

Institut für Geographie

Betreuung:

Dr. S. Hese (Friedrich-Schiller-Universität Jena),

Dr. E. Banzhaf (Helmholtz – Zentrum für Umweltforschung – UFZ)

**Vergleichende Analyse der Daten von RapidEye-, CIR- und Hyperspektral- Sensoren
zur Detektion urbaner Landbedeckungen mittels Spektralindizes**

Bachelorarbeit

vorgelegt von:

Oliver Wardeck

Studiengang: B.Sc. Geographie

Semester: 6

Matrikelnummer: 113114

Schönbachstraße 10

04299 Leipzig

E-Mail: oliver.wardeck@uni-jena.de

Abgabedatum: 06.07.2012

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Einleitung	7
1. Bedeutung der Fernerkundung für die Detektion urbaner Räume	8
2. Störungseffekte bei der Bildverarbeitung	11
2.1 Phänologische Phase.....	11
2.2 Wetterbedingungen der vorherigen Tage	12
2.3 Bodenfeuchte	13
2.4 Schattenwurf.....	14
2.5 Wolken.....	15
3. Spektrale Eigenschaften in urbanen Räumen.....	16
4. Eigenschaften der verwendeten Sensoren	21
4.1 RapidEye	22
4.2 Hyperspektral.....	22
4.3 CIR-Luftbilder	23
5. Das Untersuchungsgebiet.....	26
6. Methodik und Durchführung der Arbeit	30
7. Auswertung	33
7.1 Differenzen der Indizes zwischen den Sensoren vor und nach der Aggregation	34
7.1.1 Vergleich RapidEye und CIR 5x5	34
7.1.2 Hyperspektraler Vergleich	38
7.1.3 Vergleich zweier Aufnahmen des RapidEye- Sensors	42
7.1.4 Vergleich Hyperspektral 5x5 und RapidEye	46
7.2 Darstellung der berechneten Indizes und deren Nutzung für die Detektion der Landbedeckung.....	48
7.3 Varianzanalyse mittels Semivariographie	55
7.3.1 Funktionsweise der Semivariographie.....	55
7.3.2 Durchgeführte Bearbeitungsschritte zur Erstellung eines Variogramms.....	57
7.3.3 Ergebnisse der Variogrammanalyse.....	58
8. Zusammenfassung der Ergebnisse und vergleichende Bewertung	65
Literaturverzeichnis.....	68

Selbstständigkeitserklärung.....	71
Anlagen	72

Abbildungsverzeichnis

Abb.1-1: Skalenabhängige Analyse urbaner Räume.....	9
Abb.2-1: Phänologischer Kalender	11
Abb.3-1: Spektralbereiche von Vegetation und Böden.....	16
Abb.3-2: Spektren von ausgewählten bebauten Oberflächen	17
Abb.3-3: Reflektanzspektren anderer urbaner Oberflächen.....	18
Abb.3-4: Meist nutzbare Spektralbänder für die Detektion der Landbedeckungen in urbanen Räumen	19
Abb.4-1: Spektralbereiche der verschiedenen Sensoren	21
Abb.4-2: Abhängigkeit der Auflösung von der Flughöhe des AISA Dual Sensors.....	23
Abb.5-1: Lage der Stadt Leipzig in Sachsen, Deutschland.....	26
Abb.5-2: Stadtbezirke der Stadt Leipzig	27
Abb.5-3: Lage des Hyperspektralstreifens vom 27.06.2011	28
Abb.7-4: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die Hyperspektral- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 28.06.2011.....	48
Abb.7-5: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die RapidEye- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 24.08.2011	51
Abb.7-6: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die CIR- Aufnahme vom 16.08.2009.....	53
Abb.7-7: Arbeitsschritte bei der geostatistischen Analyse.....	56
Abb.7-8: Range, Nugget und Sill in Variogrammen.....	56
Abb.7-9: Ausschnitt aus OSAVI-Darstellung der RapidEye-Aufnahme vom 27.06.2011	57
Abb.7-10: Variogramme des bNDVI für die auf 5x5m Auflösung aggregierte Hyperspektral- Aufnahme (oben) und die RapidEye- Aufnahme (unten).....	59
Abb.7-11: Variogramme des NDVI für die auf 5x5m Auflösung aggregierte Hyperspektral- Aufnahme (oben) und die RapidEye- Aufnahme (unten).....	62
Abb.7-12: Variogramme des MTVI1 für die auf 5x5m Auflösung aggregierte Hyperspektral- Aufnahme (oben) und die RapidEye- Aufnahme (unten).....	64

Tabellenverzeichnis

Tab.4-1: Qualitativer Vergleich der Eigenschaften der verwendeten Sensoren	24
Tab.6-1: Zu untersuchende Spektralindizes	30
Tab.7-1: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes für die RapidEye- Aufnahme vom 24.08.2011 und die auf 5x5m aggregierte CIR- Aufnahme vom 16.08.2009	34
Tab.7-2: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes für die Hyperspektral- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 28.06.2011	39
Tab.7-3: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes für die RapidEye- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 24.08.2011	42
Tab.7-4: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes für die aggregierte Hyperspektral- Aufnahme vom 27.06.2011 und der..... RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011	46
Tab.7-5: Genutzte Spektralindizes-Bereiche für die Abgrenzung der Land- bedeckungsklassen der Hyperspektral- Aufnahmen vom 27./28.06.2011.....	49
Tab.7-6: Genutzte Spektralindizes-Bereiche für die Abgrenzung der Land- bedeckungsklassen der RapidEye- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 24.08.2011	51
Tab.7-7: Genutzte Spektralindizes-Bereiche für die Abgrenzung der Landbedeckungsklassen der CIR- Aufnahme vom 16.08.2009	53
Tab.7-8: bNDVI- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011	58
Tab.7-9: NDVI- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011	61
Tab.7-10: MTVI1- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011	63

Abkürzungsverzeichnis

CIR – Coloured Infrared

Abb. – Abbildung

Tab. – Tabelle

VNIR – Visible Near Infrared

NIR – Near Infrared

SWIR – Short Wave Infrared

AVIRIS - Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer

AISA - Airborne Imaging Spectrometer for Applications

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Danksagung

Hiermit bedanke ich mich bei Herrn Dr. Sören Hese, Friedrich-Schiller-Universität Jena, für die Anregungen zum Themengebiet sowie für seine zielgerichteten Hinweise zur optimalen Auswertung dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich mich bei Frau Dr. Ellen Banzhaf, Department Stadt- und Umweltsoziologie am Helmholtz – Zentrum für Umweltforschung – UFZ, für ihre Unterstützung bedanken. Sie stand stets für aufkommende Fragen bereit und hat mich bei meiner Arbeit durch einige Hinweise und Anregungen sehr voran gebracht. Vielen Dank auch für die Bereitstellung der CIR- sowie für die Vermittlung der RapidEye- Daten.

Des Weiteren danke ich Frau Dr. Angela Lausch, Department Landschaftsökologie am Helmholtz – Zentrum für Umweltforschung – UFZ, für ihre Hilfestellung in Fragen zu den bzw. zur Bereitstellung der Hyperspektral-Aufnahmen sowie für die Unterstützung bei der Einarbeitung in die Variographie.

Einleitung

Im Vordergrund dieser Arbeit steht ein methodischer Vergleich von optischen Fernerkundungssensoren. Aufbauend auf den Erkenntnissen eines Praktikums am Helmholtz – Zentrum für Umweltforschung – UFZ werden hierbei CIR-, RapidEye- und Hyperspektral-Daten für das Stadtgebiet Leipzigs genutzt und ausgewertet. Herausgestellt wird, welchen Wert jeder der verwendeten Sensoren für die Detektion urbaner Landbedeckung in ihrer spektralen Merkmalsausprägung (Vegetation, Bebauung, freie Flächen, Gewässer, etc.) aufweist. Die Analyse spektraler Informationen stellt im städtischen Bereich eine besondere Herausforderung dar, da hier eine hohe Heterogenität und ein schneller Wechsel des Stadtbildes vorherrschend sind. Als Indikatoren dafür werden Indizes berechnet, die zunächst die Merkmalsräume einzelner Landbedeckungen möglichst genau erfassen. Des Weiteren dient die Analyse der Indizes dazu, eine Vergleichbarkeit der jeweiligen Sensoren, durch Unterschiede in den Indizes, zu erarbeiten. Auf Grund der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Sensoren wurde eine Indexberechnung vor bzw. nach einer Aggregation der Daten durchgeführt. Folglich soll ein weiteres Ergebnis einen möglichen Informationsverlust nach einer Aggregation herausstellen. Demnach kann ein Index, der vorher noch als sehr gut geeignet angesehen wurde, nach dem Aggregieren als weniger gut eingestuft werden. Dies wurde im Rahmen der Arbeit näher untersucht. Die tatsächlich sinnvoll einzusetzenden Indizes für eine optimale Trennbarkeit der unterschiedlichen Landbedeckungen ergaben sich dann erst während der Arbeit und sind in den jeweiligen Kapiteln dargestellt. Als Programme für die Bearbeitung wurden ENVI, ERDAS IMAGINE und SURFER 10 genutzt.

1. Bedeutung der Fernerkundung für die Detektion urbaner Räume

Fernerkundung von urbanen Räumen wird definiert als die Messung von Oberflächenausstrahlung und ist dabei an Eigenschaften der Landnutzung und Landbedeckung in Städten gekoppelt (nach M. HEROLD & D.A. JÜRGENS in: T. RASHED & C. JÜRGENS 2010). Heute stehen Daten aus der Fernerkundung in großer Anzahl zur Verfügung. Damit ist die Chance verbunden, immer mehr Informationen von urbanen und suburbanen Räumen in räumlicher, zeitlicher und spektraler Skala zu erhalten. Folglich liefert die Fernerkundung die Grundlagen, mit denen Entscheidungsträger später arbeiten können.

Bereits in den späten achtziger- und frühen neunziger Jahren war abzusehen, dass sich die Gesellschaft von einer Industrie- zu einer Wissensgesellschaft entwickelt (nach OECD 1996). Die Folgen daraus waren immens. So kam es zu einer Dezentralisierung von kommerziellen, industriellen und finanziellen Aktivitäten sowie zu einer damit verbundenen Veränderung der traditionellen Muster der Bevölkerungs- und Landschaftsdynamiken in den Ballungsräumen. Die Konsequenzen aus diesen sozio-ökonomischen Veränderungen sind gravierend. Daher kommt es zu einem Wandel der räumlichen Struktur von urbanen Räumen, die sich in einem Bevölkerungsrückgang in Zentren von Großstädten, Auftreten von Brachflächen, einem Wachstum der Vorstädte und einer weiter fortschreitenden Verstädterung der ländlichen Gebiete äußern (nach MUNROE et al. 2005). Dies beinhaltet ebenso die Umwandlung von landwirtschaftlichen- zu städtischen Gebieten und die Urbanisierung auf Grund besserer Arbeitsmöglichkeiten in den Städten, verbunden mit einer Landflucht der Bevölkerung (nach LOSADA et al. 1998).

Durch eine immer weiter fortschreitende Ausbreitung der Städte verändert sich auch die Landnutzung stets und in immer kürzer werdenden Abständen. Insbesondere der Ausbau der Infrastruktur ist dabei ein starker Faktor. So kommt es dabei zu einer Umwandlung freier Flächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen und darauffolgend zu einer verminderten Siedlungsdichte und einem immer weiter steigenden Verkehrsaufkommen, welches dann wiederum eine Rolle im globalen Klimawandel spielt, da dieses Problem überall auf der Welt vorkommt. Folglich

ist es bei einer Betrachtung von urbanen Räumen sehr wichtig die Urbanisierung stets im Auge zu behalten. Von großem Vorteil wäre es, diesen Prozess genau zu beobachten, beschreiben, analysieren und möglicherweise vorherzusagen. Dies sind einige wesentliche Punkte, die in einer Betrachtung von Landbedeckungen in urbanen Räumen und einer Veränderungskartierung mit berücksichtigt werden müssen. Es soll darauf aufmerksam gemacht werden, dass eine genaue Untersuchung urbaner Räume auch stets auf äußere Einflüsse Bezug nehmen muss (nach LONGLEY 2002). Dies sind sowohl geologische-, ökologische- und klimatische- als auch soziale- und politische Daten (nach GRIMM et al. 2000). Einen weiteren Aspekt bei der Untersuchung urbaner Räume spielt die Skala. Da in der heutigen Zeit viele Fernerkundungsmöglichkeiten zur Detektion zur Verfügung stehen, muss diese ebenso vor jeder Untersuchung genau festgelegt werden. Diese können sowohl räumlich, zeitlich, als auch spektral variieren und sind damit ein wichtiger Bestandteil bei jeder Detektion. In Abb.1-1 sind die vielfältigen Skalen, als Beispiel für die Stadt Leipzig, dargestellt. In dieser Arbeit wird dabei nur die Urban land use / land cover Skala betrachtet.

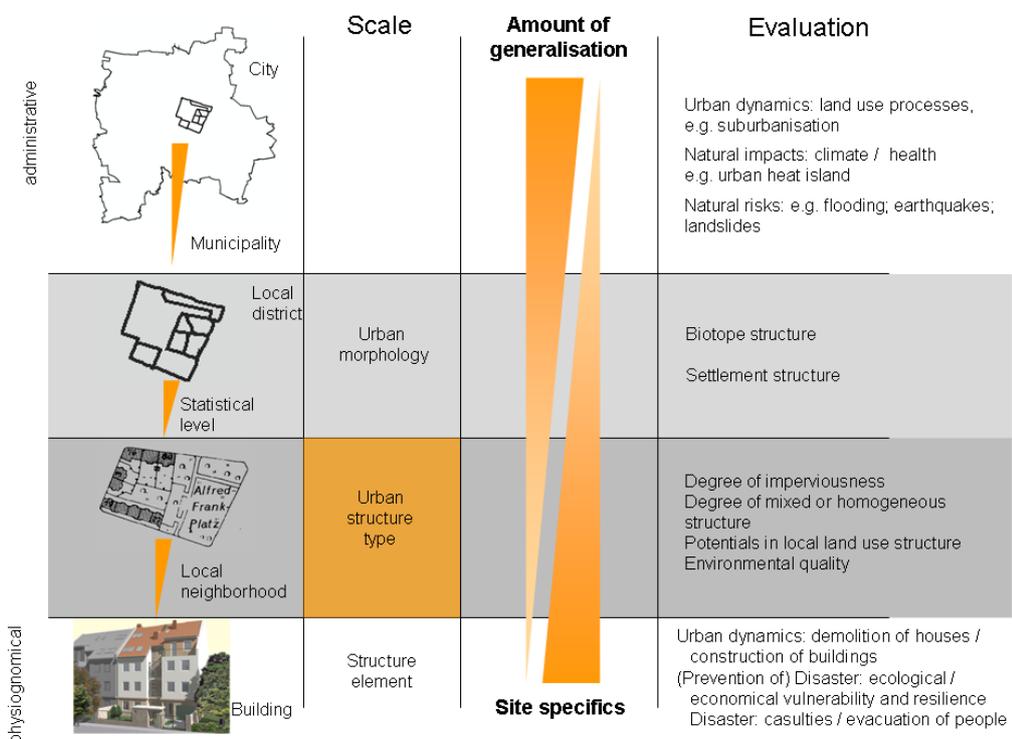


Abb.1-1: Skalenabhängige Analyse urbaner Räume (aus: BANZHAF & HÖFER 2008; verändert nach WICKOP et al. 1998)

Urbane Räume verändern die Landschaft als komplexes System (nach M. HEROLD & D.A. JÜRGENS, in: T. RASHED & C. JÜRGENS 2010). Fernerkundungsdaten können dabei eine große Hilfe sein um diese Veränderungen zu detektieren und gegebenenfalls vorhersagen zu treffen. So werden u.a. urbane Dynamiken und Vegetationsveränderungen nachgewiesen.

Es bleibt daher festzuhalten, dass die Fernerkundung ein sehr wichtiger Bestandteil bei Untersuchungen von urbanen Dynamiken geworden ist und daher eine Analyse einiger Sensoren, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wird, sehr hilfreich für künftige Untersuchungen und Entscheidungen werden kann. Insbesondere weil dabei die jeweiligen Vor- und Nachteile dargestellt und für die jeweilige Problemstellung abgewogen werden kann, welcher Sensor optimal einzusetzen wäre.

2. Störungseffekte bei der Bildverarbeitung

2.1 Phänologische Phase

Die Phänologie beschreibt die Lehre von periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen von Pflanzen und Tieren (aus: www.deutscher-wetterdienst.de). Besonders in der Fernerkundung stehen dabei hauptsächlich die Pflanzen im Vordergrund der Betrachtungen. Hierbei stehen vor allem die phänologischen Phasen des Beginns der Blattentfaltung, der Blüte, der Beginn der Blattverfärbung und der Beginn des Blattfalls im Interesse für die Auswertung von Luftbildaufnahmen. Eine Änderung der phänologischen Phase bedingt ebenso eine Veränderung der Ausprägung der Rückstreuungen. Während beispielsweise im Frühsommer stets eine sehr grüne Blattbedeckung vorherrschend ist, so ist diese ab Beginn der Herbstmonate einem ständigen Wandel unterzogen.

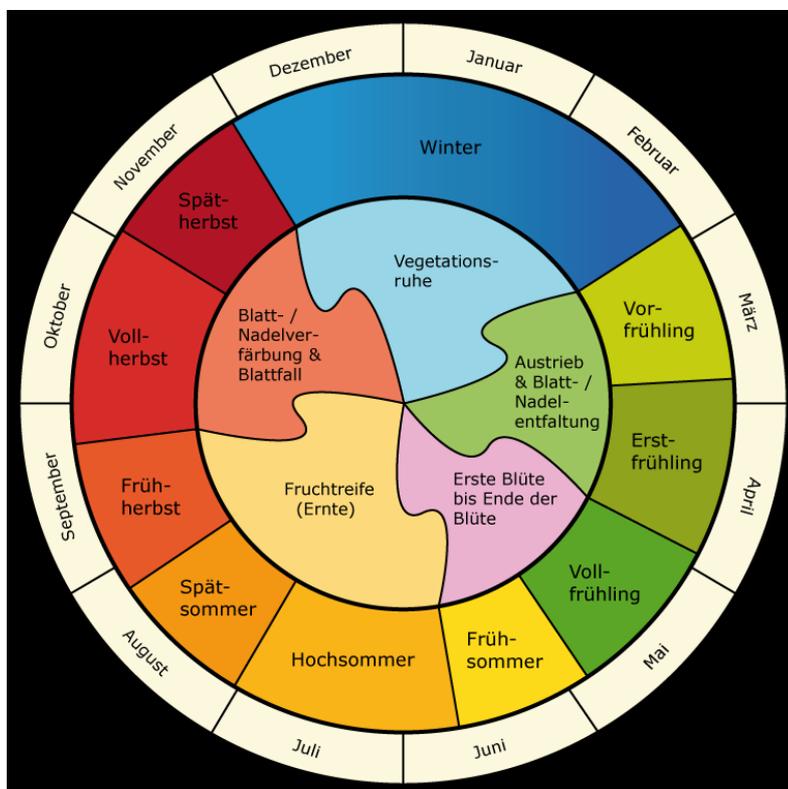


Abb.2-1: Phänologischer Kalender (aus: www.kastanienland.ch)

Anzumerken ist dabei, dass diese Phasen von Jahr zu Jahr variieren können. Demnach sollten stets auch die klimatischen Verhältnisse im Betrachtungsjahr hinzugezogen werden. Für einen optimalen Vergleich verschiedener Sensoren sollten daher stets Aufnahmen der gleichen phänologischen Phase zu Rate gezogen werden, da die Ergebnisse sonst sehr stark voneinander abweichen und keine genauen Aussagen über die Wirksamkeit bzw. keine aussagekräftige Analyseergebnisse getätigt werden können. Besonders bei der Detektion von Städten ist dies wichtig, da hier eine besonders hohe und sich rasch ändernde Heterogenität vorherrschend ist.

2.2 Wetterbedingungen der vorherigen Tage

Neben dem Faktor der Phänologie hat auch das Wetter einen Einfluss auf die Ergebnisse. So ist es stets wichtig zu wissen wie der atmosphärische Zustand in den Tagen bzw. Wochen vor der Aufnahme war. Insbesondere ist dabei von Bedeutung wann und wie viel es geregnet hat umso auf eventuell veränderte Rückstreueigenschaften eingehen bzw. diese besser in Zusammenhang stellen zu können.

Vor der CIR-Aufnahme aus dem Jahre 2009 war folgendes Wettergeschehen charakteristisch. Der Sommer war im Allgemeinen normal warm oder etwas wärmer als im langjährigen Mittel. Der Niederschlag im Juli betrug rund 30% mehr als normal, jedoch im Juni nur 94% und im August, in dem Monat auch die Aufnahme gemacht wurde, nur 81% von der ursprünglichen Niederschlagsrate im langjährigen Mittel. Folglich ist davon auszugehen, dass hier die Böden relativ trocken waren, allerdings die Vitalität der Pflanzen auf Grund der hohen Niederschläge im Juli quantitativ höher sein wird, da die dadurch angelegten Wasserreserven im Untergrund durch die Wurzeln der Pflanzen zugänglich gemacht werden.

Im Jahre 2011, in denen sowohl die RapidEye- als auch die Hyperspektral-Aufnahmen durchgeführt wurden, war die Temperatur vor dem Juni um durchschnittlich 1,8°C höher als normal. Mit 55,7 mm/m² hat es im gesamten Juni sehr wenige Niederschläge gegeben. Daher wird auch hier der Boden als trocken angesehen, auch wenn in den Tagen vor der Aufnahme stets leichte Niederschläge

und am 22.06.2011 21,7 mm/m² fielen (vgl. siehe Anlage 43, aus: www.dwd.de). Der Juni selbst war von den Temperaturen her im langjährigen Mittel. Der August 2011 zeigte eine ähnliche Ausprägung wie der Juni 2011. Auch hier fielen wenige Niederschläge. Allerdings wurden am Tag vor der Aufnahme am 24.08.2011 relativ hohe Niederschläge mit 7,3 mm/m² gemessen. Es ist hier anzunehmen, dass der Boden etwas wassergesättigter war als im Juni. Allerdings wird dies auf die Vitalität der Pflanzen noch keine großen Auswirkungen gehabt haben, da die vorherigen Tage deutlich trockener waren und dabei kaum Niederschläge gemessen wurden (vgl. Anlage 43). Bei der Vitalität der Pflanzen ist ebenso zu erwähnen, dass der Juli 2011 eine sehr lange Trockenphase zwischen dem 14. und 28. aufwies. Demnach ist, mit der unmittelbar damit verbundenen hohen Sonneneinstrahlung, anzunehmen, dass zu dieser Zeit die Vitalität der Pflanzen sehr gelitten hat. Die Niederschläge die anschließend folgten waren Starkniederschläge. Auch hierbei ist fraglich, ob diese Mengen an Niederschlägen nicht direkt oberflächlich abgeflossen sind und den Grundwasserspeicher überhaupt füllten. Ein Beweis dieser Annahme wird in Kapitel 7.1 beschrieben. Der hohe Niederschlag am 24.08. selbst ist durch ein Gewitter am Abend bedingt und für die Aufnahme nicht zu berücksichtigen. Der August 2011 galt allerdings als allgemein zu kühl. Dies geht unmittelbar mit einer verminderten Sonneneinstrahlung einher und man kann abschließend feststellen, dass sich der Juni vom August anhand des Wettergeschehens unterscheiden lässt und dies, ebenso wie Phänologie und Sonnenstand, bei einer Auswertung berücksichtigt werden muss.

2.3 Bodenfeuchte

Ein weiterer Aspekt, der bei einer Betrachtung der Einflussfaktoren berücksichtigt werden muss, ist die Bodenfeuchte. Dieser wird als Wasserzustand des Bodens definiert und ist abhängig von der Bodenart, dem Grundwassergehalt sowie dem Wettergeschehen der Vorwochen (nach: www.hypersoil.uni-muenster.de). Wie bereits in den vorangegangenen Erläuterungen zu den Wetterbedingungen dargestellt, ist anzunehmen, dass die Bodenfeuchte im August 2009 sowie im Juni 2011 ähnlich gering war. Lediglich im August 2011 wurde ein größeres

Niederschlagsereignis vor der Aufnahme beobachtet und somit angenommen, dass die Böden allgemein wassergesättigter waren (vgl. auch siehe Kapitel 2.2).

2.4 Schattenwurf

Bei der Auswertung von Luftbildaufnahmen ist auch der Schattenwurf von großer Bedeutung. Dieser kann für andere Anwendungen durchaus nützlich sein, wie etwa bei der Untersuchung von Baumhöhen oder Gebäudehöhen, aber in dieser Arbeit, in der Wert auf die Detektion urbaner Landbedeckungen gelegt wird, ist dies ein sehr starkes Problem. Wie in den Luftbildaufnahmen aller Sensoren zu sehen ist, erstrecken sich die Schatten, besonders in urbanen Bereichen, teilweise über mehr als eine Straßenhälfte oder gar bis zum nächsten Gebäude. Dies führt dementsprechend zu hohen Ungenauigkeiten in den spektralen Ausprägungen und zu Fehlern in der Detektion. Folglich ist auch hierbei zu beachten, dass möglichst Aufnahmen miteinander verglichen werden, die einen ähnlichen Sonnenstand aufweisen. Vormittags- mit Nachmittagsaufnahmen miteinander zu vergleichen würde zu sehr hohen Fehlklassifikationen führen. Dementsprechend ist stets auch das Wissen über die genaue Uhrzeit der Aufnahmen von hoher Bedeutung. In dieser Arbeit wurden daher nur Aufnahmen mit einer ähnlichen Uhrzeit miteinander verglichen. Hierbei wurden die untersuchten RapidEye- Aufnahmen jeweils um 11:04 Uhr, die Hyperspektral- Aufnahme am 27.06.2011 um 9:30 Uhr und die am 28.06.2011 um 9:40 Uhr sowie bei der CIR- Aufnahme den ganzen Tag (16.08.2009) über das Stadtgebiet Leipzigs aufgenommen. Anhand der einzelnen Aufnahmen ist ersichtlich (vgl. siehe Anlagen 1-5), dass die Schatten aller Aufnahmen nahezu identisch in Ihrer Größe und Ausprägung sind. Positiv bei der CIR- und den Hyperspektral- Aufnahmen ist, dass diese eine bessere Auflösung als die RapidEye- Aufnahmen erreichen und daher auch die Schatteneffekte deutlich sichtbarer sind. Es bleibt festzuhalten, dass es auf Grund der Verhältnisse an den jeweiligen Tagen bereits vor einer genauen Untersuchung der Aufnahmen erkennbar war, dass die Schatteneffekte zu einem großen Problem im Stadtgebiet Leipzigs werden. Insbesondere bei der CIR- Aufnahmemethode sind häufig sehr vielfältige Schatteneffekte zu beobachten, da hier über den Tag hinweg das gesamte Stadtgebiet Leipzigs aufgenommen wurde und daher

unterschiedliche Befliegungsrichtungen vorhanden waren. Demnach verändern sich auch die Schatteneffekte im Stadtgebiet Leipzigs deutlich.

Berücksichtigt werden muss auch das Datum bzw. die Jahreszeit, da diese unmittelbar mit dem Sonnenstand verbunden sind. Auch hierbei ist es sehr wichtig möglichst eng aneinander liegende Aufnahmen miteinander zu vergleichen, da sonst ebenso eine sehr hohe Fehlerrate, insbesondere durch das Problem des Schattenwurfs, zu verzeichnen wäre. Auch dies wurde bei der vergleichenden Analyse berücksichtigt.

2.5 Wolken

Bei einigen Luftbildaufnahmen existiert auch das Problem der Wolkenbedeckung innerhalb eines Aufnahmegebietes. Dies hat zur Folge, dass sich unter den Wolken befindliche Dinge nicht untersuchen lassen. Auch durch eine Atmosphärenkorrektur kann dieses Problem häufig nicht komplett beseitigt werden. Daher wurde bei der Auswahl der miteinander zu vergleichenden Luftbilder darauf geachtet, dass keine Wolkenbedeckung im Aufnahmegebiet vorherrschend war.

3. Spektrale Eigenschaften in urbanen Räumen

Nach JENSEN & COWEN (1999) ist minimal eine räumliche Auflösung von 5m notwendig, um Gebäude und Straßen richtig voneinander abzugrenzen. Dies ist bei den vorliegenden Aufnahmen der Fall. Folglich ist es zulässig eine vergleichende Analyse aller Sensoren für das Stadtgebiet Leipzigs durchzuführen. Allerdings ist auch die spektrale Vielfalt in urbanen Räumen von besonderer Bedeutung. Nach ROBERTS & HEROLD (2004) ist eben diese spektrale Heterogenität, also die Diversität von künstlich erschaffenen Dingen und Vegetation bzw. Böden von großem Interesse und daher sehr genau zu untersuchen. Da für das Stadtgebiet Leipzigs noch keine frei zugängliche Spektralbücherei verfügbar ist, müssen dabei die einzelnen Spektren näher bekannt sein. Die Abbildungen 3-1 bis 3-3 stellen diese für urbane Räume dar. In Abbildung 3-1 sind nicht bebaute Flächen aufgetragen.

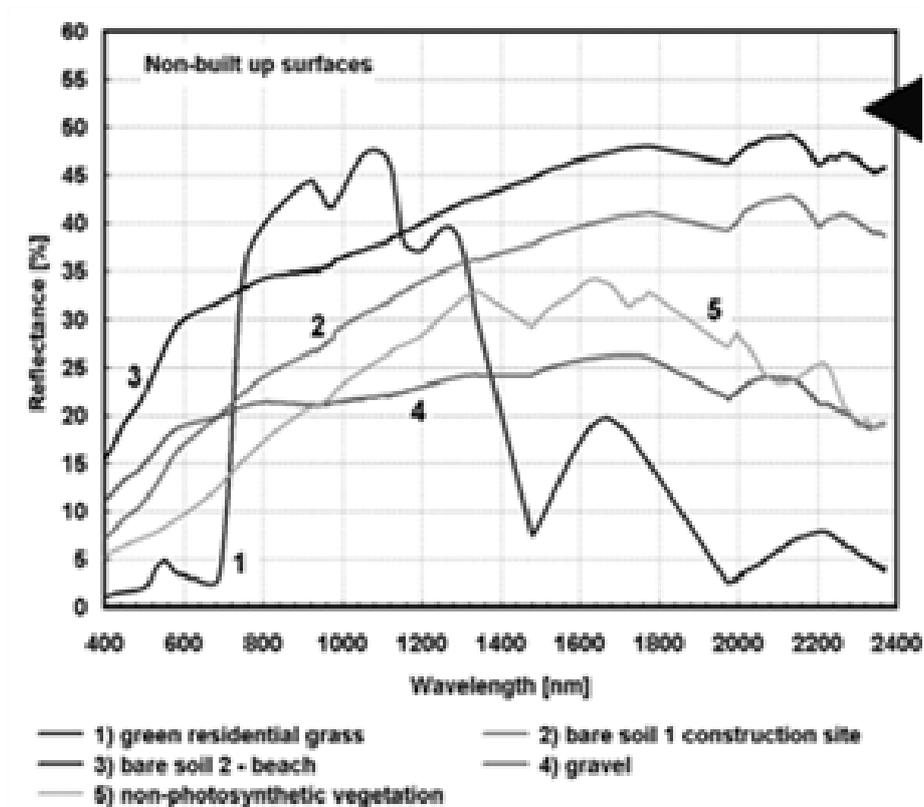


Abb.3-1: Spektralbereiche von Vegetation und Böden (aus: T. RASHED & C.

JÜRGENS 2010, 50)

In Kurve 1 ist das allgemeine Reflektanzspektrum für grüne Vegetation ersichtlich. So ist bei 550nm eine hohe Reflektanz im grünen Spektralbereich sowie bei 450nm und 680nm die Chlorophyll Absorptionsbanden zu sehen. Bei 750nm setzt ein Reflektanzsprung ein, welcher der Grund dafür ist, dass red edge Kanäle, wie etwa bei RapidEye, bei 750nm bereitgestellt werden. Des Weiteren sind im NIR Bereich die Wasserabsorptionsbanden bei 980nm, 1200nm und 1400nm erkennbar. Im SWIR existiert eine weitere Wasserabsorptionsbande bei 1900nm und, wie besonders in Kurve 5 sichtbar ist, eine Ligno-Cellulose-Bande bei 2100nm und 2300nm. In den Kurven 2 und 3, die für Böden stehen, ist besonders auf die Tonmineralabsorption bei 2200nm zu verweisen. Kurve 4 beschreibt das Reflektanzspektrum von kiesigem Untergrund.

In Abbildung 3-2 sind bebauten Oberflächen aufgetragen.

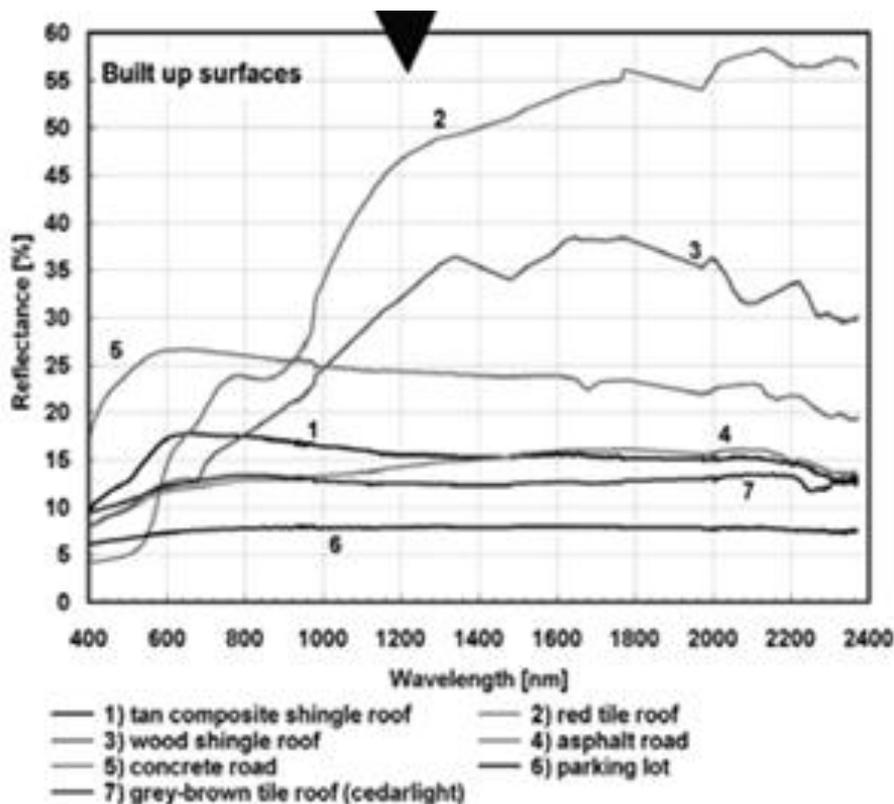


Abb.3-2: Spektren von ausgewählten bebauten Oberflächen (aus: T. RASHED & C. JÜRGENS 2010, 50)

Kurve 1 steht dabei für bräunlich zusammengesetzte Schindeldächer, Kurve 2 für rote Ziegeldächer, Kurve 3 für Schindeldächer aus Holz, Kurve 4 für asphaltierte Straßen, Kurve 5 für Betonstraßen, Kurve 6 für Parkplätze und Kurve 7 für graubraune Ziegeldächer. Zu sehen ist, dass rote Dächer signifikante Eisenoxidabsorptionen bei 520nm, 670nm und 870nm zeigen. Es sind auch einige Probleme erkennbar. So ist ersichtlich, dass Asphalt und dunkle Dächer keine signifikant anderen Signaturen aufweisen und nicht oder nur sehr schwer voneinander zu trennen sind. Insbesondere gilt diese schwere Trennbarkeit bei CIR- sowie Multispektralen- Systemen (RapidEye). Auch hier sind, wie in Kurve 5 bei Abbildung 3-1, Ligno-Cellulose-Absorptionen bei 2100nm und 2300nm in Kurve 3 erkennbar. Dies liegt an dem Holz, welches maßgeblich zu dieser Reflektanzkurve beiträgt. Auch Kurve 2 zeigt wieder die Tonmineralabsorptionsbande bei 1900nm auf.

