ISU5-Blockkarte bildet die Bezugsgeometrie für die Erfassung der zu bestimmenden Objekte und deren Höhen. Im Projektgebiet Berliner Innenstadt befinden sich rund 14.000 Haupt- und Teilblockflächen. Die extrahierten Objekte werden durch ihren eindeutigen Objektschlüssel mit den Block-Schlüsseln verschnitten, sodass jedes einzelne Objekt nicht nur seine genaue Lage, sondern auch seine Zugehörigkeit zum Objekttyp sowie Block- und Bezirksnummer kennt. Die ISU5 wird darüber hinaus zur Unterteilung des gesamten Datensatzes in kleinere, im Hinblick auf die Rechenzeit, gut verarbeitbare Kacheln eingesetzt. Wie beschrieben dient sie bei der

Geodatenbankerstellung als Bezugsgeometrie für die erfassten Gebäude- und Vegetationsobjekte. Abb. 18 zeigt die vorhandenen ISU5- und ALK-Daten in Überlagerung mit dem TOM.



Abb. 18 Ausschnitt aus den ALK- und ISU5-Daten: ISU5 Blockkarte (gelbe Linien), ALK Gebäude (rote Polygone) und ALK Straßenbäume (grüne Punkte)

### 3 Methodik

Mit zunehmender Verfügbarkeit von sehr hoch auflösenden Daten (engl. *Very High Spatial Resolution Data* - VHSR) auf dem GeoDatenmarkt, werden auch verstärkt geeignete Methoden zur automatisierten Gewinnung von Informationen aus diesen Daten gefordert. Insbesondere in dicht bebauten städtischen Gebieten, die sich durch hohe Heterogenität der semantischen Klassen und Strukturen auszeichnen, gestaltet sich diese Aufgabe als sehr komplex. Einerseits erlauben erst die sehr hochauflösenden digitalen Luftbilddaten, urbane Räume zufriedenstellend zu analysieren und die relevanten Informationen zu extrahieren, andererseits werden durch ebendiese hohe Auflösung und die einhergehende hohe spektrale und räumliche Heterogenität städtischer Bereiche Probleme verursacht. Wegen der großen Datenmengen müssen geeignete Methoden zur großflächigen Bearbeitung der Daten angewendet werden (Kachelung und Zusammenfügen der Ergebnisse). Zudem müssen wegen der variierenden Objekteigenschaften robuste Klassendefinitionen sowie anpassbare Extraktionsregelsätze entwickelt werden.

#### 3.1 Segmentierung und objektbasierte Klassifizierung

Da die zu klassifizierenden Pixel viel kleiner sind als die Objekte, die sie repräsentieren, erweisen sich die pixelbasierten Klassifizierungsverfahren als ungeeignet. Es gibt viele Untersuchungen und Hinweise in der Literatur, die belegen, dass die objektbasierten Klassifizierungsverfahren für die urbanen Anwendungen auf der Grundlage von VHSR Daten geeigneter sind (BLASCHKE, 2000), (BLASCHKE & STROBL, 2001), (MYINT ET AL., 2011) und (SEBARI & HE, 2013). Bei der objektbasierten Analyse werden einzelne Objekte in deren Kontext analysiert. Es werden nicht nur die spektralen Eigenschaften, sondern auch die Objektform, Textur sowie vor allem die Nachbarschaftsbeziehungen – alles Informationen, die nicht aus einzelnen Pixeln abzuleiten sind – berücksichtigt. Auf diese Weise versucht das objektbasierte Verfahren die menschliche Wahrnehmung zu modellieren, wobei nicht die einzelnen Bildelemente, sondern Segmente, die aus mehreren Pixeln bestehen, eine Grundlage für die Klassifizierung bilden (BLASCHKE, 2000).

Bei den objektbasierten Verfahren lassen sich zwei unterschiedliche Ansätze der automatisierten Bildinterpretation oder Objektextraktion unterscheiden: wissensbasiert / modellgetrieben (*top-down*) und datengetrieben (*bottom-up*) (KINCHLA & WOLFE, 1979). Die wissensbasierten Ansätze gehen von einem Modell aus, das basierend auf Expertenwissen (meistens eine Datenbank) definiert wird. Segmentiert werden nur die zum Modell passenden Objekte. Das in diesem Projekt überwiegend verwendete datengetriebene Verfahren segmentiert anhand von bestimmten statistischen Verfahren und definierten Parameter die gesamte Bildszene. Die resultierenden Segmente sind Pixelcluster, die noch keine semantische Bedeutung haben. Erst eine Klassifizierung weist die Objekte den Klassen zu, deren Klassenbeschreibung sie am besten erfüllen.

Bezogen auf die Segmentierung, gibt es laut SCHIEWE (2002) ebenfalls eine ähnliche Unterteilung in *bottom-up* und *top-down* Verfahren. Die *bottom-up* Segmentierung verfolgt das *region growing* Prinzip, bei dem die kleinsten Initialzellen-Segmente zu immer größeren zusammenwachsen. Zu diesen Verfahren gehört das am meisten für die Fernerkundungsdaten verwendete *Multiresolution Segmentation*. Die *top-down* Segmentierung hingegen verfolgt das *region splitting* Prinzip, bei dem von der gesamten Szene ausgehend in immer kleinere Segmente unterteilt wird.

Bei diesem Projekt wird das datengetriebene Objektextraktionsprinzip verfolgt und bei der Segmentierung der *top-down* Ansatz umgesetzt, indem von groben Objekten ausgehend (hier ALK) in kleinere unterteilt wird (vgl. Kapitel 4.4 - Segmentierungsprozesse).

### 3.2 Verwendete Software

Im Rahmen des Projektes wird ein Softwarepaket für die objektbasierte Bildanalyse (engl. *Object-Based Image Analysis*, OBIA) namens Trimble eCognition Suite in der Version 8.64.0 verwendet (vgl. TRIMBLE, 2013). Für die Optimierung der exportierten Attributtabelle sowie für die Erstellung der geforderten Geodatenbank wird die Geoinformationssystem (GIS) Software ArcGIS der Firma ESRI in der Version 10.0. verwendet (vgl. ESRI, 2013).

Das Softwarepaket Trimble eCognition Suite besteht aus drei zusammenhängenden Programmen: eCognition Developer, eCognition Server und eCognition Architect. Die eigentliche Entwicklung sowie Optimierung der Segmentierungs- und Klassifizierungsregelbasis findet in eCognition Developer statt. eCognition Server stellt eine Prozessierungsumgebung dar, in der die entwickelte Regelbasis auf den gesamten Datensatz in einer Stapelbearbeitung angewendet wird. Die Vorteile einer Serverlösung kommen bei den großen Datenmengen deutlich zum Tragen. Die Regelbasis wird auf einem kleinen repräsentativen Bildbereich entwickelt und erst anschließend in der Serversoftware auf alle vorhandenen Kacheln oder Ausschnitte angewendet. Dies erfolgt in einem Batch-Prozess, der nur einmal gestartet werden muss. Eine Verteilung der Batch-Prozesse auf mehrere Rechner ist ebenfalls möglich, verlangt jedoch zusätzliche Lizenzen. In eCognition Architect kann lediglich eine Benutzeroberfläche erstellt werden. Der Endnutzer kann in einem vereinfachten Viewer die in Developer erstellte Regelbasis anhand von eigenen Daten kalibrieren und anwenden. Diese Lösung wird im Rahmen des Projektes nicht verwendet.

Die objektbasierte Klassifizierung in eCognition ist ein mehrstufiges Verfahren. Die einzelnen Arbeitsschritte werden hierarchisch in einem sog. *Process Tree* (Abb. 19) gespeichert und können auf andere Gebiete übertragen werden.

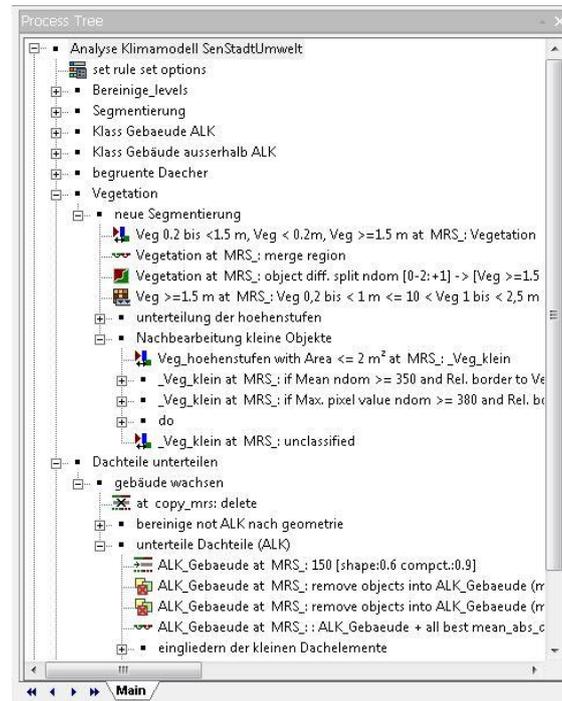


Abb. 19 Verwendung der eCognition Developer Software: entwickelte Regelbasis gespeichert in einem Process Tree – ein Ausschnitt

Eine weiterführende Verwendung des entwickelten *Process Tree* in anderen Projekten ist gewährleistet, da die entwickelte Regelbasis editiert werden kann und die Parameter der einzelnen Arbeitsschritte angepasst werden können. Dies ist im Hinblick auf die abweichende Datengrundlage in der zweiten Projektphase ausschlaggebend und sehr nützlich. Nachfolgend werden die Hauptarbeitsschritte in Trimble eCognition Developer zusammengefasst:

- Automatisierter Import der Daten in das Projekt bzw. der Kacheln in einzelne Projekte bei großen Datenmengen (Wahl der verwendeten Layer)
- Initiierende Segmentierung (hierfür stehen mehrere Segmentierungsverfahren zur Verfügung). Ggf. kann auf mehreren Segmentierungsebenen mit unterschiedlichen Skalen segmentiert werden
- Definition der Klassen und Klassenbeschreibungen (möglich sind sog. Zugehörigkeits- od. *Fuzzy*-Funktionen sowie *Nearest-Neighbor*-Klassifikator basierend auf Trainingsgebieten)
- Klassifizierung des gesamten Datensatzes / der Kacheln oder der definierten Ausschnitte und Masken
- Genauigkeitsanalyse, Abschätzung des bisherigen Ergebnisses und eventuelle Optimierung der Regelbasis
- Export der Ergebnisse als thematischen Rasterlayer oder als Vektordatei samt der relevanten Attribute, wie z. B. Statistiken der verwendeten Layer, *Mean nDOM* – durchschnittliche Objekthöhe

Die Arbeitsschritte der Segmentierung und Klassifizierung werden meistens iterativ ausgeführt. Oft ist es sinnvoll weitere objekt-optimierende Segmentierungsschritte nach der Klassifizierung durchzuführen oder im Laufe der Analyse zusätzliche Klassen anzulegen, die als Masken für weitere Schritte verwendet werden. Somit ist der oben dargestellte Ablauf als schematisch zu betrachten.

Die Klassifizierung in eCognition kann unter Verwendung von Klassenbeschreibungen mit Zugehörigkeitsfunktionen erfolgen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Modellierung der Wissensbasis mithilfe der *Fuzzy-Logic*, die eine Erweiterung der binären Logik darstellt und deren harte Werte 0 und 1 (falsch oder richtig) aufweicht. Die *Fuzzy-Logic* lässt eine Verwendung von Zwischenwerten zu und versucht dadurch das menschliche unpräzise Definieren von Objekten mathematisch zu formulieren (ZADEH, 1965: 339ff). Dies macht sich eCognition zunutze, indem die Klassenbeschreibungen mithilfe von Zugehörigkeitsfunktionen (engl. *Fuzzy-Functions*) definiert werden können. Ein Objekt kann mehreren Klassen mit unterschiedlichen Zugehörigkeitsgraden (Wahrscheinlichkeiten) gehören. Es wird letztendlich der Klasse mit dem höchsten Wahrscheinlichkeitswert zugewiesen. Die Verwendung von harten Schwellenwerten für bestimmte Eigenschaften in den Klassenbeschreibungen sowie eine Kombination von beiden ist ebenfalls möglich.

Ein großer Vorteil der Trimble eCognition Software besteht in der Möglichkeit einer simultanen Verwendung von unterschiedlichen Datentypen in einem Projekt. Es können gleichzeitig Raster- und Vektordaten sowohl im Segmentierungs- als auch im Klassifizierungsschritt verwendet werden. Die Rasterdaten können verschiedene geometrische und radiometrische Auflösungen sowie unterschiedliche Ausdehnungen besitzen. Des Weiteren können sie für den Segmentierungsschritt unterschiedlich gewichtet oder gar ausgeschaltet werden. Das Verwenden von unterschiedlichen Daten ist für das Projekt entscheidend.

Die begleitende Generierung von Objektattributen, wie z. B. Höhenstatistiken ist eine weitere Stärke der Software und für die Geoanwendungen von entscheidender Bedeutung. Mit den extrahierten Objekten kann gleichzeitig eine Vielzahl an unterschiedlichen Sachdaten mit exportiert werden (Abb. 20). Dazu gehören Statistiken der im Projekt verwendeten Layer (*Layer Values*) und die Attribute der verwendeten thematischen Layer (*Thematic Attributes*), Formattribute (*Geometry*) und Texturmaße (*Texture*), Statistiken der Nachbarobjekte (*Class-Related Features*)

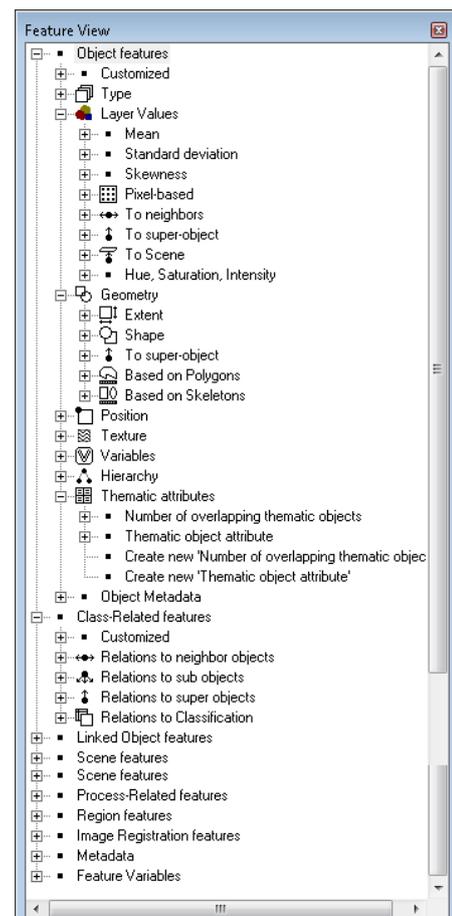


Abb. 20 Verfügbare Eigenschaften in eCognition für die Klassenbeschreibungen und als Attribute beim Export

sowie die Lageattribute (*Position*). All diese Merkmale können für die Erstellung der Klassenbeschreibungen verwendet werden. gibt einen Überblick über die verfügbaren Eigenschaften (engl. *Features*).

Für die Erstellung der Geodatenbank mit den geforderten Attributen wird für jedes extrahierte Objekt der sog. *ModelBuilder* in ESRI ArcGIS verwendet. Dieses Werkzeug dient dem Zusammenfügen von Geoverarbeitungsschritten zu Prozessketten, die anschließend automatisiert auf mehreren Datensätzen ausgeführt werden können.

Im Kapitel 4 wird der gesamte Ablaufplan sowie die einzelnen Arbeitsschritte, von Segmentierung über Klassifizierung bis hin zum Export der Ergebnisse, detailliert erläutert.

## 4 Umsetzung der Objektextraktion

### 4.1 Definition der Klassen

Auf der Grundlage der vorliegenden digitalen Luftbilder sowie des nDOM und unter Zuhilfenahme der ALK-Gebäudedaten werden nach Absprache mit dem Auftraggeber die zu extrahierenden Objektklassen definiert. Vorgegeben wurden zwei Hauptklassen – *Gebäude* und *Vegetation*. Zusätzlich werden weitere Unterklassen in Form von Höhenstufen für die Vegetation und semantischen Klassen für Gebäude (*Garagen, Schuppen, Gartenhäuser* und *geplante oder im Bau befindliche Gebäude*) definiert.

Die ALK wird fortlaufend aktuell gehalten – es findet wöchentlich eine Aktualisierung statt. Die Luftbilder wurden im Frühherbst 2010 aufgenommen, für die ALK lag die zum Startzeitpunkt des Projektes aktuellste Version mit Datenstand 06.2012 vor. Da der ALK-Erfassungsstand einen zeitlichen Nachlauf gegenüber der Realität besitzt und darüber hinaus nicht alle gebauten Objekte ALK-relevant sind, weist der ALK-Gebäude-Layer im Vergleich zu den verfügbaren Luftbildern Unterschiede im Gebäudebestand auf. Hierbei handelt es sich zum einen um Gebäude, die planmäßig in der ALK nicht verzeichnet werden, wie z. B. überdachte Parkplätze, temporäre Bauten oder nicht untermauerte Überdachungen. An manchen Stellen betrifft dies zusätzlich neu entstandene Gebäude, die bis zum Stand 06.2012 nicht eingemessen wurden. Da es Ziel des Projektes ist, einen möglichst vollständigen Erfassungsgrad sämtlicher Gebäude unabhängig von Ihrem ALK-Status zu erreichen, ist es wichtig, diese zu detektieren und zu klassifizieren. Hierfür werden drei Unterklassen definiert: *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)*, *Überbauter Innenhof* sowie *Gartenhaus od. Schuppen (kein Bestandteil der ALK)*.

Des Weiteren werden andere erhöhte Objekte, wie *Brückenbauwerke* und *erhöhte Bahngelände unterschiedlicher Ausprägung* klassifiziert. Zusätzlich werden auf Wunsch des Auftraggebers *begrünte Dächer* extrahiert.

Insgesamt werden neun Vegetationshöhenstufen und über zehn unterschiedliche Klassen für Gebäude definiert.

### 4.2 Unterteilung des Datensatzes

Der vorhandene Datensatz weist für Projektphase I eine Gesamtfläche von rund 445 km<sup>2</sup> auf. Dies bedeutet selbst für die spektralen Daten (RGB, drei Kanäle) in einer geometrischen Auflösung von 30 cm in x/y eine Datenmenge von ca. 55 GB. Zieht man den IR Kanal sowie das nDOM und alle Zusatzlayer mit in Betracht entsteht eine Datenmenge >100 GB, die eine sehr hohe Rechenintensität bedingt. Diese Datenmenge und die damit einhergehenden langen Rechenzeiten erzwingen eine Unterteilung der Daten in kleinere Flächen bzw. Berechnungsgebiete (Kacheln). Die Erfahrung aus vorherigen Studien zeigt, dass bei der Erfassung von urbanen Objekten eine

rechteckige Kachelung eher ungünstig ist, da Objekte durch die Kachelgrenzen zerschnitten werden. Ein nachträgliches Zusammenfügen von anthropogenen Objekten, die harte Grenzen aufweisen, erweist sich an dieser Stelle als schwierig. Aus diesem Grund wurde ein Konzept für die Unterteilung der Szene entwickelt, das die im ISU5-Grundlayout vorhandenen Bezirks- und Bezirksteilflächen (,ProgRaum<sup>2</sup> Flächen<sup>2</sup>) berücksichtigt (Abb. 21). Die ,ProgRaum<sup>2</sup> Flächen dienen als Grenzen für die in eCognition zu bearbeitenden Kacheln. Jede ,ProgRaum<sup>2</sup> Fläche besitzt einen eindeutigen Schlüssel, der die Bezirksnummer enthält. Nach der abgeschlossenen Prozessierung werden die einzelnen Kacheln zu den zwölf Bezirkseinheiten Berlins zusammengefügt. Die Erstellung der Geodatenbank erfolgt ebenfalls bezirksweise.

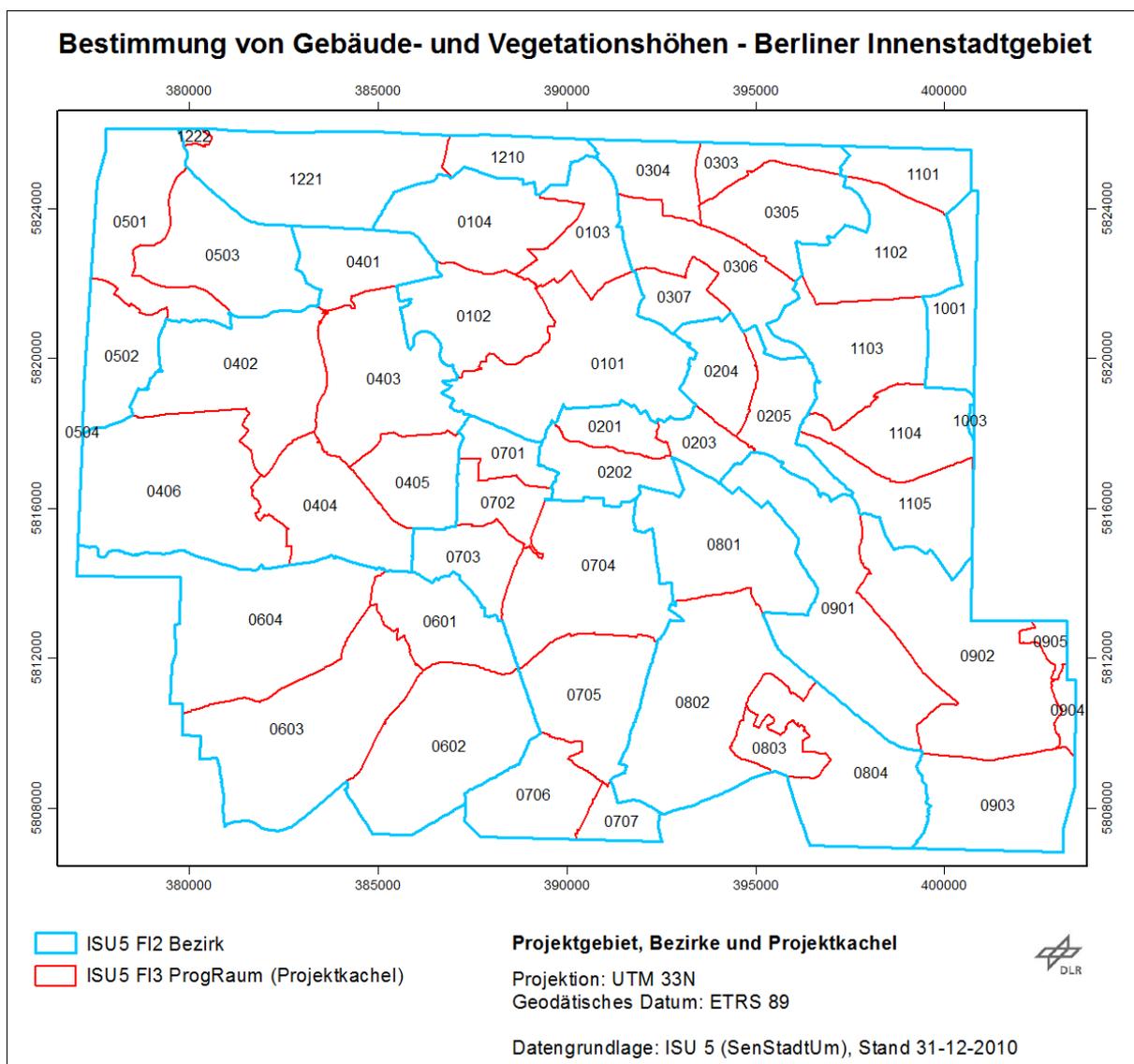


Abb. 21 Unterteilung des Projektgebietes Berliner Innenstadt in Bezirke (Grundlage für die GDB) und in die Projektkacheln (Grundlage für die Objektextraktion in eCognition)

<sup>2</sup> ,ProgRaum<sup>2</sup> steht für Prognoseräume, diese stellen mit 60 Gebieten die höchstaggregierte Ebene der sogenannten Lebensweltlich Orientierten Räume (LOR) dar, einer 2006 geschaffenen Planungsebene in Berlin (vgl. SENSTADTUM, 2013d)

### 4.3 Ablaufplan – Erfassung der Gebäude- und Vegetationsobjekte

In Abb. 22 ist der gesamte Objektextraktions-Ablaufplan des Projektes schematisch dargestellt. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die verwendeten Algorithmen sowie die Klasseneigenschaften beschrieben und mit Bildbeispielen belegt.

