

# **Multidaten-Ansatz zur fernerkundungs- und GIS-basierten Erzeugung multitemporaler, disaggregierter Landnutzungsdaten**

Methodenentwicklung und Fruchtfolgenableitung am Beispiel des Rureinzugsgebiets

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

vorgelegt von

Guido Waldhoff

aus Köln

Köln 2014

Berichtersteller:

Prof. Dr. G. Bareth

Prof. Dr. K. Schneider

Tag der mündlichen Prüfung:

03. Juli 2014

## Abstract

Nowadays land use data are of central importance for numerous topics. For the regional (agro-)ecosystem modelling of the Rur catchment, which is conducted in the Transregio 32: Patterns in Soil-Vegetation-Atmosphere-Systems: Monitoring, Modelling and Data Assimilation (TR32), land use data are essential input data. In order to describe exchange processes and matter fluxes in the system soil-vegetation-atmosphere (SVA) on a regional basis, land use data must contain parcel based information on crop distribution as well as on real crop rotations. However, due to the lack of such information, regional (agro-)ecosystem modelling is often based on too generalised land use data and typical crop rotations.

Remote sensing is a time and cost-efficient way, to generate the needed information regarding crops and crop rotations for a regional scale. To support the land use data production or to extract valuable information, existing data sets such as the Authorative Topographic-Cartographic Information System (ATKIS) can be included in the land use analysis by using GIS methods. For this purpose, the Multi-Data Approach (MDA) was adapted and further developed to create enhanced land use data. Through the combination of remote sensing and GIS, information from multiple sources was integrated into one data set with increased information content. This methodological approach was applied for the years 2008-2010 to produce annual disaggregated land use data and a crop rotation map for the Rur catchment. For this, a spatial resolution of 15 m was chosen to differentiate single parcels efficiently.

An essential part of the established MDA is the annual multitemporal analysis of multispectral remote sensing data, such as of Landsat, ASTER or RapidEye. The supervised classification of the remote sensing data was conducted using Support Vector Machines (SVM) and the Maximum Likelihood Classification (MLC). Both methods yielded comparable results. Regarding the classification of the remote sensing data, special effort was spent on the reference data base for training and validation.

For the improved identification of crops, a phenology model of the typical crops in the study area was developed. It connects significant development stages of the crops with their corresponding spectral appearance in remote sensing images from certain periods of the growing season and also predicts a class allocation in the classification. This was used to facilitate the direct classification of crops or to infer the crop type through the combination of multiple classifications in a GIS.

GIS methods were applied to support and enhance the remote sensing data analysis, for example, for the separation of arable land, grassland and other land use categories on the basis of physical block data. On this basis arable land was classified separately. In particular GIS analyses were used to integrate the classification results as well as geometric and thematic information from the ATKIS, the physical blocks and other data. Alternatively, Corine Land Cover (CLC) and OpenStreetMap (OSM) were used for the part of the study area in the

Netherlands and Belgium where the ATKIS and the physical blocks were not available. All incorporated data sets were geometrically aligned in a GIS in the raster data model and converted into a uniform data format (ESRI Grid). For this, data type specific processing routines were elaborated. The integration and inference of land use information incorporating various data sources as well as the crop rotation analysis were conducted by means of knowledge-based production rules.

The remote sensing data used in this study was characterised by a strong spatial and temporal fragmentation, which hampered the data analyses significantly. Nevertheless, the multitemporal annual remote sensing data analyses in combination with the physical block data allowed distinguishing the dominant crops in the study area (winter wheat, winter barley, spring barley, winter rapeseed, sugar beet, potatoes and maize) for the years 2008-2010 with a Kappa around 0.9 constantly. Yet, the distinction between different types of cereal as well as the separation of sugar beets and potatoes remained challenging on occasion with the available remote sensing data. Nonetheless, a more sophisticated crop discrimination was achieved using the multitemporal MDA compared to a monotemporal and solely remote sensing-based analysis.

The three year-based analysis of crop sequences provided expressive results with an accuracy, which corresponds to the annual crop differentiation, especially for the German part of the study area. Additional to typical crop rotations, rather unexpected ones that were in contradiction to general recommendations for planting were identified (e.g. the widespread direct repetition of winter wheat). This emphasises the relevance of this study regarding the modelling of (agro-)ecosystems because these unexpected crop rotations are usually not included into the models.

The validation of the prediction of land use for the year 2011, which was based on the MDA crop rotation map for 2008-2010 revealed limitations. It was concluded that a three-year data set is not sufficient and more years must be considered to capture the varying duration of each crop rotation type.

With regard to the general improvement of land use data by integrating additional information with the MDA, a significant increase of the information content was achieved through the combination of remote sensing data and particularly the ATKIS and the physical block information. Thus, for example different types of settlement-related land use and agricultural and non-agricultural grasslands were differentiated. For the Netherlands and Belgium for which no ATKIS or physical block data were available, the results were significantly behind those of the German part of the study area. This underlined the impact of the integration of appropriate data in the context of the MDA for land use analyses.

## Zusammenfassung

Landnutzungsdaten sind heutzutage für unzählige Fragestellungen von zentraler Bedeutung. Für die regionale (Agrar-)Ökosystemmodellierung, wie sie der Transregio 32: Patterns in Soil-Vegetation-Atmosphere-Systems: Monitoring, Modelling and Data Assimilation (TR32) für das Rureinzugsgebiet durchführt, stellen sie einen essentiellen Eingabedatensatz dar. In diesem Kontext müssen aber sowohl Informationen zu Feldfrüchten als auch zu praktizierten Fruchtfolgen flächendeckend und für einzelne Ackerschläge zur Verfügung stehen, da diese wesentlichen Einfluss auf die auftretenden Austauschprozesse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre haben. Aus Mangel an geeigneten Daten beruhen regionale Agrarökosystemmodellierungen allerdings oftmals auf stark generalisierten Landnutzungsdaten und auf idealtypischen Fruchtfolgen.

Die Fernerkundung bietet die Möglichkeit schlagbezogene Feldfrucht- und Fruchtfolgeninformationen für eine regionale Skala vergleichsweise arbeits- und kosteneffizient anhand multispektraler Fernerkundungsdaten abzuleiten. Zur Unterstützung der Landnutzungsanalysen oder als Quelle für bestimmte Landnutzungsklassen kann zudem mittels Geographischer Informationssysteme (GIS) auf bestehende Datensätze wie dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) zurückgegriffen werden. Der Multidaten-Ansatz (MDA) wurde daher zur Produktion von Landnutzungsdaten mit gesteigertem Informationsgehalt aufgegriffen und weiterentwickelt. Durch die Kombination von Fernerkundungs- und GIS-Verfahrensweisen wurden damit Informationen aus verschiedenen Quellen in einem Landnutzungsdatensatz mit gesteigertem Informationsgehalt integriert. Diese Methodik wurde für die Jahre 2008-2010 angewendet, um jährliche disaggregierte Landnutzungsdaten sowie eine Fruchtfolgenkarte für das Rureinzugsgebiet zu erzeugen. Um Ackerschläge möglichst effizient zu differenzieren wurde eine räumliche Auflösung von 15 m gewählt.

Ein wesentlicher Bestandteil der ausgearbeiteten MDA-Methodik stellte die jährliche multitemporale Analyse von multispektralen Fernerkundungsdaten von Systemen wie Landsat, ASTER oder RapidEye dar. Zur überwachten Klassifikation der Fernerkundungsdaten wurden die Verfahren Support Vector Machines (SVM) und Maximum Likelihood Classification (MLC) eingesetzt, die vergleichbare Ergebnisse erbrachten. Für die Klassifikation der Fernerkundungsdaten wurde viel Wert auf eine ausreichende Referenzdatengrundlage zum Training und zur Validierung gelegt.

Zur verbesserten Feldfruchtunterscheidung umfasste die ausgearbeitete Methodik insbesondere die Berücksichtigung der Phänologie typischer Feldfrüchte im Untersuchungsgebiet. Dazu wurde eine Modellvorstellung entwickelt, welche die Entwicklungsphasen von Feldfrüchten, deren entsprechende spektrale Erscheinung in Fernerkundungsdaten aus bestimmten Zeiträumen der Vegetationsperiode sowie die darauf zurückzuführende Klassen-

zuweisung verknüpft. Dies diente sowohl zur Unterstützung der direkten Klassifikation als auch zur Herleitung nicht direkt bestimmbarer Feldfrüchte durch die Kombination mehrerer Klassifikationen im GIS.

GIS-Verfahrensweisen dienten zur Unterstützung und Erweiterung der Fernerkundungsdatenanalysen, beispielsweise durch die Trennung von Ackerland, Grünland und den übrigen Landnutzungskategorien anhand von Feldblock-Daten. Ackerland wurde auf dieser Grundlage separat klassifiziert. Vor allem aber erfolgte mittels GIS die Integration der Klassifikationsergebnisse sowie zahlreicher geometrischer und thematischer Informationen aus dem ATKIS, den Feldblöcken und weiteren Datensätzen. Für den Teil des Rureinzugsgebiets in den Niederlanden und Belgien wurden ersatzweise die Datenätze Corine Land Cover (CLC) und OpenStreetMap (OSM) eingesetzt. Alle Datensätze wurden im GIS zur Integration und Analyse im Rasterdatenmodell geometrisch angeglichen und in ein einheitliches Datenformat (ESRI-Grid) überführt. Hierzu wurden für jeden Datentyp spezifische Aufbereitungsroutinen ausgearbeitet. Im gewählten Datenformat erfolgte die Integration und Herleitung von Landnutzungsinformationen sowie die Fruchtfolgenanalyse mittels wissensbasierter Produktionsregeln.

Die Fernerkundungsdatengrundlage dieser Studie war durch eine starke räumliche und temporale Fragmentierung gekennzeichnet, was die Analysen deutlich erschwerte und den Arbeitsaufwand stark erhöhte. Dennoch konnten durch die GIS-gestützte jährliche multitemporale Fernerkundungsdatenauswertung in Kombination mit den Feldblock-Daten die dominierenden Feldfrüchte im Untersuchungsgebiet (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps, Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais) weitestgehend gut unterschieden werden. So lag die Gesamtgenauigkeit bei der Feldfruchtunterscheidung für die Jahre 2008-2010 stets im Bereich von Kappa 0,9. Die Unterscheidung verschiedener Getreidearten gelang dabei mit unterschiedlichem Erfolg. Ebenso blieben Unsicherheiten bei der Trennung von Zuckerrüben und Kartoffeln zurück. Dies wurde vor allem auf die Fernerkundungsdatengrundlage zurückgeführt. Dennoch wurde durch den multitemporalen MDA eine deutlich differenziertere Feldfruchtunterscheidung gegenüber einer monotonemporalen und rein fernerkundungsbasierten Analyse erzielt.

Durch die Analyse der dreijährigen Datenbasis wurden vor allem für die deutschen Bereiche des Untersuchungsgebiets flächendeckend Fruchtfolgen bereitgestellt, die in ihrer Güte der jährlichen Feldfruchtunterscheidung entsprechen. Besonders an den Ergebnissen der räumlichen Fruchtfolgenenerfassung lässt sich die Relevanz dieser Studie ablesen. Auch wenn typische Fruchtfolgen identifiziert wurden, gestaltete sich das Spektrum der praktizierten Fruchtfolgen trotzdem sehr heterogen. So wurden beispielsweise zahlreiche Fruchtfolgen erfasst, die allgemeinen Empfehlungen widersprechen (beispielsweise die verbreitete

Selbstfolge von Winterweizen), und somit in Modellierungen auf Basis idealtypischer Fruchtfolgen keine Berücksichtigung finden.

Die Validierung der Prognose der Landnutzung für 2011, die auf der MDA-Fruchtfolgenkarte 2008-2010 beruhte, ergab, dass anhand einer dreijährigen Datengrundlage eine Vorhersage nur bedingt möglich ist. Weitere Jahre müssen daher betrachtet werden, um die unterschiedliche Dauer der einzelnen Fruchtfolgentypen besser zu erfassen.

Hinsichtlich der ganzheitlichen Aufwertung von Landnutzungsdaten mit der entwickelten Verfahrensweise, konnte durch die Kombination von Fernerkundungsergebnissen und vor allem den ATKIS- und Feldblock-Informationen eine deutliche Steigerung des Informationsgehalts erzielt werden. So konnten zahlreiche unterschiedliche Siedlungsnutzungen differenziert und beispielsweise siedlungsbezogene Grünflächen weitestgehend von landwirtschaftlich genutztem Grünland getrennt werden. Für den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets, für den keine ATKIS- oder Feldblock-Daten vorlagen, blieben alle Ergebnisse deutlich hinter denen des deutschen Teils zurück. Dies zeigt welchen Mehrwert die Integration von geeigneten Daten im Rahmen des MDA für eine Landnutzungsanalyse darstellt.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Ziele .....	1
1.2 Rahmenbedingungen und Fragestellungen .....	3
1.3 Umsetzung .....	5
<b>2 Grundlagen zu Landnutzungs- und Landbedeckungsanalysen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Landbedeckung und Landnutzung.....	7
2.2 Verfügbare Landnutzungs- und Landbedeckungsdaten .....	8
2.3 Erzeugung von Landnutzungsinformationen durch Fernerkundung.....	12
2.3.1 Physikalische und technische Grundlagen .....	12
2.3.2 Satellitengestützte Fernerkundungssysteme.....	16
2.3.3 Visuelle Interpretation von Fernerkundungsdaten .....	19
2.3.4 Automatisierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten.....	22
2.3.5 Ablauf des Klassifikationsprozesses einer Landnutzungsanalyse .....	26
2.3.5.1 Datenaufbereitung.....	27
2.3.5.2 Training und Durchführung der überwachten Klassifikation .....	28
2.3.5.3 Validierung von Fernerkundungsklassifikationen .....	29
2.3.5.4 Post-Klassifizierungsverfahren .....	32
2.3.6 Status Quo satellitendatengestützter Landnutzungsanalysen .....	33
2.4 Landnutzungsanalysen mittels Fernerkundung und GIS.....	37
2.4.1 Geographische Informationssysteme .....	37
2.4.1.1 Aufbau und Arbeitsweisen von GIS.....	37
2.4.1.2 Raumbezug.....	40
2.4.1.3 Geoinformationen und Datenmodelle .....	41
2.4.1.4 Datenanalyse im GIS .....	44
2.4.1.5 Aufbereitungsverfahren zur Integration von Raster- und Vektordaten in GIS.....	46
2.4.2 Ansätze zur Integration von GIS und FE in Landnutzungsanalysen .....	47
2.4.2.1 Stratifizierung, Datenfusion und Multidatenklassifikation.....	49
2.4.2.2 Wissensbasierte Ansätze .....	50
2.4.3 Der Multidaten-Ansatz (MDA) .....	53
2.5 Grundlagen zu Fruchtfolgen.....	56
<b>3 Untersuchungsgebiet und Daten</b> .....	<b>61</b>
3.1 Rureinzugsgebiet.....	61

3.1.1	Geologie und Geomorphologie.....	62
3.1.2	Klimatische Bedingungen.....	65
3.1.3	Naturräume, Böden und Landnutzung.....	66
3.2	MDA-Teil FE: Verwendete Fernerkundungsdaten .....	70
3.2.1	Landsat-5.....	70
3.2.2	Landsat-7.....	72
3.2.3	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER).....	73
3.2.4	IRS-P6.....	75
3.2.5	RapidEye.....	77
3.2.6	Digitale Orthophotos .....	78
3.3	MDA-Teil GIS: Vektorbasierte Geobasisdaten und Fachdaten .....	79
3.3.1	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS).....	79
3.3.2	Feldblöcke.....	83
3.3.3	Corine Land Cover (2006).....	84
3.3.4	OpenStreetMap.....	87
3.3.5	Naturräumliche Einheiten in NRW .....	88
3.4	Agrarstatistik .....	89
3.4.1	Agrarstrukturerhebung 2007.....	90
3.4.2	Landwirtschaftszählung 2010.....	90
<b>4</b>	<b>Datenaufbereitung für den Multidaten-Ansatz .....</b>	<b>91</b>
4.1	Arbeitsumgebung: Hardware und Software.....	91
4.2	Anforderungen an Daten zur Integration mit dem Multidaten-Ansatz.....	92
4.2.1	MDA-Datenmodell: Raster .....	92
4.2.2	Koordinatensystem & Projektion.....	93
4.2.3	Räumliche Auflösung.....	95
4.2.4	Georeferenz.....	97
4.2.5	MDA-Referenz-Grid.....	98
4.3	Aufbereitung der Fernerkundungsdaten.....	99
4.3.1	Registrierung der Fernerkundungsdaten.....	100
4.3.2	Landsat-5.....	101
4.3.3	Landsat-7.....	102
4.3.4	ASTER.....	103
4.3.5	IRS-P6.....	104
4.3.6	RapidEye.....	105
4.4	Aufbereitung der vektorbasierten Geodaten.....	107
4.4.1	ATKIS (AAA-Modell) .....	107
4.4.2	Feldblöcke.....	114
4.4.3	Corine Land Cover.....	115
4.4.4	OpenStreetMap.....	116
4.4.5	Naturräumliche Einheiten in NRW .....	117
<b>5</b>	<b>Weiterentwicklung und Anpassung des Multidaten-Ansatzes .....</b>	<b>121</b>
5.1	MDA-Teil FE: Modell zur phänologieabhängigen Planung der Aufnahme von Fernerkundungsdaten .....	123
5.2	MDA-Teil FE: Erzeugung der Referenzdatengrundlage .....	128
5.2.1	Referenzdatenaufnahme durch Geländekartierungen .....	129
5.2.1.1	Gestalt von Kartierungsflächen .....	130
5.2.1.2	Kartierungsgebiete .....	130

5.2.1.3	Geländekartierungskampagnen.....	132
5.2.2	Geländedatenaufnahme und Referenzflächenmanagement .....	133
5.2.3	Referenzflächenbestimmung durch visuelle Luftbildinterpretation .....	135
5.3	MDA-Teil FE: Auswahl des Klassifikationsverfahrens .....	135
5.3.1	Maximum Likelihood Klassifikation (MLC).....	137
5.3.2	Support Vector Machines (SVM).....	139
5.4	MDA-Teil FE: Übergeordnete Klassifikationsmethodik.....	141
5.5	MDA-Teil FE: Untergeordnete Klassifikationsmethodik .....	144
5.5.1	Auswahl der Trainingsgebiete.....	145
5.5.2	Klassifikation der Fernerkundungsdaten .....	149
5.5.3	Validierung der Klassifikationsergebnisse.....	150
5.5.4	Post-Klassifizierungsverfahren .....	152
5.5.4.1	Umklassifizierung .....	152
5.5.4.2	Post-Klassifizierungsglättung.....	152
5.6	MDA-Teil GIS: MDA-Methodik im Rasterdatenmodell.....	153
5.6.1	ESRI-Grid-Datenformat .....	154
5.6.2	Aufbau des MDA-Grids.....	156
5.6.3	Aufbau und Funktion der MDA-Produktionsregeln.....	158
5.7	MDA-Teil GIS: Feldfruchtableitung und Erzeugung der Basislandnutzung .....	159
<b>6</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>163</b>
6.1	Verwendung der Klassifikationsmethoden MLC & SVM.....	163
6.2	Ergebnisse der MDA-Fernerkundungsanalyse 2008.....	167
6.2.1	Fernerkundungsdatenabdeckung 2008.....	167
6.2.2	Ausgewählte Klassifikationen 2008.....	169
6.2.3	Produktion der fernerkundungsbasierten MDA-Landnutzungs-Basis-Karte 2008.....	174
6.2.4	Evaluierung fernerkundungsbasierter MDA-Landnutzungsklassen für Ackerland 2008.....	178
6.3	Ergebnis der MDA-Fernerkundungsanalyse 2009.....	179
6.3.1	Fernerkundungsdatenabdeckung 2009.....	180
6.3.2	Ausgewählte Klassifikationen 2009.....	182
6.3.3	Produktion der fernerkundungsbasierten MDA-Landnutzungs-Basis-Karte 2009.....	189
6.3.4	Evaluierung fernerkundungsbasierter MDA-Landnutzungsklassen für Ackerland 2009.....	193
6.4	Ergebnisse der MDA-Fernerkundungsanalyse 2010.....	194
6.4.1	Fernerkundungsdatenabdeckung 2010.....	194
6.4.2	Ausgewählte Klassifikationen 2010.....	197
6.4.3	Produktion der fernerkundungsbasierten MDA-Landnutzungs-Basis-Karte 2010.....	203
6.4.4	Evaluierung fernerkundungsbasierter MDA-Landnutzungsklassen für Ackerland 2010.....	207
6.5	Erzeugung der MDA-Landnutzungsklassifikationen .....	208
6.5.1	Integration von Feldblock-Informationen.....	211
6.5.2	Integration von ATKIS-Informationen .....	211
6.5.2.1	Integration der Objektarten der ATKIS-Raster-Grundebene.....	213
6.5.2.2	Integration der Objektarten der mittleren ATKIS-Raster-Ebene.....	218
6.5.2.3	Integration der Objektarten der obersten ATKIS-Raster-Ebene .....	220
6.5.3	Integration von Landnutzungsinformationen für den niederländisch-belgischen Teil.....	220
6.5.3.1	Integration von Corine Land Cover-Information.....	221
6.5.3.2	Integration von OpenStreetMap-Daten zum Wegenetz .....	224
6.6	Legende der MDA-Landnutzungsklassifikationen .....	224
6.7	MDA-Fruchtfolgenanalyse 2008-2010 .....	227

---

6.7.1	Analyse der Fruchtfolgenkartierung.....	227
6.7.2	Fruchtfolgenkarte für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets.....	231
6.7.3	Fruchtfolgenkarte für den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets.....	236
6.8	Prognose der Ackerlandnutzung für 2011.....	239
<b>7</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>241</b>
7.1	MDA-Fernerkundungsanalyse und multitemporale Feldfruchtableitung.....	241
7.1.1	Verfügbarkeit und Qualität der eingesetzten Fernerkundungsdaten .....	241
7.1.2	MDA-Fernerkundungsanalyse und multitemporale Feldfruchtableitung .....	243
7.2	Vergleich von MDA-Ergebnissen und anderen Landnutzungsdaten .....	253
7.2.1	Gegenüberstellung mit einer anderen Landnutzungsanalyse des Rureinzugsgebiets .....	253
7.2.2	Vergleich der MDA-Landnutzungsklassifikation 2010 mit der Landwirtschaftszählung 2010..	255
7.3	MDA-Fruchtfolgenanalyse und Prognose.....	260
7.3.1	Fruchtfolgenanalyse für den niederländisch-belgischen Teil .....	260
7.3.2	Fruchtfolgenanalyse und Landnutzungsprognose für den deutschen Teil .....	261
7.4	MDA-Methodik zur Integration von Fernerkundungs- und weiteren Geodaten ....	264
7.4.1	Allgemeine MDA-Umsetzung.....	264
7.4.2	Verwendung der Geobasisdaten und Fachdaten.....	266
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>273</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>279</b>
	<b>A Fehlermatrizen .....</b>	<b>295</b>
	<b>B Ergebniskarten .....</b>	<b>325</b>
	<b>C MDA-Landnutzungsklassifikation 2011.....</b>	<b>331</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>333</b>
	<b>Erklärung .....</b>	<b>334</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Die elektromagnetische Welle.....	12
Abbildung 2.2: Das elektromagnetische Spektrum.....	13
Abbildung 2.3: Reflektionseigenschaften gängiger Materialien der Erdoberfläche.....	15
Abbildung 2.4: Anordnung einzelner Objektklassen im multispektralen Merkmalsraum .....	23
Abbildung 2.5: Typischer Ablauf einer überwachten Landnutzungs-klassifikation. ....	26
Abbildung 2.6: Aufbau eines Geo-Informationssystems .....	39
Abbildung 2.7: Darstellung der realen Welt (a) im Raster- (b) und Vektordatenmodell (c) .....	42
Abbildung 2.8: Organisation von Raster- und Vektordatensätzen im GIS.....	44
Abbildung 2.9: Level der technischen Integration von Geographischen Informationssystemen und Fernerkundungssystemen .....	48
Abbildung 2.10: Wesentliche Komponenten eines wissensbasierten Systems .....	51
Abbildung 2.11: Workflow des Multidaten-Ansatzes (MDA).....	54
Abbildung 3.1: Das Untersuchungsgebiet.....	62
Abbildung 3.2: Klimadiagramme von Jülich und Kall-Sistig.....	65
Abbildung 3.3: Naturräumliche Haupteinheiten in Nordrhein-Westfalen und Corine Land Cover 2006 .....	67
Abbildung 3.4: Verteilung der ASTER-Kanäle über das elektromagnetische Spektrum.....	74
Abbildung 3.5: Wesentliche Objektarten, Attribute und Werte des ATKIS-Basis-DLM.....	80
Abbildung 3.6: Darstellung des AAA-ATKIS mit Originalsymbolisierung.....	82
Abbildung 3.7: Darstellung der Feldblöcke 2008 für ein Gebiet nördlich von Nideggen. ....	83
Abbildung 3.8: Darstellung der CLC 2006-Daten für ein Gebiet südöstlich von Roermond...	86
Abbildung 3.9: Darstellung der verwendeten OSM-Daten .....	87
Abbildung 4.1: Aufbereitungsablauf der Landsat-TM-Szenen.....	101
Abbildung 4.2: Aufbereitungsablauf der Landsat-ETM+-Szenen.....	102
Abbildung 4.3: Ausschnitt einer im SLC-off-Modus aufgezeichneten Landsat-7-Szene .....	103
Abbildung 4.4: Aufbereitungsablauf der ASTER-Szenen.....	104
Abbildung 4.5: Aufbereitungsablauf der IRS-P6-Szenen.....	105
Abbildung 4.6: Aufbereitungsablauf der ASTER-Szenen.....	106
Abbildung 4.7: Aufbereitungsablauf der ATKIS-Daten. ....	107
Abbildung 4.8: Ausschnitt der ATKIS-Raster-Grundebene .....	110
Abbildung 4.9: Ins Rasterdatenmodell konvertierte Objektarten der oberen und mittleren ATKIS-Raster-Ebene .....	112
Abbildung 4.10: Aufbereitungsablauf der jährlichen Feldblock-Daten. ....	114
Abbildung 4.11: Darstellung der gerasterten Feldblöcke für 2008.....	115
Abbildung 4.12: Aufbereitungsablauf der Corine Land Cover 2006-Daten. ....	116
Abbildung 4.13: Aufbereitungsablauf der OpenStreetMap-Daten.....	117
Abbildung 4.14: Aufbereitungsablauf der Erzeugung des NR-Regionen-Layers.....	117
Abbildung 4.15: Gliederung des Untersuchungsgebiets in NR-Regionen .....	118

Abbildung 5.1: Grundlegendes Ablaufschema des angepassten Multidaten-Ansatzes.....	122
Abbildung 5.2: Modell zur Phänologie ausgewählter Feldfrüchte im Untersuchungsgebiet ..	124
Abbildung 5.3: Kartierungsflächen zur Erzeugung der Referenzflächenbasis für Ackerland	131
Abbildung 5.4: Aus Geländekartierung und Nachbearbeitung erzeugte Referenzflächen.....	134
Abbildung 5.5: Beispiele normalverteilter Wahrscheinlichkeitsfunktionen.....	138
Abbildung 5.6: Grundlegende Aspekte der Klassifikation mit SVM.....	139
Abbildung 5.7: Übergeordnetes Ablaufschema der MDA-Fernerkundungsanalysen.....	142
Abbildung 5.8: Beispiel der jährlichen Ackerland-Maske auf Basis der Acker-Feldblöcke.....	143
Abbildung 5.9: Schematischer Ablauf der „untergeordneten“ Klassifikationsmethodik .....	145
Abbildung 5.10: Gestalt der Trainingsflächen für Ackerland.....	147
Abbildung 5.11: Trainingsgebiete für unterschiedliche Erscheinungen von Grünland.....	148
Abbildung 5.12: Beispiele für Validierungsflächen.....	151
Abbildung 5.13: Auswirkung der Post-Klassifikationsfilterung .....	153
Abbildung 5.14: Schematischer Aufbau des value attribute table eines ESRI-Grids.....	154
Abbildung 6.1: SVM- und MLC-ALL-Klassifikationsergebnis einer ASTER-Szene.....	165
Abbildung 6.2: SVM- und MLC-FB-Klassifikationsergebnis einer ASTER-Szene.....	165
Abbildung 6.3: Fernerkundungsdatenabdeckung der MDA-Landnutzungsanalyse 2008.....	168
Abbildung 6.4: ALL-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2008 .....	171
Abbildung 6.5: FB-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2008 .....	172
Abbildung 6.6: Analysebereiche der MDA-Landnutzungsanalyse 2008 .....	175
Abbildung 6.7: Ausschnitt der MDA-Landnutzungsanalyse 2008 .....	177
Abbildung 6.8: Fernerkundungsdatenabdeckung der MDA-Landnutzungsanalyse 2009.....	181
Abbildung 6.9: ALL-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2009 .....	184
Abbildung 6.10: FB-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2009 .....	186
Abbildung 6.11: Ausschnitt der MDA-Landnutzungsanalyse 2009 .....	192
Abbildung 6.12: Fernerkundungsdatenabdeckung der MDA-Landnutzungsanalyse 2010.....	195
Abbildung 6.13: ALL-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2010 .....	198
Abbildung 6.14: FB-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2010 .....	199
Abbildung 6.15: Ausschnitt der MDA-Landnutzungsanalyse 2010 .....	206
Abbildung 6.16: Ableitung der MDA-Landnutzungsanalyse innerhalb von Siedlungen.....	212
Abbildung 6.17: Durch die Geländekartierungen 2008-2010 ermittelte Fruchtfolgen.....	228
Abbildung 6.18: Ausschnitt der Fruchtfolgenkarte 2008-2010 des deutschen Teils.....	232
Abbildung 6.19: Ausschnitt der Fruchtfolgenkarte 2008-2010 des niederländisch- belgischen Teils.....	237
Abbildung 7.1: Trennung von Winterfrucht- und Sommerfrucht-Flächen.....	249
Abbildung 7.2: Vergleich der MDA-Landnutzungsanalyse 2010 mit der Landwirtschaftszählung 2010 .....	256
Abbildung 7.3: Ackerfläche der MDA-Landnutzungsanalyse 2010 (MDA-LU10) im Vergleich zur Landwirtschaftszählung 2010 (LZ10).....	257

---

Abbildung 7.4: Vergleich der Flächenanteile ausgewählter Feldfrüchte und von Ackerland in der MDA-Landnutzungsclassifikation 2010 und in der Landwirtschaftszählung 2010 .....	259
Abbildung 7.5: Vergleich der MDA-Landnutzungsclassifikationen 2008 und 2010 .....	269
Abbildung B.1: MDA-Landnutzungsclassifikation 2008. ....	326
Abbildung B.2: MDA-Landnutzungsclassifikation 2009. ....	327
Abbildung B.3: MDA-Landnutzungsclassifikation 2010. ....	328
Abbildung B.4: MDA-Fruchtfolgenkarte 2008-2010 mit der Legende des deutschen Teils. ..	329
Abbildung B.5: MDA-Fruchtfolgenkarte 2008-2010 mit der Legende des niederländisch- belgischen Teils. ....	330
Abbildung C.1: MDA-Landnutzungsclassifikation 2011 (LUSSEM & WALDHOFF 2013). ....	332





## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Die Eigenschaften der Landsat-TM-Bänder.....	17
Tabelle 2.2: Gängige satellitengestützte Fernerkundungssysteme .....	18
Tabelle 2.3: Das Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikationssystem des USGS zur Nutzung mit Fernerkundungsdaten nach ANDERSON et al. (1976). .....	21
Tabelle 2.4: Empfohlene Fernerkundungsdatengrundlage zur Landnutzungserfassung anhand des USGS-Klassifikationsschemas .....	22
Tabelle 2.5: Aufbau einer Error Matrix (EM).....	30
Tabelle 2.6: Grundrissbeispiele für den Aufbau von Fruchtfolgen aus Fruchtfolgepaaren.....	58
Tabelle 2.7: Bewertung unterschiedlicher Fruchtartenkombinationen .....	59
Tabelle 3.1: Eigenschaften von Landsat-5 und dem TM-Sensor.....	71
Tabelle 3.2: Eigenschaften von Landsat-7 und dem ETM+-Sensor.....	72
Tabelle 3.3: ASTER-Orbitparameter und Eigenschaften des VNIR-Sensors .....	74
Tabelle 3.4: Eigenschaften der IRS-P6-Mission und des LISS-III-Sensors .....	76
Tabelle 3.5: Eigenschaften des RapidEye-Systems .....	77
Tabelle 3.6: Eigenschaften digitaler Orthophotos .....	78
Tabelle 3.7: CLC-Nomenklatur in Deutsch (KEIL et al. 2010), verändert. ....	85
Tabelle 4.1: In der ATKIS-Raster-Grundebene zusammengefasste flächenhafte Objektarten .....	108
Tabelle 4.2: In der mittleren ATKIS-Raster-Ebene zusammengefasste Objektarten.....	111
Tabelle 4.3: Zur MDA-Analyse ausgewählte linienhafte Objektarten des Verkehrsnetzes .....	113
Tabelle 5.1: Jährlich geplante Aufnahmezeitfenster für multispektrale Fernerkundungsdaten.....	126
Tabelle 5.2: JM-Distanzen und TD-Werte für Winterweizen im Vergleich zu Wintergerste und Subklassen von Grünland .....	148
Tabelle 5.3: JM-Distanzen und TD-Werte für Grünland 1 im Vergleich zu Wintergerste und weiteren Subklassen von Grünland .....	149
Tabelle 5.4: Typische Layer-Zusammensetzung des MDA-Grids für die jährliche Landnutzungsanalyse.....	157
Tabelle 5.5: Analyseablauf und Grundlage zur Bildung von Produktionsregeln zur Ableitung der jährlichen Landnutzung auf Ackerflächen. ....	161
Tabelle 6.1: Overall Accuracy und Kappa-Koeffizient für die SVM- und MLC-ALL- Klassifikationen der Fernerkundungsdaten für 2008.....	164
Tabelle 6.2: Overall Accuracy und Kappa-Koeffizient für die SVM- und MLC-FB- Klassifikationen der Fernerkundungsdaten für 2008.....	164
Tabelle 6.3: Fernerkundungsdaten der MDA-Landnutzungsanalyse des Jahres 2008.....	167
Tabelle 6.4: Für die MDA-Analyse 2008 ausgewählte Klassifikationen. ....	169
Tabelle 6.5: Error Matrix für vornehmlich fernerkundungsbasierte Landnutzungsklassen der MDA-Landnutzungsanalyse 2008.....	179
Tabelle 6.6: Fernerkundungsdaten der MDA-Landnutzungsanalyse des Jahres 2009.....	180

Tabelle 6.7: Für die MDA-Analyse 2009 ausgewählte Klassifikationen.....	183
Tabelle 6.8: Error Matrix für vornehmlich fernerkundungsbasierte Landnutzungsklassen der MDA-Landnutzungsanalyse 2009.....	193
Tabelle 6.9: Fernerkundungsdaten der MDA-Landnutzungsanalyse des Jahres 2010.....	194
Tabelle 6.10: Für die MDA-Analyse 2010 ausgewählte Klassifikationen.....	197
Tabelle 6.11: Error Matrix für vornehmlich fernerkundungsbasierte Landnutzungsklassen der MDA-Landnutzungskarte 2010.....	208
Tabelle 6.12: Abgrenzung grundlegender Landnutzungskategorien.....	210
Tabelle 6.13: Grundlage zur Kombination von LU-Informationen der ATKIS-Raster- Grundebene und fernerkundungsbasierten LU-Informationen (FE-Basis) ...	214
Tabelle 6.14: Grundlage zur Kombination von LU-Informationen der mittleren ATKIS- Raster-Ebene und fernerkundungsbasierten LU-Informationen (FE-Basis) .	219
Tabelle 6.15: Aus dem ATKIS-Verkehrsnetz abgeleitete MDA-Landnutzungsklassen .....	220
Tabelle 6.16: Grundlage zur Korrektur der fernerkundungsbasierten LU-Informationen (FE-Basis) für den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets anhand von ausgewählten CLC-Klassen.....	221
Tabelle 6.17: Legende der MDA-Landnutzungs-klassifikationen .....	225
Tabelle 6.18: Rangfolge der 37 häufigsten und mindestens dreimal kartierten Fruchtfolgen.	230
Tabelle 6.19: Auf Basis der jährlichen MDA-Landnutzungs-klassifikationen identifizierte Fruchtfolgen für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets .....	234
Tabelle 6.20: Für den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets identifizierte Fruchtfolgen.....	238
Tabelle 6.21: Error Matrix bezüglich der Übereinstimmung der simulierten und der klassifizierten Landnutzung auf Ackerland für das Jahr 2011 für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets. ....	240
Tabelle 7.1: Für die MDA-Landnutzungsanalysen ermittelte Flächenanteile verschiedener Klassen im Vergleich zur Landnutzungs-klassifikation 2001 des Rureinzugsgebiets von MONTZKA (2007).....	254
Tabelle A.1: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet. ....	295
Tabelle A.2: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	296
Tabelle A.3: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet. ....	297
Tabelle A.4: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	297
Tabelle A.5: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet. ....	298