In Abbildung 3-3 sind einige ausgewählte urbane Objekte dargestellt.

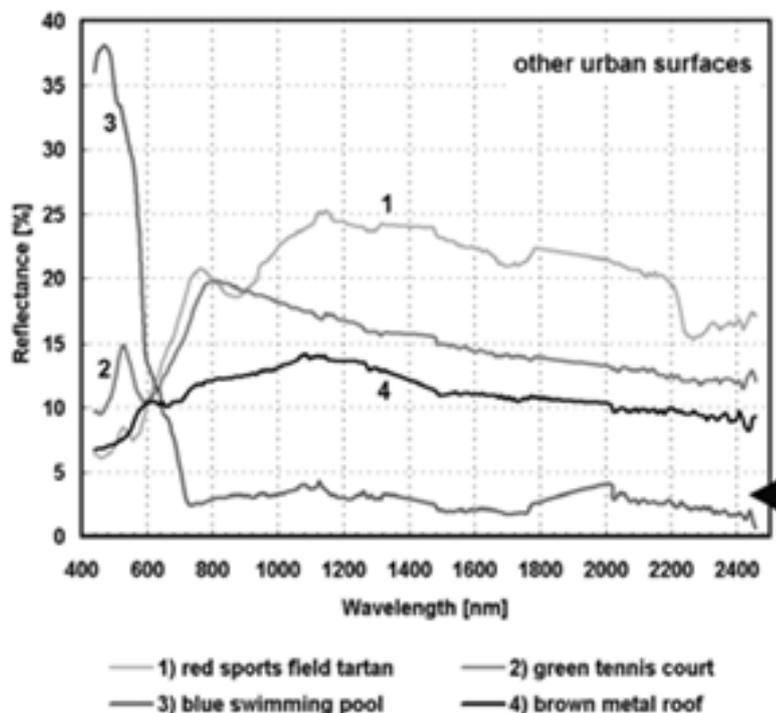


Abb.3-3: Reflektanzspektren anderer urbaner Oberflächen (ermittelt aus Hyperspektraldaten und Bodenspektrometer-Daten, die Wasserabsorptionsbanden bei 1340-1480nm und 1770-1970nm wurden linear interpoliert, aus: T. RASHED & C. JÜRGENS 2010, 50)

Kurve 1 steht dabei für Tartan-Bahnen (rot), Kurve 2 für grüne Tennisplätze, Kurve 3 für Swimming-Pools mit blauer Bemalung und Kurve 4 für braune Metallbedachungen. Es sind wiederum die Eisenoxidabsorptionen bei 520nm, 670nm und 870nm in der Kurve der Tartan-Bahnen ablesbar. Kurve 2 zeigt eine Reflektanzspitze bei 550nm, dies resultiert aus dem vermutlich mit Gras bewachsenen Untergrund des Tennisplatzes. Der Swimming-Pool weist eine hohe Reflektanz bei 450nm im blauen Spektralbereich auf. Dies resultiert aus dem blau gestrichenen Untergrund des Pools.

Folglich kann man nach M. HEROLD & D.A. ROBERTS in: T. RASHED & C. JÜRGENS 2010 4 Hauptkomponenten in urbanen Räumen feststellen: Gesteine und Böden, Vegetation, ölige Produkte wie Asphalt und Teer sowie andere künstlich geschaffene Objekte wie Plastiken und Farben. Daraus werden die wichtigsten Spektralbänder für die Detektion von Landbedeckungen in urbanen Räumen gefolgert. Diese sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

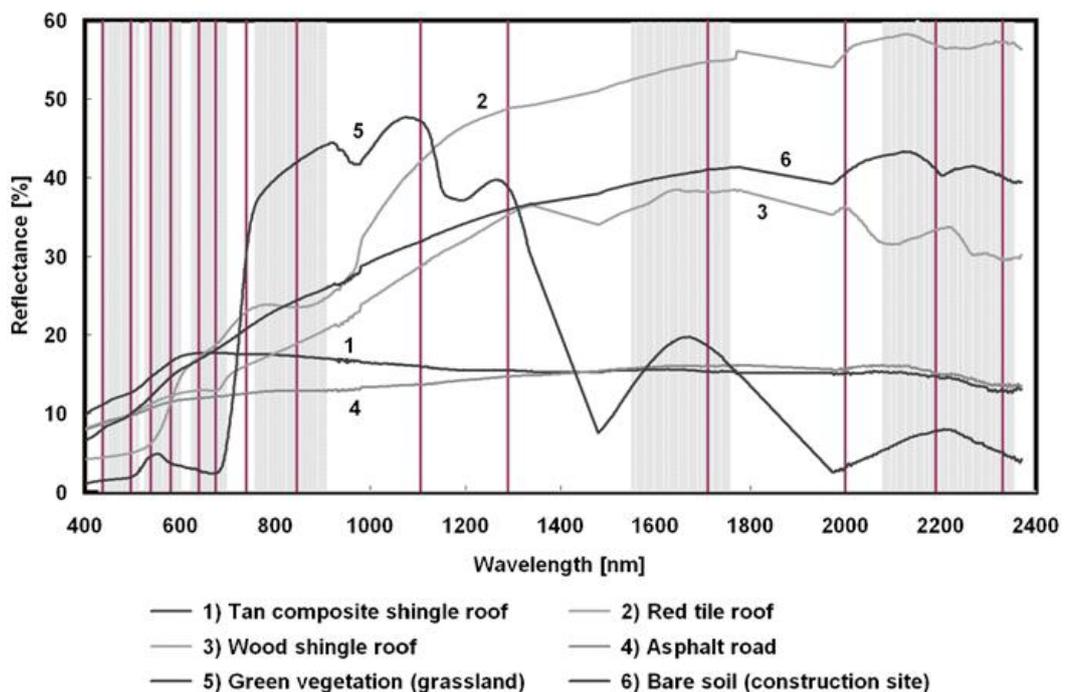


Abb.3-4: Meist nutzbare Spektralbänder für die Detektion der Landbedeckungen in urbanen Räumen (abgeleitet aus einer Spektralbibliothek und Hyperspektral-AVIRIS-Daten, aus: T. RASHED & C. JÜRGENS 2010, 55)

Zu sehen sind die Reflektanzspektren von bräunlichen Schindeldächern, roten Ziegeldächern, holzigen Schindeldächern, asphaltierten Straßen, grüner Vegetation und vegetationslosen Böden. An diesen Spektren wurde sich bei der Detektion der Landbedeckungen im Stadtgebiet Leipzigs orientiert, um daraus dann die optimalen Bereiche für die Berechnungen der Indizes zu nutzen. Dabei ist darauf zu verweisen, dass dies nur für die RapidEye- Aufnahmen bei der Unterscheidung der Nutzbarkeit des red edge – Kanals sowie bei den Hyperspektraldaten möglich war. Die CIR-Daten bilden lediglich größere Wellenlängen-bereiche ab und konnten daher nicht auf diese Reflektanzspektren untersucht werden. Bei den Hyperspektraldaten ist noch anzumerken, dass für diese anhand der Spektralbereiche in Abbildung 4-1 ein spektrales Resampling durchgeführt wurde.

Demnach ist das Wissen der Reflektanzspektren in der Fernerkundung von existenzieller Bedeutung und sollte daher immer in Betracht gezogen bzw. im Hinterkopf behalten werden um mögliche Fehler direkt ausschließen zu können. Es ist darauf zu verweisen, dass die Interpretation dadurch nur unterstützt wird und man dennoch nie genau die erhaltenen Spektren 1 zu 1 auf die Umgebung projizieren kann. Aspekte wie die Geometrie der Objekte, Rauigkeit, Neigungswinkel und das Alter sind dabei von enormer Bedeutung.

4. Eigenschaften der verwendeten Sensoren

Für eine optimale Analyse der Ergebnisse sind Kenntnisse über die genutzten Sensoren von großer Bedeutung. In Abbildung 4-1 sind die jeweiligen Wellenlängenabdeckungen der Sensoren dargestellt. Zu verweisen ist darauf, dass die Trennlinien des Hyperspektral-Sensors nicht für je einen Kanal gelten. Diese sind nur für eine bessere Anschaulichkeit eingearbeitet worden. Die reale Spanne zwischen den Hyperspektralkanälen ist viel geringer.

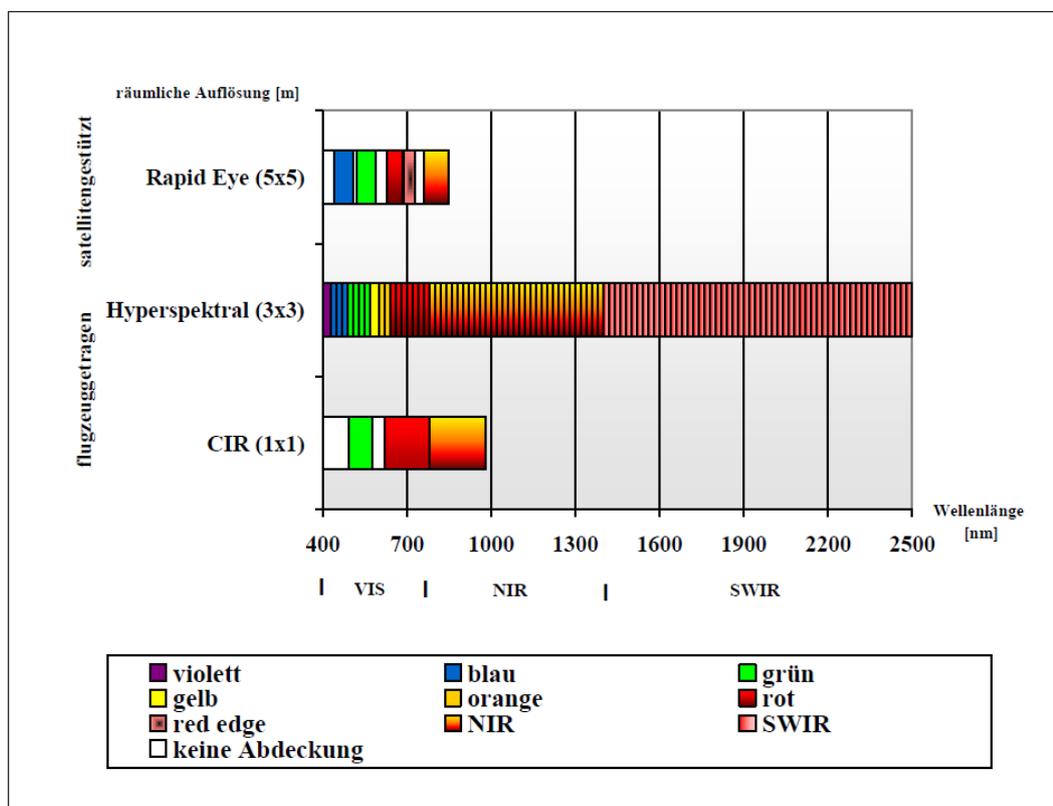


Abb.4-1: Spektralbereiche der verschiedenen Sensoren (eigene Darstellung)

4.1 RapidEye

Das RapidEye- System besteht aus 5 Satelliten, die seit dem 29. August 2008 ihre 630km hohe, sonnensynchrone Umlaufbahn um die Erde ziehen (aus: www.dlr.de). Da es 5 Satelliten sind, ist RapidEye in der Lage eine hohe Repetitionsrate der Produkte zu gewährleisten. Somit können Veränderungen in heterogenen Gebieten, wie etwa in Städten, zeitlich schneller und in ihrem Verlauf genauer nachgewiesen werden. Da das System auf Wunsch jeden Tag auf einen bestimmten Punkt der Erde ausgerichtet werden kann, können folglich Einflüsse von Wolken und Dunst vermindert werden, da bereits einen Tag später eine neue Aufnahme bereitgestellt wird.

Für die Aufnahmen sind 5 unterschiedliche multispektrale Kanäle in den Wellenlängen von 440nm bis 850nm vorhanden (siehe Abb. 4-1) und es können dabei Szenen von ca. 80km Breite mit einer Pixelgröße von 6,5m x 6,5m aufgenommen werden. Die in dieser Arbeit genutzten Daten liegen orthorektifiziert auf 5m x 5m Auflösung vor. Die Szenenlänge beträgt 1500km mit einer Schwadweite von 77km. Die Aufnahmen sind im 12bit Format vorhanden (aus: www.satimagingcorp.com).

Neben RapidEye, als satellitengestütztes System, wurden auch flugzeuggetragene Sensoren-Systeme wie CIR und Hyperspektral untersucht.

4.2 Hyperspektral

Der Sensor der hyperspektralen Aufnahmen wurde von der Firma SPECIM (Spectral Imaging Ltd., Finnland) entwickelt. Er nennt sich AISA Dual und besteht aus den Sensoren AISA Eagle und AISA Hawk. Diese können zu AISA Dual kombiniert werden. AISA steht dabei für Airborne Imaging Spectrometer for Applications. Man erhält simultane Aufnahmen von VNIR und SWIR. Dies wird ermöglicht, da beide Sensoren im gleichen Schwad (320 Pixel) schauen und AISA Hawk in der Lage ist, SWIR- Pixelgrößen in Pixelgrößen von VNIR umzuwandeln (von 512 Pixeln pro Schwad auf 320 Pixel; aus: AISA Dual Datasheet). Die Schwadweite berechnet sich dabei aus $0,43 \cdot \text{Flughöhe}$ (hier 1000m). Folglich ergibt sich eine Schwadweite von 430m. Dies ist die Breite des

Streifens, der mittels Hyperspektralmethodik aufgenommen wurde. Es kommt dabei zu einer spektralen Abdeckung von 400nm bis 2500nm in 367 Kanälen. Daher ist bereits deutlich erkennbar, dass Hyperspektralsensoren eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten bilden, um Spektralindizes zu untersuchen, die wiederum genaue spektrale Landbedeckungsklassen kenntlich machen. Die räumliche Auflösung ist dabei abhängig von der Flughöhe und kann zwischen wenigen cm und 3m betragen (siehe Abbildung 4-2). Die vorliegenden Hyperspektral-Streifen haben eine räumliche Auflösung von 1m und wurden in einer Flughöhe von etwa 1000m gemacht.

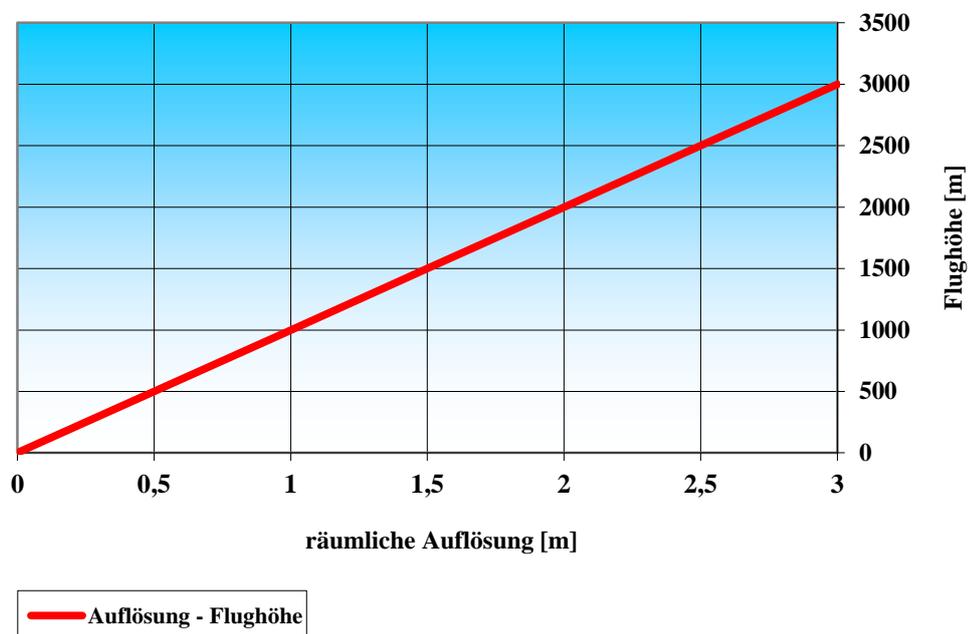


Abb.4-2: Abhängigkeit der Auflösung von der Flughöhe des AISA Dual Sensors
 (abgeleitet aus: AISA Eagle Datasheet, Version 2-2010. SPECIM,
 Spectral Imaging Ltd. Finnland, eigene Darstellung)

4.3 CIR-Luftbilder

Die vorliegende CIR-Aufnahme wurde mittels der UltraCam X der Firma Vexcel, die zur Microsoft Company gehört, aufgenommen. Das Kamerasystem ist in der Lage sowohl panchromatische, als auch multispektrale Aufnahmen zu tätigen. In

dieser Arbeit wurde nur mit den multispektralen Kanälen Grün, Rot und Nahes Infrarot (CIR) gearbeitet. Die Größe einer Aufnahme kann dabei maximal 4992 * 3328 Pixel (cross track / along track) betragen. Cross track bedeutet dabei senkrecht zur Aufnahme-richtung und along track in Aufnahme-richtung. Die radiometrische Auflösung beträgt wie bei den RapidEye- Aufnahmen 12bit pro Kanal (aus: GRUBER). In der vorliegenden Aufnahme vom 16.08.2009 beträgt die räumliche Auflösung 1m. Dies wurde allerdings durch Vorverarbeitungsschritte bewerkstelligt, da die ursprünglich mögliche Auflösung, die mittels dieses Kamerasystems erreicht werden kann, 0,2m pro Pixel beträgt.

In Tabelle 4-1 sind die zu untersuchenden Sensoren gegenübergestellt und ihre Eigenschaften vergleichend bewertet* wurden:

Tab.4-1: Qualitativer Vergleich der Eigenschaften der verwendeten Sensoren
(Bewertung gemäß allgemeiner Angaben der Hersteller, eigene Darstellung)

Eigenschaften	CIR (UltraCam X)	RapidEye	Hyperspektral (AISA Dual)
räumlich	++ 0,2m (hier: aggregiert auf 1m)	- 6,5m (hier: aggregiert auf 5m)	+ 0,2m-3m (hier: aggregiert auf 1m)
zeitlich (Repetitionsrate)	+ gute Veränderungs-analyse, da Aufnahmen über mehrere Jahre	++ 24 Stunden (ständig verfügbar seit 2008)	- je nach Anforderung, Methode noch sehr neu (Monate bis Jahre)
spektral	- 3 Kanäle (grün, rot, NIR)	+ 5 Kanäle (blau, grün, rot, red)	++ 367 Kanäle (violett bis

		edge, NIR)	SWIR)
Kosten	<p style="text-align: center;">+</p> <p style="text-align: center;">50-60€</p> <p style="text-align: center;">(an öffentlichen Ämtern, sonst für Leipzig: 3000€ und 7,50€ / km²)</p>	<p style="text-align: center;">++</p> <p style="text-align: center;">0€</p> <p style="text-align: center;">(an öffentlichen Ämtern, im Projekt, sonst: 0,95€ / km² (für Leipzig ca.: 380€)</p>	<p style="text-align: center;">-</p> <p style="text-align: center;">ca. 5000€</p> <p style="text-align: center;">(abhängig von Flugzeug- Kampagne)</p>

Legende:

++ sehr gut*

+ gut*

- schlecht*

* Bewertung gültig in Gegenüberstellung dieser verwendeten Sensoren

5. Das Untersuchungsgebiet

Leipzig ist eine der bedeutendsten Regionen im Osten Deutschlands. Daher wurde für die folgende Arbeit die Stadt Leipzig ausgewählt, um deren Struktur aufzuzeigen und die Dynamik der Landbedeckungen zu untersuchen.

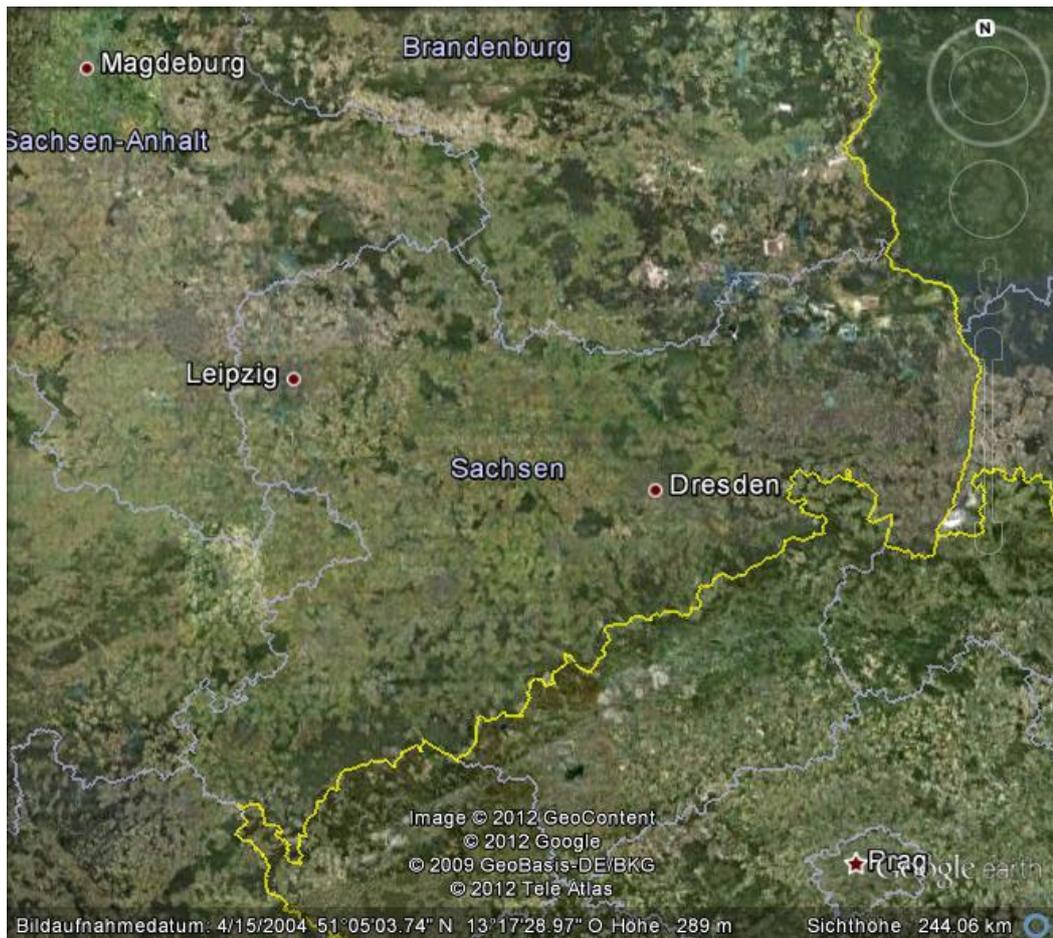


Abb.5-1: Lage der Stadt Leipzig in Sachsen, Deutschland (aus: Google Earth)

Die Region Leipzig/Halle gehört zur Metropolregion Mitteldeutschland und bildet zusammen mit Dresden deren Kern. Die Lage Leipzigs ist in Abbildung 5-1 erkennbar. Sie liegt im Nordwesten Sachsens und bildet das Zentrum der Leipziger Tieflandsbucht, die wiederum den südlichsten Teil der Norddeutschen Tiefebene einnimmt. Leipzig befindet sich etwa 30km südöstlich von Halle/Saale, ca. 100km süd-südöstlich von Magdeburg und etwa 100km nordwestlich von

Dresden. Damit liegt der Untersuchungsraum im Zentrum zwischen den drei mitteldeutschen Landeshauptstädten Dresden, Magdeburg und Erfurt.

Die Stadtfläche Leipzigs beträgt etwa 298 km² (aus: Banzhaf & Höfer 2008). Höhenunterschiede im Stadtgebiet Leipzigs sind nur marginal und somit für die Untersuchungen nicht weiter beachtet worden.



Abb.5-2: Stadtbezirke der Stadt Leipzig (aus: www.upload.wikimedia.org)

Die Umgebung Leipzigs ist waldarm, da insbesondere im 20. Jahrhundert vorwiegend Braunkohletagebau in der Region betrieben wurde. Die Folgen daraus sind auch heute sichtbar, wie z.B. in der Neuseenlandschaft südlich von Leipzig. Die Stadt liegt am Zusammenfluss von Weißer Elster, Pleiße und Parthe, die im Stadtgebiet vielfach verzweigt sind und so den Leipziger Gewässerknoten bilden,

der ein großes Auwaldgebiet speist. Besonders dort sind am ehesten zusammenhängende Waldgebiete im Stadtgebiet Leipzigs nachweisbar. Dies ist in den späteren Untersuchungen bedeutsam.

Für die Hyperspektralaufnahme ist keine Abdeckung über das gesamte Stadtgebiet Leipzigs möglich gewesen. Auf Grund der hohen Kosten wurde lediglich ein Streifen von West nach Ost über das Stadtzentrum von Leipzig befliegen. Eine Einordnung des Streifens in das Stadtgebiet ist Abbildung 5-3 dokumentiert.



Abb.5-3: Lage des Hyperspektralstreifens vom 27.06.2011 (aus: Google Earth 2012)

Die Abdeckung beginnt nördlich des Cospudener Sees und endet südlich von Althen. Der Streifen verläuft dabei von Lindenau über die weiße Elster, am Sportforum vorbei, südlich des Hauptbahnhofes, über Reudnitz, Paunsdorf und

dem Paunsdorfer Bahnhof bis hin nach Althen. Die Flugbahn wurde bewusst so gewählt, dass in diesem Streifen ebenso alle vorhandenen und zu untersuchenden Landbedeckungen (wie etwa Gewässer, Vegetation, urbane Bedeckung und Transportwege) enthalten sind und diese eventuell durch die Vielzahl an Hyperspektralkanälen noch näher und vor allem genauer untersucht werden können. Dies ist Voraussetzung dafür, die Hyperspektral- Aufnahmen trotz des relativ schmalen Streifens mit in die vergleichende Analyse der verschiedenen Sensoren einzubringen, da hier, wie bereits beschrieben, ganz neue Möglichkeiten der Detektion von Landbedeckungen in – insbesondere – Städten möglich sind.

6. Methodik und Durchführung der Arbeit

Während die Hyperspektralaufnahmen sowie die CIR-Daten bereits vorlagen, war es durch die Projektmitarbeit im Helmholtz – Projekt „Tereno“ möglich, die Daten direkt von der Website des DLR herunterzuladen. Anhand der folgenden Kriterien wurden die RapidEye- Daten ausgewählt: Auf Grund des Aufnahmedatums (phänologische Phase), des Schattenwurfs und der Wolkenschleier in den einzelnen RapidEye- Aufnahmen. Anschließend wurden die verschiedenen Indizes berechnet, die zu einer spektralen Bestimmung von städtischen Strukturen einen Beitrag leisten. Dabei wurde darauf verwiesen, welche Bedeutung Spektralindizes in der Stadtfernerkundung haben. Darauf erfolgte ein erster Vergleich der erhaltenen Daten mittels mehrerer Differenzbilder. Es wurden anschließend die räumlichen Auflösungen der Sensoren aggregiert um eine genauere Vergleichbarkeit, sowohl innerhalb eines- als auch zwischen den Sensoren zu gewährleisten und Unterschiede bei den Indizes mit einer Anpassung der Auflösungen kenntlich zu machen. Dies erforderte ein paralleles Arbeiten mit und ohne räumlich aggregierte Daten. Auch hierbei wurden dann wieder Differenzbilder gebildet um die Unterschiede ersichtlicher zu machen.

Es folgt eine Aufstellung der berechneten Indizes in Tabelle 6-1:

Tab.6-1: Zu untersuchende Spektralindizes; hellgrau unterlegt: nur Hyperspektral-Datenauswertung möglich; dunkelgrau unterlegt bedeutet: für Auswertung weniger gut geeignet (eigene Aufstellung)

Index	Name	Berechnungsformel	Anzeichen für
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(\text{NIR}-\text{Rot})/(\text{NIR}+\text{Rot})$	Vitalität von Pflanzen und zur Unterscheidung von Boden und Vegetation
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	$((\text{NIR}-\text{Rot})/(\text{NIR}+\text{Rot}+\text{L}))^*$ (1+L)	Einflüsse des Bodens auf den NDVI werden minimiert

MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$(2 \cdot \text{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \text{NIR} + 1)^2 - 8 \cdot (\text{NIR} - \text{Rot})}) / 2$	einfacheres ermitteln des Bodenheiligkeitskorrekturfaktors (L)
NDWI	Normalized Difference Water Index	$(\text{Grün} - \text{NIR}) / (\text{Grün} + \text{NIR})$	Wasserflächen
MTVI1	Modified Triangular Vegetation Index	$1,2 \cdot [1,2 \cdot (\text{NIR} - \text{Grün}) - 2,5 \cdot (\text{Rot} - \text{Grün})]$	Veränderungen in Blatt- und Bedeckungsstrukturen (aus HABOUDANE et al. 2003)
MSR	Modified Simple Ratio	$((\text{NIR} / \text{Rot}) - 1) / \sqrt{((\text{NIR} / \text{Rot}) + 1)}$	lineare Vegetationsparameter statt NDVI
OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{Rot}) / (\text{NIR} + \text{Rot} + Y)$	reduziert die Bodeneinflüsse weiter, Y-Faktor für Bodeneinflüsse (0,16)
bNDVI	Blue Normalized Difference Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{Blau}) / (\text{NIR} + \text{Blau})$	Unterscheidung zwischen vegetationslosen Boden und Straßen (aus: DINIS et al. 2010)
CVI	Chlorophyll Vegetation Index	$(\text{NIR} / \text{Grün}) \cdot (\text{Rot} / \text{Grün})$	den Anteil an Chlorophyll bzw. der Vitalität von Pflanzen
DVI	Difference Vegetation Index	$\text{NIR} - \text{Rot}$	vereinfachter NDVI aber anfälliger für Messfehler im NIR
TVI	Transformed Vegetation Index	$\sqrt{((\text{NIR} - \text{Rot}) / (\text{NIR} + \text{Rot}) + 0,5)}$	umgeht negative Werte für NDVI und verbessert die Linearität zwischen Biomasse und LAI
RDVI	Renormalized Difference Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{Rot}) / \sqrt{(\text{NIR} + \text{Rot})}$	einen hohen LAI
UI	Urban Index	$(\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR})$	Unterscheidung zwischen künstlichen Dingen und Vegetation (aus: VILLA 2007)
SVI	Soil and Vegetation Index	$(\text{SWIR} - \text{Blau}) / (\text{SWIR} + \text{Blau})$	Unterscheidung von Böden und urbanen Bedeckungen (aus:

			VILLA 2007)
BASVI	Brilliance Adjusted Soil and Vegetation Index	$(1+L)*((SWIR-Blau) / (SWIR+Blau+L))$	ähnlich SVI, zieht Bodenhelligkeit mit in Betracht (aus: VILLA 2007)

In den nachfolgenden Kapiteln wird näher erläutert, welcher Index auf Grund welcher Merkmale für diese Arbeit genutzt wurde.

Im Anschluss daran erfolgte ein spektrales Resampling der Daten. Dieses beinhaltet ein Aggregieren der Hyperspektraldaten auf die RapidEye-Daten. Wichtig ist dies, wie bereits bei der Angleichung der geometrischen Auflösungen, für eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Sensoren und deren Auswirkungen auf die Indizes, um so Aussagen über die Nutzbarkeit der Sensoren für bestimmte Stadtgebiete treffen zu können.

Daran anschließend erfolgt der Vergleich der Ergebnisse. Beginnend wurde eine Flächenanalyse durchgeführt. Hierbei wird betrachtet, wie die städtischen Strukturen als Landbedeckungsmuster in ihren quantitativen Ausprägungen von den Sensoren abgebildet werden. Eine erste Vergleichbarkeit der Sensoren ist dabei gewährleistet. Dabei werden die Ausprägungen sowohl vor-, als auch nach der räumlichen Aggregation und dem spektralen Resampling, miteinander verglichen. Somit werden dabei bereits erste Erkenntnisse über die unterschiedliche Nutzbarkeit der Sensoren im urbanen Raum sowohl zeitlich, räumlich als auch spektral gewonnen.

Ein weiteres Mittel für den Vergleich der Sensoren ist die Berechnung eines Mustervergleiches mittels Semivariographie. Dies ist wichtig für geostatistische Bewertungen und eine räumliche Analyse.

Im abschließenden Fazit findet zunächst die Diskussion statt, welcher Sensor für welche Landbedeckungsart in Städten am besten geeignet ist (an Hand der berechneten Indizes und den Unterschieden vor und nach der Aggregation der Sensoren). Die Ergebnisse werden gegenübergestellt, gegebenenfalls die unterschiedliche Nutzbarkeit der einzelnen Sensoren herausgestellt und ein Ausblick gegeben. Ziel dabei sollte es sein, Annahmen zu treffen, inwieweit an Hand der erhaltenen Ergebnisse eine Übertragbarkeit auf andere Städte möglich wäre.

7. Auswertung

Die Auswertung wird anhand dreier Hauptaspekte vorgenommen. Diese sind:

1. Differenzen der Indizes zwischen den Sensoren vor und nach der Aggregierung,
2. Darstellung der berechneten Indizes und deren Nutzung für die Detektion der Landbedeckung und
3. Varianzenanalyse mittels Semivariographie.

Eine Vergleichbarkeit der Daten ist jederzeit möglich, da die unterschiedlichen Reflektanzen und Radianzen der Hyperspektral- Aufnahmen keine Rolle spielen, da sie nun als abgeleitete Spektralindizes vorliegen. Daher konnten die Daten untereinander ohne größere Umrechnungen verglichen werden.

Wie bereits in Tabelle 6-1 dargestellt, wurden für alle aufgelisteten Indizes Berechnungen durchgeführt. Zu nennen ist dabei grundsätzlich, dass Indizes nur für die Sensoren korrekt berechnet werden können, die die notwendigen Eingangparameter, also die erforderlichen Spektralbereiche besitzen. So konnte beispielsweise der bNDVI lediglich mit den RapidEye- und Hyperspektraldaten berechnet werden. Ebenso wurde der UI, SVI und BASVI nur für die Hyperspektraldaten berechnet, da nur dieser Sensor eine Abdeckung im SWIR gewährleistet. Es wurde untersucht, ob diese Indizes eine signifikante Verbesserung der Detektion von Landbedeckungen im urbanen Raum haben herbeiführen können. Darauf wird in den nun folgenden Ausführungen zu den Differenzen der Indizes zwischen den Sensoren vor und nach der Aggregierung eingegangen.