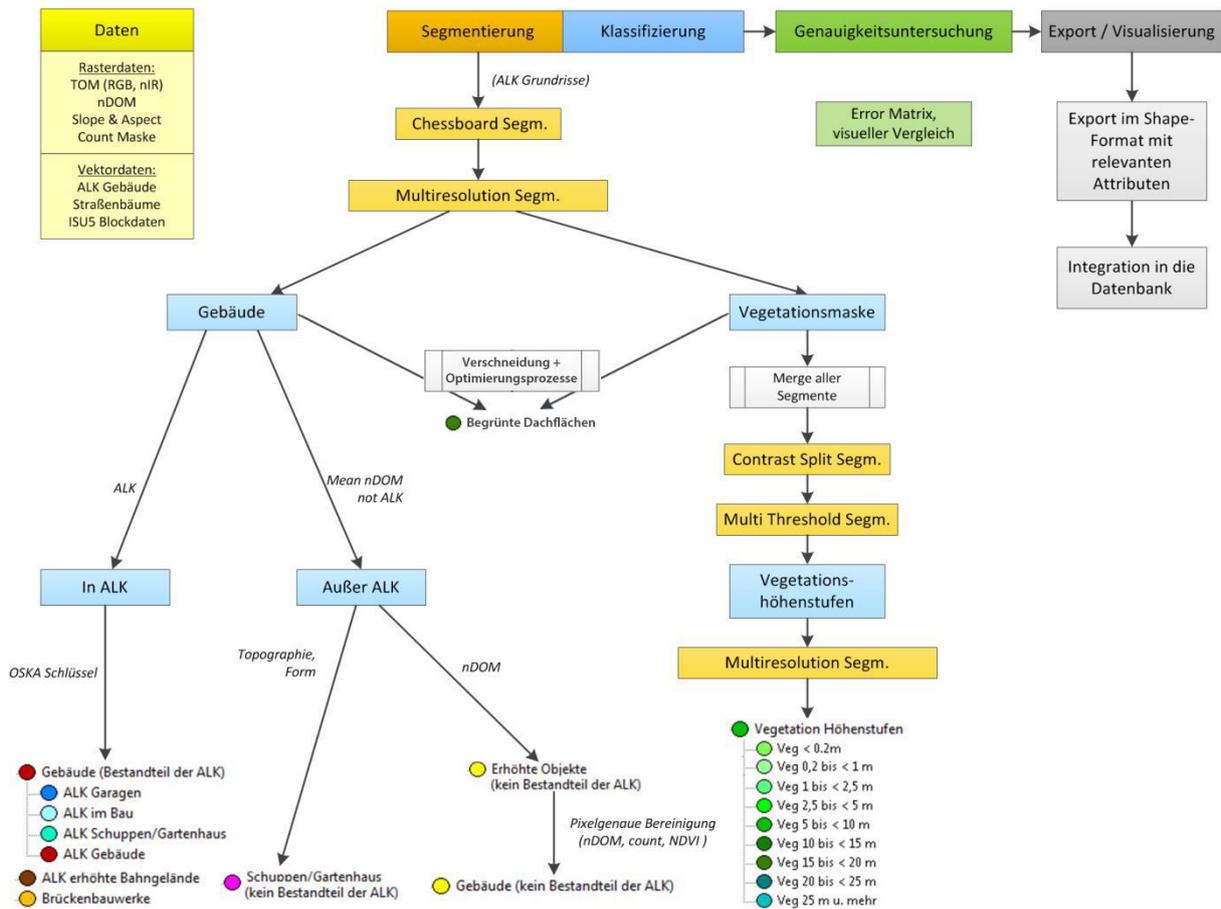


Abb. 22 Ablaufplan: Erfassung von Gebäude- und Vegetationsobjekten im Berliner Innenstadtgebiet (Phase I)

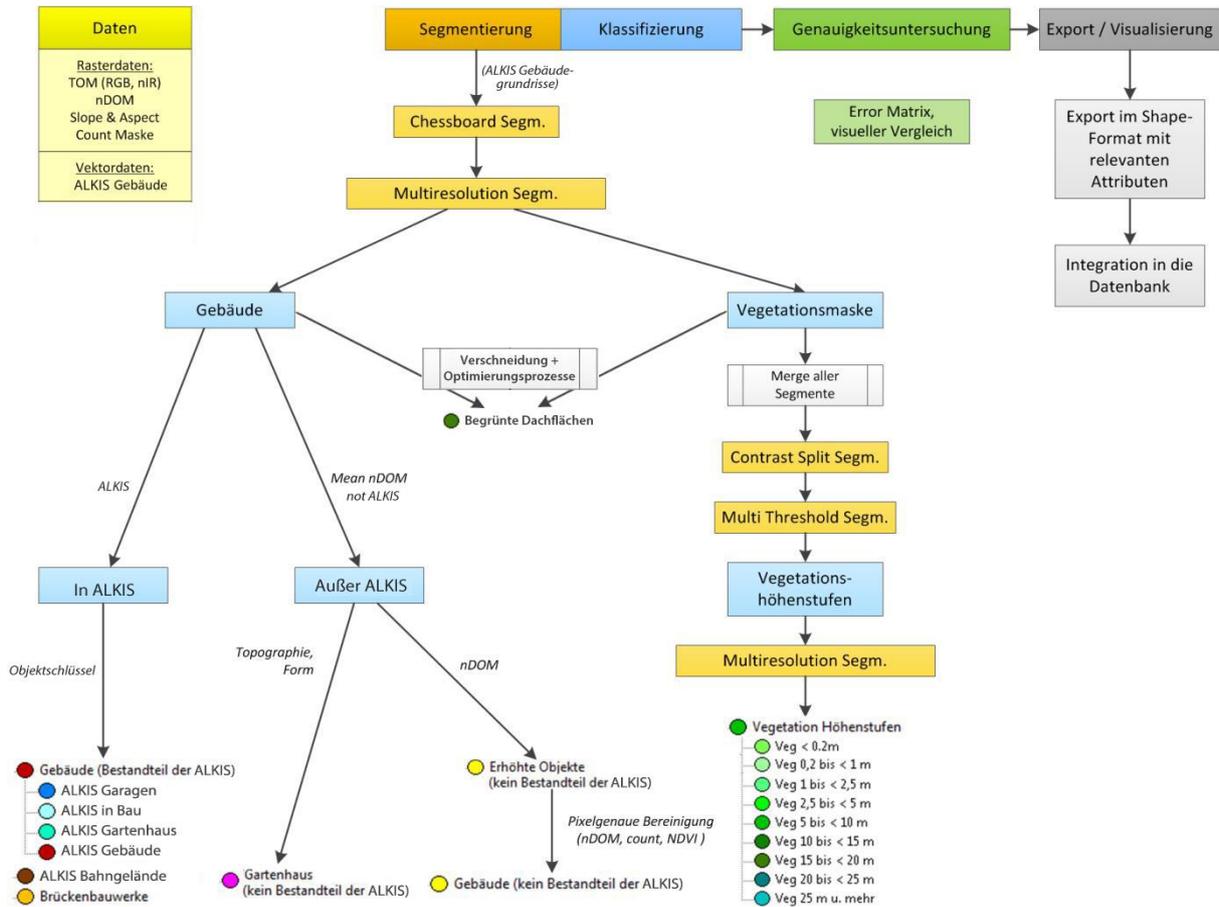


Abb. 23 Ablaufplan: Erfassung von Gebäude- und Vegetationsobjekten im Berliner Innenstadtgebiet (Phase II)

#### 4.4 Segmentierungsprozesse

Grundlage für die Objektklassifizierung bildet eine initiale Segmentierung der gesamten Bildszene oder des im Projekt definierten Ausschnittes, wie z. B. einer Kachel. Hier werden unterschiedliche Pixel, die bestimmte Homogenitätskriterien erfüllen, in bedeutungsvolle ‚homogene‘ Segmente (auch als Objekte bezeichnet) zusammengefasst. Die Segmentierung kann auch als Generalisierung des zugrundeliegenden Datensatzes verstanden werden, da die heterogenen Pixelinformationen zu homogenen Objekten verschmelzen. Die Qualität der Segmentierung ist für die nachfolgende Klassifizierung ausschlaggebend, da für die Erstellung der Klassenbeschreibungen nicht nur spektrale sondern auch Formeigenschaften der resultierenden Segmente genutzt werden können. Es gilt also: je genauer die resultierenden Segmente deren reale Objektform widerspiegeln, umso einfacher und genauer die anschließende Klassifizierung (BAATZ & SCHÄPE, 2000).

In Trimble eCognition gibt es eine Reihe von verschiedenen Segmentierungsalgorithmen, die je nach der Datengrundlage sowie den zu klassifizierenden Objekten unterschiedlich eingesetzt werden können. Die Segmentierung kann in mehreren Schritten mit unterschiedlichen Skalen (Größen der resultierenden Objekte) erfolgen. Dies ist aber nicht in allen Fällen notwendig.

Unabhängig von der verwendeten Segmentierungsmethode gilt aber, dass die vertikale Objekthierarchie (bei mehreren Segmentierungsebenen) nicht verletzt werden darf. Diese erzwingt, dass sich die kleinen Objekte auf den unteren Ebenen (Level 1) und die größeren oben (Level 3) befinden (Abb. 24). Eine solche Hierarchie gewährleistet, dass nicht nur die Eigenschaften der Nachbarobjekte von derselben Ebene, sondern auch die von allen vertikalen Ebenen abgefragt werden können.

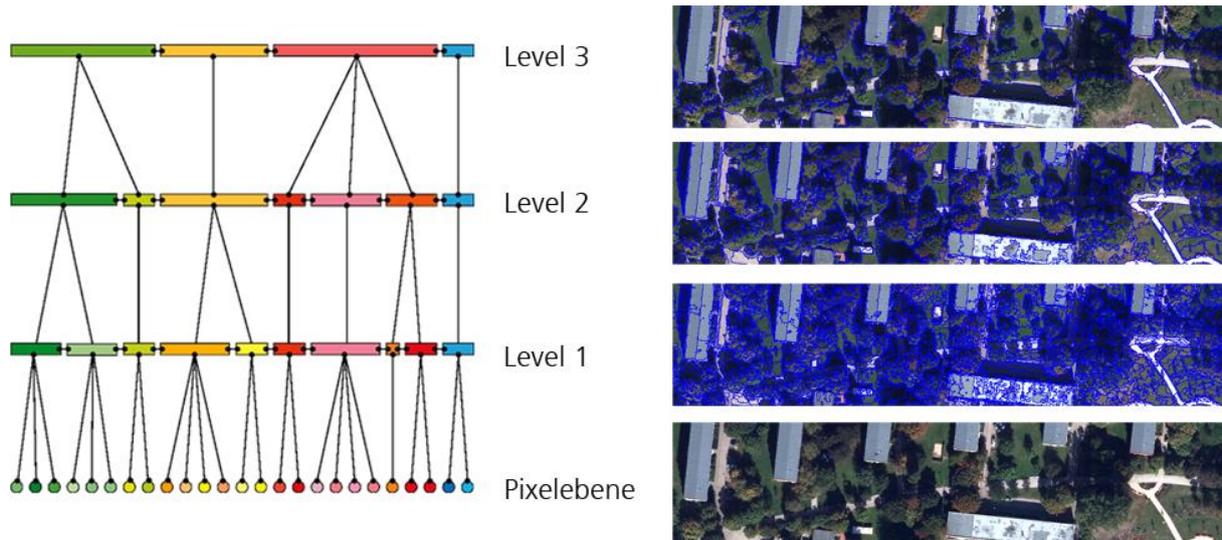


Abb. 24 Objekthierarchie auf mehreren Skalenebenen in abstrakter Darstellung (links) und mit Bildbeispielen (rechts) (Quelle: eigene Darstellung verändert nach Baatz et al., 2004)

Bei jeder Segmentierung können thematische Layer (z. B. ALK-Polygone) berücksichtigt werden. In solch einem Fall werden die Polygongrenzen nachgezeichnet und bilden die Objektgrenzen.

Die vertikale Objekthierarchie wird benutzt um die ALK Gebäude-Polygone auf der obersten Ebene zu segmentieren. Die entstehenden Objektgrenzen werden in den nachfolgenden feineren Segmentierungsschritten nicht verletzt, d.h. die Objekte auf den unteren Ebenen (Gebäudeteile) sind Bestandteile der oberen Objekte (ALK Gebäude). Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass die Gebäudeteile auf den unteren Ebenen die thematischen Objekteigenschaften der oberen Objekte abfragen können. Demzufolge ‚weiß‘ jeder Gebäudeteil welchen ALK-Objektschlüssel er besitzt.

#### 4.4.1 Chessboard Segmentation

Für die ‚Nach‘-Segmentierung der ALK wird die *Chessboard Segmentation* verwendet. Diese Methode unterteilt die Bildszene lediglich in gleichgroße quadratische Segmente (Abb. 25) und ist durch ihre Einfachheit der schnellste Segmentierungsalgorithmus in eCognition.



Abb. 25 Chessboard Segmentation mit einer Schachbrettgröße von 30 x 30 Pixeln

Da der ALK Layer bei diesem Segmentierungsschritt eingeschaltet wird, werden ebenfalls dessen Polygongrenzen nachgezeichnet. Wird die Schachbrettgröße größer als die Szenenausdehnung gewählt so werden nur die ALK Objektgrenzen segmentiert. Als Ergebnis liegen Objekte vor, welche vollständig die ALK repräsentieren (Abb. 26). Dieser Segmentierungslevel wird nachfolgend ‚ALK-Level‘ genannt.



Abb. 26 Ergebnis der Chessboard Segmentation unter Verwendung des ALK Layers (gelbe Linien)

#### 4.4.2 Multiresolution Segmentation

Basierend auf dem *ALK-Level* erfolgt eine feinere Segmentierung. Diese wird für die Erstellung einer Vegetationsmaske benutzt um die Vegetation von den anthropogenen Objekten abgrenzen zu können. Verwendet wird die *Multiresolution Segmentation*, kurz *MRS*. Diese Segmentierungsmethode wurde von BAATZ & SCHÄPE (2000) entwickelt und gehört zu den sog. *Region-Merging* Verfahren. Hier werden die benachbarten Pixel, die bestimmte Homogenitätskriterien erfüllen, zu immer größeren Segmenten zusammengefasst. Dies erfolgt solange ein bestimmter Homogenitätsschwellenwert nicht überschritten wird. In diesem Fall bestimmt der darüber liegende *ALK-Level* die maximale Größe der resultierenden Vegetations-Objekte. Verteilt

über die ganze Szene wachsen alle Segmente simultan, was gewährleistet, dass sie ähnliche Größen haben und dadurch vergleichbar sind. Der Benutzer kann die Größe und Form der Objekte beeinflussen, indem er die eingehenden Layer unterschiedlich gewichtet sowie einen Wert für die maximal zulässige Heterogenität innerhalb der Segmente, den sog. *Scale Parameter* und bestimmte Homogenitätskriterien festlegt (Abb. 27). Für die Homogenitätskriterien (*Color & Shape* und *Smoothness & Compactness*) findet ein Ausgleich der Werte zu 1 statt. Wenn einer auf 0.2 eingestellt wird, beträgt der andere 0.8.

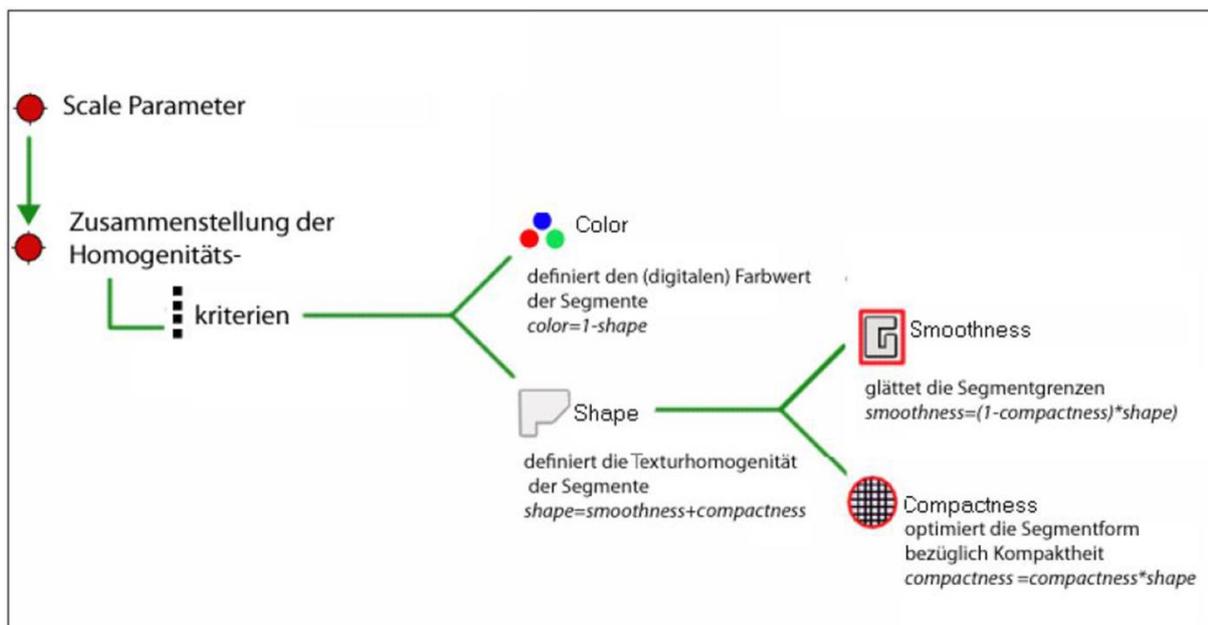


Abb. 27 Zusammenstellung der Segmentierungsparameter für die Multiresolution Segmentation in eCognition  
(Quelle: verändert nach Definiens, 2007: 22)

Das Kriterium für *Color* berücksichtigt die spektralen Werte aller eingehenden Layer. Die Festsetzung dieses Kriteriums beeinflusst dabei die Struktur der Objektgrenzen, da alle Farbeinheiten einkalkuliert werden. Es resultiert deswegen in stärker strukturierten Grenzen. Das Kriterium für *Shape* definiert dagegen die Formhomogenität. Wird dieses Kriterium hoch gewichtet, werden entsprechend der Heterogenität der Daten gröbere bzw. vereinfachte Segmente gebildet. Es ist in der Regel ein größerer Wert für *Shape* einzustellen, wenn die Segmente klare, nicht fraktale Grenzen aufweisen sollen (z. B. bei Segmentierung von Gebäudedächern), und ein größerer Wert für *Color* wenn spektrale Nuancen erfasst werden sollen (z. B. bei Segmentierung von Vegetation). Das Kriterium für *Shape* wird zusätzlich durch die beiden Parameter *Smoothness* und *Compactness* definiert, welche die Form der Segmente entweder glätten oder deren Kompaktheit erhöhen.

Allgemeingültige Einstellungsparameter für die MRS sind schwer anzugeben. Ihre Bestimmung variiert in Abhängigkeit von den verwendeten Daten und insbesondere von der Fragestellung der Untersuchung. Meistens wird iterativ vorgegangen um die optimalen Parameter für die gewünschten Objekte zu finden.

Um die optimale Segmentierung der Vegetationsflächen und anthropogener Objekte zu erzielen wurden folgende Gewichtungen der Layer eingestellt:

- spektrale Kanäle: höchste Gewichtung
- nDOM: halbe Gewichtung
- *Count* nicht verwendet
- *Slope* und *Aspect*: nicht verwendet

Der nDOM Layer wurde in die Segmentierung mit einbezogen, da die Höheninformation entscheidend für das Trennen spektral ähnlicher, aber unterschiedlich hoher Objekte ist (z. B. angrenzende Strauch- und Baumobjekte). Die Gewichtung wurde auf die Hälfte reduziert, da das nDOM mit 32 Bit Datenformat einen höheren Einfluss auf die Segmentbildung hat. Durch die zweifache Reduzierung wird es mit den spektralen Kanälen gleich gesetzt.

Die MRS Parameter wurden wie folgt eingestellt:

- *Scale Parameter*: 150
- *Shape / Color*: 0,6 / 0,4
- *Compactness / Smoothness*: 0,5 / 0,5

Der gewählte *Scale Parameter* generiert eher kleine Segmente, um den unterschiedlichen Ausprägungen der Vegetation gerecht zu werden. Die resultierende MRS-Segmentierung (Abb. 28) bildet eine solide Grundlage für die nachfolgende Klassifizierung der Vegetationsmaske. Hierzu gehören Vegetation, Vegetation im Schatten sowie im späteren Verlauf auch begrünte Dächer. Im Laufe der Objektextraktion wird dieses Segmentierungsergebnis mithilfe von *Chessboard Segmentation*, MRS sowie anderen Segmentierungsverfahren auf die zu extrahierenden Objekte optimiert.



Abb. 28 Ergebnis der initiierenden Multiresolution Segmentation (MRS) basierend auf UCX-Daten

## 4.5 Klassifizierungs- und Objektextraktionsprozesse

### 4.5.1 ALK-Klasse: geplante oder im Bau befindliche Gebäude

Die vorliegenden Raster- und thematischen Daten liegen zwei Jahre auseinander. Aus diesem Grund ist keine korrekte Höhenbestimmung für die ALK-Klasse *geplante oder im Bau befindliche Gebäude* möglich. Da die Luftbilder zwei Jahre zurückliegen, ergeben sich an vielen betroffenen Stellen Unterschiede (Baumaßnahmen noch nicht angefangen, Gebäude noch nicht fertig oder sehr hohe Baukräne vorhanden), so dass keine korrekten Höhen bestimmbar sind. Theoretisch betrachtet wäre eine fernerkundliche Veränderungsanalyse (engl. *Change Detection*) möglich, dies würde jedoch den zeitlichen Rahmen des Projektes sprengen. Demnach werden noch vor der Erstellung der Vegetationsmaske die Bereiche klassifiziert, die in der ALK als *geplante oder im Bau befindliche Gebäude* definiert sind (Objektschlüsselkatalog (OSKA) Folie o87). Diese gesonderte Klassifizierung schließt noch weitere höhenverfälschende Einflüsse der eventuell benachbarten Vegetation aus und ermöglicht eine ergänzende Korrektur der Höhenattribute. Diese Klassifizierung erfolgt ausschließlich auf der Grundlage des OSKA Schlüssels, d.h. die Klassenbeschreibung greift auf die Schlüssel-Spalte in der Attributtabelle des ALK-Layers zurück. In Abb. 29 wird beispielhaft ein Klassifizierungsergebnis dieser Objekte dargestellt.

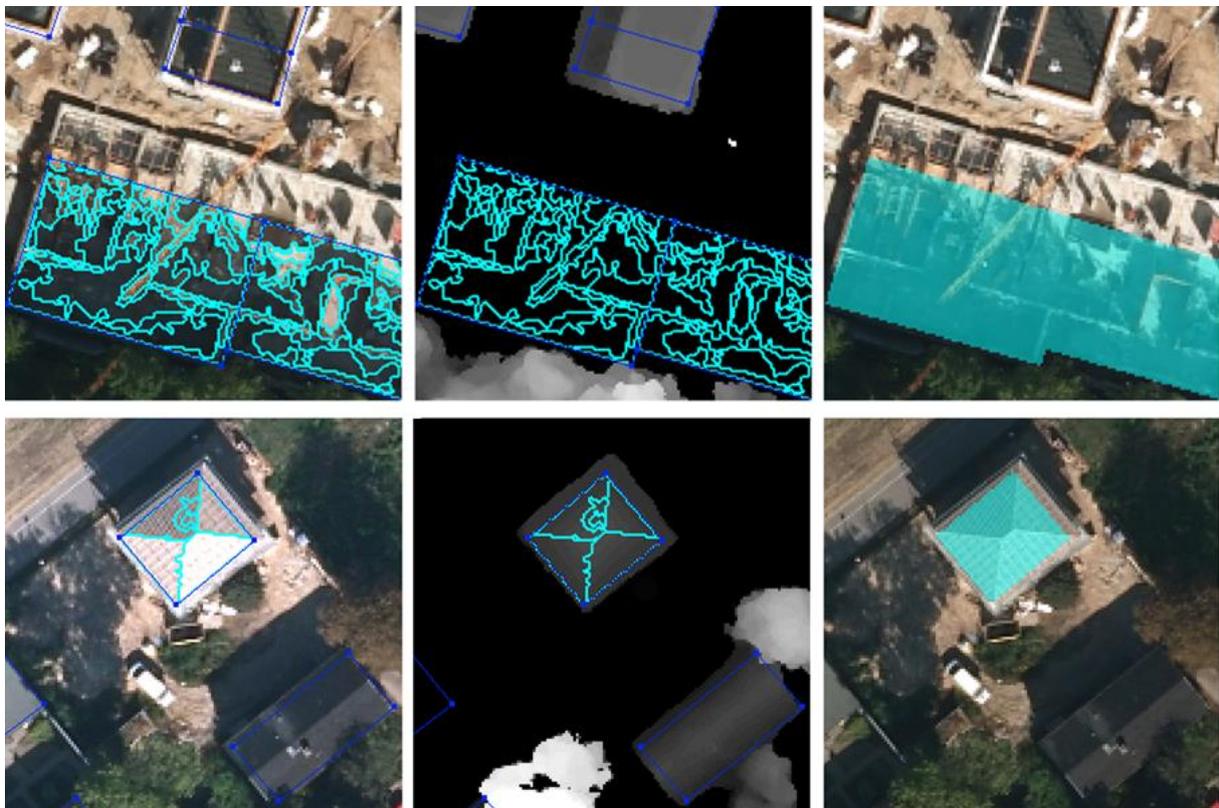


Abb. 29 Zwei Klassifizierungsergebnisse der laut ALK-Bearbeitungsstand 06.2012 geplanten oder im Bau befindlichen Gebäude; links und mittig: einzelne klassifizierte Segmente sowie als zusammengefasstes Objekt (rechts); oben ein Beispiel für laufende Baumaßnahmen, unten für ein fertig gestelltes Gebäude (2010)

#### 4.5.2 ALK-Klassen: Garagen, Schuppen, Gartenhäuser

Wie im Kapitel 2.1.4 beschrieben enthält das generierte nDOM Schwächen in den Bereichen der sehr niedrigen Höhen ( $< 2,5$  m). Aufgrund der strikt aufgestellten Regeln für das erstellte DGM, wurden kleine und niedrige Objekte, wie z. B. Schuppen, im DGM nicht als erhöhte Objekte ausmaskiert, so dass diese nach der Subtraktion vom DOM gleich Null gesetzt wurden. Aus diesem Grund werden niedrige und kleine Gebäudetypen wie Garagen (ALK-Nutzungsart Sammelgarage – OS 011 2364, Doppelgarage – OS 011 2365, Einzelgarage – OS 011 2366), Schuppen und Gartenhäuser (ALK-Nutzungsart Schuppen – OS 011 2723, Lagerschuppen – OS 011 1744, Garten- oder Wochenendhaus – OS 011 2862 2863) ebenfalls noch vor der Erstellung der Vegetationsmaske unter Verwendung der entsprechenden Nutzungsdaten des Objektschlüssel-Kataloges der ALK klassifiziert. Diese Objekte werden anschließend jeweils zu einem Objekt zusammengefasst (engl. *Merge*) und weisen einen einheitlichen durchschnittlichen Höhenwert (*Mean nDOM*) auf.