Tabelle A.6: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	299
Tabelle A.7: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	300
Tabelle A.8: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	300
Tabelle A.9: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-7-Szene vom 15.07.2008 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	301
Tabelle A.10: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-7-Szene vom 15.07.2008 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	301
Tabelle A.11: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	302
Tabelle A.12: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	303
Tabelle A.13: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	304
Tabelle A.14: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	304
Tabelle A.15: Error Matrix des ALL1-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	305
Tabelle A.16: Error Matrix des ALL2-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	306
Tabelle A.17: Error Matrix des FB1-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	307
Tabelle A.18: Error Matrix des FB2-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	307
Tabelle A.19: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	307
Tabelle A.20: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 27.07.2009 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	308
Tabelle A.21: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 27.09.2009 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	309
Tabelle A.22: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 15.08.2009 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	310
Tabelle A.23: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 15.08.2009 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	311
Tabelle A.24: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 31.08. 2009 (ZS5). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	311

Tabelle A.25: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 08.09.2009 (ZS6). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet. ....	312
Tabelle A.26: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 08.09.2009 (ZS6). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet. ....	313
Tabelle A.27: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der OST-Szene vom 23.05.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	314
Tabelle A.28: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der OST-Szene vom 23.05.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	315
Tabelle A.29: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der WEST-Szene vom 20.05.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	316
Tabelle A.30: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der WEST-Szene vom 20.05.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	317
Tabelle A.31: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der HAUPT-Szene vom 07.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	318
Tabelle A.32: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der HAUPT-RapidEye-Szene vom 07.07.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	319
Tabelle A.33: Error Matrix des ALL1-Klassifikationsergebnisses der NW-RapidEye-Szene vom 08.-10.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	320
Tabelle A.34: Error Matrix des ALL2-Klassifikationsergebnisses der NW-RapidEye-Szene vom 08.-10.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.....	321
Tabelle A.35: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der NW-RapidEye-Szene vom 08.-10.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.....	322
Tabelle A.36: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 14.08.2010 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	323
Tabelle A.37: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 14.08.2010 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet. ....	324
Tabelle C.1: Error Matrix der MDA-Landnutzungsklassifikation 2011 (LUSSEM & WALDHOFF 2013).....	331

## Abkürzungsverzeichnis

AAA	ALFIS, ALKIS, ATKIS
AF	Aufnahmefenster
ALB	Automatisiertes Liegenschaftsbuch
ALI	Advanced Land Imager
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ANN	Artificial Neural Networks
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVNIR-2	Advanced Visible and Near Infrared Radiometer 2
AWiFS	Advanced Wide Field Sensor
B	unbedeckter Boden
BBCH-Skala	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie-Skala
BSQ	Band Sequential
CAD	Computer Aided Design
C-CAP	Coastal Change Analysis Program
CCD	Charge Coupled Devices
CE	Commission Error
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
CGIS	Canada Geographic Information System
CITARS	Crop Identification Technology Assessment for Remote Sensing
CLC	CORINE Land Cover
CORINE	Co-ordination of Information on the Environment
CPU	Central Processing Unit
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DHDN/GK	Deutsches Hauptdreiecksnetz/Gauß-Krüger
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DLM-DE	Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DN	Digital Numbers
DNDC	Denitrification–Decomposition
DOP	Digitale Orthophotos
DT	Decision Tree
EEA	European Environment Agency
EEA	European Environment Agency
EGFL	Europäischen Garantiefonds für die Landwirtschaft
EM	Error Matrix (Fehlermatrix)
ENVI	Environment for Visualizing Images
EO-1	Earth Observing 1
ERS-1	European Remote Sensing Satellite 1
ERTS-1	Earth Resources Technology Satellite 1
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EU	Europäischen Union
FB	Feldblöcke
FE	Fernerkundung

FIS	Fachinformationssysteme
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GCP	Ground Control Points
gfP	gute fachliche Praxis
GIS	Geographische Informationssysteme
GL	Grünland
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GNSS	Globale Satellitennavigationssysteme
GSD	Ground Sampling Distance
GT	Wintergetreide
HDF	Hierarchical Data Format
IACS	Integrated Administration and Control System
IFOV	Instantaneous Field of View
IGIS	Integrated Geographic Information System
InVeKoS	Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems
IRS	Indian Remote Sensing
IRS-LISS-III	Linear Imaging Self-Scanning Sensor-III
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis
IT.NRW	Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen
JM	Jeffries-Matusita Distance
KI	Künstliche Intelligenz
KT	Kartoffeln
LACIE	Large Area Crop Inventory Experiment
LAI	Leaf Area Index
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LC	Land Cover (Landbedeckung)
LDCM	Landsat Data Continuity Mission
Lidar	Light Detection And Ranging
LIS	Landinformationssysteme
LPIS	Land Parcel Information System
LU	Land Use (Landnutzung)
LWK NRW	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
LW	Laubwald
LZ10	Landwirtschaftszählung 2010
M	Mais
MDA	Multidaten-Ansatz
MDA-LU10	MDA-Landnutzungsklassifikation 2010
MDA-RG	MDA-Referenz-Grid
MEKA	Multiple Extended Kalman Algorithm
MLC	Maximum Likelihood Classification
MMU	Minimum Mapping Unit
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multispectral Scanner
NAVSTAR GPS	Navigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System
NCGIA	National Center For Geographic Information and Analysis
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index
NHE	Naturräumliche Haupteinheiten
NLCD	National Land Cover Database
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

---

NR-Region	Naturraum-Region
NRW	Nordrhein-Westfalen
NTv2	National Transformation Version 2
NW	Nadelwald
OA	Overall Accuracy
OE	Omission Error
OSH	Optimal Separierende Hyperebene
OSM	Open Street Map
PA	Producer's Accuracy
Radar	Radio Detection and Ranging
RMSE	Root Mean Square Error
RO	Winterroggen
ROI	Region of Interest
RPC	Rational Polynomial Coefficients
SAR	Synthetic Aperture Radar
SF	Sommerfrucht
SG	Sommergerste
SMA	Spectral Mixture Analysis
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SQL	Standard Query Language
SVA	Soil-Vegetation-Atmosphere
SVM	Support Vector Machines
SWIR	Shortwave-Infrared
TD	Transformed Divergence
TIR	Thermal Infrared
TM	Thematic Mapper
TR32	Transregio 32
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UA	User's Accuracy
UIS	Umweltinformationssysteme
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator-Projektion
VAT	Value Attribute Table
VNIR	Visible-to-Near Infrared
WF	Winterfrucht
WG	Wintergerste
WMS	Web Map Services
WR	Winterraps
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrüben
ZS	Zeitschnitt





## Vorwort

Die vorliegende Arbeit behandelt vornehmlich Arbeitsweisen der Fernerkundung (FE) und Geographischer Informationssysteme (GIS). Die Fachsprachen dieser beiden Disziplinen zeichnen sich durch eine sehr starke angelsächsische Prägung aus. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit in der Regel die englischsprachigen Fachbegriffe verwendet, auch wenn in Einzelfällen deutsche Begriffe vorhanden sind. Zudem werden für viele Fachbegriffe oder Bezeichnungen die englischsprachigen Abkürzungen verwendet, da diese in den beiden Disziplinen allgemein akzeptiert und in dieser Hinsicht die Lesbarkeit erleichtern. Die Abkürzungen repräsentieren dabei sowohl die Einzahl als auch die Mehrzahl. Die zumeist englischen Fachbegriffe oder Abkürzungen werden bei der ersten Nennung erläutert und dann im weiteren Text *kursiv* geschrieben und wie deutschsprachige Begriffe behandelt. Hinsichtlich der später genauer erläuterten Begriffe Landnutzung (*land use*) und Landbedeckung (*land cover*) werden daher auch die im englischen Sprachraum gebräuchlichen Abkürzungen LU beziehungsweise LC verwendet.

Neben der Bezeichnung Acker gibt es für entsprechende Flächen je nach Größe oder Beschaffenheit, zahlreiche weitere Bezeichnungen wie Feld, Parzelle, Feldblock oder Schlag, die je nach Kontext zum Teil unterschiedlich definiert sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden mit den Begriffen Feld, Parzelle und Schlag stets einzelne Bereiche der Ackerfläche verstanden, die mit nur einer Feldfrucht bestellt sind. Mit einem Acker wird hingegen ein zusammenhängender Flächenbereich, mit gegebenenfalls mehreren Nutzungen, oder auch unbedeckter Ackerboden verbunden. Die Ackerfläche oder das Ackerland umfassen demgegenüber sämtliche Äcker (eines definierten Gebiets). Feldblock ist hingegen eine feste Definition für einen Bereich von gewöhnlich mehreren aneinander angrenzenden Feldern (mit unter Umständen mehreren unterschiedlichen Ackernutzungen), die von festen Grenzen wie Wegen, Baureihen, Wälder, Böschungen etc. umschlossen sind.



# 1 Einleitung

Räumliche Landnutzungsdaten dienen zur Herausstellung unterschiedlicher Eigenschaften oder Funktionen der Erdoberfläche. Die allgemein verfügbaren Landnutzungsinformationen sind zur Behandlung bestimmter Problemstellungen allerdings nicht ausreichend. Hier stellt die Fernerkundung (FE) eine vergleichsweise arbeits- und kosteneffiziente Möglichkeit dar, die benötigten Informationen für unterschiedlich große Gebiete oder unterschiedliche Maßstabsebenen zu erzeugen, da nicht mit dem untersuchten Phänomen, Objekt oder Bereich in Kontakt getreten werden muss (LILLESAND et al. 2008). Durch die Verwendung von Geographischen Informationssystemen (GIS) lassen sich zudem Informationen unterschiedlicher Quellen miteinander verknüpfen, um durch deren räumliche Verschneidung neue Informationen abzuleiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Multidaten-Ansatz (MDA), der Fernerkundungs- und GIS-Verfahrensweisen kombiniert, weiterentwickelt und angewendet, um mehrjährige disaggregierte Landnutzungsdaten des Rureinzugsgebiets zu erzeugen. Diese enthalten bezüglich landwirtschaftlicher Nutzfläche insbesondere räumliche Informationen zum Auftreten von Feldfrüchten und Fruchtfolgen.

## 1.1 Hintergrund und Ziele

Der Sonderforschungsbereich/Transregio 32: Patterns in Soil-Vegetation-Atmosphere-Systems: Monitoring, Modelling and Data Assimilation (TR32) befasst sich am Beispiel des Rureinzugsgebiets mit den nicht-linearen Energie- und Stoffaustauschprozessen, insbesondere in Form von Wasser und CO<sub>2</sub>, zwischen den Sphären Boden, Vegetation und Atmosphäre. Die übergeordnete Forschungsfrage des TR32 ist die Charakterisierung der Strukturen und Muster dieser Prozesse auf verschiedenen Skalenniveaus, um ein qualitativ und quantitativ besseres Verständnis des Systems Boden-Vegetation-Atmosphäre (SVA) zu erzielen (TR32 2010). Die regionale (Agrar-)Ökosystemmodellierung nimmt dabei einen großen Stellenwert ein. Dazu werden üblicherweise hochkomplexe Modelle eingesetzt, die sehr detaillierte Eingabedaten wie meteorologische Daten, hydrologische Daten, Bodendaten oder pflanzen-spezifische Parameter benötigen, um die einzelnen Prozesse zu erfassen (vgl. GRANT (2001), LENZ-WIEDEMANN et al. (2010)). Um Modellierungen für Regionen durchführen zu können, sind daher auch entsprechende detaillierte Landnutzungsdaten von hoher Qualität notwendig, die die Zusammensetzung der Erdoberfläche durch die unterschiedlichen Landnutzungen räumlich darstellen (BARETH 2009). Zur Agrarökosystemmodellierung ist in dieser Hinsicht besonders die Unterscheidung der angebauten Feldfrüchte notwendig, da diese und das mit

ihnen verbundene Management (zum Beispiel Saattermine, Düngung, Applikation von Pflanzenschutz und Bodenbearbeitung) maßgeblichen Einfluss auf die Austauschprozesse haben. Da sich der Anbau von Feldfrüchten auf den Ackerflächen jährlich ändert, müssen entsprechende Daten auf jährlicher Basis vorliegen. Zudem ist das Management der Feldfrüchte, und damit der Einfluss auf Austauschprozesse, maßgeblich von der Abfolge der unterschiedlichen Feldfrüchte abhängig (WILSON & AL-KAISI 2008). Aus diesem Grund benötigt beispielsweise das auf regionaler bis nationaler Ebene eingesetzte prozessbasierte Agrarökosystemmodell DNDC (Denitrification–Decomposition) zur Prognose verschiedener C- und N-Emissionen auf Ackerböden die Angabe der Fruchtfolge, an die dann weitere Managementdaten (wie Saattermine, Bodenbearbeitungsmaßnahmen oder die Düngung) geknüpft werden können (BEHEYDT et al. 2007, GILTRAP et al. 2010).

Offiziell verfügbare Datensätze wie Corine Land Cover (CLC) stellen die benötigten Informationen jedoch nicht bereit. Selbst das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) für Deutschland enthält zwar thematisch sehr detaillierte und geometrisch präzise Landnutzungsinformationen. Die vor allem zur Agrarökosystemmodellierung wichtigen Informationen zur landwirtschaftlichen Nutzfläche sind aber in diesem Kontext zu aggregiert, da nur eine Unterscheidung von Ackerland, Grünland und Dauer- oder Sonderkulturen stattfindet. Aus Mangel an geeigneten Daten beruhen Agrarökosystemmodellierungen daher oftmals auf stark generalisierten oder auf räumlich sehr eingeschränkten Daten. Da räumliche Fruchtfolgeninformationen in der Regel noch seltener vorliegen, als Daten zur angebauten Feldfrucht, wird zur Modellierung oft auf idealtypische Fruchtfolgen zurückgegriffen. Zahlreiche Studien behandeln die Fortschreibung und Verteilung von idealtypischen Fruchtfolgen in die Fläche (vgl. beispielsweise WECHSUNG et al. (2000), KLÖCKING et al. (2003), CASTELLAZZI et al. (2008), AURBACHER & DABBERT (2011) oder SCHÖNHART et al. (2011)). Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit idealtypische Fruchtfolgen die Realität widerspiegeln, da die Auswahl und Gestaltung von Fruchtfolgen von klimatischen, bodenspezifischen, ökonomischen oder anderen Faktoren abhängt (FREYER 2003, MUNZERT 2006). Die Anwendung von Agrarökosystemmodellen, die auf der Feld- oder Regionalskala eingesetzt werden, ist aus diesem Grund hauptsächlich durch die hohe Unsicherheit der Eingabedaten, im Besonderen bezüglich Boden- und Managementinformationen, charakterisiert (KERSEBAUM et al. 2007). Dies macht den Mangel an räumlichen Informationen zu den angebauten Feldfrüchten und praktizierten Fruchtfolgen und vor allem auch den Bedarf an solchen Informationen deutlich.

Zur Überwindung dieser Unsicherheiten bei der Modellierung auf regionaler Basis, sind daher Landnutzungsdaten mit gesteigertem Informationsgehalt notwendig, die den hochkomplexen Modellen besser entsprechen. Von fundamentaler Bedeutung ist in dieser Hinsicht der Maßstab der Eingabedaten. Für regionale Betrachtungen werden als Kompromiss zwischen Informationsgehalt und Datenmenge und -abdeckung Daten im Maßstabsbereich 1:50.000 bis

1:100.000 als notwendig erachtet (ROHIERSE & BARETH 2004). Damit aber Feldfrüchte hinreichend unterschieden werden können, ist die Differenzierung einzelner Schläge notwendig. Dies macht einen größeren Maßstab von etwa 1:50.000 erforderlich. Zur ganzheitlichen Betrachtung von Austauschprozessen im SVA-System sind neben Ackerland und Grünland auch anderer Landnutzungen zu berücksichtigen, da diese ebenfalls Austauschprozesse verursachen oder andere beeinflussen. Um eine angemessene (Agrar-) Ökosystemmodellierung zu ermöglichen, sind daher flächendeckend, disaggregierte Landnutzungsdaten notwendig, die

- (a) die räumliche Verteilung der dominierenden Feldfrüchte auf Schlagebene darstellen,
- (b) die Verteilung der tatsächlich praktizierten Fruchtfolgen enthalten, damit daran Managementinformationen geknüpft werden können,
- (c) auch andere Landnutzungen möglichst disaggregiert darstellen, um Auslöser von Stoffflüssen nicht landwirtschaftlichen Ursprungs zu berücksichtigen.

Das Ziel dieser Arbeit war die Erstellung von Landnutzungsdaten, die den zuvor formulierten Anforderungen entsprechen. Die Fernerkundung bietet dazu zahlreiche Möglichkeiten und wurde daher als grundlegende Verfahrensweise gewählt. Durch die Integration zusätzlicher Daten und Methoden können die Möglichkeiten mittels GIS allerdings noch deutlich erweitert werden. So stellt beispielsweise das ATKIS zwar keine ausreichenden Informationen bezüglich Ackerland bereit. Es enthält aber zahlreiche Information, die grundsätzlich für eine Landnutzungsanalyse hilfreich sind. Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit der Multidaten-Ansatz (MDA) gewählt, da dieser fernerkundungs- und GIS-Verfahrensweisen in einem methodischen Rahmen kombiniert, der zur Erzeugung von aufgewerteten Landnutzungs-informationen konzipiert wurde (BARETH 2008). Der MDA ist allerdings kein fest vordefiniertes methodisches Schema, sondern ist an die jeweilige Fragestellung anzupassen. Neben der Erzeugung der benötigten Landnutzungsdaten bildete die Auswahl und Weiterentwicklung von Methoden innerhalb des MDA ein weiteres Ziel dieser Arbeit. Da disaggregierte Landnutzungsdaten auf jährlicher Basis benötigt werden, sollte die zu entwickelnde Vorgehensweise zudem reproduzierbar sein, um wiederholt angewendet werden zu können.

## 1.2 Rahmenbedingungen und Fragestellungen

Für die in Kapitel 1.1 formulierten Ziele dieser Arbeit ergaben sich zahlreiche Rahmenbedingungen und Fragestellungen, die hinsichtlich der Datengrundlage, der zu verwendeten Verfahrensweisen sowie in Bezug auf die zu erzielenden Ergebnisse für diese Arbeit zur berücksichtigen waren. In Bezug auf die Erfassung der Landnutzung stehen

heutzutage unzählige Fernerkundungssysteme zur Verfügung. Ebenso kann aus verschiedenen Analyseverfahren gewählt werden. Besonders Feldfrüchte zeichnen sich durch ihre unterschiedliche Phänologie aus, die Einfluss auf deren Erfassung und deren Unterscheidung auf Basis von Fernerkundungsdaten hat. Die Verwendung einer multitemporalen Datengrundlage ist daher grundsätzlich anzustreben (ROHIERSE & BARETH 2004). Hinsichtlich der Fernerkundungsanalysen waren daher folgende Fragestellungen zu behandeln.

- Welche Fernerkundungsdaten eignen sich am besten zur Unterscheidung der dominierenden Feldfrüchte aber auch anderer Landnutzungen im Untersuchungsgebiet?
- Über welche räumliche Auflösung und über welche anderen Eigenschaften müssen Fernerkundungsdaten verfügen damit Feldfrüchte auf Schlagebene unterschieden werden können?
- Wie viele Aufnahmen, und zu welchen Zeitpunkten während der Vegetationsperiode, sind notwendig, um die dominierenden Feldfrüchte optimal zu erfassen?
- Mit welchen Analyseverfahren lassen sich die unterschiedlichen Landnutzungen effizient unterscheiden?
- Welche Daten oder weitere Verfahrensweisen lassen sich zur Unterstützung der Fernerkundungsanalyse integrieren?

Der MDA ermöglicht die Integration vielzähliger Informationen zur Steigerung des Informationsgehalts von Landnutzungsdaten mittels GIS. Mit dem ATKIS steht diesbezüglich eine reichhaltige Quelle für entsprechende Informationen zur Verfügung. Bezüglich der Einbeziehung von zusätzlichen Informationen wird den folgenden Fragen nachgegangen:

- Welche der Informationen können aus dem ATKIS für diese Studie hilfreich sein?
- Welche weiteren Datensätze sind verfügbar, die nützliche Informationen enthalten?
- Welche Methoden eignen sich besonders, um zusätzliche Informationen in die Landnutzungsanalyse zu integrieren?

Neben der Produktion von Landnutzungsdaten diene diese Studie daher auch der Auslotung von Möglichkeiten und Grenzen der Methodik. Zur Erfassung von Fruchtfolgen im Rureinzugsgebiet wurde die Studie für den Zeitraum von drei Jahren (2008-2010) ausgelegt. Hinsichtlich der eigentlichen Ergebnisse der Landnutzungs- und Fruchtfolgenanalyse ergaben sich folgende Fragen:

- Wie stellt sich die Verteilung der Feldfrüchte dar?
- Sind jährliche Unterschiede in der Landnutzung zu erkennen?
- Welche Fruchtfolgen werden im Untersuchungsgebiet praktiziert?

- Können anhand der identifizierten Fruchtfolgen Landnutzungsprognosen durchgeführt werden?
- In welchem Umfang wird die Qualität der Landnutzungsdaten des Rureinzugsgebiets durch die Integration der verschiedenen Informationen verbessert?

### 1.3 Umsetzung

Für diese Studie wurden einerseits methodische Ziele formuliert. Andererseits diente sie auch der Erzeugung und Analyse von Ergebnisdatensätzen für die Jahre 2008-2010. Zur Bearbeitung der Fragestellungen wurde daher die folgende Vorgehensweise und Gliederung gewählt:

Kapitel 2 gibt zunächst eine Einführung in die einzelnen Themenkomplexe einer Landnutzungsanalyse und legt die Basis für die Datenauswahl, Methodenauswahl und Methodenentwicklung zur anschließenden Erzeugung disaggregierter mehrjähriger Landnutzungsdaten. Begonnen wird mit einem kurzen Überblick über bereits verfügbare und auch nichtverfügbare Landnutzungsdaten, was einen großen Einfluss auf viele Aspekte der methodischen Ausrichtung sowie auf die erzielten Ergebnisse hatte. Weiterhin wird eine knappe Einführung in den Aufbau von Fruchtfolgen zur späteren Fruchtfolgenanalyse gegeben. Aufgrund der großen Bedeutung für die Ausarbeitung der Methodik dieser Studie, erfolgt eine ausführliche Gegenüberstellung verfügbarer Analyse- und Klassifikationsverfahren aus denen sich dann die als am besten erachteten Komponenten für die vorgestellte MDA-Methodik herauskristallisierten.

Kapitel 3 führt in das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ein und präsentiert einerseits die für die Studie ausgewählten Fernerkundungsdaten sowie andererseits die vektorbasierten Geobasisdaten und Fachdaten.

Hinsichtlich der Umsetzung des MDA in dieser Arbeit, werden in Kapitel 4 zunächst grundsätzliche Anforderungen an die Datengrundlage formuliert, die sich aus der prinzipiellen Ausrichtung der Methodik ergaben. Um die unterschiedlichen Daten gemeinsam nutzbar zu machen, waren für jeden Datentyp eigene Aufbereiteroutinen zu entwickeln, die an einzelnen Beispielen erläutert werden.

Kapitel 5 präsentiert die im Rahmen dieser Studie entwickelte methodische Umsetzung des MDA. Dabei erfolgte zuerst die Darstellung der ausgearbeiteten Modellvorstellung zur Feldfruchterfassung durch multitemporale Fernerkundungsanalysen sowie eine exemplarische Erläuterung der einzelnen Arbeits- und Analyseschritte. Ebenso findet eine Charakterisierung der ausgewählten Klassifikationsverfahren statt. Anschließend wird die technische und

methodische Vorgehensweise des MDA zur räumlichen und thematischen Informationsverschneidung aus unterschiedlichen Datenquellen im GIS zur Produktion aufgewerteter Landnutzungsdatensätze und der Fruchtfolgenkarte dargelegt. Darauf aufbauend wird, an die multitemporale Fernerkundungsanalyse anknüpfend, die Vorgehensweise zur Feldfruchtableitung und Verschneidung der Ergebnisse der Fernerkundungsanalysen erläutert. Die Schilderungen zur Integration der verwendeten Geodaten erfolgen, der Analysereihenfolge entsprechend, erst im Verlauf des anschließenden Kapitels.

Kapitel 6 beginnt mit der Ergebnisgegenüberstellung der eingesetzten Klassifikationsverfahren, gefolgt von der Präsentation der ausgewählten Fernerkundungsdaten, der Darstellung der Ergebnisse zur fernerkundungsdatenbasierten Feldfruchtableitung und zur Erzeugung der jährlichen Basislandnutzung (FE-Basis) für die Jahre 2008-2010. Im Anschluss an die Ausführungen zur Integration der ausgewählten Geodaten, wird die Klassenzusammensetzung der finalen MDA-Landnutzungsdatensätze präsentiert. Das Ergebniskapitel endet mit der Auswertung der Fruchtfolgenanalyse und der Validierung der Landnutzungsprognose für das Jahr 2011.

In Kapitel 7 werden die verwendeten Daten, die entwickelte Verfahrensweisen und die erzielten Ergebnisse für die Schwerpunkte Feldfruchterfassung, Fruchtfolgenanalyse und Datenintegration anhand des MDA diskutiert. Dabei werden Einordnungen vorgenommen, inwieweit Erwartungen an die Verwendung von Daten oder Methoden erfüllt wurden, beziehungsweise inwieweit methodische Modelvorstellungen umgesetzt werden konnten.

Daran anknüpfend wird in Kapitel 8 ein Fazit für die einzelnen Schwerpunkte dieser Arbeit gezogen und Anknüpfungspunkte für die Weiterentwicklung der vorgestellten Methode vorgeschlagen.



## 2 Grundlagen zu Landnutzungs- und Landbedeckungsanalysen

Im folgenden Kapitel werden zunächst die notwendigen technischen und methodischen Grundlagen zur fernerkundungsgestützten Datenerfassung sowie zur Bearbeitung und Analyse geographischer Daten erläutert. Außerdem wird ein einleitender Überblick über offiziell verfügbare Landnutzungsdaten gegeben. Weiterhin wird Allgemeines zum Aufbau von Fruchtfolgen hinsichtlich ihrer Bedeutung für Landnutzungsanalysen dargestellt.

### 2.1 Landbedeckung und Landnutzung

Im Zusammenhang mit der Beschreibung der Beschaffenheit der Erdoberfläche sind die beiden Begriffe Landnutzung (*land use*, LU) und Landbedeckung (*land cover*, LC) zu unterscheiden, obwohl sie im Alltag oftmals synonym verwendet werden (GIRI 2012). Landnutzung und Landbedeckung sind wechselseitig miteinander verbunden, indem der Zustand oder die Veränderung des Einen, das Andere bedingen oder beeinflussen kann (MEINEL & HENNERSDORF 2002, GIRI 2012). Der Begriff Landbedeckung bezieht sich auf die (beispielsweise durch Fernerkundung) beobachtbare biotische und abiotische Zusammensetzung der Erdoberfläche (MEYER & TURNER 1992). Damit umfasst die Landbedeckung Vegetationsflächen wie Wälder, Grasländer, Felder aber auch Gewässer, unbedeckten Boden oder Gesteinsflächen. Darüber hinaus schließt die Landbedeckung vom Menschen geschaffene Strukturen wie Siedlungen und damit auch Straßen oder Gebäude mit ein (GIRI 2012). Die Landnutzung beschreibt hingegen die (primäre) Funktion einer Fläche für den Menschen in Kategorien wie Wohn-, Industrie- oder Siedlungs- oder Forstgebiete, beinhaltet aber auch Kategorien wie Schutz- oder Erholungsgebiete und zielt oftmals auf die Nutzungsintensität unter sozioökonomischen Gesichtspunkten ab (LOVELAND & DEFRIES 2004). Ein Bereich der Erdoberfläche lässt sich nur einer Landbedeckung (zum Beispiel Wald) zuordnen, kann jedoch mehrere Nutzungen (dementsprechend Wirtschaftswald, Schutzgebiet, oder Erholungsgebiet) aufweisen (GIRI 2012). Eine Landnutzungsklasse wie beispielsweise Wohngebiet kann wiederum aus mehreren biophysischen Kategorien (Landbedeckungen) wie Rasenflächen, Gebäuden oder Straßen zusammengesetzt sein (MEINEL & HENNERSDORF 2002). In Abhängigkeit vom Verwendungszweck der Informationen stehen somit abhängig vom Typ die Nutzung und/oder die Bedeckung einer Fläche im Vordergrund (LOVELAND 2012). Oftmals ist jedoch die Bestimmung der Landnutzung mittels Fernerkundung allein problematisch und zudem von der betrachteten Skala abhängig. Die Landbedeckung dient

daher mitunter als Ersatz, um daraus die Landnutzung abzuleiten (ANDERSON et al. 1976, LOVELAND & DEFRIES 2004).

Landnutzung und Landbedeckung schließen sich in vielen Datensätzen gemeinhin aus. Dies ist letztendlich einer der Gründe, weshalb der in dieser Arbeit vorgestellte methodische Ansatz auf der Integration mehrerer Informationsquellen fußt. Für die (Agrar-)Ökosystemmodellierung, als primärer Verwendungszweck der in dieser Arbeit erzeugten Daten, steht besonders die räumliche Verbreitung für die Fragestellung relevanter Nutzungen und die damit verknüpften Austauschprozesse im SVA-System im Vordergrund. Als ein Ziel dieser Arbeit wurde daher die Herausstellung einer bestimmten dominanten Nutzung einer Fläche benannt. Im Folgenden wird daher, in Kenntnis des Unterschieds zwischen Bedeckung und Nutzung, der Einfachheit halber, in Bezug auf die Ergebnisse dieser Arbeit üblicherweise von Landnutzung gesprochen. In diesem Sinne wird nachfolgend beispielsweise eine Rasenfläche innerhalb einer Siedlung als Rasennutzung gesehen, mit der bestimmte Prozesse oder Handlungen verbunden sind.

## 2.2 Verfügbare Landnutzungs- und Landbedeckungsdaten

Durch den im Laufe der letzten Jahrzehnte ständig zunehmenden Bedarf an verschiedensten räumlichen Informationen zur Flächennutzung, existieren heutzutage zahlreiche Datensätze. In Deutschland wie in vielen (europäischen) Industrienationen sind daher digital aufbereitete Landnutzungsinformationen in unterschiedlichem Maße vorhanden. Entsprechende Daten werden von verschiedenen Einrichtungen der öffentlichen Hand oder von anderen Institutionen, die oftmals der Öffentlichkeit dienen, erhoben. Je nach primärem Verwendungszweck, der thematischen Ausrichtung, der Institution die die Daten bereitstellt oder den Verfahren der Datenerfassung unterscheiden sich die Datensätze im Maßstab, in der Informationsart und -dichte und mitunter auch in der thematischen oder räumlichen Genauigkeit (oder Qualität) sowie in den Anschaffungskosten. Für den folgenden knappen Überblick über die für Deutschland beziehungsweise für das Untersuchungsgebiet bereits verfügbaren Landnutzungsinformationen, dienen der Herausgeber sowie die Art der Datenerfassung als grobe Kategorisierung. Eine Gruppe bilden dabei Datensätze, die von öffentlichen nationalen Stellen bereitgestellt werden. Sogenannte Landinformationssysteme (LIS) sind in dieser Kategorie von besonderer Bedeutung (BILL 2010). Deren Daten werden üblicherweise durch das amtliche Vermessungs- oder Katasterwesen eines Landes flächendeckend erhoben, aufbereitet und in mehrjährigen Zyklen fortgeführt. LIS stellen räumliche Basisinformationen von öffentlichem Interesse zur Behandlung von Rechts-, Verwaltungs-, Wirtschafts-, Planungs- oder Entwicklungsfragen bereit und müssen daher

sowohl über eine entsprechend hohe geometrische als auch thematische Genauigkeit und Korrektheit verfügen (BILL 2010). Nach ihrem primären Verwendungszweck werden LIS in Kataster- oder Liegenschaftsinformationssysteme und in primär topographisch geprägte digitale Landschaftsmodelle (DLM) gegliedert. Erstere enthalten unter anderem präzise großmaßstäbliche räumliche Nutzungsinformationen (Maßstab ca. 1:5.000-10.000) auf Basis von Flurstücken und Gebäuden. DLM beschreiben hingegen die Beschaffenheit der Landschaft für mittlere bis kleine Maßstäbe (1:10.000-1:1.000.000) in Form von topographischen Objekten, die ebenfalls Nutzungsinformationen sowie weitere beschreibende Informationen (Sachdaten) bereitstellen (BILL 2010).

In Deutschland bilden das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) (ehemals in Automatisiertes Liegenschaftsbuch (ALB) und Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) unterteilt) und das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS), welches für mehrere Maßstabebenen ab 1:25.000 verfügbar ist, die beiden Basisinformationssysteme (Geobasisdaten). Die im ALKIS und im ATKIS enthaltenen räumlichen und thematischen Informationen unterscheiden sich dabei vor allem im Abstraktionsgrad (ADV 2008b). Hinsichtlich der Verfügbarkeit bereits vollständig aufbereiteter LU/LC-Informationen, kam im Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit darüber hinaus das aus dem ATKIS abgeleitete Digitale Landbedeckungsmodell für Deutschland (DLM-DE) hinzu (ARNOLD 2009, BKG 2011b).

Bezüglich der Landnutzung unterteilen LIS die Erdoberfläche unter anderem in Siedlungs-, Vegetations-, Verkehrs- oder Gewässerflächen, wobei je nach Oberkategorie, unterschiedlich viele Unterkategorien unterschieden werden. So werden im ATKIS Siedlungsflächen zunächst beispielsweise in Wohnbau-, Gewerbeflächen, gemeinnützige oder anderweitige Flächen unterschieden, die wiederum in konkretere Nutzungen wie Handel, Gärtnerei oder Park differenziert sind (ADV 2008b). Vegetationsflächen werden dementsprechend in Landwirtschaft, Wald, Gehölz oder Heide unterteilt.

Hinsichtlich der im vorangegangenen Kapitel behandelten Beziehung zwischen Landnutzung und Landbedeckung, ist anzumerken, dass bei oben genannten LIS (ausgenommen dem DLM-DE) bei der Klassendefinition grundsätzlich die tatsächliche Nutzung im Vordergrund steht. Unterschiedliche Bedeckungstypen und deren Ausmaß innerhalb einer Nutzung (wie Vegetationsbedeckung oder Versiegelungsgrad), sind daher mitunter nur vereinzelt ausgewiesen. So findet auch eine weitere Unterscheidung von landwirtschaftlichen Nutzungen (im Sinne von Bedeckungstypen), die über die Differenzierung von Ackerland, Grünland und Sonderkulturen hinausgeht (beispielsweise nach Feldfrüchten), in öffentlich verfügbaren Informationssystemen in der Regel nicht statt. Im Fall von Vegetationsflächen kann dies einerseits auf einen zu hohen und jährlich notwendigen Aktualisierungsaufwand, andererseits, vor allem bei Ackerland, aber auch auf Datenschutzrichtlinien zurückgeführt werden. Denn de

facto werden entsprechende Informationen bezüglich landwirtschaftlich genutzter Flächen (zum Beispiel angebaute Feldfrüchte) auf jährlicher Basis von öffentlichen Stellen erhoben. Im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der Europäischen Union (EU) (ausgehend von der Verordnung (EWG) Nr. 1765/92 des Rates der Europäischen Gemeinschaften (EG 1992)) erhalten Landwirte infolge der Konkurrenzsituation im globalen Handel auf Antrag unter anderem Direktzahlungen aus dem Europäischen Garantiefond für die Landwirtschaft (EGFL). Diese Direktzahlungen dienen zur Grundsicherung ihrer Einkünfte und letztendlich zur damit verbundenen Sicherung der Nahrungsmittelerzeugung in der Europäischen Union (EU 2014). Zur jährlichen Beantragung dieser Direktzahlungen ist die Angabe der Flächennutzung (z.B. die angebaute Feldfrucht pro Schlag oder gegebenenfalls andere Flächennutzungen im Rahmen von Cross-Compliance-Maßnahmen) für sämtliche zu einem Betrieb gehörende Parzellen erforderlich (LWK NRW 2014). Die Antragsbearbeitung sowie die Kontrolle der gemachten Angaben erfolgt im Rahmen eines Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS), das von jedem Mitgliedsstaat der EU eingesetzt werden muss (BMELV 2004). Auf diese Weise werden jährlich sowohl räumlich als auch thematisch sehr detaillierte Landnutzungsinformationen für landwirtschaftliche Nutzflächen EU-weit auf Schlagenebene erhoben. Da diese Daten allerdings sehr strikten Datenschutzrichtlinien unterliegen, dürfen sie nur zur Durchführung der Aufgaben im Rahmen des InVeKoS verwendet werden (BMELV 2008). Auch zu Forschungszwecken stehen diese detaillierten Landnutzungsinformationen daher nicht zur Verfügung (persönliche Kommunikation LWK NRW, 2010).

Neben Basisinformationssystemen enthalten vor allem auf nationaler Ebene diverse sogenannte Umweltinformationssysteme (UIS) nützliche Informationen im mittleren Maßstabsbereich (BILL 2010). Diese enthalten zwar mitunter keine direkten Landnutzungsinformation, können allerdings in Kombination mit Basisdaten weitere Auskunft über die Art oder Intensität einer Nutzung geben. So führen in der Regel Umweltämter Biotopkataster, die die räumliche Abgrenzung von Bereichen mit schutzwürdiger oder bereits rechtlich geschützter natürlicher Flora oder Fauna ausweisen und zudem zahlreiche Zusatzinformationen zum Vorkommen von Arten oder dem Gefährdungszustand enthalten (LANUV NRW 2013c, a).

Weiterhin geben räumliche Daten zu Forstflächen, Wasser- oder Naturschutzgebieten indirekt Auskunft über die Nutzungsintensität bestimmter Gebiete. Entsprechende Geoinformationen sind heutzutage üblicherweise (in NRW beispielsweise über das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, LANUV NRW) bei öffentlichen Stellen allgemein verfügbar. Darüber hinaus können auch Bodeninformationssysteme (digitale Bodenkarten) oder digitale Geländemodelle zur weiteren Differenzierung von Landnutzungen verwendet werden.