7.1 Differenzen der Indizes zwischen den Sensoren vor und nach der Aggregierung

7.1.1 Vergleich RapidEye und CIR 5x5

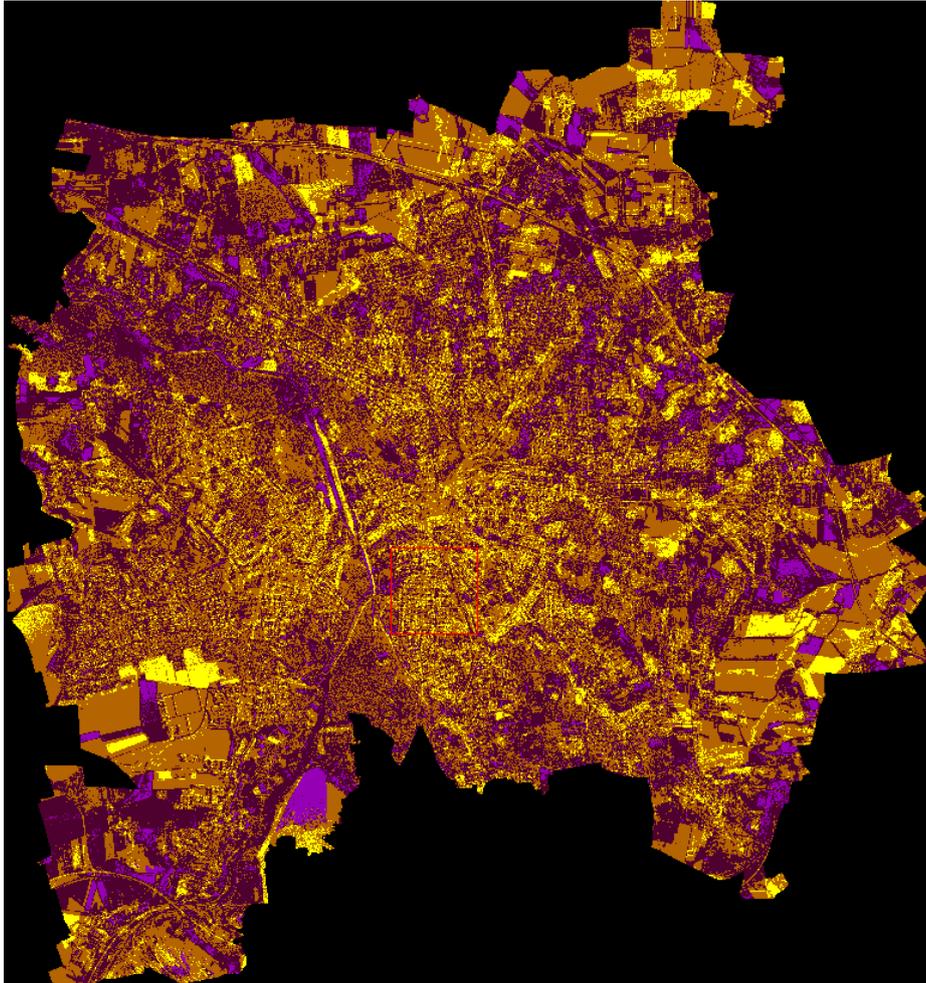
Bereits bei einer ersten Betrachtung der berechneten Indizes wurden die Unterschiede zwischen den Sensoren deutlich. So kam es auf Grund der Einflussfaktoren, wie in Kapitel 2 beschrieben, zu unterschiedlichen Wertebereichen bei den Indizes. Ebenso sind die Unterschiede in den Spektralbereichen der Sensoren dabei zu nennen. Dadurch kam es zu den in Tabelle 7-1 dargestellten Min/Max – Werten der berechneten Indizes, hier für die Unterschiede zwischen der RapidEye- und der auf 5x5m aggregierten CIR-Aufnahme.

Tab.7-1: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes für die RapidEye- Aufnahme vom 24.08.2011 und die auf 5x5m aggregierte CIR- Aufnahme vom 16.08.2009

RapidEye 24.08.11 – CIR 5x516.08.09	Indizes	Min	Max	Mean	Stand.- Abw.
	RE NDVI	-0,744	0,772	0,251	0,253
	CIR NDVI	-0,985	0,991	0,273	0,248
	RE NDWI	-0,787	0,892	-0,075	0,204
	CIR NDWI	-0,991	0,991	-0,229	0,219
	RE OSAVI	-0,744	0,772	0,154	0,233
	CIR OSAVI	-0,984	0,990	0,166	0,234
	RE MTVI1	136685,53	80237,28	3628,94	4581,26
	CIR MTVI1	-237,48	381,12	69,51	93,82
	RE MSAVI	-5,822	0,871	0,202	0,323
	CIR MSAVI	-14,817	0,996	0,216	0,452

RE TVI	0,038	1,128	0,853	0,151
CIR TVI	0	1,221	0,872	0,133
RE SAVI06	-1,191	1,235	0,246	0,373
CIR SAVI06	-1,569	1,582	0,266	0,374
RE RDVI	-174,42	110,90	25,11	25,89
CIR RDVI	-11,40	14,90	4,36	3,58
RE MSR	-0,797	2,286	0,508	0,528
CIR MSR	-0,989	14,900	0,573	0,638

Zu sehen ist dabei, dass die Werte der CIR- Aufnahme eher höhere Ausprägungen erreichen als die Werte der RapidEye- Aufnahme. Insbesondere bei den Indizes NDVI, NDWI, OSAVI und MSAVI wird dies deutlich. Diese weisen Maximalwerte von je +1 auf und werden bei den CIR-Daten mit etwa 0,99 annähernd erreicht. Bei den RapidEye- Daten werden lediglich Werte zwischen 0,77 und 0,89 erreicht. Die Gründe dafür liegen hauptsächlich beim Wettergeschehen in den Tagen bzw. im Monat vor der jeweiligen Aufnahme (siehe Kapitel 2.2). Diese Annahme wird dadurch bewiesen, dass die Indizes NDVI, OSAVI und MSAVI Anzeiger für die Vitalität von Pflanzen sind. Folglich scheinen die Pflanzen im August des Jahres 2009 vitaler bzw. wassergesättigter gewesen zu sein als die Pflanzen im August des Jahres 2011. Dies lässt sich anhand des dargestellten Wettergeschehens in Kapitel 2.2 nachvollziehen. Ebenso ersichtlich wird dies in einem Differenzbild des NDVI beider Aufnahmen. Dies ist in Abbildung 7-1 zu sehen.



Legende:

fliederfarben: Veränderung der Landbedeckung von 2009 zu 2011 mehr als 0,5

dunkellila: Veränderung von 2009 zu 2011 zwischen >0 und 0,5;

schwarz: keine Veränderung bzw. Abdeckung

ockerfarben: Veränderung von 2011 zu 2009 zwischen >0 und 0,5

hellgelb: Veränderung von 2011 zu 2009 mehr als 0,5

Abb.7-1: Differenzenbild aus den NDVI beider Aufnahmen

Für eine Betrachtung der Wertetabellen und der mittleren quadratischen Abweichung r^2 ist auf die Anlagen 15-17 zu verweisen. Hierbei wird ersichtlich, dass es in den Bereichen von Feldern zu einer weniger starken Veränderung als im Stadtgebiet kam. Daher ist die Heterogenität von städtischen Gebieten, insbesondere der Innenstadtbereiche, bewiesen. Die fliederfarbenen bzw. dunkellila gefärbten Flächen stellen Veränderungen von 2009 zu 2011 dar. Dabei

wurden die Flächen abgeleitet, die sich in ihren NDVI Werten um weniger als 0,5 (dunkellila) und mehr als 0,5 (fliederfarben) verringert haben. Zu sehen ist, dass dies insbesondere die Gebiete des Auenwaldes und der bewachsenen Felder betrifft. Demnach ist die Annahme aus den vorherigen Ausführungen, dass der Boden 2009 wassergesättigter und die Vegetation vitaler war, belegt. Ein Problem bei der Interpretation ist besonders bei einem Vergleich mittels CIR immer der Schattenwurf. Auch hierbei treten größere Effekte auf. Diese werden in der Problemanalyse in Kapitel 8 genauer erläutert. Bei einer Interpretation der Werte ist darauf zu achten, dass der RapidEye- Sensor andere Wellenlängenbereiche als der CIR- Sensor abdeckt. Folglich kann auch hier ein Unterschied begründet liegen. Zu verweisen ist dabei auf Abbildung 4-1 in der die Wellenlängenbereiche der Sensoren gegenübergestellt werden. So wird bei dem CIR-Sensor v.a. der NIR-Bereich deutlich breiter gestreckt als bei dem RapidEye- Sensor. Da dieser Bereich besonders intensiv auf Vegetation hinweist, können die Werte in gewisser Weise auch darauf zurückgeführt werden, da größere Rückstreubereiche betrachtet werden. Dies wird ebenso bei einer Betrachtung der Minimalwerte der oben beschriebenen Indizes (NDVI, OSAVI und MSAVI) deutlich. Auch dabei wird eine deutlich stärkere Ausprägung der Werte hin zum maximalen Minimalwert von -1 sichtbar. Dies kann nicht direkt auf Wettereinflüsse bezogen werden, da hauptsächlich bebaute Flächen im Bereich um -1 abgebildet werden. Somit gilt ebenso die Begründung, dass es zu diesem Unterschied durch die unterschiedlichen Wellenlängenabdeckungen der Sensoren kommt. Ebenso ist besonders auf den NIR-Bereich zu verweisen, da die Reflexionskurve der Vegetation einen hohen Einfluss hat und somit bebaute Flächen nicht abgedeckt bzw. mit zunehmenden Wellenlängenbereichen die Unterschiede zur Vegetation deutlicher werden. Des Weiteren sind die Mittelwerte für die Indizes von CIR und RapidEye sehr aussagekräftig bezogen auf den jeweiligen Sensor. So lässt sich feststellen, dass die in den vorherigen Ausführungen dargestellten Indizes bei der CIR- Aufnahme höhere Werte als bei der RapidEye-Aufnahme aufweisen. Dies unterstützt die Beweisführung für bereits getroffene Aussagen über das Wettergeschehen und den Einfluss der unterschiedlichen Wellenlängenabdeckungen der Sensoren erneut. Somit weist die Pflanzenstruktur im August 2009 im Vergleich zum August 2011 einen höheren Chlorophyllgehalt und damit auch eine höhere Vitalität im Stadtgebiet Leipzigs auf.

Während der NDVI das Chlorophyll und die Versorgung der Pflanzen mit Tiefenwasser betrachtet, ist der NDWI ein Index für den Nachweis von oberirdischen Wasserflächen. Es müssen dafür andere Bezüge zur Umwelt hergestellt werden. Eine Übertragbarkeit der Interpretationsansätze zwischen den einzelnen Indizes ist daher nur begrenzt möglich. Offensichtlich konnten die Extremwerte für den NDWI besser vom CIR-Sensor abgedeckt werden, allerdings weist der Mittelwert von CIR im Vergleich zu RapidEye darauf hin, dass die Wasserflächen nicht in dem Maße abgrenzbar im August 2009 wie im August 2011 waren. Der Grund dafür ist, dass am Tag vor der RapidEye- Aufnahme mit $7,3\text{mm/m}^2$ starke Niederschläge zu verzeichnen waren und es dadurch zu einer größeren Anhäufung positiver Rückstreuwerte für diese Aufnahme kam. Vor der Aufnahme im Jahre 2009 war ein solches Ereignis nicht zu verzeichnen und daher sind die Werte stärker im negativen Bereich als die Werte für das Jahr 2011. Ersichtlich dabei ist die unterschiedliche Abbildung der Landbedeckungsstruktur durch die beiden Indizes NDVI und NDWI.

Die abzulesenden starken Unterschiede für CIR 2009 und RapidEye 2011 im MTVI1 schließen sich aus den 2 Jahren zwischen den Aufnahmen, in denen stets Veränderungen im Bewuchs und in den Richtungen des Vegetationswachstums vorherrschend waren. Ebenso liegt es an den Einflüssen der flugzeuggetragenen CIR- Aufnahme. Hierbei kommt es durch die Aufnahme des gesamten Stadtgebiets Leipzigs zu erhöhten Schatteneinflüssen und zu einem „Abklapp-Effekt“ der Häuser. Dies wird in der Problemanalyse nochmals genauer erläutert.

7.1.2 Hyperspektraler Vergleich

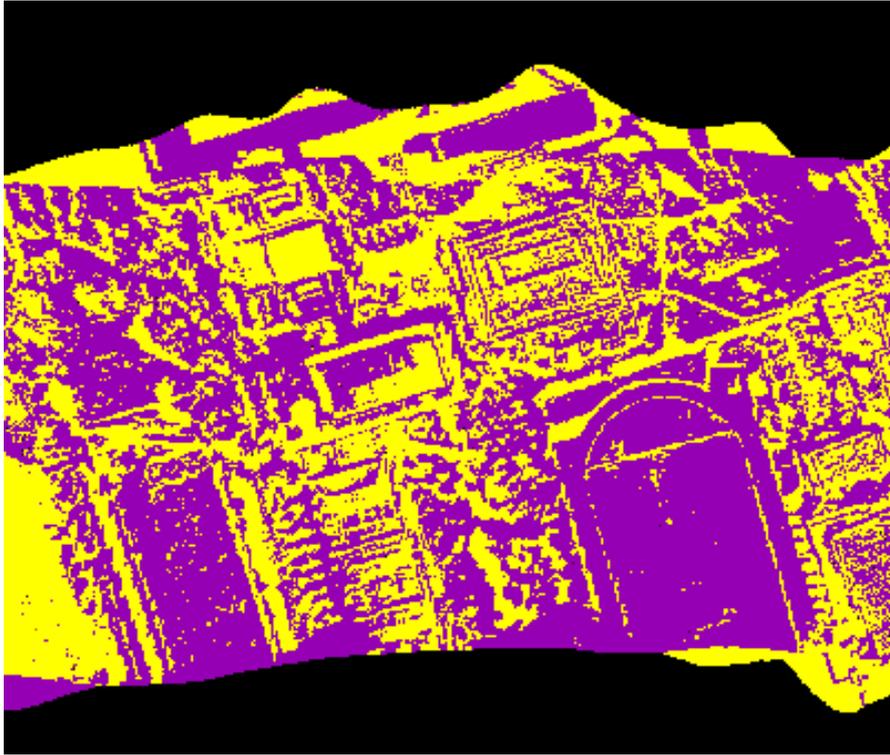
Nachfolgend werden die Hyperspektral-Aufnahmen vom 27.06.2011 und 28.06.2011 miteinander verglichen um auf die Variabilität städtischer Bereiche aufmerksam zu machen. Hierbei sind besonders eine gleiche Flugrichtung und eine möglichst identische Tageszeit von großer Bedeutung, da diese Einflüsse sonst noch massivere Auswirkungen auf den Ergebnisvergleich haben können. In Tabelle 7-2 sind die berechneten Indizes beider Aufnahmen dargestellt.

Tab.7-2: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes
für die Hyperspektral- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 28.06.2011

Hyper 27.06.11 - Hyper 28.06.11	Indizes	Min	Max	Mean	Stand.- Abw.
79_102	27 NDVI	-1	1	0,069	0,090
	28 NDVI	-1	1	0,057	0,061
12_192	27 bNDVI	-1	0,976	0,622	0,285
	28 bNDVI	-1	0,976	0,581	0,289
83_302	27 UI	-1	1	-0,310	0,376
	28 UI	-1	1	-0,289	0,353
11_218	27 SVI	-1	0,980	0,645	0,284
	28 SVI	-1	0,989	0,607	0,289
58_93	27 OSAVI	-0,999	0,989	0,107	0,267
	28 OSAVI	-0,999	0,984	0,074	0,222
31_93	27 NDWI	-0,975	1	-0,532	0,323
	28 NDWI	-0,970	1	-0,499	0,313
32_59_187	27 MTVI1	-5455,56	13258,32	184,70	603,83
	28 MTVI1	-7291,92	13010,52	135,11	583,40
11_218	27 BASVI	-1,587	1,568	0,225	0,476
	28 BASVI	-1,589	1,583	0,163	0,409

Die Tageszeiten der Aufnahmen waren am 27.06.2011 zwischen 09.30 und 09.40 Uhr sowie auch am 28.06.2011 zwischen 09.30 und 09.40 Uhr. Demnach sind die Einflüsse der Tageszeit bei einem Vergleich zu vernachlässigen, da wohl nur wenige Sekunden Unterschied zwischen den Aufnahmezeitpunkten liegen. Wie in Tabelle 7-2 zu sehen, wurden andere Indizes für den Vergleich der Hyperspektral-Aufnahmen genutzt, da hierbei deutlich mehr Kanalkombinationen für die Detektion urbaner Räume zur Verfügung standen. Deutlich erkennbar ist auch, dass die ausgewählten Bandkombinationen (Spalte 1 der Tabelle 7-2) den Wertebereich der Indizes nahezu komplett ausschöpfen. Somit ist eine optimale

Vergleichbarkeit möglich. Wie zu erwarten war, sind die Unterschiede nicht so groß wie beim Vergleich der CIR-Aufnahme und der RapidEye- Aufnahme. Daher wurden hauptsächlich die Mittelwerte der ermittelten Indizes miteinander verglichen, da diese eine Interpretation der Bedingungen eher zulassen. Bei einer Betrachtung aller Indizes lässt sich feststellen, dass die Mittelwerte vom 27.06.2011 leicht höher als die vom 28.06.2011 sind. Anhand des Wetters lässt sich dies nicht erklären, da zu bei beiden Aufnahmetagen keinerlei Niederschläge zu verzeichnen waren. Lediglich am 26.06.2011 kam es zu minimalen Niederschlägen von 1,1mm/m². Ob dies die Unterschiede erklären kann ist zu bezweifeln. Bei einem Blick auf den NDWI wird deutlich, dass der Mittelwert für den 27.06.2011 niedriger ist als für den Folgetag. Wenn eine direkte Abhängigkeit zum Niederschlagsereignis einen Tag vorher bestehen würde, müsste der Wert am 28.06.2011 geringer sein. Daher ist der Einfluss des Niederschlags auf die Aufnahmetage unter diesem Aspekt zu vernachlässigen. Einen weitaus höheren Effekt wird die Befliegung an sich haben. Da nie 2 exakt identische Luftbildstreifen aufgenommen werden können und stets Unterschiede in der Beleuchtung existieren sowie auch durch Windeinflüsse veränderte Aufnahmebedingungen vorherrschen, ist dies die wahrscheinlichste Erklärung für die Unterschiede. Ein hilfreicher Index dafür ist auch der MTVI1. Dieser ermöglicht Aussagen zu Veränderungen in der Blatt- und Bedeckungsstruktur. Bei einer Betrachtung der Werte des MTVI1 wird deutlich, dass – im Vergleich zu den anderen Indizes – starke Unterschiede zu beobachten sind. Es herrschen stets Einflüsse wie: „Pitch“ (Neigungswinkel oder plötzliches „nicken“), „Roll“ (eine Art Bewegung wie eine Walze) und „Yaw“ (Bewegung um die Höhenachse) des Flugzeugs, Wind und die Abhängigkeit des Aufnahmewinkels. Im Differenzenbild aus Abbildung 7-2 sind die Unterschiede im MTVI1 markant sichtbar. Besonders die Befliegungseffekte sind im nördlichen und südlichen Teil des Ausschnitts gut zu sehen.



Legende:

fliederfarben: Veränderung der Landbedeckung von 2009 zu 2011 mehr als 0,5

dunkellila: Veränderung von 2009 zu 2011 zwischen >0 und 0,5;

schwarz: keine Veränderung bzw. Abdeckung

ockerfarben: Veränderung von 2011 zu 2009 zwischen >0 und 0,5

hellgelb: Veränderung von 2011 zu 2009 mehr als 0,5

Abb.7-2: Ausschnitt aus dem Differenzenbild des MTVI1 der Hyperspektral-
Aufnahmen (Gebiet am Sportforum, Leipzig, Legende gemäß Abbildung
7-1)

In Abbildung 7-2 sind jeweils starke Veränderungen in den Ausprägungen des MTVI1 zu sehen. Die einzelnen Wertetabellen und r^2 sind in den Anlagen 23-25 festgehalten. Die starken Veränderungen liegen unter anderem am Wertebereich des Index begründet. Dabei können die Werte in Bereichen von mehreren Tausenderstellen vorliegen. Die Veränderungen im Differenzenbild sind schon ab einem Unterschied von größer 0,5 fliederfarben bzw. hellgelb dargestellt. Folglich kommt es zu den starken Veränderungen in Abbildung 7-2. Zu sehen sind dennoch markante Merkmale, die auf die oben genannten Einflusseffekte (Roll,

Pitch, Yaw, Wind und Aufnahmewinkel) zurückzuführen sind. So sind z.B. Umrandungen von Häusern deutlich sichtbar. Dies liegt an Veränderungen im Schattenwurf bzw. hauptsächlich an einem nicht exakt identischen Aufnahmewinkel. Dieser führt zu einer veränderten Aufnahme der Reflektanz und zu Unterschieden zwischen den beiden Aufnahmen. Dies ist ein weiteres Problem der flugzeuggetragenen Systeme. Auf diese Problematik wird in Kapitel 8 „Problemanalyse“ und „Fazit“ nochmals eingegangen.

Beim Vergleich der Hyperspektral- Aufnahmen muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass bereits innerhalb eines Tages Probleme der Vergleichbarkeit von Daten gegeben sein können. Dieses Problem ist, wie bereits bei den Darlegungen zu dem Vergleich von CIR und RapidEye, mit einer zunehmenden zeitlichen Distanz immer größer. Demnach muss ein Vergleich von Sensoren auch stets den Aspekt der zeitlichen Vergleichbarkeit berücksichtigen.

7.1.3 Vergleich zweier Aufnahmen des RapidEye- Sensors

Um deutlich zu machen, wie die Unterschiede zwischen 2 Monaten aussehen können, wurden auch die RapidEye- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 24.08.2011 verglichen. Dies ist in Tabelle 7-3 dargestellt.

Tab.7-3: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes für die RapidEye- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 24.08.2011

RapidEye 24.08.11 - RapidEye 27.06.11	Indizes	Min	Max	Mean	Stand.- Abw.
	24 NDVI	-0,744	0,772	0,251	0,254
	27 NDVI	-0,774	0,797	0,281	0,255
	24 NDWI	-0,787	0,892	-0,075	0,204
	27 NDWI	-0,683	0,785	-0,135	0,217
	24 OSAVI	-0,744	0,771	0,154	0,233
	27 OSAVI	-0,774	0,797	0,172	0,242

24 MTVI1	-136685,53	80237,28	3628,94	4581,26
27 MTVI1	-133326,97	77461,56	4429,67	5415,49
24 MSAVI	-5,822	0,871	0,202	0,323
27 MSAVI	-6,842	0,887	0,225	0,340
24 TVI	0,038	1,128	0,853	0,152
27 TVI	0	1,139	0,870	0,154
24 SAVI06	-1,191	1,235	0,246	0,373
27 SAVI06	-1,238	1,276	0,276	0,388
24 RDVI	-174,42	110,90	25,11	25,89
27 RDVI	-182,38	113,48	31,25	28,10
24 MSR	-0,797	2,286	0,508	0,528
27 MSR	-0,822	2,505	0,580	0,568
24 bNDVI	-0,884	0,726	-0,016	0,201
27 bNDVI	-0,842	0,647	0,066	0,216
24 CVI	0,014	38,657	0,996	0,289
27 CVI	0,004	55,047	0,823	0,230

Bei einem Vergleich über mehrere Monate hinweg muss neben dem Wettergeschehen auch die Phänologie in Betracht gezogen werden. Auf Grund der beobachteten Wetterbedingungen – relativ kühle Temperaturen und viel Niederschlag (siehe Kapitel 2.2) – wurde der 27.06.2011 in den Zeitraum des Frühsommers eingeordnet. Dieser verläuft Ende Juni zwischen dem Ende der Blüte und der Fruchtreife. Es können dabei, jeweils abhängig vom genauen Stadium der Phänologie, Unterschiede in den jeweiligen Reflektanzen vorkommen und Unterschiede zwischen den Aufnahmen entstehen. Der August gehört stets zum Spätsommer und zur Fruchtreife. Folglich ist es wichtig auch diese Unterschiede bei einer vergleichenden Auswertung mit zu berücksichtigen. Für eine genaue Analyse wurde ebenso die Tageszeit betrachtet. Diese war sowohl am 27.06.2011, wie auch am 24.08.2011 um 11.04 Uhr. Es lagen dabei nur 15 Sekunden zwischen den Aufnahmen. Daher sind die Einflüsse der Tageszeit zu vernachlässigen. Wie bereits in den vorherigen Ausführungen beschrieben, war das Wettergeschehen im Juni und August 2011 annähernd identisch. Es existierten in den Tagen vor der Aufnahme nur vereinzelt

Niederschläge, allerdings am 23. August, dem Tag vor der Aufnahme, kam es zu einem stärkeren Niederschlagsereignis von 7,3mm/m². Dies hatte unmittelbare Auswirkungen auf die Ergebnisse des NDWI. Bei einer Betrachtung in Tabelle 7-3 wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen den RapidEye- Aufnahmen beim NDWI deutlich höher als bei den anderen Indizes mit einem Wertebereich von +-1 sind. Daraus kann man schließen, dass oberflächlich höhere Mengen an Wasser vorhanden waren und es so zu höheren Werten des NDWI kam. Dies wird anhand eines Mittelwertvergleichs deutlich. Dieser liegt am 24.08.2011 leicht höher als am 27.06.2011. Folglich ist vergleichsweise mehr Wasser im August oberflächlich vorhanden gewesen als im Juni. Deutlich wird dies auch im Differenzenbild des NDWI der jeweiligen RapidEye- Aufnahmen. Zu sehen ist dieses in Abbildung 7-3.



Legende:

fliederfarben: Veränderung der Landbedeckung von 2009 zu 2011 mehr als 0,5

dunkellila: Veränderung von 2009 zu 2011 zwischen >0 und 0,5;

schwarz: keine Veränderung bzw. Abdeckung

ockerfarben: Veränderung von 2011 zu 2009 zwischen >0 und 0,5

hellgelb: Veränderung von 2011 zu 2009 mehr als 0,5

Abb.7-3: Differenzenbild des NDWI der RapidEye- Aufnahmen (Legende gemäß Abbildung 7-1)

Bei einer Betrachtung des Differenzenbildes wird deutlich, dass die Bereiche im Auenwald sowie fast alle Felder im Juni 2011 leicht höhere NDWI- Werte aufwiesen als im August 2011. Ein Grund dafür kann sein, dass diese Felder, ähnlich wie die Auenwaldgebiete bewachsen sind. Folglich ändert sich, wie bereits in den vorherigen Ausführungen dargestellt, die Wirkungsweise des NDWI. Daher kann man eine Betrachtung des vorhandenen Wassergehalts nur auf die nicht-bewachsenen Felder bzw. die bewässerten Gebiete im Stadtkern konzentrieren. Hierbei ist ersichtlich, dass es von Juni zu August zu einer Erhöhung um weniger als 0,5 im NDWI-Wert kam (dargestellt in Ockerfarbe). Das hellgelbe Feld im südwestlichen Bereich Leipzigs ist vermutlich auf eine unmittelbare Bewässerung des Feldes vor der Aufnahme am 24. August 2011 zurückzuführen. Folglich konnte anhand des Differenzenbildes die Annahme gestützt werden, dass es von Juni zu August zu einer leichten Veränderung im oberflächlich vorhandenen Wasser kam.

Auf Grund eines ähnlichen Wettergeschehens in den Wochen vor den jeweiligen Aufnahmen sind die Vegetationsindizes (NDVI, MSAVI, OSAVI, usw.) wenig unterschiedlich. Dadurch konnte herausgestellt werden, dass es bei gleichen Sensoren stets auf die äußeren Einflüsse die während und vor der Aufnahme herrschten ankommt bzw. man die Wirkungsweise der Spektralindizes genau verstehen muss um eine Analyse nach den jeweiligen Vorgaben durchführen zu können. Es bleibt festzuhalten, dass der RapidEye- Sensor durchaus geeignet ist um Veränderungen über die Zeit darzustellen. Für eine abschließende Bewertung des Sensors ist auf Kapitel 8 zu verweisen. Dahingehend ist es bei einem

Vergleich von unterschiedlichen Sensoren stets ratsam möglichst gleiche Aufnahmezeitpunkte und Aufnahmebedingungen zu nutzen, da sonst zu viele äußere Einflüsse betrachtet werden müssen und der wichtige Vergleich der Eigenschaften der Sensoren dabei nachteilig beeinflusst werden kann.

7.1.4 Vergleich Hyperspektral 5x5 und RapidEye

In Tabelle 7-4 wurden die Unterschiede zwischen der Hyperspektral- Aufnahme – auf 5x5m Auflösung (wie RapidEye) aggregiert – und der RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011 dargestellt. Ein Differenzenbild konnte nicht berechnet werden, da es zu Problemen der Übertragbarkeit des Hyperspektralstreifens auf die RapidEye- Aufnahme des Stadtgebietes in der Software ENVI kam.

Tab.7-4: Min/Max-Werte, sowie Mittelwert und Standardabweichung der Indizes für die aggregierte Hyperspektral- Aufnahme vom 27.06.2011 und der RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011

Hyper5x5 27.06.2011- RapidEye 27.06.2011	Indizes	Min	Max	Mean	Stand.- Abw.
	HY NDVI	-1	1	0,069	0,090
	RE NDVI	-0,774	0,797	0,281	0,255
	HY NDWI	-0,973	1	-0,530	0,323
	RE NDWI	-0,683	0,785	-0,135	0,217
	HY OSAVI	-0,999	0,984	0,118	0,279
	RE OSAVI	-0,774	0,797	0,172	0,242
	HY MTVI1	-4437	8472,24	204,27	631,01
	RE MTVI1	-133326,97	77461,56	4429,67	5415,49
	HY bNDVI	-1	0,967	0,620	0,285
	RE bNDVI	-0,842	0,647	0,066	0,216

Es sind auch hier große Unterschiede in den jeweiligen Werteverläufen der Indizes zu beobachten. Dies liegt vor allem daran, dass der Hyperspektralstreifen eine deutliche höhere spektrale Auflösung als die RapidEye- Aufnahme besitzt. Durch die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten bei Hyperspektral- Aufnahmen ist es möglich die in Tabelle 7-4 zu sehenden Ausprägungen der Indizes bzw. die Grenzen der Indizes nahezu zu erreichen. Da bei der RapidEye- Aufnahme nur eine Bandkombination möglich ist, kann diese optimale Nutzung der Indizes nicht erreicht werden. Äußere Einflüsse können bei den Aufnahmen des gleichen Tages nahezu ausgeschlossen werden. Lediglich die Tageszeit variierte von 09.30 – 09.40 Uhr bei der Hyperspektral- Aufnahme und 11.04 Uhr bei der RapidEye- Aufnahme. Da die RapidEye- Aufnahme atmosphärenkorrigiert vorlag, konnten auch diese Einflüsse vernachlässigt werden. Der wohl wichtigste Faktor ist die Entfernung bzw. die räumliche Auflösung. Während RapidEye satellitengestützt aus 630km Höhe Daten aufzeichnet, wurde der Hyperspektralstreifen aus einer Höhe von 1km aufgenommen (siehe Kapitel 4.2). Somit werden viel genauere Strukturveränderungen aufgenommen, die wie in Tabelle 7-4 dargestellt, Extremwerte erreichen. Dies liegt zum einen an der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Sensoren und zum anderen an der Art der durchgeführten Aggregation. Auch nach einer räumlichen Aggregation der Daten der Hyperspektral- Aufnahme bleiben diese genaueren Wertebereiche erhalten, da hierbei die Nearest-Neighbour-Methode genutzt wurde. Sie ordnet den nächstgelegenen Grauwert der umliegenden Pixel dem ursprünglichen Pixel zu. Daher werden bei dieser Methode keine neuen Grauwerte berechnet und die spektrale Signatur bleibt erhalten. Somit bleiben auch die Indizes in ihren Werten nahezu identisch.

Demnach ist eine Bedeutung von Hyperspektral- Aufnahmen herausgestellt. Sie erlauben, mittels Spektralindizes, eine noch genauere Unterscheidung von Landbedeckungen und dementsprechenden Veränderungen im Landschaftsbild. So lassen sich beispielsweise Hausdächer und Straßen besser voneinander trennen als bei anderen Fernerkundungssensoren. Daher ist besonders in stark heterogen geprägten Arealen wie Städten eine Nutzung hyperspektraler Aufnahmen empfehlenswert, allerdings gilt es dabei immer auch den Kosten-Nutzen-Faktor zu beachten. Für eine abschließende Bewertung des Sensors ist auf Kapitel 8 zu verweisen.

7.2 Darstellung der berechneten Indizes und deren Nutzung für die Detektion der Landbedeckung

Die Aussage der besseren Trennbarkeit von Landbedeckungen mittels Hyperspektral- Sensoren wird mit den nun folgenden Analyseergebnissen nochmals belegt. So wurden aus den Spektralindizes verschiedene Landbedeckungsklassen gebildet, um die Möglichkeiten der Nutzung der jeweiligen Sensoren besser darstellen zu können. Diese Klassen sind für die Hyperspektral-Aufnahmen in Abbildung 7-4 dargestellt.

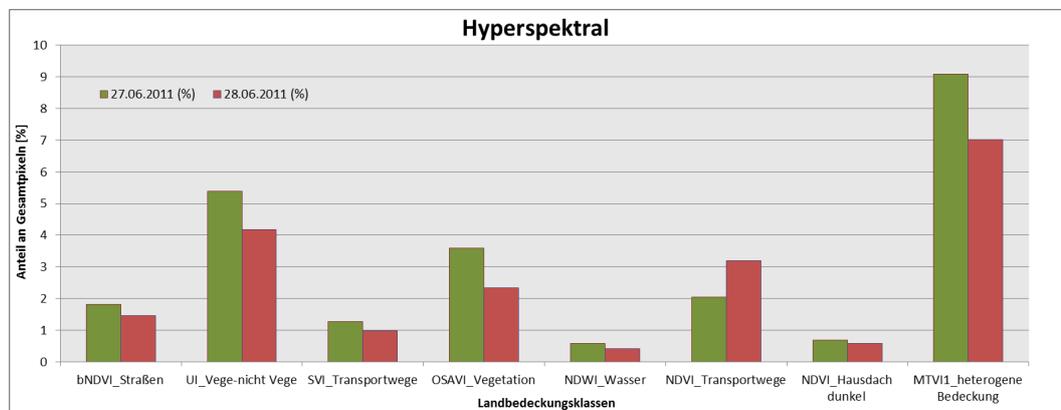


Abb.7-4: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die Hyperspektral- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 28.06.2011 (in Prozenten von der jeweiligen Gesamtpixelanzahl)

Die Landbedeckungsklassen wurden für die Aufnahme vom 27.06.2011 erstellt und als Vergleich die identischen Bereiche der Spektralindizes auf die Aufnahme vom 28.06.2011 übertragen. Genutzt wurden dabei die in Tabelle 7-5 zu sehenden Bereiche der Hyperspektralindizes. Des Weiteren wurden nur die Bandkombinationen verwendet, die am genauesten die Strukturen herausgestellt haben. Für die exakte Findung der Kombinationen wurden die in Kapitel 3 beschriebenen spektralen Eigenschaften urbaner Räume genutzt. Die Wellenlängen der Bänder sind in Klammern dargestellt.