Abb. 30 verdeutlicht exemplarisch das Problem der Entfernung von kleineren Objekten, wie beispielsweise Garagen, im Zuge der nDOM Generierung. Die in der ALK enthaltenen Garagen (grüne Segmente) weisen im nDOM eine falsche Höhe von Null auf. Durch das Zusammenfügen der Segmente zu einem Objekt wird zusätzlich noch die Höhe der angrenzenden Baumsegmente in die Berechnung der Objekthöhe mit einbezogen und die Objekthöhe zusätzlich verfälscht. In diesen Fällen ist eine nachträgliche Korrektur der Objekthöhen notwendig. Für alle gebauten Objekte mit einer Durchschnittshöhe von unter 28 dm (entspricht einem Stockwerk) werden die Höhenattribute anhand der in der ALK vorhandenen Angabe zur maximalen Geschossigkeit berechnet (max. Geschossigkeit \* 2,8 m). Dieser Berechnungsschritt erfolgt in ESRI ArcGIS.

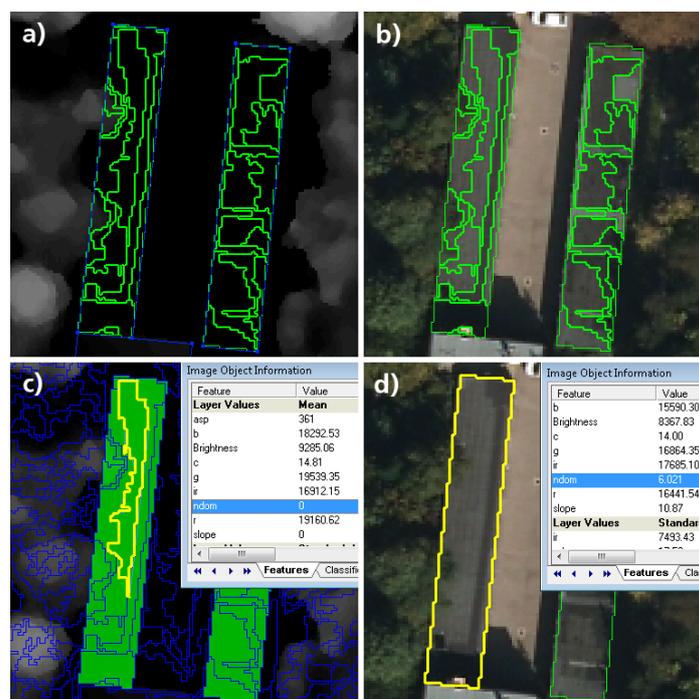


Abb. 30 Klassifizierung der ALK-Nutzungsklasse Garagen; unter c), fehlende Höheninformation für einzelne Garagen-Segmente, d) nach dem Zusammenfügen: Durchschnittshöhe von 6 dm

### 4.5.3 Erfassung von Vegetation und deren Struktur

#### Vegetationsmaske

Nach der Klassifizierung von Gebäudeobjekten der ALK-Nutzungsklassen *ALK geplante oder im Bau befindliche Gebäude, ALK Garagen, Schuppen und Gartenhäuser* erfolgt die Klassifizierung der Vegetationsmaske. Die auf dem MRS-Level erstellten Vegetationsobjekte sind feingliedrig, wodurch auf die Vielfalt der vorkommenden Vegetation eingegangen werden kann.

Die in der digitalen Fernerkundung übliche Methode der Vegetationsextraktion basiert auf einem Vegetationsindex, der aus den vorhandenen Kanälen Rot und Infrarot erstellt wird. Dieser (engl.) *Normalized Differenced Vegetation Index*, kurz NDVI berechnet sich wie folgt:

$$NDVI = (nIR - R) / (nIR + R)$$

Dieser Index nutzt die Gegebenheit aus, dass die vitale Vegetation besonders hohe Werte im nahen Infrarot Bereich aufweist, während sie im roten Spektralbereich viel niedrigere Werte hat. Diese Konstellation findet sich in keiner weiteren Objektklasse wieder, wodurch eine einfache Trennung der Vegetation von anderen Klassen gewährleistet wird (ALBERTZ, 2001: 219). Durch die Differenzbildung entsteht ein Wertebereich zwischen -1 und 1, wobei negative Werte den künstlichen Materialien, wie z. B. Asphalt oder Beton entsprechen, während die natürlichen Objekte eher positive Werte aufweisen.

Der NDVI wird in eCognition als ein benutzerdefinierter Layer (*Customized Arithmetic Feature*) berechnet. Für die Klassenbeschreibung der Vegetation wird ein Zugehörigkeitswert von  $> 0,2$  definiert. In Abb. 31 ist deutlich zu erkennen, dass dieser Wert die Vegetation von anderen Objekten trennt: der Kunstrasen bleibt unklassifiziert, während die anderen Rasenflächen mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten, in Abhängigkeit von dem NDVI-Wert, der Klasse Vegetation zugewiesen werden.

Durch die normierte Verhältnisbildung des nahen Infrarot und des roten Kanals im NDVI werden Unterschiede in den Beleuchtungsverhältnissen sowie Einflüsse der Verschattung erheblich reduziert, sodass auch vegetationstypische Werte bei sich im Schatten befindlicher Vegetation zu verzeichnen sind. Eine nahezu vollständige Klassifizierung der Vegetation wird dadurch gewährleistet (Abb. 32).

Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen im Berliner Stadtgebiet

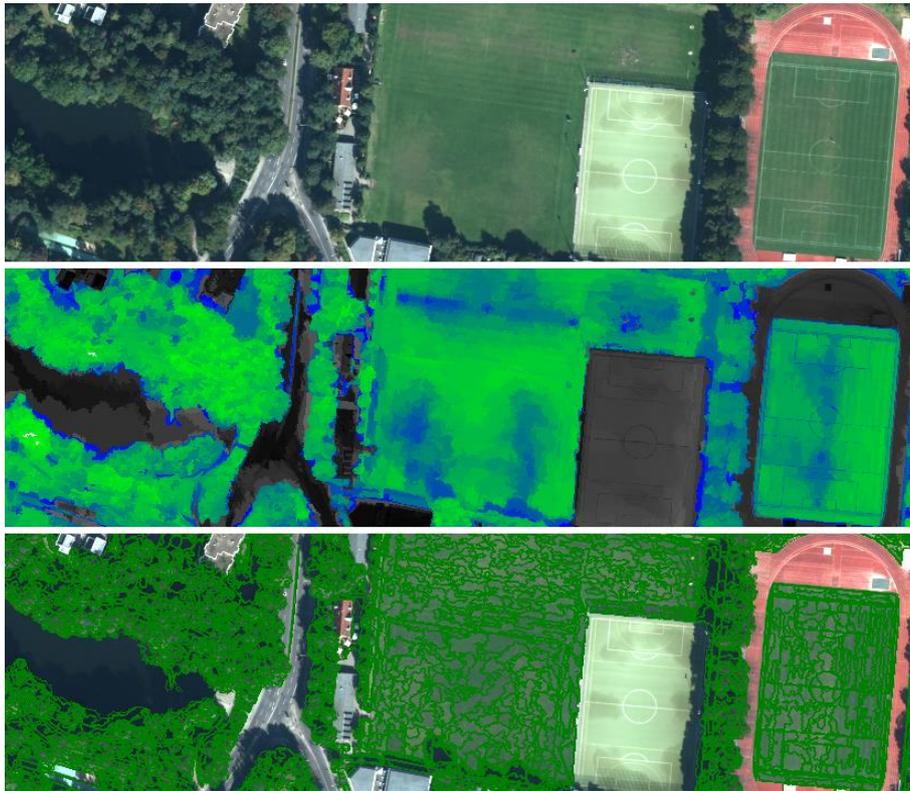


Abb. 31 Vegetationsmaske; mittig: der NDVI in einer Farbkodierung (von Dunkelblau = 0,2 bis Hellgrün = 1,0), unten das Klassifizierungsergebnis (Grün)

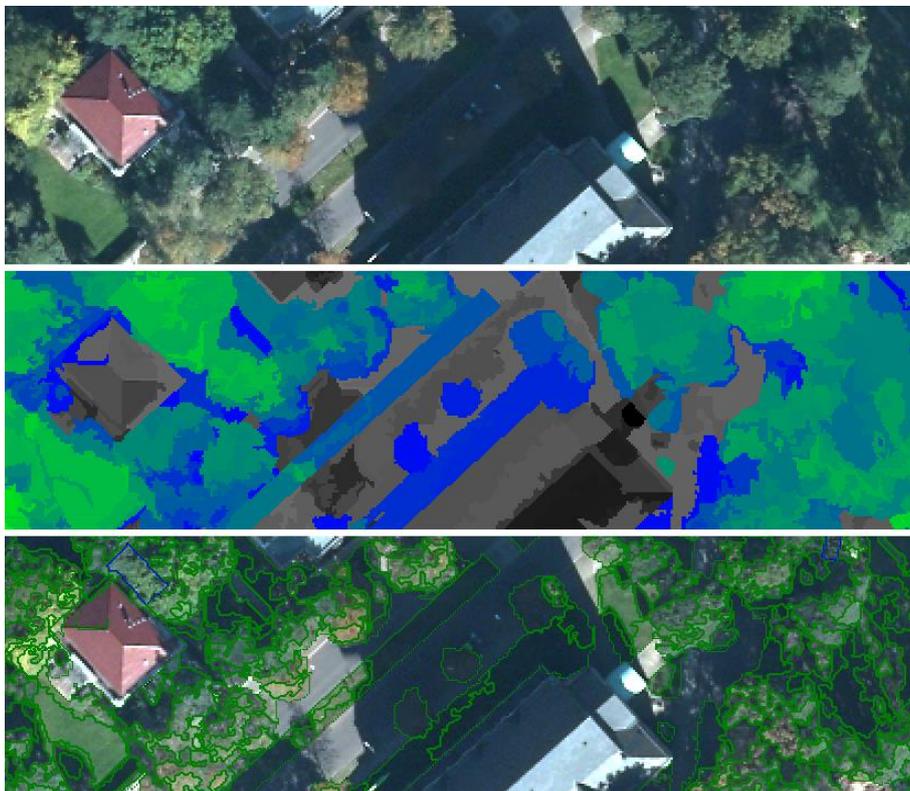


Abb. 32 Vegetationsklassifizierung: auch in den Schattenbereichen NDVI Werte  $> 0,2$  (mittig, Dunkelblau), resultierende Vegetationsmaske (unten, Grün)

Bei den Voreinstellungen der Klassifizierung wurde festgelegt, dass die Zuweisung der Objekte zu einer Klasse erst erfolgt, wenn der durchschnittliche Zugehörigkeitswert zu einer Klasse mehr als 50 % beträgt. In Abb. 33 wird verdeutlicht, dass die kleinen (weniger vitalen) Baumobjekte einen zu niedrigen NDVI-Wert aufweisen, um als Vegetation klassifiziert zu werden. Der NDVI-Wert des markierten Objektes beträgt 0,1355, was in einem geringen Zugehörigkeitswert von nur 4 % resultiert.

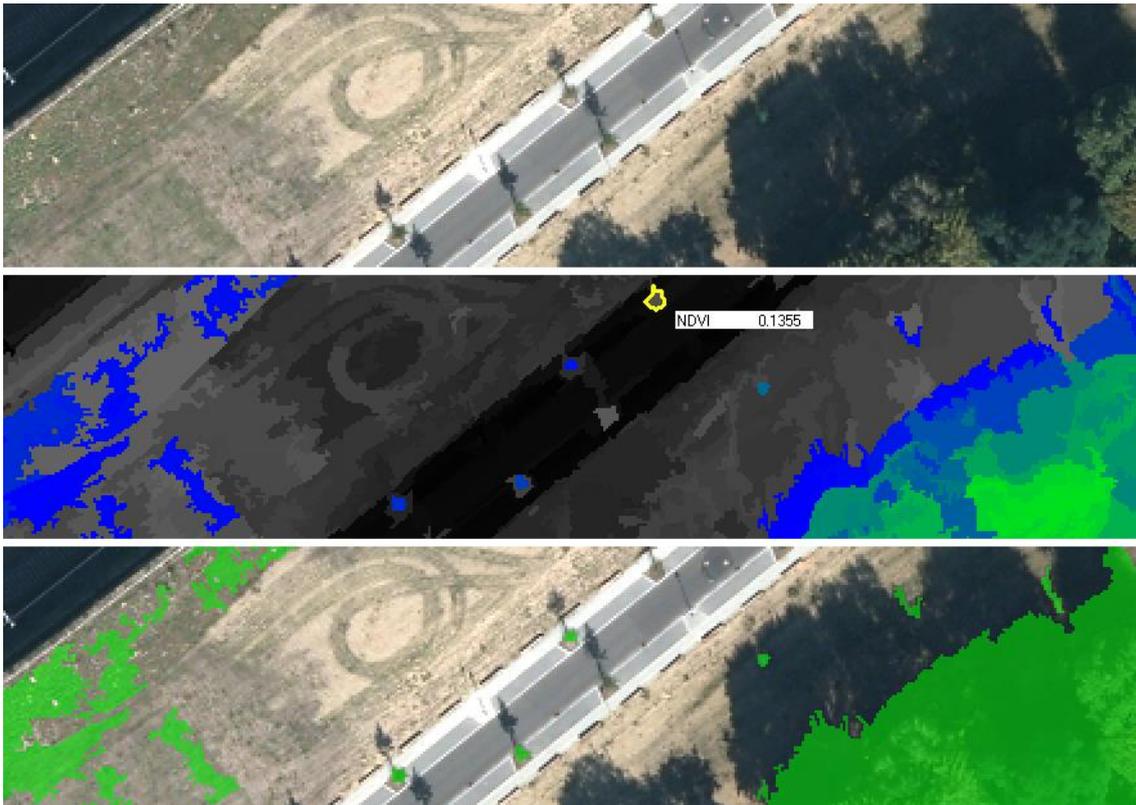


Abb. 33 Ergebnis der Vegetationsklassifizierung (unten);  
durch die zu niedrigen NDVI Werte (mittig) fehlende Klassenzuweisung

Die klassifizierte Vegetation wird ausmaskiert, sodass für die nachfolgende Gebäudeklassifizierung nur die restlichen Bereiche berücksichtigt werden müssen. Die Vegetationsmaske soll aus diesem Grund so präzise wie möglich die tatsächliche Vegetation wiedergeben. Da sie noch wenige Fehler in den Schattenbereichen sowie bei weniger vitalen Vegetation enthält, finden weitere Verfeinerungsschritte statt.

### Verfeinerung der Vegetationsmaske

Die Optimierung der vorhandenen Vegetationsmaske ist notwendig in den verschatteten Bereichen. Diese Korrektur erfolgt im Zuge der Klassifizierung von Gebäudeobjekten, die kein Bestandteil der ALK sind und wird im Kapitel 4.5.6, auf Seite 48 näher erläutert.

#### 4.5.4 Vegetationshöhenstufen

Zur Erfassung der Vegetationsmaske wurde die MRS-Segmentierung verwendet (vgl. Kapitel 4.4.2 und 4.5.3). Diese wurde basierend auf den spektralen Kanälen erstellt und ist gut für die detaillierte Erfassung der Vegetationsobjekte geeignet. Für die Erfassung der Höhenstrukturen ist sie jedoch zu stark gegliedert und spiegelt die Vegetationshöhenstufen nur ungenau wider (Abb. 34). Dies ist einerseits durch die hohe geometrische Auflösung, aber auch durch die hohe spektrale Heterogenität der Vegetationsobjekte bedingt. Aus diesem Grund werden alle vorhandenen Vegetationsmaskenobjekte zusammengefasst (sodass die Form der Vegetationsmaske unverändert bleibt) und einer neuen geeigneten Segmentierung unterzogen, diesmal mit Fokus auf die vorkommenden Vegetationsstrukturen und -höhen.

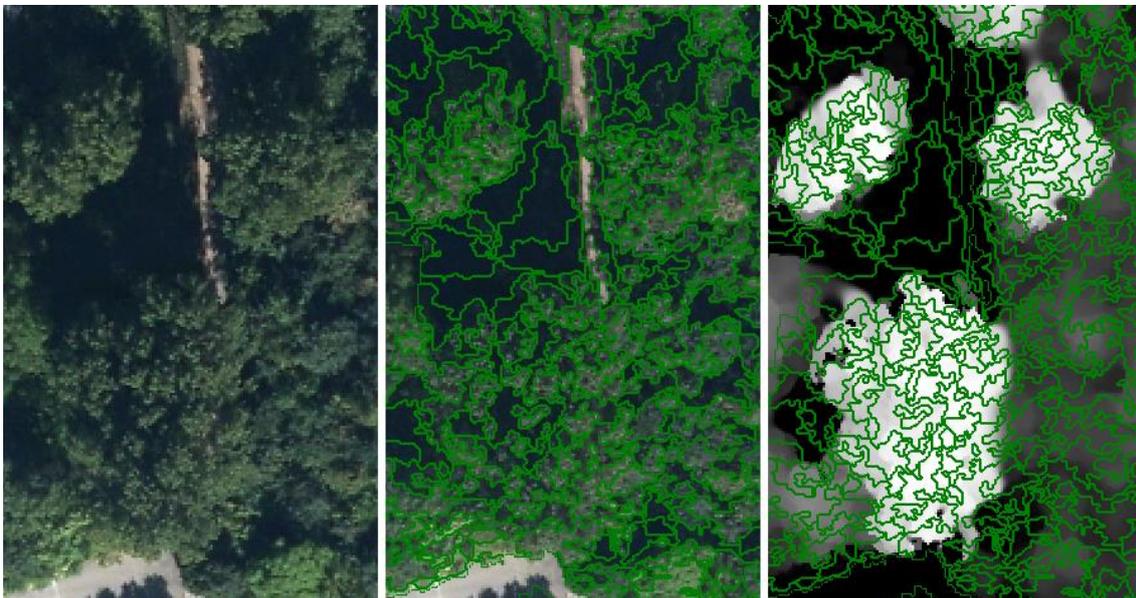


Abb. 34 MRS-Segmentierung der Vegetation – genutzt für die Erstellung der Vegetationsmaske, aber zu stark gegliedert für die Erfassung der Höhenstruktur

#### Contrast Split Segmentation

Für die Erfassung der Höhenstrukturen wurde zuerst die *Contrast Split Segmentation* (nachfolgend CSS genannt) verwendet. Dieser Algorithmus unterteilt das zugrundeliegende Bild in helle und dunkle Bereiche. Verwendet man ein Höhenmodell, so wird es in niedrige (dunkel) und hohe Objekte (hell) segmentiert. Die Unterteilung basiert auf definierten Schwellenwerten, welche den Kontrast zwischen den resultierenden hellen (Werte über dem Schwellenwert) und dunklen (Werte unter dem Schwellenwert) Objekten zur Segmenterstellung nutzen. Der Algorithmus wertet iterativ den optimalen Segmentgrenzverlauf für jedes einzelne zu segmentierende Objekt durch die Prüfung der Pixelwerte zwischen den vorgegebenen minimalen und maximalen Schwellenwerten, aus. Der Prüfschwellenwert wird als optimal bewertet, wenn der resultierende Kontrast zwischen dem hellen und dunklen Objekt am höchsten ist – eine Segmentgrenze wird gezogen (TRIMBLE ECOGNITION, 2010: 30ff).

Mithilfe der CSS wird die Vegetationsmaske in niedrige und erhöhte Vegetation unterteilt, wobei der maximale Schwellenwert für das nDOM bei 20 dm liegt (Abb. 35). Dieses Segmentierungsergebnis gilt als eine Grundlage für die weitere detailliertere Unterteilung der erhöhten Vegetation in deren Höhenstufen.

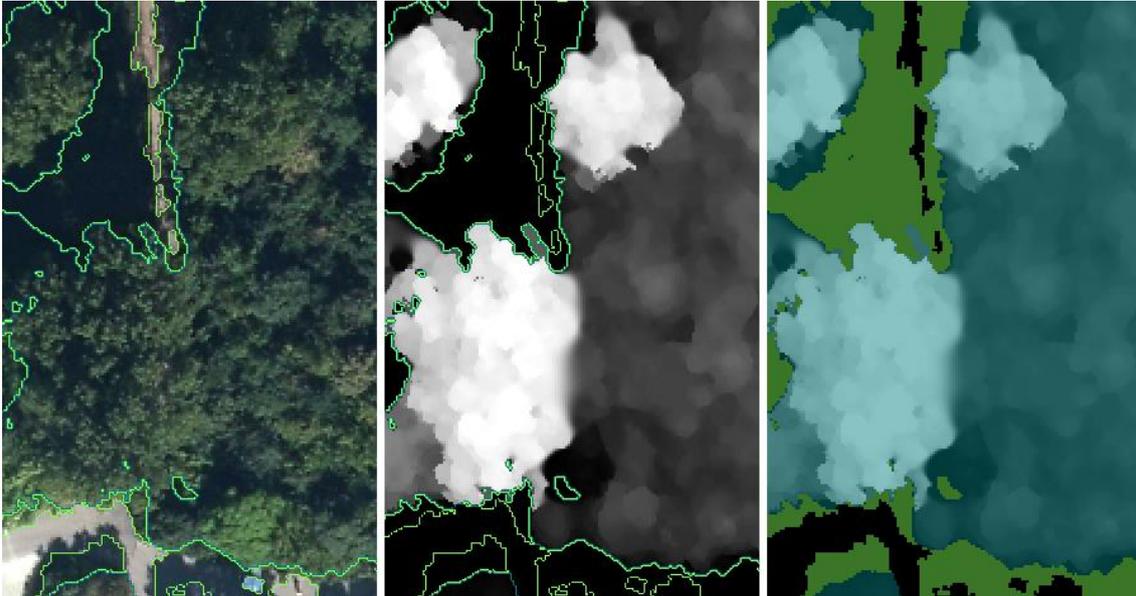


Abb. 35 Ergebnis der Contrast Split Segmentation: Unterteilung in niedrige (Grün) und erhöhte Vegetation (Türkis)

### Multi Threshold Segmentation

Für die Unterteilung der erhöhten Vegetation in weitere Höhenstufen wird die *Multi Threshold Segmentation* verwendet (nachfolgend MTS genannt). Dieser Segmentierungsalgorithmus basiert auf den Pixelwerten des vorgegebenen Layers. In diesem Fall wird das nDOM verwendet. Es unterteilt die vorhandenen Segmente entlang der vorgegebenen maximalen Pixelwerte des Eingabe-Layers. Der Nutzer kann mehrere Schwellenwerte definieren (hier wurden neun Höhenstufen vorgegeben), entlang denen segmentiert werden soll. Ebenfalls kann die minimale Größe der resultierenden Objekte definiert werden (TRIMBLE ECOGNITION, 2010: 41f). Wird bei der MTS das Höhenmodell als Eingabe-Layer verwendet, kann das Verfahren mit einer Höhenlinienerstellung verglichen werden. Das Ergebnis der MTS ist in Abb. 36 dargestellt.

Die resultierenden Segmente nach der MTS richten sich nach den definierten Vegetationshöhenstufen. Die Segmente spiegeln also noch keine Vegetationsstruktur wider. Um auf die differenzierte Vielfalt der Vegetation besser eingehen zu können, werden die vorhandenen Vegetationshöhenstufen unter der Berücksichtigung von Höhenstrukturen, weiter unterteilt. Dies erfolgt mithilfe der *Multiresolution Segmentation* (MRS) (vgl. Kapitel 4.4.2), wobei das nDOM als einziger Eingangs-Layer aktiviert wird, während die Gewichtung der anderen Daten auf null gestellt wird. Das Ergebnis der Unterteilung von Höhenstufen in Vegetationsstrukturen ist in Abb. 37 visualisiert.