Neben geometrischen Daten stehen auf nationaler Ebene zudem oftmals Daten der amtlichen Statistik zur Flächennutzung für verschiedene administrative Ebenen (zumeist bis zur Kreis- oder Gemeindeebene hinunter) zur Verfügung. In Deutschland werden über die statistischen Bundesämter der einzelnen Länder verschiedene Bodennutzungsstatistiken zum Teil im jährigen, mitunter allerdings auch nur im mehrjährigen Turnus erhoben. Detaillierte statistische Erhebungen zur Nutzung landwirtschaftlicher Flächen auf Gemeindeebene werden infolge des damit verbunden hohen Aufwands nur im Abstand von drei Jahren durchgeführt (BMJ 2012).

In Bezug auf frei zugängliche und reine Landnutzungs- oder Landbedeckungs-informationssysteme, sind allen voran die Landbedeckungsdaten des CORINE Land Cover (CLC) zu nennen, die für zahlreiche europäische Länder für die Bezugsjahre 1990, 2000 und 2006 verfügbar sind (BÜTTNER et al. 2012). Im Gegensatz zu den zuvor genannten Datenquellen, beruhen die CLC-Daten hauptsächlich auf der Analyse von Satellitenbildern und stellen somit bereits Fernerkundungsdatenprodukte dar. Das CORINE-Programm (Co-ordination of Information on the Environment) wurde von der Europäischen Kommission im Jahre 1985 initiiert und dient der europaweiten Bereitstellung einheitlicher digitaler Bodenbedeckungsdaten für alle teilnehmenden Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sowie weiterer Partnerstaaten (EEA 1995). Seit ihrer Gründung ist die Europäische Umweltagentur (European Environment Agency, EEA) für das CORINE-Programm verantwortlich (BÜTTNER et al. 2012). Nationale CLC-Daten werden zwar von den einzelnen Staaten eigenständig erstellt. Ihnen liegen allerdings eine einheitliche Datengrundlage und Nomenklatur zugrunde. CLC-Daten unterscheiden grundsätzliche Bedeckungstypen wie Siedlung, Vegetation oder Gewässer in insgesamt 44 Klassen im Maßstab 1:100.000. Aufgrund dieses Erfassungsmaßstabs verfügen CLC-Landbedeckungsklassen über einen deutlich höheren Aggregierungsgrad als beispielsweise das ATKIS.

Als ein zukünftiges und aus Produzentensicht kosteneffizientes Bindeglied zwischen ATKIS und CLC ist das inzwischen deutschlandweit kostenpflichtig verfügbare DLM-DE des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) gedacht (ARNOLD 2009). Das DLM-DE mit dem Bezugsjahr 2009 basiert auf dem damaligen Datenstand des ATKIS mit einer mittlerweile abgelösten Nomenklatur (Objektartenkatalog Version 3.2, vom 01.07.2003) (BKG 2011b). Das wesentliche Merkmal des DLM-DE stellt die Überführung ausgewählter ATKIS-Informationen in die CLC-Nomenklatur (vgl. Kapitel 3.3.3) dar. Dabei wurden die ursprünglichen ATKIS-Geometrien weitestgehend beibehalten, jedoch durch die Analyse multitemporaler Fernerkundungsdaten des entsprechenden Zeitraums aktualisiert (BKG 2011b).

## 2.3 Erzeugung von Landnutzungsinformationen durch Fernerkundung

Zur Erzeugung von Landnutzungsinformationen mittels Fernerkundung bestehen heutzutage vielfältige Möglichkeiten hinsichtlich der Techniken, der Sensorensysteme und der Analyseverfahren. Zunächst werden die physikalischen Grundlagen der Fernerkundung erläutert, bevor auf die für diese Arbeit relevanten Aufnahmesysteme und Analyseverfahren eingegangen wird.

### 2.3.1 Physikalische und technische Grundlagen

Fernerkundung ist die Informationsgewinnung über Objekte, Phänomene oder Flächen anhand der Analyse von Daten eines Sensors, der nicht im direkten Kontakt mit dem beobachteten Objekt steht (LILLESAND et al. 2008). Die Möglichkeit dazu beruht auf der elektromagnetischen Strahlung, die eine sich gradlinig und konstant mit Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ) (etwa  $3 \times 10^8$  m/s) ausbreitende wellenartige Energiestrahlung ist (LILLESAND et al. 2008). Sie setzt sich aus einem magnetischen und einem elektrischen Feld zusammen, die im rechten Winkel zu einander angeordnet sind und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung sinusförmig schwingen (vgl. Abbildung 2.1). Wellenlänge ( $\lambda$ ) und Frequenz ( $\nu$ ) sind dabei umgekehrt proportional.

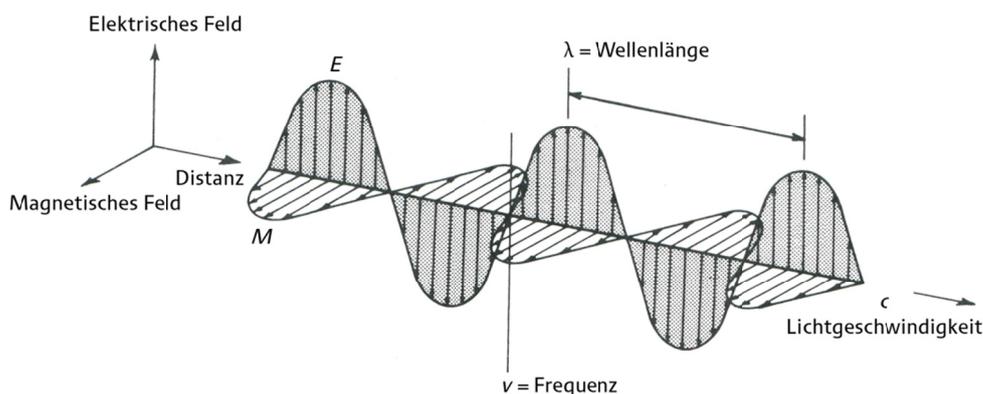


Abbildung 2.1: Die elektromagnetische Welle. Ihre Komponenten umfassen eine sinusförmige elektrische Welle ( $E$ ) und eine entsprechende magnetische Welle ( $M$ ), die im rechten Winkel senkrecht zur Ausbreitungsrichtung angeordnet sind (LILLESAND et al. 2008), verändert.

Die Gesamtheit aller vorkommenden Wellenlängen bezeichnet man als elektromagnetisches Spektrum. Zur Charakterisierung der elektromagnetischen Strahlung dient im Bereich der (passiven) Fernerkundung (s.u.) allgemein die Wellenlänge in Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ) (LILLESAND et al. 2008). Die Energie elektromagnetischer Strahlung ist nach der Quantentheorie

umgekehrt proportional zur Wellenlänge und nimmt somit mit zunehmender Wellenlänge ab (LÖFFLER et al. 2005). Elektromagnetische Strahlung wird von jedem Körper, der über eine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts (0 K) verfügt, aufgrund seiner Materialeigenschaften in unterschiedlichem Maße abgegeben (JENSEN 2005). Die Strahlungsintensität und der dominant abgegebene Wellenlängenbereich sind dabei eng mit der Temperatur gekoppelt. Erstere steigt mit der vierten Potenz der Temperatur an (LÖFFLER et al. 2005). Aus Sicht der Fernerkundung ist die langwellige Ausstrahlung der Erde somit deutlich schwerer zu detektieren (LILLESAND et al. 2008). Zugleich wird elektromagnetische Strahlung von jedem Körper aufgrund seiner spezifischen spektralen Eigenschaften in unterschiedlichem Maße wellenlängenabhängig reflektiert, absorbiert oder transmittiert, wodurch eine Unterscheidung möglich wird (ALBERTZ 2009). Die Sonne stellt aufgrund ihrer Oberflächentemperatur von etwa 6000 K die bedeutendste Quelle für elektromagnetische Strahlung dar und emittiert diese in unterschiedlichen Stärken über die gesamte Bandbreite des elektromagnetischen Spektrums (RICHARDS 2012).

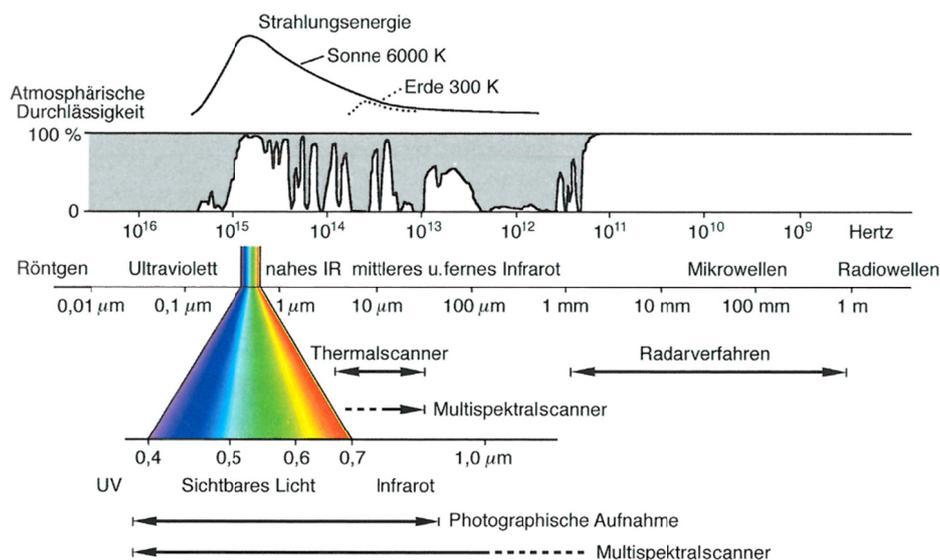


Abbildung 2.2: Das elektromagnetische Spektrum, die Bereiche in denen unterschiedliche Sensoren operieren und die Positionen von atmosphärischen Fenstern (ALBERTZ 2009), verändert.

Wie Abbildung 2.2 zeigt, befindet sich das Strahlungsmaximum der Sonne im sichtbaren Licht (ca. bei 0,5 µm), während das der Erde, aufgrund der deutlich geringeren Durchschnittstemperatur (etwa 300 K), weit außerhalb des sichtbaren Bereichs bei etwa 10 µm liegt. Daraus resultiert, dass zur Fernerkundung die Eigenstrahlung der Erdoberfläche erst ab etwa 3 µm, in Form von Thermalstrahlung, genutzt werden kann (ALBERTZ 2009). Der überwiegende Teil der Fernerkundungssysteme zur Landnutzungsanalyse beruht daher auf der Erfassung der kurzwelligeren elektromagnetischen Strahlung, die von der Sonne ausgesendet und von einem beobachteten Objekt reflektiert wird (passive Systeme). Für bestimmte Fragestellungen wird aber auch die von der Erdoberfläche ausgesendete Thermalstrahlung zur Informationsgewinnung verwendet (JENSEN 2005). Passiven Sensoren stehen sogenannte aktive Systeme,

wie RADAR (*radio detection and ranging*) oder LIDAR (*light detection and ranging*) gegenüber, die über eine eigene Energiequelle verfügen, um die Erdoberfläche mit elektromagnetischer Energie in einer bestimmten Wellenlänge (oder Frequenz) zu bestrahlen. Der von der Erdoberfläche reflektierte Anteil der künstlich erzeugten Strahlung lässt sich ebenfalls zur Informationsgewinnung verwenden (ALBERTZ 2009, RICHARDS 2012). Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch ausschließlich auf passive Systeme zurückgegriffen, die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung verwenden. Andere Systeme werden daher nicht weiter thematisiert.

Zur Landnutzungsanalyse ausgewählte Systeme operieren hauptsächlich im sogenannten optischen Spektralbereich von sichtbarem Licht (0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ) über nahes Infrarot (bis etwa 1,1  $\mu\text{m}$ ) bis ins mittlere Infrarot (bis etwa 2,5  $\mu\text{m}$ ). Die Bereiche des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots werden in der Fernerkundung gewöhnlich als *visible-to-near infrared* (VNIR) zusammengefasst, während das mittlere Infrarot oftmals als *shortwave-infrared* (SWIR) bezeichnet wird (VAN LEEUWEN 2009). Wie Abbildung 2.2 zeigt, kann elektromagnetische Strahlung die Atmosphäre in den oben genannten Spektralbereichen größtenteils passieren (atmosphärische Fenster). In vielen anderen Spektralbereichen hingegen besitzen vor allem Wasser (-dampf) ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und weitere atmosphärische Gase wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ), Ozon ( $\text{O}_3$ ) und Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) Absorptionsbänder unterschiedlicher Breite, die eine Transmission unterbinden (JENSEN 2005). Elektromagnetische Strahlung unterliegt im optischen Bereich allerdings auch innerhalb der atmosphärischen Fenster weiteren Beeinflussungen. So wird elektromagnetische Strahlung auf dem Weg von der Sonne zur Erdoberfläche und dann zum Sensor, selektiv durch Gasmoleküle und Aerosole sowie nicht-selektiv durch größere Partikel wie Staub und Wasserdampf gestreut oder reflektiert (LÖFFLER et al. 2005). Die Strahlung, die ein Sensor für ein beobachtetes Objekt in seinem sogenannten momentanen Gesichtsfeld (*instantaneous field of view*, IFOV) aufgezeichnet (*radiance* oder *radiance at sensor*), setzt sich demnach, neben der von der Oberfläche reflektierten Strahlung, aus weiteren atmosphärischen Strahlungskomponenten (*path radiance*) zusammen (RICHARDS 2012). Zur Unterscheidung biotischer und abiotischer terrestrischer Oberflächen sind der VNIR- und der SWIR-Bereich von besonderer Bedeutung (VAN LEEUWEN 2009, CAMPBELL & WYNNE 2011). Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, zeichnen sich hier photosynthetisch aktive Pflanzen gegenüber anderen Materialien durch einen signifikanten Kontrast von starker Absorption im Rot (durch Chlorophyll a und b) und hoher Reflektion im nahen Infrarot (NIR) aus, was sich in Reflektionskurven (spektrale Signatur) in einem steilen Anstieg äußert (VAN LEEUWEN 2009). Der Spektralbereich zwischen 0,72  $\mu\text{m}$  und 0,76  $\mu\text{m}$  wird daher auch als *red edge* bezeichnet. Die Stärke und Position des *red edge* aber auch anderer spektraler Eigenschaften ist pflanzenspezifisch und von weiteren Faktoren wie Vitalität, Bestandsdichte sowie der phänologischen Entwicklung abhängig. Die spektrale Erscheinung von Pflanzen und ist damit auch zeitlichen Veränderungen (Jahresgang) unterworfen (VAN LEEUWEN 2009). Für die Erfassbarkeit beziehungsweise Unterscheidbarkeit von Vegetation



ist dementsprechend auch der Beobachtungszeitpunkt zu beachten. Andere Materialien wie beispielsweise Wasser, Asphalt oder Beton verfügen im VNIR- bis SWIR-Bereich jeweils über deutlich unterschiedliche Reflektionseigenschaften, die deren Unterscheidung ermöglichen (LILLESAND et al. 2008). Die Erfassung der von der Erdoberfläche reflektierten elektromagnetischen Strahlung erfolgt in den meisten Fällen durch sogenannte multispektrale Sensoren. Diese messen die von einem beobachteten Objekt reflektierte Strahlung in mehreren ausgewählten und voneinander getrennten Spektralbereichen (sogenannten Kanälen oder Bändern) (RICHARDS & JIA 2006). Breite und Anordnung der spektralen Kanäle im elektromagnetischen Spektrum sind dabei so gewählt, um effizient den maximalen Kontrast zwischen unterschiedlichen Oberflächen oder Objekten der Erdoberfläche zu erzielen oder um mit einem Spektralbereich verknüpfte charakteristische Pflanzeigenschaften abzuleiten zu können (JENSEN 2007).

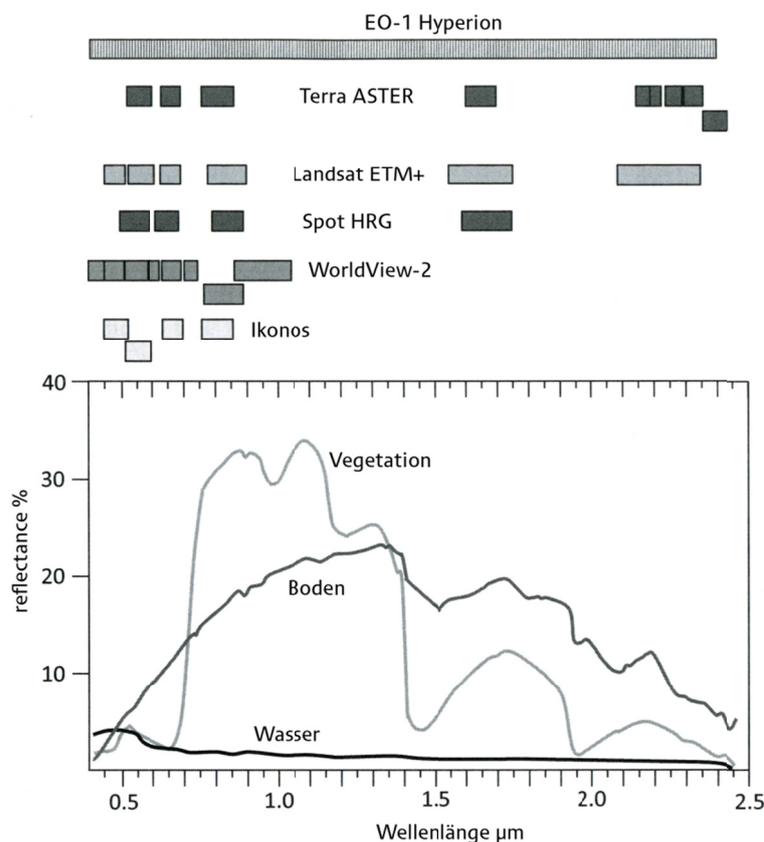


Abbildung 2.3: Reflektionseigenschaften gängiger Materialien der Erdoberfläche sowie die Anordnung der spektralen Bänder ausgewählter Fernerkundungssensoren, nach RICHARDS (2012) verändert.

Die pro Kanal im IFOV erfasste *radiance* wird dann in Form von Helligkeitswerten (*brightness values*, BV) oder digitalen Zahlenwerten (*digital numbers*, DN) aufgezeichnet (CAMPBELL & WYNNE 2011). Die Größe der abgespeicherten Zahlenwerte richtet sich dabei nach der radiometrischen Auflösung eines Sensors, also der Anzahl an unterscheidbaren Intensitätsstufen. Beim gängigen Auflösungsvermögen multispektraler Kanäle von 8 bit, können demnach bis zu 255 Intensitätsstufen (Graustufen) unterschieden werden (LILLESAND

& KIEFER 2004). Die resultierenden Bilddaten multispektraler Sensoren sind dabei so aufgebaut, dass die einzelnen DN-Werte der pro Bild erfassten Raumeinheiten (Pixel) für jeden Kanal in einem gleichmäßigen Raster angeordnet sind. Die Raster(-ebenen) der einzelnen Kanäle sind übereinander angeordnet, wobei sich die DN-Werte der Kanäle eines Pixels exakt überlagern (vgl. Kapitel 2.4.1.3).

### 2.3.2 Satellitengestützte Fernerkundungssysteme

Neben dem Sensortyp unterscheidet die Fernerkundung zwischen flugzeug- und satellitengestützten Systemen. In den letzten Jahren kommen zusätzlich vermehrt sogenannte (mini-) *unmanned aerial vehicle* (UAV) zum Einsatz, bei denen leichte Sensoren mit unterschiedlicher Aufnahmetechnik auf vergleichsweise kleinen ferngesteuerten Plattformen eingesetzt werden (JAAKKOLA et al. 2010, BENDIG et al. 2013). Je nach Trägersystem können somit unterschiedlich große Gebiete der Erdoberfläche in verschiedenen räumlichen Auflösungen erfasst werden. Für Landnutzungsanalysen auf regionaler Ebene sind flugzeuggestützte Systeme und UAVs infolge ihrer begrenzten räumlichen Abdeckung oder des mit dem Aufnahmeprozess verbundenen Arbeits- und Kostenaufwands im Vergleich zu Satellitensystemen eher ungeeignet. Der folgende Überblick ist dementsprechend auf letztere Systeme beschränkt. Heutzutage steht eine fast unüberschaubare Vielfalt zur Landnutzungsanalyse geeigneter Fernerkundungssensoren zu Verfügung. Als Musterbeispiel satellitengestützter Erdbeobachtungssysteme gelten die Landsat-Satelliten (LAUER et al. 1997), von denen sich seit Februar 2013 nunmehr die achte Generation (Landsat-8) im Orbit befindet (USGS 2013b). Mit Landsat-1, damals noch mit der Bezeichnung Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1), wurde im Jahre 1972 zudem der Grundstein für die großflächige satellitengestützte zivile Erdbeobachtung gelegt (GOWARD et al. 2009). Viele nachfolgende Erdbeobachtungssysteme orientieren sich am Systemdesign und der wissenschaftlichen Ausrichtung der Landsat-Satelliten (CAMPBELL & WYNNE 2011). Stellvertretend werden daher deren wesentliche Eigenschaften anhand einiger Landsat-Beispiele erläutert. Charakteristisch für gängige Satellitensysteme zur Erdoberflächenbeobachtung ist ein um wenige Grad geneigter polnaher und sonnensynchroner Orbit (LÖFFLER et al. 2005). Die Erdumlaufbahn ist dabei so konzipiert, dass der Äquator überall ungefähr zum gleichen Zeitpunkt vormittags überflogen wird. Landsat-5 etwa überquert diesen bei einer Flughöhe von 705 km stets gegen 9.45 Uhr (lokale Sonnenzeit) (LILLESAND et al. 2008). In anderen Breitenlagen variieren die vormittäglichen Überflugszeitpunkte, auch in Abhängigkeit von der Jahreszeit, etwa im Bereich von einer Stunde (LÖFFLER et al. 2005). Die Gründe für die Wahl dieses Zeitraums sind die für viele Anwendungen günstigsten Beleuchtungsverhältnisse sowie die dann potentiell geringste Bewölkung in den Tropen (CAMPBELL & WYNNE 2011). Hinsichtlich der spektralen Ausrichtung verfügt der Thematic

Mapper-Sensor (TM), der seit 1982 über Jahrzehnte auf den Satelliten Landsat-4 & -5 eingesetzt wurde, beispielsweise über sieben Multispektralkanäle (USGS 2013a).

Tabelle 2.1: Die Eigenschaften der Landsat-TM-Bänder im Hinblick auf die Unterscheidung von Vegetationstypen und Landnutzungen nach JENSEN (2007), LILLESAND et al. (2008).

<b>Band</b>	<b>Wellenlänge (µm)</b>	<b> nominale spektrale Position</b>	<b>ausgewählte Anwendungen</b>
1	0,45-0,52	Blau-Grün	Küstengewässerkartierung; Unterscheidung von Boden/Vegetation, Waldtypen; Identifizierung von anthropogenen Objekten
2	0,52-0,60	Grün	Unterscheidung und Abschätzung der Vitalität von Vegetation; ebenso hilfreich zur Identifizierung von anthropogenen Objekten
3	0,63-0,69	Rot	Unterscheidung von Pflanzenarten durch Betrachtung der Absorptionsbanden von Chlorophyll; Unterscheidung von Bodentypen oder Gesteinstypen; ebenso hilfreich zur Identifizierung von anthropogenen Objekten
4	0,76-0,90	Nahes IR	Unterscheidung von Vegetationstypen, Vitalität, Biomasse/Bedeckungsgrad, Kartierung von Wasserflächen
5	1,55-1,75	Mittleres IR	Abschätzung des Wassergehalts von Pflanzen und Bodenfeuchte; Unterscheidung von Wolken und Schneebedeckung
6	10,4-12,5	Thermales IR	Ableitung von Pflanzenstress, Bodenfeuchte, Unterscheidung von Vegetationstypen
7	2,08-2,35	Mittleres IR	Unterscheidung von Mineral- und Gesteinstypen

Tabelle 2.1 fasst die Eigenschaften der TM-Bänder und deren Anwendungszwecke zusammen. Obwohl Anzahl, Breite und genaue Position der einzelnen Bänder je nach Sensor variieren, lässt sich der generelle Zweck für die Bänderauswahl auf andere Systeme übertragen. Neben multispektralen Systemen existieren auch hyperspektrale Systeme wie beispielsweise Hyperion (PEARLMAN et al. 2003), die sich durch eine sehr hohe Anzahl sehr schmaler und dicht aneinander angeordneter Spektralkanäle auszeichnen. Material- oder Pflanzeigenschaften können dadurch deutlich genauer erfasst werden. Geringe Datenverfügbarkeit, schmale Aufnahmestreifen (bei Hyperion beispielsweise lediglich 7,7 km) oder hohe Anschaffungskosten sind jedoch die wesentlichen limitierenden Faktoren. Für regionale Landnutzungsanalysen spielen diese Systeme daher noch keine Rolle. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal multispektraler Erdbeobachtungssatelliten stellt die räumliche Auflösung (hier vereinfacht mit Pixelgröße gleichgesetzt) dar. WARNER et al. (2009b) unterscheiden diesbezüglich zwischen sehr fein (<1 m), fein (1-10 m), moderat (10-100 m), grob (100-1000 m) und sehr grob (>1000 m) auflösenden Sensoren. In Tabelle 2.2 sind daher einige gängige satellitengestützte Fernerkundungssysteme, nach der räumlichen Auflösung sortiert, aufgeführt. Beispiele für sehr fein und fein auflösende Systeme sind WorldView-2, Quickbird, Ikonos oder GeoEye. Diese Systeme verfügen zumeist über einen panchromatischen Kanal im Auflösungsbereich von  $\leq 1$  m sowie über weitere multispektrale

Kanäle im Bereich bis <4 m. Die Multispektralkanäle des Landsat-TM-Sensors verfügen, mit Ausnahme des thermalen Kanals, über eine räumliche Auflösung von 30 m und werden somit allgemein zu den räumlich moderat auflösenden Systemen gerechnet (GOWARD et al. 2009). Weitere Beispiele für räumlich moderat auflösende Satellitensysteme sind das Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) (vgl. Kapitel 3.2.3), Systeme der SPOT-Familie (Satellite Pour l'Observation de la Terre) wie SPOT-4 (ASTRIUM-GEO 2013) oder das indische IRS-P6-System (vgl. Kapitel 3.2.4). Populäre Systeme mit grober oder sehr grober räumlicher Auflösung sind beispielsweise das Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (JUSTICE et al. 1998) und das Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) mit Pixelgrößen von 250-500 m respektive 1000 m (TUCKER et al. 1985). Eine detailliertere und umfassendere Übersicht gegenwärtiger satellitengestützter Fernerkundungssensoren geben aktuelle Lehrbücher wie JENSEN (2007), LILLESAND et al. (2008), WARNER et al. (2009c) oder auch CAMPBELL & WYNNE (2011).

Tabelle 2.2: Gängige satellitengestützte Fernerkundungssysteme, eingeordnet nach der räumlichen Auflösung, nach WULDER et al. (2008), verändert und ergänzt.

räumliche Auflösung	Satellit (Sensor)	Swath Width (km)	räuml. Auflösung (m)	spektr. Auflösung (nm)	Wiederkehrrate (Tage)
grob (>100 m)	NOAA 17 (AVHRR)	2940	1100	500-1250	1
	SPOT (VGT)	2250	1000	430-1750	1
	Terra (MODIS)	2330	250-500	366-14385	1
moderat (10-100 m)	Landsat-5 (TM)	185	30	450-2350	16
	Landsat-5 (ETM+)	185	30 (MS); 15 (pan)	450-2350	16
	SPOT 2 (HRV)	60	20 (MS); 10 (pan)	500-890	26
	SPOT 4 (HRVIR)	60	20	500-1750	26 (3)
	SPOT 5 (HRG)	60	10 (MS); 20 (SWIR)	500-1730	26 (3)
	IRS-P6	141	23,5	520-1700	14
	Terra (ASTER)	60	15 (VNIR)	530-1165	16
	CBERS-1 & -2	120	20	485-830	26
	EO-1 (Hyperion)	7,5	30	433-2350	16
fein (<10 m)	OrbView-3	8	4 (MS); 1 (pan)	450-900	3
	Quickbird(-2)	16,5	2,44 (MS); 0,6 (pan)	450-900	2,4
	IKONOS	13,8	4 (MS); 1 (pan)	450-850	3
	WorldView-2	16,4	1,85 (MS); 0,46 (pan)	400-1040	1,1

MS = multispektral  
 pan = panchromatisch  
 VNIR = visible-to-near infrared  
 SWIR = shortwave-infrared

Wie aus Tabelle 2.2 hervorgeht, sind mit der räumlichen Auflösung im Allgemeinen weitere charakteristische Eigenschaften wie die Breite des Aufnahmestreifens (*swath width*) und die Wiederkehrrate bis zu einem gewissen Grad umgekehrt proportional verknüpft und limitieren sich daher gegenseitig (GOWARD et al. 2009, WARNER et al. 2009b). Szenen räumlich sehr hoch auflösender Systeme wie beispielsweise Worldview-2 (2 m multispektral) decken daher mit einer *swath width* von etwa 16,4 km (DIGITALGLOBE 2013) eher schmale Gebiete ab,

während Landsat 5-TM-Daten etwa 185 km breite Streifen der Erdoberfläche erfassen (USGS 2013a). Die Daten des Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) decken bei einer Pixelgröße von 250-1000 m hingegen Flächen mit einer Breite von bis zu 2330 km ab (LP DAAC 2011). Die *swath width* beschränkt daher oftmals die Wiederholrate, sofern Systeme nicht über eine Funktion zur Neigung des Sensors (*pointing*) relativ zur Flugbahn verfügen, wodurch diese mitunter auf fast einen Tag verkürzt werden kann (DIGITALGLOBE 2013). Systeme wie Landsat oder ASTER überfliegen eine Position auf der Erdoberfläche etwa alle 14-16 Tage und können somit theoretisch Nadir-Aufnahmen eines Orts in entsprechenden Intervallen bereitstellen. Bezüglich der Verknüpfung von *swath width* und Wiederholrate stellen Systeme wie RapidEye allerdings eine Ausnahme dar. Diese ermöglichen durch ihr Systemdesign mit mehreren Satelliten trotz ihrer hohen räumlichen Auflösung von 6,5 m und *swath width* von 77 km theoretisch tägliche Nadir-Aufnahmen (vgl. Kapitel 3.2.5).

Ausschlaggebend für die Auswahl eines Systems sind aber nicht zuletzt die Datenkosten. Während einige moderat und grob auflösende Systeme (z.B. Landsat, ASTER und MODIS) von Regierungs- oder Forschungseinrichtungen betrieben werden und deren Daten daher vor allem für Forschungszwecke kostenlos oder relativ günstig zur Verfügung stehen, stammen hochauflösende Fernerkundungsdaten fast ausnahmslos von kommerziellen Anbietern. Bei gegenwärtigen Datenkosten ab etwa 22 US\$/km<sup>2</sup> (E-GEOS 2013) für Neuaufnahmen, entstehen für Gebiete von der Größe des Rureinzugsgebiets (etwa 2400 km<sup>2</sup>) bereits für eine monotemporale Abdeckung enorme Kosten.

### 2.3.3 Visuelle Interpretation von Fernerkundungsdaten

Zur Ableitung von Landnutzungsinformationen aus multispektralen, optischen Fernerkundungsdaten lassen sich mit der visuellen Interpretation und der rechnergestützten digitalen (semi-)automatisierten Klassifikation zwei grundsätzliche Verfahrensweisen unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zwar die Anwendung der letzteren Verfahrensweise angestrebt. Zur Darlegung grundsätzlicher Aspekte fernerkundungsbasierter Landnutzungsanalysen ist jedoch die kurze Behandlung visueller Verfahren hilfreich.

Die visuelle Interpretation von Luftbildern wird etwa seit den 1940er Jahren zur Landnutzungskartierung eingesetzt (LILLESAND et al. 2008). Während dies früher manuell auf ausgedrucktem Bildmaterial erfolgte, kommen heutzutage in der Regel rechnergestützte GIS zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.4.1). Wie bei analogen Luftbildern, erfolgt auch bei multispektralen Daten eine Unterscheidung von Bildinhalten unter Berücksichtigung von Merkmalen (und deren Veränderung) wie Form, Größe, Muster, Grau- oder Farbton, Textur, Standort, Umfeld, Beziehung und räumlicher Auflösung (JENSEN 2007, LILLESAND et al.

2008). Während bei analogen Luftbildern nur der Spektralbereich des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots nutzbar ist, ermöglichen multispektrale Daten hingegen gewöhnlich Falschfarbendarstellungen mit zahlreichen Kanalkombinationen zur Akzentuierung unterschiedlicher spektraler Merkmale (vgl. CAMPBELL & WYNNE (2011)). Die generelle Unterscheidbarkeit von Objekten in rasterbasierten Fernerkundungsdaten ist, neben dem Bildkontrast und anderen Faktoren (siehe beispielsweise LILLESAND et al. (2008)), vereinfacht dargestellt von der Größe der Objekte in Relation zum Betrachtungsmaßstab beziehungsweise der räumlichen Auflösung (Pixelgröße) der Bilddaten abhängig (vgl. STRAHLER et al. (1986)). In diesem Zusammenhang besagt eine Faustformel, dass eine Unterscheidung grundsätzlich möglich ist, sofern die nominelle Pixelgröße weniger als die Hälfte des Durchmessers des kleinsten zu unterscheidenden Objekts beträgt (JENSEN 2005). Die Identifikation von Landnutzungen erfolgt dann unter Anwendung des Wissens über die betrachtete geographische Region sowie unter Zuhilfenahme zusätzlicher Informationen (beispielsweise Kartenmaterial), indem zunächst unterschiedene Bereiche in einer Szene durch Grenzziehung als einzelne Parzellen ausgewiesen, und anschließend mit einer eindeutigen Landnutzungsklasse versehen werden (LÖFFLER et al. 2005). Da oftmals nur Landbedeckungen in Fernerkundungsdaten unterschieden werden können, erfolgt bei der Interpretation häufig eine Zusammenfassung von verschiedenen Bedeckungstypen zu einer Landnutzungsklasse (zum Beispiel Grünflächen und versiegelten Flächen einer Siedlungsnutzung) (CAMPBELL & WYNNE 2011). Die Klassenzuweisung beruht dabei in der Regel auf einem übernommenen oder selbst entwickelten Klassifikationsschema mit eindeutigen diskreten Klassen. Hinsichtlich des gewählten Zielmaßstabs einer Landnutzungs-klassifikation ist die sogenannte *minimum mapping unit* (MMU) von herausragender Bedeutung. Die MMU bestimmt die kleinste Flächeneinheit in der eine Landnutzung ausgewiesen wird und definiert somit den Detailgrad der Kartierung (LILLESAND et al. 2008). Oftmals weist eine Landnutzungsklasse daher nur die dominante Landnutzung aus (CAMPBELL & WYNNE 2011). Von den veröffentlichten Klassifikationsschemata zur Erstellung von Landnutzungskarten ist das Land Use And Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data des U.S. Geological Survey (USGS) von ANDERSON et al. (1976) bezüglich seiner wesentlichen Eigenschaften und aufgrund seiner häufigen Anwendung (beispielsweise CARBONE et al. (1996), YUAN et al. (2005) HOMER et al. (2007)) hervorzuheben (vgl. Tabelle 2.3). Viele nachfolgende aktuellere und teilweise höher spezialisierte Klassifikationsschemata, wie beispielsweise des CLC (BOSSARD et al. (2000), vgl. Kapitel 3.3.3), verwenden zahlreiche bereits darin enthaltene Konzepte und weisen eine ähnliche Struktur auf (LILLESAND et al. 2008, CAMPBELL & WYNNE 2011). Das Anderson-Klassifikationsschema, wurde als universelles Klassifikationsschema zur globalen Landnutzungs- und Landbedeckungserfassung konzipiert. Zu den wesentlichen Entwicklungskriterien zählen beispielsweise eine für alle Kategorien etwa gleich gute Erfassbarkeit (erzielbare Interpretationsgenauigkeit mindestens 85 %) oder die Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit von Kartierungsergebnissen.

Tabelle 2.3: Das Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikationssystem des USGS zur Nutzung mit Fernerkundungsdaten nach ANDERSON et al. (1976).