Tab.7-5: Genutzte Spektralindizes-Bereiche für die Abgrenzung der Landbedeckungsklassen der Hyperspektral- Aufnahmen vom 27./28.06.2011

Spektralindizes (Bandkombination)[nm]	ermittelte Bereiche	Landbedeckungsklasse
bNDVI (12[448,2]/192[1398,1])	0,2 - 0,31	Straßen
NDWI (31[532,9]/93[821])	0,4 - 1	Wasserflächen
MTVI1 (32[537,3]/59[661,7]/187[1366,6])	1000 - 3800	Heterogenität Bedeckungen
NDVI (79[754,6]/102[863,6])	0 - 0,03	Transportwege
NDVI (79[754,6]/102[863,6])	-0,1 - -0,03	Hausdächer dunkel
OSAVI (58[657,2]/93[821])	0,9 - 1	Vegetation
UI (83[773,6]/302[2089,6])	-0,83 - -0,65	Vegetation - nicht Vegetation
SVI (11[443,7]/218[1561,8])	0,32 - 0,38	Transportwege

Die jeweiligen Ausschnitte der Aufnahmen sind in den Anlagen 44-51 beigelegt. Ein Vergleich der Ausprägungen der Landbedeckung wird genutzt, um anhand der jeweils genutzten Bereiche der Spektralindizes zu sehen, inwiefern eine Übertragbarkeit eines Sensors erfolgen kann und wie der zeitliche Verlauf dieser Ausprägungen ist. Des Weiteren wird untersucht wie gut die verschiedenen Sensoren eine Klassifizierung der Landbedeckung in städtischen Gebieten zulassen. Hierfür wurde eine gänzlich deskriptive Methode gewählt, da ein

tiefere Eindringen in diesen Aspekt durch die geringe Zeitspanne für das Erstellen dieser Arbeit nicht bewerkstelligt werden konnte.

In Abbildung 7-4 ist zu sehen, dass Bereiche die mit der Detektion von Vegetation zu tun haben am 27.06.2011 höher sind als am 28.06.2011. Ursächlich dafür sind die leicht veränderten Schatteneffekte auf Grund des unterschiedlichen Aufnahmewinkels. So können Bereiche die tags zuvor noch als Baum abgedeckt wurden, am anderen Tag schon dem Bereich der Straße zugeordnet werden und umgekehrt. Keine Aufnahme ist genau identisch zur vorherigen Aufnahme. Dies gilt insbesondere für flugzeuggetragene Systeme. Darauf wird in Kapitel 8 nochmals Bezug genommen. Aus Abbildung 7-4 kann ebenso geschlossen werden, dass der NDVI nicht geeignet ist um Transportwege zu klassifizieren. Besser geeignet sind dafür der UI bzw. SVI, die eine Detektion urbaner Flächen bzw. eine Unterscheidung von Böden und Straßen zulassen (nach VILLA 2007). Da bei diesen Indizes der 27.06.2011 stets einen höheren Anteil an der Gesamtpixelzahl aufweist und der 28.06.2011 nur bei dem mittels NDVI ermittelten Transportwegen zu beobachten ist. Man sollte beachten, dass auch hierbei größere Fehler durch Schatten aufkommen können. In den Ausschnitten der Hyperspektral- Aufnahmen (siehe Anlagen 4 und 5) ist dies bereits ersichtlich. Der Schattenwurf reicht bis über die Straßen oder verlängert scheinbar Hausdächer. Auf dieses Problem bei der Detektion urbaner Räume ist immer wieder hinzuweisen. Der erhöhte Anteil der heterogenen Bedeckung, abgeleitet aus dem MTVI1 am 27.06.2011 im Vergleich zum 28.06.2011, ist ein weiterer Indikator für die starke Wandelbarkeit in Städten, welche durch Einflüsse der Aufnahmemethode, äußere Faktoren und den spezifischen Eigenschaften der Sensoren entstehen.

Um den Einfluss äußerer Faktoren wie Sonneneinstrahlung, Wettergeschehen, Phänologie und Schatteneffekte deutlicher zu machen, wurden auch die ermittelten Landbedeckungsklassen für die RapidEye- Aufnahmen in Abbildung 7-5 gegenübergestellt. Zu erwähnen ist dabei, dass zur besseren Vergleichbarkeit für die RapidEye- Aufnahme vom 24.08.2011 die gleichen Index-Bereiche genutzt wurden wie für den 27.06.2011.

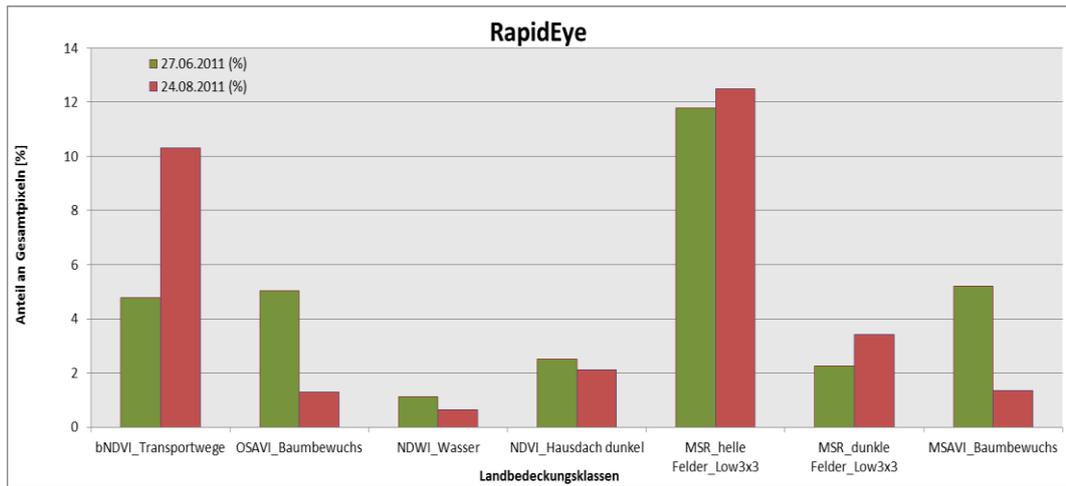


Abb.7-5: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die RapidEye- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 24.08.2011 (in Prozenten von der jeweiligen Gesamtpixelanzahl)

Des Weiteren wurden in Tabelle 7-6 die genutzten Spektralindizes-Bereiche für die Erstellung der Landbedeckungsklassen aufgetragen. Für den MSR wurde dabei noch ein 3x3 Low-Pass-Filter für glattere und geschlossenere Konturen genutzt.

Tab.7-6: Genutzte Spektralindizes-Bereiche für die Abgrenzung der Landbedeckungsklassen der RapidEye- Aufnahmen vom 27.06.2011 und 24.08.2011

Spektralindizes (Filter)	ermittelte Bereiche	Landbedeckungs- klasse
bNDVI	-0,29 - -0,17	Transportwege
NDWI	0,45 - 0,68	Wasserflächen
NDVI	-0,23 - -0,133	Hausdächer dunkel
MSR (Low 3x3)	-0,13 - -0,05	Felder dunkel
MSR (Low 3x3)	0,45 - 1,2	Felder hell
OSAVI	0,64 - 0,72	Baumbewuchs
MSAVI	0,78 - 0,84	Baumbewuchs

Die jeweiligen Ausschnitte der Aufnahmen sind in den Anlagen 52-58 beigelegt. Wie bereits den Ausführungen in Kapitel 7.1.3 zu entnehmen ist, kommt es bei einem fast zweimonatigen Abstand der Aufnahmezeiten zu einer Reihe von Effekten die in eine vergleichende Betrachtung einbezogen werden sollten. Bei einer Analyse der in Abbildung 7-5 gegenübergestellten Anteile an den Landbedeckungsklassen ist ersichtlich, dass der Aufnahmezeitpunkt 27.06.2011 einen deutlich höheren Anteil an der Klasse Baumbewuchs hat. Dies liegt daran, dass sich der Bereich der spektralen Abdeckung dieser Klasse offensichtlich verschoben hat. Als Vergleich wurde Tabelle 7-3 nochmals betrachtet. Darin ist erkennbar, dass die Werte für den OSAVI und MSAVI, mit denen die Landbedeckungsklasse gebildet wurde, am 27.06.2011 durchschnittlich höher waren als am 24.08.2011. Folglich kam es zu einer leichten Verschiebung des in Tabelle 7-6 dargestellten Bereichs zur Detektion der Landbedeckungsklasse Baumbewuchs durch die von außen einwirkenden Faktoren. Da RapidEye ein satellitengestütztes System ist, sind Einflüsse die durch die Befliegung entstehen nicht so stark wie in flugzeuggetragenen Systemen wie sie für CIR- oder Hyperspektral- Aufnahmen genutzt werden. Auch anhand der ermittelten Klassen der Felder und Transportwege werden Unterschiede sichtbar. Da die Klasse des Baumbewuchses zum 24.08.2011 quantitativ abgenommen hat, wurde dementsprechend bei anderen Klassen eine positive Veränderung zum 24.08.2011 erreicht. Die Gründe liegen wie bereits benannt in den äußeren, natürlich bedingten Einflüssen. Mittels eines Vergleichs der Landbedeckungs-klassen der RapidEye- Aufnahmen wurde herausgestellt, dass eine Übertragbarkeit bereits ermittelter Bereiche zur Detektion einzelner Landbedeckungen über mehrere Wochen oder sogar Monate nicht empfehlenswert ist. Wie bereits in den Ausführungen zu den Hyperspektral-ermittelten Klassen beschrieben, wirken teilweise Einflüsse schon zwischen aufeinanderfolgenden Tagen und daher müssen für eine genaue Veränderungs-analyse mittels Spektralindizes stets neue Bereiche gebildet bzw. gesucht werden.

Da nur eine CIR- Aufnahme für die Analyse der Sensoren genutzt wurde, konnte ein Vergleich zwischen den zeitlichen Veränderungen in den Landbedeckungs-klassen nicht durchgeführt werden. Zur Vollständigkeit wurde auch für die CIR- Aufnahme Landbedeckungsklassen gebildet. Diese sind in Abbildung 7-6 ersichtlich.

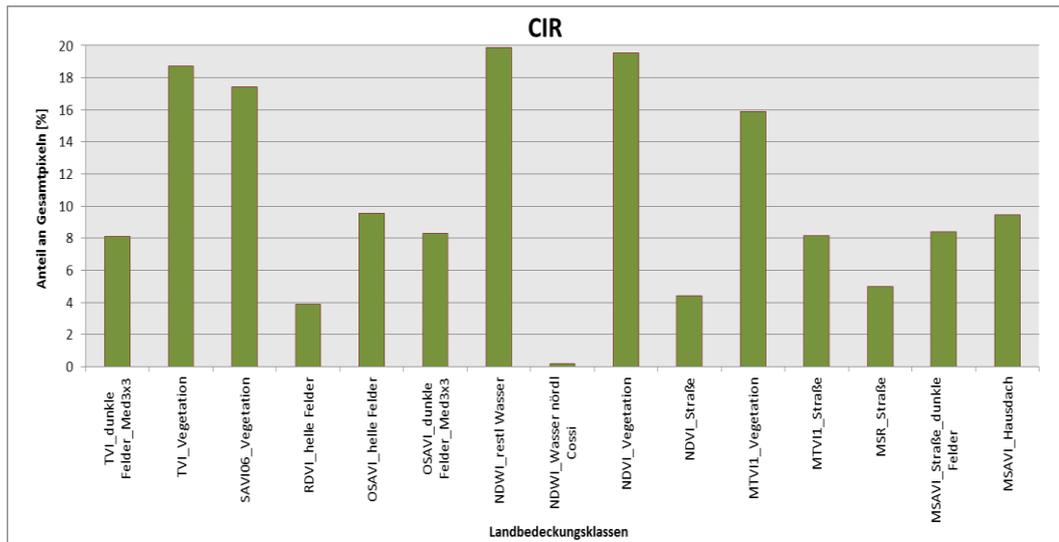


Abb.7-6: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die CIR-Aufnahme vom 16.08.2009 (in Prozenten von der jeweiligen Gesamtpixelanzahl)

Die Ermittlungen der Klassen führten zu einer interessanten Problematik. Als mittels des NDWI die Klasse Wasser gebildet werden sollte, wurden nur für den nördlichen Teil des Cospudener Sees die maximalen Ausprägungen des NDWI erreicht. Für die restlichen Wasserflächen musste ein negativer Bereich gewählt werden. Dies ist in Tabelle 7-7 dargestellt.

Tab.7-7: Genutzte Spektralindizes-Bereiche für die Abgrenzung der Landbedeckungsklassen der CIR- Aufnahme vom 16.08.2009

Spektralindizes (Filter)	ermittelte Bereiche	Landbedeckungsklasse
TVI (Median 3x3)	0,73 - 0,77	Felder dunkel
TVI	0,95 - 1,12	Vegetation
SAVI06	0,6 - 1,06	Vegetation
RDVI	5,8 - 6,7	Felder hell
OSAVI	0,28 - 0,42	Felder hell

OSAVI (Median 3x3)	0,03 - 0,09	Felder dunkel
NDWI	-0,28 - -0,1	restliche Wasserflächen*
NDWI	0,95 - 1	nörtl. Teil Cospudener See
NDVI	0,4 - 0,58	Vegetation
NDVI	0,15 - 0,22	Straßen
MTVII	180 - 260	Vegetation
MTVII	30 - 65	Straßen
MSR	0,33 - 0,47	Straßen
MSAVI	0,1 - 0,21	Straßen + Felder dunkel
MSAVI	0,15 - 0,33	Hausdächer dunkel

Auch hierbei ist zu erwähnen, dass die jeweiligen Ausschnitte der Aufnahmen in den Anlagen 59-73 beigelegt sind. Woran es liegt, dass der NDWI bei der CIR-Aufnahme so differenziert in seiner Ausprägung ist lässt sich nur vermuten. Da auch viele Felder in diesem Bereich klassifiziert wurden wird angenommen, dass viel organisches Material in den Seen und Flüssen in und um Leipzig im Jahre 2009 vorhanden war. Möglicherweise kam es zu einer hohen Produktivität von Algen an der Seeoberfläche und dadurch wurden die Werte so beeinflusst. Dies konnte allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden. Allerdings wäre dies ein interessanter Aspekt der in zukünftigen Arbeiten genauere Berücksichtigung finden könnte.

Eine weitere Methode des Vergleichs von unterschiedlichen Fernerkundungs-Aufnahmen bietet die Semivariographie. Diese wird im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

7.3 Varianzanalyse mittels Semivariographie

7.3.1 Funktionsweise der Semivariographie

Die Semivariographie wird genutzt, um die räumliche Heterogenität von Daten zu beschreiben (aus: HATTERMANN 2011). Insbesondere soll dabei die Geometrie der Daten im Vordergrund stehen. Daher können dafür nur Aufnahmen gleichen Datums genutzt werden, da es sonst zu einer zu hohen zeitlichen Variabilität kommt und nicht mehr die Geometrie als entscheidendes Merkmal, sondern u.a. die Phänologie betrachtet wird. In dieser Arbeit wurden daher nur ein Ausschnitt der RapidEye-Aufnahme und ein Ausschnitt der, auf 5x5m Auflösung aggregierten, Hyperspektral-Aufnahme vom 27.06.2011 miteinander verglichen. Um herauszustellen welche Einflüsse u.a. die Phänologie haben kann, wurden anschließend Aufnahmen unterschiedlichen Datums mittels der Semivariographie untersucht.

Die Semivariographie ist ein Arbeitsschritt bei der geostatistischen Analyse von Daten. In Abbildung 7-7 sind diese Bearbeitungsschritte dargestellt. In dieser Arbeit wurden dabei nur die Punkte 1-3 Messung, Datenanalyse und Variographie und, soweit möglich, Punkt 5 Validierung durchgeführt. Eine weiterführende Analyse der Daten würde noch eine Interpolation mittels Kriging und eine weiterführende Fehleranalyse beinhalten.

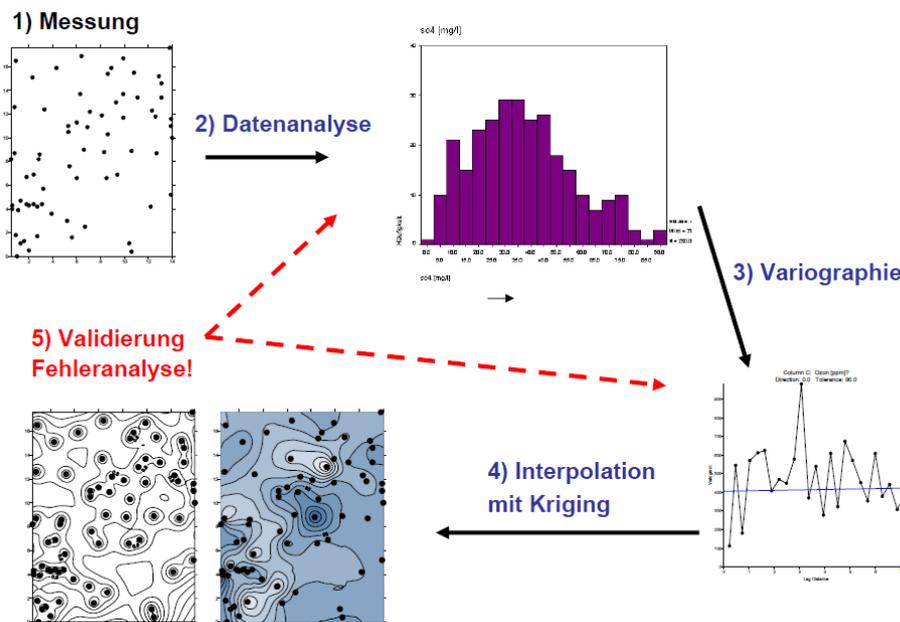


Abb.7-7: Arbeitsschritte bei der geostatistischen Analyse (aus: HATTERMANN 2011, Folie 7)

Bei der Erstellung von Variogrammen – einer statistischen Beschreibung der räumlichen Korrelation einer Zufallsfunktion mittels Semivariographie (aus: HATTERMANN 2011, Folie 20) – gibt es 3 wesentliche Hauptelemente: Range, Nugget und Sill. Ihre Aussagekraft wird in Abb.7-8 beschrieben.

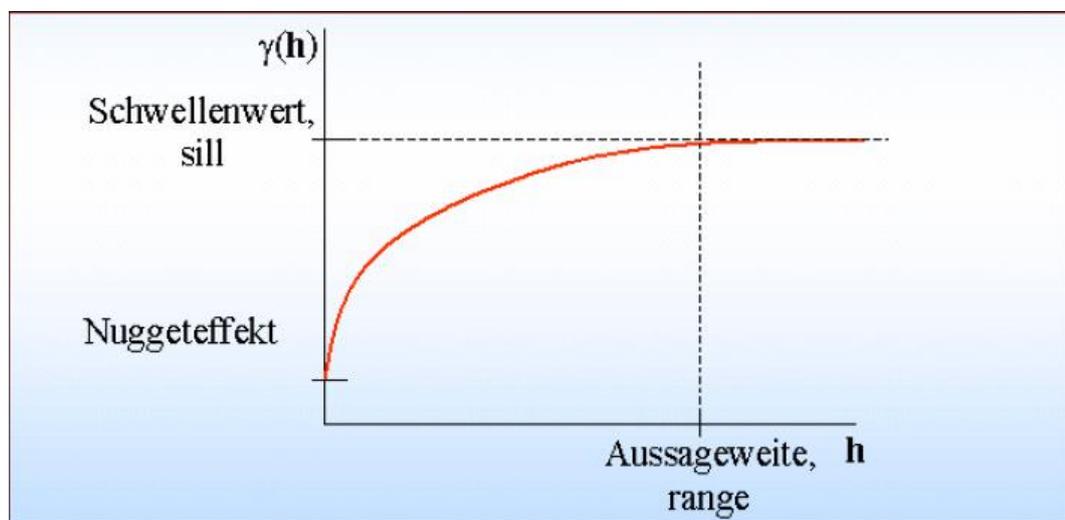


Abb.7-8: Range, Nugget und Sill in Variogrammen (aus: HATTERMANN, Folie 29)

In der Regel ist das Variogramm eine monoton wachsende Funktion wie in Abb.7-8 dargestellt, da die Varianz der Differenz zweier Zufallsvariablen mit steigendem Abstand der Variablen zunimmt. An dem Abstand, bei dem asymptotisch ein Schwellenwert (Sill) erreicht wird, ist auch die Aussageweite (Range) des Variogramms anzusiedeln. Wenn das Variogramm nicht durch den Koordinatenursprung verläuft, so wird der Schnittpunkt mit der Y-Achse als Nugget Effekt bezeichnet (aus: HATTERMANN 2011, Folie 29). Diese Größen lassen dann Aussagen über die Geometrie zweier Datensätze zu.

In Abb.7-9 ist der genutzte Ausschnitt der RapidEye-Aufnahme vom 27.06.2011 dargestellt. Zu sehen ist dabei im westlichen Bereich die Weiße Elster mit der

Angerbrücke an der Straße zum Sportforum bzw. im östlichen Bereich das Sportforum an sich.



Abb.7-9: Ausschnitt aus OSAVI-Darstellung der RapidEye-Aufnahme vom
27.06.2011

7.3.2 Durchgeführte Bearbeitungsschritte zur Erstellung eines Variogramms

Für die Erstellung der Variogramme wurde das Programm SURFER 10 genutzt. Durch das übersichtliche Benutzerinterface konnten dabei rasch die verschiedenen Variogramme erstellt und miteinander verglichen werden.

Als Vorverarbeitungsschritte mussten die vorhandenen Aufnahmedaten (Ausschnitte von den Indizes OSAVI, MTVI1, NDVI, NDWI und bNDVI) von der RapidEye- und der Hyperspektral- Aufnahme in ASCII-Dateien gespeichert werden. Deshalb wurden dabei auch die relevanten Y-Werte, die für eine Erstellung der Heterogenität notwendig sind, in einem tabellarischen Format abgespeichert. Anschließend konnten diese Daten in SURFER 10 eingeladen und die Variogramme erstellt werden. Bei allen Variogrammen wurde direkt der sogenannte Hole- Effekt sichtbar. Dieser entsteht, wenn der „Schwellenwert (Sill) scheinbar erreicht wird, aber danach die Variogrammwerte wieder fallen. In diesem Fall liegen oft regelmäßige Strukturen vor, so dass sich in einem regelmäßigen Abstand die Werte der Variablen wieder stärker ähneln“ (aus: HATTERMANN, Folie 46). Es wurde daher für jedes Variogramm der Befehl der automatischen Hole- Effekt Korrektur durchgeführt. Eine tiefere Analyse war auf Grund der begrenzten Zeit für diese Arbeit nicht möglich, wäre allerdings durchaus interessant, da dabei durch eine manuelle Anpassung der Variogrammkurve noch genauere Werte erreicht werden könnten. Im nun folgenden Kapitel werden die erhaltenen Variogramme dargestellt und

miteinander verglichen. Es wurde insbesondere auf die Werte für den Nugget Effekt, den Sill und die Aussageweite eingegangen. Hierfür konnte ein Variogramm- Report erstellt werden.

7.3.3 Ergebnisse der Variogrammanalyse

Aus dem Variogramm-Report wurden die Werte in Tabelle 7-8 für den bNDVI übertragen. Nugget Effekt und Sill wurden direkt aus dem Variogramm abgeleitet bzw. dabei angezeigt. Die Variogramme sind in Abbildung 7-10 dargestellt. Die Aussageweite war nicht ermittelbar, da bei Hole- Effekten keine genaue Annäherung an den Sill an einer bestimmten Stelle ablesbar ist. Somit ist dort in der Tabelle ein k.A. für keine Angabe.

Tab.7-8: bNDVI- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011

Vergleichsdaten	Hyperspektral	RapidEye
Standardabweichung	0,146	0,049
Varianz	0,021	0,002
Variationskoeffizient	1,194	0,984
Schiefe	1,925	1,707
RMSE	0,19	0,07
Nugget Effekt	0,003205	0,02713
Sill	0,066	0,075
Aussageweite	k.A.	k.A.

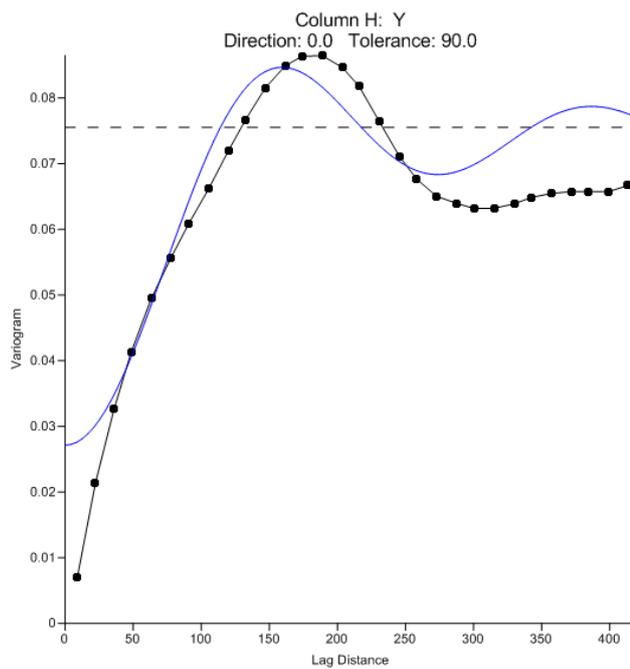
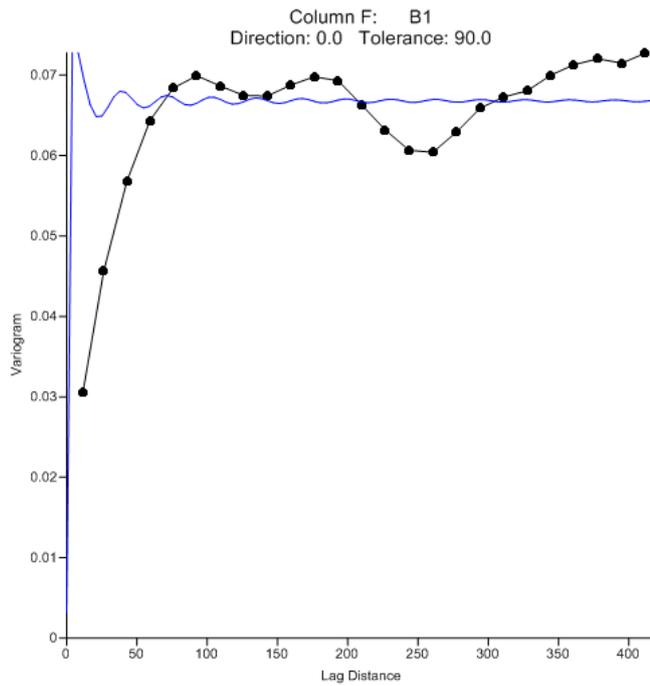


Abb.7-10: Variogramme des bNDVI für die auf 5x5m Auflösung aggregierte
Hyperspektral- Aufnahme (oben) und die RapidEye- Aufnahme (unten)

Bei einer Betrachtung der Werte in Tabelle 7-8 fällt auf, dass sowohl die Varianzen von der Hyperspektralen- als auch die von der RapidEye- Aufnahme sehr gering sind. Dies belegt die Aussage aus HATTERMANN 2011, dass Hole-

Effekte entstehen, wenn regelmäßige Strukturen vorherrschen. Somit ist davon auszugehen, dass der in Abbildung 7-9 dargestellte Ausschnitt in sich homogene Strukturen aufweist, allerdings die Strukturen zueinander stark variieren. Folglich kann die kleinräumige Variabilität im vorliegenden Ausschnitt für den bNDVI als sehr gering bezeichnet werden. Dabei ist diese Variabilität zwischen den Datensätzen leicht unterschiedlich. Auf Grund der ursprünglich höheren Auflösung der Hyperspektral- Aufnahme werden dementsprechend genauer die Strukturen abgebildet. Dadurch kommt es zu einer höheren Varianz als in der RapidEye- Aufnahme die bereits mit einer räumlichen Auflösung von 5x5m aufgenommen wurde. Ein Indikator dafür ist auch der Nugget-Effekt. Dieser beinhaltet Messfehler und die kleinräumige Variabilität der Daten (nach: www.rwth-aachen.de). Hierbei ist ein höherer Effekt bei der RapidEye- Aufnahme aus Tabelle 7-8 ablesbar. Offensichtlich scheinen die Messfehler, die durch die Auflösung entstanden, einen höheren Einfluss auf die Variabilität zu haben. Bei einer Betrachtung des oberen Variogrammes in Abbildung 7-10 wird deutlich, dass die ermittelte Annäherung an das Variogramm deutlich schlechter ist als die zur unteren Abbildung 7-10. Daraus lässt sich schließen, dass der Nugget-Effekt in der Hyperspektral- Aufnahme als geringer angenommen wird. Bei einer Betrachtung der genau ermittelten Kurven wird deutlich, dass die Kurve der RapidEye- Aufnahme näher am Koordinatenursprung anzusiedeln ist. Folglich ist der Hyperspektral- Wert für den Nugget- Effekt in Tabelle 7-8 als fehlerhaft auf Grund der nicht mehr genauer erfolgten manuellen Anpassung des Variogrammes anzusehen.

Großräumig betrachtet ist die Heterogenität des Datensatzes allerdings sehr hoch. Dies wird durch den beobachtbaren Hole-Effekt in Abbildung 7-10 deutlich, da immer wieder neue Wellen einer scheinbaren Annäherung an den Sill entstehen. Ursächlich dafür ist eine Veränderung in der Landbedeckung bzw. Landnutzung. Der Sill selbst ist ein Indikator für die Gesamtvariabilität des Datensatzes (nach: www.rwth-aachen.de). Bei einem Vergleich zwischen Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme ist ein leicht höherer Sill bei der RapidEye- Aufnahme zu erkennen. Dies sind vermutlich sensorische Einflüsse die auf die Variabilität Einfluss haben. Die Unterschiede sind allerdings so marginal, dass dies nicht genauer untersucht wurde. Der Eindruck aus Abbildung 7-9 wird durch die Ergebnisse der Varianzanalyse bestätigt, die Heterogenität größerer urbaner

Räume und die Homogenität kleinerer Räume (z.B. einzelne Häuser, Plätze, Grünanlagen (im geeigneten Maßstab), etc.) herausgestellt.

In Tabelle 7-9 sind die NDVI- Werte von Hyperspektral- und RapidEye-Aufnahmen aufgetragen. Generell ist der Verlauf identisch wie die Werte für die bNDVI Aufnahmen. Lediglich der Fehler im Nugget Effekt ist nicht mehr vorhanden, da die Variogrammkurve besser von der automatisch erstellten Hole-Effekt Kurve abgebildet wird. Der höhere Sill-Wert in der Hyperspektral-Aufnahme resultiert möglicherweise aus den Eigenschaften des NDVI. Hierbei treten verstärkt Effekte auf, die aus Vegetation resultieren. Auf Grund der höheren ursprünglichen Auflösung der Hyperspektral- Aufnahme werden kleinste Vegetationsparameter besser abgebildet und es kommt zu einer höheren Gesamtvariabilität.

Tab.7-9: NDVI- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011

Vergleichsdaten	Hyperspektral	RapidEye
Standardabweichung	0,172	0,059
Varianz	0,03	0,003
Variationskoeffizient	1,275	1,003
Schiefe	2,016	1,708
RMSE	0,219	0,083
Nugget Effekt	0,09142	0,04172
Sill	0,305	0,088
Aussageweite	k.A.	k.A.

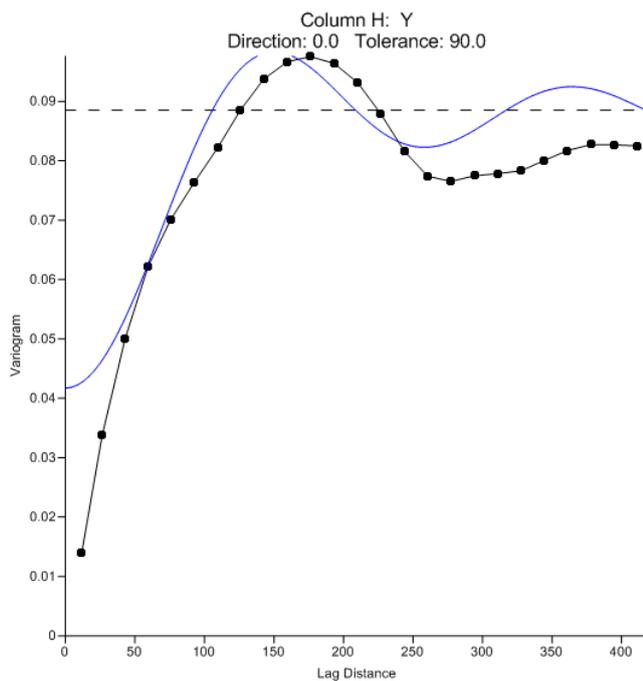
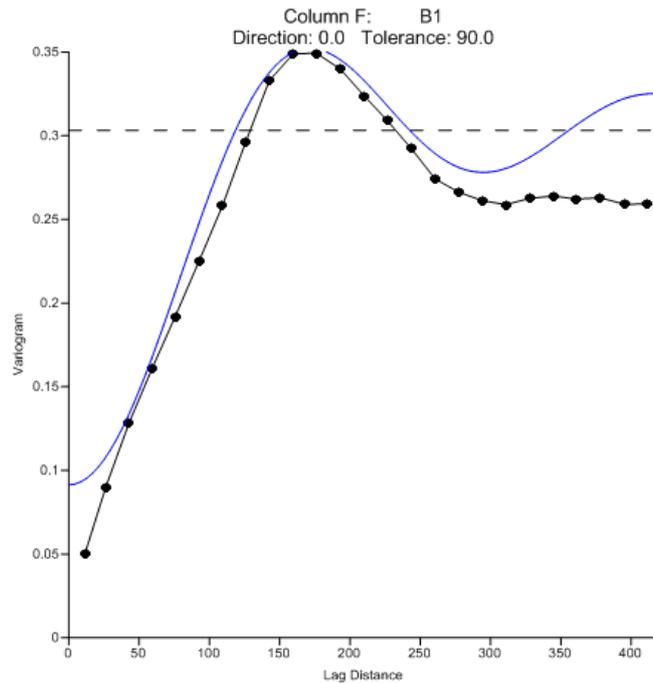


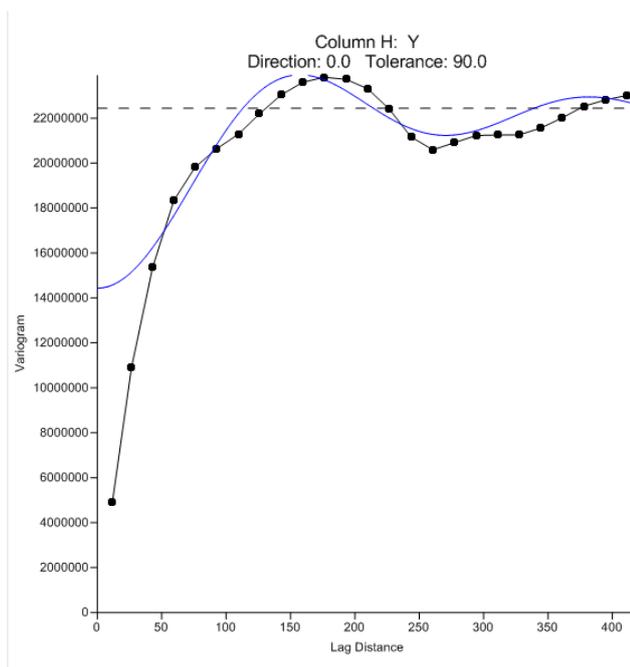
Abb.7-11: Variogramme des NDVI für die auf 5x5m Auflösung aggregierte
Hyperspektral- Aufnahme (oben) und die RapidEye- Aufnahme (unten)

Der letzte näher zu untersuchende Index ist der MTVI1. Dieser ist interessant, weil er heterogene Landbedeckungen besser herausstellt und dabei Veränderungen in den Landbedeckungen kenntlich macht.