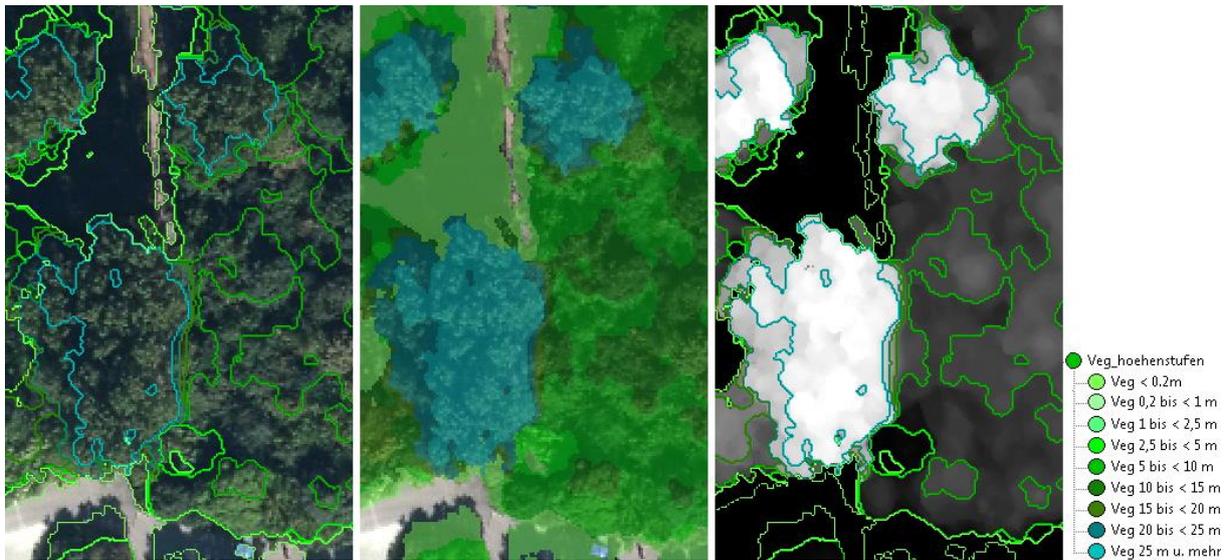


Abb. 36 Ergebnis der Multi Threshold Segmentation (MTS): Unterteilung der erhöhten Vegetation in neun Höhenstufen

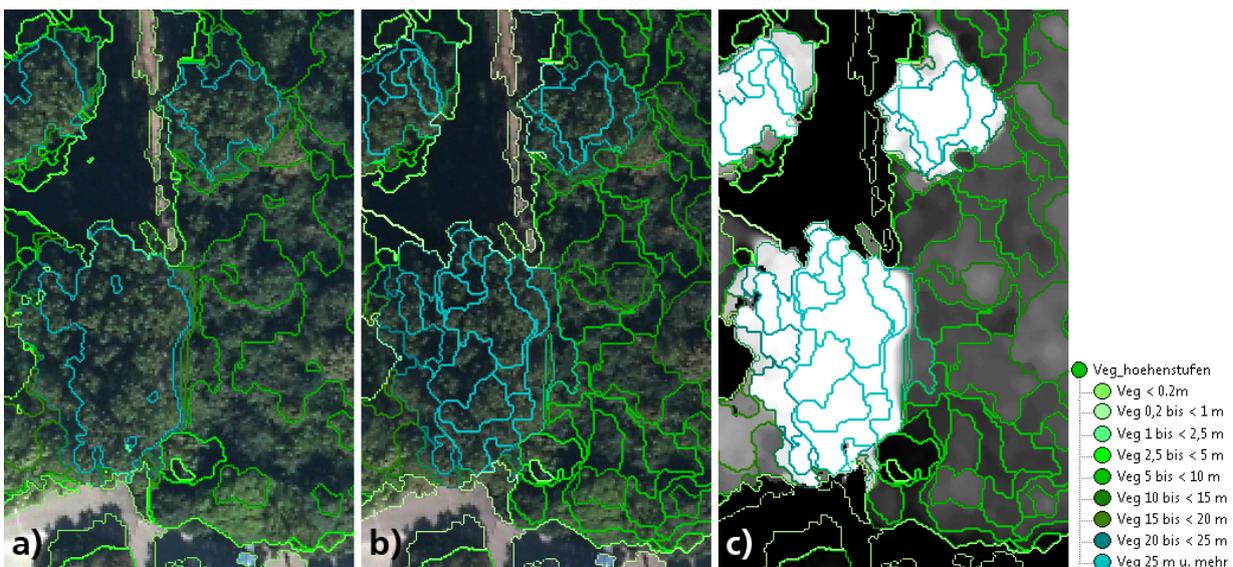


Abb. 37 Ergebnis der Unterteilung in Vegetationsstrukturen mithilfe von MRS-Segmentierung (b und c) innerhalb der einzelnen Höhenstufen aus der vorangehenden MTS (a)

Im Vergleich zu der zunächst ausgeführten MRS zur Erstellung der Vegetationsmaske, wurde bei der Generierung von Vegetationsstrukturen ein größerer Wert auf die Form der einzelnen Vegetationssegmente gelegt. Diese sind nicht mehr stark gegliedert, da die verwendeten Segmentierungsverfahren nicht auf die spektrale Heterogenität der Vegetation eingehen. Verwendet wird ausschließlich das nDOM. Dies resultiert in homogenen, glattverlaufenden Segmenten, die zugleich die Vegetationsstruktur und deren Höhenstufen gut und naturgetreu repräsentieren.

#### 4.5.5 Erfassung von Gebäuden (Bestandteil der ALK)

Die Klassifizierung der Gebäude, die in der ALK verzeichnet sind, erfolgt lediglich unter Zuhilfenahme des ALK-Layers.

##### Gebäudeobjekte

Alle Objekte, die nicht als Vegetation klassifiziert wurden und mit dem ALK-Layer überlappen, werden als Gebäude klassifiziert. Die direkte ‚Übernahme‘ der Gebäudeobjekte aus der ALK stellt noch keine vollständige Gebäude-Klassifizierung dar. Die in der ALK nicht verzeichneten Gebäudeobjekte müssen ergänzt werden. Dies könnte schnell unter Zuhilfenahme des nDOM erfolgen und unter der Annahme, dass alle erhöhten Objekte, die bisher unklassifiziert geblieben sind, die in der ALK nicht verzeichneten Gebäudeobjekte darstellen. Diese Annahme scheitert jedoch an dem Unterschied, der durch die verschiedenartige Beschaffenheit von ALK und dem True Ortho Mosaik (TOM) zustande kommt (Abb. 38). Die ALK enthält die Gebäudegrundrisse, während das TOM eine Draufsicht repräsentiert. Da viele Gebäude verhältnismäßig große Dachüberstände aufweisen, entstehen dadurch Differenzen in der Ausdehnung der Gebäudeobjekte. Dies erschwert die Klassifizierung von den Gebäudeobjekten, die kein Bestandteil der ALK sind. Eine Beschreibung der Vorgehensweise findet sich im Kapitel 4.5.6.

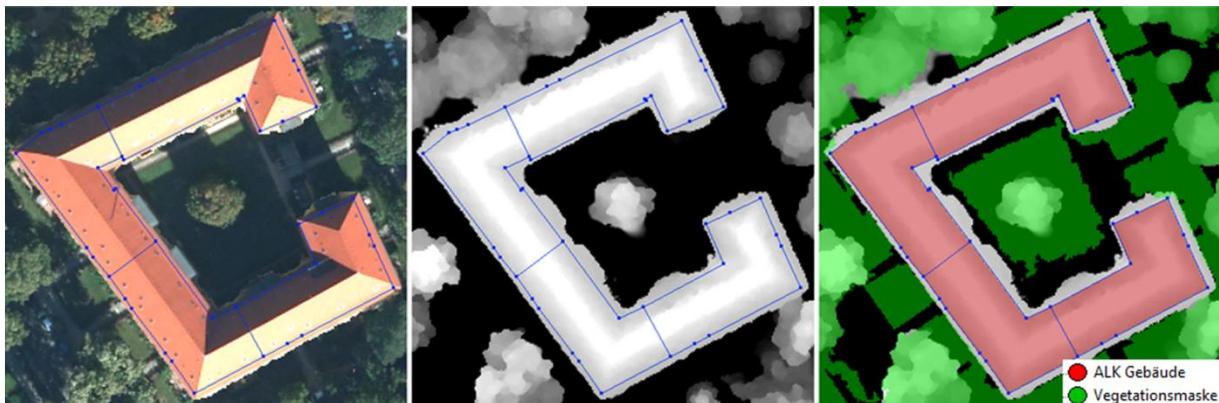


Abb. 38 Dachüberstände; links: TOM RGB überlagert mit der ALK, mittig: nDOM überlagert mit der ALK, rechts: Klassifizierungsergebnis

##### Brückenbauwerke und erhöhte Bahnanlagen

Brückenobjekte sowie erhabene, z. B. aufgeständerte Bahnanlagen sollen ebenfalls als gebaute Objekte erfasst werden. In der ALK sind neben den Gebäuden auch weitere Gebäudeobjekte in den Layern für Basis- und Ergänzungstopographie enthalten. Hierzu zählen u. a. Brücken sowie Gleisanlagen (sowohl über- als auch unterirdisch). Diese werden – ähnlich wie die Gebäudeobjekte mithilfe der entsprechenden OSKA Schlüssel klassifiziert. Das Klassifizierungsergebnis ist in Abb. 39 dargestellt.

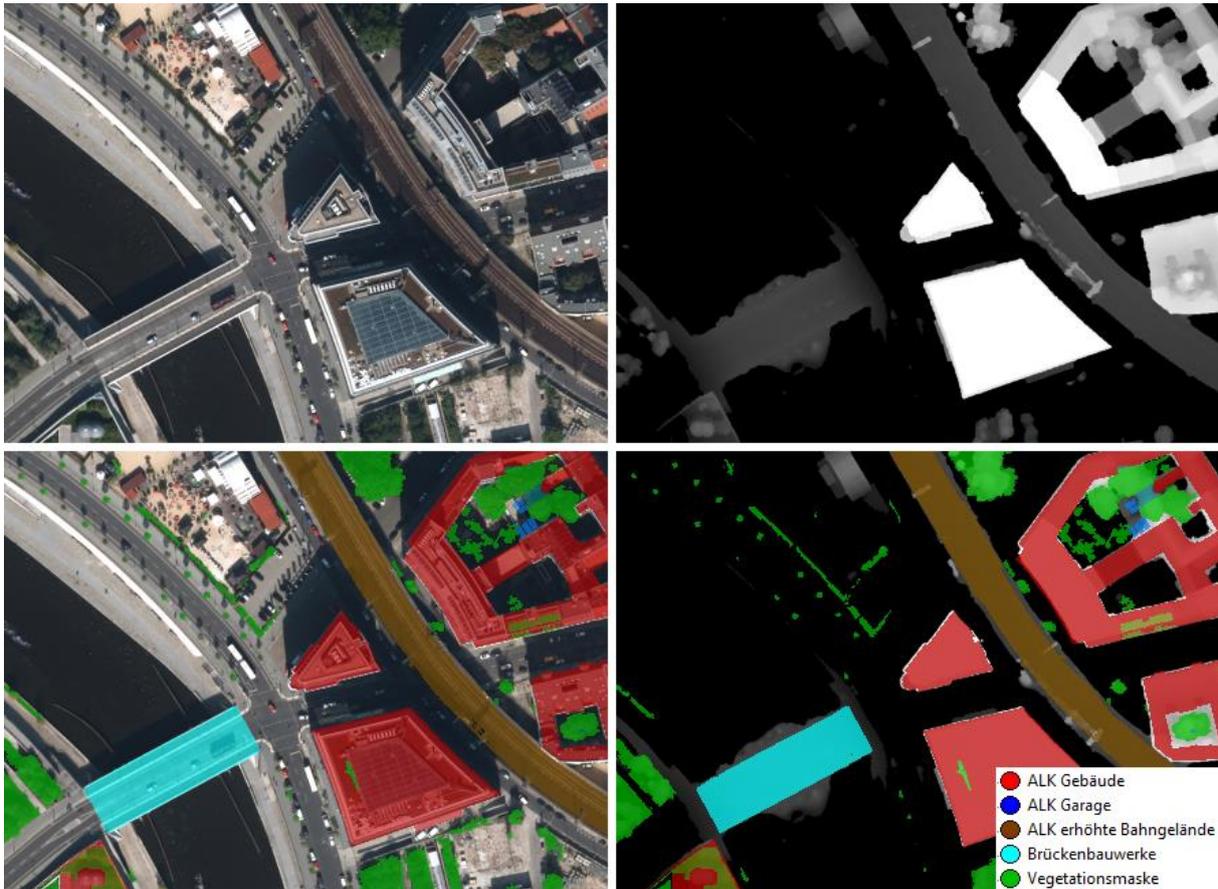


Abb. 39 Klassifizierungsergebnis von Brücken- und Hochbahnobjekten

#### 4.5.6 Erfassung von Gebäuden (kein Bestandteil der ALK)

Zu den nicht in der ALK verzeichneten Gebäudeobjekten zählen Garten- oder Ferienhäuser, neu gebaute Gebäude, überbaute Innenhöfe und Überdachungen. Auf der Grundlage der genutzten Daten kann nicht zwischen temporären oder dauerhaften Objekten unterschieden werden. Aus diesem Grund werden auch große Bau-Container oder Zelte erfasst.

Da das vorhandene nDOM keine dritte Dimension, sondern lediglich die sog. 2,5D darstellt, können keine Durchfahrten oder ‚offene‘ Überdachungen unterschieden werden. Diese Problematik veranschaulicht ein horizontales Höhenprofil über das Brandenburger Tor (Abb. 40). Es ist zu erkennen, dass aufgrund einer Draufsicht keine Durchfahrt verzeichnet wird, wodurch keine echte 3D Analyse oder Bestimmung der Gebäudebauart möglich ist. Dies wirkt sich jedoch nicht negativ auf die Extraktion der geforderten Objekte und deren Höhenattribute aus.

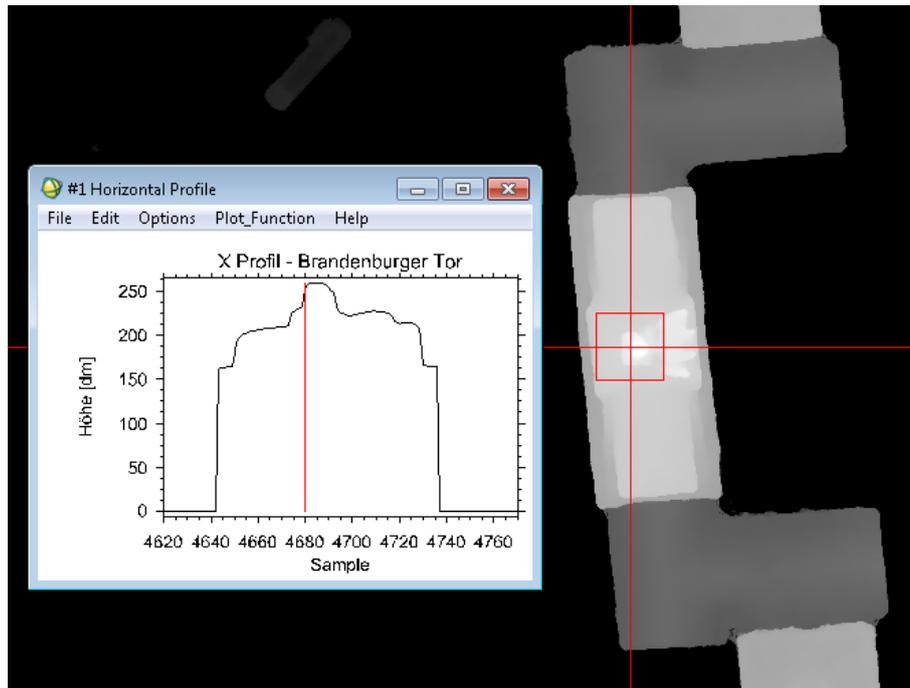


Abb. 40 Horizontales Höhenprofil (nDOM) über das Brandenburger Tor

Eine Analyse im 3D Raum ist derzeit Gegenstand der Forschung und würde die Extraktionsgenauigkeit deutlich erhöhen. In der Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen des DLR werden derzeit schrägblickende Sensorsysteme entwickelt, die auch eine Ableitung von echten 3D Informationen aus Luftbildern sowie die Extraktion im 3D Raum ermöglichen (WIEDEN & LINKIEWICZ, 2013), (LINKIEWICZ, 2013), (vgl. DLR, 2013d).

Nachfolgend wird auf die hier genutzte Vorgehensweise der Erfassung von Gebäudeobjekten, die kein Bestandteil der ALK sind, näher eingegangen.

### Gartenhäuser (kein Bestandteil der ALK)

Zuerst werden die Gartenhäuser erfasst. Hierfür wird eine Klasse *Schuppen/Gartenhaus* (kein Bestandteil der ALK) angelegt. Die Klassifizierung beschränkt sich auf die räumlichen Bereiche, die in der Topographie-Folie der ALK im Bereich der ‚Klein-, Schrebergarten oder Laubenkolonie‘ liegen. Ein niedriger NDVI-Wert wird zusätzlich in die Klassenbeschreibung eingenommen. Da die Gartenhäuser eher niedrige und kleine Objekte darstellen, werden sie in den meisten Fällen mit einer falschen Höhe im nDOM verzeichnet (vgl. Kapitel 4.5.2). Aus diesem Grund kann kein Höhenwert in der Klassenbeschreibung benutzt werden. Dies verursacht jedoch gleichzeitig viele falsche Klassenzuweisungen im Bereich der Straßen und Wege in diesen Gebieten, da diese ebenfalls einen niedrigen NDVI-Wert besitzen. An dieser Stelle wird auf die Formeigenschaften zurückgegriffen. Ein Maß für die Rechteckigkeit (*Rectangularity*) sowie ein Verhältnis der Länge zur Breite (*Length/Width*) lassen die Straßenflächen aus der Gartenhaus-Klasse ausschließen.

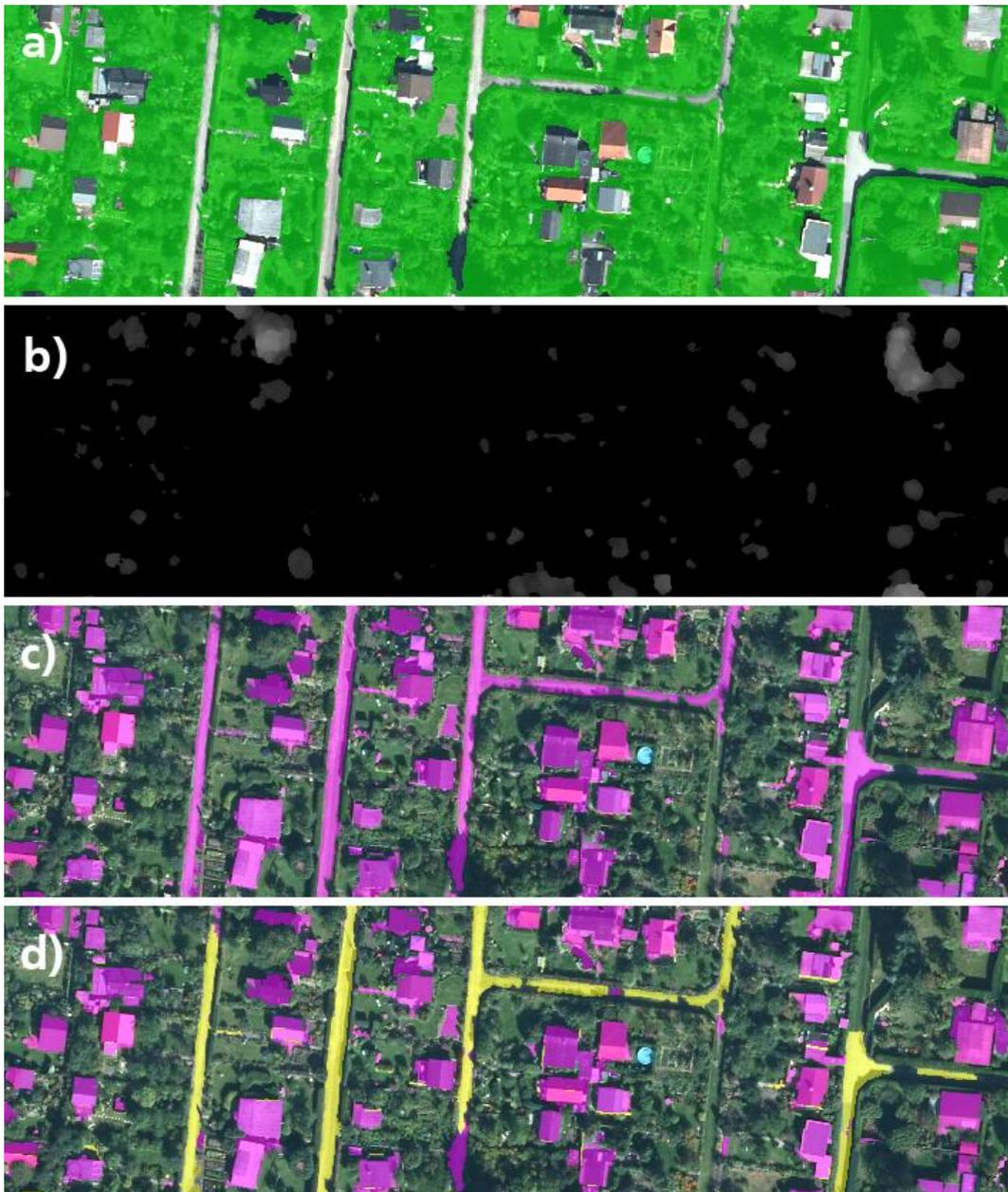


Abb. 41 Klassifizierung von Gartenhäusern (kein Bestandteil der ALK); a) bisherige Klassifizierung (Vegetationsmaske) überlagert auf RGB, b) Ausschnitt aus nDOM – keine Höhen für die Gartenhäuser, c) erste Klassifizierung (Lila) ergibt Fehler im Bereich der Straßen, d) um die Straßen (Gelb) bereinigte Klassifizierung von Gartenhäusern

### Gebäudeobjekte (kein Bestandteil der ALK)

Für die Klassifizierung der *Gebäude* (kein Bestandteil der ALK) werden alle übriggebliebenen erhöhten Objekte klassifiziert und anschließend unter Zuhilfenahme von geometrischen Eigenschaften sowie Statistiken des nDOM und der Zusatzlayer um die falschen Objekte bereinigt. In Abb. 42 ist ein vorläufiges Klassifizierungsergebnis dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass fälschlicherweise Dachüberstände sowie im Vegetationsbereich einige Segmente als Gebäude mitklassifiziert werden.

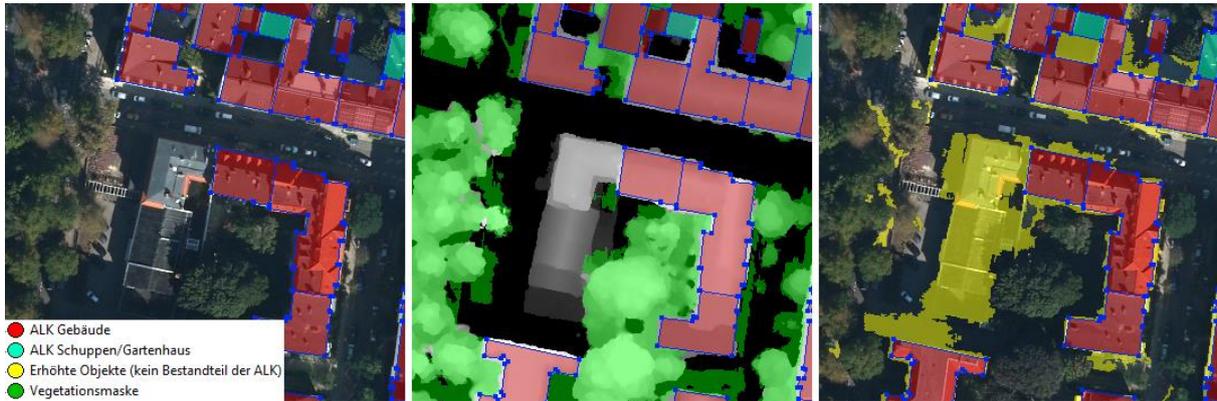


Abb. 42 Vorläufige Klassifizierung der Gebäude, die kein Bestandteil der ALK sind (rechts in Gelb); überlagert mit ALK-Konturen (blaue Linien)

In spektral homogenen Schattenbereichen kann es während der MRS vorkommen, dass auch Pixel mit dem Höhenwert Null in das entstehende Segment integriert werden. So ein Segment weist z. B. eine Durchschnittshöhe von 20 dm auf, welche der minimal geforderten Gebäudehöhe entspricht. Um die falsch klassifizierten Segmente zu korrigieren, bedarf es deswegen einer pixel-genauen Analyse. Auf diese Weise können die Pixel mit zu niedrigen Höhen entfernt werden.

Dafür wird eine *Chessboard Segmentation* (vgl. Kapitel 4.4.1) mit dem Größenparameter, <sup>1</sup> angewendet, um im Bereich der Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* Segmente in Pixelgröße zu erstellen. Wie in Abb. 43 dargestellt, wird jedes von diesen pixel-großen Segmenten einer Klassifizierung unterzogen. Segmente, die eine Höhe von Null aufweisen werden aus der Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* entfernt (in Abb. 43 in Orange eingefärbt).