<b>Level I</b>		<b>Level II</b>	
1	Urban or Built-up Land	11	Residential
		12	Commercial and Services
		13	Industrial
		14	Transportation, Communications, and Utilities
		15	Industrial and Commercial Complexes
		16	Mixed Urban or Built-up Land
		17	Other Urban or Built-up Land
2	Agricultural Land	21	Cropland and Pasture
		22	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Ornamental Horticultural Areas
		23	Confined Feeding Operations
		24	Other Agricultural Land
3	Rangeland	31	Herbaceous Rangeland
		32	Shrub and Brush Rangeland
		33	Mixed Rangeland
4	Forest Land	41	Deciduous Forest Land
		42	Evergreen Forest Land
		43	Mixed Forest Land
5	Water	51	Streams and Canals
		52	Lakes
		53	Reservoirs
		54	Bays and Estuaries
6	Wetland	61	Forested Wetland
		62	Nonforested Wetland
7	Barren Land	71	Dry Salt Flats
		72	Beaches
		73	Sandy Areas other than Beaches
		74	Bare Exposed Rock
		75	Strip Mines Quarries, and Gravel Pits
		76	Transitional Areas
		77	Mixed Barren Land
8	Tundra	81	Shrub and Brush Tundra
		82	Herbaceous Tundra
		83	Bare Ground Tundra
		84	Wet Tundra
		85	Mixed Tundra
9	Perennial Snow or Ice	91	Perennial Snowfields
		92	Glaciers

Das Anderson-Klassifikationsschema besitzt einen hierarchischen Aufbau, der für insgesamt vier Detailstufen beziehungsweise Maßstabsebenen (Level I-IV) konzipiert wurde. Vordefiniert sind allerdings lediglich Level I & II (ANDERSON et al. 1976). Level I stellt dabei die Stufe mit dem höchsten Generalisierungsgrad dar, die sich auch für globale Studien mit größerer Pixelgröße eignet (vgl. Tabelle 2.4). In Level II erfolgt eine weitere Differenzierung der grundlegenden Landnutzungskategorien, die vor allem zur Landnutzungserfassung bis zur Staatenebene konzipiert wurde und beispielsweise die Grundlage für die Landnutzungskarte des Coastal Change Analysis Program (C-CAP) der National Oceanic and Atmospheric

Administration (NOAA) der Vereinigten Staaten von Amerika bildet (NOAA 2013). Level III und Level IV können beim Anderson-System vom Nutzer je nach Fragestellung frei definiert werden, müssen allerdings inhaltlich konform mit der vordefinierten Nomenklatur, und räumlich in ihrer Ausdehnung angepasst sein, sodass stets eine Aggregation beziehungsweise Disaggregation zum nächsten Level möglich ist (ANDERSON et al. 1976). Die Abgrenzung unterschiedlicher Nutzungskategorien ist bei Klassifikationsschemata somit grundsätzlich durch das oberste Level festgelegt.

Tabelle 2.4: Empfohlene Fernerkundungsdatengrundlage zur Landnutzungserfassung anhand des USGS-Klassifikationsschemas hinsichtlich des Maßstabs bzw. der Pixelgröße nach ANDERSON et al. (1976), LILLESAND et al. (2008) und JENSEN (2007).

Anderson-Level	nach ANDERSON et al. (1976)		nach JENSEN (2007), LILLESAND et al. (2009)	
	empfohlene Datenquelle	Maßstabsbereich/ Pixelgröße	Pixelgröße (m)	Auflösungsbereich
I	Satellitenaufnahmen	ca. 80 m (Landsat MSS-ähnlich)	20-100 (global bis 1 km)	(sehr)grob – moderat
II	Luftbilder hoher Flughöhe	<1:80.000	5-20	moderat
II	Luftbilder mittlerer Flughöhe	1:20.000-1:80.000	1-5	fein
IV	Luftbilder niedriger Flughöhe	>1:20.000	0,25-1	sehr fein

Der Detailgrad, in dem Landnutzungsklassen erfasst werden können, ist mitunter von der betrachteten Skala abhängig (JENSEN 2007). ANDERSON et al. (1976) empfehlen daher, je nach Level, eine Fernerkundungsdatengrundlage in einem bestimmten Maßstabsbereich. Wie Tabelle 2.4 zeigt, wurde die Verwendung multispektraler Sensoren wie Landsat (Landsat-1, räumliche Auflösung ca. 80 m) für Level I von ANDERSON et al. (1976) allerdings bereits explizit bedacht. Mit steigenden räumlichen Auflösungsvermögen multispektraler Satellitensensoren, eignen sich zunehmend entsprechende Systeme als Datengrundlage (JENSEN 2007). Da die Eignung multispektraler Satellitendaten zur Unterscheidung bestimmter Objekte besonders über die Pixelgröße gesteuert wird, enthält Tabelle 2.4 zusätzlich die von JENSEN (2007) und LILLESAND et al. (2008) zusammengestellten Empfehlungen hinsichtlich der benötigten Pixelgröße zur Erfassung eines bestimmten Klassifikationslevels.

### 2.3.4 Automatisierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten

Im Gegensatz zur visuellen Interpretation umfasst die rechnergestützte automatische Klassifizierung multispektraler Fernerkundungsdaten die Zuweisung von Pixeln zu einer (Landnutzungs-)Klasse auf Basis der mit jedem Pixel transportierten charakteristischen spektralen Muster (LILLESAND et al. 2008). Wie Abbildung 2.4 idealisiert verdeutlichen soll,



füßen entsprechende Klassifikationsverfahren darauf, dass sich die Pixel verschiedener Objektklassen aufgrund ihrer spezifischen spektralen Zusammensetzung in unterschiedlichen Bereichen im Merkmalsraum lokalisieren lassen und somit zu differenzieren sind (ALBERTZ 2009).

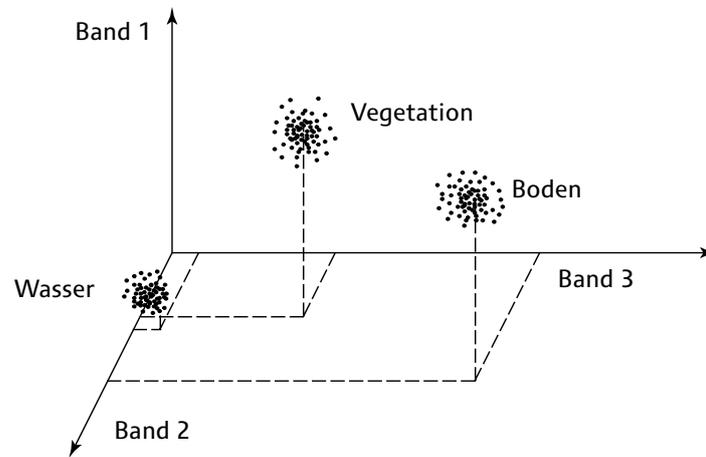


Abbildung 2.4: Anordnung einzelner Objektklassen im multispektralen Merkmalsraum aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften (ALBERTZ 2009), verändert.

Da sich die daraus resultierenden Punktwolken im Merkmalsraum in der Praxis jedoch häufig überschneiden, besteht das grundlegende Ziel einer Klassifikation darin, die bestmögliche Trennung der unterschiedlichen Objektklassen in einer Fernerkundungsszene herbeizuführen. Dies erfolgt, je nach Betrachtungsweise, durch die Bestimmung sogenannter Unterscheidungsebenen (*decision surfaces* oder *decision boundaries*) zur Trennung von Klassen, oder durch die Bestimmung von idealtypischen spektralen Mustern für jede Klasse (Mittelwertvektor oder auch *spectral pattern*), mit denen alle Pixel auf ihre spektrale Ähnlichkeit, beispielsweise über die euklidische Distanz, verglichen werden (MATHER & KOCH 2011, RICHARDS 2012). Zur Klassifikation multispektraler Fernerkundungsdaten bestehen zahllose Strategien und Verfahren, die sich unter verschiedenen Gesichtspunkten in Kategorien einordnen lassen. Grundlegend können dabei sogenannte überwachte Klassifikationsverfahren von unüberwachten sowie pixelbasierte von objektbasierten Klassifikationsverfahren unterschieden werden. Hybride Ansätze kombinieren allerdings auch verschiedene Klassifikationsverfahren miteinander (JENSEN 2005). Bei unüberwachten Verfahren (auch als Clusterbildung oder Clustering bezeichnet) handelt es sich gewöhnlich um pixelbasierte Ansätze. Dabei erfolgt im Merkmalsraum eine Zusammenfassung von Pixeln zu Gruppen (Cluster), die über ähnliche spektrale Eigenschaften (Grauwertzusammensetzung der Pixelvektoren, auch als *pattern* bezeichnet) verfügen (MATHER & KOCH 2011). Neben der Angabe der unterschiedlichen Cluster die gebildet werden sollen, bedarf die Klassifikation zunächst keiner weiteren Kenntnis der zu analysierenden Bilddaten (daher unüberwacht). Erst nach Abschluss der Klassifikation erfolgt, unter Verwendung von Referenzdaten, die Zuweisung der unterschiedlichen Spektralklassen (Cluster) zu Informationsklassen (JENSEN et al. 2009). Zu den bekanntesten Clusterbildungsverfahren zählt die Iterative Self-Organizing

Data Analysis (ISODATA), bei der durch wiederholte Neuberechnung der Mittelwertvektoren der Clusterzentren die Klassenzugehörigkeit der Pixel solange modifiziert wird, bis keine signifikanten Veränderungen der Clusterzusammensetzungen mehr erfolgen (LILLESAND et al. 2008, RICHARDS 2012). Clusterbildungsverfahren werden oftmals im Sinne einer Voruntersuchung verwendet, um die Anzahl an unterscheidbaren Spektralklassen einer Fernerkundungsszene zu bestimmen. Die Erzeugung von Landnutzungsklassifikationen erfolgt in den meisten Fällen anhand überwachter Verfahren, wobei Referenzdaten (beispielsweise entnommen aus Kartenmaterial oder in Form von Geländedaten, vgl. Kapitel 5.2) im Vorfeld der Klassifikation eingesetzt werden, um den gewählten Algorithmus für die Unterscheidung vordefinierter Klassen zu trainieren (JENSEN et al. 2009). Überwachte (pixelbasierte) Verfahren lassen sich weiter in statistische (parametrische) Verfahren und nicht-statistische (nicht-parametrische) Verfahren gliedern (JENSEN et al. 2009, MATHER & KOCH 2011). Statistische Verfahren wie die klassische Maximum Likelihood Classification (MLC) verwenden Parameter zur Klassenunterscheidung, die durch statistische Auswertungen wie die Mittelwertberechnung oder anhand von Varianz-Kovarianzmatrizen der Trainingsdaten gewonnen werden. Diese Methoden beruhen auf der Annahme, dass die einbezogenen Messwerte normalverteilt sind (RICHARDS 2012) (vgl. Kapitel 5.3.1). Nicht-parametrische Verfahren benötigen hingegen keine normalverteilten Trainingsdaten zur Ableitung von Parametern, sondern verwenden die Trainingsdaten direkt zur Klassifikation (MATHER & KOCH 2011). Heutzutage häufig verwendete nicht-parametrische Verfahren sind Artificial Neural Networks (ANN) oder Support Vector Machines (SVM), die im Rahmen der Fernerkundung zu den vergleichsweise neueren Klassifikationsverfahren zählen. ANN adaptieren die Funktionsweise von Neuronen im menschlichen Gehirn (BENEDIKTSSON et al. 1990, JENSEN 2005). Durch ihre Fähigkeit zu lernen sollen sie auch mit fehlerhaften oder geringen sowie unterschiedlichen Eingabedaten überdurchschnittliche Ergebnisse ermöglichen (JENSEN 2005). Allerdings sind ANN sehr rechenintensiv und mitunter schwer zu entwerfen (MATHER & KOCH 2011). SVM beruhen auf statistischem Lernen und gelten besonders effektiv bei begrenzten Trainingsdaten, da sie zur Klassenunterscheidung ausschließlich Trainingspixel vom Rand einer Klassenverteilung im Merkmalsraum, so genannte *support vectors*, verwenden (HUANG et al. 2002, FOODY & MATHUR 2004a) (vgl. Kapitel 5.3.2). Einen anderen Ansatz verfolgen Verfahren wie Decision Trees (DT) (HANSEN et al. 1996, FRIEDL & BRODLEY 1997). Dabei werden hierarchisch aufeinanderfolgende wissensbasierte Entscheidungsregeln zur Klassenunterscheidung erzeugt (JENSEN 2005, MATHER & KOCH 2011). DT können zur Lösung komplexer Klassifikationsprobleme dienen, sind allerdings in der Entwicklung sehr zeitaufwendig. Die erzielbaren Ergebnisse sind besonders stark vom datenspezifischen Wissen und der Fähigkeit dieses als Entscheidungsregeln zu formulieren abhängig (JENSEN et al. 2009). Die bisher beschriebenen sogenannten harten Klassifikationsansätze unterstellen, dass jedes Pixel nur einer Landnutzungsklasse entspricht. Bei Subpixel-Verfahren wird hingegen davon ausgegangen, dass oftmals auch Mischpixel

aufzutreten, deren spektrale Zusammensetzung von verschiedenen Objekten (beispielsweise Vegetation, Wasser und Asphalt) herrührt (LILLESAND et al. 2008). Vor allem bei der Analyse von hyperspektralen Daten, mit denen sich die spektralen Signaturen (*endmember*) von einzelnen Materialien nachvollziehen lassen, bietet eine spektrale Mischungsanalyse (*spectral mixture analysis*, SMA) je nach Anwendung Vorteile (JENSEN et al. 2009). Auf Fuzzy-Logik basierende weiche Klassifikationsverfahren zielen auf die Entmischung von Mischpixeln und die Ausweisung ihrer anteiligen Zusammensetzung (beispielsweise 50 % Wald und 50 % Asphalt) ab (MATHER & KOCH 2011). Da das Ziel dieser Arbeit jedoch die Ableitung eindeutiger Landnutzungsklassen ist, kommen diese Ansätze nicht in Betracht und werden daher nur der Vollständigkeit halber genannt.

Im Gegensatz zu pixelbasierten Verfahren betrachten objektbasierte Verfahren nicht nur spektrale, sondern auch räumliche Informationen. Unter Berücksichtigung der spektralen Ähnlichkeit, Textur und anderen empirisch und iterativ zu ermittelnden Homogenitätskriterien, erfolgt dabei in Abhängigkeit von der betrachteten Skala die Zusammenfassung benachbarter und semantisch verbundener Pixel zu sinnvollen homogenen Objekten (Segmenten) von unterschiedlicher Größe (BAATZ & SCHÄPE 2000, BENZ et al. 2004). Die einzelnen Segmente lassen sich anschließend beispielsweise unter Verwendung von Trainingsgebieten mit unterschiedlichen Verfahren klassifizieren. Dabei können auch zusätzliche Datenquellen in den Klassifizierungsprozess einbezogen werden. Der Analyseablauf objektbasierter Verfahren, wie sie beispielsweise die Software eCognition bietet, ist davon geprägt, dass zunächst sogenannte *rule sets* mit unterschiedlich vielen Prozessen (Operationen) in einem iterativen Prozess (weiter-)entwickelt werden. Die einzelnen Operationen setzen beispielsweise bestimmte Kriterien um, oder führen Algorithmen aus. Die eigentliche Segmentierung und Klassifikation erfolgt erst durch die sequentielle Ausführung des entworfenen *rule sets* (TRIMBLE 2012). Bezüglich der Eignung für unterschiedliche Typen multispektraler Fernerkundungsdaten bestehen grundsätzlich keine Einschränkungen. Objektbasierte Methoden bieten sich jedoch besonders für räumlich hochauflösende Daten (nominelle Auflösung ca. < 5 m) an. Darin zu klassifizierende Objekte sind, anders als bei räumlich moderat aufgelösten Daten, gewöhnlich um ein vielfaches größer als die Pixelgröße (*H-resolution image elements*, vgl. FERRO & WARNER (2002), STRAHLER et al. (1986)). Die hohe räumliche Auflösung führt bei entsprechenden Datensätzen, beispielsweise bei Aufnahmen von urbanen Gebieten, oftmals zu einer starken Heterogenität benachbarter Pixel, was bei pixelbasierten Verfahren zu Problemen führen kann (JENSEN 2007). Zudem liegen Informationen in räumlich hochauflösenden Daten gewöhnlich in unterschiedlichen Skalenniveaus vor, die dann mit objektbasierten Verfahren besser erfasst werden können (BLASCHKE 2010).

### 2.3.5 Ablauf des Klassifikationsprozesses einer Landnutzungsanalyse

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die wesentlichen Arbeitsschritte der (überwachten) Klassifikation optischer Fernerkundungsdaten zur Landnutzungsanalyse gegeben werden. Eine detailliertere Einführung hierzu geben beispielsweise JENSEN (2005), LILLESAND et al. (2008), CAMPBELL & WYNNE (2011) oder RICHARDS (2012).

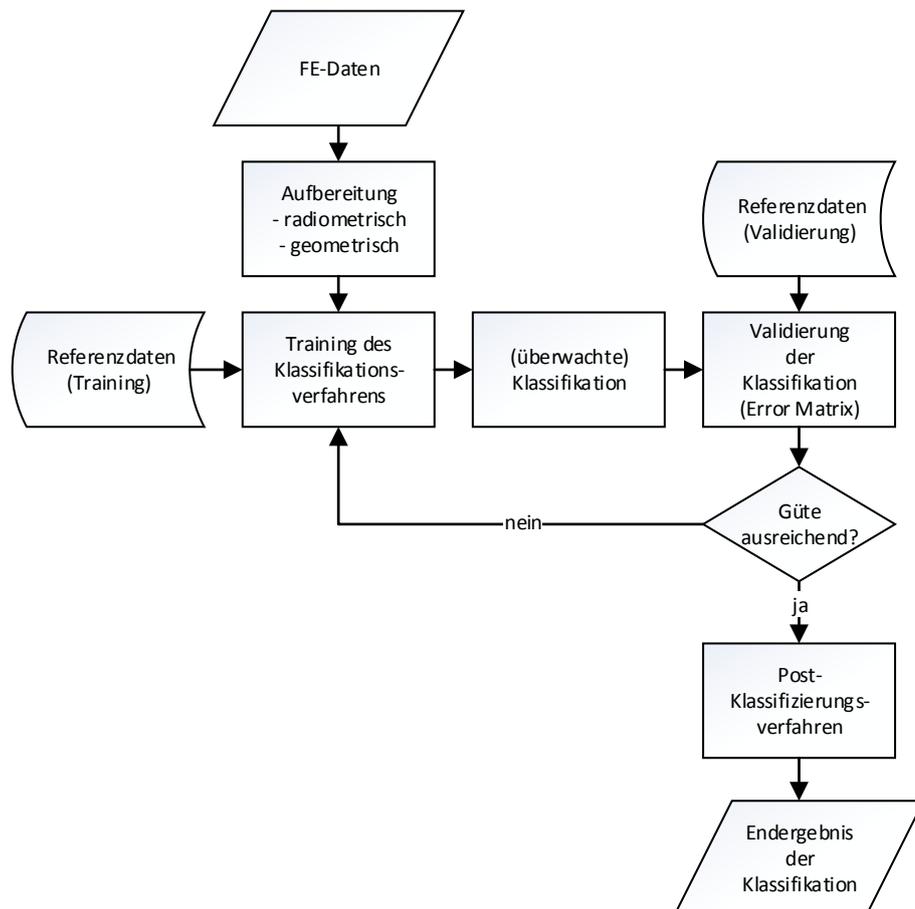


Abbildung 2.5: Typischer Ablauf einer überwachten Landnutzungsklassifikation.

Abbildung 2.5 stellt einen typischen Analyseablauf mit Datenaufbereitung (*preprocessing*), Training des Klassifikationsalgorithmus und Durchführung der Klassifikation, Evaluierung des Klassifikationsergebnisses sowie Nachbereitungsverfahren (*postprocessing*) dar. Grundsätzlich ist zwischen notwendigen und optionalen Bearbeitungsschritten zu unterscheiden, die jedoch bezüglich der Datenaufbereitung nach ausgewähltem Sensor beziehungsweise Datentyp und nach der vom Hersteller bereitgestellten Aufbereitungsstufe variieren.

### 2.3.5.1 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung dient zur Überführung der Daten in ein analysefähiges Format zur Fehlerkorrektur oder zur Bildverbesserung. Bei Datenfehlern ist grundsätzlich zwischen radiometrischen und geometrischen Fehlern sowie jeweils zwischen in Raum und Zeit veränderlichen externen und (in der Regel systematischen und somit vorhersehbaren) internen Fehlern zu unterscheiden (JENSEN 2005). Je nach Datentyp und -produkt sind Fernerkundungsdaten heutzutage zumeist in unterschiedlichem Umfang aufbereitet. Eine atmosphärische Korrektur behandelt externe Fehler, die durch die Beleuchtungssituation des betrachteten Objekts oder durch den wellenlängenabhängigen Einfluss der Atmosphäre auf die vom beobachteten Objekt ausgehende elektromagnetische Strahlung entstehen. Sie führen zur Kontrastminderung oder Aufhellung der Bilddaten (JENSEN 2005, ALBERTZ 2009). Die Korrektur (oftmals sensorspezifischer) interner radiometrischer Fehler betrifft unter anderem die Rauschreduktion oder die Kompensation von Datenlücken oder Streifung (*striping*) (beispielsweise durch Interpolation), die durch defekte oder fehlerhaft kalibrierte Detektoren verursacht werden (LILLESAND et al. 2008). Geometrische Korrekturen behandeln demgegenüber (sensorspezifische) systematische Bildverzerrungen, die zum Beispiel durch die allgemeine Aufnahmegeometrie oder durch die Bewegung der Erde oder der Aufnahmeplattform während des Aufnahmeprozesses (*skew distortion*) verursacht werden. Das Ausmaß solcher Einflüsse ist in der Regel bekannt, oder durch die Auswertung von Telemetriedaten des Aufnahmesystems anhand von mathematischen Beziehungen herzuleiten. Die Korrektur oder Abmilderung solcher Fehler ist daher oftmals automatisiert möglich (LILLESAND et al. 2008). Die Korrektur übriger interner oder externer geometrischer Verzerrungen, wie sie durch unvorhersehbare Bewegungen der Aufnahmeplattform oder durch die Reliefenergie eines beobachteten Bereichs der Erdoberfläche verursacht werden, erfolgt durch die Verwendung sogenannter *ground control points* (GCP) (JENSEN 2005). Dies sind Passpunkte mit sehr genau bekannter Position auf der Erdoberfläche. Durch die Identifizierung dieser Punkte in den Fernerkundungsdaten kann mithilfe verschiedener mathematischer Modelle eine Entzerrung, gewöhnlich über inverse oder indirekte Transformationen, erfolgen (ALBERTZ 2009). Entsprechende Verfahren dienen auch zur Georeferenzierung oder Registrierung, um Bilddaten mit anderen räumlichen Daten zu vereinen oder in eine bestimmte Kartenprojektion zu überführen (vgl. Kapitel 4.2.4 & 4.3.1). Zur Kontrolle der Gleichmäßigkeit (d.h. zur Einschätzung der Genauigkeit) der auf Basis der GCP berechneten Transformationsfunktion, wird allgemein der quadratische Mittelwertsfehler (*root mean square error*, RMS-Fehler) aller Residuen berechnet. Residuen entsprechen dabei der Differenz zwischen der anhand der GCP gesetzten Position und der durch die Transformationsgleichung berechneten Position (CONGALTON & GREEN 2009, ESRI 2013b). Zur Bestimmung der Rasterzellenwerte (DN-Werte) des Neuberechneten entzerrten oder georeferenzierten Bildes ist die Verwendung eines geeigneten Interpolationsverfahrens notwendig. Je nach Verwendungszweck der Daten wird gewöhnlich zwischen den Verfahren *nearest neighbor* (Übernahme ursprünglicher DN-Werte,

aber mitunter treppenartige visuelle Erscheinung des Ergebnisses), *bilinear* (moderate Veränderung der ursprünglichen DN-Werte, aber visuell homogenere Erscheinung) und *cubic convolution* (stärkste Veränderung der DN-Werte, aber auch visuelle stärkste Kantenglättung) gewählt (ALBERTZ 2009, RICHARDS 2012). Die Durchführung weiterer Bildverbesserungsmaßnahmen (*image enhancement*) erfolgt für gewöhnlich optional. Das Spektrum solcher Verfahren beinhaltet beispielsweise die Anwendung von räumlichen Filtern (Hochbeziehungsweise Tiefpassfilter) zur räumlichen Frequenzanalyse, Fourier-Transformationen und Hauptkomponentenanalysen zur weiteren Rauschminderung, Datenreduktion oder Neuorganisation (vgl. RICHARDS (2012)). Eine weitere Aufbereitungsmöglichkeit ist die Fusion von Daten unterschiedlicher Sensoren. Durch sogenanntes *pansharpening* können beispielsweise die Grauwerte multispektraler Kanäle mit der höheren räumlichen Information eines (panchromatischen) Kanals verknüpft werden, um die räumliche Auflösung der Multispektraldaten insgesamt zu erhöhen (vgl. CAMPBELL & WYNNE (2011)). Eine im Rahmen von Landnutzungsanalysen oftmals am Ende der Datenaufbereitung eingesetzte Aufbereitungsmaßnahme zur Effizienzsteigerung ist die Mosaikbildung aus mehreren Einzelszenen (ALBERTZ 2009). Sie ist möglich, sofern Szenen über einen Überlappungsbereich, eine genaue Georeferenzierung oder Orthorektifizierung, gleiche Dateneigenschaften (wie räumliche Auflösung oder Bänderkombination) und, hinsichtlich einer homogenen Datengrundlage, über ein ähnliches Aufnahmedatum verfügen (vgl. TUCKER et al. (2004)).

### 2.3.5.2 Training und Durchführung der überwachten Klassifikation

Wie Abbildung 2.5 verdeutlichen soll, werden bei einem überwachten Klassifikationsprozess Training, Ausführung der Klassifikation und Validierung des Ergebnisses gewöhnlich iterativ durchlaufen, bis eine gewünschte Klassifikationsgenauigkeit erzielt beziehungsweise keine wesentliche Klassifikationsverbesserung zu erreichen ist. Die Trainingsphase dient dabei der Erstellung eines statistischen Datensatzes (Trainingsdaten), der die spektrale Variabilität jeder in der Fernerkundungsszene auftretenden Landnutzungsklasse erfasst, um deren Unterscheidung zu ermöglichen (LILLESAND et al. 2008). Die Grundlage dazu bilden Referenzinformationen zur Klassenzugehörigkeit für Teilbereiche der Fernerkundungsszene (JENSEN 2005). Die Referenzdaten stammen für gewöhnlich aus Geländekartierungen (möglichst zum Aufnahmezeitpunkt der Fernerkundungsdaten), Auswertung von Kartenmaterial oder können durch die visuelle Interpretation von Luftbildern erzeugt werden. Diese Daten lassen sich, sofern sie über eine Georeferenzierung mit exakten Koordinatenwerten verfügen (beispielsweise durch Datenaufnahme mittels globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS)), mit den Fernerkundungsdaten lagegenau darstellen. Gewöhnlich erfolgt die Überführung von Referenzinformationen durch die interaktive

graphische Markierung und Überarbeitung von sogenannten Trainingsgebieten (oftmals auch als *Regions-of-Interest* (ROI) bezeichnet) am Bildschirmarbeitsplatz (LILLESAND et al. 2008). Die Identifizierung und Positionierung der Referenzinformationen erfolgt dabei durch visuelle Inspektion der Fernerkundungsdaten (CAMPBELL & WYNNE 2011, MATHER & KOCH 2011). Um die spektrale Variabilität aller Landnutzungsklassen (Informationsklassen und deren Spektralklassen) zu erfassen, ist im Allgemeinen eine bestimmte Menge an Trainingsfällen (als Flächen oder einzelne Pixel) sowie deren räumliche Verteilung über die Bilddatei notwendig. Je nach verwendetem Klassifikationsverfahren werden unterschiedliche Empfehlungen bezüglich der benötigten minimalen Pixelanzahl und der räumlichen Gestalt der Trainingsgebiete gegeben (vgl. Kapitel 5.5.1), wobei die mögliche räumliche Autokorrelation benachbarter Pixeln zu beachten ist (MATHER & KOCH 2011). Da Landnutzungsklassen mitunter über hohe spektrale Ähnlichkeiten oder gar Überschneidungen verfügen können, dient beispielsweise die Berechnung von Distanzen im Merkmalsraum zur Bewertung der spektralen Trennbarkeit von Trainingsgebieten im Vorfeld einer Klassifikation (vgl. MATHER & KOCH (2011)). Oftmals empfohlene Verfahren sind beispielsweise die statistischen Verfahren Jeffries-Matusita Distance (JM) oder Transformed Divergence (TD) (JENSEN 2005, RICHARDS 2012) (vgl. Kapitel 5.5.1). Neben der Entwicklung des Trainingsdatensatzes für ein ausgewähltes Klassifikationsverfahren, hat der Nutzer zudem durch die Manipulation von Algorithmusparametern Einfluss auf den Klassifikationsprozess (vgl. Kapitel 2.3.3).

### 2.3.5.3 Validierung von Fernerkundungsklassifikationen

Da Klassifikationen zahlreichen Fehlerquellen wie Fehlzuweisungen von Mischpixeln unterliegen können, bildet die Ergebnisvalidierung zur Bestimmung der Klassifikationsgenauigkeit (*accuracy assessment*) einen essenziellen Bestandteil des Klassifikationsprozesses (LILLESAND et al. (2008)). Aus Anwendersicht dient die Validierung der Bestimmung inwieweit eine korrekte Kategorisierung der unterschiedlichen Spektralklassen in einer Fernerkundungsszene anhand der Trainingsgebiete und dem ausgewählten Klassifikationsverfahren erzielt wurde. Nutzer einer Landnutzungsklassifikation benötigen das Evaluierungsergebnis zur Einschätzung der Verlässlichkeit der enthaltenen Informationen (FOODY 2004). Sogenannte nicht-ortsspezifische Evaluierungsverfahren vergleichen dabei die aggregierten Flächenanteile, die einer Landnutzung in der Klassifikation zugewiesen wurden, mit den Flächenanteilen, die beispielsweise Landnutzungsstatistiken bereitstellen (CAMPBELL & WYNNE 2011). Ortsspezifische (ortsbezogene) Verfahren vergleichen hingegen die Klassenzuweisung der Klassifikation auf Pixelbasis in bestimmten Bereichen, für die die tatsächliche Landnutzungs-kategorie durch Referenzdaten (Testdaten) bekannt ist (STEHMAN & FOODY 2009). Die Quellen solcher Testdaten entsprechen denen zur Erzeugung von Trainingsgebieten. Testdaten werden daher oftmals parallel zu Trainingsdaten erhoben. Aufgrund ihres unterschiedlichen Zwecks

sollte die Flächenauswahl jedoch möglichst unabhängig erfolgen und die Testdaten getrennt behandelt werden (JENSEN 2005). Zur Aufnahme von Testdaten bestehen daher verschiedene und unterschiedlich aufwendige räumliche Strategien zur Probennahme (*sampling designs*) wie *random sampling*, *systematic sampling*, *stratified random sampling* oder *cluster sampling*. (JENSEN 2005, CONGALTON & GREEN 2009, CAMPBELL & WYNNE 2011). In Abhängigkeit von den zu unterscheidenden Klassen empfehlen CONGALTON & GREEN (2009) dabei 75-100 Testpixel pro Klasse zu betrachten. Die Qualität der Referenzdaten hat enormen Einfluss auf das Evaluierungsergebnis und kann wie auch das Klassifikationsergebnis durch zahlreiche Fehlerquellen wie beispielsweise Lagefehler oder andere Beeinträchtigungen herabgesetzt werden. Referenzdaten stellen die tatsächliche Beschaffenheit der Erdoberfläche daher gegebenenfalls auch nur angenähert dar (FOODY 2002). Wie FOODY (2002) vorschlägt, wird der im Zusammenhang mit Referenzdaten allgemein gebräuchliche Begriff *ground truth* im Rahmen dieser Arbeit daher vermieden. Folglich messen Validierungsverfahren eher den Grad der Übereinstimmung zwischen dem Klassifikationsergebnis und der Referenzinformation für die betrachteten Standorte (STEHMAN & FOODY 2009, CAMPBELL & WYNNE 2011). Von den zahlreichen vorhandenen ortsbezogenen Verfahren hat sich die Auswertung einer Fehlermatrix, im Allgemeinen als Error Matrix (EM) bezeichnet, seit ihrer Einführung in ihrer jetzigen Form von STORY & CONGALTON (1986) als Quasistandard etabliert (FOODY 2002, CONGALTON & GREEN 2009).

Tabelle 2.5: Aufbau einer Error Matrix (EM), nach JENSEN (2005), CONGALTON & GREEN (2009).

		Referenzdaten (Pixel) j					CE (%)	UA (%)
		Klasse	1	2	3	k		
Klassifikation (Pixel) i	1	n <sub>1,1</sub>	n <sub>1,2</sub>	n <sub>1,3</sub>	n <sub>1,k</sub>	n <sub>1+</sub>	-	-
	2	n <sub>2,1</sub>	n <sub>2,2</sub>	n <sub>2,3</sub>	n <sub>2,k</sub>	n <sub>2+</sub>	-	-
	3	n <sub>3,1</sub>	n <sub>3,2</sub>	n <sub>3,3</sub>	n <sub>3,k</sub>	n <sub>3+</sub>	-	-
	k	n <sub>k,1</sub>	n <sub>k,2</sub>	n <sub>k,3</sub>	n <sub>k,k</sub>	n <sub>k+</sub>	-	-
	Summe (n <sub>+j</sub> )	n <sub>+1</sub>	n <sub>+2</sub>	n <sub>+3</sub>	n <sub>+k</sub>	n	-	-
	OE (%)	-	-	-	-	-	OA(%):	
	PA (%)	-	-	-	-	-	Kappa:	

- n = Gesamtanzahl der Pixel
- k = Anzahl an Landnutzungsklassen
- n<sub>ij</sub> = Pixelanzahl die Klasse i in der Klassifikation und Klasse j in den Referenzdaten zugewiesen wurden
- n<sub>i+</sub> = Pixelanzahl die Klasse i in der Klassifikation zugewiesen wurden
- n<sub>+j</sub> = Pixelanzahl die Klasse j in den Referenzdaten enthält
- OE = Omission Errors (Auslassungsfehler)
- PA = Producer's Accuracy
- CE = Commission Errors (Vereinigungsfehler)
- UA = User's Accuracy
- OA = Overall Accuracy (Gesamtgenauigkeit)

Tabelle 2.5 stellt den typischen Aufbau einer Error Matrix dar. Deren Kern bildet eine quadratische Anordnung von Werten in Reihen und Spalten. Die Spalten repräsentieren die Referenzdaten, wohingegen die Zeilen die Klassifikation betreffen (JENSEN 2007). Werte im



Überschneidungsbereich von Spalten und Reihen entsprechen der Anzahl an Testdaten (Pixeln), die einer Kategorie in der Klassifikation in Bezug zu den Referenzdaten zugewiesen wurde (CONGALTON & GREEN 2009). In Tabelle 2.5 grau hinterlegte und diagonal angeordnete Zellen (Hauptdiagonale) enthalten jeweils die Anzahl korrekt zugewiesener Pixel, wobei  $n$  der Gesamtanzahl an betrachteten Pixeln entspricht (JENSEN 2007). Werte abseits der Hauptdiagonalen repräsentieren jeweils die Anzahl falsch zugewiesener Pixel. Die Betrachtung der Spalten offenbart Auslassungsfehler (*omission errors*, OE), wohingegen entsprechende Werte in den Zeilen eine unkorrekte Einbeziehung in eine Klasse (*commission errors*, CE) darstellen (LILLESAND et al. 2008). Die Erläuterungen der Variablen gelten, soweit nicht anders ausgewiesen, auch für die nachfolgenden Formeln. Als herausragendes deskriptives Maß für die Klassifikationsgenauigkeit dient die Gesamtgenauigkeit (*overall accuracy*, OA), die durch die Division der Gesamtheit der korrekt klassifizierten Pixel durch die Anzahl aller betrachteten Pixel nach CONGALTON & GREEN (2009) wie folgt bestimmt wird:

$$OA_i = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} \quad (2.1)$$

Da hierdurch keine Aussage bezüglich der Genauigkeiten einzelner Klassen abzuleiten ist, müssen OE und CE genauer betrachtet werden (STORY & CONGALTON 1986). Die *Producer's Accuracy* (PA) betrifft den OE und gibt darüber Auskunft, inwieweit eine Klasse in der Klassifikation erfasst wurde, wobei

$$PA_j = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \quad (2.2)$$

Die *User's Accuracy* (UA) behandelt hingegen den CE und repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Pixel in der Klassifikation tatsächlich der entsprechenden Klasse angehört, in dem

$$UA_i = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad (2.3)$$

Beide Maßzahlen sind in Tabelle 2.5 jeweils in Prozent angegeben. Zusätzlich zu diesen deskriptiven Messgrößen wird üblicherweise auch der Kappa-Koeffizient (kurz Kappa oder  $\hat{K}$ ) angegeben. Das Hauptaugenmerk der Kappa-Analyse liegt in der Bestimmung der Differenz zwischen der Genauigkeit, die eine zufällige korrekte Klassenzuweisung ergeben würde, und der tatsächlichen Übereinstimmung des Klassifikationsergebnisses mit den Referenzdaten. Die Berechnung von Kappa beruht auf folgender Gleichung (CONGALTON & GREEN 2009):

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}} \quad (2.4)$$

mit

- n = Gesamtanzahl der Pixel
- k = Anzahl an Landnutzungsklassen
- n<sub>ii</sub> = Pixelanzahl in Reihe i und Spalte i entlang der Hauptdiagonalen
- n<sub>i+</sub> = Pixelanzahl die Klasse i in der Klassifikation zugewiesen wurden
- n<sub>+i</sub> = Pixelanzahl die Klasse i in den Referenzdaten zugewiesen wurden

Der Kappa-Wert (für gewöhnlich ein Wert zwischen 0 und 1) kann dem Prozentsatz gleichgesetzt werden, mit dem eine Klassifikation besser als eine zufällige Klassenzuweisung ist (CONGALTON & GREEN 2009). Werte über 0,80 werden nach LANDIS & KOCH (1977) allgemein als hohe Übereinstimmung zwischen Referenzdaten und entsprechenden Positionen in einer Klassifikation angesehen.