Tab.7-10: MTVI1- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011

Vergleichsdaten	Hyperspektral	RapidEye
Standardabweichung	629,688	1.174,357
Varianz	396.506,581	1.379.114,562
Variationskoeffizient	1,163	0,954
Schiefe	1,766	1,575
RMSE	830,327	1701,208
Nugget Effekt	960.600	1,443*10 ⁷
Sill	1.350.000	22.200.000
Aussageweite	k.A.	k.A.

Es ist prinzipiell eine deutlich höhere Varianz im Datensatz der RapidEye-MTVI1- Aufnahme vorhanden. Dies liegt vermutlich an der Aggregation der Hyperspektral- Aufnahme und daher einer Reduktion der Gesamtpixelanzahl. Um die genaue Varianz des Datensatzes zu ermitteln wird der Variationskoeffizient betrachtet, da dieser Veränderungen zwischen den Pixeln relativiert. Demnach ist auch hier, wie in Abbildung 7-12 zu sehen ist, die kleinräumige Variabilität gering.



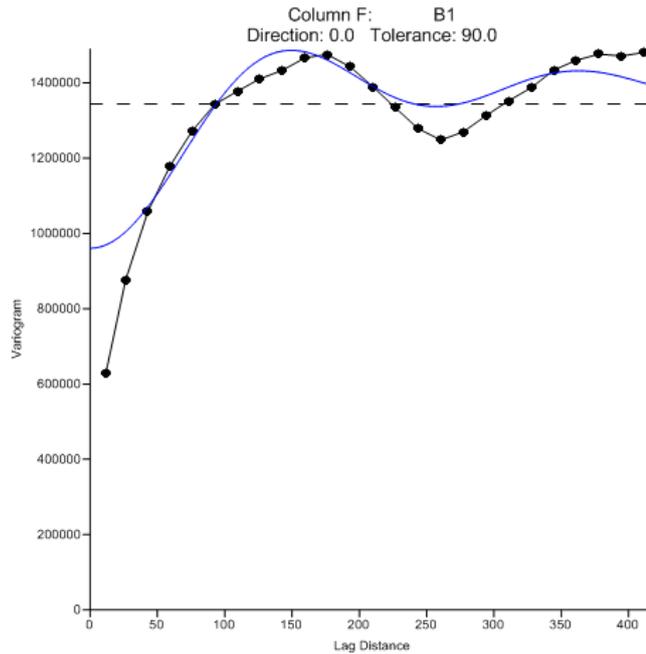


Abb.7-12: Variogramme des MTVI1 für die auf 5x5m Auflösung aggregierte
Hyperspektral- Aufnahme (oben) und die RapidEye- Aufnahme (unten)

Ebenso wurde diese kleinräumige Variabilität bereits im bNDVI beobachtet. Somit ist diese Variabilität im RapidEye- Datensatz geringer als im Hyperspektral- Datensatz. Die Ursachen dafür wurden bereits erläutert. Die enormen Unterschiede im Nugget Effekt und Sill resultieren ebenfalls in der unterschiedlichen Pixelanzahl bzw. derer spektralen Abdeckung des MTVI1. Prinzipiell verlaufen die Datensätze ähnlich in der Ausprägung ihres Variogramms. Daher ist anzunehmen, dass auch der Nugget Effekt und Sill nahezu identisch sein würden. Diese Annahme müsste man in einer genaueren Untersuchung der Varianzen genau betrachten und gegebenenfalls bestätigen. Für die in dieser Arbeit benötigten Erkenntnisse wurde dies allerdings als nicht notwendig erachtet bzw. hätte den Rahmen gesprengt.

8. Zusammenfassung der Ergebnisse und vergleichende Bewertung

In diesem Kapitel werden die erhaltenen Ergebnisse kurz zusammengefasst, auf Probleme eingegangen und eine abschließende Bewertung getroffen welche Sensoren inwiefern am besten für die Detektion urbaner Räume mittels Spektralindizes geeignet sind.

In Kapitel 7 wurde herausgestellt, dass es möglich ist Veränderungen urbaner Landbedeckungen mittels unterschiedlicher Sensoren über die Zeit hinweg nachzuweisen. Dabei mussten viele Einflüsse der jeweiligen Sensoren, sowohl von außen durch das Wettergeschehen, den Sonnenstand, die Phänologie etc. als auch von „innen“ durch sensorspezifische Aspekte wie z.B. die räumliche sowie spektrale Auflösung und die Art des Systems (flugzeuggetragen, satellitengestützt) mit betrachtet werden. Nähere Ausführungen dazu sind in den Kapiteln 2 und 4 bereits beschrieben.

Unter anderem konnte aus dem Vergleich der CIR- Aufnahme vom 16.08.2009 und der RapidEye- Aufnahme vom 24.08.2011 geschlossen werden, dass die Böden im August des Jahres 2009 scheinbar wassergesättigter und die Vegetation vitaler war als im August 2011 (siehe Kapitel 7.1.1). Es wurde darauf aufmerksam gemacht, dass bereits bei gleichen Sensoren in Ein-Tages-Schritten Veränderungen erkennbar sind und diese mit der Zeit durch Einflüsse von außen zunehmen (siehe Kapitel 7.1.2). Des Weiteren wurde darauf hingewiesen, dass es bei gleichen Sensoren durch Einflüsse der Phänologie und des Wetters zu hohen Unterschieden kommen kann (siehe Kapitel 7.1.3). Die Vorteile der hohen Anzahl von Hyperspektralbändern wurden in Kapitel 7.1.4 veranschaulicht.

Es ist bei einer Betrachtung von CIR- Aufnahmen immer darauf zu achten, dass Effekte der Befliegung berücksichtigt werden. Da sich die Aufzeichnung von CIR- Aufnahmen für eine ganze Stadtlandschaft über ein bis zwei Tage erstreckt und hierbei stets andere Aufnahme- bzw. Flugrichtungen vorherrschend sind, kommt es zu teilweisen „Abklappeffekten“ von Häusern und zu einem nicht durchgehend homogenen Schattenwurf bzw. zu einem teilweisen Versatz der Schatten und Häuser an denen ein Streifen der Aufnahme beendet war und ein

neuer Streifen aus der entgegengesetzten Flugrichtung ansetzte. Dies ist ein Problem flugzeuggetragener Systeme. Wenn größere Areale verglichen bzw. aufgenommen werden sollten, werden auf Grund von Kosteneinsparungen etc. nicht die ursprünglichen Startpunkte für einen neuen Streifen gewählt, sondern die Aufnahme aus entgegengesetzter Richtung fortgeführt. Insbesondere bei Hyperspektral- Aufnahmen ist der Kostenfaktor dabei von enormer Bedeutung. Hinzuweisen ist dabei auf Tabelle 4-1 in der u.a. auch die Kosten der verschiedenen Sensoren gegenübergestellt werden. Ebenso spielen in flugzeuggetragenen Systemen Einflüsse wie Roll, Pitch und Yaw eine große Rolle. Zu verweisen ist dabei auf Abbildung 7-2. Bei einem Vergleich verschiedener Aufnahmetage des identischen Sensors sind diese Einflüsse ebenfalls nicht vermeidbar. Hierbei wirken sich unterschiedliche Winde besonders stark auf die Ergebnisse aus. Dabei verändert sich auch der Aufnahmewinkel. Somit entstehen auch dabei Unterschiede in den Reflektanzen und es kommt zu einer scheinbaren Veränderung der Landbedeckung obwohl sie sich nicht merklich verändert hat.

Die Zeit ist ebenso ein wichtiger Aspekt für die Vergleichbarkeit. Es sollte stets darauf geachtet werden möglichst identische Tageszeiten sowie Tage miteinander zu vergleichen, da sonst die Phänologie, der Sonnenstand und damit verbunden der Schattenwurf und jahreszeitliche Aspekte zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen können. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass dies stets abhängig von der jeweilig zu untersuchenden Fragestellung ist. Bei einem Vergleich von Sensoren sind diese Aspekte allerdings von sehr hoher Bedeutung und sollten stets beachtet werden. Generell sind Hyperspektral- Aufnahmen die beste Methode zur Detektion urbaner Räume, da sie eine hohe räumliche sowie spektrale Auflösung haben und daher sehr genaue Strukturen und Landbedeckungen erkennbar sind. Durch die hohe Anzahl spektraler Bänder, auch im SWIR- Bereich, sind Hyperspektralsensoren sehr nützlich bei der Ermittlung von urbanen Spektralindizes wie den UI, SVI und BASVI. Es ist stets der Kosten-Nutzen-Faktor zu beachten. Nachteile der Hyperspektral- Aufnahmen sind die hohen Kosten im Vergleich zu einer Abdeckung eines relativ kleinen Areals. Im kleinräumigen Maßstab sind daher hyperspektrale Sensoren eher zu empfehlen. Da die hyperspektrale Fernerkundung eine sehr neue Methode ist, werden die Kosten auch in nächster Zeit nicht merklich sinken. Folglich sollten für

Untersuchungen größerer Räume Sensoren genutzt werden, die diese in einem ausreichenden Maße abdecken und abhängig von der jeweiligen Fragestellung auch bezahlbar sind. Daher sollte man vor jeder Untersuchung genaue Überlegungen anstellen, wie die Fragestellung mit möglichst geringen Mitteln optimal gelöst werden kann. So können auch CIR- Sensoren, wie die in dieser Arbeit untersuchte UltraCam-X, bereits ausreichend sein. Dabei sollten dann allerdings die oben genannten Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Das RapidEye- System bietet ebenso eine geeignete Alternative für die Untersuchung großräumiger Areale. Es ist vergleichsweise kostengünstig und kann im 24 Stunden Rhythmus Veränderungen darstellen. Einflüsse wie Roll, Pitch und Yaw existieren bei diesem satellitengestützten System nicht.

Die Variogrammanalyse konnte die Ausführungen in Kapitel 7.1 und 7.2 nochmals stützen. Es bleibt darauf hinzuweisen, dass es eine Reihe weiterer Varianzanalysemethoden gibt. Diese sind u.a. Quadtree – hierarchische Dekomposition, räumliche Entropie, Fourier Transformation und Wavelet Transformation (aus: GARRIGUES et al. 2006). Allerdings hätte eine Durchführung dieser den Rahmen der vorliegenden Arbeit gesprengt.

Bei Hyperspektral- Sensoren sollte stets darauf geachtet werden, dass nur eine relativ geringe Abdeckung von Arealen möglich ist. Wie bereits beschrieben, müssen stets die Kosten-Nutzen-Aspekte und die zu untersuchende zeitliche, räumliche oder spektrale Skala betrachtet werden. Gegebenenfalls können sehr gute Ergebnisse mit geringeren Kosten auch durch die RapidEye- Sensoren erreicht werden. Eine optimale Lösung wäre ein hyperspektraler Sensor im All. Der gerade in der Planung befindliche EnMAP- Sensor würde diese Voraussetzungen erfüllen. Es bleibt abzuwarten inwieweit die Kosten für Aufnahmen dieser Kategorie bezahlbar sind. Einer dieser Satelliten, Hyperion (NASA), ist bereits seit 2011 im All unterwegs. Allerdings war im Rahmen dieser Arbeit kein Zugriff auf die Daten des Satelliten möglich. Abschließend bleibt herauszustellen, dass Hyperspektral- Sensoren die beste Möglichkeit zur Detektion urbaner Landbedeckungen mittels Spektralindizes sind.

Literaturverzeichnis

- E. BANZHAF & HÖFER, R. (2008): Monitoring urban structure types as spatial indicators with CIR aerial photographs for a more effective urban environmental management. In: Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS), IEEE. 1(2):129–138.
- J. DINIS et al. (2010): Hierarchical Object-based Classification of dense urban areas by integrating high spatial resolution satellite images and LIDAR elevation data. In: GEOBIA 2010. Geographic Object-Based Image Analysis, Juni 29 – Juli 2, Gent.
- S. GARRIGUES, ALLARD, D., BARET, F. & WEISS, M. (2006): Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. Remote Sensing of Environment 103, 81-96.
- N.B. GRIMM, GROVE, J.M., REDMAN, C.L. & PICKETT, S.A. (2000): Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. Bioscience 70, 571–584.
- M. GRUBER: UltraCam X, the New Digital Aerial Camera System by Microsoft Photogrammetry. Graz.
- D. HABOUDANE, MILLER, J.R., PATTEY, E., ZARCO-TEJADA, P.J. & STRACHAN, B. (2003): Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote Sensing of Environment 90 (2004), 337-352.
- F. HATTERMANN (2011): Einführung in die Geostatistik. Vorlesung. Potsdam (<http://www.pik-potsdam.de/~fred/geostatistik/einf%20in%20die%20geostatistik%204.pdf>), Zugriff: 19.06.2012.

- J.R. JENSEN & COWEN, D.C. (1999): Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65, 611–622.
- P.A. LONGLEY (2002): Geographic information systems: will developments in urban remote sensing and GIS lead to ‘better’ urban geography? *Program Human Geographie* 26 (2), 213–239.
- H. LOSADA, MARTINEZ, H., VIEYRA, J., PEALING, R. & CORTÉS, J. (1998): Urban agriculture in the metropolitan zone of Mexico: changes over time in urban, sub-urban and peri-urban areas. *Environment Urbanization* 10 (2), 37–54.
- D. MUNROE, CLARK, J. & IRWIN, E. (2005): Regional determinants of exurban land use in the U.S. Midwest. Prepared for the 52nd Annual North American Meetings of the Regional Science Association, Las Vegas, NV, USA.
- Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) (1996): *The knowledge-based economy*, Paris, France (online).
(<http://www.oecd.org/dataoecd/51/8/1913021.pdf>), Zugriff: 16.06.2012.
- T. RASHED & JÜRGENS, C. (2010): *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Springer, 47-58.
- D.A. ROBERTS & HEROLD, M. (2004): Imaging spectrometry of urban materials. In: P. KING, RAMSEY, M.S. & SWAYZE, G. (eds) *Infrared spectroscopy in geochemistry, exploration and remote sensing*, Vol. 33. Mineral Association of Canada. Short Course Series. London. Ontario, 155–181.
- P. VILLA (2007): *Imperviousness Indexes Performance Evaluation for Mapping Urban Areas Using Remote Sensing Data*. Urban Remote Sensing Joint Event 11-13 April 2007. Paris.
- E. WICKOP, BÖHM, P., EITNER, K. & BREUSTE, J. (1998): Qualitätszielkonzept für Stadtstrukturtypen am Beispiel der Stadt Leipzig. *UFZ Bericht* 14, 156.

AISA Eagle Datasheet, Version 2-2010. SPECIM, Spectral Imaging Ltd. Finland.

(http://www.specim.fi/media/aisa-datasheets/aisaeagle_datasheet_ver1-2012.pdf), Zugriff: 25.05.2012.

AISA Dual Datasheet, Version 2-2010. SPECIM, Spectral Imaging Ltd. Finland.

(http://www.specim.fi/media/aisa-datasheets/dual_datasheet_ver1-2012.pdf), Zugriff: 25.05.2012.

Google Earth, Version: 5.2.1.1588, Stand: 1. September 2010.

http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_windowLabel=T26607173141161345039102&_urlType=action&_pageLabel=_dwdwww_spezielle_nutzer_energiewirtschaft_historisch, Zugriff: 14.06.2012.

http://www.eonerc.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaacbkja, 24, Zugriff: 24.06.2012.

<http://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/07.htm>, Zugriff: 08.06.2012.

<http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=P&DAT=Phaenologische-Phase>, Zugriff: 23.05.2012.

<http://kastanienland.ch/html/phaeno-kalender.html>, Zugriff: 23.05.2012.

http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586_read-5336, Zugriff: 14.06.2012.

<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/rapideye.html>, Zugriff: 23.05.2012.

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Verwaltung_Leipzig.svg, Zugriff: 23.05.2012.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln durchgeführt und verfasst habe. Ich habe aus anderen Werken entnommene Daten, Abbildungen sowie wörtliche und sinngemäße Zitate mit Quellenangaben gekennzeichnet.

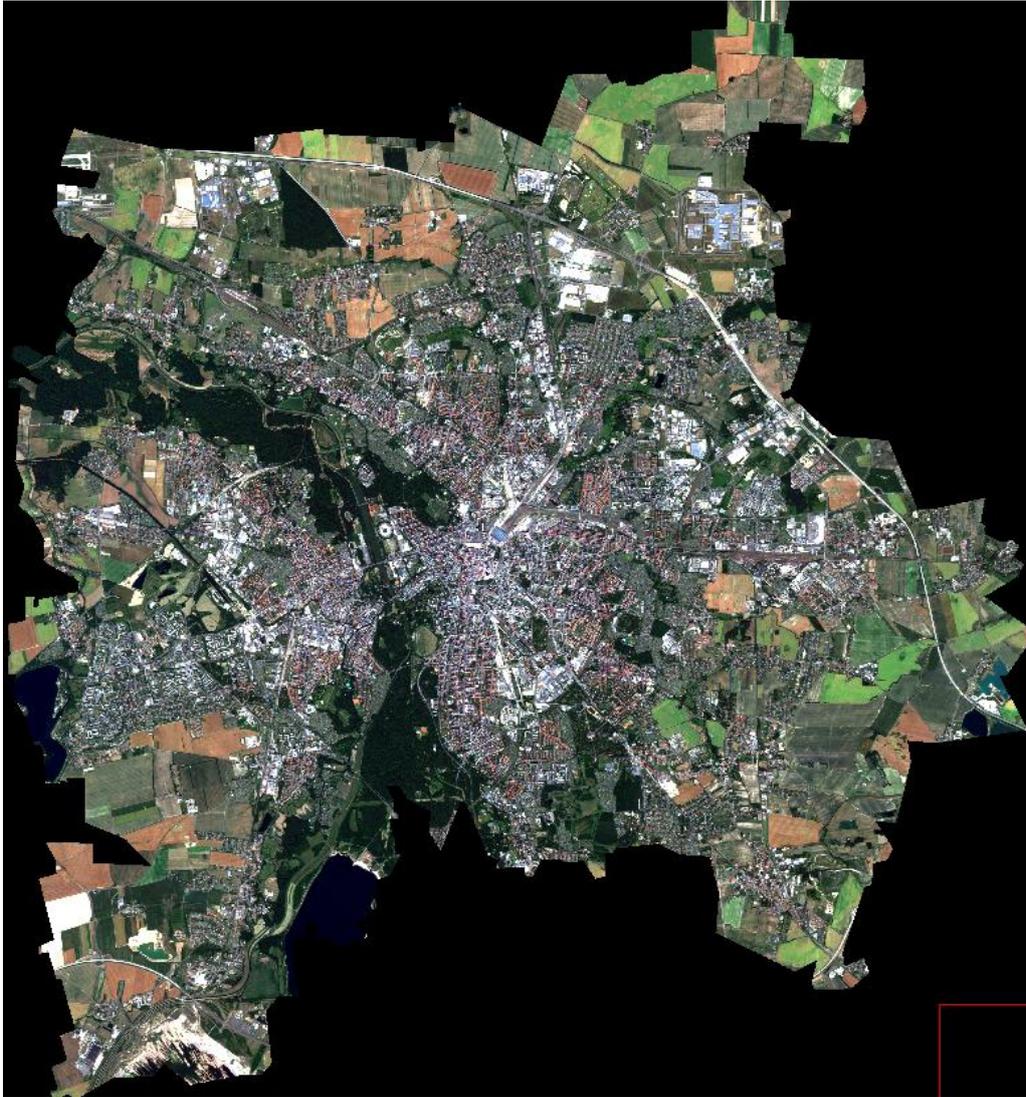
Jena, den 06.07.2012

Oliver Wardeck

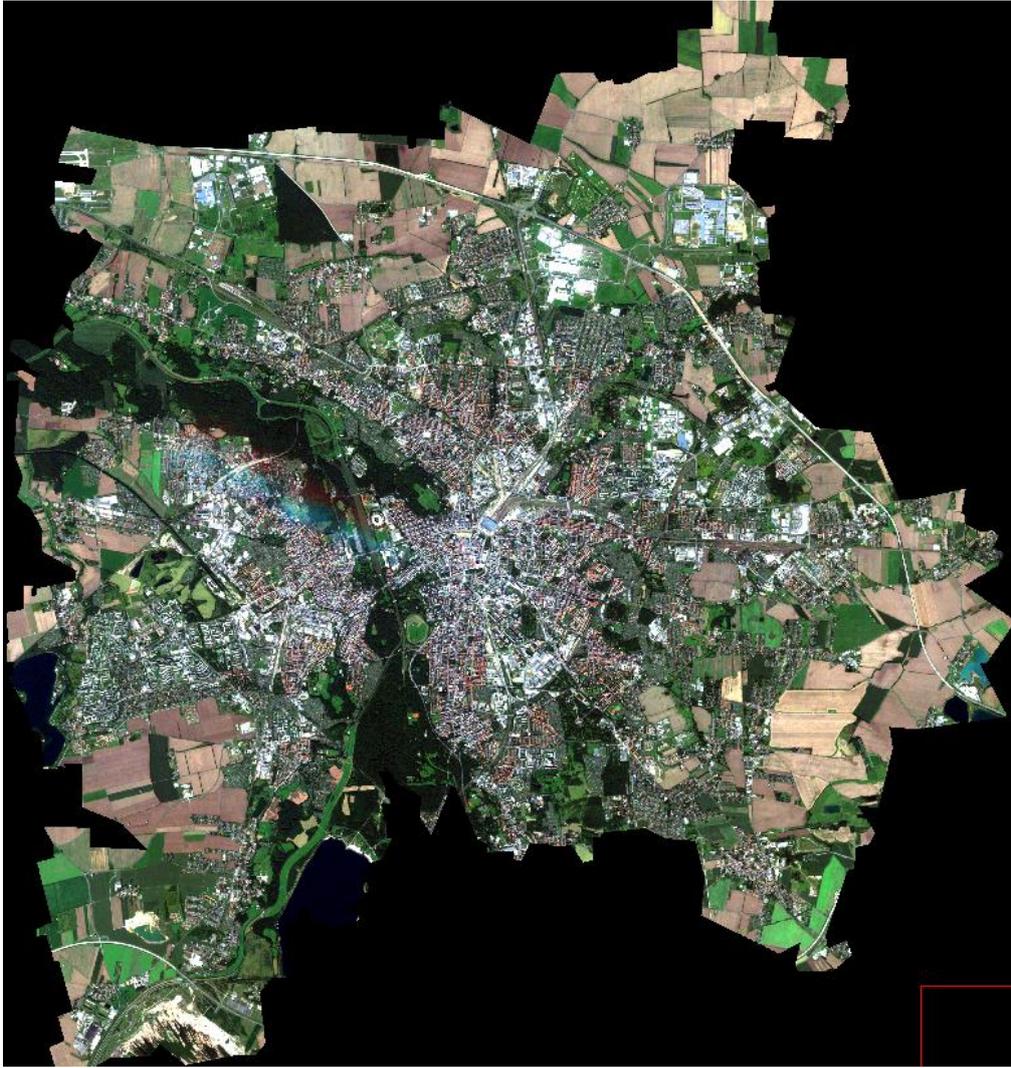
Anlagen



Anlage 1: CIR- Aufnahme vom 16.08.2009 und Ausschnitt aus der CIR- Aufnahme



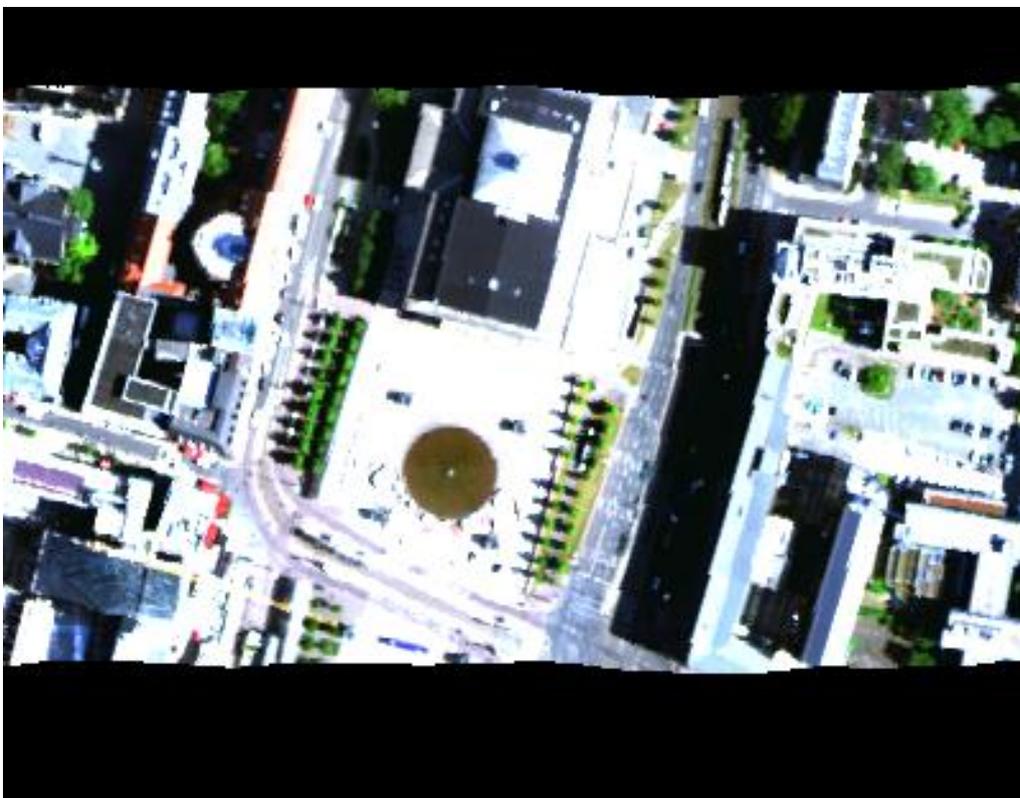
Anlage 2: RGB- Darstellung der RapidEye- Aufnahme und ein Ausschnitt vom 27.06.2011



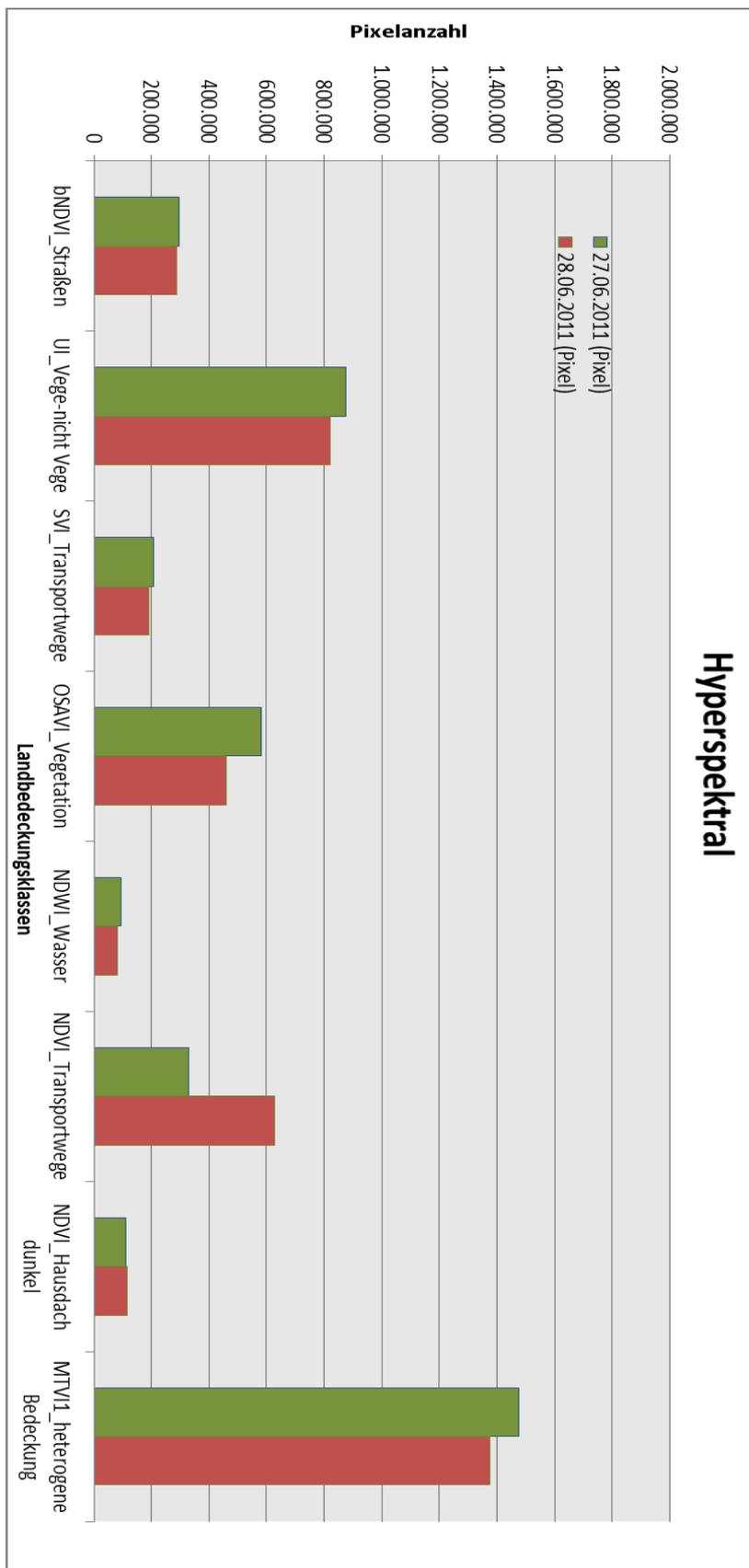
Anlage 3: RGB- Darstellung der RapidEye- Aufnahme und ein Ausschnitt vom 24.08.2011



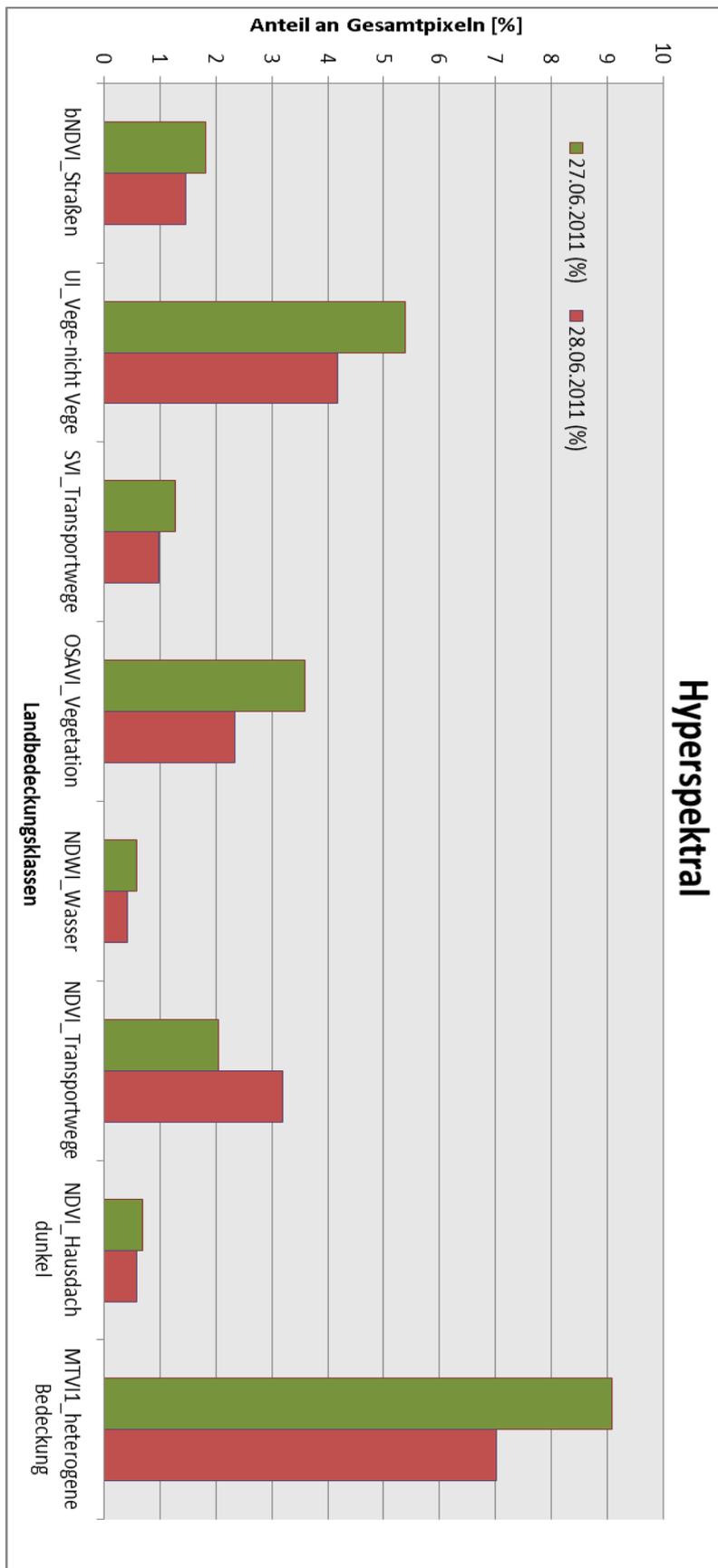
Anlage 4: RGB- Darstellung eines Ausschnitts des Hyperspektralstreifens vom 27.06.2011



Anlage 5: RGB- Darstellung eines Ausschnitts des Hyperspektralstreifens vom 28.06.2011



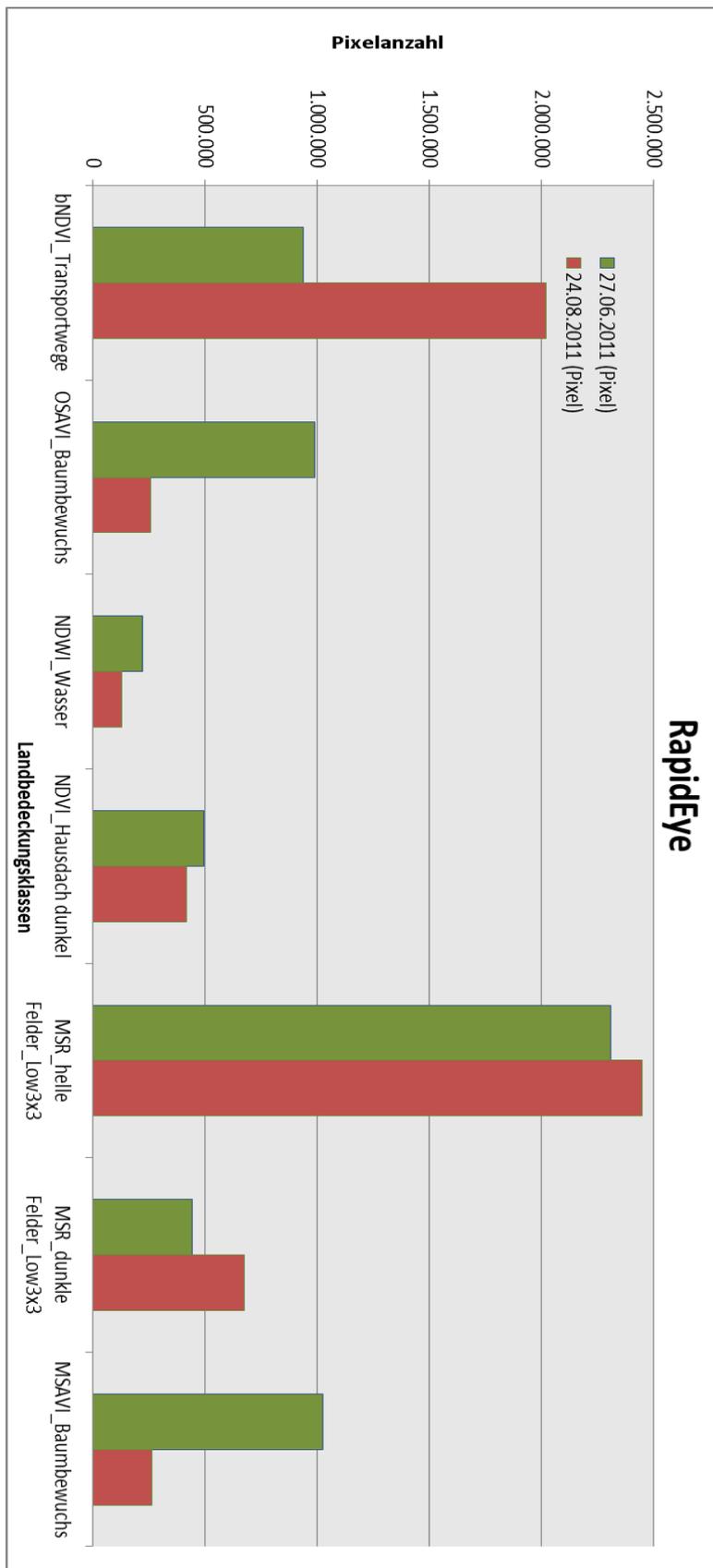
Anlage 6: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die Hyperspektral-Aufnahmen (in Gesamtpixeln)