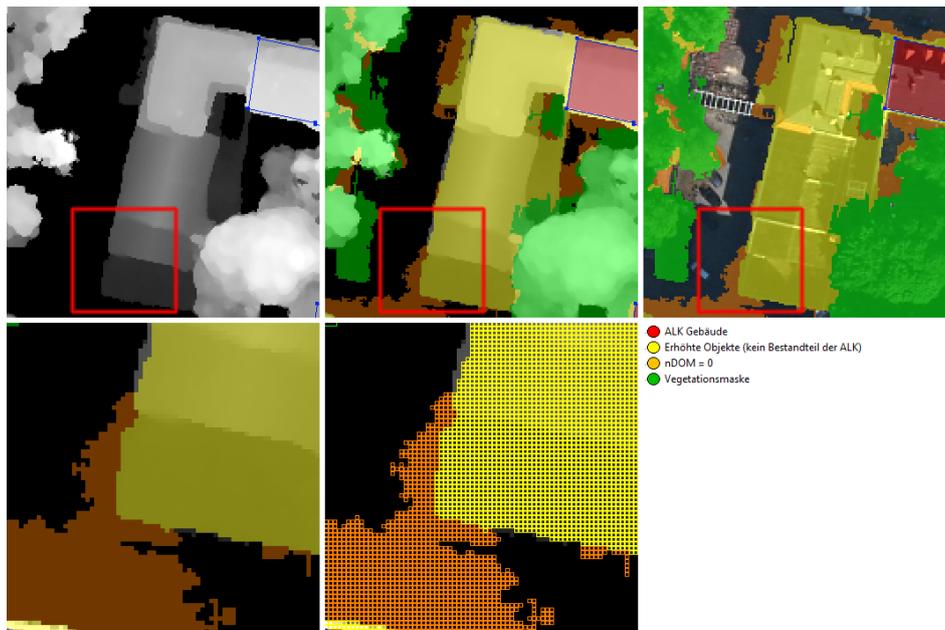


Abb. 43 Korrekturergebnis von erhöhten Objekten (kein Bestandteil der ALK) unter pixel-genauen Betrachtung von nDOM; in Orange: Pixel mit nDOM = 0, unten: Detailansicht mit Chessboard-Segmenten

Einer weiteren Korrektur werden Pixel unterzogen, die im Layer *Count* einen sehr niedrigen Wert besitzen, was den Bildelementen entspricht, die wenige korrespondierende Punkte während der DOM-Prozessierung aufwiesen (vgl. Kapitel 2.1.4). Für solche Pixel kann häufig kein korrekter Höhenwert ermittelt werden. Diese werden daher mit Hilfe der Nachbarpixel interpoliert. In solchen Fällen kann es vorkommen, dass verfälschte Höhenwerte generiert werden. Dies kommt größtenteils in Sichtschattenbereichen vor. Die Korrektur mit Hilfe der niedrigen *Count*-Werte ist in Abb. 44 dargestellt.

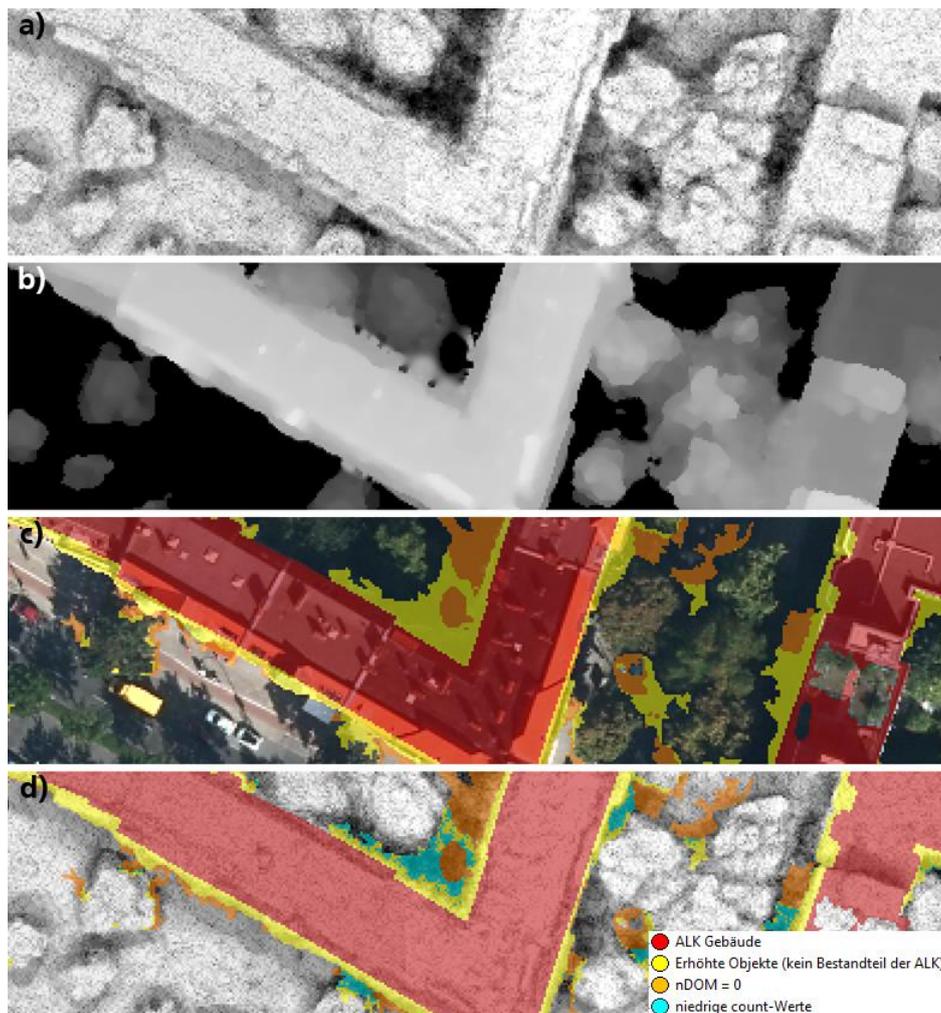


Abb. 44 Korrektur unter Nutzung niedriger Count-Werte; a) dunkle Bereiche im Count-Layer stehen für wenige korrespondierende Bildzuordnungspunkte, b) die Höhen werden im DOM/nDOM interpoliert, c) interpolierte Höhen führen zu Fehlklassifizierung in der Klasse ‚erhöhte Objekte (kein Bestandteil der ALK)‘ d) Korrektur durch die Klassifizierung der niedrigen Count-Werte (Blau)

Die so korrigierten Segmente der Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* (in Gelb) bestehen nun zum großen Teil aus relevanten erhöhten Objekten. In den vorangegangenen Bildbeispielen ist deutlich zu erkennen, dass noch weitere Korrekturen im Bereich der Vegetation notwendig sind. Es gibt noch viele kleine Bereiche, die sehr wahrscheinlich Teile der Vegetation sind, als solche aber bisher aufgrund des zu niedrigen NDVI-Wertes nicht in die Vegetationsmaske integriert wurden.

### Ergänzung der Vegetationsmaske

Die bestehende Vegetationsmaske wird um die Bereiche aus der Klasse *Erhöhte Objekte (kein Bestandteil der ALK)* unter Berücksichtigung der NDVI-Werte ergänzt. Segmente mit positivem NDVI sowie einem relativ kleinem NDVI-Unterschied zu den benachbarten Vegetationsobjekten, wachsen iterativ in die Vegetationsmaske hinein (*conditional region growing*). Segmente, die diese Bedingung nicht erfüllen bleiben unklassifiziert. Das Ergebnis der Vervollständigung der Vegetationsmaske ist in der Abb. 45 zu sehen.

Die um die Vegetationsobjekte bereinigte Klasse *Erhöhte Objekte (kein Bestandteil der ALK)* stellt noch nicht das endgültige Ergebnis dar. Die Klassifizierung weist noch viele Objekte auf, welche die Dachüberstände darstellen. Um nur die tatsächlichen Gebäudeobjekte zu erhalten, werden sie auf Formeigenschaften untersucht. Dafür müssen die Ein-Pixel-Objekte zusammengefasst werden. Nur die Objekte, die eine bestimmte Größe und ein gewisses Maß an Rechtwinkligkeit (*Rectangular Fit*) (normiert auf den Wertebereich zwischen 0 und 1) sowie ein Mindestmaß für die Breite (*Width*) aufweisen, werden als *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* klassifiziert. Die restlichen Segmente – auch wenn sie Dachüberstände darstellen – werden aus der Klasse ausgeschlossen. Diese Optimierung der Gebäudeobjekte stellt das endgültige Ergebnis für die Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* dar (Abb. 46).

Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen im Berliner Stadtgebiet

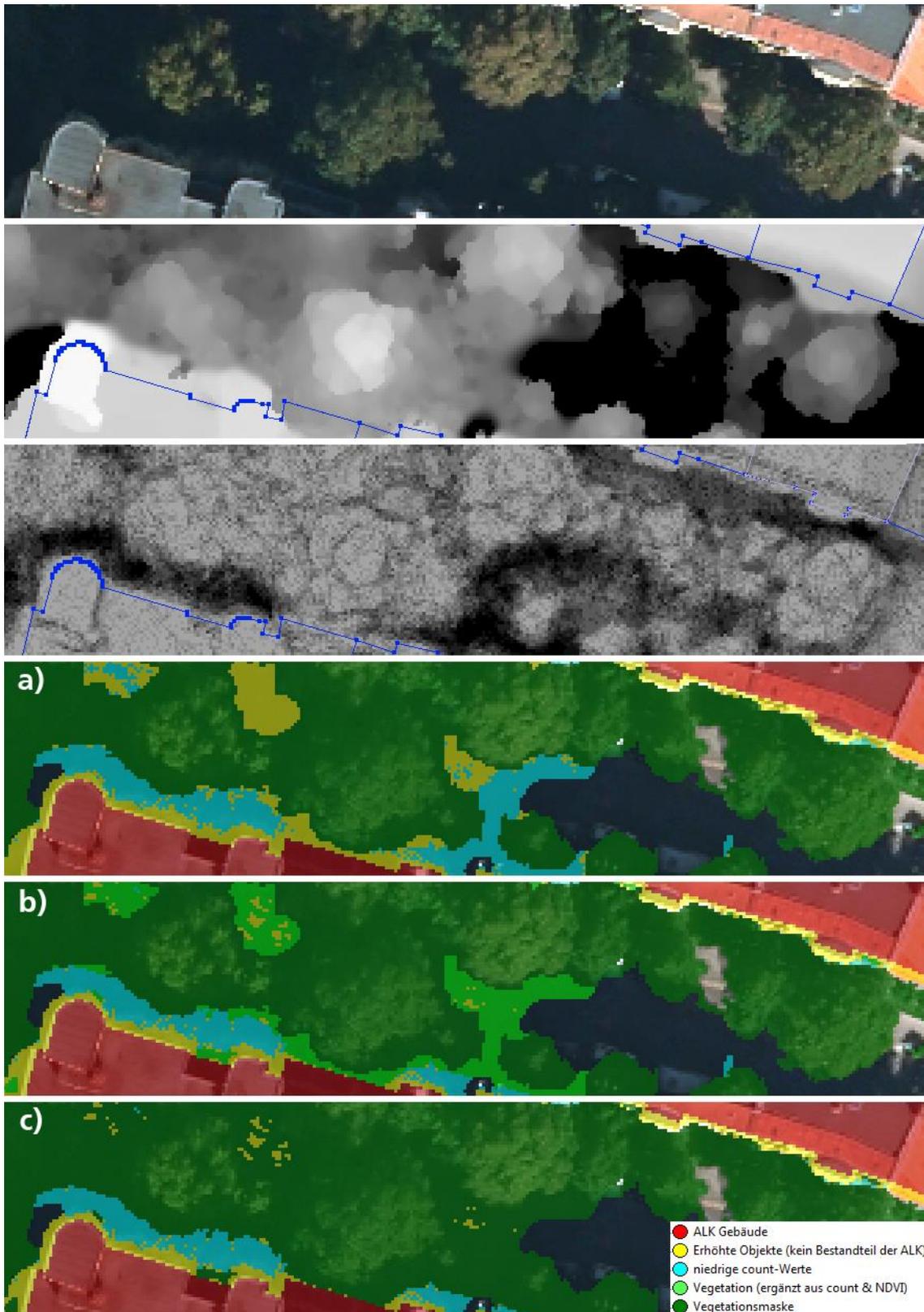


Abb. 45 Ergebnis der Ergänzung der Vegetationsmaske: a) Klassifizierung von niedrigen Count Werten, b) Klassifizierung von positiven NDVI-Werten, c) iteratives pixelweise Conditional Growing in die Vegetationsmaske unter Berücksichtigung der relativen Unterschiede zu Vegetationsnachbarobjekten

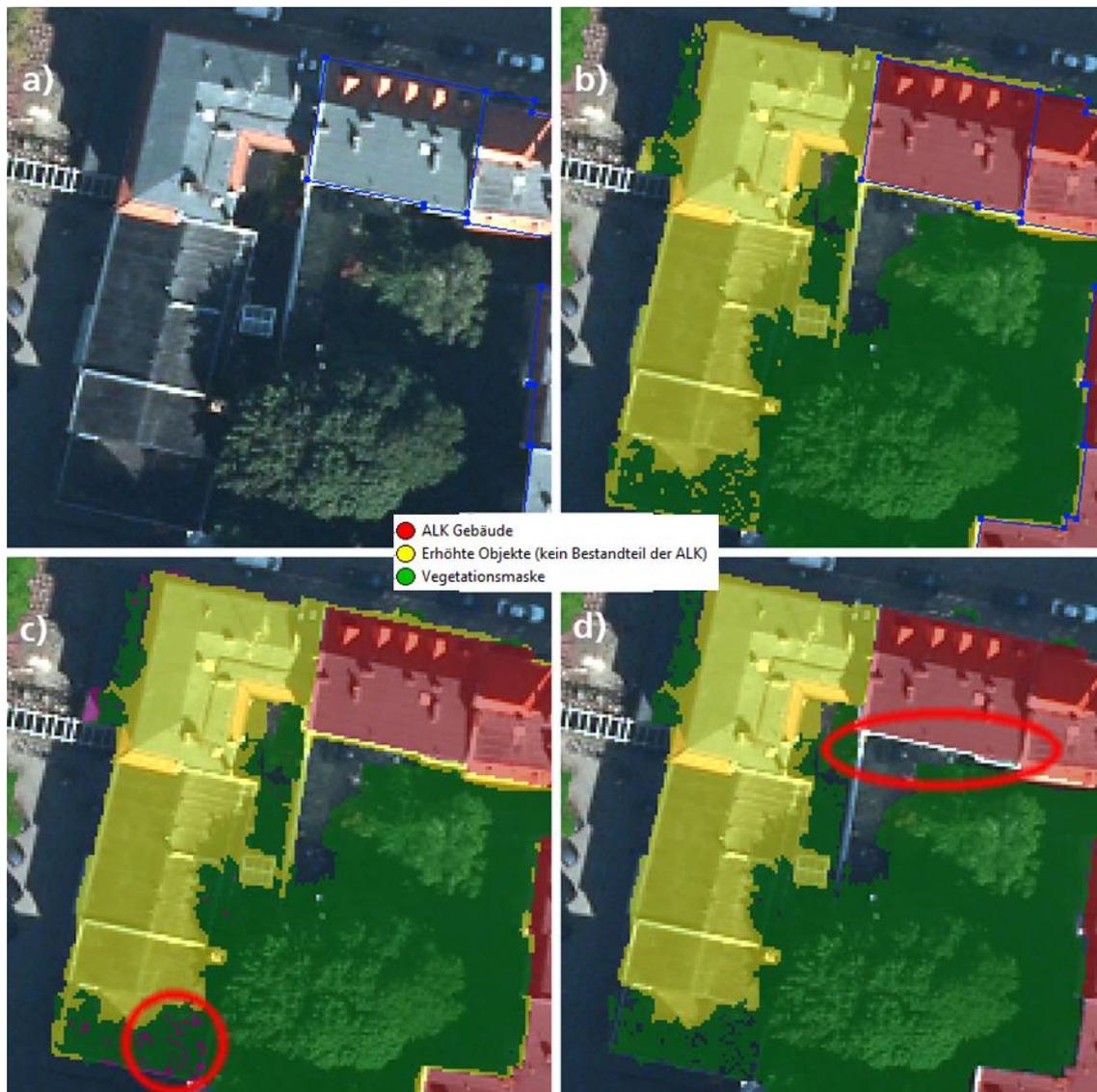


Abb. 46 Bereinigung der Klasse Gebäude (kein Bestandteil der ALK) mithilfe von geometrischen Eigenschaften:  
c) Flächengröße, d) Breite und Rechtwinkligkeit

#### 4.5.7 Begrünte und von der Vegetation verdeckte Dachflächen

Dachgärten nehmen in Deutschland stetig an Beliebtheit und Bedeutung zu. So stieg der Anteil von intensiv genutzten begrünten Dachflächen zwischen 2008 und 2010 von 11,4 % auf 16,9 % an – bezogen auf begrünte Dachflächen in Deutschland (FACHVEREINIGUNG BAUWERKSBEGRÜNUNG, 2011: 6). Es ist von hohem Interesse diese Dachflächen automatisiert zu detektieren um z. B. potenzielle Flächen für das sog. *urban gardening* oder für die gezielte Gebäudebegrünung bestimmen zu können. Begrünte Dächer üben ferner einen positiven Einfluss auf verschiedene Umweltaspekte wie das Stadtklima oder die Regenwassernutzung aus. Bisher besteht in Berlin kein flächendeckender Überblick über den Bestand an begrünten Dachflächen.

In der Klasse *begrünte Dächer* wird nicht nach unterschiedlichen Intensitäten der Dachbegrünung wie etwa intensiv genutzten Dachgarten oder rein bemoosten Dachflächen unterschieden. Das Ziel

dieses Arbeitsschrittes ist ausschließlich die Ersterfassung in einem das gesamte Untersuchungsgebiet umfassenden Ansatz. Die alleinige Verschneidung der Vegetationsmaske mit dem vorhandenen ALK Gebäude-Layer ergibt noch kein endgültiges Ergebnis, da auch dicht an den Gebäuden stehende Bäume, die Teile der Dachflächen verdecken, mit erfasst werden. Genau diese Flächen werden aber später bei der Korrektur der Höhenberechnungen für die teils durch Vegetation verdeckten Dachflächen benötigt. Eine vorläufige Klassifizierung der begrünter Dachflächen durch die Verschneidung mit dem ALK Gebäude-Layer wird in Abb. 47 dargestellt.

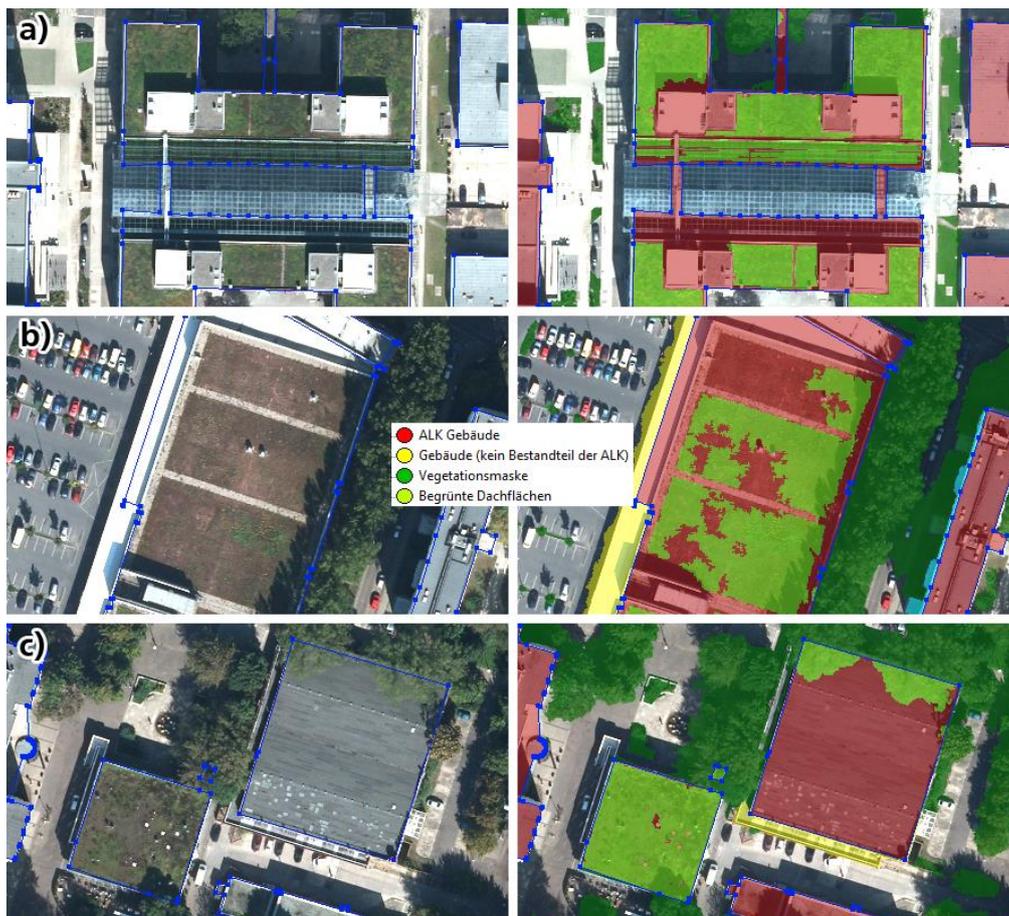


Abb. 47 Begrünte Dachflächen durch die Verschneidung der Vegetationsmaske mit dem ALK-Gebäude-Layer

In Abb. 47 ist deutlich zu erkennen, dass die Klassifizierung von begrünten Dächern an vielen Stellen sehr gut funktioniert, da diese Flächen einen hohen NDVI-Wert aufweisen, wodurch sie in die Vegetationsmaske aufgenommen werden (Beispiel a). An den Stellen, wo die Dachbegrünung weniger vital ist, werden nur einige unregelmäßige Teile erfasst. Da, wo der NDVI-Wert den Schwellenwert nicht überschreitet, wird keine Vegetationsmaske generiert, weshalb auch keine begrünten Dachflächenbereiche klassifiziert werden (Abb. 47, Beispiel b). Im Beispiel c) ist hingegen zu erkennen, dass Dachteile, die von angrenzenden Bäumen verdeckt werden, vorerst als begrünte Dächer klassifiziert werden. In den Beispielen a) und b) werden ebenfalls Diskontinuitäten in den Schattenbereichen deutlich.

Um die Vegetationsobjekte, die Dachteile verdecken und keine begrünten Dachflächen darstellen, zu klassifizieren, wird die Klasse *begrünte Dächer* auf die Unterschiede im nDOM und im NDVI zu den angrenzenden Objekten untersucht. Weisen die Objekte der Klasse *begrünte Dächer* nur einen geringen Höhenunterschied zu den benachbarten Baumobjekten und einen höheren zu den Gebäudeobjekten sowie sehr ähnliche spektrale Eigenschaften zu den Bäumen auf, werden sie iterativ in die Klasse *Vegetation verdeckt Dachteile* verschoben. In Abb. 48 ist anhand des beigefügten nDOM-Abbildes die Notwendigkeit dieser Klassenbildung deutlich zu erkennen. Für den Fall, dass sie als Gebäude klassifiziert bleiben, würden sie zur Verfälschung der durchschnittlichen Gebäudehöhe führen.

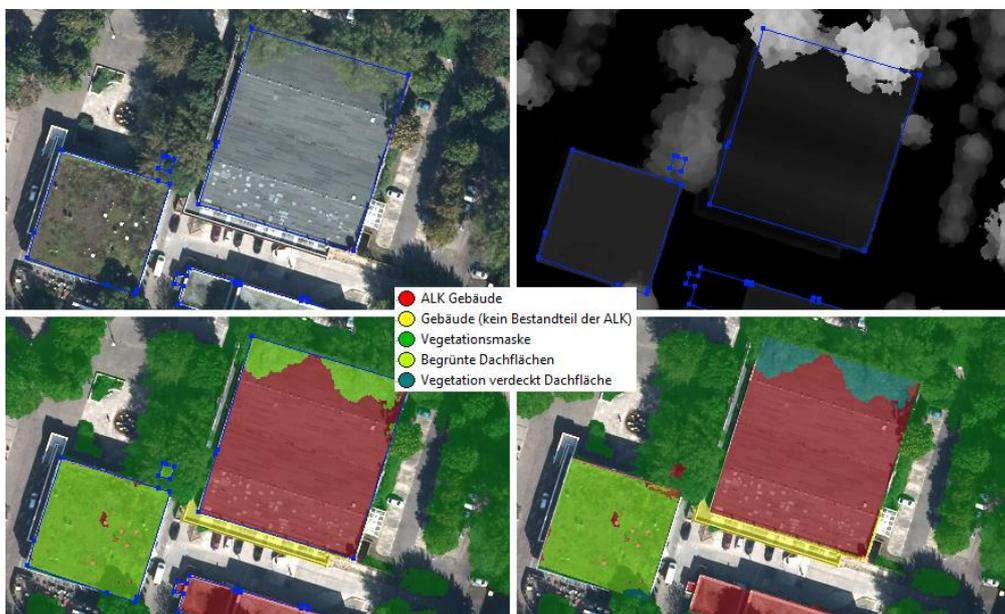


Abb. 48 Klassifizierungsergebnis der Klasse ‚Vegetation verdeckt Dachteile‘ (unten rechts)

Die klassifizierten *begrünten Dächern* weisen noch einige weitere Fehler, insbesondere in verschatteten Bereichen auf, wo der NDVI-Wert unter dem geforderten Schwellenwert liegt. Aus diesem Grund werden die Nachbarsegmente der vorhandenen Objekte der Klasse *begrünte Dächer* auf Ähnlichkeiten untersucht. An dieser Stelle wird nur ein einfacher Vergleich der spektralen Eigenschaften durchgeführt. Ein Vergleich der Geometrieigenschaften der betroffenen Dachteilflächen und eine Wahrscheinlichkeitsanalyse lässt verbesserte Klassifizierungsergebnisse erwarten, wird aber aus zeitlichen Gründen nicht verfolgt. In Abb. 49 ist das Ergebnis des Nachbarschaftsvergleichs visualisiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die begrünten Dachflächen besser wiedergegeben werden, jedoch weiterhin fehlende Erfassung in Schattenbereichen aufweisen.