#### 2.3.5.4 Post-Klassifizierungsverfahren

Sogenannte Postklassifizierungsverfahren umfassen Arbeitsschritte zur moderaten Nachbearbeitung der Klassifikationsergebnisse. Dabei erfolgt oftmals eine *reclassification* (Umklassifizierung), indem beispielsweise mehrere Spektralklassen einer Landnutzungsklasse zusammengefasst werden (JENSEN 2005). Darüber hinaus verwendete Verfahren dienen oftmals der Glättung von Klassifikationsergebnissen. Ergebnisse pixelbasierter Verfahren werden in der Regel in unterschiedlichem Ausmaß durch das Auftreten von einzelnen oder kleinen Gruppen von Pixeln, mit mehr oder weniger willkürlich erscheinender Klassenzuweisung, innerhalb ansonsten homogen klassifizierter Bereiche, beeinträchtigt. Dies ist beispielsweise auf eine hohe spektrale Heterogenität der entsprechenden Pixel zurückzuführen (LILLESAND et al. 2008). Zur Abmilderung dieses sogenannten Salz-und-Pfeffer-Effekts (TOWNSEND 1986) werden unterschiedliche Verfahren, die auf räumlichen Filtern beruhen, eingesetzt. Im Gegensatz zur Bilddatenaufbereitung ist dabei zu beachten, dass es sich bei Klassifikationsergebnissen um kategorische Informationen und keine Messwerte handelt. Zur Filterung können daher beispielsweise nur Algorithmen wie Mehrheits- oder Median-Filter eingesetzt werden, die logische Operationen ausführen und keine arithmetischen Berechnungen durchführen (GURNEY & TOWNSEND 1983, THUNNISSEN et al. 1992, LILLESAND et al. 2008, RICHARDS 2012).

### 2.3.6 Status Quo satellitendatengestützter Landnutzungsanalysen

Das Spektrum an fernerkundungs- und vor allem satellitendatengestützten Landnutzungsanalysen ist heutzutage nahezu unüberschaubar. Es reicht von hochaufgelösten und eher kleinräumigen Landnutzungsanalysen über regionale und (inter-) national organisierte Vorhaben bis hin zu grobskaligen kontinentalen und globalen Landbedeckungsklassifikationen. Die Erfassung von Landnutzungs- oder Landbedeckungsänderungen gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung. Da in dieser Arbeit allerdings die differenzierte jahresaktuelle Abbildung der Landnutzung im Vordergrund steht, können Change Detection-Studien und damit verbundene Verfahrensweisen hier nur der Vollständigkeit halber genannt werden (siehe dazu beispielsweise SINGH (1989), LOVELAND & DEFRIES (2004), LU et al. (2004), YUAN et al. (2005), WARNER et al. (2009a), SETIAWAN & YOSHINO (2012) oder CAMPBELL & WYNNE (2011)).

Als Startschuss der satellitendatengestützten Landnutzungserfassung kann der Start von Landsat-1 im Jahre 1972 angesehen werden, wodurch erstmals Landbedeckungsstudien auf regionaler Ebene, vornehmlich durch visuelle Interpretation, durchzuführen waren. In diesem Zusammenhang erwächst rasch der Bedarf unterschiedliche Klassifikationsergebnisse vergleichbar und übertragbar zu machen. Die Veröffentlichung des Klassifikationsschemas von ANDERSON et al. (1976) kann diesbezüglich als richtungsweisend angesehen werden (vgl. Kapitel 2.3.3). Es bildet die Grundlage zahlreicher nationaler Landbedeckungsdatensätze in und außerhalb der USA (LOVELAND 2012). Hinsichtlich der rechnergestützten Identifizierung von Feldfrüchten sowie großflächiger Erntevorhersagen (für Weizen) mittels Landsat-MSS-Daten sind die in den USA durchgeführten Projekte Crop Identification Technology Assessment for Remote Sensing (CITARS) von 1973-1975 (BIZZELL et al. 1975) und Large Area Crop Inventory Experiment (LACIE) von 1973-1978 zu nennen (MACDONALD & HALL 1980). Darauf aufbauend evaluieren beispielsweise HIXSON et al. (1980) die Eignung verschiedener Klassifikationsverfahren (unter anderem MLC) zur Vegetations- und Landbedeckungserfassung. JENSEN & CHERY (1980), HIXSON et al. (1982), ODENWELLER & JOHNSON (1984) oder auch BADHWAR et al. (1987) stellen die Berücksichtigung der phänologischen Entwicklung von Feldfrüchten für die Planung von Fernerkundungsaufnahmen und zur Feldfruchtunterscheidung heraus. Veröffentlichungen wie LANDGREBE (1980) oder SWAIN et al. (1981) stehen für Bestrebungen verbesserte Klassifikationsergebnisse durch hochentwickelte überwachte und unüberwachte Klassifikationsalgorithmen zu erzielen. Strahler STRAHLER et al. (1978) oder HUTCHINSON (1982) präsentierten hingegen Ansätze um eine Steigerung der Klassifikationsgenauigkeit durch die Verwendung von Zusatzdaten (*ancillary data*) herbeizuführen. Durch die Verfügbarkeit von Landsat-TM- (1982) und SPOT-Daten (1986), und dem damit verbundenen Sprung der räumlichen Auflösung von ca. 80 m auf <30 m, ergeben sich verbesserte Bedingungen für Landnutzungsanalysen und zur Erfassung von Vegetationszuständen (WULDER et al. 2008).

Neben den auf Landsat- oder SPOT-Daten beruhenden Landnutzungsanalysen für Regionen oder auf Staatenebene werden erstmals grobskalige multispektrale AVHRR-Daten zur Landbedeckungsanalysen großflächiger Gebiete auf kontinentaler Skala (JUSTICE et al. 1985, TUCKER et al. 1985) eingesetzt. In diesem Zusammenhang thematisierten BROWN et al. (1993) den Mehrwert von Zusatzdaten für die Analyse sehr grob auflösender Fernerkundungsdaten wie AVHRR (vgl. auch LIU et al. (2003), LOVELAND (2012)). In nachfolgenden globalen Landbedeckungsstudien wird die räumliche Auflösung von initial teilweise <8 km bis auf etwa 1 km verbessert. Durch die Nutzung von MODIS-Daten findet eine weitere Erhöhung auf bis zu auf 500 m statt (HANSEN et al. 2000, LOVELAND et al. 2000, FRIEDL et al. 2002). In diesem Zusammenhang sind auch europäische Projekte wie GLC2000 zur Erzeugung globaler Landbedeckungsdaten (BARTHOLOMÉ & BELWARD 2005) sowie Vergleichsanalysen verschiedener globaler Datensätze wie GIRI et al. (2005), NEUMANN et al. (2007) oder KAPTUÉ TCHUENTÉ et al. (2011) zu nennen. Mit dem europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (ehemals Global Monitoring for Environment and Security, GMES) werden zudem viele aktuelle und zukünftige Bestrebungen Landbedeckungsinformationen in verschiedenen räumlichen Auflösungen und unter Verwendung unterschiedlicher Sensorensysteme und Verfahrensweisen zusammengefasst (vgl. ASCHBACHER & MILAGRO-PEREZ (2012)). GONG et al. (2013) präsentieren den ersten globalen Landbedeckungsdatensatz mit 30 m räumlicher Auflösung auf Basis von Landsat-Daten. Einen Ausblick über weitere Entwicklungen globaler Landbedeckungsanalysen geben GIRI et al. (2013).

Auf regionaler bis internationaler Skala entwickeln sich in den 1990er Jahren zahlreiche Bestrebungen Landbedeckungsdatensätze auf Basis von Satellitendaten wie Landsat oder SPOT zu erzeugen. Beispielsweise in den USA erfolgt unter anderem die Produktion der rasterbasierten USGS National Land Cover Database (NLCD1992) mit 30 m Zellengröße (VOGELMANN et al. 2001). Dabei werden neben Landsat-Szenen Zusatzdaten wie digitale Höhenmodelle, Bevölkerungsstatistiken oder Bodendaten genutzt, um Landbedeckungsklassen mittels einer initialen unüberwachten Klassifikation und eines darauf aufbauenden expertenwissensbasierten Decision Tree-Verfahrens abzuleiten (VOGELMANN et al. 1998b). Für die Aktualisierung NLCD2001 wird die Methodik als Datenbank-Ansatz mit mehreren miteinander verknüpften Daten-Layern um einige Aspekte erweitert. Dazu zählen die Analyse von Daten aus drei Zeiträumen (Frühjahr, Sommer, Herbst) sowie die Verwendung von räumlichen Daten zum Versiegelungs- und Bedeckungsgrad in einem regelbasierten Klassifikationsprozess (HOMER et al. 2007). Zusätzlich erfolgt die Analyse auf separate Unterregionen verteilt (HOMER et al. 2004). Der NLCD2006-Datensatz beruht aus Kostengründen nur auf einem Aufnahmezeitraum (FRY et al. 2011).

Der Bedarf an entsprechenden Daten führt in Europa zur Initiierung des CORINE-Programms durch die Europäische Kommission. Daraus resultierten bis heute Landbedeckungsdatensätze basierend auf Landsat-, SPOT- und IRS-Daten für die

Bezugsjahre 1990, 2000 und 2006. Diese decken fast ganz Europa im Maßstab 1:100.000 vektorbasiert ab (vgl. Kapitel 3.3.3). Die Erstellung der CLC-Daten erfolgt allerdings unter Zuhilfenahme von Zusatzinformationen durch visuelle Interpretation.

Bei der Weiterentwicklung fernerkundungsbasierter Landnutzungsanalysen lassen sich unterschiedliche Bestrebungen feststellen, wobei auch mehrere Schwerpunkte miteinander kombiniert werden. Ein Schwerpunkt liegt in der Weiterentwicklung oder der Einführung neuer Klassifikationsalgorithmen in die multispektrale Fernerkundung. Zu den klassischen parametrischen Verfahren wie MLC kommen Anfang der 1990er Jahre zunächst vor allem Artificial Neural Networks (ANN) hinzu. BENEDIKTSSON et al. (1990) stellen das Potential von ANN trotz des damit verbundenen Berechnungsaufwands gegenüber parametrischen Verfahren bei der Anwendung auf verschiedene Datensätze heraus. KANELLOPOULOS et al. (1992) oder CHEN et al. (1995) testen die Eignung von ANN für Landbedeckungsklassifikationen anhand von SPOT-Daten und schätzen diese als überlegen zu parametrischen Verfahren ein. ATKINSON & TATNALL (1997) oder KAVZOGLU & MATHER (2003) geben einen Überblick über unterschiedliche Konzeptionen von ANN zur Analyse von Fernerkundungsdaten. Zeitlich etwas später erfolgt die Einführung von Decision Tree-Verfahren (DT). FRIEDL & BRODLEY (1997) stellen verschiedene Formen von DT vor und kommen zum Ergebnis, dass sie durch ihre nicht-parametrische Beschaffenheit und ihren relativ simplen und intuitiven Aufbau zahlreiche Vorteile gegenüber parametrischen Verfahren aufweisen. PAL & MATHER (2003) vergleichen MLC, ANN und DT für Landbedeckungsklassifikationen und kommen zum Ergebnis, dass vor allem bei hochdimensionalen Daten (z.B. Hyperspektraldaten) DT schlechter abschneiden als MLC und ANN. Gegen Ende der 1990er Jahre werden Support Vector Machines (SVM) als neues nicht-parametrisches Verfahren zur Klassifikation von Fernerkundungsdaten eingeführt. BROWN et al. (1999) vergleichen SVM mit nun etablierten Methoden wie ANN und betonen den geringen Bedarf an Trainingsdaten von SVM, bei dennoch guten Ergebnissen. HUANG et al. (2002) schätzen SVM ebenfalls mindestens konkurrenzfähig ein, stellen aber die Wahl eines geeigneten Kernels heraus. PAL & MATHER (2005) oder DIXON & CANDADE (2008) kommen in weiteren Vergleichsanalysen unterschiedlicher Klassifikationsverfahren ebenfalls zu einem ähnlichen Ergebnis zu Gunsten von SVM. FOODY & MATHUR (2004b) präsentieren einen Ansatz zur effizienten Auswahl von Trainingspixeln für SVM. Die gute Eignung von SVM für Datensätze, die sehr viele Dimensionen aufweisen, wird von MELGANI & BRUZZONE (2004) berichtet. MOUNTRAKIS et al. (2011) dokumentieren den exponentiellen Anstieg an Veröffentlichungen, die SVM als Klassifikationsverfahren im Rahmen der Fernerkundung seit deren Einführung einsetzen. Die Verfügbarkeit räumlich sehr hoch auflösender optischer Satellitensensoren ( $\leq 1$  m) wie IKONOS(-2) (KRAMER 2002) führt etwa ab dem Jahr 2000 auch zur Entwicklung objektbasierter Klassifikationsverfahren, die auf unterschiedlichen bereits verfügbaren Verfahren beruhen (BAATZ & SCHÄPE 2000). So werfen BLASCHKE & STROBL (2001) in diesem Zusammenhang die Frage auf, ob nicht kontextuelle

Zusammenhänge und die stärkere Berücksichtigung des Betrachtungsmaßstabs, anstatt einzelner Pixel, zur Analyse von hochauflösenden Fernerkundungsdaten dienlicher sind. HAY et al. (2003) vergleichen verschiedene Ansätze zur multiskaligen objektbasierten Analyse räumlich hochauflösender Fernerkundungsdaten. BENZ et al. (2004) präsentieren die Arbeitsweisen und Einsatzmöglichkeiten von eCognition als erste rein objektbasierte Software zur Analyse von Fernerkundungsdaten. BLASCHKE (2010) berichtet über den parallel zur SVM-Entwicklung stattfindenden rapiden und anhaltenden Anstieg von Publikationen in denen objektbasierte Verfahren eingesetzt werden. Neben der Einführung neuer Klassifikationsalgorithmen werden Weiterentwicklungen hinsichtlich der fernerkundungsbasierten Landnutzungserfassung auch an die Verfügbarkeit neuer oder andersartiger Sensoren geknüpft. XU & GONG (2007) berichten, dass bei einer Landnutzungs-/Landbedeckungsklassifikation mit hyperspektralen Hyperion-Daten um bis zu 7 % bessere Ergebnisse gegenüber multispektralen ALI-Daten erzielt werden. Oftmals werden auch Versuche unternommen Limitierungen optischer Daten durch die Verwendung oder Integration von RADAR-Daten zu kompensieren. SOLBERG et al. (1994) kombinieren multitemporale Landsat- und ERS-1-SAR-Daten und können dadurch Fehlklassifikationen deutlich reduzieren. BLAES et al. (2005) untersuchen die Kombination von multitemporalen optischen und SAR-Daten zur parzellenbasierten Identifizierung von Feldfrüchten im Hinblick auf die Anwendbarkeit des Verfahrens im Rahmen von Kontrollsystemen. WASKE & BENEDIKTSSON (2007) kombinieren optische Daten und SAR-Daten in einem mehrstufigen Klassifikationsprozess mittels SVM und erzielen damit deutlich bessere Ergebnisse als mit MLC, DT oder Kombinationen aus mehreren Verfahren. ANTONARAKIS et al. (2008) nutzen hingegen flugzeuggestütztes LIDAR zur Landbedeckungsklassifikation durch Messung der Höhenunterschiede zwischen Erdoberfläche und Vegetationsoberfläche (Vegetationshöhe), Punktdichte der zurückreflektierten Messungen sowie deren Intensität. Dabei werden grundlegende Landnutzungsklassen unter anderem Wasser, unbedeckter Boden und verschiedene Vegetationstypen (Wald, niedrige Vegetation) unterschieden.

Obwohl die Evaluierung von Ergebnissen eigentlich seit langem ein fester Bestandteil von fernerkundungsbasierten Landnutzungsanalysen ist (STORY & CONGALTON 1986, CONGALTON 1991, STEHMAN & CZAPLEWSKI 1998), hat dieser Aspekt in den letzten zehn Jahren nochmals deutlich an Bedeutung gewonnen. So ist in diesem Kontext die Veröffentlichung von FOODY (2002) ‚Status of land cover classification accuracy assessment‘ zum jetzigen Zeitpunkt die am häufigsten zitierte Publikation laut Web of Science.

Wie einige der genannten Beispiele wie HUTCHINSON (1982), BROWN et al. (1993), VOGELMANN et al. (1998a), BENZ et al. (2004) bereits andeuten, wird die Verbesserung von Landnutzungsanalysen seit jeher auch durch die Integration von verschiedenen (auch nicht fernerkundungsbasierten) Datensätzen und Methoden in unterschiedlichen Analysephasen angestrebt, die nicht mit klassischen Bildanalyseverfahren im Rahmen der Fernerkundung

allein zu bewerkstelligen sind. Dies erfolgt üblicherweise durch die Anwendung von GIS-Verfahrensweisen.

## 2.4 Landnutzungsanalysen mittels Fernerkundung und GIS

Die Kombination von Fernerkundungsanalysen und GIS schafft die Möglichkeit zusätzliche räumliche oder nicht-räumliche Daten sowie weiterführende Methoden in den Prozess der Landnutzungsanalyse zu integrieren, um durch diese synergetische Nutzung verbesserte Ergebnisse zu erzielen (MATHER & KOCH 2011). Dabei wird grundsätzlich eine Verbesserung der thematischen oder geometrischen Genauigkeit als auch der thematischen Detailliertheit angestrebt (LILLESAND et al. 2008). Bevor auf die unterschiedlichen Arten und Arbeitsweisen zur Integration von Daten und Methoden in eine Landnutzungsanalyse eingegangen werden kann, ist zunächst die Darstellung grundlegender Eigenschaften von GIS hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen notwendig.

### 2.4.1 Geographische Informationssysteme

Die grundlegende Aufgabe eines Geographischen Informationssystems (GI-System, GIS), synonym auch Geo-Informationssystem, ist die (gemeinsame) Behandlung verschiedenster digitaler raumbezogener Daten (BILL 2010, KAPPAS 2011). GIS kommen heutzutage in den unterschiedlichsten Bereichen wie beispielsweise Vermessungs- und Katasterwesen, (Geo-) Wissenschaft, Ressourcenmanagement, Umweltplanung, Stadt- und Entwicklungsplanung Logistik oder Transportwesen, in denen Geoinformationen verarbeitet werden, zum Einsatz (LONGLEY et al. 2011).

#### 2.4.1.1 Aufbau und Arbeitsweisen von GIS

Die Entwicklung von GIS zur digitalen Behandlung von Geographischen Daten beginnt in den 1960er Jahren und ist eng mit Entwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnologie verknüpft. Als eines der ersten GIS gilt das Canada Geographic Information System (CGIS), das am Department of Forestry and Rural Development unter der Leitung von R. Tomlinson zur Aufbereitung von Bestandsdaten zum ländlichen Raum Kanadas entwickelt wird (LANGE 2013). BARTELME (2005), BILL (2010) oder LONGLEY et al. (2011) unterscheiden verschiedene zeitliche Epochen der Entwicklung von GIS bis zu seiner heutigen Form. Der Zeitraum bis in die Mitte der 1970er Jahre wird als Pionierphase gesehen,

die vor allem unter den Aspekten der Hardware und Methodenentwicklung zu sehen ist. Anfang der 1970er Jahre beginnen zudem Behörden wie der U.S. Geological Survey (USGS) Geodaten mit Computern zu verarbeiten und zu verwalten. In den frühen 1980er Jahren veröffentlichen kommerzielle Firmen erste eigene GIS (beispielsweise Arc/Info von ESRI) für Workstations. Daneben bauen Behörden ihre vorhandenen Systeme zu umfassenderen thematisch spezialisierten Informationssystemen aus (BARTELME 2005). Die 1990er Jahre führen zu einer starken Ausbreitung von GIS auf Desktop-Systemen und zu einem offenen Markt für GI-Systeme und Geodaten. Durch die Entwicklung des Internets nehmen Webanwendungen von GIS ab etwa 1993 einen zunehmenden Stellenwert ein (LONGLEY et al. 2011). Je nach Sichtweise lassen unterschiedliche Definitionen von GIS unter dem Aspekt eines Sets von Werkzeugen, im Sinne eines räumlichen Datenbanksystems, als eine Institution oder Organisation die räumliche Daten behandelt oder als eine eigene Technologie zusammenfassen (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Eine Definition, die viele Aspekte gegenwärtiger GIS zusammenfasst, gibt BILL (2010), S. 8:

*„Ein Geo-Informationssystem (GIS) ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software und Daten besteht und mit dem sich raumbezogene Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten modellieren und bearbeiten lassen. Die dafür benötigten raumbezogenen Daten/Informationen können digital erfasst, redigiert, verwaltet und reorganisiert, analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden. GIS bezeichnet sowohl eine Technologie, Produkte als auch Vorhaben zur Bereitstellung und Behandlung von Geoinformationen.“*

Ein GIS setzt sich demnach aus den physikalischen Komponenten Hardware, Software, Daten einerseits sowie dem Nutzer andererseits zusammen. Es ist oftmals ein integriertes Computersystem, das aus einer Vielzahl an Software- und Hardware-Werkzeugen besteht, die genau aufeinander abgestimmt sein müssen (KAPPAS 2011). Abbildung 2.6 stellt den Aufbau eines klassischen GIS dar. Die Hardware umfasst üblicherweise eine zentrale Recheneinheit mit CPU (*central processing unit*), diverse Laufwerke zur Datenspeicherung, Eingabegeräte, Drucker oder Plotter sowie Bildschirmausgabegeräte (BILL 2010). Die Spannweite von GI-Systemen erstreckt sich heutzutage von ursprünglich lokal in sich abgeschlossenen Systemen (zum Beispiel EDV-Arbeitsplatz mit Desktop-GIS) einerseits bis hin zu Hochleistungserversystemen, umfasst andererseits aber auch Smartphones oder Tablets (BILL 2010). Der Vernetzung der einzelnen Komponenten (über Bussysteme oder Netzwerktechnologien) kommt, teilweise unabhängig von der Größe des Systems, durch den Einfluss des Internets eine immer größer werdende Bedeutung zu (LONGLEY et al. 2011). Die einzelnen Komponenten Hardware, Software, Daten und auch die Anwender befinden sich oftmals an unterschiedlichen Orten und sind über das Internet mit einander verbunden. Der Zugriff erfolgt dabei beispielsweise per Webinterface (als WebGIS) über einen Webbrowser (vgl. BAASER (2010)).



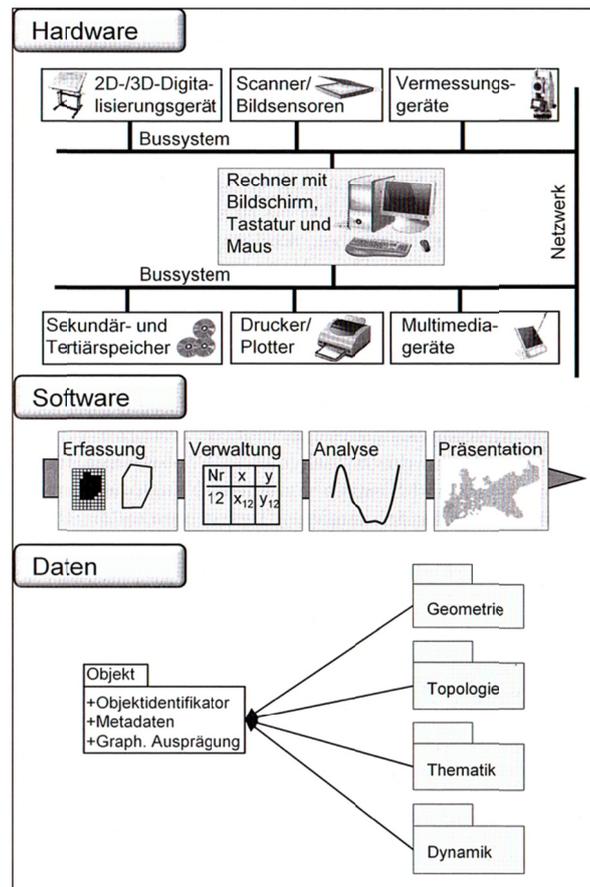


Abbildung 2.6: Aufbau eines Geo-Informationssystems (BILL 2010), verändert.

Die Arbeiten, die ein GIS über die Software ausgeführt (vgl. Abbildung 2.6), lassen sich in die funktionalen Komponenten Erfassung (Input), Verwaltung (Management), Analyse (Analysis) und Präsentation (Presentation) einordnen (EVAP- beziehungsweise IMAP-Komponenten) (BILL 2010). Die Erfassung oder Eingabe beinhaltet dabei einerseits die Dateneingabe, über mit einem Rechner verbundene Eingabegeräte, in Form von Digitalisieren oder Scannen (vgl. Abbildung 2.6). Andererseits umfasst sie auch die Verfahrensweisen zur Datenaufnahme im Gelände oder der Photogrammetrie. Aus der Perspektive der Geoinformationswissenschaft wird die Datenerhebung und Analyse im Rahmen der Fernerkundung auch zu den Arbeitsweisen im Sinne eines GIS gezählt (vgl. Kapitel 2.3) (BILL 2010, KAPPAS 2011).

Zur Dateneingabe zählt zudem die Integration bereits bestehender Geodaten von Behörden oder Landesvermessungsämtern wie beispielsweise dem ATKIS (vgl. Kapitel 3.3.1). Dazu sind aber mitunter geeignete Schnittstellen notwendig. Darüber hinaus ist zum Datenimport, in Abhängigkeit von der Fragestellung, auch die Konvertierung unterschiedlicher Datenformate oder Datenmodelle notwendig (KAPPAS 2011).

Die Verwaltungskomponente umfasst die Speicherung und Organisation unterschiedlicher Datentypen sowie deren interaktive Manipulation in einer Geodatenbank, dessen Verwaltung gewöhnlich über ein Datenbankmanagementsystem (DBMS) erfolgt. Räumliche und

anderweitige Daten (Sachdaten) werden darin datentypspezifisch organisiert und beispielsweise mit Metadaten versehen (BRINKHOFF 2013).

Das Spektrum der Analysefunktionen reicht von einfachen Abfragen auf (mehrere) Datensätze oder komplexen statistischen oder mathematischen Auswertungen über die Konvertierung oder Transformierung bis hin zu Verknüpfungen oder Verschneidungen von Daten aufgrund geometrischer, logischer oder relationaler Eigenschaften. Auch Netzwerkanalysen und Routing sind typische GIS-Analysen (LONGLEY et al. 2011). Die gewöhnlich hohe Anzahl und Komplexität der räumlichen Analysefunktionalitäten grenzt GIS von anderen Informationssystemen oder CAD-Programmen (Computer-Aided Design) ab (KAPPAS 2011).

Die Präsentationsfunktionalitäten dienen der Veröffentlichung und Visualisierung von Ergebnissen in unterschiedlichen Medien. Dies erfolgt entweder lokal am Bildschirm oder beispielsweise in Form von Kartendiensten (WebGIS) über das Internet, selbstverständlich aber auch als digitales oder gedrucktes Kartenwerk. Geodaten lassen sich mittels GIS dazu in unterschiedlichem Maße kartographisch aufarbeiten. GIS ermöglichen allerdings auch die Ausgabe nichtgraphischer Ergebnisse als Report oder Tabelle (KAPPAS 2011).

Aufgrund der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten von GIS existieren heutzutage je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Spezialisierungen. Hinsichtlich der Informationsfunktion spricht man im deutschsprachigen Raum daher unter anderem auch von Land- (LIS), Raum- (RIS), Umwelt- (UIS) oder auch Fachinformationssystemen (FIS) (BILL 2010, KAPPAS 2011). LIS behandeln dabei vornehmlich Liegenschafts- und Topographiedaten und bilden daher die Basis für andere thematische Informationssysteme wie beispielsweise UIS, die Umweltdaten für ein Land oder eine Region bereitstellen (BILL 2010).

#### **2.4.1.2 Raumbezug**

Das Hauptunterscheidungsmerkmal von GIS gegenüber anderen Informationssystemen ist die explizite Ausrichtung auf die Behandlung raumbeschreibender Daten (KAPPAS 2011). Entsprechende geographische Daten (oder Geodaten) enthalten neben der thematischen Information eine Angabe zur räumlichen Zuordnung auf der Erdoberfläche (Georeferenz). Diesbezüglich ist grundsätzlich ein direkter von einem indirekten Raumbezug zu unterscheiden. Bei Letzterem handelt es sich beispielsweise um einen Verweis auf einen Ort oder eine Fläche in Form einer Hausnummer oder einer Postleitzahl (BILL 2010). Die Herstellung eines direkten Raumbezugs erfolgt hingegen in Form von zwei- oder dreidimensionalen Koordinaten (zum Beispiel geographische Breite und Länge), denen ein vordefiniertes Koordinatenreferenzsystem zugrunde liegt und anhand dessen jede Position auf

der Erdoberfläche ausgewiesen werden kann (BILL 2010). Als Referenzsysteme dienen im Allgemeinen dreidimensionale geodätische Bezugssysteme, die die Gestalt der Erde modellhaft in Form eines oftmals geozentrisch gelagerten Ellipsoids wiedergeben (KAHMEN 2005). Ein global bedeutendes Referenzsystem ist beispielsweise das World Geodetic System 1984 (WGS84), das auch zur Positionsbestimmung durch das Navigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System (NAVSTAR GPS) eingesetzt wird (MANSELD 2010). Anhand von Kartenprojektionen werden ellipsoidische Koordinaten eines Referenzsystems über mathematische Abbildungen zu rechtwinkligen (kartesischen) Koordinaten auf die Flächen projiziert oder umgerechnet (HAKE et al. 2002). Fernerkundungsdaten satellitengestützter Systeme liegt gewöhnlich das WGS84 als Referenzsystem zugrunde, die durch die darauf aufsetzende Universal Transverse Mercator-Projektion (UTM) in die ebene Darstellung überführt werden.

#### 2.4.1.3 Geoinformationen und Datenmodelle

Um die komplexen Phänomene der realen Welt rechnergestützt verarbeiten zu können, ist deren Vereinfachung notwendig. Die Bildung sogenannter Geoobjekte, als generalisierte Form eines Objekts der realen Welt (Entität), erfolgt im GIS unter Anwendung unterschiedlicher Modelle, die auf deren hauptsächlich betrachtete Eigenschaften angepasst sind. Geoobjekte weisen, je nach Zweck, eine unterschiedlich hohe Komplexität (Dimension) auf (BILL 2010). Die abzubildenden Eigenschaften eines Geoobjekts lassen sich in geometrische und topologische sowie in thematische aber auch temporale Eigenschaften einordnen, die zumeist unterschiedlich viele Dimensionen aufweisen können.

Neben der Betrachtung von Phänomenen als diskret (qualitativ) mit scharfer Abgrenzung (beispielsweise eine Landnutzungsklasse oder ein Gebäude), ist allerdings auch die Repräsentation von sich kontinuierlich (quantitativ) im Raum verändernden Erscheinungen (zum Beispiel eine Geländeoberfläche) möglich (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Die Speicherung verschiedener Eigenschaften von diskreten Geoobjekten erfolgt im GIS über die grundsätzlichen Datentypen Geometriedaten und Sachdaten (Attributdaten). Angaben hinsichtlich der kartographischen Darstellung räumlicher Phänomene geben Grafikdaten (BILL 2010). Die Geometriedaten beschreiben die relative Lage und Form von Geoobjekten im Raum, die mittels eines direkten Raumbezugs in Verbindung mit einem einheitlichen Bezugsrahmen konkretisiert wird. Die Grundelemente von Geoobjekten bilden dabei Punkte, Linien oder Flächen (vgl. Abbildung 2.7) (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Geometrieinformationen können sowohl zweidimensional (2D) mittels x,y-Koordinaten als auch dreidimensional (3D) durch x,y,z-Koordinaten beschrieben werden. Bei 3D-Geometrien ist zwischen Linien-, Flächen- und Volumenmodellen zu unterscheiden. Letztere sind für den Rahmen dieser Arbeit zu vernachlässigen. 2,5D-Geometrien umfassen neben der planaren

Ausbreitung (x,y) zusätzlich eine Höheninformation als Attribut. Mit Form und Lage eines Objekts sind topologische Eigenschaften eng verknüpft, die über die Ausdehnungen, Verbindungen und Nachbarschaftsbeziehungen Auskunft geben (KAPPAS 2011). Die Darstellung räumlicher Phänomene erfolgt im GIS je nach Art und Verwendungszweck wahlweise im Vektordatenmodell oder im Rasterdatenmodell mit für beide Modelle verschiedenen Umsetzungen.

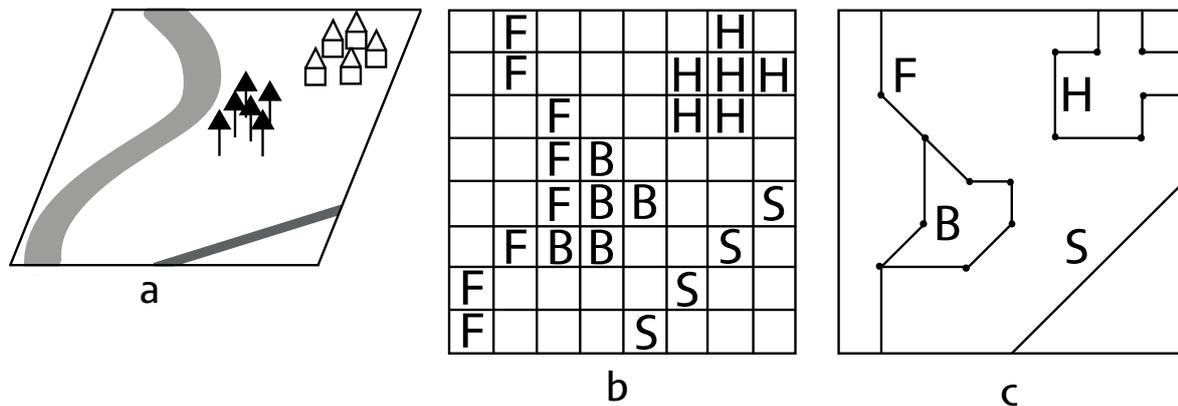


Abbildung 2.7: Darstellung der realen Welt (a) im Raster- (b) und Vektordatenmodell (c), nach GOMARASCA (2009), verändert.

Beim topologischen Vektordatenmodell erfolgt die diskrete Beschreibung raumbezogener Objekte durch einzelne Punkte, denen Koordinaten zugewiesen sind (LANGE 2013). Durch die Verbindung sequentiell angeordneter Punkte (Tupel oder *vertex*) durch gerichtete Linien (als Vektoren (*arcs*)) werden linienhafte Strukturen dargestellt. Durch geschlossene Linienstrukturen (gleiche Start- und Endkoordinaten) mit mindestens drei Punkten erfolgt die Bildung von Flächen (Polygonen). Da im topologischen Vektormodell Nachbarschaftsbeziehungen abgespeichert werden (von Knoten als Teil eines Netzwerks oder zwischen angrenzenden Objekten), ist eine effiziente Datenspeicherung möglich, womit eine redundante Speicherung von Geometrien vermieden werden kann (KAPPAS 2011, LONGLEY et al. 2011). Vektordaten können in allen Maßstabsbereichen eingesetzt werden, nehmen aber vor allem bei großen Maßstäben eine dominante Rolle ein (BILL 2010). Sie ermöglichen eine präzise geometrische Datenerfassung und Darstellung und können leicht in andere Bezugssysteme transformiert werden (BURROUGH & MCDONNELL 1998, KAPPAS 2011). Ihre Datenstruktur ist jedoch vergleichsweise komplex und für räumliche Analysen nicht immer geeignet. Zur räumlichen Verschneidung mehrerer Datensätze muss die topologische Struktur exakt übereinstimmen (BURROUGH & MCDONNELL 1998).

Im Gegensatz zu Vektordatenmodellen liegt Rasterdatenmodellen eine ausschließlich flächenhafte (zweidimensionale) Darstellung von Objekten zugrunde. Rasterdaten beruhen auf Zellen (Pixeln), die aneinander angrenzend in einer Gitterstruktur (auch Tessellation oder Grid) angeordnet sind. Rasterdaten verfügen in der Regel (mit Ausnahme von beispielsweise *Quadtrees*, vgl. HEYWOOD et al. (2011)) über ein gleichförmiges und quadratisches Ausmaß,

wobei jeder Zelle ein Wert zugeordnet ist (KAPPAS 2011). Aus der Gitterstruktur sind topologische Nachbarschaftsbeziehungen direkt ableitbar, es bestehen jedoch keine logischen Beziehungen zwischen benachbarten Zellen (BILL 2010). Während durch Fernerkundungssensoren aufgezeichnete Rasterdaten kontinuierliche Werte umfassen, erfolgt die Darstellung von diskreten Objekten, Entitäten oder Klassen durch die Vergabe eindeutiger und sich gegenseitig ausschließender Zellenwerte. Die Darstellung von punktuellen, linienförmigen oder flächenhaften Phänomenen erfolgt im Rastermodell durch die entsprechende räumliche Anordnung von Zellen mit gleichem Zellenwert (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Zur Abbildung bestimmter Objekte ist eine geeignete Zellengröße von Bedeutung (KAPPAS 2011). Datenstruktur und inhärente Topologie von Rastermodellen eignen sich besonders zur Überlagerung und Verschneidung mehrerer thematischer Layer, solange Zellengröße und -ausrichtung übereinstimmen. Weitere Vorzüge sind die gute Eignung zur Anwendung räumlicher Filter und für mathematische Berechnungen (beispielsweise zur Modellierung) (BARTELME 2005, LANGE 2013). Die Überführung von Rasterdaten in ein anderes räumliches Bezugssystem ist allerdings aufwendiger als bei Vektordaten (BURROUGH & MCDONNELL 1998).