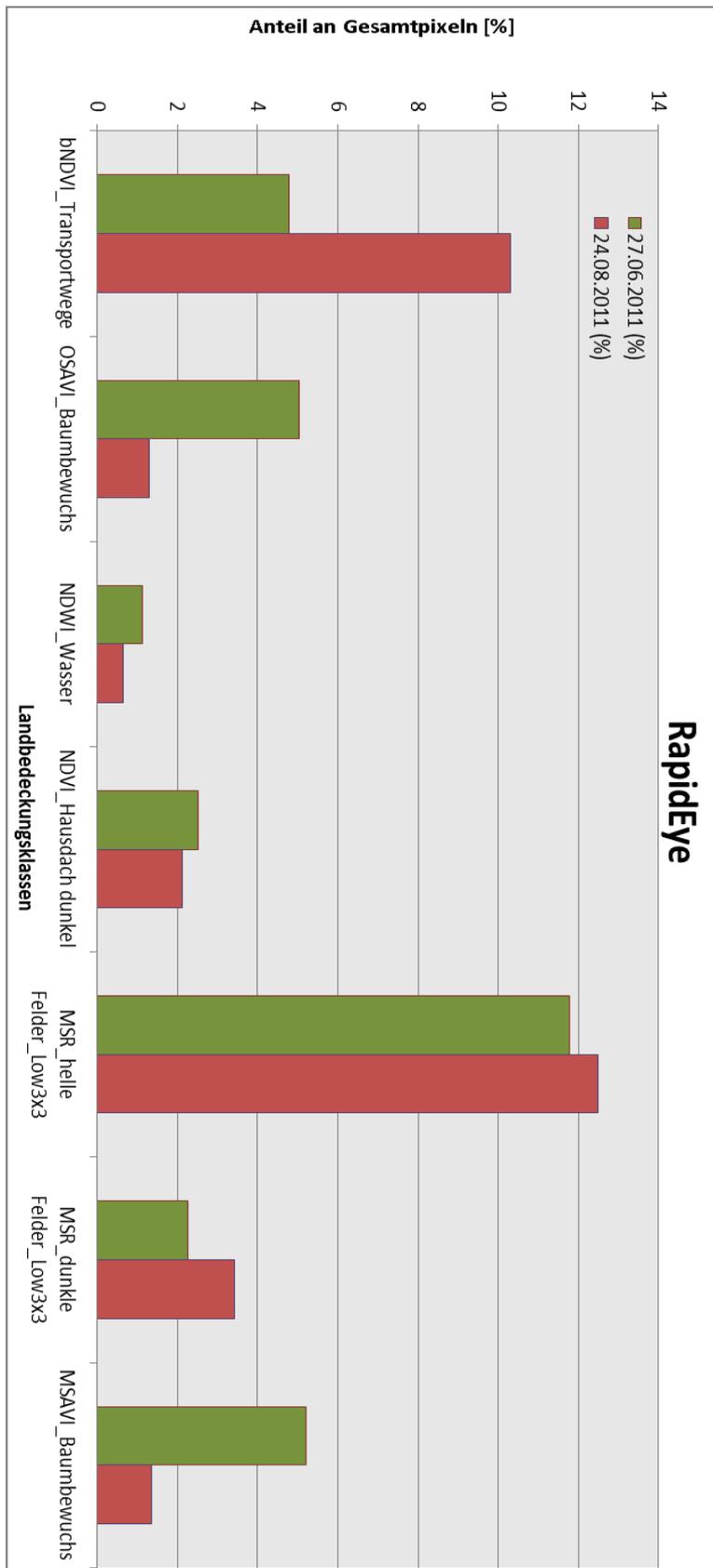
Anlage 7: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die Hyperspektral-Aufnahmen (in Prozent von den jeweiligen Gesamtpixeln)

Landbedeckungen	27.06.2011 (Pixel)	27.06.2011 (%)	28.06.2011 (Pixel)	28.06.2011 (%)	r ²
bNDVI_Straßen	294.999	1,82	285.901	1,46	
UI_Vege-nicht Vege	873.226	5,38	818.852	4,17	
SVI_Transportwege	207.894	1,28	190.148	0,97	
OSAVI_Vegetation	582.810	3,59	459.868	2,34	
NDWI_Wasser	95.235	0,59	80.595	0,41	
NDVI_Transportwege	330.550	2,04	625.666	3,19	
NDVI_Hausdach dunkel	110.095	0,68	115.708	0,59	
MTVI1_heterogene Bedeckung	1.476.268	9,09	1.375.024	7,01	
Gesamt					0,96304827

Anlage 8: Tabelle der aus den Spektralindizes ermittelten Landbedeckungsklassen für die jeweilige Hyperspektral- Aufnahme mit berechneten r²



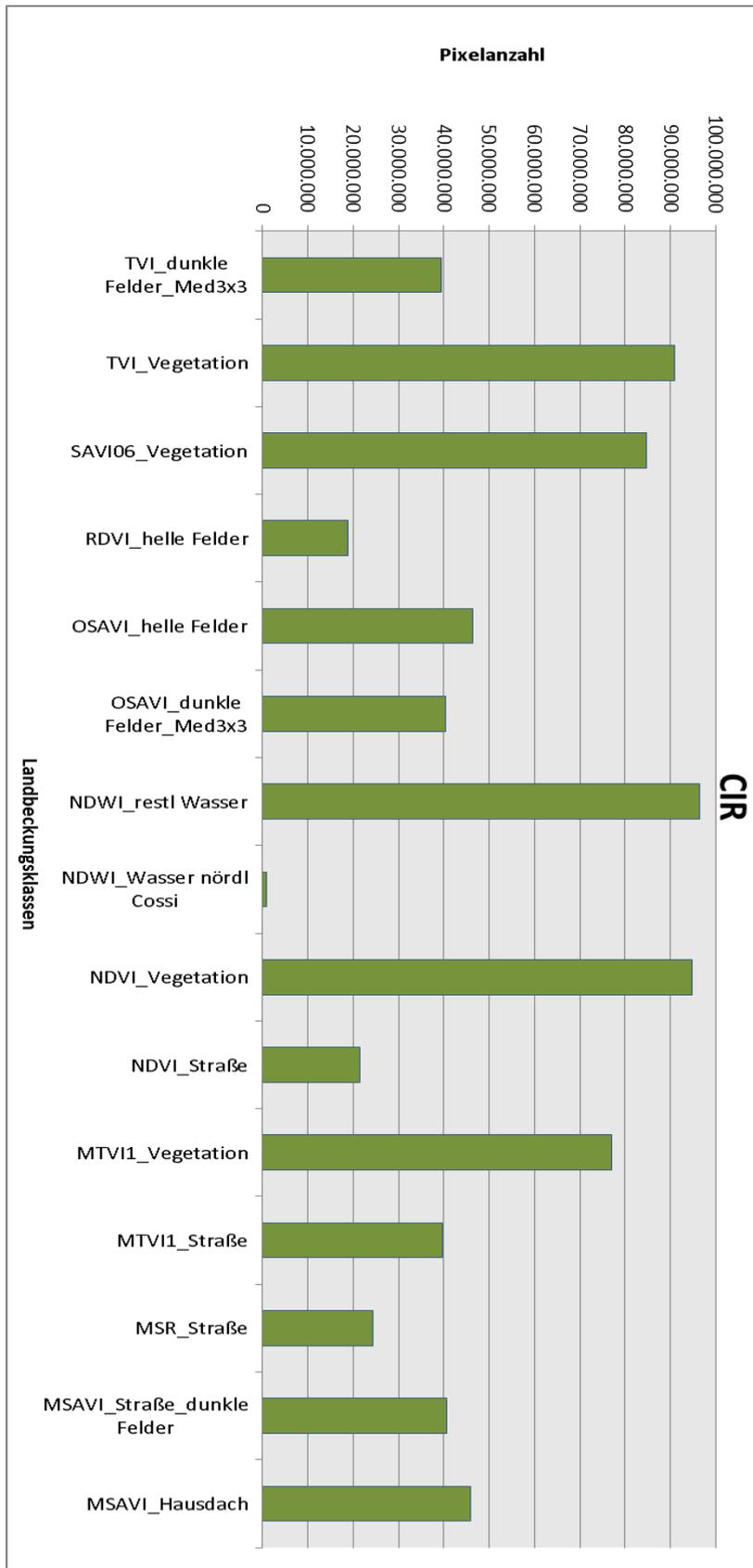
Anlage 9: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die RapidEye-Aufnahmen (in Gesamtpixeln)



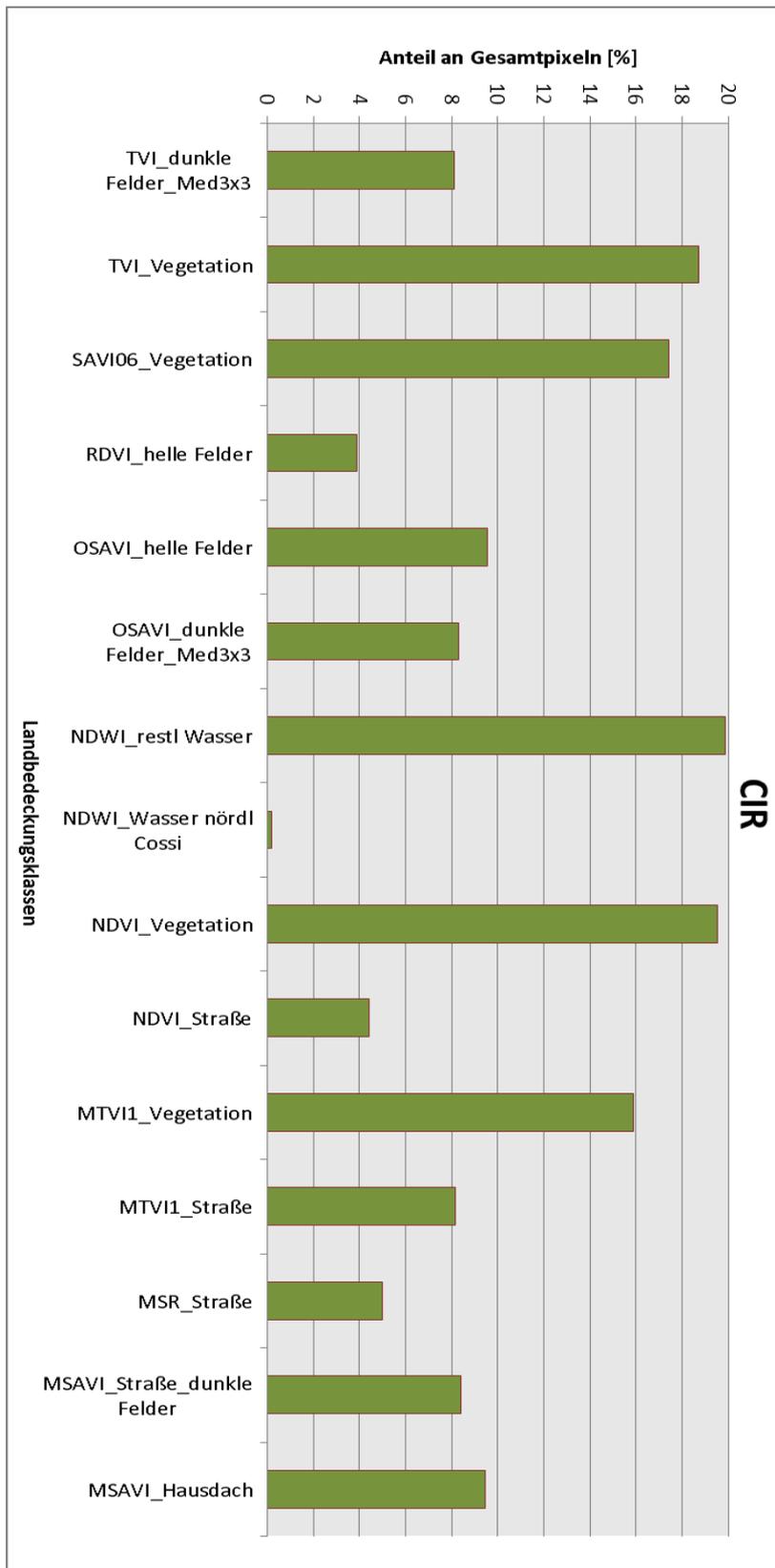
Anlage 10: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die RapidEye-Aufnahmen (in Prozent von den jeweiligen Gesamtpixeln)

Landbedeckungen	27.06.2011 (Pixel)	27.06.2011 (%)	24.08.2011 (Pixel)	24.08.2011 (%)	r ²
bNDVI_Transportwege	937.736	4,78	2.020.426	10,31	
OSAVI_Baumbewuchs	986.914	5,04	255.424	1,3	
NDWI_Wasser	217.625	1,11	126.686	0,65	
NDVI_Hausdach dunkel	493.498	2,52	414.573	2,12	
MSR_helle Felder_Low3x3	2.308.314	11,78	2.449.069	12,5	
MSR_dunkle Felder_Low3x3	444.062	2,27	671.645	3,43	
MSAVI_Baumbewuchs	1.023.174	5,22	262.195	1,34	
Gesamt					0,74770863

Anlage 11: Tabelle der aus den Spektralindizes ermittelten Landbedeckungsklassen für die jeweilige RapidEye- Aufnahme mit berechneten r²



Anlage 12: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die CIR-Aufnahme (in Gesamtpixeln)

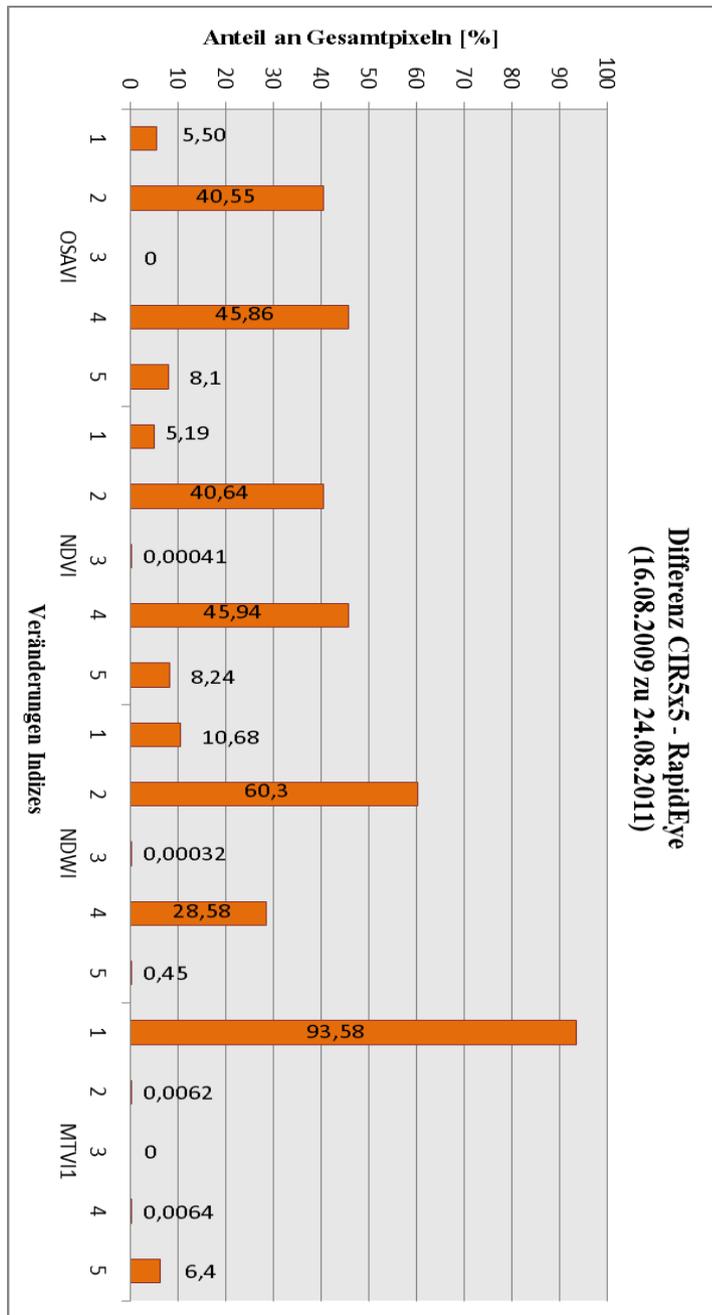


Anlage 13: Aus den Spektralindizes ermittelte Landbedeckungsklassen für die CIR-Aufnahme (in Prozent von den jeweiligen Gesamtpixeln)

Landbedeckungen	16.08.2009 (Pixel)	16.08.2009 (%)
TVI_dunkle Felder_Med3x3	39.420.864	8,12
TVI_Vegetation	90.838.390	18,71
SAVI06_Vegetation	84.728.978	17,45
RDVI_helle Felder	18.838.059	3,88
OSAVI_helle Felder	46.362.102	9,55
OSAVI_dunkle Felder_Med3x3	40.358.705	8,31
NDWI_restl Wasser	96.512.450	19,88
NDWI_Wasser nördl Cossi	913.663	0,19
NDVI_Vegetation	94.838.131	19,54
NDVI_Straße	21.515.349	4,43
MTVI1_Vegetation	77.125.161	15,89
MTVI1_Straße	39.701.702	8,18
MSR_Straße	24.285.640	5
MSAVI_Straße_dunkle Felder	40.700.958	8,38
MSAVI_Hausdach	45.885.592	9,45

Anlage 14: Tabelle der aus den Spektralindizes ermittelten Landbedeckungsklassen für die CIR- Aufnahme

- 1: von älter zu neuer (Datum) Veränderung > 0,5 größer werdend, fliederfarben
- 2: von älter zu neuer (Datum) Veränderung zwischen 0 und 0,5 größer werdend, dunkellila
- 3: No Change, schwarz
- 4: von älter zu neuer (Datum) Veränderung zwischen 0 und 0,5 kleiner werdend, ocker
- 5: von älter zu neuer (Datum) Veränderung > 0,5 kleiner werdend, hellgelb



Anlage 15: Differenz der Spektralindizes von der aggregierten CIR- Aufnahme und der RapidEye- Aufnahme in Prozent mit Erklärung der Nummern 1-5

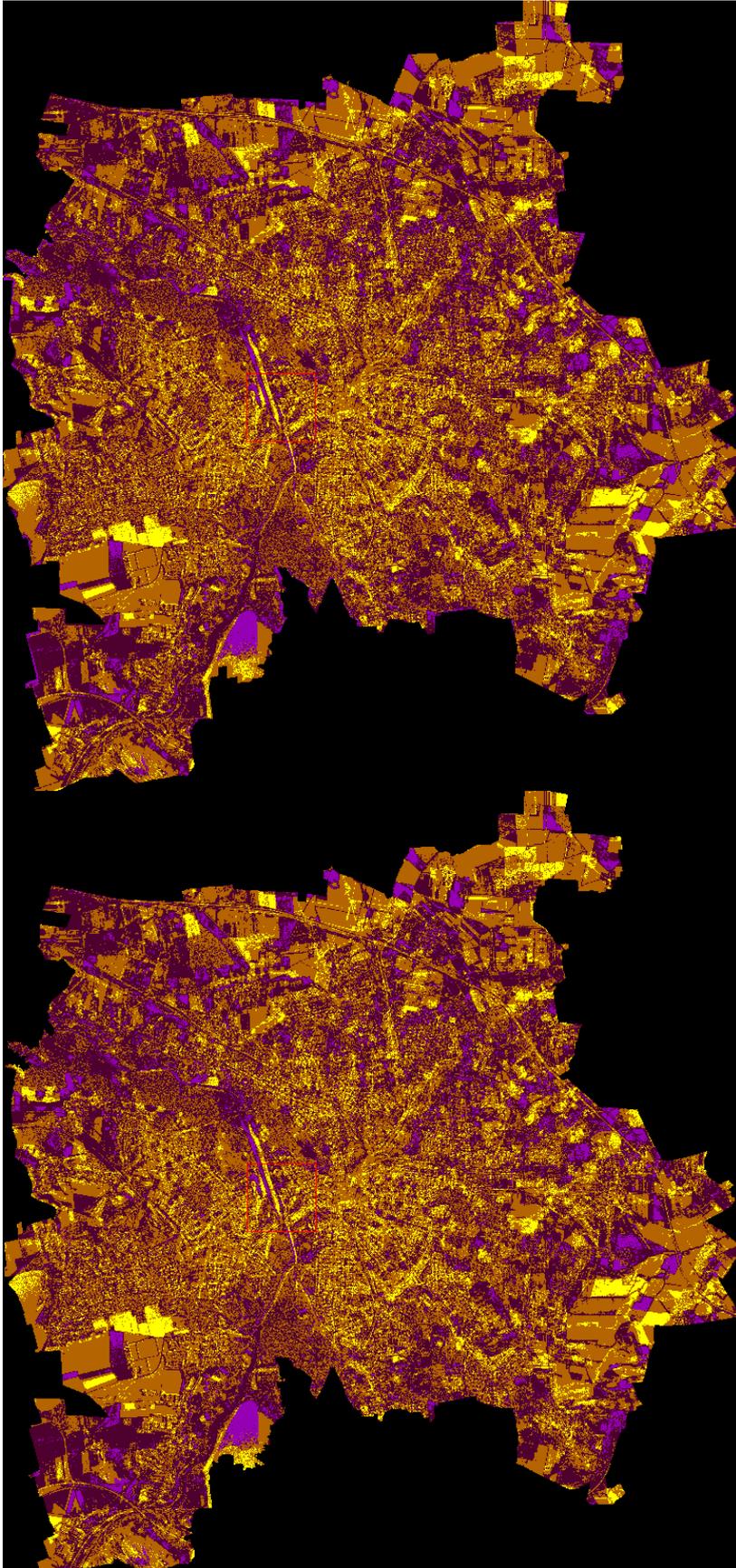
<u>OSAVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>NDVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	666.504	5,50	1	617.607	5,19
2	4.917.876	40,55	2	4.839.193	40,64
3	0	0	3	49	0,00041
4	5.561.090	45,86	4	5.470.651	45,94
5	981.758	8,1	5	980.706	8,24

<u>NDWI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>MTVI1:</u>	Pixelanzahl	%
1	1.271.312	10,68	1	1.349.288	93,58
2	7.179.739	60,3	2	756	0,0062
3	38	0,00032	3	0	0
4	3.403.041	28,58	4	781	0,0064
5	54.076	0,45	5	776.545	6,4

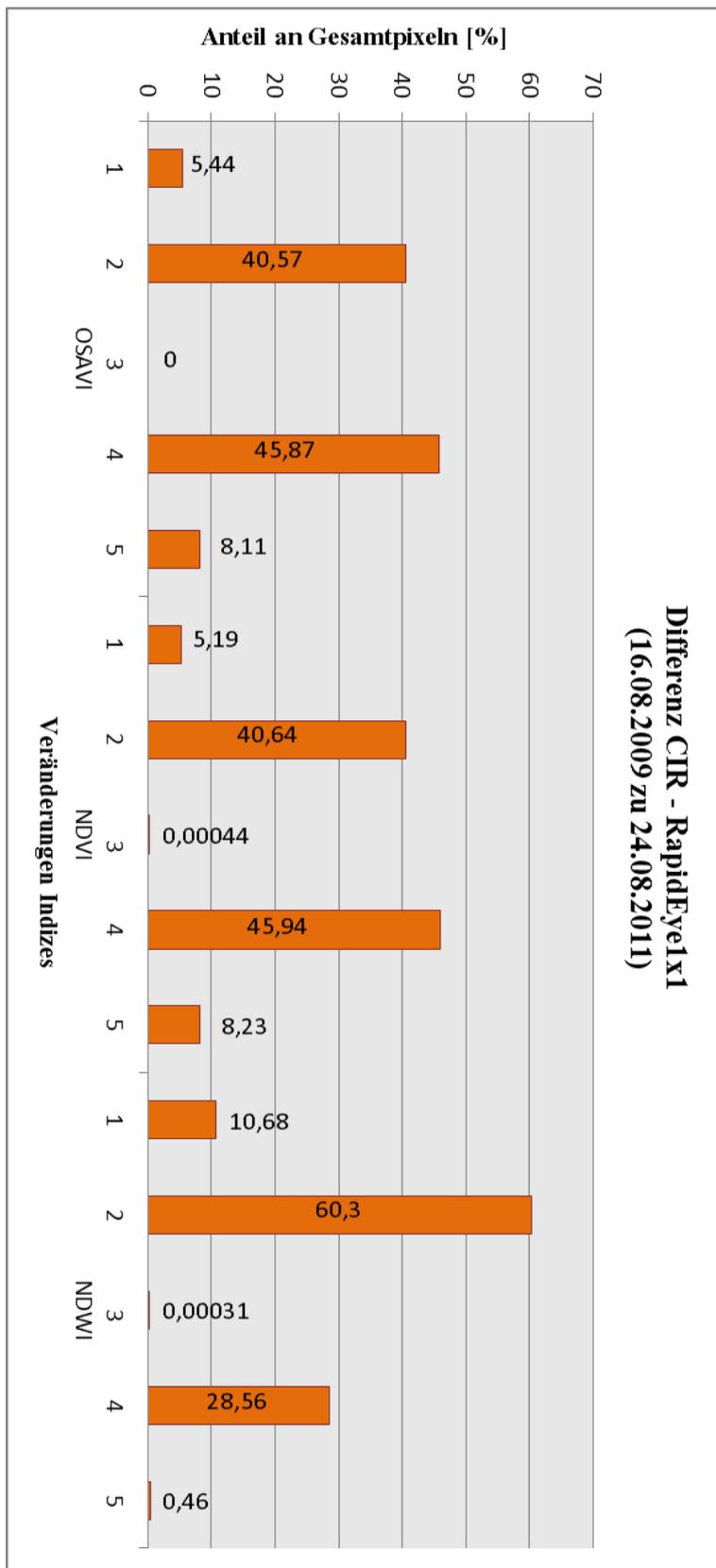
Anlage 16: Differenzentabelle der Spektralindizes für CIR 5x5 und RapidEye

Indexdifferenz	r²
OSAVI-NDVI	0,999
OSAVI-NDWI	0,836
OSAVI-MTVI1	-0,544
NDVI-NDWI	0,835
NDVI-MTVI1	-0,548
NDWI-MTVI1	-0,444

Anlage 17: Betrachtete Indexdifferenz und ermitteltes r² aus den in Anlage 16 dargestellten Werten



Anlage 18: Differenzbilder aus den in Anlage 16 dargestellten Werten für die CIR- und die RapidEye- Aufnahme (OSAVI und NDVI)



Anlage 19: Differenz der Spektralindizes von der CIR- Aufnahme und der aggregierten RapidEye- Aufnahme in Prozent

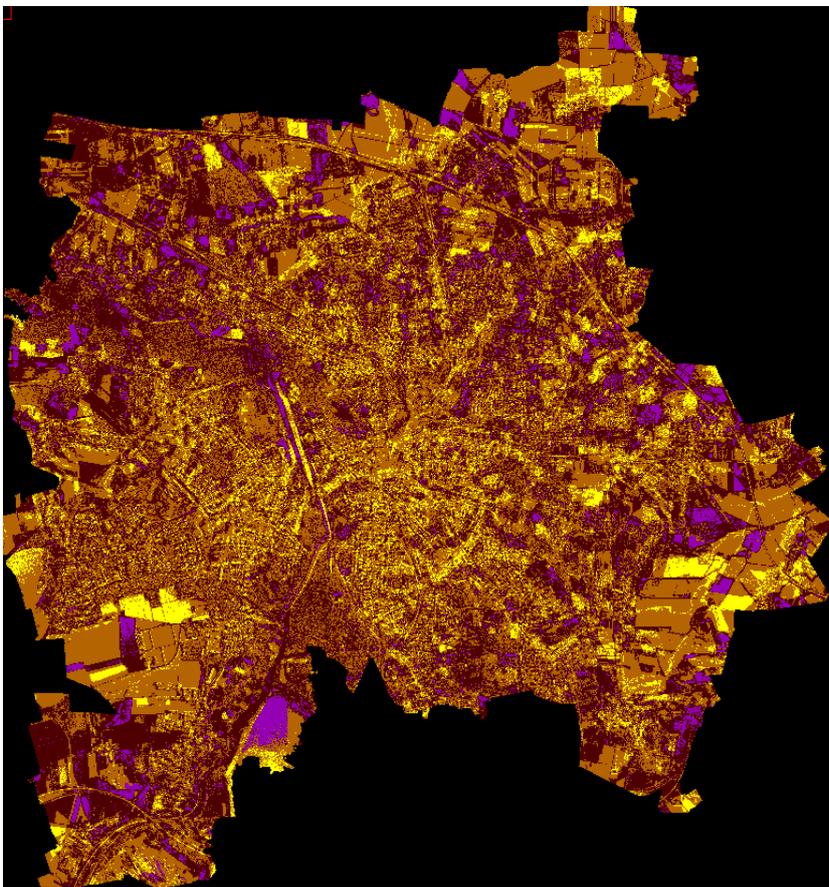
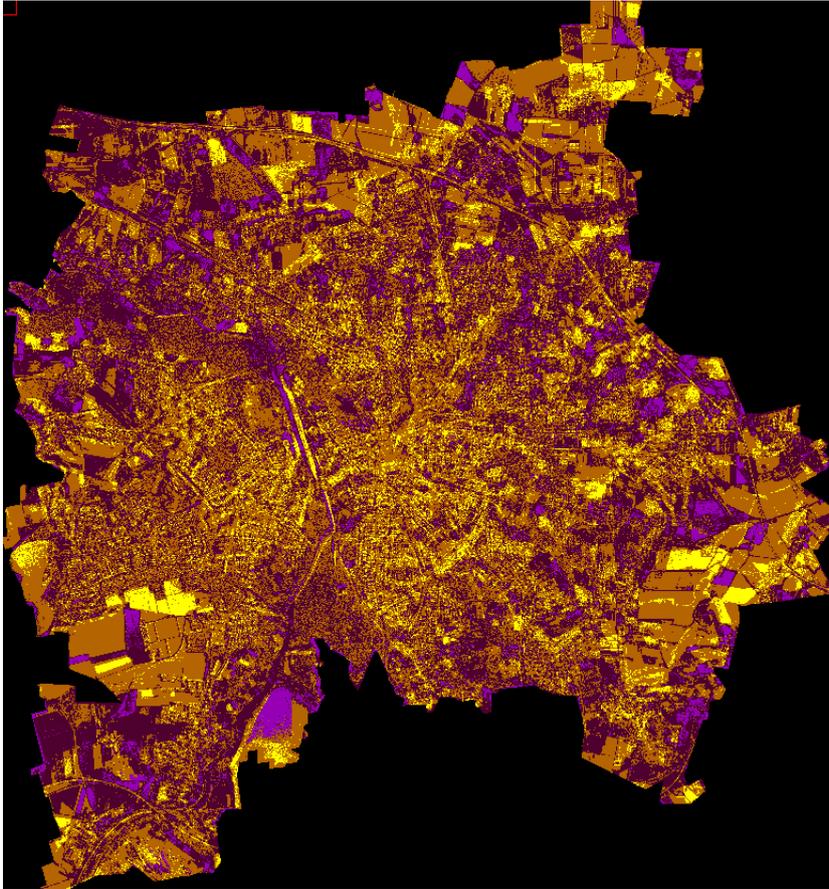
OSAVI:	Pixelanzahl	%	NDVI:	Pixelanzahl	%
1	16.433.320	5,44	1	15.434.593	5,19
2	122.580.245	40,57	2	120.899.059	40,64
3	0	0	3	1.299	0,00044
4	138.595.748	45,87	4	136.685.459	45,94
5	24.513.698	8,11	5	24.494.620	8,23

NDWI:	Pixelanzahl	%
1	31.786.512	10,68
2	179.394.665	60,3
3	909	0,00031
4	84.978.102	28,56
5	1.354.842	0,46

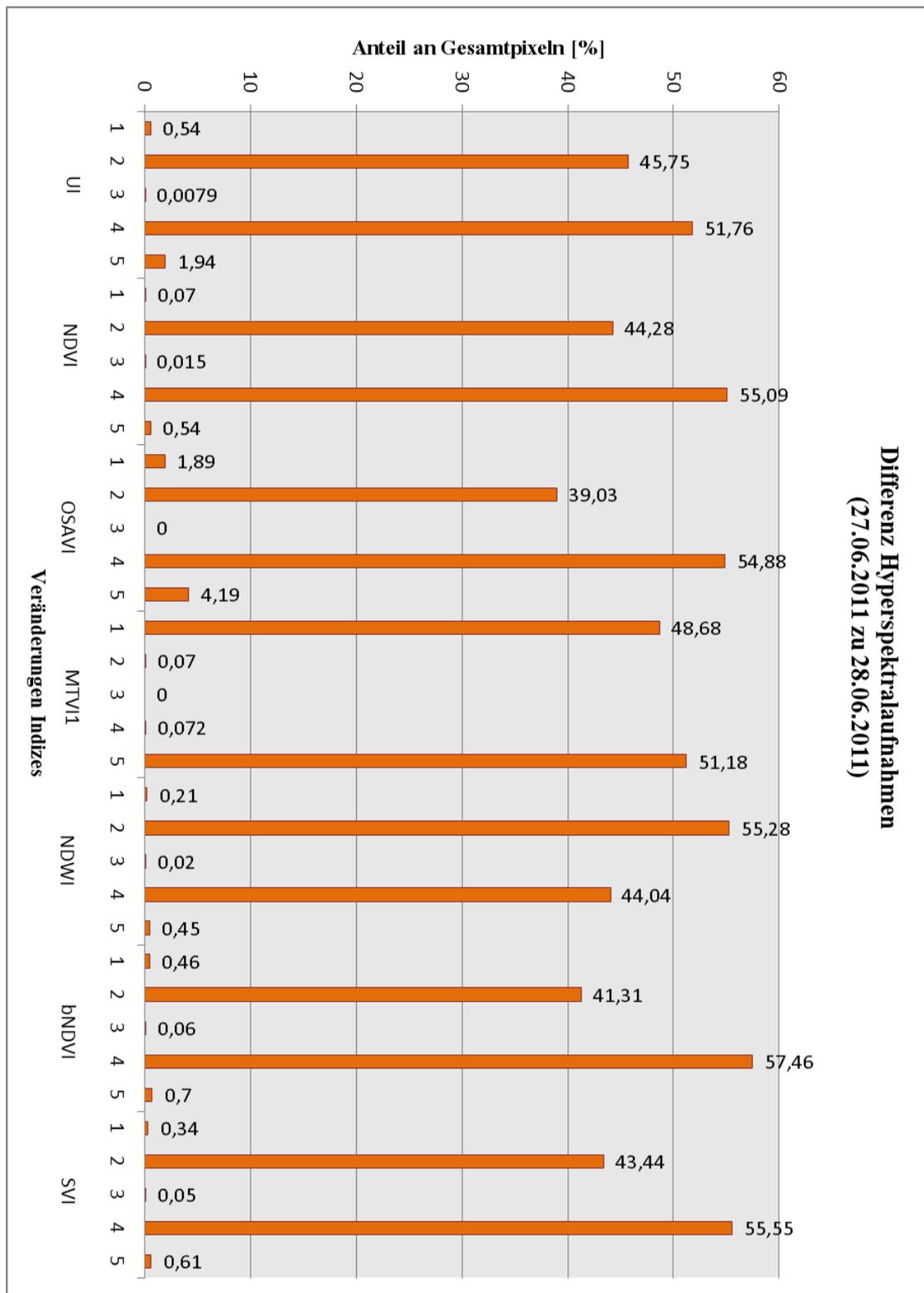
Anlage 20: Differenzentabelle der Spektralindizes für CIR und RapidEye 1x1