Abb. 49 Verbessertes Klassifizierungsergebnis der begrünten Dachflächen basierend auf spektraler Nachbarschaftsanalyse (rechts)

Teile der begrünten Dachflächen werden - zwar in geringerem Ausmaß - in der Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* erfasst. Es ist zu erwarten, dass an einigen Neubauten gezielt Naturdächer mit Bewuchs oder Dachgärten angelegt worden sind oder dass Begrünung an Überdachungen, die nicht in der ALK verzeichnet sind, vorhanden ist. Für eine genaue Klassifizierung der begrünten Dachflächen außerhalb der ALK bedarf es anderer Methoden und weiterer Eigenschaften, um eine Unterscheidung zu Baumkronen zu gewährleisten. Zuerst wird nach Vegetationsobjekten gesucht, die vollständig durch die Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* umschlossen sind. An dieser Stelle bleiben Baumobjekte, welche die Dachflächen verdecken, unberührt. Um eine Klassifizierung von eventuell auftretender Vegetation in den Innenhöfen zu vermeiden, wird des Weiteren angenommen, dass die begrünten Dachflächen eine andere Textur (geringe Standardabweichung der nDOM- und Slope-Werte) als Baumflächen, sowie auch einen eher geringen Höhenunterschied zu angrenzenden Objekten der Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* aufzeigen. Stark divergierende Höhen- und Slope-Werte sind charakteristisch für die Baumkronen. Ein beispielhaftes Klassifizierungsergebnis der *begrünten Dächer (kein Bestandteil der ALK)* ist in der Abb. 50 dargestellt. In diesem Fall betrifft es eine Überdachung, die nicht in der ALK verzeichnet wird (vgl. Bildbeispiel links) und eine begrünte Fläche darstellt.



Abb. 50 Klassifizierungsergebnis von begrünten Dachflächen (kein Bestandteil der ALK) (rechts)

#### 4.5.8 Unterteilung der Dachflächen

Die bisher erstellte Gebäudemasken ist vollständig, weist jedoch eine viel zu feine Segmentstruktur auf. Für verschiedene Nutzanwendungen ist es von Wichtigkeit, dass die Gebäudeobjekte wie auch die Vegetationsobjekte nach ihren Höhenstrukturen aufgeteilt werden. Oft kommt es vor, dass die Gebäudeobjekte in der ALK nicht differenziert genug dargestellt werden, d.h. die divergierende Stockwerkanzahl innerhalb eines Gebäudes ist nicht in den Polygonattributen abgespeichert.

Daher ist eine Unterteilung der Klasse ALK *Gebäude* in sinnvolle durch die Geometrie und Höhenunterschiede vorgegebene Dachteile notwendig. Die dafür genutzte Methodik wird im Rahmen der Dissertation von Frau Poznanska am DLR (Einreichung an der FU Berlin) entwickelt, ist aber noch in einem Evaluierungs- und Optimierungsstadium.

Als Grundlage für die Dachflächenunterteilung wird eine erneute MRS Segmentierung, bei der der Ausrichtungs-Layer (*Aspect*) die höchste Gewichtung bekommt, durchgeführt. Ebenfalls fließt das nDOM mit einer relativ hohen und die spektralen Layer mit der niedrigsten Gewichtung in die Segmentierung mit ein. Der *Aspect*-Layer gibt die Ausprägung der Dachgeometrien sehr gut wieder, jedoch tauchen einige Probleme bei den nördlich ausgerichteten Dächern auf, die sowohl Werte in den Bereichen um 0 bis 15 Grad und gleichzeitig um 345 bis 360 Grad aufweisen. Dieses ‚Rauschen‘ hat einen Einfluss auf die Segmentstruktur. Aus diesem Grund müssen die spektralen Layer in die Segmentierung mit einfließen. Dies begünstigt zwar das Zusammenwachsen der Segmente auf den problematischen nördlichen Dachteilen, steigert aber gleichzeitig die spektrale Empfindlichkeit der MRS, wodurch Segmentkanten entlang der Schattenbereiche gebildet werden. Das Ergebnis der MRS ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**<sup>1</sup> dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass neben der recht sauberen Geometrieerfassung der Dachkanten noch Störungen in den Schattenbereichen auftreten. Kleine, aber sich spektral stark abgrenzende Elemente wie Dachfenster oder Schornsteine werden ebenfalls erfasst. Diese Dachelemente werden in einem weiteren Schritt entfernt, was zu einem verbesserten Ergebnis der Dachgeometrien führt.

Die Beseitigung der kleinen Objekte erfolgt mithilfe der sog. *Image Object Fusion*, welche zu den *Region Growing* Verfahren zählt. Diese Methode ermöglicht eine genaue Definition für das Verschmelzen von benachbarten Objekten. Es können Parameter für die sog. Initial-Zellen sowie für die Kandidat-Objekte definiert werden (*Fitting Functions*). Des Weiteren werden Bedingungen für den Wachstumsprozess bestimmt, dazu gehören u.a. der *Fitting Mode*, die *Fitting Function Threshold* sowie die *Weighted Sum*, die eine Gewichtung der gewählten Parameter ermöglicht (TRIMBLE ECOGNITION, 2010: 85ff). Diese komplexe Bestimmung von Parametern und Wachstumsbedingungen ermöglicht gute Resultate. Das Ergebnis der Beseitigung von kleinen Objekten ist in Abb. 52 veranschaulicht. Es ist deutlich zu erkennen, dass diese relativ zuverlässig in die benachbarten Dachsegmente eingegliedert werden. Es bleiben lediglich Segmente erhalten, die den maximal zulässigen Schwellenwert für die Größe überschreiten (z. B. große Dachfenster).



Abb. 51 Ergebnis einer erneuten MRS als Grundlage für weitere Unterteilung der Dachflächen



Abb. 52 Ergebnis der bedingten Image Object Fusion: kleine Objekte werden mit den angrenzenden Dachteilsegmenten verschmolzen

Um Gebäudeteile mit ausgeprägter Geometrie oder starken Höhendifferenzen zu unterteilen, kommt des Weiteren die Standardabweichung des nDOM zum Einsatz. Dies wird jedoch nur für die flachen Dächer (mit einem Wert für *Slope-Layer* < 7 Grad) angewendet. Diese Gebäude werden nochmals unter starker Gewichtung des nDOM und *Slope-Layers* segmentiert, sodass unterschiedliche Gebäudehöhenstufen besser segmentiert werden (Abb. 53). Es ist zu erkennen, dass trotz einer relativ guten Unterteilung in Höhenstufen noch viele spektrale Störungen die Segmentform prägen.

Die so erfassten Gebäudeobjekte und Dachteile werden automatisiert und samt den Höhenattributen in zwei Versionen (zusammengefasst und als einzelne Dachteile) exportiert. Es ist zu beachten, dass die Gebäudehöhe pro erfasstem Gebäudesegment gemittelt ausgegeben wird (*Mean of nDOM*). Ebenfalls werden Attribute für den minimalen und maximalen nDOM-Wert, der

innerhalb des Segmentes vorhanden ist (*Min & Max of nDOM*), in die Tabelle geschrieben. Nur in Einzelfällen, z. B. bei optimal gestalteten flachen Dächern entspricht der durchschnittliche Höhenwert der absoluten Gebäudehöhe. Bei den für Berlin typischen Satteldächern ist dies nicht der Fall.

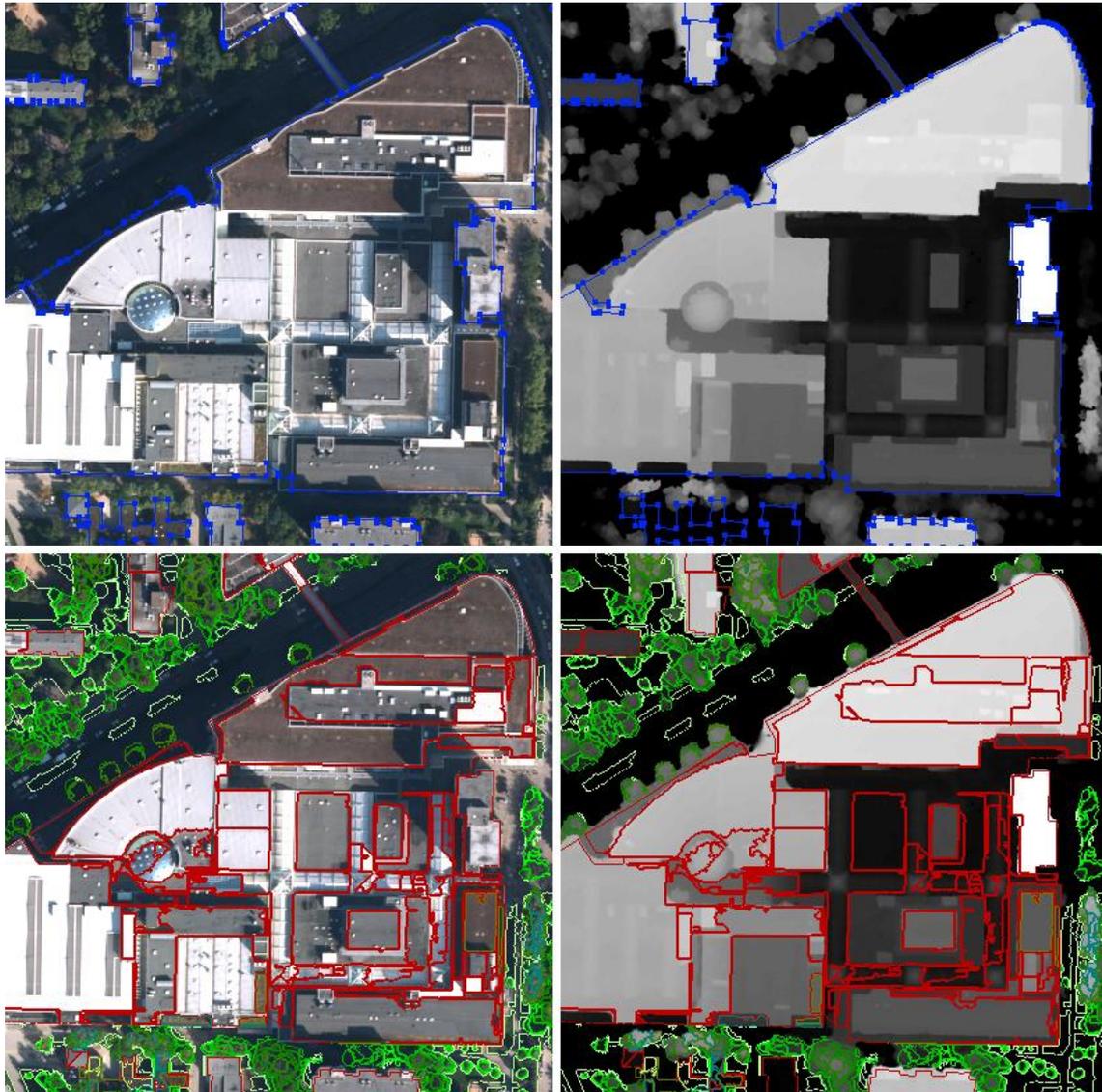


Abb. 53 Unterteilung von Gebäudeobjekten mit ausgeprägten Höhenunterschieden (unten);  
Gebäude als ein Objekt in der ALK (oben)

## 5 Ergebnisse – Qualität der Erfassung

Die entwickelte und für Berlin optimierte Regelbasis für die automatisierte objektbasierte Analyse und Erfassung der Gebäude- und Vegetationsobjekte der Berliner Innenstadt (Phase I) wurde in allen zwölf im Projektgebiet enthaltenen Bezirken angewendet. Insgesamt sind das 54 Prognoseraum-Flächen (*ProgRaum*-Flächen), die der Analyse unterzogen wurden. Die benötigte Rechenzeit betrug ca. 12 Tage (auf einem Rechner mit 24 GB RAM, 64-Bit Betriebssystem und einem 2,93 GHz Intel Core i7 Prozessor). Die Rechenzeit für den Brandenburger Teil von Projektphase II betrug 22 Tage. Die Eingabe der Daten, die Analyse und der Export der Ergebnisse erfolgen dabei automatisch in einem Stapelverarbeitungsprozess.

Die resultierenden Gebäude- und Vegetationsobjekte sind zufriedenstellend erfasst worden (Abb. 60 bis Abb. 63), zeigen jedoch auch gewisse Schwächen. Auf die Qualität der Ergebnisse wird nachfolgend näher eingegangen. Grundsätzlich kann jedoch festgestellt werden, dass die Qualität der Objektextraktion in Phase II aufgrund der radiometrisch und geometrisch schlechteren Eingangsdaten im Vergleich zu Phase I abfällt.

### 5.1 Gebäudeobjekte

Die Klasse *Gebäude* umfasst insgesamt zehn unterschiedliche Klassen, die einerseits auf die vorhandenen ALK-Objekte zurückgreifen, andererseits aber auch die nicht in der ALK verzeichneten Objekte mit einbeziehen. Bei den innerhalb des Projektes angewendeten Methoden handelt es sich ausschließlich um rechnergestützte und automatisierte Verfahren der Objektextraktion, was einen großen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat.

Die Vollständigkeit und Korrektheit der erfassten Gebäude innerhalb der ALK-Polygone kann als sehr gut betrachtet werden, da hier auf die vorhandene ALK-Datei zurückgegriffen wird. Auf eine gesonderte Genauigkeitsuntersuchung kann an dieser Stelle verzichtet werden, da die Erfassungsqualität der Korrektheit der ALK bzw. der ALKIS entspricht.

Eine Genauigkeitsuntersuchung der Gebäudeobjekte, die kein Bestandteil der ALK sind, konnte aufgrund fehlender Referenzdaten nur in Stichproben visuell durchgeführt werden. Die Ergebnisse für Projektphase I können nach visueller Prüfung als sehr gut bewertet werden. Überwiegend temporäre Objekte, wie z. B. Zirkuszelte oder große Baucontainer, werden inkorrektweise mit erfasst, was sich aber ohne manuelle Nachbearbeitung nicht vermeiden lässt. Die Objekte der Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* werden als zusammengefasste Segmente exportiert, da oft aufgrund von sehr heterogenen Strukturen (z. B. an einer Baustelle) keine korrekte Segmentbildung und Höhenbestimmung gewährleistet werden kann.

Aufgrund der schlechteren Auflösung der Ausgangsdaten von Projektphase II und der dadurch bedingenden schlechteren Qualität von DOM und TOM ist auch die Vollständigkeit und Korrektheit der Ergebnisse von Phase II im Vergleich zu Phase I geringer. Durch die signifikant schlechtere

Qualität des DOM/nDOMs und die niedrigere Auflösung werden insbesondere kleine Gebäudeobjekte nicht oder mit tendenziell zu geringen Höhen erfasst.

Für die Überprüfung der Ergebnisse wurde ein Mischgebiet als Referenzgebiet ausgewählt und die klassifizierten Daten mit Luftbilddaten visuell verglichen und bewertet.



Abb. 54 Untersuchungsgebiet in Berlin Mitte – Wedding, Phase II

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Berlin Mitte im Ortsteil Wedding und erstreckt sich vom Waidmannsluster Damm im Nordwesten bis zum Städtischen Friedhof Wittenau im Südosten.

Diese visuelle Stichprobe zur Untersuchung der Klassifikationsgenauigkeit ergab eine Korrektheit der klassifizierten Objekte (*Gebäude nicht ALK*) von über 90%. Es traten sehr wenige Fehlklassifizierungen auf, beispielsweise wurde ein Gebäude als erhöhte Vegetation klassifiziert (Abb. 55, rechts). Die Vollständigkeit für *Gebäude und Gartenhäuschen* welche nicht in der ALK sind, wurde ebenfalls visuell für den Testausschnitt bestimmt; zu beachten ist, dass die visuelle Prüfung z.B. der Klasse *Gartenhaus* aufgrund der geringen Auflösung nicht als vollständig korrekt angesehen werden kann; eine absolute Referenz für die Bilddaten aus dem Jahr 2009 konnte aufgrund des Zeitversatzes nicht aufgenommen werden.

In dem ausgewählten Gebiet wurden exemplarisch 838 Gartenhäuschen gezählt, davon wurden 621 Lauben (75 %) klassifiziert, 197 Gartenhäuschen wurden nicht erfasst.

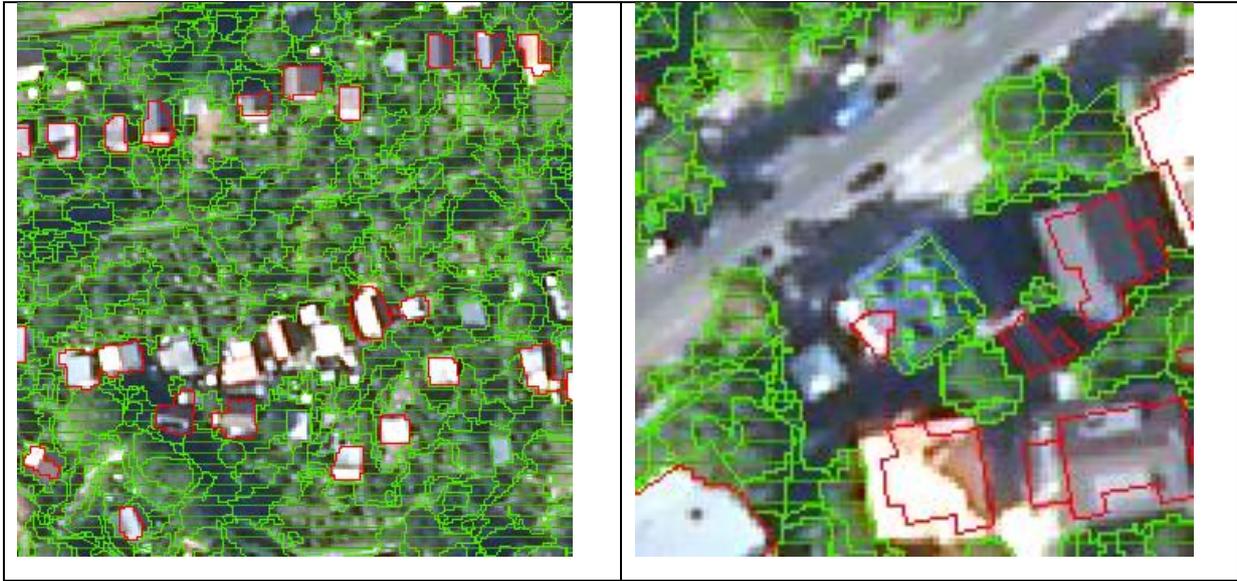


Abb. 55 Links: Klassifizierte und nicht klassifizierte Gartenhäuschen, rechts: Das Gebäude im Zentrum größtenteils als Vegetation klassifiziert

In den folgenden Tab 2 bis 4 werden die Anzahl der erfassten Gebäudeobjekte sowie die Anzahl und der Anteil der Objekte der Klasse *Gebäude (kein Bestandteil der ALK)* zusammengestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass innerhalb des Projektgebietes relativ viele Gebäudeobjekte nicht in der ALK verzeichnet werden. Für Projektphase I betrifft es im Durchschnitt 273 Gebäudeobjekte (ausgenommen Gartenhäuser) pro Bezirk, was einen durchschnittlichen Anteil an der Gesamtheit der erfassten Gebäudeobjekte von ca. 1,6 % ausmacht, in Phase II sind es nur noch 0,75 %. Die geringere Vollständigkeit trägt zu diesem um ca. Faktor 2 geringeren Anteil an Gebäuden – nicht in ALK im Vergleich zur Phase I (siehe folgende Tabellen) bei.

Besonders auffällig ist der Bezirk Marzahn-Hellersdorf, wo insgesamt 6,4 % der detektierten Gebäudeobjekte kein Bestandteil der ALK sind. Dies wird zum einen durch die kleine, nicht repräsentative Fläche des Bezirkes in Phase I, die im Projektgebiet abgedeckt wird, verursacht. Zum anderen schließt sie zum größten Teil ein industrielles Gebiet ein, welches viele Überdachungen sowie neu erstellte Lagerhallen enthält, die (bisher) nicht in der ALK verzeichnet sind (Stand 06.2012) (Abb. 57).

## Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen im Berliner Stadtgebiet

Tab. 2 Zusammenstellung der erfassten Gebäudeobjekte (Bestandteil der ALK) und Gebäudeobjekte (kein Bestandteil der ALK), Projektphase I

Bezirk	Erfasste Gebäudeobjekte gesamt	davon		
		Gebäudeobjekte (nicht in der ALK)	Gebäudeobjekte (nicht in der ALK) ohne Gartenhäuser	Anteil Gebäudeobjekte (nicht in der ALK) ohne Gartenhäuser [%]
Mitte	21.903	2.141	406	1,85
Friedrichshain-Kreuzberg	15.509	316	196	1,26
Pankow	20.081	3.320	220	1,10
Charlottenburg-Wilmersdorf	33.588	7.865	300	0,89
Spandau	19.463	1.913	153	0,79
Steglitz-Zehlendorf	41.850	4.826	328	0,78
Tempelhof-Schöneberg	32.856	6.082	363	1,10
Neukölln	38.654	8.761	487	1,26
Treptow-Köpenick	34.653	7.046	312	0,90
Marzahn-Hellersdorf	1.859	204	119	6,40
Lichtenberg	17.408	1.749	315	1,81
Reinickendorf	7.704	1.794	78	1,01
SUMME	285.528	46.017	3.277 (Ø 273)	Ø 1,6

Tab. 3 Zusammenstellung der erfassten Gebäudeobjekte (Bestandteil der ALK) und Gebäudeobjekte (kein Bestandteil der ALK), Projektphase II – Berlin

Bezirk	Erfasste Gebäudeobjekte gesamt	Gebäudeobjekte (nicht in der ALK)	Gebäudeobjekte (nicht in der ALK) ohne Gartenhäuser	Gebäudeobjekte (nicht in der ALK) ohne Gartenhäuser [%]
Mitte				
Friedrichshain-Kreuzberg				
Pankow	71.215	10.244	312	0,44
Charlottenburg-Wilmersdorf				
Spandau	50.141	2.354	425	0,85
Steglitz-Zehlendorf	12.479	768	312	2,50
Tempelhof-Schöneberg	13.608	438	100	0,73
Neukölln	1.053	168	4	0,38
Treptow-Köpenick	48.272	987	146	0,30
Marzahn-Hellersdorf	53.461	597	280	0,52
Lichtenberg	9.327	573	51	0,55
Reinickendorf	62.696	4.109	265	0,42
SUMME	251.037	20.238	1.895	Ø 0,75

Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen im Berliner Stadtgebiet

Tab. 4 Zusammenstellung der erfassten Gebäudeobjekte (Bestandteil der ALK) und Gebäudeobjekte (kein Bestandteil der ALK), Projektphase II - Brandenburg

Landkreis	Erfasste Gebäudeobjekte gesamt	Gebäudeobjekte (nicht in der ALK/ALKIS)	Gebäudeobjekte (nicht in der ALK/ALKIS) ohne Gartenhäuser	Gebäudeobjekte (nicht in der ALK/ALKIS) ohne Gartenhäuser [%]
Potsdam	21.210	181	140	0,66
Havelland	26.768	227	150	0,56
Oberhavel	43.725	344	272	0,62
Barnim	59.990	462	256	0,43
Märkisch-Oderland	45.078	129	0	0,00
Oder-Spree	26.971	99	98	0,36
Dahme-Spreewald	34.756	225	155	0,45
Teltow-Fläming	19.834	33	21	0,11
Potsdam-Mittelmark	37.830	251	147	0,39
SUMME	164.469	1.951	1.239	Ø 0,75



Abb. 56 Erfasste Gebäudeobjekte in Berlin Marzahn-Hellersdorf (Ausschnitt)

Die Unterteilung von Gebäuden in sinnvolle Dachteile, die sich nach der Dachgeometrie ausrichten, funktioniert teilweise nur mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit. Die Empfindlichkeit der MRS Segmentierung unter Zuhilfenahme von spektralen Kanälen lässt die Ergebnisse insbesondere in den verschatteten Bereichen eher unzuverlässig erscheinen. An der Optimierung der Methodik wird weiterhin gearbeitet.

Für Phase I wurde die Genauigkeit der Erfassung der begrünten Dächer erhoben, sie wurden ebenfalls zufriedenstellend und zum größten Teil korrekt erfasst. Die Vollständigkeit der Extraktion ist aber durch die Schattenbereiche gestört. Im Rahmen einer bei SenStadtUm durchgeführten relativen Genauigkeitsuntersuchung an insgesamt 60 ausgewählten begrünten Dachflächen konnte eine hohe Genauigkeit hinsichtlich Vollständigkeit und Korrektheit der Ergebnisse (Phase I) bereits nachgewiesen werden. Die Vollständigkeit der Erfassung wurde geschätzt und als Prozentwert ausgegeben. Ungefähr ein Drittel der korrekt detektierten Flächen weisen eine Vollständigkeit von unter 50 % und rund die Hälfte eine Vollständigkeit von mehr als 75 % auf. Unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Störfaktoren bei der Klassifizierung, wie Schatten oder kleineren Lüftungsausgängen, die mit erfasst werden, ist dieses Ergebnis als gut zu bewerten.