Neben Geometriedaten dienen nicht-räumliche Sachdaten (Attributdaten oder thematische Daten) zur weiteren Charakterisierung eines Objekts unter verschiedenen thematischen Aspekten (HEYWOOD et al. 2011). In GIS wird für Attributdaten vor allem das relationale Datenmodell eingesetzt (BILL 2010). Für eine Übersicht weiterer Datenmodelle sei an dieser Stelle auf BRINKHOFF (2013) verwiesen. Im relationalen Datenmodell sind Daten (Informationen) in Tabellen in Zeilen und Spalten organisiert. Spalten enthalten dabei die einzelnen thematischen Attributarten (beispielsweise: Landnutzungsklasse, Bodentyp, Einwohnerzahl). Jede Zeile enthält jeweils alle Attributwerte, die einem Objekt zugeordnet sind (KAPPAS 2011). Die Verknüpfung von Geoobjekt und Attributwerten einer Tabelle erfolgt durch ein eindeutiges sogenanntes primäres Schlüsselattribut (oder Identifizierungsnummer, *identifer*), das in jedem Datensatz hinterlegt ist (LANGE 2013). Das relationale Datenmodell zeichnet sich vor allem durch seine einfache Datenstruktur, leichte Verknüpfbarkeit unterschiedlicher Datentabellen sowie durch die Anwendbarkeit der verbreiteten Datenbankabfragesprache Standard Query Language (SQL) aus. Gängige vektorbasierte Datenformate wie beispielsweise das ESRI-Shapefile-Format speichern neben geometrischen Informationen auch damit verknüpfte thematische Information in Attributtabellen (im dBase-Format) (ESRI 2013e). Rasterdaten sind in ihrer einfachen Form hingegen nur in der Lage ein Attribut pro Rasterebene anhand des Zellewertes zu transportieren. Daher ist gewöhnlich die Verwendung mehrerer Rasterebenen zur Erhöhung der thematischen Dimension notwendig.

#### 2.4.1.4 Datenanalyse im GIS

Gängige GIS bieten unzählige Werkzeuge zur Analyse räumlicher Daten unter anderem durch statistische, arithmetische, logischen oder multivariate Verfahren (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Im Folgenden wird sich auf die grundlegenden und für eine Landnutzungsanalyse relevanten Methoden beschränkt. Zur Strukturierung und gemeinsamen Nutzung (unterschiedlicher) geographischer Daten erfolgt in GIS gewöhnlich deren Einordnung als thematische Ebenen (Layer) (vgl. Abbildung 2.8). Diese werden mittels sogenannter Overlay-Techniken (georeferenziert) übereinander gelagert dargestellt und analysiert (BERNHARSDEN 2002, KAPPAS 2011). Aus der Anzahl der verschiedenen thematischen Layer, aber auch aus der Anzahl der in einem Datensatz enthaltenen Attribute, resultiert dabei die thematische Dimension einer Analyse (BILL 2010).

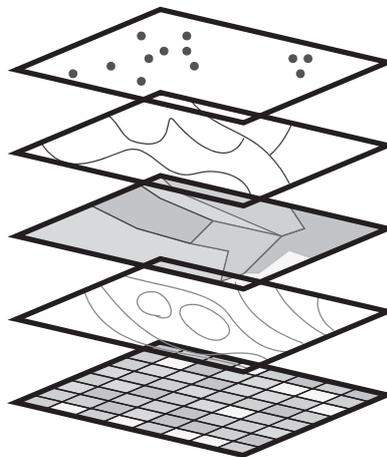


Abbildung 2.8: Organisation von Raster- und Vektordatensätzen im GIS als übereinander gelagerte thematische Ebenen (Layer) (BRINKHOFF 2013), verändert.

Während GI-Systeme eine lange Zeit jeweils nur auf ein Datenmodell festgelegt waren (Raster-GIS oder Vektor-GIS), sind aktuelle GIS oftmals als sogenannte hybride Systeme in der Lage mehrere Datenmodelle parallel zu behandeln. Diese ermöglichen als einfachste Form sogenannter Overlay-Analysen beispielsweise die kombinierte räumliche Darstellung einer rasterbasierten Fernerkundungsszene mit im Vektorformat vorliegenden Straßengeometrien oder Landnutzungsgrenzen als unterschiedliche thematische Ebenen (HEYWOOD et al. 2011). Auf solch einer Datenbasis sind dann einfache kombinierte Attributabfragen für einen bestimmten Standort möglich (BERNHARSDEN 2002). Zur Beantwortung komplexer Fragstellungen und zur Ableitung neuer Informationen dienen Overlay-Operationen, bei denen geometrische und thematische Informationen (Attribute) mehrerer Eingabe-Layer miteinander verschnitten und in einem neuen Layer zusammengefasst werden (HEYWOOD et al. 2011). Allerdings ist die Durchführung komplexer Overlay-Analysen auch bei hybriden Systemen auf ein Datenmodell beschränkt (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Es ist daher zwischen Vektor-Overlay- und Raster-Overlay-Verfahren zu wählen. Zur Durchführung von Overlay-Analysen mit thematischen Ebenen, denen ein unterschiedliches Datenmodell

zugrunde liegt, bieten hybride Systeme gewöhnlich verschiedene Werkzeuge, um Konvertierungen zwischen dem Raster- und Vektordatenmodell durchzuführen (vgl. Kapitel 2.4.1.5). Weitestgehend unabhängig vom Datenmodell, in dem die Overlay-Analyse vollzogen wird, erfolgt im Vorfeld der Datenverschneidung gewöhnlich eine Auswahl gewünschter räumlicher und thematischer Informationen. Dies ist beispielsweise mittels Operationen der Boole'schen Algebra über SQL-Abfragen möglich (BURROUGH 1992, MATTIKALLI 1995, BURROUGH & MCDONNELL 1998, KAPPAS 2011) (vgl. Kapitel 5.6.1). Beim Vektordatenmodell sind die wesentlichen Typen Polygon-Overlay (Flächenverschneidung), Polygon-Linien-Overlay und Polygon-Punkt-Overlay zu unterscheiden. Bei den beiden letzteren Varianten erfolgt in den meisten Fällen lediglich eine Übertragung von Attributen zwischen den in die Operation einbezogenen Layern beziehungsweise Objekten, wobei Linien mitunter zudem in einzelne Segmente unterteilt werden (BERNHARSEN 2002). Beim Polygon-Overlay werden neben Geometrieinformationen auch Attribute der einbezogenen Layer auf verschiedene Arten mittels aus der Mengenlehre bekannten Operationen miteinander verschritten (KAPPAS 2011). Eine grundlegende Operation ist beispielsweise die Zusammenführung aller Geometrien der Eingabe-Layer (*union*), was mitunter zu einer starken Zerteilung von Flächen im Überlappungsbereich führt. Die Verschneidungen von Eingabe-Layern kann unter verschiedenen Gesichtspunkten auf bestimmte Flächen (beispielsweise *identity* oder *intersect*) beschränkt werden (HEYWOOD et al. 2011). Mittels der Operation *update* werden Polygonbereiche eines Eingabe-Layers durch Polygone eines anderen Eingabe-Layers im Ausgabe-Layer überschrieben (DE SMITH et al. 2009). Die geometrische und topologische Homogenität der Eingabe-Layer sind im Vektordatenmodell von herausragender Bedeutung (zum Beispiel Positionsübereinstimmung von Knoten unterschiedlicher Layer, die dieselbe Entität repräsentieren) (BURROUGH & MCDONNELL 1998).

Flächenverschneidungen im Rasterdatenmodell (Raster-Overlay) erfolgen hingegen durch die Verbindung der einzelnen sich überlappenden Zellen der einbezogenen thematischen Rasterebenen (HEYWOOD et al. 2011). Viele geometrische Aspekte, die die Behandlung von Vektordaten erschweren (z.B. uneinheitliche Geometrie angrenzender Objekte), treten durch die eindeutige Rastergeometrie hier nicht auf (BARTELME 2005). Alle Rasterzellen müssen dazu „lediglich“ über dieselbe Position (gleicher Ursprung der Raster), Orientierung und Größe verfügen, damit die einbezogenen Layer eine einheitliche Topologie aufweisen (BERNHARSEN 2002).

Eine Möglichkeit der Verschneidung von kategorischen Informationen beim Raster-Overlay ist die Anwendung sogenannter Map Algebra (BILL 2010). Dabei werden die einzelnen Zellenwerte der Eingabe-Layer miteinander addiert, subtrahiert, multipliziert oder dividiert und als Ergebnis in einem neuen Raster-Layer gespeichert (DE SMITH et al. 2009). Dabei ist die geeignete Kodierung der Zellenwerte von herausragender Bedeutung, damit die durch die Verschneidung entstandenen Klassenwerte eindeutig sind und auf die Eingangsklassen

zurückgeschlossen werden kann (HEYWOOD et al. 2011). Darüber hinaus besteht wie auch beim Vektor-Overlay die Möglichkeit mittels logischer Operationen zuvor selektierte Zellenwerte aus unterschiedlichen Eingaberastern 1:1 zu übertragen (BERNHARDSEN 2002).

#### 2.4.1.5 Aufbereitungsverfahren zur Integration von Raster- und Vektordaten in GIS

Gängige hybride GIS bieten zahlreiche (Bild-) Datenaufbereitungs- und Konvertierungswerkzeuge. Zur Integration unterschiedlicher Datenmodelle und Datentypen sind für das Themenfeld dieser Arbeit besonders Methoden zur Raster-/Vektor-Konvertierung, Georeferenzierung und geometrischen Anpassung sowie zur Umklassifizierung thematischer (kategorischer) Informationen von Bedeutung. Bei der Vektor-zu-Raster-Konvertierung erfolgt die Rasterung von Polygonen, Linien oder Punkten unter Angabe einer bestimmten Zellengröße. Unter Berücksichtigung des Maßstabs der thematischen Daten, der Zielzellengröße und der räumlichen Anordnung des Rasters (in Bezug auf dessen Ursprung), können verschiedene Verfahren zur Zuweisung der Zellenwerte für das ausgewählte Attribut (Entitätsklasse, Landnutzungs-kategorie, etc.) eingesetzt werden. So kann aus Polygon-Eingabedaten bei einer Aggregation beispielsweise entweder die thematische Information im Zentrum einer Zielzelle, die Kategorie mit der größten Einzelfläche im Zellabdeckungsbereich oder die Kategorie mit der größten Gesamtfläche innerhalb einer Zelle als Zielzellenwert bestimmt werden (ESRI 2013c). Die Überführung von Vektorgeometrien in eine Rasterstruktur ist; in Abhängigkeit von der Zellengröße, mit einer unterschiedlich starken Generalisierung oder Positionsverlagerung verbunden. Bezüglich der Konvertierung von Liniengeometrien ist zu beachten, dass diese je nach Gestalt im Rastermodell mindestens die Breite einer Rasterzelle einnehmen (HEYWOOD et al. 2011). Die Raster-zu-Vektor-Konvertierung (Raster-zu-Polygon) kategorischer (diskreter) Daten umfasst sowohl die Zusammenfassung von aneinandergrenzenden und mit dem gleichen Zahlenwert ausgestatteten Zellen zu einem Polygon, als auch die Überführung einzelner „isolierter“ Zellen. Dabei bleibt die rasterartige Geometrie im Vektordatenmodell grundsätzlich erhalten (MATTIKALLI 1995). Um die treppenartige geometrische Gestalt abzumildern, besteht die Möglichkeit eine Glättung der Polygongrenzen durchzuführen (ESRI 2013d). Die ebenfalls möglichen Konvertierungen Raster-zu-Punkt oder Raster-zu-Linie beschreiben HEYWOOD et al. (2011). Neben der Datenmodellangleichung sind für Overlay-Analysen mitunter (relative) Positionskorrekturen, Homogenisierungen der geometrischen Gestalt oder topologischer Zusammenhänge von Geoobjekten sowie die Angleichung des zugrundeliegenden Koordinatensystems notwendig (KAPPAS 2011). Die geometrische Anpassung von Rasterdaten durch räumliche Verschiebung, Entzerrung, Skalierung und Resampling zur Erzielung der Lageübereinstimmung (Registrierung oder Koregistrierung) entspricht weitestgehend der in Kapitel 2.3.5.1 dargestellten Vorgehensweise zur Georeferenzierung von



Fernerkundungsdaten. Das in GIS gängige *rubber sheeting*-Verfahren ermöglicht äquivalent zur Rasterentzerrung mittels Fernerkundungssoftware die geometrische und topologische Anpassung sowohl von Vektordaten als auch von Rasterdaten auf Basis von Passpunkten. Unter Anwendung von mathematischen Transformationen wird dabei durch Zerrungen und Stauchungen (und im Fall von Rasterdaten zusätzlich Interpolation) eine Homogenisierung angestrebt (BURROUGH & MCDONNELL 1998, HEYWOOD et al. 2011). Zum alleinigen Wechsel des Koordinatensystems stehen in GIS heutzutage üblicherweise an den jeweiligen Fall angepasste Transformationsmethoden zur Verfügung. Des Weiteren kann die Übernahme von thematischen Informationen, beispielsweise vom Vektor- ins Rasterdatenmodell, eine Umformung (Umklassifizierung) von Strings (Texts) in numerische Werte bedingen. Fernerkundungs- und GIS-Software bieten daher verschiedene Werkzeuge zur Manipulation von Attribut- beziehungsweise Zellwerten. Vor allem in Bezug auf Rasterdaten ist heutzutage eine deutliche Annäherung von GIS- und Fernerkundungssoftware zu erkennen, da GIS zunehmend auch Methoden zur Bildbearbeitung und -analyse standardmäßig enthalten (KAPPAS 2011).

#### **2.4.2 Ansätze zur Integration von GIS und FE in Landnutzungsanalysen**

Fernerkundungs- und GI-Systeme wurden für unterschiedliche Zwecke konzipiert und entwickelten sich lange Zeit weitestgehend unabhängig voneinander (MERCHANT & NARUMALANI 2009). Beide Technologien behandeln jedoch große Mengen geographischer Daten in unterschiedlichen Skalen und beruhen auf ähnlichen Hardware- und Softwarekonzepten (EHLERS 1992). Aufgrund dieser Überschneidungen gibt es bereits seit Mitte der 1970er Jahre Untersuchungen zur Kombination von Fernerkundungsdaten und anderen (vektorbasierten) Geodaten mittels GIS-Verfahrensweisen (STRAHLER et al. 1978, STOW & ESTES 1981, HUTCHINSON 1982). In den 1990er Jahren entwickeln sich daraus größere Bestrebungen wie die NCGIA Initiative-12 des National Center For Geographic Information and Analysis (STAR et al. 1991) oder IGIS (integrated geographic information system) (DOBSON 1993), um beide Technologien nahtlos in einem System zu vereinen. LUNETTA et al. (1991), GOODCHILD (1994) oder WILKINSON (1996) weisen hinsichtlich der Integration von GIS und Fernerkundung neben den Möglichkeiten auch auf die dabei zu beachtenden Fehlerquellen hin. Im Zusammenhang der NCGIA Initiative-12 formuliert EHLERS (1990) drei Stufen (Level) zur technologischen Integration von Fernerkundungssystemen und GI-Systemen (vgl. Abbildung 2.9). Level 1-Integration (a) umfasst die bereits vorgestellte gemeinsame Darstellung von fernerkundungsbasierten Rasterdaten und (vektorbasierten) geographischen Daten (Geodaten) beispielsweise zur visuellen Interpretation sowie zum gegenseitigen Austausch von Vektor- und Rasterdaten zwischen beiden Systemen. Eine Level 2-Integration (b) bildet die nahtlose Angleichung der Bedienungsoberfläche sowie die

kombinierte Prozessierung (und Konvertierung) von verschiedenen Datenmodellen und Attributdaten. Mit der Level 3-Integration (c) wäre der Übergang zu einem einzigen integrierten System vollzogen.

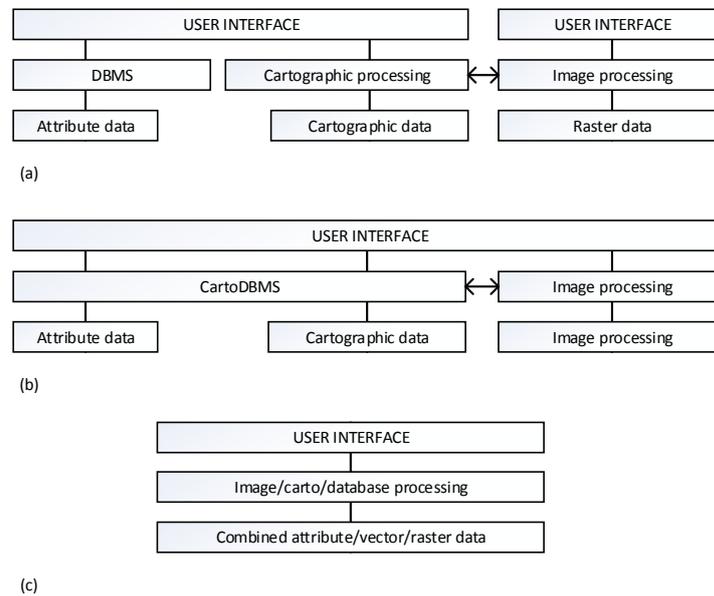


Abbildung 2.9: Level der technischen Integration von Geographischen Informationssystemen und Fernerkundungssystemen. (a) Level 1: beide Systeme sind lediglich durch Datenaustauschnittstellen verbunden. (b) Level 2: die Softwaremodule beider Systeme verfügen über eine einheitliche Bedienoberfläche und sind in der Lage Raster- und Vektordatenmodelle und Attributdaten kombiniert zu verarbeiten. (c) Level 3: ein ununterscheidbares System, das alle Technologien in sich vereint (EHLERS 1990), verändert.

Während heutige Systeme in der Regel eine Level 2-Integration ermöglichen und fortführende Ansätze bestehen, ist trotz großer Fortschritte in den letzten Jahren auch gegenwärtig das dritte Level noch nicht erreicht, so dass zwar eine integrierte Datenanalyse möglich ist, dazu aber noch unterschiedliche Systeme miteinander zu kombinieren sind (MESEV & WALRATH 2008). Die technische aber auch methodische Integration von Fernerkundung und GIS ist daher weiterhin Forschungsgegenstand (MERCHANT & NARUMALANI 2009).

Technisch fußt die Integration von verschiedenen Daten und Methoden mittels GIS in initial fernerkundungsbasierten Landnutzungsanalysen in der Regel auf den in den Kapiteln 2.4.1.4 und 2.4.1.5 beschriebenen Verfahren zur Datenaufbereitung und Datenmanipulation sowie im Besonderen auf Overlay-Verfahrensweisen. Hinsichtlich der zentralen Zielsetzungen dieser Arbeit sind hierbei vor allem Verfahrensweisen zur besseren Erfassung von Feldfrüchten und Fruchtfolgen auf Ackerflächen sowie zur Steigerung der Genauigkeit (geometrisch wie thematisch) und der Detailliertheit von Landnutzungsdatensätzen relevant. Mit Integration ist in diesem Kontext sowohl die gemeinsame Verwendung multitemporaler oder multisensoraler Fernerkundungsdaten oder daraus abgeleiteter (Zwischen-)Ergebnisse als auch die Nutzung anderweitig erhobener Daten unterschiedlicher Art zu verstehen. Die Verwendung multitemporaler Fernerkundungsdaten dient dabei in der Regel der besseren Vegetations-

unterscheidung (hier vor allem Feldfrüchte) durch die Berücksichtigung der Phänologie (vgl. PAX-LENNEY & WOODCOCK (1997), DE WIT & CLEVERS (2004), VAN NIEL & MCVICAR (2004) oder TURKER & ARIKAN (2005)). Bei der Verwendung von bereits bestehenden und nicht primär durch Fernerkundung erzeugten Daten wird aus der Sicht der Fernerkundung oftmals auch von *ancillary data* (Zusatzdaten) gesprochen. Das Spektrum reicht dabei von digitalen Höhen- oder Geländemodellen sowie deren Derivaten wie Hangneigungs- und Expositionskarten (FRANKLIN & WILSON 1991, RICCHETTI 2000, ROGAN et al. 2003, JUDEX et al. 2006) über NDVI-Karten (DE WIT & CLEVERS 2004) oder Abgrenzungen von Landnutzungen, Naturräumen oder administrativen Einheiten (JANSSEN & MIDDELKOOP 1992, GROOM et al. 1996, ORTIZ et al. 1997, VOGELMANN et al. 1998a, LUNETTA et al. 2003) bis hin zu unterschiedlich komplexen topographischen Datensätzen (BARETH 2001, HAZEU 2006). Darüber hinaus werden auch Daten mit indirektem Raumbezug wie statistische Daten genutzt (HARRIS & VENTURA 1995, BARETH 2001). Wie die Datenkomplexität, können auch die Komplexität einer Datenintegration und die damit verbundene Methodik große Unterschiede aufweisen. Hier reicht die Spannweite von einer vergleichsweise einfachen Verwendung von Zusatzdaten zur Auswahl von Trainingsgebieten (zum Beispiel die visuelle Interpretation von Luftbildern oder Kartenmaterial (CAMPBELL & WYNNE 2011) bis hin zur zusätzlichen Anwendung von Expertenwissen mittels Verfahrensweisen wissensbasierter Systeme. Ausgehend von einer fernerkundungsbasierten Landnutzungsanalyse lassen sich GIS-Verfahrensweisen und Datenintegration sowohl vor, während als auch nach einer Klassifikation nutzen (JENSEN 2005, LILLESAND et al. 2008). Zudem lassen sich eine Reihe von Verfahren zu unterschiedlichen Stadien oder über mehrere Phasen hinweg in einer Analyse einsetzen.

#### 2.4.2.1 Stratifizierung, Datenfusion und Multidatenklassifikation

Eine gängige Methode zur Erzielung einer höheren Klassifikationsgenauigkeit stellt die (geographische) Stratifizierung von Fernerkundungsdaten in homogene Einheiten (Strata) im Vorfeld der Klassifikation dar. Einzelne Strata werden separat klassifiziert und die Ergebnisse anschließend wieder zusammengefügt (HUTCHINSON 1982). Die Grundlage zur Stratifizierung bilden, wie bereits in Kapitel 2.3.6 erwähnt, beispielsweise topographische Informationen wie Nutzungsgrenzen grundlegender Landnutzungskategorien (JANSSEN et al. 1990) und/oder Bodenkarten (THUNNISSEN et al. 1992). OETTER et al. (2000) oder HOMER et al. (2004) nutzen Naturraumgrenzen zur Stratifizierung, um eine höhere Klassifikationsgenauigkeit durch die Reduktion von Fehlklassifikationen zu erzielen. In ihren multitemporalen Analysen verwenden SMITH & FULLER (2001), DEAN & SMITH (2003), DE WIT & CLEVERS (2004), VAN NIEL & MCVICAR (2004) oder TURKER & ARIKAN (2005) hingegen teilweise manuelle digitalisierte vektorbasierte Feldgrenzen, um Ackerflächen zwar pixelbasiert, aber als einzelne

Felder und separat von anderen Landnutzungskategorien, anhand von multispektralen Landsat- oder auch IRS-LISS-III-Daten zu klassifizieren. In regel- und objektbasierten Klassifikationsansätzen nutzen zum Beispiel LUCAS et al. (2007), BUCK (2010) oder LUCAS et al. (2011) Abgrenzungen landwirtschaftlicher Flächen des Integrated Administration and Control System (IACS) beziehungsweise des Land Parcel Information System (LPIS) zur separaten Klassifikation.

Bei sogenannten Data Fusion- oder Multisource-Klassifikationsmethoden werden hingegen verschiedene Datenquellen zur gemeinsamen Klassifikation zu einem Datensatz mit mehreren Datenebenen vereint (*stacked vector approach*) (RICHARDS 2012). Dabei kann es sich beispielsweise um multitemporale Daten eines Sensors handeln, die gemeinsam klassifiziert werden (LI & YEH 1998, KEY et al. 2001, LUNETTA et al. 2003, VAN NIEL & MCVICAR 2004). STRAHLER et al. (1978) fügen hingegen multispektralen Daten eine zusätzliche Datenebene (Kanal) mit topographischen Informationen als sogenannten *logical channel* hinzu, um eine bessere Klassenunterscheidung zu erzielen. Data Fusion kann allerdings, wie bereits in Kapitel 2.3.6 erwähnt, auch die Kombination von Multispektral- und Radardaten in einem Datensatz umfassen (vgl. SOLBERG et al. (1994) oder HUANG et al. (2007)). Weiterhin bestehen Ansätze, Daten mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung beispielsweise durch *pansharpening* (vgl. DE WIT & CLEVERS (2004)) oder durch Überlagern (*layer stacking*) der einzelnen Bänder zu kombinieren (CHEN & STOW 2003). Eine Zusammenfassung zahlreicher Verfahren geben POHL & VAN GENDEREN (1998) oder WANG et al. (2005). Durch die Anwendung von ANN-Verfahren kann die Integration verschiedenster Daten beispielsweise auch erst im Klassifikationsprozess selber erfolgen (vgl. BRUZZONE et al. (1997), SKIDMORE et al. (1997)).

#### 2.4.2.2 Wissensbasierte Ansätze

Um den Mehrwert besonders kategorischer oder thematischer Informationen unterschiedlicher Zusatzdaten in einer GIS-Umgebung weiter auszuschöpfen, bietet sich die Anwendung von Experten- oder wissensbasierten Systemen oder bereits die methodische Anlehnung an entsprechende Verfahrensweisen an (SRINIVASAN & RICHARDS 1993, BARETH 2000, BARTELME 2005, BARETH 2008, RICHARDS 2012). Experten- oder wissensbasierte Systeme (*expert* oder *knowledge-based systems*) gehören (wie auch beispielsweise ANN) ursprünglich zum Forschungszweig der rechnergestützten Wissensverarbeitung als Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz-Forschung (*artificial intelligence*), die wiederum zur Informatik gezählt werden kann (NEBEL & WÖLFL 2013). Der mitunter missverständliche Begriff Künstliche Intelligenz (KI) hat seinen Ursprung in den 1950er Jahren, wobei diese Bezeichnung vor allem im Kontext der mit dem Forschungsgebiet verknüpften Erwartungen dieser Zeit zu sehen ist (GÖRZ et al. 2013). Heutzutage wird in der KI-Forschung vor allem die Simulation der menschlichen Entscheidungsfindung, also das Schlussfolgern, verbunden

(STRUBE et al. 2013). Die Begriffe Daten, Information und Wissen und deren unterschiedliche Bedeutung sind in diesem Zusammenhang zu unterscheiden. Informationen entstehen durch die sinnvolle Zusammenführung von Daten, die alleinstehend keine Aussage ermöglichen. Wissen wird wiederum durch die Interpretation von Informationen unter einem bestimmten Gesichtspunkt erzeugt (BRYANT 1988).

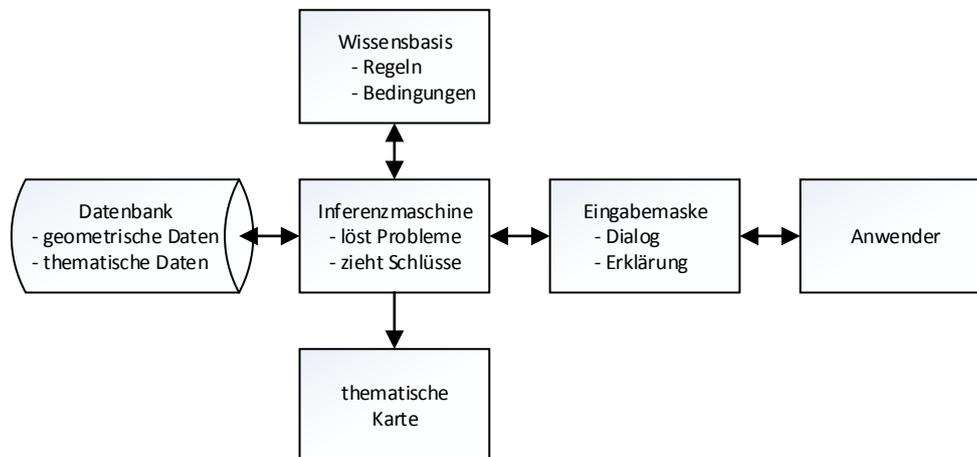


Abbildung 2.10: Wesentliche Komponenten eines wissensbasierten Systems zur Behandlung von geographischen Fragestellungen in Anlehnung an BARTELME (2005), JENSEN (2005) und RICHARDS (2012).

Im Kontext von GIS stellen wissensbasierte Systeme eine Erweiterung der Analysefunktionen dar, um durch die Verwendung von Wissen zum Vergleichen, Lernen und Schlussfolgern (Problemlösen) automatisiert neue räumliche Informationen aus einer Datengrundlage abzuleiten (BARTELME 2005). Der grundlegende Aufbau eines wissensbasierten Systems (vgl. Abbildung 2.10) besteht aus Experten, die das Wissen in einer Wissensbasis (*knowledge base*) bereitstellen, einer Oberfläche (Eingabemaske) für Anwendende, den (geometrischen und thematischen) Daten und einer Inferenzmaschine mit der das gespeicherte Wissen auf die Daten angewendet wird (JENSEN 2005). Ein vollständiges wissensbasiertes System enthält zudem Komponenten zum Dialog sowie zur Erläuterung der durch das System durchgeführten Schlussfolgerungen (BRYANT 1988). Im Kontext dieser Arbeit sind allerdings nicht alle Komponenten in gleichem Maße von Bedeutung. Die Wissensbasis enthält oftmals hochspezialisiertes Wissen über einen konkreten Sachverhalt (Typ: *deep and narrow*) (BARTELME 2005), das gegebenenfalls mittels sogenanntem *knowledge engineering* abgefragt und in eine maschinenlesbare Form überführt wird (NEBEL & WÖFL 2013). Die Speicherung des Wissens erfolgt üblicherweise in Form von (im Fall von GIS geometrischen oder thematischen) Bedingungen und Regeln (Entscheidungskriterien) die auf die Fakten (Daten) zurückgreifen (BARTELME 2005). Oftmals kommen für GIS- und Fernerkundungsanalysen auch nur der Aufbau einer Wissensbasis und die automatisierte oder manuelle Anwendung der darin enthaltenen Regeln zur Erzeugung thematischer Karten zum Einsatz. Wissensbasierte Systeme/Expertensysteme oder auch Vorstufen werden aufgrund der Regeln als wesentliche Elemente oftmals auch als regelbasierte Systeme (*rules based systems*) und die Regeln als

Entscheidungs- oder Produktionsregeln (*decision rules; production rules*) bezeichnet (JENSEN 2005, RICHARDS 2012). Bei Produktionsregeln handelt es sich gewöhnlich um Wenn-Dann-Formulierungen („WENN (IF) Bedingung erfüllt, DANN (THEN) Ausführung“), wobei hauptsächlich kausales qualitatives mitunter aber auch quantitatives oder vages Wissen angewendet wird (DAVIS & McDONALD 1993, JENSEN 2005, NEBEL & WÖFL 2013). Die Bedingungskomponente ist dabei üblicherweise ein Fakt wie beispielsweise: Pixelwert ist = (oder >, <, etc.) Wert X (JENSEN 2005). Die einzelnen Regeln in einer Wissensbasis müssen grundsätzlich sequentiell abzuarbeiten sein und dürfen sich nicht widersprechen. Im Expertensystem werden die einzelnen Regeln von der Inferenzmaschine ausgewählt, interpretiert und auf die Datengrundlage angewendet. Dabei wird geprüft, ob eine Bedingung zutrifft oder nicht, um daraus eine Schlussfolgerung abzuleiten (RICHARDS 2012). Dazu können beliebige Bedingungen, zumeist durch Boole'sche Logik (UND oder ODER), aneinander gekettet werden (JENSEN 2005). Die Anwendung des in den Regeln gespeicherten Wissens kann dabei auf unterschiedliche Arten erfolgen. Da Problemstellungen oftmals eine hohe Komplexität aufweisen, werden verschiedene heuristische Strategien zur Lösung angewendet. Diesbezüglich lassen sich grundsätzlich deduktives, induktives und analoges Schlussfolgern unterscheiden (STRUBE et al. 2013). Inferenzmaschinen wissensbasierter Systeme gehen bei der Problemlösung zum Teil deduktiv, oftmals aber induktiv (*forward chaining, data driven*) vor. Es ist jedoch auch die Kombination beider Schlussfolgerungsstrategien möglich (JENSEN 2005). Beim deduktiven Schlussfolgern wird von einer gegebenen Menge an Informationen (Prämissen) ausgehend eine Schlussfolgerung gezogen, wobei vom Allgemeinen auf einen spezifischen Fall geschlossen wird (STRUBE et al. 2013). Dabei wird eine Problemstellung so lange untergliedert, bis Teilproblemstellungen mit ja oder nein zu beantworten sind (*backward chaining, goal driven*) (BRYANT 1988, BARTELME 2005). Beim induktiven Schlussfolgern wird dagegen von zusammengetragenen einzelnen Beobachtungen auf die Gesamtheit verallgemeinert, wobei solche eher empirischen Schlüsse mitunter aber nur so lange akzeptiert werden, bis sie widerlegt werden können (STRUBE et al. 2013). Induktiv arbeitende Systeme tragen sukzessive Wissen zusammen, bis eine Schlussfolgerung abgeleitet werden kann (BARTELME 2005). Die Integration von Expertenwissen kann (aus Sicht der Fernerkundung) zum einen im Klassifikationsprozess selber, beispielsweise durch die Anwendung von (oftmals pixelbasierten) Decision Tree-Verfahren (vgl. WILKINSON & MÉGIER (1990), DE FRIES et al. (1998), LAWRENCE & WRIGHT (2001), FRIEDL et al. (2002), IM & JENSEN (2005) oder MENDOZA & MARTINS (2006)) sowie mittels objektbasierter Verfahren erfolgen (vgl. BALTSAVIAS (2004), BENZ et al. (2004), LUCAS et al. (2007) oder BLASCHKE (2010)). Dabei wird (ähnlich wie bei der Datenfusion) eine ursprünglich rein auf Spektraldaten beschränkte Klassenunterscheidung beispielsweise durch die Verknüpfung mit Höheninformationen und dem Wissen über das daran gekoppelte Vorkommen oder Nicht-Vorkommen von bestimmten Klassen (zum Beispiel Baumarten) erweitert. Zum anderen bestehen darüber hinaus vielfältige Möglichkeiten der Integration von Expertenwissen nach

einer oder mehreren separaten Fernerkundungsklassifikationen im GIS (RICHARDS 2012). In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf letztere Verfahrensweisen gelegt, da diese leicht zu implementieren sind und nur ausgewählte Klassen behandelt werden können (HARRIS & VENTURA 1995). Die Anwendung von Wissen erfolgt jedoch sowohl während als auch nach einem initialen Klassifikationsprozess oftmals grundsätzlich nach einem ähnlichen Prinzip. In der Fernerkundungsliteratur werden einige Umsetzungen auch als *post classification sorting*, (HUTCHINSON 1982, JANSSEN et al. 1990, STUCKENS et al. 2000, STEFANOV et al. 2001), als *post classification stratification* (GROOM et al. 1996, CAMPBELL & WYNNE 2011) oder als *post classification correction* (MANANDHAR et al. 2009) bezeichnet. JANSSEN et al. (1990) verwenden aus vektorbasierten topographischen Daten entnommene Landnutzungsgrenzen im Anschluss an eine pixelbasierte Klassifikation von Landsat-TM-Daten, um Landnutzungskarten mit homogenen Flächen (Objekten) mit nur einer Landnutzung zu erzeugen. HARRIS & VENTURA (1995), GROOM et al. (1996) oder auch STUCKENS et al. (2000) führen eine Stratifizierung im Anschluss an eine Fernerkundungsklassifikation durch (*post-classification stratification*), um die Unterscheidung grundsätzlicher Landnutzungstypen (zum Beispiel urban/nicht-urban) unter Anwendung digitaler Landnutzungskarten und Wissen durch die Korrektur von Fehlklassifikationen zu verbessern. STEFANOV et al. (2001) erstellen ein Expertensystem zur Umklassifizierung (*post classification sorting*) einer initialen pixelbasierten Klassifikation von Landsat-TM-Daten unter Verwendung verschiedener räumlicher Datensätze zur Landnutzung oder Wassernutzung sowie administrativer Grenzen. LUNETTA et al. (2003) verwenden in einer pixelbasierten Landbedeckungsklassifikation eine Stratifizierung (unter anderem) in Kombination mit Anbaustatistiken dominanter Feldfrüchte zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten, in welchem Umfang bestimmte Feldfrüchte in einem Gebiet vorkommen. Beim Großteil der gefundenen Quellennachweise zu Landnutzungsanalysen bleibt der Schwerpunkt, trotz vielfältiger Möglichkeiten unterschiedliche Datenquellen und Verfahrensweisen im GIS zu verknüpfen, oftmals bei der Fernerkundung. Ansätze wie beispielsweise von BARETH (2001) für Deutschland oder von HAZEU (2006) für die Niederlande, die auf eine umfassende Nutzung und Integration bereits vorhandener Landnutzungsinformationen für unterschiedliche Landnutzungskategorien ausgereicht sind, finden sich auch heutzutage noch vergleichsweise selten.