Indexdifferenz	r²
OSAVI-NDVI	0,999
OSAVI-NDWI	0,836
NDVI-NDWI	0,835

Anlage 21: Betrachtete Indexdifferenz und ermitteltes r² aus den in Anlage 20 dargestellten Werten



Anlage 22: Differenzbilder aus den in Anlage 20 dargestellten Werten (OSAVI und NDVI)



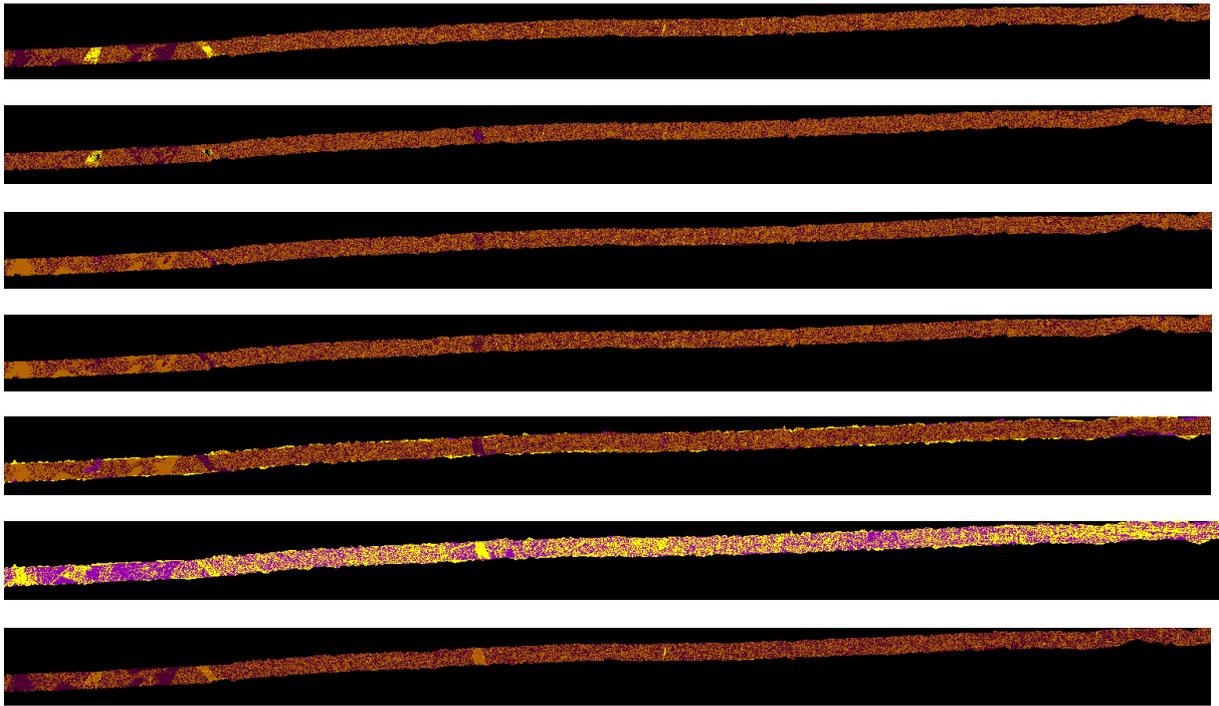
Anlage 23: Differenz der Spektralindizes von den Hyperspektral- Aufnahmen in Prozent

<u>UI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>NDWI:</u>	Pixelanzahl	%
1	19.199	0,54	1	7.346	0,21
2	1.633.374	45,75	2	1.973.749	55,28
3	282	0,0079	3	673	0,02
4	1.847.957	51,76	4	1.572.401	44,04
5	69.287	1,94	5	15.970	0,45
<u>NDVI:</u>					
<u>NDVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>bNDVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	2.544	0,07	1	16.538	0,46
2	1.576.976	44,28	2	1.474.732	41,31
3	547	0,015	3	2.240	0,06
4	1.962.262	55,09	4	2.051.560	57,46
5	19.361	0,54	5	25.069	0,7
<u>OSAVI:</u>					
<u>OSAVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>SVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	76.147	1,89	1	12.242	0,34
2	1.568.610	39,03	2	1.550.741	43,44
3	0	0	3	1.957	0,05
4	2.205.413	54,88	4	1.983.282	55,55
5	168.466	4,19	5	21.917	0,61
<u>MTVI1:</u>					
<u>MTVI1:</u>	Pixelanzahl	%			
1	1.955.867	48,68			
2	2.830	0,07			
3	0	0			
4	2.892	0,072			
5	2.056.496	51,18			

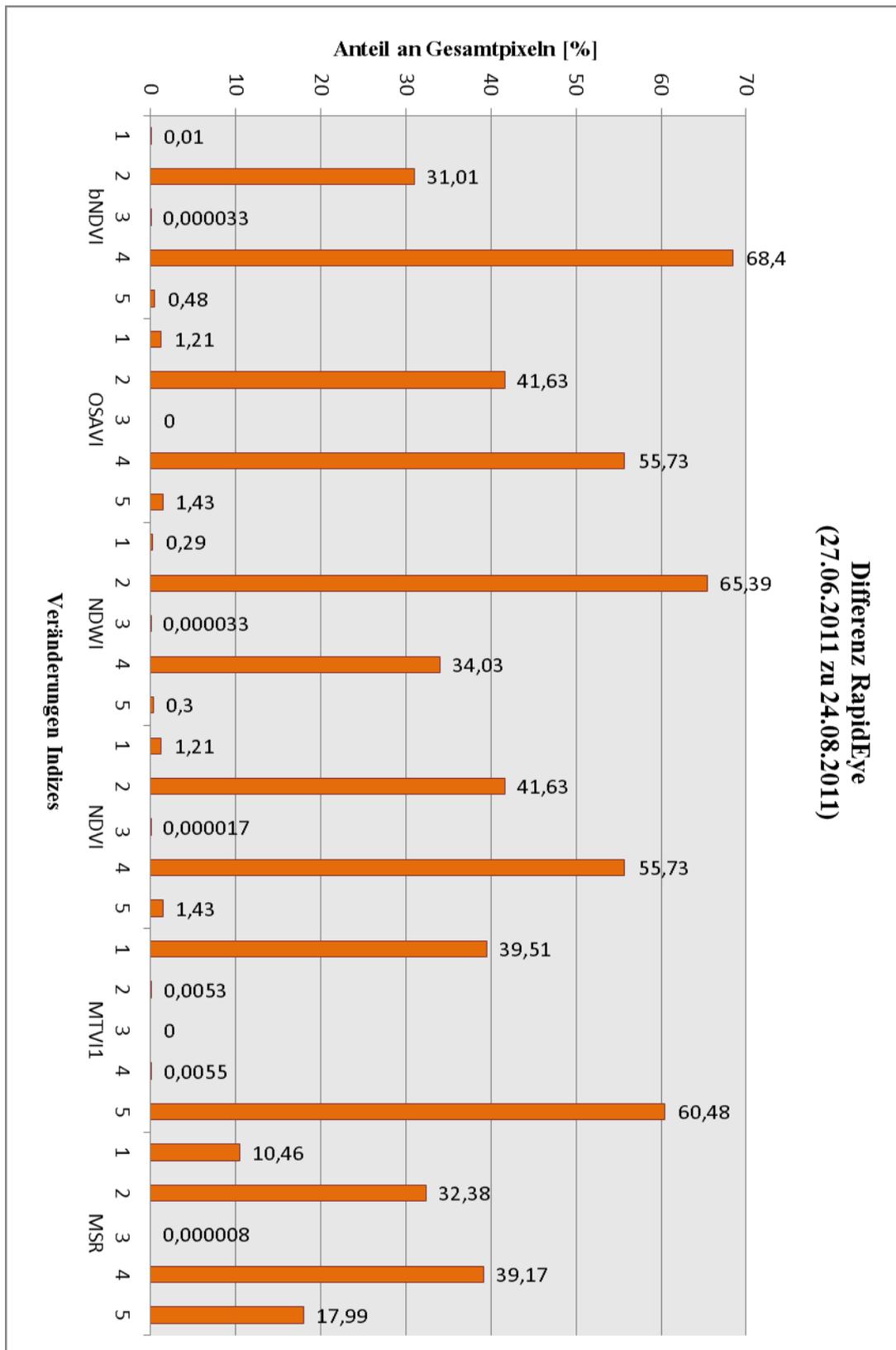
Anlage 24: Differenzentabelle der Spektralindizes für die Hyperspektral- Aufnahmen

Indextdifferenz	r ²
UI-NDWI	0,974
UI-NDVI	0,998
UI-bNDVI	0,992
UI-OSAVI	0,989
UI-SVI	0,997
UI-MTVI1	-0,648
NDWI-NDVI	0,959
NDWI-bNDVI	0,937
NDWI-OSAVI	0,931
NDWI-SVI	0,954
NDWI-MTVI1	-0,655
NDVI-bNDVI	0,998
NDVI-OSAVI	0,995
NDVI-SVI	0,999
NDVI-MTVI1	-0,656
bNDVI-OSAVI	0,999
bNDVI-SVI	0,999
bNDVI-MTVI1	-0,645
OSAVI-SVI	0,996
OSAVI-MTVI1	-0,610
SVI-MTVI1	-0,652

Anlage 25: Betrachtete Indextdifferenz und ermitteltes r² aus den in Anlage 24 dargestellten Werten



Anlage 26: Differenzbilder aus den in Anlage 24 dargestellten Werten (UI, NDVI, bNDVI, SVI, OSAVI, MTVI1 und NDWI)



Anlage 27: Differenz der Spektralindizes von den RapidEye- Aufnahmen in Prozent

<u>bNDVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>NDVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	13.666	0,01	1	146.383	1,21
2	3.756.562	31,01	2	5.042.628	41,63
3	4	0,000033	3	2	0,000017
4	8.285.438	68,4	4	6.750.810	55,73
5	57.565	0,48	5	173.412	1,43

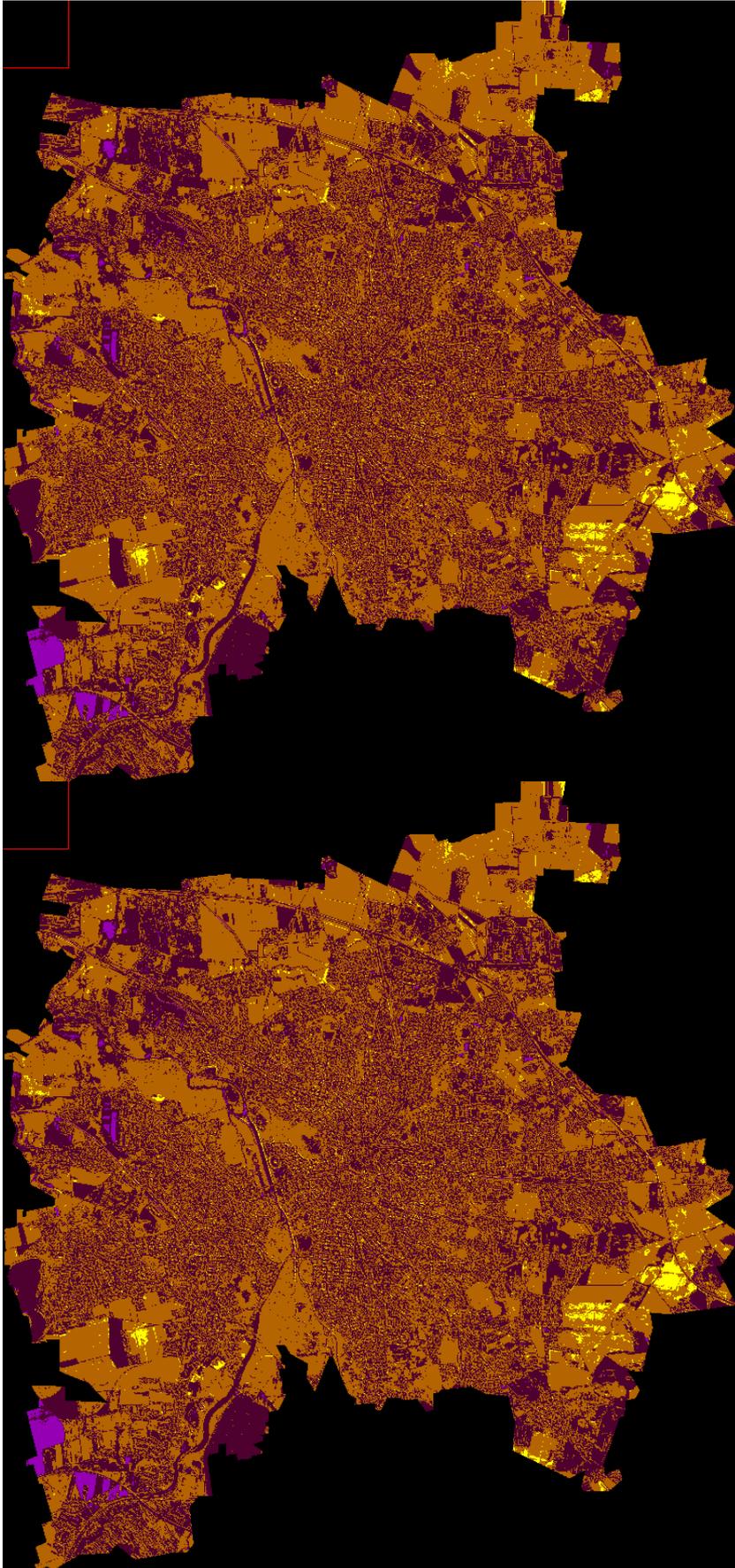
<u>OSAVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>MTVI1:</u>	Pixelanzahl	%
1	146.375	1,21	1	4.785.847	39,51
2	5.042.623	41,63	2	648	0,0053
3	0	0	3	0	0
4	6.750.845	55,73	4	666	0,0055
5	173.390	1,43	5	7.325.944	60,48

<u>NDWI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>MSR:</u>	Pixelanzahl	%
1	35.095	0,29	1	1.266.993	10,46
2	7.920.272	65,39	2	3.922.019	32,38
3	4	0,000033	3	1	0,000008
4	4.121.955	34,03	4	4.744.577	39,17
5	35.909	0,3	5	2.179.645	17,99

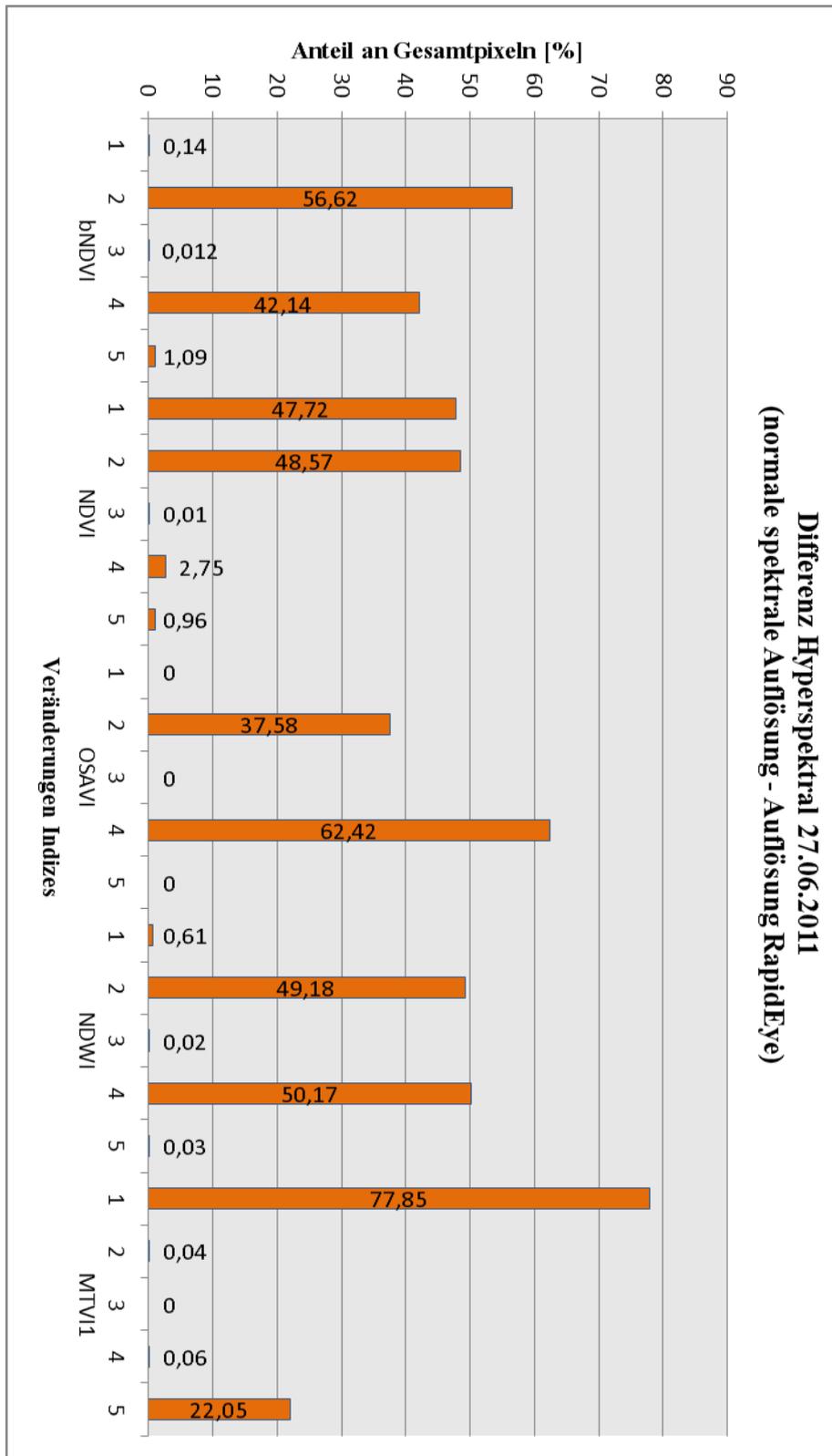
Anlage 28: Differenzentabelle der Spektralindizes für die RapidEye- Aufnahmen

Indextdifferenz	r ²
bNDVI-NDVI	0,965
bNDVI-OSAVI	0,965
bNDVI-MTVI1	-0,574
bNDVI-NDWI	0,666
bNDVI-MSR	0,880
NDVI-OSAVI	1
NDVI-MTVI1	-0,617
NDVI-NDWI	0,838
NDVI-MSR	0,924
OSAVI-MTVI1	-0,617
OSAVI-NDWI	0,838
OSAVI-MSR	0,924
MTVI1-NDWI	-0,593
MTVI1-MSR	-0,275
NDWI-MSR	0,781

Anlage 29: Betrachtete Indextdifferenz und ermitteltes r² aus den in Anlage 28 dargestellten Werten



Anlage 30: Differenzbilder aus den in Anlage 28 dargestellten Werten (OSAVI und NDVI)



Anlage 31: Differenz der Spektralindizes von der Hyperspektralaufnahme vom 27.06.2011 mit der normalen spektralen Auflösung und der aggregierten Auflösung nach RapidEye

<u>bNDVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>NDVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	6.851	0,14	1	2.261.526	47,72
2	2.688.205	56,62	2	2.301.788	48,57
3	576	0,012	3	280	0,01
4	2.000.551	42,14	4	130.354	2,75
5	51.762	1,09	5	45.472	0,96

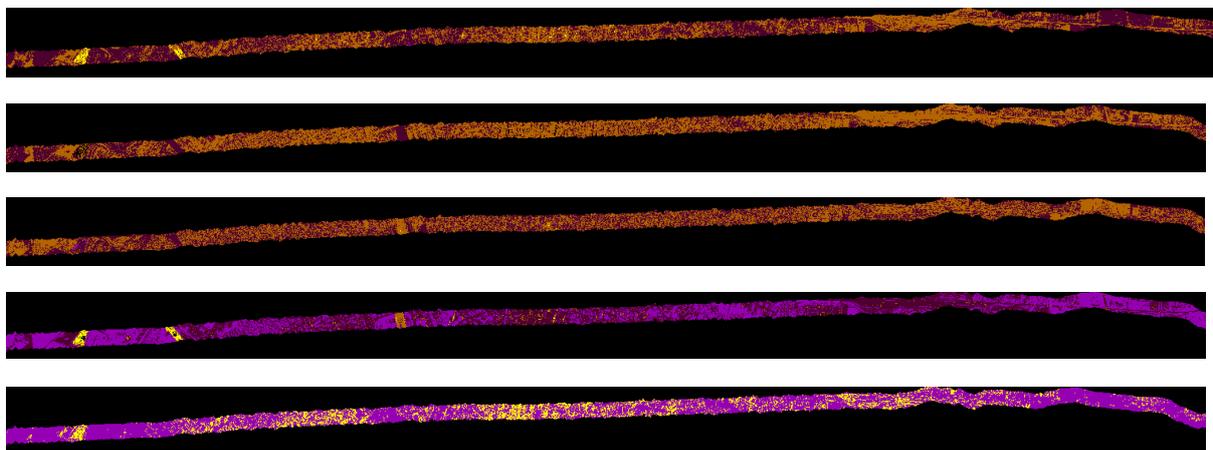
<u>OSAVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>NDWI:</u>	Pixelanzahl	%
1	0	0	1	28.879	0,61
2	1.746.562	37,58	2	2.335.001	49,18
3	0	0	3	1.011	0,02
4	2.900.732	62,42	4	2.381.814	50,17
5	0	0	5	1.240	0,03

<u>MTVI1:</u>	Pixelanzahl	%
1	3.695.461	77,85
2	2.092	0,04
3	0	0
4	2.776	0,06
5	1.046.537	22,05

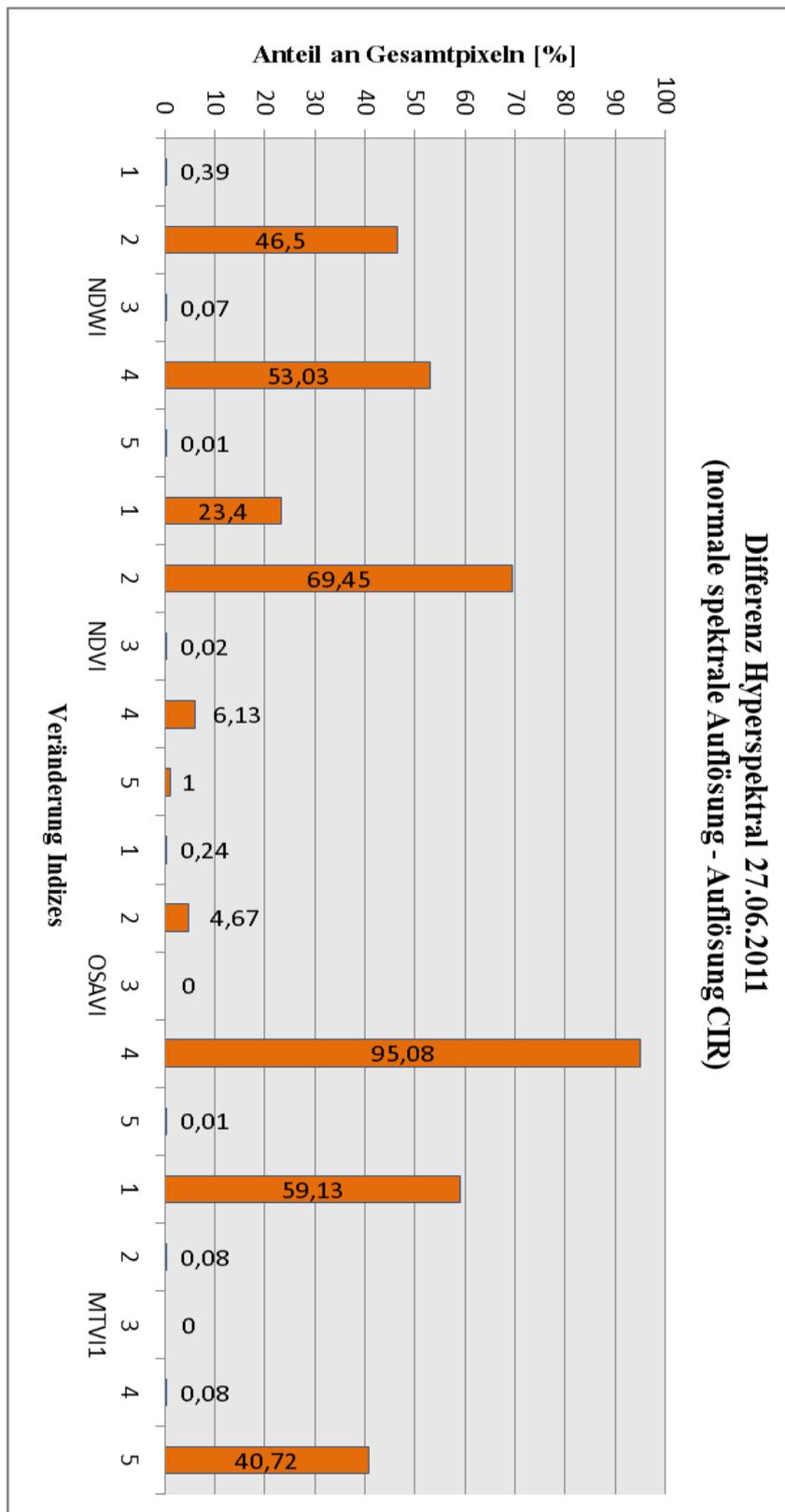
Anlage 32: Differenzentabelle der Spektralindizes von der Hyperspektralaufnahme vom 27.06.2011 mit der normalen spektralen Auflösung und der aggregierten Auflösung nach RapidEye

Indexdifferenz	r^2
bNDVI-NDVI	0,311
bNDVI-OSAVI	0,878
bNDVI-NDWI	0,980
bNDVI-MTVI1	-0,532
NDVI-OSAVI	-0,001
NDVI-NDWI	0,199
NDVI-MTVI1	0,501
OSAVI-NDWI	0,956
OSAVI-MTVI1	-0,514
NDWI-MTVI1	-0,533

Anlage 33: Betrachtete Indexdifferenz und ermitteltes r^2 aus den in Anlage 32 dargestellten Werten



Anlage 34: Differenzenbilder aus den in Anlage 32 dargestellten Werten (bNDVI, OSAVI, NDWI, NDVI und MTVI1)



Anlage 35: Differenz der Spektralindizes von der Hyperspektralaufnahme vom 27.06.2011 mit der normalen spektralen Auflösung und der aggregierten Auflösung nach CIR

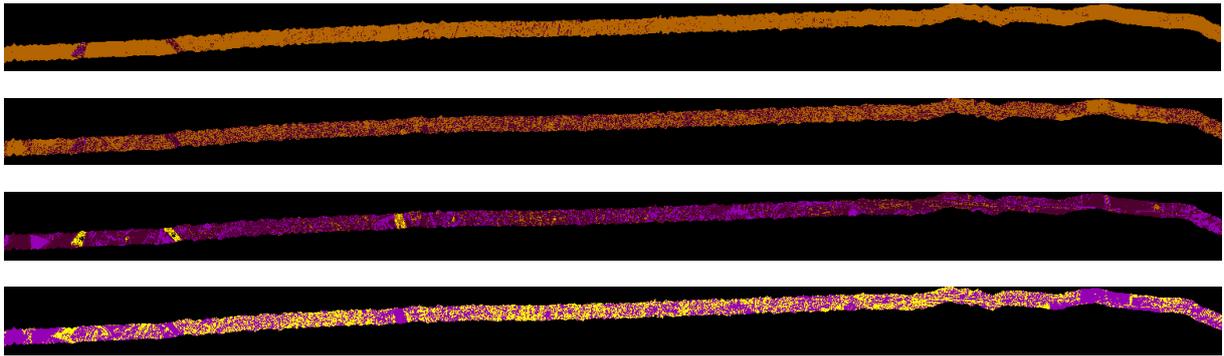
<u>NDWI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>NDVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	18.480	0,39	1	1.109.140	23,4
2	2.207.818	46,5	2	3.291.653	69,45
3	3.537	0,07	3	806	0,02
4	2.517.857	53,03	4	290.496	6,13
5	253	0,01	5	47.325	1

<u>OSAVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>MTVI1:</u>	Pixelanzahl	%
1	11.235	0,24	1	2.806.900	59,13
2	221.852	4,67	2	3.753	0,08
3	0	0	3	0	0
4	4.513.955	95,08	4	3.625	0,08
5	617	0,01	5	1.932.859	40,72

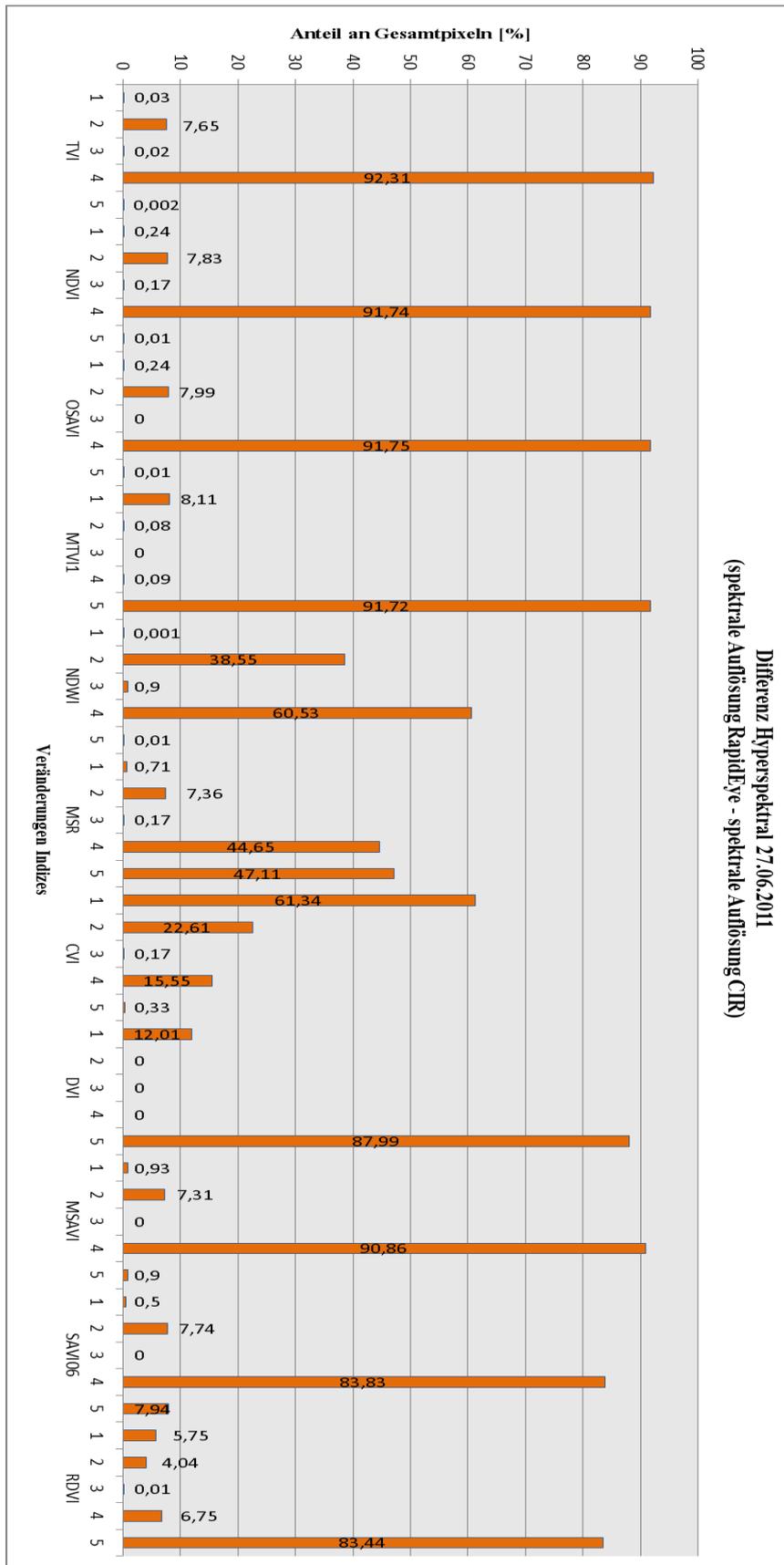
Anlage 36: Differenzentabelle der Spektralindizes von der Hyperspektralaufnahme vom 27.06.2011 mit der normalen spektralen Auflösung und der aggregierten Auflösung nach CIR

Indexdifferenzen	r²
NDWI-NDVI	0,491
NDWI-OSAVI	0,711
NDWI-MTVI1	-0,643
NDVI-OSAVI	-0,222
NDVI-MTVI1	-0,174
OSAVI-MTVI1	-0,419

Anlage 37: Betrachtete Indexdifferenz und ermitteltes r² aus den in Anlage 36 dargestellten Werten



Anlage 38: Differenzbilder aus den in Anlage 36 dargestellten Werten (OSAVI, NDWI, NDVI und MTVI1)



Anlage 39: Differenz der Spektralindizes von der Hyperspektralaufnahme vom 27.06.2011 mit der aggregierten Auflösung nach RapidEye und der nach CIR

<u>TVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>NDVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	1.284	0,03	1	11.308	0,24
2	357.340	7,65	2	371.739	7,83
3	737	0,02	3	8.256	0,17
4	4.314.490	92,31	4	4.355.953	91,74
5	73	0,002	5	689	0,01

<u>OSAVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>MTVI1:</u>	Pixelanzahl	%
1	11.270	0,24	1	385.086	8,11
2	379.510	7,99	2	3.791	0,08
3	0	0	3	0	0
4	4.355.953	91,75	4	4.355	0,09
5	679	0,01	5	4.353.818	91,72

<u>NDWI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>MSR:</u>	Pixelanzahl	%
1	50	0,001	1	33.729	0,71
2	1.830.467	38,55	2	349.318	7,36
3	42.897	0,9	3	8.256	0,17
4	2.874.064	60,53	4	2.119.996	44,65
5	467	0,01	5	2.236.646	47,11

<u>CVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>DVI:</u>	Pixelanzahl	%
1	2.912.163	61,34	1	567.838	12,01
2	1.073.623	22,61	2	0	0
3	8.192	0,17	3	0	0
4	738.138	15,55	4	0	0
5	15.829	0,33	5	4.159.173	87,99