## 5.2 Vegetation

Die Klasse *Vegetation* enthält neun Höhenstufen. Diese werden ebenfalls mit den Höhenattributen exportiert, sodass auch in der Klasse *Vegetation* eine eigenständige Höhenunterteilung vorgenommen werden kann. Die zugrundeliegende Vegetationsmaske repräsentiert sehr genau die vor Ort vorhandene Vegetation, wobei die Ergebnisse aus Phase II gegenüber der Phase I abfallen. Die Unterteilung in die Höhenstufen und Strukturen ist sehr genau und naturgetreu. Das Erscheinungsbild der Segmente ist homogen.

In Phase I kommt es lediglich in den interpolierten nDOM-Bereichen zu Fehlklassifizierungen der *Vegetation* (Abb. 57). Dies liegt jedoch eindeutig an den Eingangsdaten und nicht an der Klassifizierungsregel. Diese durch die Datengrundlage bedingten Fehler lassen sich nicht an allen Stellen korrigieren, auch nicht unter Zuhilfenahme der *Count*-Maske oder des NDVI. Vereinzelt kommt es vor, dass noch positive NDVI (Abb. 57, b) und hohe *Count*-Werte (Abb. 57, c und e) vorkommen, vor allem in dunklen Schattenbereichen und an Hauskanten (Sichtschatten). Treten diese Fehler (oft verstärkt durch Interpolation) an hohen Häusern auf, können Vegetationshöhen von über 40 m ausgegeben werden (Abb. 57, d und f), was die Realität deutlich übersteigt. Damit solche Fehler nicht in nachfolgenden Verfahren zum Tragen kommen, können sie nur durch manuelle Korrekturen behoben werden.

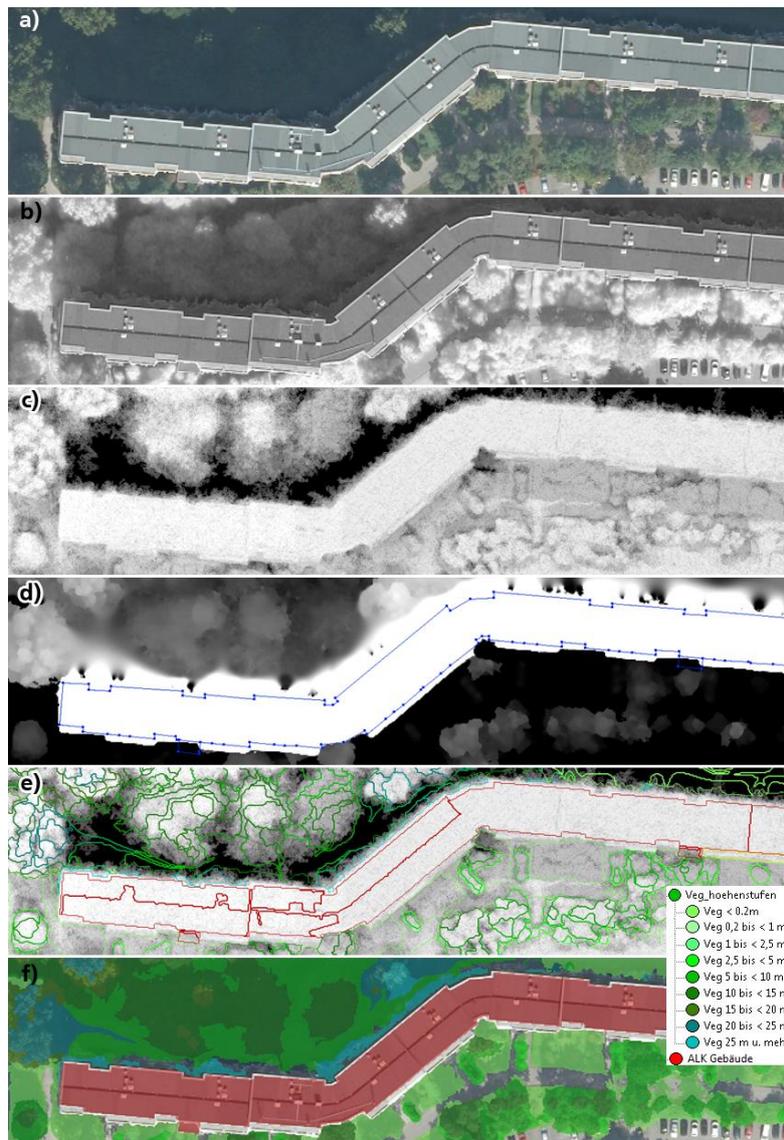


Abb. 57 Fehlklassifizierung der Vegetationshöhenstufen, bedingt durch Interpolation der (Sicht-)Schattenbereiche im DOM / nDOM

In Phase Phase II wurde Vegetation im Referenzgebiet (Abb. 58) zu über 90 % richtig klassifiziert. Auch hier ist die Klassifikationsgenauigkeit als sehr gut zu bewerten. Im Referenzgebiet wurden sämtliche Bäume geprüft, es wurden nur 12 Bäume nicht als erhöhte Vegetation erfasst, was einer Vollständigkeit deutlich über 90 % entspricht.

Niedrige Vegetation und Rasen wurden jedoch teilweise in Schattenbereichen schlechter detektiert und auch Flächen, die aufgrund der Jahreszeit des Aufnahmezeitpunktes der Ausgangsdaten, bereits vertrocknet waren, konnten nicht vollständig detektiert werden. Um dieses Problem zu bereinigen, wären Aufnahmen aus anderen Zeitpunkten notwendig. So sind bis zu etwa 15 % der Rasenflächen nicht klassifiziert worden.

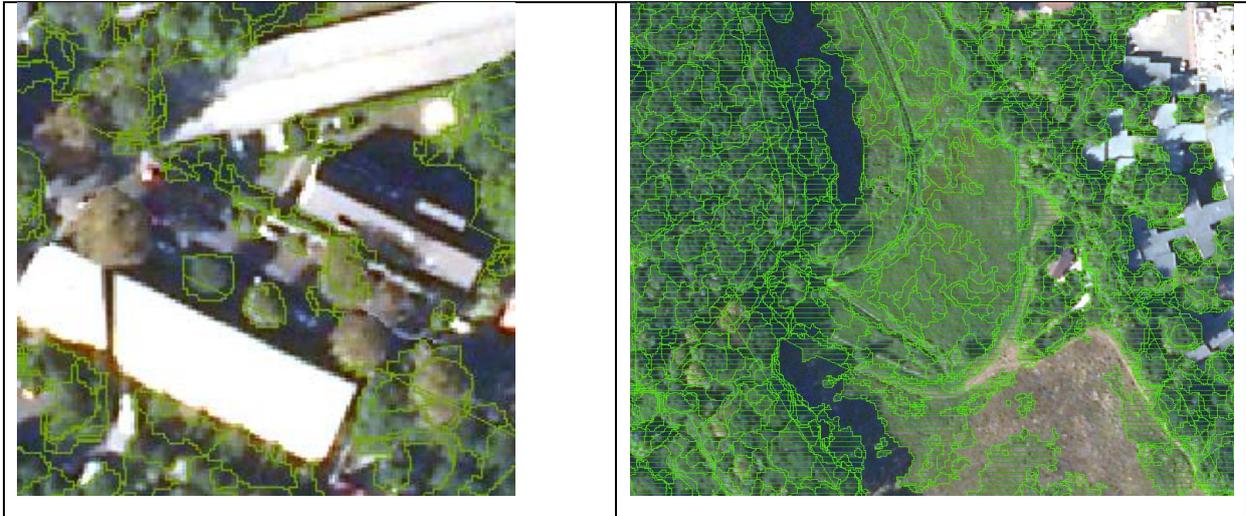


Abb. 58 Links: Nicht klassifizierte Bäume; Rechts: Problem Schattenbereich bzw. Trockenheit bei der Detektion von Rasen (Phase II)

### 5.3 Export der Ergebnisse und Erstellung einer Geodatenbank

Um die Integration der Ergebnisse in eine konsistente Geodatenbank (GDB) zu gewährleisten, wurden diese unter Berücksichtigung einer einheitlichen Benennung mit den entsprechenden Attributen automatisch exportiert. Bei dem durchgeführten Exportvorgang kann zwischen zwei unterschiedlichen Kanten-Modi für die Polygone gewählt werden. Diese können entweder gerastert oder geglättet ausgegeben werden. Bei den gerasterten Kanten wird jede Polygonstützstelle mitexportiert, was einerseits eine pixelgenaue Datenausgabe garantiert, andererseits aber eine fraktale Polygonstruktur verursacht. Bei den geglätteten Kanten handelt es sich um simplifizierte Polygone, die zwar ein homogenes Bild darstellen, jedoch aufgrund der Vereinfachung zu geringen Ergebnisverfälschungen führen können. Keiner der gegebenen Exportmodi ist optimal. Aufgrund der geringeren Datenmenge und des homogeneren Erscheinungsbildes der Ergebnisse, wurde die geglättete Polygonvariante als finaler Export verwendet.

Beim Export der Ergebnisse können alle in eCognition verfügbaren *Features* bzw. Statistiken als Attribut an die Ergebnisse angehängt werden. In eCognition erfolgt also nicht nur die automatisierte Objektextraktion, sondern auch die Vergabe von relevanten Attributen. Diese Zuweisung einer semantischen Bedeutung und von Attributen an die erstellten Polygone ist für weiterführende urbane Analysen von großem Nutzen.

Die exportierten Objekte mit der Attributtabelle werden in ArcGIS weiterverarbeitet. Die Objekte aus den *ProgRaum* Flächen werden auf die Bezirksflächen zusammengefasst. Für jeden Bezirk wurde eine Geodatenbank (GDB) erstellt, in welcher die Gebäude- und Vegetationsobjekte mit einem eindeutigen Schlüssel gespeichert sind. Der Objektschlüssel besteht aus der Bezirksnummer, einer ObjectID (diese wird beim Import in die GDB für jedes Objekt erstellt), dem ALK-Objektschlüssel und einer Variablen für die Objektklasse. Auf diese Weise entsteht für jedes einzelne Element im

gesamten Projektgebiet ein eindeutiger Schlüssel. Bei den Gebäudeobjekten, die kein Bestandteil der ALK sind, wird anstelle des ALK-Objektschlüssels eine fortlaufende Nummerierung angewendet.

Zu den weiteren Attributen, die in der GDB festgehalten werden, zählen der Klassenname (verwendet zur Klassifizierung in eCognition), die maximale Geschossigkeit, Mean-, Max-, Min-nDOM, der Objektschlüssel aus dem OSKA, der Blockschlüssel sowie die Polygongröße und –länge (Abb. 59). Diese komplexe Attributierung der Objekte in der GDB erlaubt nicht nur deren genaue Lagezuordnung nach Bezirk, Block und Objekt, sondern auch die Beschreibung von deren Eigenschaften anhand der Klassenzugehörigkeit sowie von Höhen- und Geometrieigenschaften. Für die Vegetationsobjekte erfolgt eine Verschneidung mit der Blockfläche sowie mit dem vorhandenen Straßenbaumkataster. Nur die Vegetationsobjekte, die Straßenbaum-Punkte schneiden, erhalten einen eindeutigen Baumschlüssel.

Die Integration der Ergebnisse in die GDB sowie die Verschneidungen und die Erstellung der Objektschlüssel erfolgen im ArcGIS *ModelBuilder*, sodass für jede der zwölf Bezirks-GDB eine einheitliche Datenstruktur und eine eindeutige Verschlüsselung der Objekte gewährleistet sind.

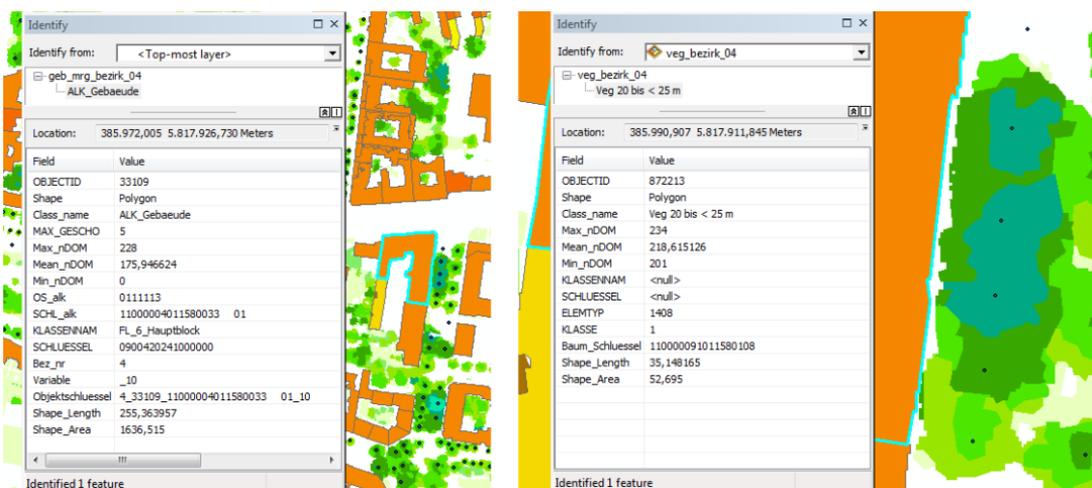


Abb. 59 Attribute in der GDB: Gebäudeattribute (links), Vegetationsattribute (rechts)

Nachfolgend werden beispielhafte Objektextraktionsergebnisse in Karten visualisiert.

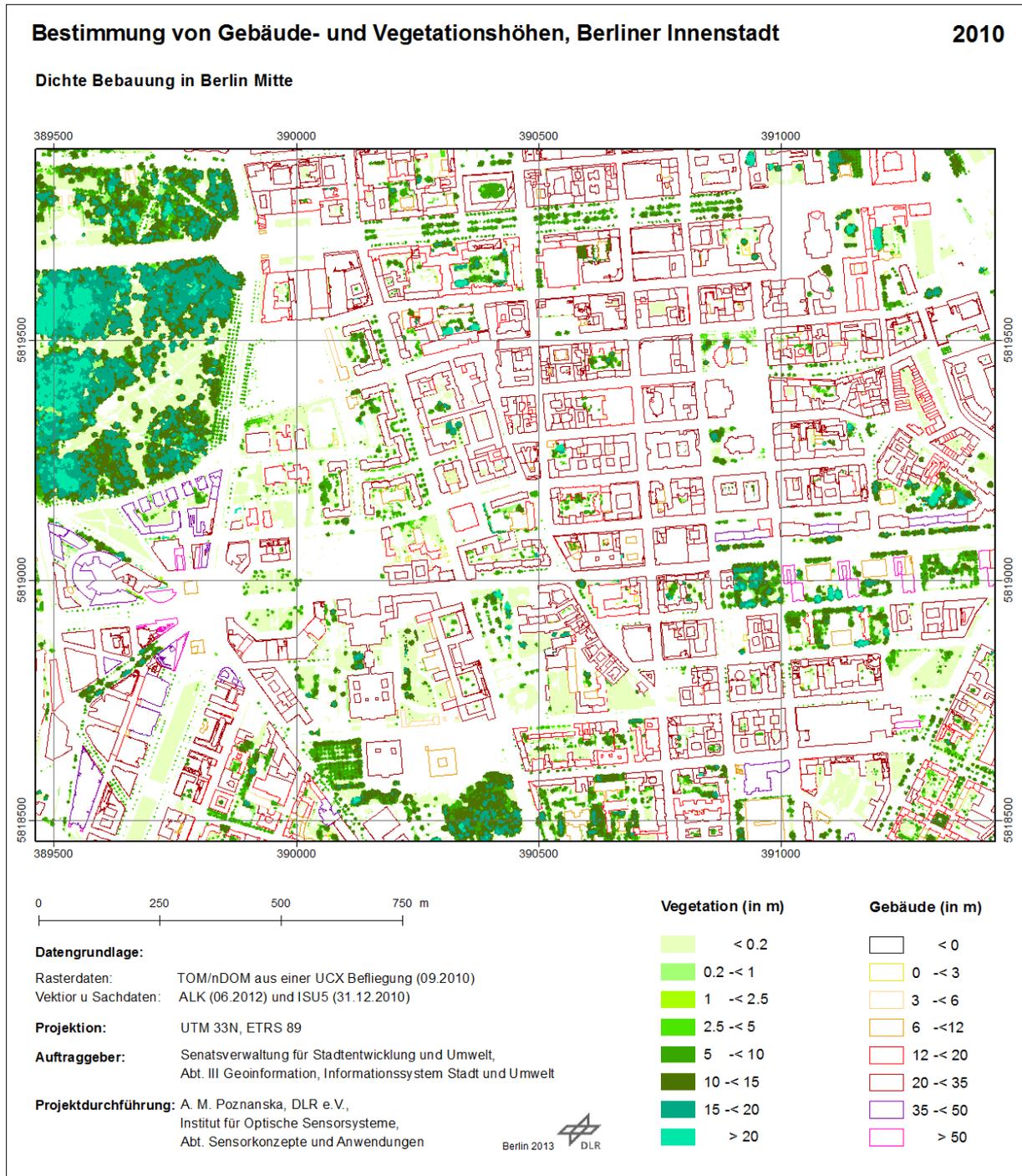


Abb. 6o Klassifizierungsergebnis in einem dicht bebauten Gebiet von Berlin-Mitte in einer Kartendarstellung

Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen, Berliner Innenstadt

2010

Lockere Bebauung in Berlin Steglitz-Zehlendorf

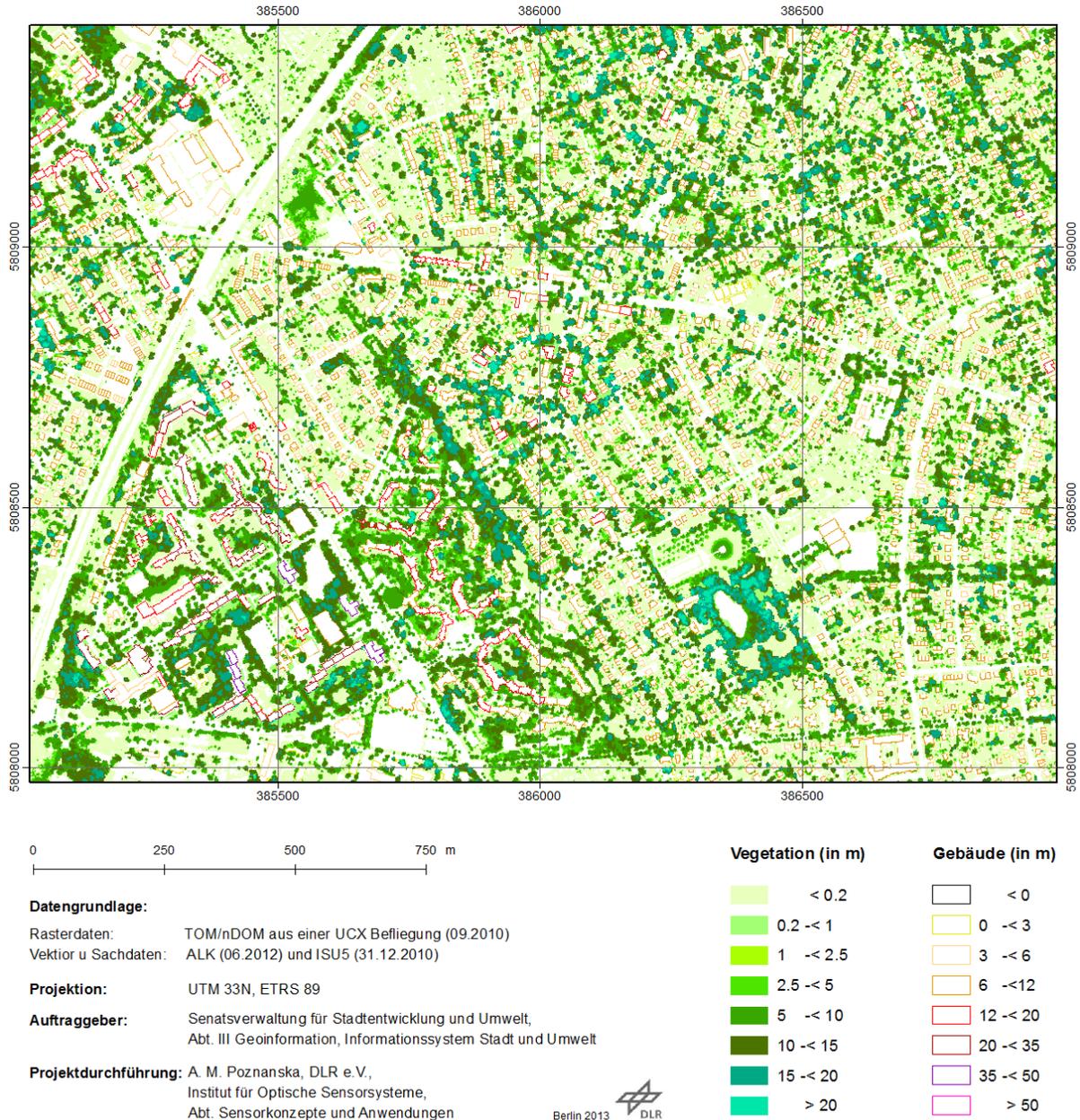


Abb. 61 Klassifizierungsergebnis in einem locker bebauten Gebiet von Berlin-Steglitz-Zehlendorf in einer Kartendarstellung

**Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen, Berliner Innenstadt**

**2010**

**Industriegebiet in Berlin Neukölln**



**Datengrundlage:**

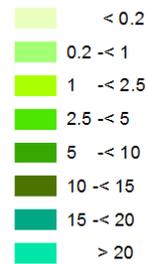
Rasterdaten: TOM/nDOM aus einer UCX Befliegung (09.2010)  
 Vektor u Sachdaten: ALK (06.2012) und ISU5 (31.12.2010)

**Projektion:** UTM 33N, ETRS 89

**Auftraggeber:** Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt,  
 Abt. III Geoinformation, Informationssystem Stadt und Umwelt

**Projektdurchführung:** A. M. Poznanska, DLR e.V.,  
 Institut für Optische Sensorsysteme,  
 Abt. Sensorkonzepte und Anwendungen

**Vegetation (in m)**



**Gebäude (in m)**

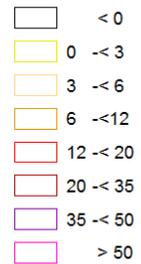


Abb. 62 Klassifizierungsergebnis in einem Industriegebiet von Berlin-Neukölln in einer Kartendarstellung

Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen, Berliner Innenstadt

2010

Bebauungsklassen in Berlin Mitte

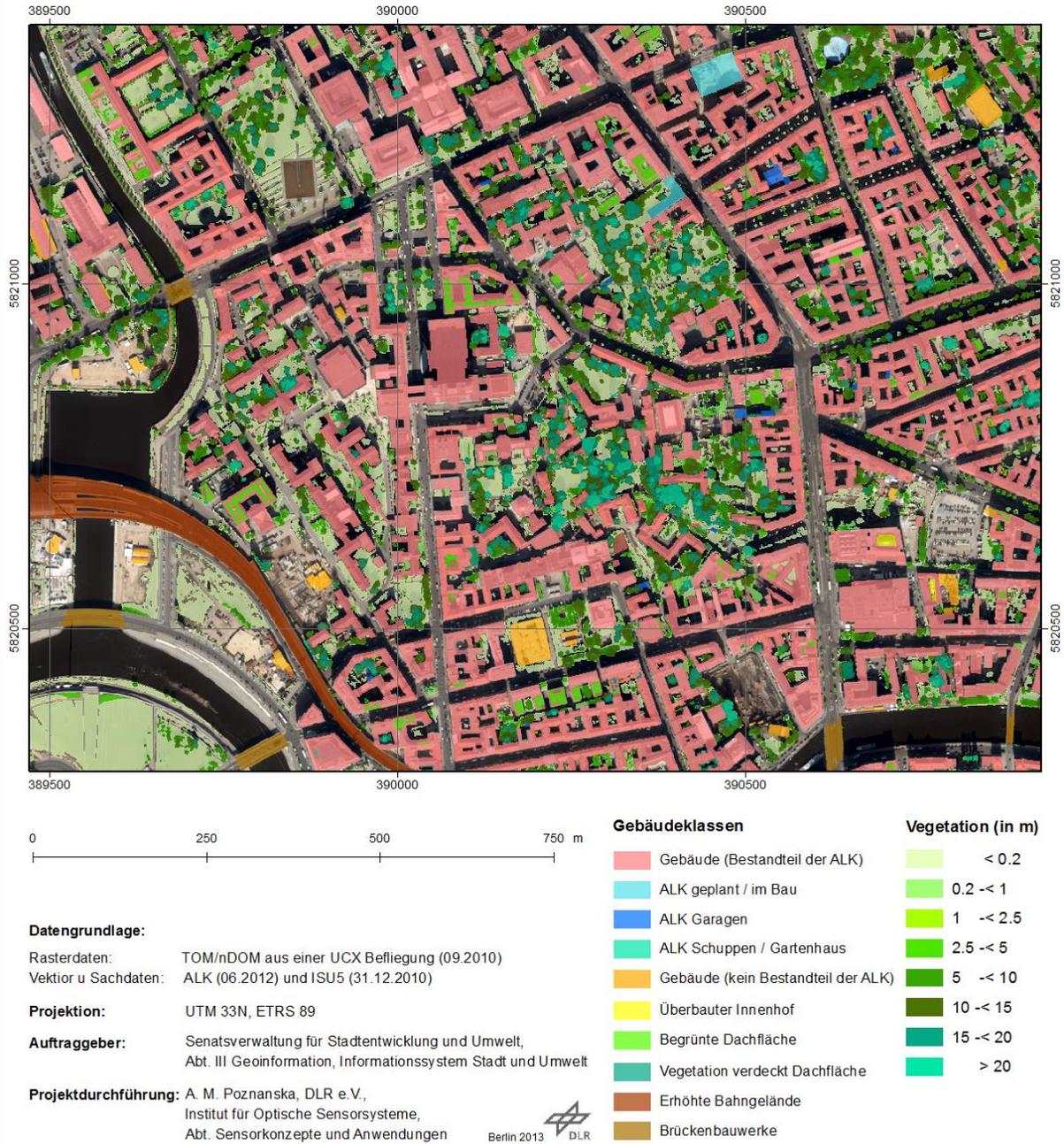


Abb. 63 Gebäudeklassen in Berlin-Mitte in einer Kartendarstellung (im Hintergrund TOM, RGB)

## 6 Fazit und Ausblick

Die sehr hochauflösenden digitalen Luftbilddaten in Form eines True Ortho Mosaiks (TOM) und eines normierten digitalen Oberflächenmodells (nDOM) haben sich als eine unabdingbare Datengrundlage für die automatisierte Objektextraktion in den dicht und heterogen bebauten urbanen Gebieten etabliert. In einem Zusammenspiel mit den Daten der ALK-Berlin und der Grundkarte 1:5.000 (ISU5) der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt bilden sie eine zuverlässige Grundlage für die Erfassung der Gebäude- und Vegetationsobjekte sowie für die Ableitung von deren Höhen und Strukturen. Ebenfalls hat sich die objektbasierte Klassifikation als eine zuverlässige Extraktionsmethode erwiesen. Die eCognition Software bietet eine geeignete Umgebung für die Entwicklung von robusten Segmentierungs- und Klassifizierungsregelbasen. Ebenfalls ist eine Anpassung und Optimierung der Regel für nachfolgende Projektphasen oder sogar für andere Gebiete möglich.