### 2.4.3 Der Multidaten-Ansatz (MDA)

Im Multidaten-Ansatz (MDA) (BARETH 2008) lassen sich viele der zuvor genannten Möglichkeiten zur Integration von Fernerkundungs- und GIS-Verfahrensweisen, unterschiedlicher Datenquellen sowie Expertenwissen zur Erzeugung aufgewerteter Landnutzungsinformationen vereinen. Die zentrale Idee des MDA liegt einerseits in der prinzipiellen Kombination und Integration möglichst vieler bereits verfügbarer Datenquellen,

die geeignete Landnutzungsinformationen für eine Fragestellung bereitstellen. Andererseits beinhaltet der MDA die Ergänzung fehlender oder nur unzureichender Informationen mittels Fernerkundung (ROHIERSE & BARETH 2004). Im Gegensatz zum aus Sicht der Fernerkundung üblichen Betrachtungswinkel (erst Fernerkundungsanalyse, dann Integration von Zusatzdaten, die primär zur Reduktion von Fehlklassifikationen dienen), liegt dem MDA ein anderer Ausgangspunkt zugrunde (BARETH 2001, BARETH 2008). Digitale Landschaftsmodelle (DLM) wie das ATKIS (in NRW seit etwa Mitte der 1990er Jahre verfügbar (HARBECK 1994)) sind dabei für eine MDA-Landnutzungsanalyse als Ausgangspunkt zur Integration weiterer Datenquellen von zentraler Bedeutung.

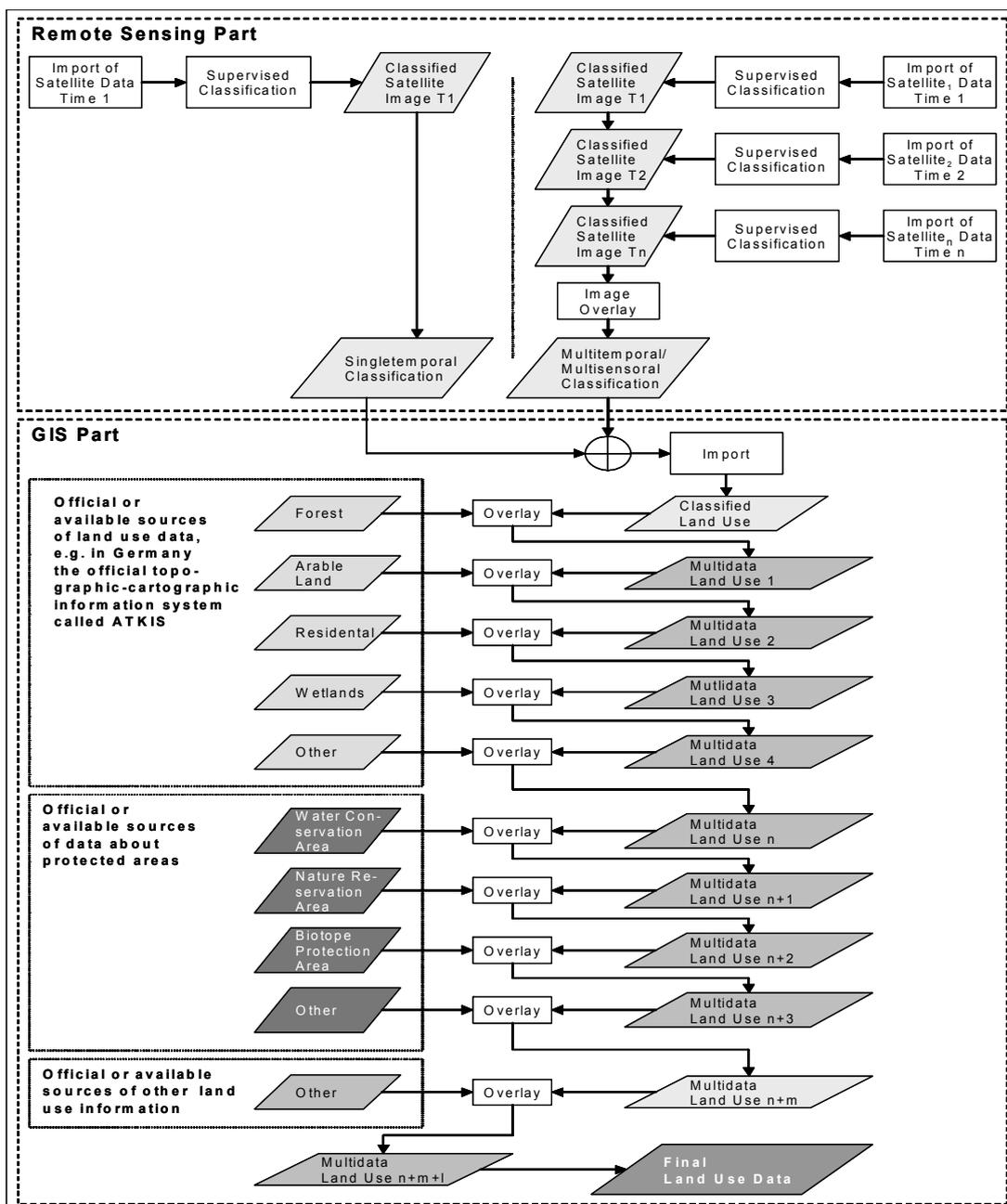


Abbildung 2.11: Workflow des Multidaten-Ansatzes (MDA) (BARETH 2008), verändert.



Das Konzept des MDA hat seine Ursprünge in den späten 1990er Jahren und wurde in den Arbeiten von BARETH (1998), BARETH (2000), BARETH (2001), BARETH (2003) und ROHIERSE & BARETH (2004) kontinuierlich weiterentwickelt und auf unterschiedliche Gegebenheiten und Fragestellungen angepasst. BARETH (2001) kombiniert aktuelle, mittels überwachter Fernerkundungsklassifikation (basierend auf IRS-1C-Daten) erzeugte, Landnutzungsinformationen zu Ackerland und landwirtschaftlich genutztem Grünland des württembergischen Allgäus mit Informationen zu anderweitigen Landnutzungskategorien aus dem vektorbasierten ATKIS. Zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Landnutzungsdaten, welche die räumliche Verteilung von Winterweizen zur Modellierung von Winterweizen-Agrarökosystemen für die Städtereion Peking enthalten, kombiniert BARETH (2003) eine Landnutzungsklassifikation (basierend auf Landsat-TM-Daten), Vektordaten zur Topographie sowie offiziell verfügbare Landnutzungsdaten. ROHIERSE & BARETH (2004) integrieren die Ergebnisse multitemporaler Satellitenbildklassifikationen in ATKIS-Daten zur Disaggregation der Landnutzungs-kategorie Ackerland in unterschiedliche Feldfrüchte und zur Abschätzung der räumlichen Verteilung von Fruchtfolgen. Darauf aufbauend wird der MDA von BARETH (2008) als generelle Methodik zur Erzeugung von weiterentwickelten Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten vorgestellt. Abbildung 2.11 stellt den grundlegenden Aufbau und Ablauf des MDA schematisch dar. Auch beim MDA sind grundsätzlich Methoden und Daten der Fernerkundungsanalyse (FE-Teil) und die Methoden und Daten der GIS-Analyse (GIS-Teil) zu unterscheiden (BARETH 2008).

Der Fernerkundungssteil (FE-Teil) dient im Besonderen der Erzeugung von Landnutzungsinformationen bezüglich ackerbaulich genutzter Flächen und zielt, wie auch in dieser Arbeit, auf die Ableitung von Feldfrüchten und Fruchtfolgen aus einer multitemporalen Datengrundlage ab (ROHIERSE & BARETH 2004, BARETH 2008). Die Analyse der einzelnen Fernerkundungsszenen erfolgt mittels überwachter (pixelbasierter) Klassifikation zunächst separat, da hierdurch die Integration von Daten unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte, Sensoren und Sensortypen erleichtert wird. Der MDA sieht allerdings bereits einige GIS-Verfahrensweisen zur Datenaufbereitung und zur Unterstützung der Fernerkundungsanalysen sowie zur Verschneidung der Klassifikationsergebnisse mittels Overlay-Verfahren vor (ROHIERSE & BARETH 2004).

Im GIS-Teil erfolgt zunächst der Import aller verfügbaren Datensätze, wie multitemporale Fernerkundungsklassifikationen und weitere Geo-(Basis-)daten, in ein einheitliches Format und Datenmodell. In den zuvor genannten Untersuchungen kommt hierzu jeweils das Vektordatenmodell zur Anwendung. DLM wie das ATKIS in Deutschland stellen für den MDA einen zentralen Ausgangspunkt zur Datenintegration dar. Das ATKIS bietet für unterschiedliche Maßstabsebenen neben topographischen Informationen auch zahlreiche Informationen zur Landnutzung in hoher geometrischer und thematischer Genauigkeit (vgl. Kapitel 3.3.1). Im Zuge der GIS-Analysen werden, wie in Abbildung 2.11 dargestellt,

verfügbare Informationen zu Gewässern, Wald-, Siedlungs- oder anderweitigen Flächennutzungen sukzessive mittels Overlay-Verfahren räumlich verschnitten (inklusive der Übernahme dazugehöriger Attributinformation) und in den MDA-Landnutzungsdatensatz integriert. Entsprechende Informationen, die aus der Fernerkundungsanalyse resultierten, können dann mitunter verworfen werden (BARETH 2001). Dieser Vorgehensweise liegt zugrunde, dass zahlreiche Informationen zu diesen Landnutzungskategorien im DLM (oder in äquivalenten offiziell verfügbaren Landnutzungsdaten, vgl. Kapitel 2.2) über eine bessere thematische Detailliertheit und räumliche Genauigkeit verfügen, als diejenigen Informationen, die mittels reiner Fernerkundungsanalyse abzuleiten sind (BARETH 2008). Insbesondere bezüglich des Ackerlands werden hingegen die Ergebnisse der Fernerkundungsanalysen beibehalten und in die entsprechenden Flächenbereiche integriert. Dies dient dazu, die in offiziellen Landnutzungsdaten gewöhnlich nicht abgebildete jährliche Flächennutzungsänderung durch die dominanten Feldfrüchte und zusätzlich Fruchtfolgen als raum-zeitliche Landnutzungsmuster in der MDA-Landnutzung zu ergänzen (ROHIERSE & BARETH 2004).

Die Integration der Informationen aus den verschiedenen Quellen erfolgt beim MDA mittels angepasster wissensbasierter Produktionsregeln. Dabei werden die wertvollen Informationen der einzelnen Layer durch die Produktionsregeln selektiert und für die entsprechenden Bereiche in die MDA-Landnutzung übertragen. Durch die Verkettung mehrerer Regeln können Informationen unterschiedlicher Quellen miteinander verknüpft und daraus neue Informationen abgeleitet werden. Der Aufbau eines vollständigen wissensbasierten Systems ist dazu allerdings nicht zwingend notwendig. Wie aus Abbildung 2.11 hervorgeht, sieht der MDA, neben allgemeinen Landnutzungsinformationen, darüber hinaus auch die Integration weiterer räumlicher Informationen zu Wasserschutzgebieten, Naturschutzgebieten, Biotopen oder anderweitigen Daten wie Landnutzungsstatistiken vor. Da solche Kategorisierungen Rückschlüsse auf die konkrete Flächennutzung und das Flächenmanagement zulassen, sind sie für die Erzeugung aufgewerteter Landnutzungsdatensätze besonders wertvoll (BARETH 2008). Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten, die der MDA bietet, wurde der Ansatz im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und zur Erzeugung aufgewerteter Landnutzungsinformationen zur (Agrar-)Ökosystemmodellierung, am Beispiel des Rureinzugsgebiets angepasst und weiterentwickelt.

## 2.5 Grundlagen zu Fruchtfolgen

DIEPENBROCK et al. (2012) definieren Fruchtfolgen (FF) als geordnete, sinnvolle zeitliche Wechsel der Pflanzenbestände auf Ackerland, die dadurch grundlegende Ordnungsfunktionen aller ackerbaulichen Maßnahmen darstellen. Mit der Fruchtfolgestaltung geht somit auch

ein Flächenmanagement einher, da zur Risikominimierung pro Fruchtfolge(-system) mindestens eine der Anzahl an aufeinanderfolgenden Feldfrüchten entsprechende Anzahl an Schlägen, mit jeweils ähnlicher Flächengröße, benötigt wird (MUNZERT 2006, DIEPENBROCK et al. 2012). Jeder Schlag einer Fruchtfolge, zusammengefasst als Fruchtfolgefeld, durchläuft damit zeitlich versetzt die gleiche Abfolge von Feldfrüchten. Fruchtfolgen haben ihren Ursprung in verschiedenen Anbausystemen wie der Dreifelderwirtschaft. Die typische Fruchtfolge Brache - Winterung (Wintergetreide) - Sommerung (Sommergetreide) wird in weiten Teilen Europas bis ins 18. Jahrhundert praktiziert. Die Brache diente dabei unter anderem der Akkumulation von Humus und Nährstoffen sowie zur Unterbrechung der Entwicklungszyklen von Schaderregern (FREYER 2003). Durch solch eine Dreifelderwirtschaft wird die ackerbauliche Bodennutzung unter Flurzwang strikt geregelt, resultiert aber in einer Beschränkung auf Getreideanbau und stellt aus Mangel an Futteranbauflächen ein Hemmnis für die Viehhaltung dar (DIEPENBROCK et al. 2012). Ab Mitte des 18. Jahrhunderts wird dieses strikte System durch die Verwendung von Rotklee als Futterpflanze („Verbesserte Dreifelderwirtschaft“), die Einführung der Kartoffel in den Feldbau sowie durch die Kultivierung von Zuckerrüben ab dem 19. Jahrhundert immer weiter abgelegt (KÄMPF 1983). Ab den 1960er Jahren führt die intensive Landwirtschaft durch den Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln zu einem deutlichen Ertragsanstieg, wobei dadurch mitunter einhergehende nachhaltige Schädigungen von Böden oder Gewässern kaum berücksichtigt wurden. Mit Aufkommen des ökologischen Landbaus in den 1980er Jahren kommt der Fruchtfolgestaltung wieder eine größere Bedeutung zu (FREYER 2003).

Heutzutage haben Fruchtfolgen im Rahmen des integrierten Pflanzenbaus vielzählige Funktionen mit denen unterschiedliche Ziele verfolgt werden (MUNZERT 2006). Die Gestaltung von Fruchtfolgen erfolgt daher nach FREYER (2003) unter verschiedenen Aspekten, die je nach Betrieb individuell gewichtet werden. Im Sinne der Ertragsfunktion erfolgt die Auswahl von Pflanzen und Sorten, die an den Standort und aneinander (beispielsweise bezüglich der Saat- und Erntetermine) angepasst sind, um die Erträge langfristig zu sichern. Mit der phytosanitären Funktion wird die Erhaltung der Vitalität von Boden und Pflanzen durch die gezielte Auswahl und Abfolge von Feldfrüchten und Sorten mit möglichst geringer Anfälligkeit gegenüber Schaderregern verbunden. Die Ressourcenschutzfunktion dient dem Bodenschutz und Erhaltung der Bodenfunktionen sowie der Minderung der Erosionsgefährdung oder Bodenverdichtung. Dies wird beispielsweise mit der Dauer der Bodenruhe und der Bodenbedeckung oder durch die kulturartenspezifische Bodenbearbeitung gesteuert (MUNZERT 2006). Die betriebswirtschaftliche Funktion umfasst die Auswahl und Abfolge von Feldfrüchten zur Erzielung hoher Erträge, Qualitäten und Deckungsbeiträge durch Anpassung der Pflanzenproduktion an die Absatzsituation (FREYER 2003). Dies führt zu eher einseitigen und engeren Fruchtfolgen, die leichter zu planen und anzupassen sind, belasten den Boden allerdings stärker (MUNZERT 2006). Komplexere Fruchtfolgen verursachen einen höheren Arbeitsaufwand und setzen mehr Fach- und

Praxiswissen voraus, haben auf längere Sicht jedoch eher positive Wirkung auf die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und die Ertragssicherung (FREYER 2003).

Tabelle 2.6: Grundrissbeispiele für den Aufbau von Fruchtfolgen aus Fruchtfolgepaaren und -gliedern nach FREYER (2003), MUNZERT (2006) und KBTL (2009), verändert. Feldfrüchte in fett markieren den Beginn eines Fruchtfolgeglieds.

<b>Fruchtwechsel (2-feldrig)</b>	<b>Überfrucht- wechsel</b>	<b>Doppelfrucht- wechsel</b>	<b>Dreifelder- wirtschaft</b>	<b>Vierfelder- wirtschaft</b>	<b>5-feldrig &amp; 2- gliedrig</b>
<b>1. Halmfrucht (Hackfrucht)</b>	<b>1. Blattfrucht (Zuckerrüben)</b>	<b>1. Blattfrucht (Zuckerrüben)</b>	<b>1. Blattfrucht (Zuckerrüben)</b>	<b>1. Blattfrucht (Zuckerrüben)</b>	<b>1. Blattfrucht (Klee gras)</b>
2. Blattfrucht (Wintergetreide)	2. Blattfrucht (Kartoffeln)	2. Blattfrucht (Kartoffeln)	2. Halmfrucht (Winterweizen)	2. Halmfrucht (Winterweizen)	2. Halmfrucht (Winterweizen)
	3. Halmfrucht (Winterweizen)	3. Halmfrucht (Wintergerste)	3. Halmfrucht (Wintergerste)	3. Halmfrucht (Wintergerste)	<i>Zwischenfrucht</i>
		4. Halmfrucht (Winterweizen)		<i>Zwischenfrucht</i>	<b>3. Blattfrucht (Kartoffeln)</b>
				4. Halmfrucht (Hafer)	4. Halmfrucht (Wintergerste)
					5. Halmfrucht (Winterroggen)

Nach BRINKMANN (1950) setzen sich Fruchtfolgen aus unterschiedlich vielen grundsätzlichen Fruchtfolgegliedern zusammen, die aufeinander abgestimmt sind. Die einzelnen Fruchtfolgeglieder bestehen dabei in der Regel aus einem Fruchtwechsel von Blattfrucht und Halmfrucht, wobei einer Blattfrucht eine oder mehrere Halmfrüchte folgen können (FREYER 2003). Zwischen einigen Hauptfrüchten besteht zudem die Möglichkeit bestimmte Zwischenfrüchte als Bodenverbesserungsmaßnahme anzubauen. Die Auswahl der Zwischenfrüchte ist dabei gewöhnlich an die Auswahl der Hauptfrüchte geknüpft (MUNZERT 2006). Blattfrüchte (beispielsweise Kartoffeln, Zuckerrüben, Raps) gelten in der Fruchtfolge aufgrund ihres allgemein positiven Einflusses auf Bodeneigenschaften als aufbauend, garefördernd und fruchtbarkeitsmehrend und werden daher als tragende Feldfrüchte bezeichnet. Halmfrüchte (vor allem alle Getreidearten sowie Körnermais) gelten im Gegensatz zu Zuckerrüben oder Kartoffeln zwar als eher humusmehrend, beanspruchen den Boden ansonsten aber stärker und werden daher als getragene (der Blattfrüchte) oder abtragende Feldfrüchte bezeichnet (BRINKMANN 1950, DIEPENBROCK et al. 2012).

Je nach Anzahl der nacheinander gestellten Fruchtfolgeglieder reicht das Spektrum von zweifeldrigen bis hin zu fünffeldrigen Fruchtfolgen (FREYER 2003). Als Ausgangsbasis für Fruchtfolgen werden oftmals die in Tabelle 2.6 aufgeführten Fruchtfolgegrundrisse vorgeschlagen. Folgen im Gegensatz zum einfachen Fruchtwechsel zwei Blattfrüchte aufeinander, wird dies als Überfruchtwechsel bezeichnet. Bei einer Abfolge von zwei Blattfrüchten und zwei Halmfrüchten handelt es sich um einen Doppelfruchtwechsel. Für die Ackerflächen der Börde in der Köln-Aachener-Bucht ist beispielsweise die Rheinische Fruchtfolge von besonderer Bedeutung, wodurch Zuckerrüben, Winterweizen und

Wintergerste (vgl. Tabelle 2.6) dort am häufigsten angebaut werden (FRANKEN & HÖVELMANN 1998). Durch den geringen Bedarf an Klee als Viehfutter, die geringen Erträge von Hafer sowie den Anstieg des Zuckerrübenbaus seit den 1930er Jahren kommt bereits NIEDERSTUCKE (1967) zum Ergebnis, dass die ursprünglichen Ausprägungen der Rheinischen Fruchtfolge mit Klee und Hafer nahezu bedeutungslos geworden sind. Heutzutage wird diese Fruchtfolge daher eher im Sinne einer Dreifelderwirtschaft betrieben (BUCHNER 2009).

Tabelle 2.7: Bewertung unterschiedlicher Fruchtartenkombinationen (LWK NRW 2012), verändert.

		Vorfrucht															
		Winterweizen	Sommerweizen	Wintergerste	Sommergerste	Winterroggen	Triticale	Hafer	Silomais	CCM-/Körnermais	Ackerbohnen	Erbsen	Spätkartoffeln	Frühkartoffeln	Winterraps	Zuckerrüben	Runkelrüben
Nachfrucht	Winterweizen	-	-	-	-	o	o	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Sommerweizen	-	-	-	-	o	o	+	+	+	*	*	*	*	*	+	*
	Wintergerste	+	+	-	-	+	+	+	o	-	*	*	-	+	*	-	-
	Sommergerste	+	+	-	-	+	+	+	*	*	*	*	*	*	*	+	*
	Winterroggen	+	+	+	+	o	o	+	+	o	*	*	-	*	*	-	*
	Triticale	o	o	+	+	+	o/-	+	+	o	*	*	-	*	*	-	*
	Hafer	+	+	+	+	+	+	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Mais	+	+	+	+	+	+	+	o	o	*	*	+	*	*	+	+
	Ackerbohnen	+	+	*	+	+	+	+	+	+	-	-	*	*	*	*	*
	Erbsen	+	+	*	+	+	+	+	+	+	-	-	*	*	*	*	*
	Spät-/Frühkartoffeln	+	+	+	+	+	+	+	o	+	+	+	-	-	*	+	+
	Winterraps	o	o	+	+	o	o	o	-	-	-	+	-	+	-	-	-
	Zuckerrüben	+	+	+	+	+	+	*	-	-	-	+	*	*	-	-	-
	Runkelrüben	+	+	+	+	+	+	+	o	+	+	+	*	*	-	-	-

+ günstige Vorfrucht

\* günstige Vorfrucht, aber Luxusfolge, weil andere Nachfrüchte die Vorfruchtwirkung besser ausnutzen können, längere vegetationsfreie Zeit ggf. durch Zwischenfrüchte nutzbar

o mit Einschränkungen möglich

- ungünstige Vorfrucht (Ertragsabfall, Fruchtfolgekrankheiten) bzw. Einhaltung der Bestelltermine der Nachfrucht nicht möglich

Im Zusammenhang mit Fruchtfolgen sind die Begriffe Vorfruchtwirkung und Vorfruchtanspruch, Fruchtfolgestellung sowie die Selbstverträglichkeit von besonderer Bedeutung (MUNZERT 2006). Die Vorfruchtwirkung umfasst Faktoren wie die Bodenfruchtbarkeit, den Entwicklungsverlauf bodenbürtiger Krankheitserreger oder die Verunkrautung, die durch den Anbau von Feldfrüchten in unterschiedlichem Maße verändert werden. Feldfrüchte „hinterlassen“ Ackerflächen nach der Ernte daher in unterschiedlichen Zuständen und beeinflussen somit den Anbau nachfolgender Feldfrüchte. Andererseits haben Feldfrüchte einen gewissen Vorfruchtanspruch beispielsweise bezüglich der entsprechenden Ernte und Saattermine, dem Bodenzustand oder phytosanitären Faktoren (DIEPENBROCK et al. 2012). Feldfrüchte reagieren daher unterschiedlich stark auf ihre Stellung in der Fruchtfolge. Bei Weizen oder Zuckerrüben muss die Fruchtfolgestellung daher besonders berücksichtigt werden. Auf Roggen und Mais hat die Fruchtfolgestellung hingegen geringeren

Einfluss (KLAPP 1967). Somit ist auch die Selbstverträglichkeit von Feldfrüchten (beispielsweise bei Selbstfolge) unterschiedlich hoch. Geringe Selbstverträglichkeit äußert sich folglich in erhöhter Anfälligkeit für Krankheitserreger, einseitiger Bodenbeanspruchung und abnehmendem Ertrag (DIEPENBROCK et al. 2012). In Tabelle 2.7 sind die gängigen Feldfrüchte hinsichtlich ihrer Kombinationsmöglichkeiten eingetragen. Demnach werden beispielsweise alle aufgeführten Blattfrüchte als gute Vorfrucht für Winterweizen angesehen. Die Selbstfolge von Winterweizen auf Winterweizen ist hingegen ungünstig, während sich Winterweizen gut als Vorfrucht für Wintergerste eignet. Von Winterweizen als Nachfrucht auf Wintergerste wird hingegen abgeraten.

## 3 Untersuchungsgebiet und Daten

Im Folgenden wird zunächst das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Studie hinsichtlich des geologischen Unterbaus, der klimatischen Bedingungen sowie der naturräumlichen Gegebenheiten und der grundsätzlichen Landnutzungsstruktur vorgestellt. Daran anknüpfend werden die Fernerkundungsdaten, Geobasis- und Fachdaten sowie Daten der amtlichen Statistik vorgestellt, die am besten geeignet erschienen, um möglichst disaggregierte Landnutzungsdaten für das Untersuchungsgebiet anhand des MDA zu erzeugen. Die ausgewählten Geobasisdaten und Fachdaten stehen zumindest in Deutschland weitestgehend flächendeckend zur Verfügung, so dass die Produktauswahl auch für andere Untersuchungsgebiete übertragbar ist.

### 3.1 Rureinzugsgebiet

Das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit orientiert sich im Wesentlichen am Einzugsgebiet der Rur (Abbildung 3.1), dem Untersuchungsgebiet des TR32, in dessen Rahmen diese Arbeit eingegliedert ist. Das Rureinzugsgebiet erstreckt sich von Roermond im Norden bis Dahlem im Süden. Seine Ost-West-Erstreckung reicht von westlich von Aachen bis östlich von Düren. Für diese Arbeit wurde die Fläche des Untersuchungsgebiets um einen Puffer von 2 km erweitert, um Randeffekte bei nachfolgenden Analysen zu vermeiden. Des Weiteren wurden zusätzliche Bereiche einbezogen, so dass Gemeinden im deutschen Teil, die sich nur teilweise im Rureinzugsgebiet befinden, vollständig erfasst werden. Der Großteil des Untersuchungsgebiets befindet sich im Westen von Nordrhein-Westfalen. Im Nordwesten reicht es jedoch in die Niederlande hinein, im Südwesten übertritt es die Grenze nach Belgien. Das Rureinzugsgebiet umfasst eine Fläche von etwa 2365 km<sup>2</sup>, die sich durch die oben beschriebene Erweiterung auf annähernd 3003 km<sup>2</sup> vergrößert. Das Quellgebiet der Rur selbst liegt im Wallonischen Venn (Fagne Wallone, Belgien) nördlich von Sourbrodt auf etwa 630 m über dem Meer (MARENBERG 1994). Die Rur übertritt jedoch bereits nach kurzer Fließstrecke die Grenze zu Deutschland (BÖCKELS 1999). Im Oberlauf durchfließt sie in teilweise tiefen Schluchten die Mittelgebirgsregion der Nordeifel, und unter anderem die Stadt Monschau. Später wird sie durch die Rurtalsperre gestaut. Der Mittellauf der Rur führt durch die Jülicher Börde nach Norden an Düren vorbei. In ihrem Unterlauf durchquert sie das „Heinsberger Tiefland“ (BÖCKELS 1999). Bei Roermond mündet die Rur nach etwa 165 km Fließstrecke in die Maas (LANUV NRW 2010).

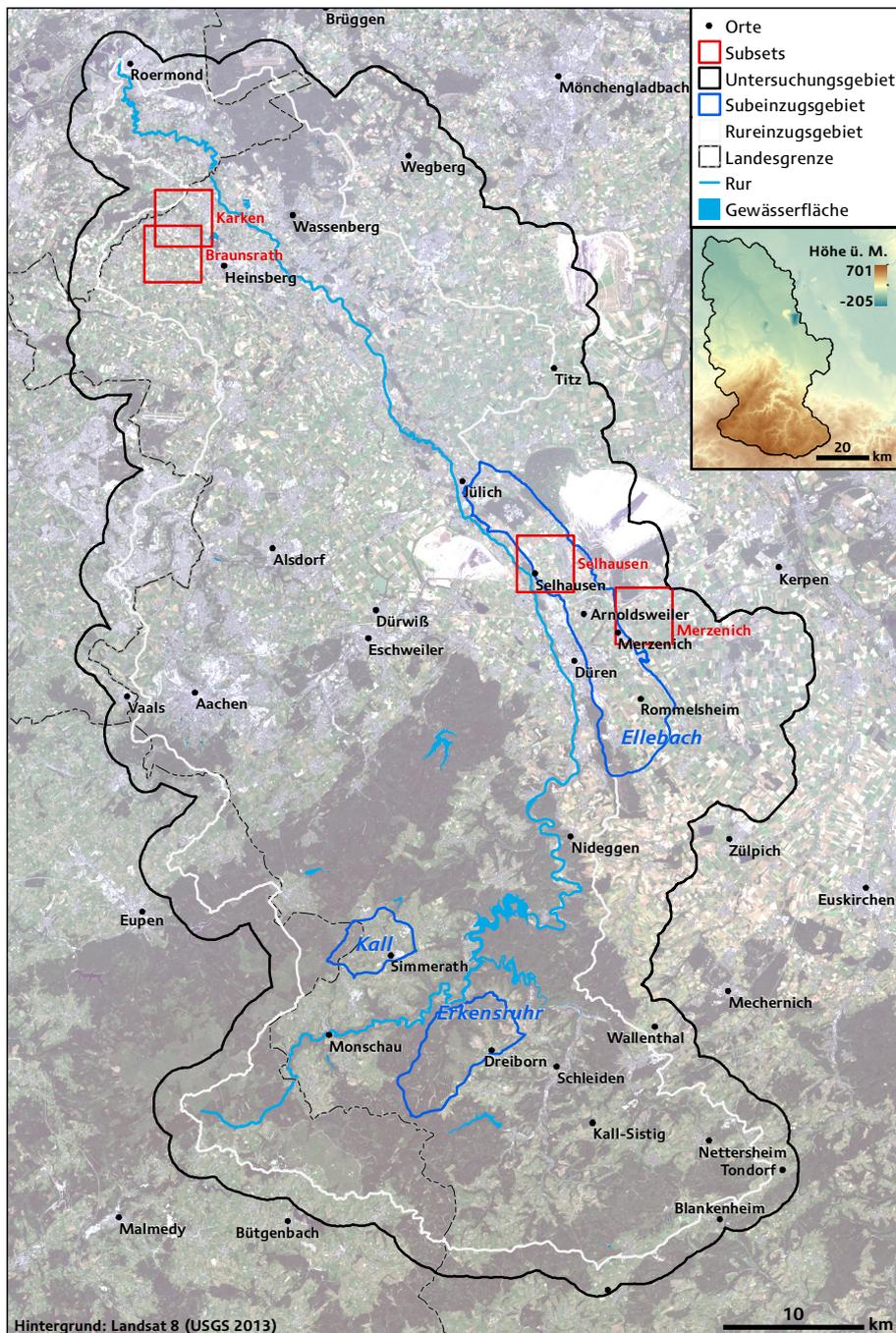


Abbildung 3.1: Das Untersuchungsgebiet in Anlehnung an das Einzugsgebiet der Rur.

### 3.1.1 Geologie und Geomorphologie

Anhand seines geologischen Unterbaus lässt sich das Rureinzugsgebiet in eine Nord- und eine Südhälfte unterteilen. Die Nordhälfte liegt im Westen der Niederrheinischen Bucht, wohingegen die Südhälfte große Bereiche der Nordeifel einnimmt, die wiederum den nördlichen Teil des Rheinischen Schiefergebirges westlich des Rheins darstellt (RIBBERT 2010). Die Niederrheinische Bucht ist eine sich von Südosten nach Nordwesten auffächernde



Beckenstruktur, die ins Rheinische Schiefergebirge eingebrochen ist (HENNINGSEN & KATZUNG 2006). Die Hauptabsenkungsphase setzt ab dem Tertiär ein und dauert bis heute an. Infolgedessen haben sich in der Niederrheinischen Bucht tertiäre Sedimente von mehreren hundert Metern Mächtigkeit auf dem paläozoisch-mesozoischen Gebirgssockel abgelagert (WALTER 2010a). Während des Paläozän und Eozäns wurden dabei vornehmlich marine Sedimente abgelagert, wohingegen im Oligozän und Miozän limnische Sedimentation vorherrschte (HENNINGSEN & KATZUNG 2006). Während des Pliozäns wurden in der westlichen Niederrheinischen Bucht vor allem helle Sande und Kiese mit hohem Quarzgehalt sowie bunte Tone abgelagert. Darauf folgten, bedingt durch die Kaltzeiten des Pleistozäns, ausgedehnte Flussterrassenlandschaften, in denen Kiese und Sande von Rhein und Maas mit Mächtigkeiten von 200-300 m akkumuliert wurden. Liefergebiete für das abgelagerte Material waren hierfür die umliegenden Gebirge Eifel und Ardennen (LIEDTKE & MARCINEK 2002). In die alten Flussterrassenablagerungen haben sich heute Rur und Erft eingeschnitten (WALTER 2010a). Überdeckt werden die alten Terrassenlandschaften zudem von teilweise bis zu 20 m mächtigen Lössen und Flugsanden (HENNINGSEN & KATZUNG 2006), wodurch kleinräumige Reliefunterschiede weitgehend nivelliert wurden. Die Lössen sind vornehmlich weichselzeitlich und entstammen vor allem den vegetationslosen Aufschotterungsebenen der Niederterrasse der Maas (WALTER 2010a). Tektonisch ist die Niederrheinische Bucht durch mehrere große nordwest-südost-verlaufende Störungen gekennzeichnet, die die tertiären Sedimentschichtenfolgen in mehrere nach Nordwesten geneigte und leicht nach Osten verkippte Großschollen gliedert (KLOSTERMANN 1992, HENNINGSEN & KATZUNG 2006). Durch die tektonischen Spannungen entlang der Störungen, die auch heutzutage noch zu Erdbeben führen, sind die Schollen zueinander horstartig herausgehoben beziehungsweise zu Grabenstrukturen herabgesunken (HENNINGSEN & KATZUNG 2006). Die von der Fläche bedeutendste Scholle im Rureinzugsgebiet ist die Rurscholle, die sich in den Niederlanden als Roertal-Graben fortsetzt und im Westen an die Aachen-Maastrichter-Kreidetafel angrenzt. An der steil nach Südosten einfallenden östlichen Grenze zur Erftscholle, der Rurrand-Verwerfung, ist die Tertiärbasis der Rur-Scholle gegenüber der Erftscholle um etwa 800 m abgesunken (WALTER 2010a). Von der Erftscholle liegt allerdings nur noch der westliche Randbereich im Untersuchungsgebiet. Abgesehen von den Flusstälern zeichnet sich die westliche Niederrheinische Bucht durch nur geringe Reliefenergie aus.

Ein besonderes Merkmal der Niederrheinischen Bucht sind die bedeutendsten Braunkohlelagerstätten Europas, die im Tagebau Hambach und im Tagebau Inden in der Nähe von Jülich erschlossen werden. Die vor allem aus dem Miozän stammenden Flöze liegen im Tagebau Hambach in bis zu 450 m Tiefe. Neben den durch den Abbau entstanden riesigen Gruben, entstanden durch die Tagbautätigkeit auch riesige Abraumhalden, wie die Sophienhöhe am Tagebau Hambach, die die Umgebung um über 200 m überragt (WALTER 2010a). Neben dem mittlerweile nahezu eingestellten Steinkohlebergbau bei Alsdorf, werden des Weiteren vor

allem Kies, Sand und Ton an vielen Stellen in der Niederrheinischen Bucht gewonnen (HENNINGSEN & KATZUNG 2006).