<u>MSAVI:</u>	Pixelanzahl	%	<u>SAVI06:</u>	Pixelanzahl	%
1	44.130	0,93	1	23.702	0,5
2	347.197	7,31	2	367.214	7,74

3	0	0	3	0	0
4	4.312.809	90,86	4	3.979.528	83,83
5	42.641	0,9	5	376.966	7,94
RDVI:					
	Pixelanzahl	%			
1	273.175	5,75			
2	191.947	4,04			
3	537	0,01			
4	320.555	6,75			
5	3.961.731	83,44			

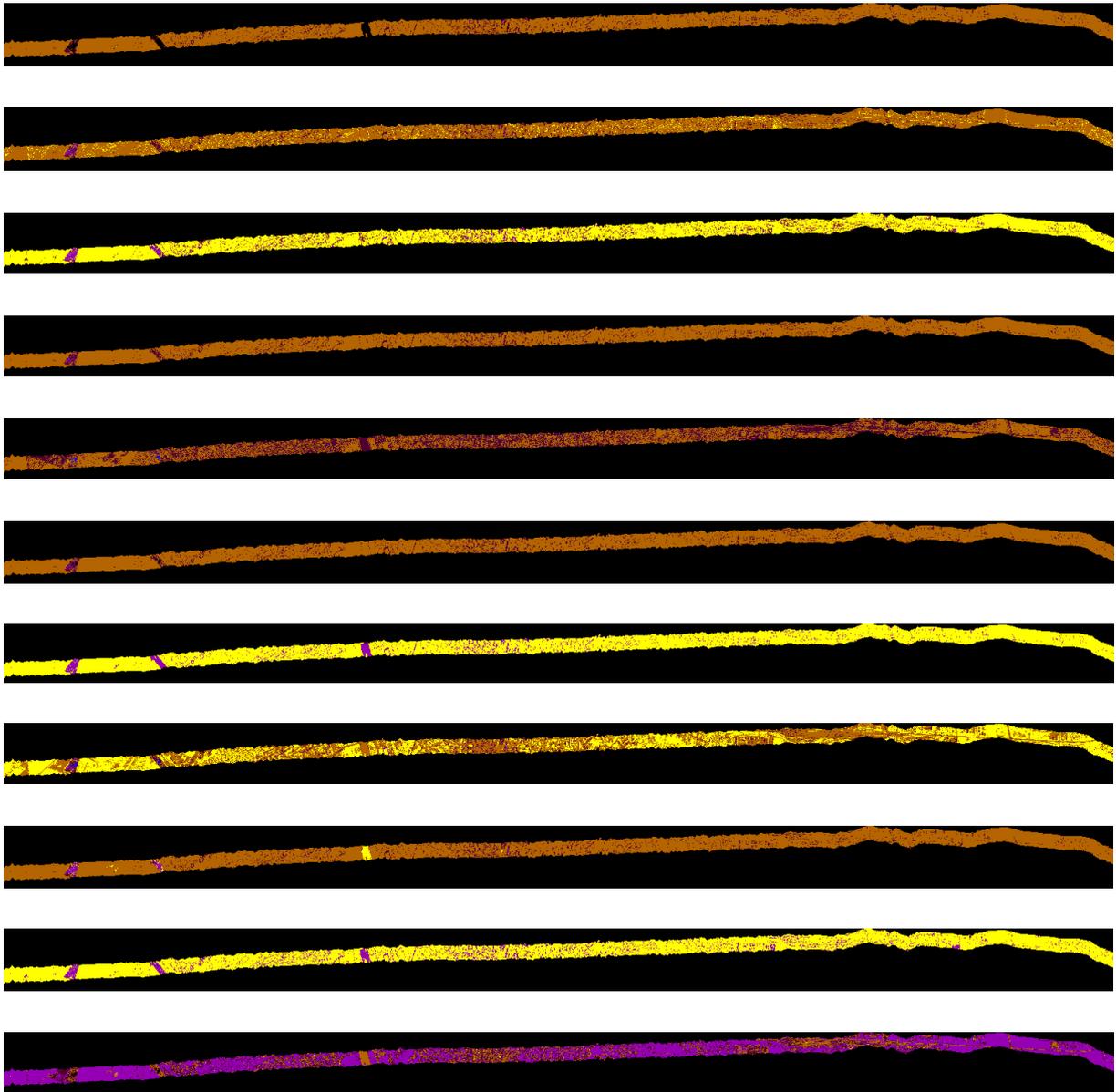
Anlage 40: Differenzentabelle der Spektralindizes von der Hyperspektralaufnahme vom 27.06.2011 mit der nach RapidEye- Auflösung aggregierten Aufnahme und der nach CIR

Indextdifferenzen	r ²	Indextdifferenzen	r ²
TVI-NDV	1	MTV-NDW	-0,441
TVI-OSA	1	MTV-MSR	0,608
TVI-MTV	-0,305	MTV-CVI	-0,364
TVI-NDW	0,853	MTV-DVI	0,999
TVI-MSR	0,564	MTV-MSA	-0,297
TVI-CVI	-0,096	MTV-SAV	-0,218
TVI-DVI	-0,321	MTV-RDV	0,996
TVI-MSA	0,999	NDW-MSR	0,369
TVI-SAV	0,996	NDW-CVI	-0,066
TVI-RDV	-0,233	NDW-DVI	-0,464

NDV-OSA	1	NDW-MSA	0,848
NDV-MTV	-0,307	NDW-SAV	0,837
NDV-NDW	0,853	NDW-RDV	-0,3591
NDV-MSR	0,562	MSR-CVI	-0,452
NDV-CVI	-0,095	MSR-DVI	0,589
NDV-DVI	-0,323	MSR-MSA	0,569
NDV-MSA	0,999	MSR-SAV	0,636
NDV-SAV	0,996	MSR-RDV	0,669
NDV-RDV	-0,235	CVI-DVI	-0,321
OSA-MTV	-0,307	CVI-MSA	-0,092
OSA-NDW	0,855	CVI-SAV	-0,136
OSA-MSR	0,562	CVI-RDV	-0,399
OSA-CVI	-0,094	DVI-MSA	-0,313
OSA-DVI	-0,323	DVI-SAV	-0,235
OSA-MSA	0,999	DVI-RDV	0,992
OSA-SAV	0,996	MSA-SAV	0,996
OSA-RDV	-0,235	MSA-RDV	-0,226
SAV-RDVI	-0,144		

Anlage 41: Betrachtete Indexdifferenz und ermitteltes r^2 aus den in Anlage 40 dargestellten

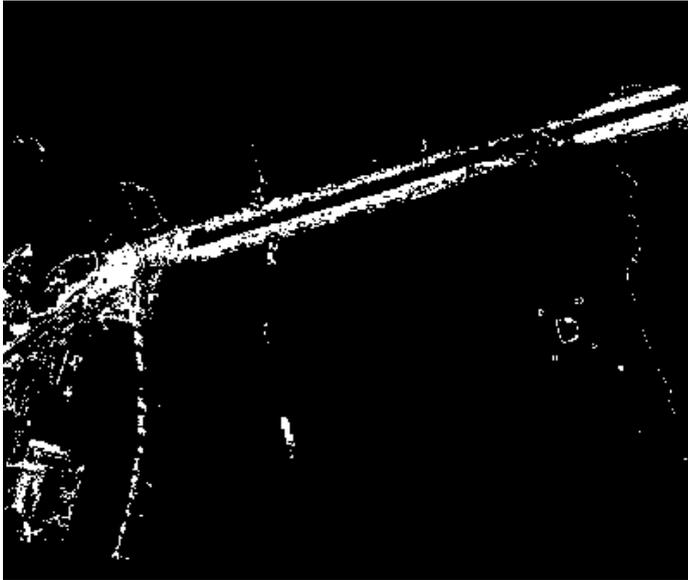
Werten



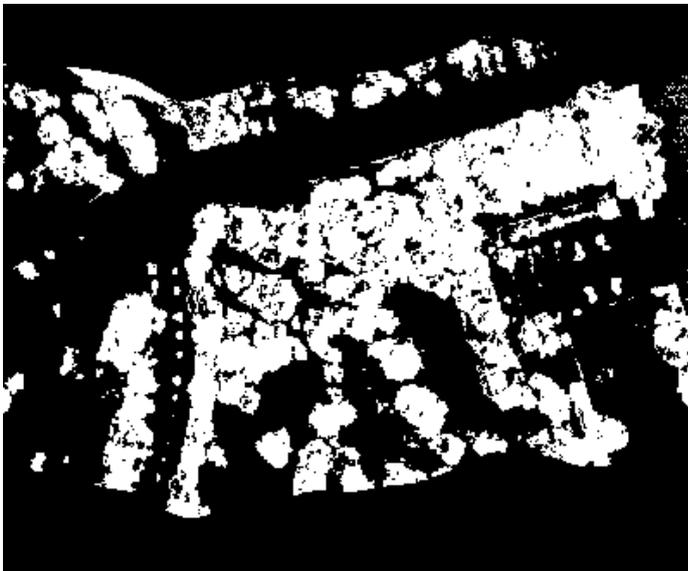
Anlage 42: Differenzenbilder aus den in Anlage 40 dargestellten Werten (TVI, SAVI06, RDVI, OSAVI, NDWI, NDVI, MTVI1, MSR, MSAVI, DVI und CVI)

Tag	T	NS
20110627	21.1	0.0
20110626	17.9	1.3
20110625	13.9	0.4
20110624	14.4	0.6
20110623	17.2	0.1
20110622	19.0	21.7
20110621	17.8	2.8
20110620	15.0	0.0
20110619	14.0	6.5
20110618	16.6	1.3
20110617	18.2	4.3
20110616	21.7	2.2
20110615	19.9	0.0
20110614	18.2	0.0
20110613	18.0	0.0
20110824	16.5	29.0
20110823	16.1	7.3
20110822	17.2	0.0
20110821	13.1	0.0
20110820	11.2	0.0
20110819	12.8	2.1
20110818	16.7	0.0
20110817	15.3	0.0
20110816	13.2	0.2
20110815	13.8	0.1
20110814	15.9	5.5
20110813	15.6	0.3
20110812	15.5	12.4
20110811	13.4	0.9
20110810	10.9	0.4

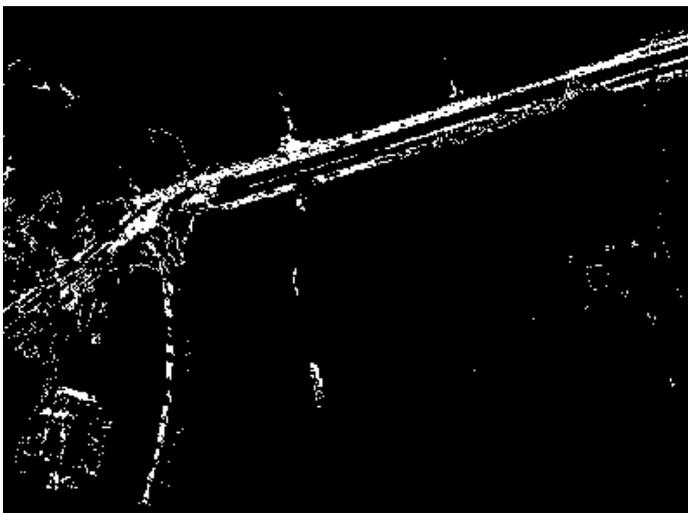
Anlage 43: Tabelle mit den Temperaturen und Niederschlägen der Tage vor den RapidEye- und Hyperspektral- Aufnahmen



bNDVI – Transportwege



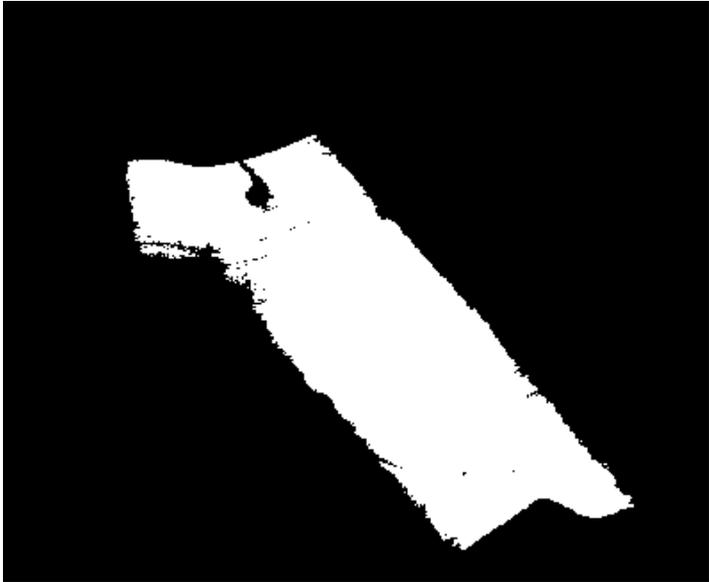
UI – Unterschied Vegetation – n. Vege



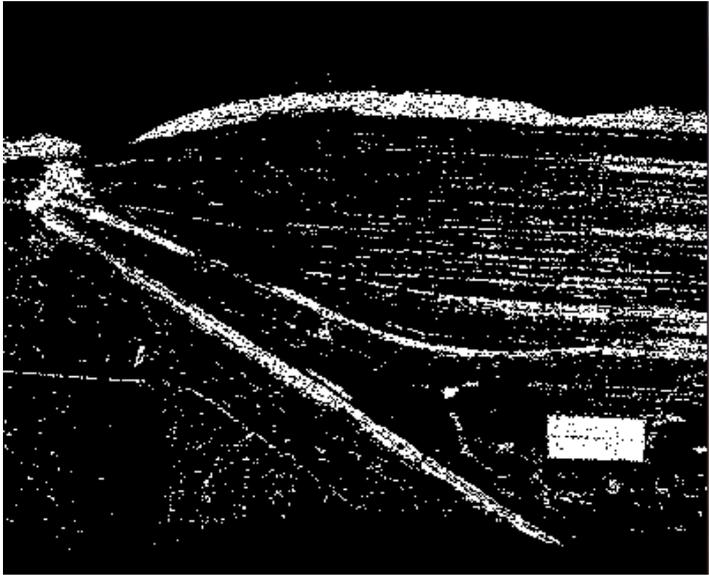
SVI – Transportwege



OSAVI – Vegetation



NDWI – Wasser



NDVI - Transportwege

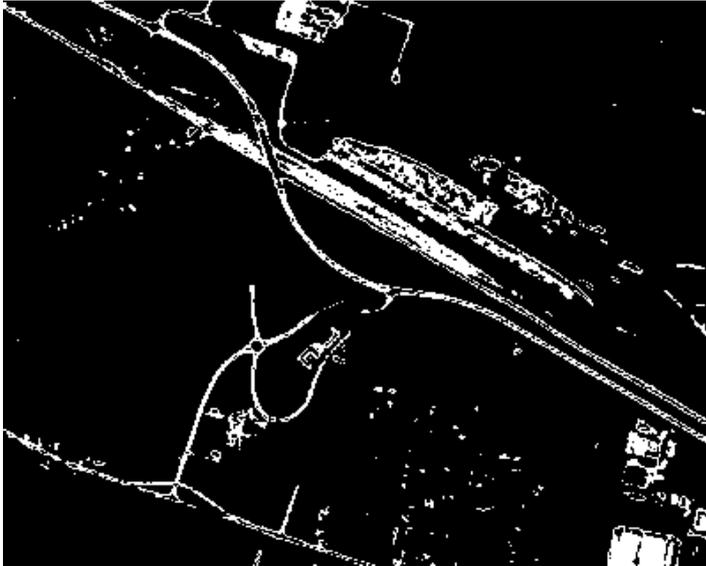


NDVI – Hausdächer dunkel



MTVI1 – heterogene Bedeckung

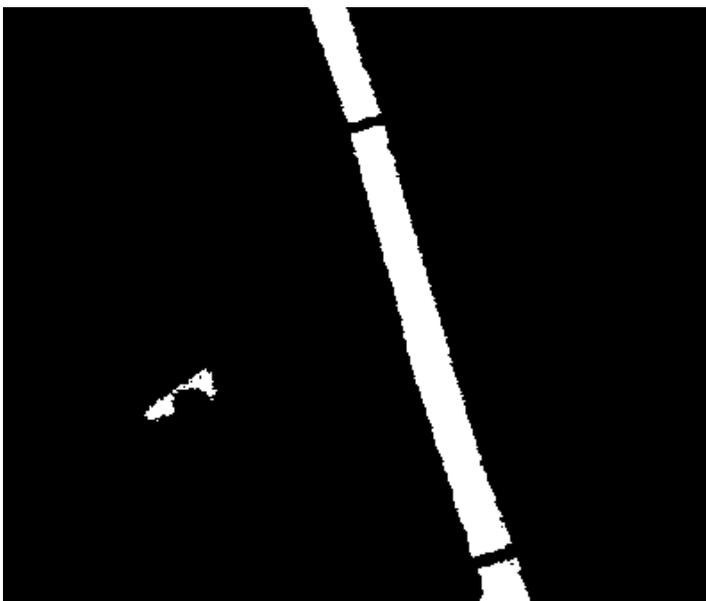
Anlagen 44-51: Ermittelte Landbedeckungsklassen der Hyperspektralaufnahme vom
27.06.2011



bNDVI – Transportwege



OSAVI – Vegetation



NDWI – Wasser



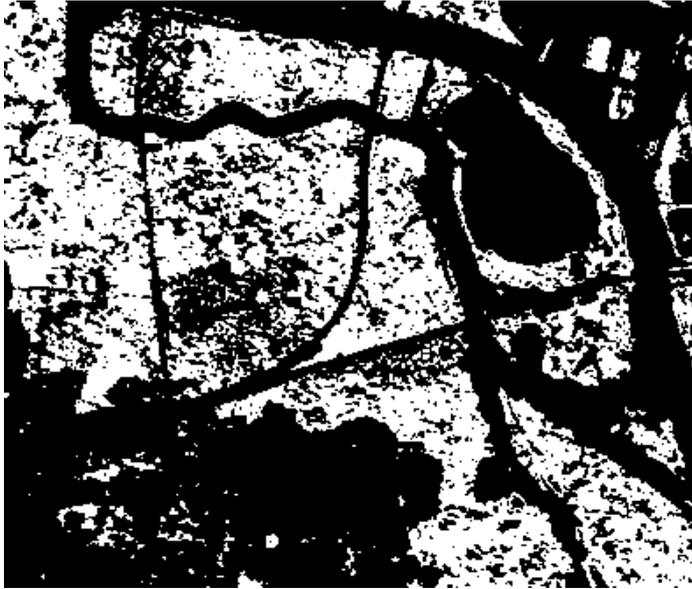
NDVI – Hausdächer dunkel



MSR – helle Felder



MSR – dunkle Felder

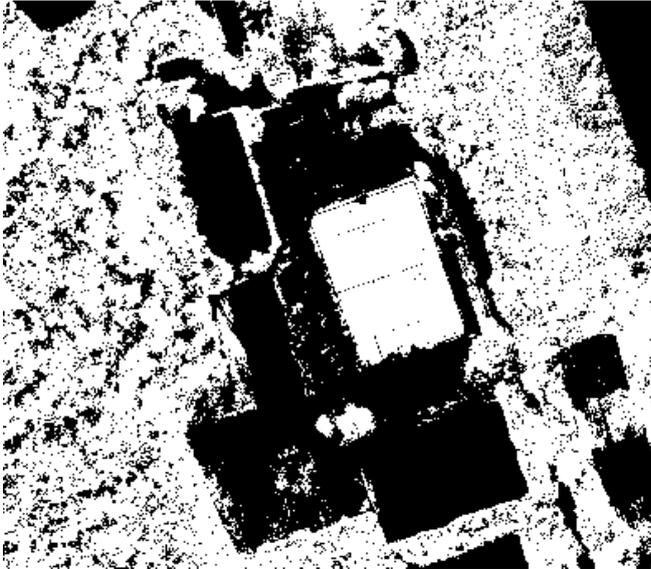


MSAVI – Vegetation

Anlagen 52-58: Ermittelte Landbedeckungsklassen der RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011



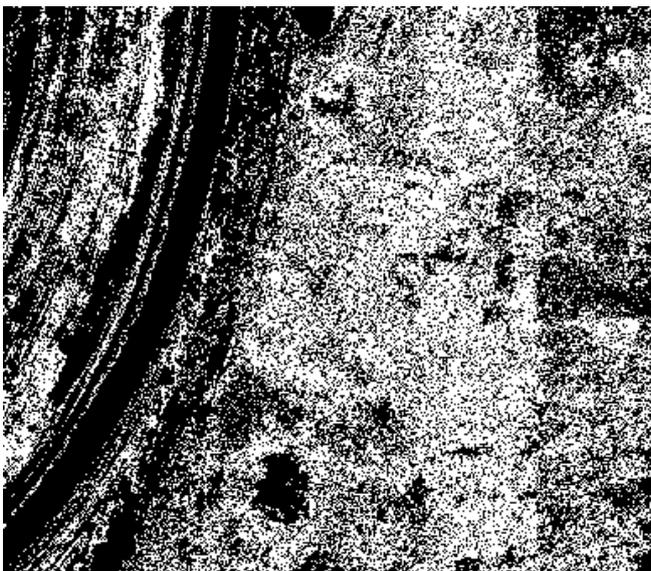
TVI – dunkle Felder



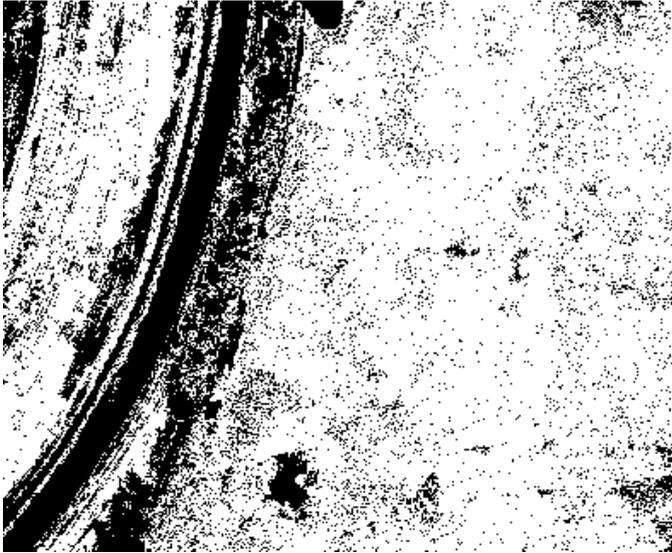
TVI – Vegetation



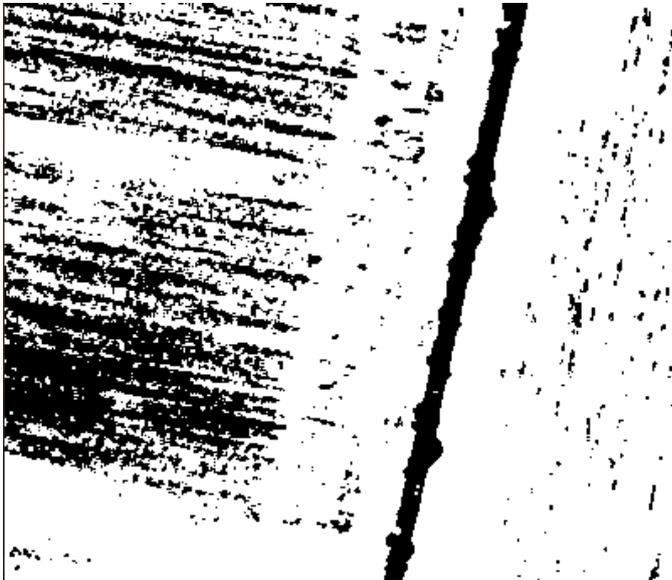
SAVI06 – Vegetation



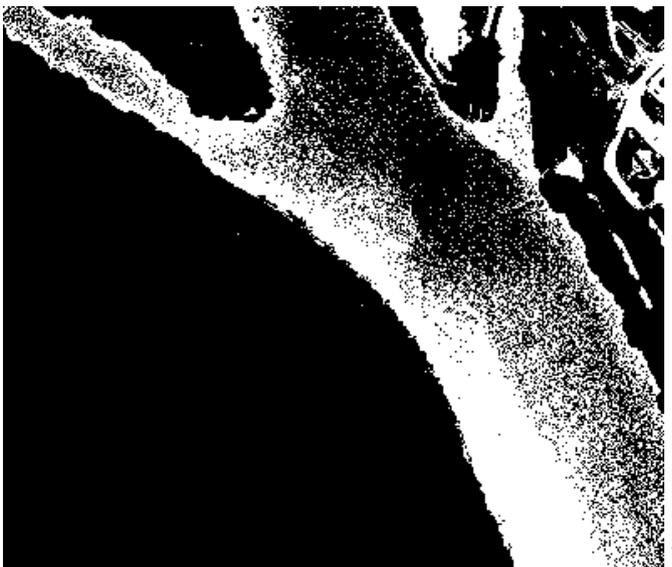
RDVI – helle Felder



OSAVI – helle Felder



OSAVI – dunkle Felder



NDWI – restliches Wasser



NDWI – nördlicher Teil Cospudener See



NDVI – Vegetation



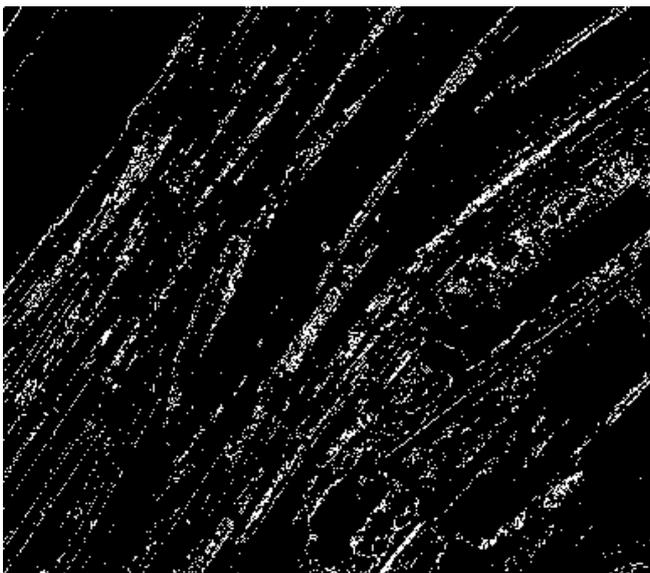
NDVI – Transportwege



MTVII – Vegetation



MTVII – Transportwege



MSR – Transportwege



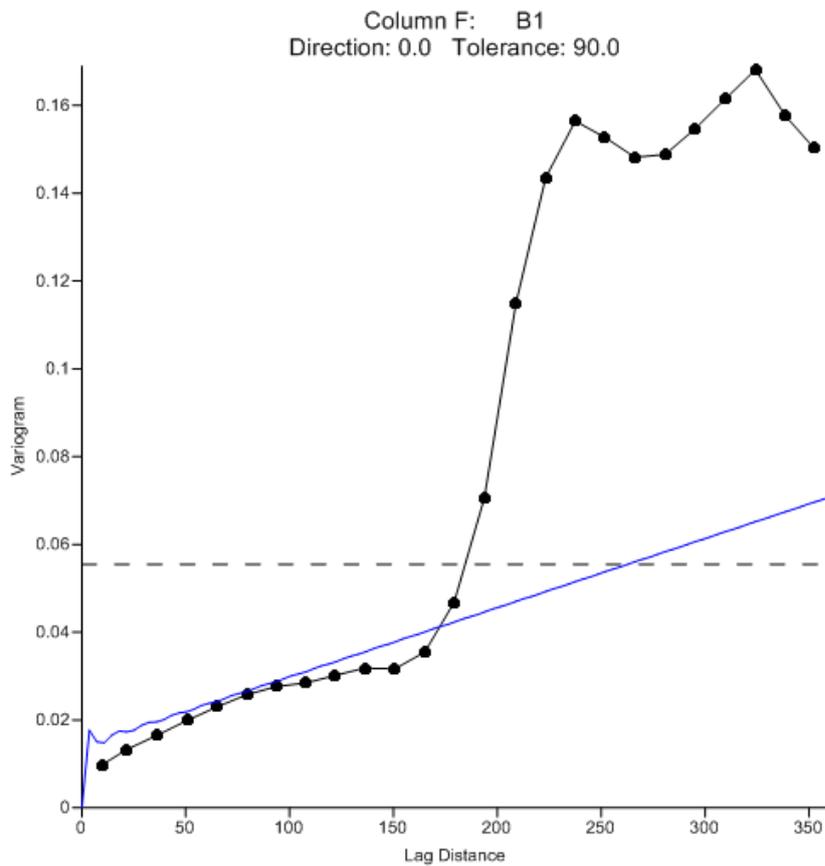
MSAVI – dunkle Felder



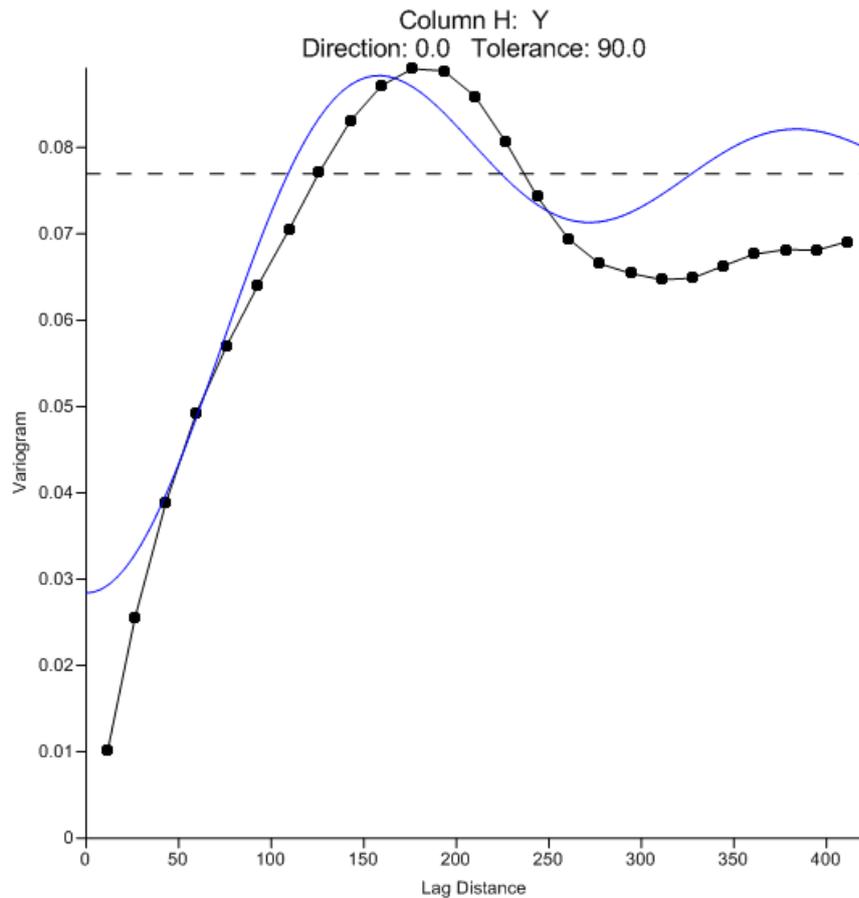
MSAVI – Hausdächer

Anlagen 59-73: Ermittelte Landbedeckungsklassen der CIR- Aufnahme vom 16.08.2009

Vergleichsdaten	Hyperspektral	RapidEye
Standardabweichung	0,114	0,049
Varianz	0,013	0,002
Variationskoeffizient	1,384	0,991
Schiefe	3,256	1,704
RMSE	0,14	0,07
Nugget Effekt	0	0,0284
Sill	0,058	0,077
Aussageweite	k.A.	k.A.



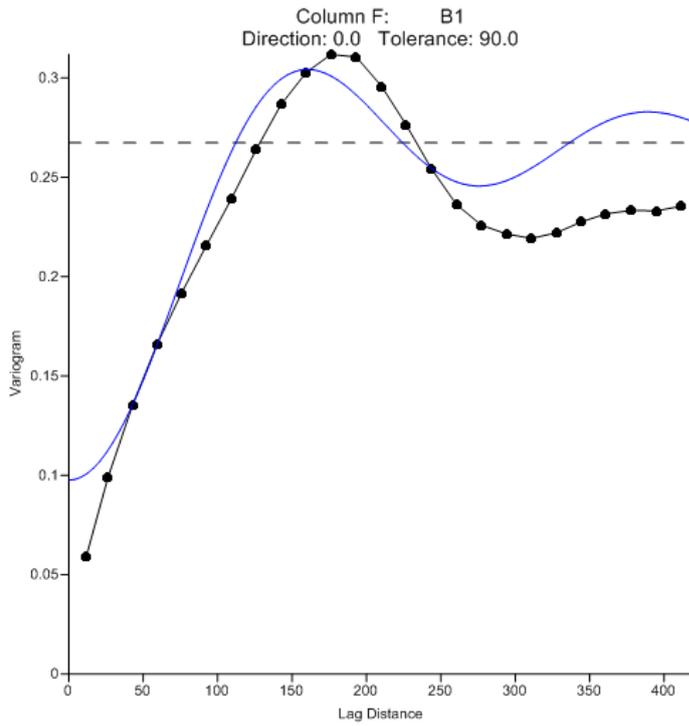
Hyper 5x5



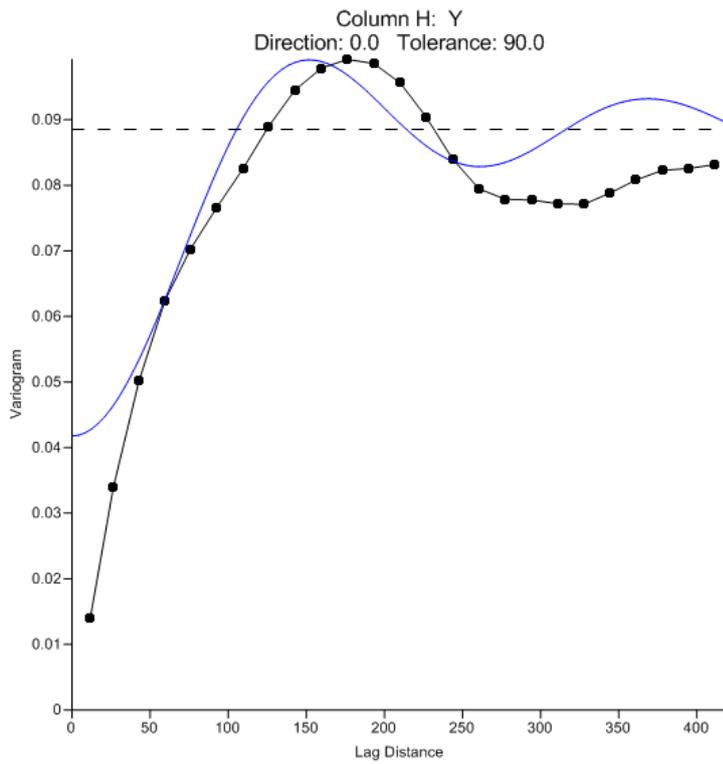
RapidEye

Anlage 74: NDWI- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011 und Variogramme

Vergleichsdaten	Hyperspektral	RapidEye
Standardabweichung	0,19	0,059
Varianz	0,036	0,003
Variationskoeffizient	1,325	1,006
Schiefe	1,931	1,72
RMSE	0,238	0,083
Nugget Effekt	0,09758	0,04177
Sill	0,27	0,088
Aussageweite	k.A.	k.A.



Hyper 5x5



RapidEye

Anlage 75: OSAVI- Werte für die Vergleichbarkeit von Hyperspektral- und RapidEye- Aufnahme vom 27.06.2011 und Variogramme