Die während der ersten Projektphase entwickelten Regeln wurden für die nachfolgende Bearbeitung der Stadtrandgebiete und des Umlandes angepasst. Bei dieser Übertragung der in Phase I entwickelten Regeln hat sich auch die große Bedeutung der geometrischen Auflösung gezeigt. Mit sehr hochaufgelösten Oberflächenmodellen und True Orthophoto Mosaiken, wie sie in Projektphase I verwendet wurden, lassen sich urbane Objekte wesentlich vollständiger und korrekter extrahieren. Auch die schlechtere radiometrische Qualität der aus sehr großer Höhe aufgenommenen Daten aus Phase II beeinträchtigt die Extraktionsqualität.

Die Ergebnisse der beiden Projektphasen sind im Berliner Umweltatlas sowie im Geoportal des Landes Berlin veröffentlicht.

Für weitere Untersuchungen der Klasse *Gebäude* (*kein Bestandteil der ALK*) ist zum Stand der Veröffentlichung eine Veränderungsanalyse in der Entwicklung. Auf diese Weise könnten potenzielle Objekte aufgezeigt werden, die einer Aktualisierung in der ALK bedürfen.

Für die begrünten Dachflächen werden aktuell Möglichkeiten einer bedingten Ausweitung der detektierten Begrünung evaluiert. Beispielsweise sollen Form- und Geometrieigenschaften der Dachflächen in die Analyse mit einfließen. Ebenfalls ist zu untersuchen, wie sich mehr Informationen aus den Schattenbereichen detektieren lassen.

Die Erfassung der Vegetationsstrukturen kann als sehr gut angesehen werden. Für die weiteren Untersuchungen steht eine Einzelbaumerfassung im städtischen Raum im Vordergrund. An dieser Stelle sei auf die Extraktionsansätze der Baumspitzen sowie die Bestimmung des Kronenumfanges in BAYER ET AL. (2013) hingewiesen. Zwar beziehen sich die Analysen auf Forstbereiche, sie bedienen sich aber derselben Rasterdatengrundlage, die in diesem Projekt verwendet wurde. Die erste Übertragung der in BAYER ET AL. (2013) entwickelten Regelbasen auf die Stadtbereiche wurde bereits durchgeführt und liefert vielversprechende Ergebnisse (POZNANSKA ET AL., 2013).

Bezogen auf die Datengrundlage wäre eine Optimierung der nDOM-Generierung wünschenswert. Wichtig für die Analysen in urbanen Räumen ist die Extraktionsfähigkeit aller Gebäudekategorien, d.h. auch von niedrigen und kleinen Objekten. Ebenfalls ist eine Optimierung des Bildzuordnungsverfahrens sinnvoll, sodass noch weniger interpolierte Bereiche auftreten.

Im Rahmen der ersten Projektphase wurde ein komplexes und zuverlässiges Regelwerk zur automatisierten Extraktion von Gebäude- und Vegetationsobjekten sowie deren semantischen Attributen in urbanen Räumen erstellt. Diese können als eine sehr gute Grundlage für detaillierte urbane Anwendungen wie kleinräumige klimatische Modellierungen, Biomassenbestimmungen oder stadtplanerische Analysen verwendet werden.

Durch die Nutzung von Standard-Datensätzen ist eine Übertragung auf andere Gebiete Deutschlands möglich.

## 7 Quellenverzeichnisse

### Verwendete Literaturquellen

- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, 2. Aufl., Darmstadt.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000): Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J. (Ed.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag, pp. 12-23.
- BAATZ, M., BENZ, U., DEGHANI, S., HEYNEN, M., HÖLTJE, A., HOFMANN, P., LINGENFELDER I., MIMLER, M., SOHLBACH, M., WEBER, M. & WILLHAUCK, G. (2004): Definiens Imaging – eCognition. User guide 4, München.
- BAYER, S., MIRI, M. & BUCHER, T. (2013): Automatisierte Einzelbaumerfassung auf Basis von hochaufgelösten TrueOrtho-Mosaiken und photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen. In: Publikationen zu 33. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF), Band 22, pp. 26-35.
- BLASCHKE, T. (2000): Ohne Salz und Pfeffer. In: GeoBIT, Vol. 2, pp. 19-21.
- BLASCHKE, T. & STROBL, J. (2001): What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. In: GeoBIT/GIS, Vol. 6/01, pp. 12-17.
- DEFINIENS AG (2007): Definiens Developer 7– User Guide. München
- FACHVEREINIGUNG BAUWERKSBEGRÜNUNG (2011): Umfrage der Fachvereinigung Bauwerks-begrünung. Intensivbegrünung bei fast 17 %. In: Dach + Grün, Vol. 20 (3), 6.
- GRUBER, M., PONTICELLI, M., BERNÖGGER, S. & LEBERL, F. (2008): UltracamX, the Large Format Digital Aerial Camera System by Vexcel Imaging/Microsoft. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37, pp. 665-670.
- HEIPKE, C. (2003): Photogrammetrie & Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung. In: Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Vol. 3, S. 165-180.
- HIRSCHMÜLLER, H., (2005): Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In Proc. of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005), San Diego, CA, USA, pp. 807-814.
- HIRSCHMÜLLER, H. (2008): Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30 (2), pp. 328-341.
- HIRSCHMÜLLER, H. (2011): Semi-Global Matching. Motivation, Developments and Applications. In: Proc. of the Invited Paper at the 54th Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, pp. 5-11.

- 
- HIRSCHMÜLLER, H. & BUCHER, T. (2010): Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Vol. 19, S. 571-580.
- KINCHLA, R.A. & WOLFE, J.M. (1979): The order of visual processing: "Top-down", "bottom-up" or "middle-out". In: Perception & Psychophysics 1979, Vol. 25 (3), pp. 225-231.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie (Band 1). Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7. Aufl., Berlin.
- LEBERL, F. & GRUBER, M. (2003): Flying the new large format digital aerial camera Ultracam. In: Photogrammetric Week, Vol. 3, pp. 67-76.
- LEHMANN, F., BUCHER, T., PLESS S. & WIEDEN, A. (2011): Hochauflösende Oberflächenmodelle und True Ortho Photos aus digitalen Luftbildkameras: die Entwicklung anhand von Beispielen der letzten 10 Jahre. In: DGPF, Tagungsband 20/2011.
- LINKIEWICZ, M. (2013): Extraktion von senkrechten Fassadenebenen aus 3D-Punktwolken von Schrägluftbildern. In: Publikationen zur 33. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF), Band 22, pp. 354-362.
- MAYER, S. (2000): Retrieving object borders and height from high-resolution digital surface models. In: Proc. of the World Multiconference on Systems, Cybernetics and Informatics, Vol. 5, Orlando, FL, USA, pp. 433-438.
- MAYER, S. (2004): Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung. Dissertation an der Humboldt Universität zu Berlin.
- MODER, F., OCZIPKA, M., SIEGERT, F., LEHMANN, F., DJAJADIHARDAJA, Y.S., KLEIN, R. & WAHL, R. (2008): Last-Mile – Large-Scale topographic mapping of densely populated coasts in support of risk assessment of tsunami hazards. In: International conference on tsunami warning, Bali, Indonesia, pp. 12-14.
- MYINT, S.W., GOBER, P., BRAZEL, A., GROSSMAN-CLARKE, S. & WENG, Q. (2011): Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 115/5, pp. 1145-1161.
- POZNANSKA, A.M., BAYER, S. & BUCHER, T. (2013): Derivation of urban objects and their attributes for large-scale urban areas based on very high resolution UltraCam true orthophotos and nDSM: a case study Berlin, Germany. In: Proceedings of SPIE – Earth Resources and Environmental Remote Sensing / GIS Application IV, Volume 8893, pp. 889303-1-13.
- SCHIEWE, J. (2002): Segmentation of high-resolution remotely sensed data - concepts, applications and problems. In: International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(4), pp. 380-385.
- SEBARI, I & HE, D.-C. (2013): Automatic fuzzy object-based analysis of VHRS images for urban objects extraction. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 79, pp. 171-184.

TRIMBLE ECOGNITION (2010): Trimble Documentation: eCognition Developer 8.64.o. Reference Book, Munich, Germany.

TROSSET, A.M., BUCHER, T. & LEHMANN, F. (2009): Adaption of building extraction rule sets derived from MFC3 and UltraCamD aerial image data sets. In: Proc. of SPIE, Vol. 7478.

WIEDEN, A. & LINKIEWICZ, M. (2013): True- Oblique- Orthomosaik aus Schrägluftbildern zur Extraktion von 3D-Geoinformationen. In: Publikationen zu 33. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF), Band 22, pp. 373-383.

ZADEH, L.A. (1965): Fuzzy Sets. In: Information and Control, New York & London, Vol. 8/3, pp. 338-353.

---

## Verwendete Internetquellen

- DLR (2013a): DLR im Überblick. Online in Internet: <http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10002/#/DLR/Start/About> [Stand: 2013-07-12].
- DLR (2013b): DLR, Institut für Optische Sensorsysteme. Online in Internet: <http://www.dlr.de/os/> [Stand: 2013-07-12].
- DLR (2013c): DLR, Fachabteilung Sensorkonzepte und Anwendungen am Institut für Optische Sensorsysteme. Online in Internet: <http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-7257/> [Stand: 2013-07-12].
- DLR (2013d): DLR, Fachabteilung Sensorkonzepte und Anwendungen am Institut für Optische Sensorsysteme: Modulare Luftbildkamerasysteme. Online in Internet: [http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-8078/12173\\_read-28835/](http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-8078/12173_read-28835/) [Stand: 2013-07-12].
- ESRI (2013): ArcGIS: das umfassende Geoinformationssystem. Online in Internet: <http://esri.de/products/arcgis/> [Stand: 2013-07-01].
- ESRI RESOURCES (2013a): ArcGIS Help 10.1. How Aspect works. Online in Internet: [http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/How\\_Aspect\\_works/009z00000vp00000/](http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/How_Aspect_works/009z00000vp00000/) [Stand: 2013-07-12].
- ESRI RESOURCES (2013b): ArcGIS Help 10.1. How Surface Slope works. Online in Internet: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/na/009900000061000000/> [Stand: 2013-07-12].
- ISU (2013): Geoportal – Informationssystem Stadt und Umwelt. Online in Internet: [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/info\\_system/index.shtml](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/info_system/index.shtml) [Stand: 2013-07-12].
- SENSTADTUM (2013a): Geoportal Berlin: FIS-Broker. Online in Internet: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/fis-broker/index.shtml> [Stand: 2013-07-12].
- SENSTADTUM (2013b): Geoportal Berlin: Umweltatlas Berlin. Online in Internet: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/index.shtml> [Stand: 2013-07-12].
- SENSTADTUM (2013c): Geoportal. Liegenschaftskataster: Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK-Berlin). Online in Internet: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/liegenschaftskataster/alk.shtml> [Stand: 2013-07-13].
- SENSTADTUM (2013d): Planen – Stadtwissen und Daten: Lebensweltlich orientierte Räume (LOR) in Berlin – Planungsgrundlagen. Online in Internet: [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/basisdaten\\_stadtentwicklung/lor/](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/basisdaten_stadtentwicklung/lor/) [Stand: 2013-07-29].

TRIMBLE (2013): Trimble eCognition Software – Overview. Online in Internet:  
<http://www.ecognition.com/products> [Stand: 2013-07-01].

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Ausdehnung der Projektgebiete – Berliner Stadtgebiet und Berliner Umland.....	5
Abb. 2 UltraCamX Kamerakopf (links, Quelle: Gruber et al., 2008, S. 666) und das Aufnahmeprinzip (rechts, Quelle: Leberl & Gruber, 2003, S. 74) .....	6
Abb. 3 Berliner Innenstadtgebiet – Lage und Ausdehnung der UCX Daten aus der Befliegungskampagne am 23.09.2010 .....	8
Abb. 4 Projektgebiet Phase II – Lage und Ausdehnung der UCX Daten aus der Befliegungskampagne am 24.08.2009.....	9
Abb. 5 Vergleich zwischen DOP und TOM; a) DOP 20 RGB, 2011 (Quelle: SenStadtUm, 2013a), b) TOM RGB überlagert mit ALK Gebäudekonturen, c) nDOM überlagert mit ALK Gebäudekonturen.....	12
Abb. 6 nDOM – schematische Darstellung der Berechnung (links); Bildbeispiele: DOM (rechts oben) und das berechnete nDOM (rechts unten), (Quelle: eigene Darstellung nach Mayer, 2004) .....	14
Abb. 7 Vergleich TOM und DOM der Befliegungen von 2009 (oben, 50 cm) und 2010 (15 cm), südl. Tempelhofer Feld. Das DSM von 2010 hat eine deutlich bessere Qualität, Erläuterungen zu Markierungen im Text. ....	15
Abb. 8 Höhenprofil des nDOM von Phase I (Höhen dargestellt in dm). Zu erkennen sind unterschiedliche Dachformen und Vegetationsstrukturen.....	16
Abb. 9 Höhenprofil des nDOM von Phase II, schlechtere Qualität (Rauschen, Kantenschärfe) als in Phase I .....	16
Abb. 10 Schematische Darstellung des Vorgehens zur Detektion erhöhter Punkte für die Grundhöheninterpolation an einem Höhenprofil (Quelle: Mayer, 2004: 49) .....	17
Abb. 11 Vergleich zwischen nDOM (links) und DOM-Höhenprofilen (rechts); durch die Schwellenwertbildung verschwinden kleine und niedrige Objekte im nDOM (hier Innenhofgaragen). 18	
Abb. 12 Interpolationsfehler im nDOM: auslaufende Gebäudekante im Schatten .....	19
Abb. 13 TOM Daten in Echtfarben-Darstellung in drei unterschiedlichen Detailstufen .....	20
Abb. 14 TOM Daten: nahes-Infrarot Kanal (unten); Vegetation weist hohe spektrale Werte auf (helle Bereiche).....	20
Abb. 15 Helligkeitssprünge zwischen den Flugstreifen sowie innerhalb der Flugstreifen .....	21
Abb. 16 Schatten / Sichtschatten hinter einem hohen Haus: a) TOM RGB, b) nDOM mit Interpolationsfehlern, c) Count Maske, d) durchschnittlicher Count-Wert pro Segment, niedrige Werte farblich kodiert von 0 (dunkelblau) bis 4 (hellgrün); alle Layer wurden mit der ALK (blaue Linien) überlagert.....	22

<i>Abb. 17 Ausrichtungs- (c)- und Neigungs-Layer (d)</i> .....	23
<i>Abb. 18 Ausschnitt aus den ALK- und ISU5-Daten: ISU5 Blockkarte (gelbe Linien), ALK Gebäude (rote Polygone) und ALK Straßenbäume (grüne Punkte)</i> .....	25
<i>Abb. 19 Verwendung der eCognition Developer Software: entwickelte Regelbasis gespeichert in einem Process Tree – ein Ausschnitt</i> .....	28
Abb. 20 Verfügbare Eigenschaften in eCognition für die Klassenbeschreibungen und als Attribute beim Export .....	29
Abb. 21 Unterteilung des Projektgebietes Berliner Innenstadt in Bezirke (Grundlage für die GDB) und in die Projektkacheln (Grundlage für die Objektextraktion in eCognition).....	32
Abb. 22 Ablaufplan: Erfassung von Gebäude- und Vegetationsobjekten im Berliner Innenstadtgebiet (Phase I).....	33
Abb. 23 Ablaufplan: Erfassung von Gebäude- und Vegetationsobjekten im Berliner Innenstadtgebiet (Phase II).....	34
Abb. 24 Objekthierarchie auf mehreren Skalenebenen in abstrakter Darstellung (links) und mit Bildbeispielen (rechts) (Quelle: eigene Darstellung verändert nach Baatz et al., 2004) .....	35
Abb. 25 Chessboard Segmentation mit einer Schachbrettgröße von 30 x 30 Pixeln.....	36
Abb. 26 Ergebnis der Chessboard Segmentation unter Verwendung des ALK Layers (gelbe Linien) ...	36
Abb. 27 Zusammenstellung der Segmentierungsparameter für die Multiresolution Segmentation in eCognition (Quelle: verändert nach Definiens, 2007: 22).....	37
Abb. 28 Ergebnis der initiierenden Multiresolution Segmentation (MRS) basierend auf UCX-Daten..	38
Abb. 29 Zwei Klassifizierungsergebnisse der laut ALK-Bearbeitungsstand 06.2012 geplanten oder im Bau befindlichen Gebäude; links und mittig: einzelne klassifizierte Segmente sowie als zusammengefasstes Objekt (rechts); oben ein Beispiel für laufende Baumaßnahmen, unten für ein fertig gestelltes Gebäude (2010).....	39
Abb. 30 Klassifizierung der ALK-Nutzungsklasse Garagen; unter c), fehlende' Höheninformation für einzelne Garagen-Segmente, d) nach dem Zusammenfügen: Durchschnittshöhe von 6 dm.....	40
Abb. 31 Vegetationsmaske; mittig: der NDVI in einer Farbkodierung (von Dunkelblau = 0.2 bis Hellgrün = 1.0), unten das Klassifizierungsergebnis (Grün) .....	42
Abb. 32 Vegetationsklassifizierung: auch in den Schattenbereichen NDVI Werte > 0,2 (mittig, Dunkelblau), resultierende Vegetationsmaske (unten, Grün) .....	42
Abb. 33 Ergebnis der Vegetationsklassifizierung (unten); durch die zu niedrigen NDVI Werte (mittig) fehlende Klassenzuweisung .....	43

Abb. 34 MRS-Segmentierung der Vegetation – genutzt für die Erstellung der Vegetationsmaske, aber zu stark gegliedert für die Erfassung der Höhenstruktur .....	44
Abb. 35 Ergebnis der Contrast Split Segmentation: Unterteilung in niedrige (Grün) und erhabene Vegetation (Türkis) .....	45
Abb. 36 Ergebnis der Multi Threshold Segmentation (MTS): Unterteilung der erhöhten Vegetation in neun Höhenstufen.....	46
Abb. 37 Ergebnis der Unterteilung in Vegetationsstrukturen mithilfe von MRS-Segmentierung (b und c) innerhalb der einzelnen Höhenstufen aus der vorangehenden MTS (a) .....	46
Abb. 38 Dachüberstände; links: TOM RGB überlagert mit der ALK, mittig: nDOM überlagert mit der ALK, rechts: Klassifizierungsergebnis .....	47
Abb. 39 Klassifizierungsergebnis von Brücken- und Hochbahnobjekten .....	48
Abb. 40 Horizontales Höhenprofil (nDOM) über das Brandenburger Tor .....	49
Abb. 41 Klassifizierung von Gartenhäusern (kein Bestandteil der ALK); a) bisherige Klassifizierung (Vegetationsmaske) überlagert auf RGB, b) Ausschnitt aus nDOM – keine Höhen für die Gartenhäuser, c) erste Klassifizierung (Lila ) ergibt Fehler im Bereich der Straßen, d) um die Straßen (Gelb) bereinigte Klassifizierung von Gartenhäusern .....	50
Abb. 42 Vorläufige Klassifizierung der Gebäude, die kein Bestandteil der ALK sind (rechts in Gelb); überlagert mit ALK-Konturen (blaue Linien) .....	51
Abb. 43 Korrekturergebnis von erhöhten Objekten (kein Bestandteil der ALK) unter pixel-genauen Betrachtung von nDOM; in Orange: Pixel mit nDOM = 0, unten: Detailansicht mit Chessboard-Segmenten.....	51
Abb. 44 Korrektur unter Nutzung niedriger Count-Werte; a) dunkle Bereiche im Count-Layer stehen für wenige korrespondierende Bildzuordnungspunkte, b) die Höhen werden im DOM/nDOM interpoliert, c) interpolierte Höhen führen zu Fehlklassifizierung in der Klasse ‚erhöhte Objekte (kein Bestandteil der ALK)‘ d) Korrektur durch die Klassifizierung der niedrigen Count-Werte (Blau) .....	52
Abb. 45 Ergebnis der Ergänzung der Vegetationsmaske: a) Klassifizierung von niedrigen Count Werten, b) Klassifizierung von positiven NDVI-Werten, c) iteratives pixelweise Conditional Growing in die Vegetationsmaske unter Berücksichtigung der relativen Unterschiede zu Vegetationsnachbarobjekten .....	54
Abb. 46 Bereinigung der Klasse Gebäude (kein Bestandteil der ALK) mithilfe von geometrischen Eigenschaften: c) Flächengröße, d) Breite und Rechtwinkligkeit .....	55
Abb. 47 Begrünte Dachflächen durch die Verschneidung der Vegetationsmaske mit dem ALK-Gebäude-Layer .....	56
Abb. 48 Klassifizierungsergebnis der Klasse ‚Vegetation verdeckt Dachteile‘ (unten rechts) .....	57

---

Abb. 49 Verbessertes Klassifizierungsergebnis der begrünten Dachflächen basierend auf spektraler Nachbarschaftsanalyse (rechts) .....	58
Abb. 50 Klassifizierungsergebnis von begrünten Dachflächen (kein Bestandteil der ALK) (rechts) .....	58
Abb. 51 Ergebnis einer erneuten MRS als Grundlage für weitere Unterteilung der Dachflächen .....	58
Abb. 52 Ergebnis der bedingten Image Object Fusion: kleine Objekte werden mit den angrenzenden Dachteilesegmenten verschmolzen .....	60
Abb. 53 Unterteilung von Gebäudeobjekten mit ausgeprägten Höhenunterschieden (unten); Gebäude als ein Objekt in der ALK (oben) .....	61
Abb. 54 Untersuchungsgebiet in Berlin Mitte – Wedding, Phase II .....	63
Abb. 55 Links: Klassifizierte und nicht klassifizierte Gartenhäuschen, rechts: Das Gebäude im Zentrum größtenteils als Vegetation klassifiziert .....	64
Abb. 56 Erfasste Gebäudeobjekte in Berlin Marzahn-Hellersdorf (Ausschnitt).....	66
Abb. 57 Fehlklassifizierung der Vegetationshöhenstufen, bedingt durch Interpolation der (Sicht-)Schattenbereiche im DOM / nDOM .....	68
Abb. 58 Links: Nicht klassifizierte Bäume; Rechts: Problem Schattenbereich bzw. Trockenheit bei der Detektion von Rasen (Phase II).....	69
Abb. 59 Attribute in der GDB: Gebäudeattribute (links), Vegetationsattribute (rechts).....	70
Abb. 60 Klassifizierungsergebnis in einem dicht bebauten Gebiet von BerlinMitte in einer Kartendarstellung .....	701
Abb. 61 Klassifizierungsergebnis in einem locker bebauten Gebiet von Berlin-Steglitz-Zehlendorf in einer Kartendarstellung.....	702
Abb. 62 Klassifizierungsergebnis in einem Industriegebiet von Berlin-Neukölln in einer Kartendarstellung .....	73
Abb. 63 Gebäudeklassen in Berlin-Mitte in einer Kartendarstellung (im Hintergrund TOM, RGB).....	74

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Zusammenstellung der Befliegungsdaten .....	7
Tab. 2 Zusammenstellung der erfassten Gebäudeobjekte (Bestandteil der ALK) und Gebäudeobjekte (kein Bestandteil der ALK), Projektphase I.....	65
Tab. 3 Zusammenstellung der erfassten Gebäudeobjekte (Bestandteil der ALK) und Gebäudeobjekte (kein Bestandteil der ALK), Projektphase II – Berlin.....	65
Tab. 4 Zusammenstellung der erfassten Gebäudeobjekte (Bestandteil der ALK) und Gebäudeobjekte (kein Bestandteil der ALK), Projektphase II - Brandenburg .....	66