Südlich der Rurscholle geht der Gesteinsuntergrund in die Schichten des Rheinischen Schiefergebirges über. Die Gesteinsschichten im Bereich der Nordeifel bilden vor allem paläozoische Ton-, Sand- und Kalksteine des Devons, die in einem Schelfmeer abgelagert wurden (WALTER 2010b). Diese Sedimente wurden im späten Oberkarbon im Rahmen der variszischen Gebirgsbildung von Süden ausgehend aufgefaltet, verstellt und verschiefert (HENNINGSEN & KATZUNG 2006). Charakteristisch für alle variszischen Orogene ist die in etwa südwest-nordost verlaufende Hauptstreichrichtung (variszisches Streichen) der Sättel und Mulden (RIBBERT 2010), die sich nach Norden auch ins Venn-Vorland fortsetzt (WALTER 2010b). Bereits während des frühen Mesozoikums begann die rasche Abtragung des variszischen Gebirges zu einer Rumpffläche (WALTER 2010b). Darauf folgte gegen Ende des Tertiärs und im Verlauf des Quartärs eine starke Anhebung dieser freigelegten Rumpffläche auf ihr heutiges Mittelgebirgsniveau. Das mit der Hebung einhergehende verstärkte Einschneiden des Gewässernetzes führte zur Ausbildung des heutigen Reliefs und zu Anlage steilhangiger Kerbtäler (WALTER 2010b). In den Hochflächen der einzelnen Eifelregionen sind die Rumpfflächen noch deutlich erkennbar (LIEDTKE & MARCINEK 2002). An der Oberfläche steigt das Relief des Untersuchungsgebiets im Süden von der Rurscholle mit dem Aachener Hügelland erst mäßig, dann über die Vennfußfläche (bei ca. 200-300 m NN) moderat, und schließlich deutlich über eine vielfach gegliederte Flächentreppe zur Dachfläche des Venn Sattels in der Nordeifel an (LIEDTKE & MARCINEK 2002). Das Aachener Hügelland gehört aufgrund seiner Überdeckung mit seinen Kreidesedimenten zu den mesozoischen Berg- und Hügelländern. Den Untergrund der Vennfußfläche bilden, im Vergleich zu weiter südlicheren Bereichen, deutlich geringmächtigere und weniger gefaltete Gesteinsfolgen von Sand-, Ton- und Karbonatgesteinen aus dem Devon und dem Karbon. Der Venn-Sattel, als Fortsetzung des Massivs von Stavelot in den Ardennen, stellt die dominante Faltenstruktur der Nordeifel dar, in dem mit Phylliten, Quarziten und Arkosen aus dem Kambrium die ältesten Gesteine im Rheinischen Schiefergebirge vorkommen. Überlagert werden diese jedoch von Schiefen aus dem Ordovizium (HENNINGSEN & KATZUNG 2006). Der höchste Punkt des Hohen Venn befindet sich mit 692 m NN in der belgischen Botrange (RIBBERT 2010). Seit dem jüngeren Tertiär hat der Venn-Sattel eine kräftige Hebung von mehr als 300 m erfahren, die bis heute anhält (LIEDTKE & MARCINEK 2002). Die südöstlich an den Venn-Sattel anschließende Rureifel besteht vornehmlich aus Wechselfolgen von Sandsteinen und Schiefen (WALTER 2010b). Heutzutage haben sich die Täler und die diversen Seitentäler von Rur, Kall, Urft und Olef bis zu 200 m in die Schiefergebirgsrumpffläche eingeschnitten und das Relief damit bedeutend geprägt. Weiter nach Südosten zur Grenze des Untersuchungsgebiets schließt sich die Kalkeifel mit der Eifeler Nord-Süd-Zone an, die durch eine Reihe von Kalkmulden, wie die Sötenischer oder die Blankenheimer Kalkmulde markiert wird (RIBBERT 2010). Die Mulden enthalten kalkige und mergelige Sedimentgesteine aus dem

Mittel- und Oberdevon und sind an eine Bewegungszone gebunden, die vermutlich bereits seit dem Altpaläozoikum besteht (HENNINGSEN & KATZUNG 2006). Östlich der Rureifel beziehungsweise nördlich der Kalkeifel reichen die westlichen Bereiche der Mechernicher Voreifel beziehungsweise der Mechernicher Triassenske (etwa innerhalb des Dreiecks Kreuzau, Kall und Mechernich) ins Untersuchungsgebiet hinein. Darin sind mächtige Folgen von Sandsteinen und Konglomeraten des Mittleren und des Oberen Buntsandsteins enthalten, die durch Störungen in kleine Schollen zerlegt sind (RIBBERT 2010).

### 3.1.2 Klimatische Bedingungen

Durch seine Lage in Mitteleuropa lässt sich das Untersuchungsgebiet nach der Klimaklassifikation von Köppen-Geiger und der darauf beruhenden aktualisierten Klimaweltkarte von KOTTEK et al. (2006) klimatisch als Cfb-Klima (warm-gemäßigtes Regenklima) einordnen. Es befindet sich ganzjährig im Einflussbereich der West-Wind-Drift, wodurch vor allem maritime Luftmassen wetterbestimmend sind (WEISCHET & ENDLICHER 2000). In Bezug auf das Klima führt dies zu insgesamt eher kühlen Sommern und im Allgemeinen milden Wintern (GENBLER 2010). Kontinental geprägte Wetterlagen mit längeren Phasen hohen Luftdrucks sind jedoch auch möglich. In den Sommermonaten kann dies bei östlichen Windrichtungen auch zu längeren Trockenphasen mit höheren Temperaturen führen. In den Wintermonaten drückt sich der kontinentale Hochdruckeinfluss hingegen in Kälteperioden aus (OTTE 1989). Innerhalb des Rureinzugsgebiets zeichnen sich deutliche klimatische Unterschiede durch die Orographie der Niederrheinischen Bucht und der Eifel ab. Abbildung 3.2 zeigt die Klimadiagramme von Jülich und Kall-Sistig exemplarisch für die allgemeinen klimatischen Bedingungen der beiden Regionen.

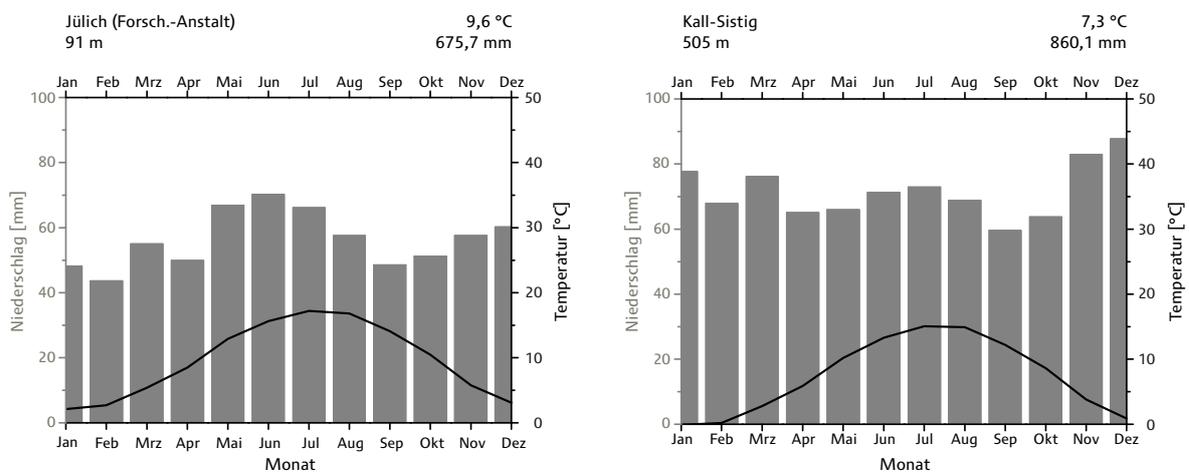


Abbildung 3.2: Klimadiagramme von Jülich und Kall-Sistig (Datengrundlage: DWD 2011, 2012).

Die Bereiche in der Niederrheinischen Bucht sind bis zu Höhenlagen unter 150 m ü. NN von Jahresmitteltemperaturen über 9°C und jährlichen Niederschlagsmengen im Bereich von 600-1000 mm gekennzeichnet (GENBLER 2010). Die Niederschlagsverteilung ist dabei durch eine starke Amplitude im Jahresgang charakterisiert. Der Hauptanteil der Niederschläge fällt in den Sommermonaten und ist durch die erhöhte Einstrahlung oftmals an Schauer oder Gewitter gebunden. Man spricht beim Niederschlagsregime in der Niederrheinischen Bucht vom sogenannten Sommertyp (OTTE 1989). In der Eifel hingegen nimmt die Temperatur im Mittel um 0,7°C pro 100 m Höhe ab, so dass die Jahresmittelwerte in Höhenlagen der Eifel auf unter 7°C absinken. Demgegenüber steigen die mittleren Jahresniederschläge durch Stauungseffekte mit der Höhe in den westlichen Bereichen im Luv der Eifel auf teilweise über 1400 mm an (GENBLER 2010). In der nordöstlich an die Eifel anschließenden Zülpicher Börde führt dies durch den damit verbundenen Lee-Effekt zu deutlich verminderten mittleren Jahresniederschlägen von teilweise unter 600 mm (OTTE 1989). Im Vergleich zur Niederschlagsverteilung der Niederrheinischen Bucht, tritt in der Eifel neben einem Hauptniederschlagsmaximum im Sommer ein weiteres sekundäres Maximum im Winter auf (sogenannter Mittelgebirgstyp). Verursacht wird dies durch das niedrigere Kondensationsniveau im Winter, was durch Stauereffekte in Höhenlagen zu vermehrtem Niederschlag führt. Daraus resultieren in den Höhenlagen auch häufig geschlossene Schneedecken in den Wintermonaten (OTTE 1989). Verbunden mit den Unterschieden bei Temperatur und Niederschlag ist auch der Beginn und die Länge der Vegetationszeit der beiden Teile des Rureinzugsgebiets. Diese wird anhand der Phänologie von typischen Leitpflanzen in Bezug auf den Beginn der Blüte und den Eintritt der Blattverfärbung ermittelt. Die Apfelblüte, die als Indikator für den Beginn des Vollfrühlings dient, beginnt in den höheren Lagen der Eifel beispielsweise bis zu drei Wochen später als in der Kölner Bucht (JOBST & ERASMI 2008). Auch die phänologische Vegetationszeit ist für den Betrachtungszeitraum 1991-2009 in der Niederrheinischen Bucht mit ungefähr 223 Tagen im Mittel etwa 10 Tage länger als in den Höhenlagen der Eifel, wo diese im Schnitt etwa 213 Tage andauert (GENBLER 2010).

### **3.1.3 Naturräume, Böden und Landnutzung**

Wie in Abbildung 3.3a dargestellt, lässt sich das Untersuchungsgebiet beruhend auf der geologischen Situation, der Oberflächenmorphologie sowie der daraus in bedeutendem Maße resultierenden landschaftlichen Gestalt in mehrere naturräumliche Haupteinheiten untergliedern (LANUV NRW 2011). Diese Unterteilung erfasst zwar nur die Bereiche in Deutschland, die jeweiligen Naturräume sollten im Allgemeinen jedoch auf die angrenzenden Bereiche in Belgien und den Niederlanden übertragbar sein. Die folgende Beschreibung der naturräumlichen Haupteinheiten beruht größtenteils auf den entsprechenden Begleittexten (Verweis durch die Zahlen in Klammern), die mit den Daten digital verfügbar sind (vgl.

Kapitel 3.3.5). Daneben erfolgte die visuelle Interpretation des Informationssystems Bodenkarte von NRW 1:50.000 (GD.NRW 2011) sowie aktueller Luftbilder (vgl. Kapitel 3.2.6).

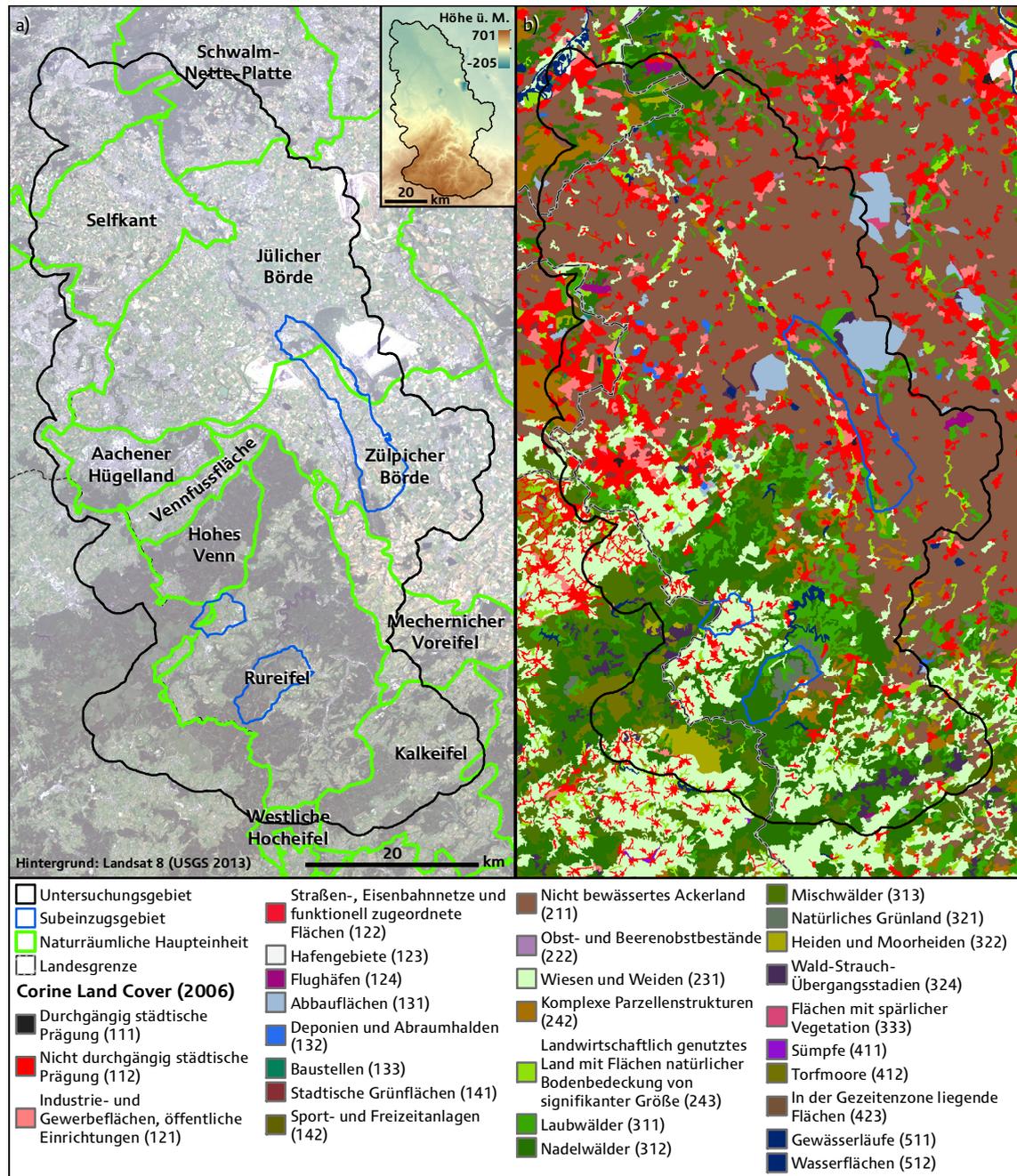


Abbildung 3.3: Naturräumliche Haupteinheiten in Nordrhein-Westfalen und Corine Land Cover 2006 (Datengrundlage: Corine Land Cover 2006 (EEA 2011); Naturräumliche Haupteinheiten in Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW 2011)).

Die in Kapitel 3.1.1 beschriebene Zweiteilung des Untersuchungsgebiets überträgt sich auch auf die naturräumliche Gestalt und die grundsätzliche Landnutzung. So wird durch die Betrachtung der CLC-Daten (vgl. Kapitel 3.3.3) in Abbildung 3.3b deutlich, dass die Nordhälfte vor allem ackerbaulich geprägt ist, wohingegen Waldgebiete und Grünlandnutzung die Südhälfte charakterisieren. Die naturräumlichen Haupteinheiten im Bereich der

Niederrheinischen Bucht (Selfkant, Jülicher Börde, Zülpicher Börde und Schwalm-Nette-Platte) zeichnen sich demnach durch intensiven Ackerbau aus. Dies ist an die ausgedehnten Gebiete fruchtbarer Böden wie Braun- und besonders Parabraunerden der Jülicher Börde und der Zülpicher Börde geknüpft, die sich aus den pleistozänen Lössablagerungen auf den Hauptterrassenebenen entwickeln konnten. Die Bördenlandschaften sind Altsiedelland und teilweise seit Jahrtausenden bewirtschaftet (554, 553). Waldgebiete oder Grünlandnutzung treten hier deutlich in den Hintergrund. Grünlandnutzung ist vermehrt in den größeren Talniederungen anzutreffen, wohingegen Waldgebiete an steile Hänge oder in Talniederungen zurückgedrängt worden sind. Die insgesamt vergleichsweise kleinen Waldgebiete stehen auf Podsol-Braunerden. Von den vereinzelt größeren Waldgebieten ist der Stockheimer Wald südlich von Düren oder die Bürge (Hambacher Forst) südöstlich des Tagebaus Hambach zu nennen, die die Jülicher von der Zülpicher Börde trennt (554). Des Weiteren sind künstliche Aufforstungen wie die Sophienhöhe beim Tagebau Hambach zu erwähnen.

Im Aachener Hügelland treten neben den vorherrschenden Böden der Börde zusätzlich vermehrt auch Pseudogleye auf, die sich auf Tonsteinen des Oberkarbons entwickelt haben. Auf Kalken oder Mergeln der Oberkreide entwickelten sich hingegen Rendzinen oder Kalkbraunerden. Im Aachener Wald, als bedeutendstes Waldgebiet in diesem Gebiet, haben sich teilweise Podsole aus dem sandigen Untergrund gebildet (561). Aufgrund der starken Besiedlung nimmt der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche deutlich ab, wobei dann Grünland vorherrschend ist. In Auen treten vermehrt Gleye, Gley-Vegas und Pseudogleye, teilweise auch Niedermoore, auf (570). Die größten Städte im Untersuchungsgebiet sind Aachen und Düren.

Im Bereich der Vennfußfläche sind pseudovergleyte oder podsoliierte Braunerden, die sich aus silikatischem Festgestein oder aus Hang- und Hochflächenlehm entwickelt haben, vorherrschend. Parabraunerden, die auf Lössablagerungen hinweisen, treten hier deutlich zurück (560). Insgesamt ist diese Region zwar deutlich besiedelt, aber durch eher kleine Ortschaften gekennzeichnet. Die Vennfußfläche unterscheidet sich mit Grünland als dominante Landnutzung relativ deutlich von den angrenzenden Einheiten. Waldgebiete spielen eine nur sehr untergeordnete Rolle.

In Kontrast dazu ist die schwach gewölbte schildförmige Hochfläche des Hohen Venns im deutschen Teil, abgesehen von einigen Rodungsbereichen mit Grünland, fast ausschließlich von Waldflächen eingenommen. Dabei hat Nadelholzforst heutzutage großflächig die ursprünglichen Laubwälder ersetzt (283). Verbunden mit den stark wasserstauenden tertiären Verwitterungsschichten im Untergrund, haben sich im Hohen Venn, neben Braunerden, vor allem Bodentypen mit Staunässecharakter (wie Pseudogley, Anmoor-Stagnogley und Niedermoor) bis hin zum Hochmoor gebildet (283, BK50). Nach Südwesten sowie oberhalb von etwa 500 m NN nehmen die Moorflächen holozäner Entstehung (vor allem in Belgien

gelegen) immer weitere Gebiete ein. Herauszustellen ist hierbei besonders das Wallonische Venn, bei dem es sich um ein ombrogen-soligenes Sattelhochmoor handelt (WALTER 2010b).

In der Rureifel nehmen die Waldflächen zugunsten von Grünland deutlich ab. Ackerflächen haben nur einen relativ geringen Flächenanteil (282). Aus dem silikatischen Festgestein haben sich abseits der Täler hier vor allem zumeist pseudovergleyte basenarme Braunerden entwickelt (RIBBERT 2010). Je nach Geländedeposition treten auch Rohböden wie Ranker oder Übergangsformen zur Braunerde auf. Erwähnenswert sind die ackerbaulich genutzten Böden auf Tonsteinen des Oberen Buntsandsteins im Bereich zwischen Kall und Nideggen, auf denen verbreitet Braugerste angebaut wird (RIBBERT 2010). In den zahlreichen Tälern treten typische Auenböden von der Auenbraunerde bis zum Auengley auf (282).

Neben den Böden, die bereits für die Rureifel genannt wurden, finden sich in der Kalkeifel auf Karbonatgesteinen der Kalkmulden basenreiche und nährstoffreiche Braunerden, die bei einem höheren Lössanteil oftmals Ackerstandorte darstellen (RIBBERT 2010). In Hangbereichen bilden sich hingegen Rendzinen aus. Die Bereiche der Kalkmulden sind im Allgemeinen eher unbewaldet. Auch der Anteil an Grünland, der hauptsächlich für die extensive Weidewirtschaft und die Feldgraswirtschaft genutzt wird, ist im Vergleich geringer (276). In den bewaldeten Gebieten mit silikatischem Untergrund, die einen hohen Fichtenanteil aufweisen, nehmen Pseudogley oder Pseudogley-Braunerde eine bedeutende Stellung ein (RIBBERT 2010).

Der Bereich der Mechernicher Voreifel innerhalb des Untersuchungsgebietes ist vor allem durch ackerbauliche Nutzung, zumeist auf (pseudovergleyten) Braunerden, gekennzeichnet. Grünland tritt vor allem in Talniederungen sowie im Umkreis von Ortschaften auf (eigene visuelle Luftbildinterpretation). Waldgebiete sind zumeist auf Flächen des mittleren Buntsandsteins anzutreffen (275).

Hinsichtlich der ackerbaulichen Nutzung ist das Untersuchungsgebiet, auf Grundlage der Agrarstrukturerhebung 2007 (IT.NRW 2009) auf Landkreisebene, besonders in der Nordhälfte stark durch den Anbau von Winterweizen und Zuckerrüben mit Flächenanteilen von teilweise weit über 10.000 ha geprägt. Zu den weiteren großflächig angebauten Feldfrüchten zählen Wintergerste, Kartoffeln, Mais und Winterraps. Der Kreis Euskirchen, der etwa zur Hälfte im südlichen Untersuchungsgebiet liegt, ist zudem durch einen verhältnismäßig großen Anteil von Sommergerstenanbau gekennzeichnet. Zuckerrüben treten dort gegenüber den anderen Kreisen stark zurück.

## 3.2 MDA-Teil FE: Verwendete Fernerkundungsdaten

Wie in Kapitel 2.3.2 dargestellt, stehen zur fernerkundungsbasierten Landnutzungsanalyse eine Vielzahl an generell geeigneten multispektralen Fernerkundungssensoren zur Verfügung, die sich jedoch in ihrer spektralen, räumlichen und temporalen Auflösung sowie in der *swath width* deutlich unterscheiden. Die Datenauswahl zur multitemporalen Landnutzungsanalyse des Rureinzugsgebiets erfolgte daher, neben der generellen spektralen Eignung zur Analyse der Landnutzung speziell auf Vegetationsflächen, unter mehreren Gesichtspunkten. Da multitemporale Analysen geplant waren, sollte die Wiederholrate eines Systems mehrere Aufnahmen während der Vegetationsperiode ermöglichen. In Bezug auf das Ausmaß des Untersuchungsgebiets sollte zudem eine vollständige räumliche Abdeckung im Idealfall mit einer Observation möglich sein. Unter Berücksichtigung des angestrebten Zielmaßstabs von 1:50.000 war eine räumliche Auflösung notwendig, die sich zur Unterscheidung der wesentlichen Bereiche der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf Schlagebene eignet, damit die dominanten Feldfrüchte erfassbar sind. Infolge der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Verknüpfung zwischen *swath width* und Pixelgröße, aber auch in Bezug auf Datenverfügbarkeit, Datenkosten, effiziente Informationsgewinnung und Datenaufkommen, wurde die Auswahl daher auf räumlich moderat auflösende Sensorensysteme bis maximal 30 m Pixelgröße eingegrenzt. Im Folgenden werden nun die Sensorensysteme vorgestellt, die diesen Vorgaben entsprechen und die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden.

### 3.2.1 Landsat-5

Die Landsat-Satelliten werden als staatliches US-amerikanisches Vorhaben zurzeit in einer Kooperation von National Aeronautics and Space Administration (NASA) und U.S. Geological Survey (USGS) betrieben (USGS 2013d). Der seit dem 1. März 1984 im Orbit befindliche Landsat-5 verfügt mit dem Multispectral Scanner (MSS) und dem Thematic Mapper-Sensor (TM) über zwei multispektrale Sensorensysteme, wobei der MSS im Jahre 1999 deaktiviert wurde (USGS 2013a) und daher nicht weiter beschrieben wird. Im Gegensatz dazu war der TM-Sensor an Bord von Landsat-5 trotz seines für Fernerkundungssysteme sehr hohen Alters von fast 30 Jahren, im Analysezeitraum dieser Arbeit noch funktionsfähig. Aktuelle Landsat-5-Daten waren für das Untersuchungsgebiet (abgesehen von 2008) kostenfrei über verschiedene Webportale des USGS wie beispielsweise EarthExplorer ([earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov)) oder Glovis ([glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov)) verfügbar und wurden in die Analysen einbezogen. Der TM-Sensor (vgl. Kapitel 2.3.2) erfasst von der Erdoberfläche ausgesandte elektromagnetische Strahlung in sieben Bändern im Bereich vom sichtbaren Licht bis ins thermale Infrarot, mit einer räumlichen Auflösung von 30 m für die Bänder 1-5 und 7 sowie 120 m für Band 6. Er verfügt dabei über eine *swath width* von 185 km (Szenenausmaß ca. 185



x185 km) bei einer Wiederholrate von 16 Tagen (CAMPBELL & WYNNE 2011). Beim Aufnahmesystem des TM handelt es sich um einen optomechanischen Scanner (*wiskbroom*), der die Erdoberfläche unter Verwendung eines beweglichen Drehspiegels zeilenweise quer zur Flugrichtung abtastet. Die erfasste Strahlung gelangt über ein optisches System zum Detektor (LÖFFLER et al. 2005).

Tabelle 3.1: Eigenschaften von Landsat-5 und dem TM-Sensor (JENSEN 2007, LILLESAND et al. 2008).

Startdatum	1. März 1984
Orbithöhe	705 km (sonnensynchron)
Inklination	98,2°
Orbitdauer	99 min
Anzahl der Orbits pro Tag	14,5
Überquerung des Äquators	09:45h (lokale Sonnenzeit)
Sensortyp	multispektraler optomechanischer Scanner ( <i>wiskbroom</i> )
Swath Width	185 km
Bodenpixelauflösung	
Bänder 1-5, 7	30 m
Band 6	120 m
Wiederholrate	16 Tage
radiometrische Auflösung	8 bit
Spektralbänder (TM)	
Blaugrün (B1)	0,45-0,52 $\mu\text{m}$
Grün (B2)	0,52-0,60 $\mu\text{m}$
Rot (B3)	0,63-0,69 $\mu\text{m}$
Nahes IR (B4)	0,76-0,90 $\mu\text{m}$
Mittleres IR (B5)	1,55-1,75 $\mu\text{m}$
Thermales IR (B6)	10,4-12,5 $\mu\text{m}$
Mittleres IR (B7)	2,08-2,35 $\mu\text{m}$

Tabelle 3.1 fasst die wesentlichen Eigenschaften des Landsat 5-TM-Systems zusammen. Aufgrund der differenzierten Analytik von Emissionsdaten und der geringeren räumlichen Auflösung, wurden die Daten von Band 6 in dieser Arbeit allerdings nicht verwendet. Landsat-Daten werden je nach Datenquelle in unterschiedlichen Prozessierungsstufen bereitgestellt. Über den USGS kostenfrei verfügbare Landsat 5-TM-Daten wurden in der für Archivdaten standardmäßigen Prozessierungsstufe L1T bezogen. Dabei handelt es sich um systemspezifisch radiometrisch und geometrisch korrigierte Daten im GeoTIFF-Format, die zudem bereits unter Verwendung von Höhendaten (GLS2000) und dem Resampling-Verfahren *cubic convolution* in die Kartenprojektion WGS84/UTM überführt wurden (USGS 2013c). Für das Jahr 2008 verwendete Landsat 5-TM-Daten waren jedoch nicht über den USGS verfügbar, sondern wurden über die Firma Euromap GmbH ([www.euromap.de](http://www.euromap.de)) in Neustrelitz bezogen. Die entsprechenden Szenen wurden im ESA CEOS-Format (ESA=European Space Agency; CEOS=Committee on Earth Observation Satellites) in der Prozessierungsstufe 1G abgegeben. Dabei handelt es sich dabei ebenfalls um systemspezifisch

radiometrisch und geometrisch korrigierte Daten, die in das Bezugssystem WGS84/UTM (Zone 32N) projiziert wurden (Resampling-Verfahren *cubic convolution*). Allerdings verfügen die Szenen bei Auslieferung über eine Satellitenpfad-Ausrichtung (*path oriented*).

### 3.2.2 Landsat-7

Landsat-7 bildet den Nachfolger von Landsat-5 (Landsat-6 erreichte nicht den Erdorbit) und wurde am 15. April 1999 gestartet. Er besitzt im Wesentlichen die gleichen Orbitparameter, die gleiche *swath width* und die identische Wiederholrate wie Landsat-5. Der auf Landsat-7 eingesetzte Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) stellt eine Weiterentwicklung des TM-Sensors dar. Neben den vom TM-Sensor bekannten Multispektralbändern mit identischer räumlicher Auflösung von 30 m für die Bänder 1-5 und 7, verfügt ETM+ zusätzlich über ein panchromatisches Band mit einer Auflösung von 15 m (14,25 m). Darüber hinaus wurde die räumliche Auflösung des thermalen Band 6 auf 60 m erhöht (LILLESAND et al. 2008). Die gute Kalibrierungsmöglichkeit der einzelnen Bänder stellt ein wesentliches Merkmal von ETM+ dar (JENSEN 2007).

Tabelle 3.2: Eigenschaften von Landsat-7 und dem ETM+-Sensor (KRAMER 2002, JENSEN 2007, CAMPBELL & WYNNE 2011).

Startdatum	15. April 1999
Orbithöhe	705 km (sonnensynchron)
Inklination	98,2°
Orbitdauer	99 min
Anzahl der Orbits pro Tag	14,5
Überquerung des Äquators	10:00 h ± 15 min. (lokale Sonnenzeit)
Sensortyp	multispektraler optomechanischer Scanner (wiskbroom)
Swath Width	185 km
Bodenpixelauflösung	
Bänder 1-5, 7	30 m
Band 6	120 m
Band 8 (panchromatisch)	15 m
Wiederholrate	16 Tage
radiometrische Auflösung	8 bit
Spektralbänder (ETM+)	
Blaugrün (B1)	0,450-0,515 µm
Grün (B2)	0,525-0,605 µm
Rot (B3)	0,630-0,69 µm
Nahes IR (B4)	0,75-0,90 µm
Mittleres IR (B5)	1,55-1,75 µm
Thermales IR (B6)	10,4-12,5 µm
Mittleres IR (B7)	2,08-2,35 µm
Panchromatisch (B8)	0,52-0,90 µm

Tabelle 3.2 fasst die wesentlichen Eigenschaften von Landsat-7-ETM+ zusammen. Für die Analysen dieser Arbeit wurden nur die multispektralen Bänder des ETM+-Sensors verwendet. Im May 2003 führte ein Defekt des sogenannten Scan Line Corrector (SLC) dazu, dass die quer zur Flugrichtung aufgezeichneten Abtaststreifen in den prozessierten Bilddaten nicht mehr korrekt angeordnet werden können. ETM+-Szenen, die seitdem im sogenannten SLC-off-Modus aufgezeichnet werden, enthalten aufgrund dessen sich zu den westlichen und östlichen Rändern vergrößernde keilförmige Datenlücken, die etwa 22 % einer Szene ausmachen (STOREY et al. 2005, USGS 2010). In Abhängigkeit vom Bereich einer Szene, ist die Datenqualität dadurch mitunter stark eingeschränkt. ETM+-Daten wurden daher vor allem als mögliche Alternative betrachtet, sofern für einen bestimmten Zeitraum keine Daten anderer Sensoren verfügbar waren. Im Gegensatz zu den Landsat-TM-Daten, wurden ETM+-Daten ausschließlich über den USGS kostenfrei bezogen. Das verwendete Datenprodukt L1T war dabei mit dem der TM-Daten identisch (vgl. Kapitel 3.2.1).

### 3.2.3 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)

Das multispektrale Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), an Bord des Satelliten Terra (ehemals EOS-AM1), befindet sich seit Dezember 1999 im Orbit. ASTER wurde unter Federführung des japanischen Ministeriums für Internationalen Handel und Industrie (MITI) entwickelt, wird allerdings als „Flaggschiff“ des EOS-Projekts der NASA in einem Gemeinschaftsprojekt der USA und Japan betrieben (ASTERWEB 2004, ERSDAC 2005). ASTER gilt als technische Weiterentwicklung von Sensoren wie Landsat-TM und JERS-1 OPS und wurde zur Untersuchung der Interaktion von Geosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Atmosphäre aus einem geophysikalischen Blickwinkel konzipiert (FUJISADA 1995). Terra besitzt den gleichen Orbit wie Landsat-7 und befindet sich somit ebenfalls in einer polnahen, sonnen-synchronen Erdumlaufbahn in 705 km Höhe, wobei der Äquator etwa gegen 10.30 h Ortszeit überquert wird (FUJISADA 1995). Die ASTER-Sensoren verfügen über eine *swath width* von 60 km bei einer Distanz zwischen benachbarten Orbits von 172 km. Jede Umlaufbahn wiederholt sich alle 16 Tage (vgl. Tabelle 3.3). Durch *pointing* ist jedoch beispielsweise bei Umweltkatastrophen, vor allem in Äquatornähe, eine erhebliche Verkürzung der Beobachtungsintervalle möglich (YAMAGUCHI et al. 1998). ASTER erfasst die von der Erdoberfläche reflektierte und emittierte elektromagnetische Strahlung im optischen Bereich mit drei Bändern im VNIR und sechs Bändern im SWIR sowie in fünf weiteren Bändern im Thermalbereich (TIR), die sich auf drei verschiedene Sensoren mit unterschiedlicher räumlicher und spektraler Auflösung verteilen (ABRAMS 2000). Aufgrund der zu groben räumlichen Auflösung von 90 m und der differenzierten Analytik, die Emissionsdaten erfordern, wurden die ASTER-TIR-Kanäle in

dieser Arbeit nicht verwendet. Daher wird auf das TIR-System nicht weiter eingegangen. Beim VNIR-Subsystem handelt es sich um einen sogenannten optoelektronischen CCD-Sensor (CCD = Charge Coupled Devices), auch als *pushbroom* bezeichnet, der über drei Kanäle im Wellenlängenbereich vom sichtbaren Licht bis ins nahe Infrarot (0,52-0,86  $\mu\text{m}$ ) mit einer räumlichen Auflösung von 15 m und einer radiometrischen Auflösung von 8 bits verfügt (FUJISADA 1995). Wie in Abbildung 3.4 zusehen, wurde im Vergleich zu Landsat-ETM+ auf einen Band im Blau verzichtet, so dass im sichtbaren Licht nur der grüne (Band 1) und rote Wellenlängenbereich (Band 2) erfasst wird. Band 3 befindet sich im nahen Infrarot.

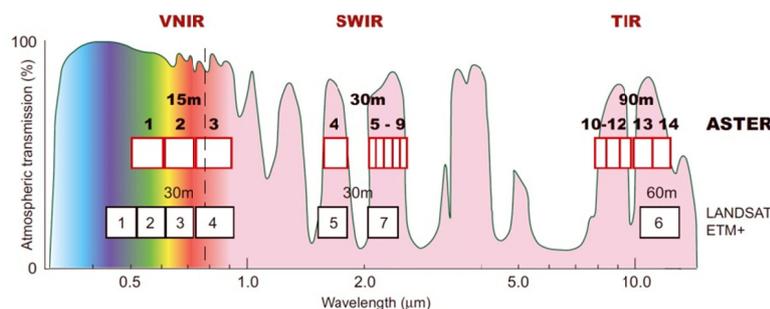


Abbildung 3.4: Verteilung der ASTER-Kanäle über das elektromagnetische Spektrum im Vergleich zu Landsat-ETM+. Um die Leistungsfähigkeit zu verbessern, ist die optische Aufnahmeeinheit in die drei unterschiedliche Subsysteme VNIR, SWIR und TIR unterteilt, die in den jeweiligen Spektralbereichen aufzeichnen (KÄÄB et al. 2003), verändert.

Diese Kanalverteilung wurde vor allem zur Differenzierung von Vegetation (Band 2+3) sowie von Eisenoxid-Mineralen in Böden und des an der Erdoberfläche anstehenden Gesteins gewählt (YAMAGUCHI et al. 1998). Besonderheit des VNIR-Systems ist die Unterteilung von Band 3 (NIR) in Band 3N (*nadir*) und Band 3B (*backward looking*). Durch ein zusätzliches, im Winkel von  $27,6^\circ$  zurück gerichtetes Teleskop (*along-track*), erfolgt neben der Nadir-Aufnahme (3N) eine zeitversetzte erneute Aufnahme (3B). Hierdurch ist die Erzeugung stereoskopischer Bilder in einem Überflug möglich, aus denen sich digitale Höhenmodelle ableiten lassen (FUJISADA et al. 2005, BOLTEN & BUBENZER 2006).

Tabelle 3.3: ASTER-Orbitparameter und Eigenschaften des VNIR-Sensors (ERSDAC 2005).

Orbit	sonnensynchron
Überquerung des Äquators	10:30 h $\pm$ 15 min. Ortszeit
Flughöhe	700-737 km (705 km am Äquator)
Inklination	$98,2^\circ \pm 0,15^\circ$
Wiederholrate	16 Tage (233 Umläufe/16 Tage)
Distanz zwischen benachbarten Orbits	172 km
Orbitdauer	98,9 min
Sensortyp	multispektraler optoelektronischer Scanner ( <i>pushbroom</i> )
Swath Width	60 km
Bodenpixelauflösung	15 m
Spektralbänder (nur VNIR)	
Grün (B1)	0,52-0,60 $\mu\text{m}$
Rot (B2)	0,63-0,69 $\mu\text{m}$
Nahes Infrarot (3N/3B)	0,78-0,86 $\mu\text{m}$

Eine weitere Besonderheit stellt der Sensor des SWIR-Subsystems dar, da dieser im Vergleich zu Landsat-ETM+ im Wellenlängenbereich von 2,1-2,4  $\mu\text{m}$ , anstatt eines breiten, über fünf spektral relativ schmale Bänder bei gleicher räumlicher Auflösung von 30 m verfügt (vgl. Abbildung 3.4). Da in diesem Bereich zahlreiche Materialien (vor allem Mineralien) charakteristische Absorptionsmerkmale besitzen (ABRAMS & HOOK 1995, YAMAGUCHI ET AL. 1998), wurde das SWIR-Instrument auch zur Unterscheidung unterschiedlicher Landbedeckungen (zum Beispiel unbedeckter Boden/Asphalt) als hilfreich eingeschätzt. Der SWIR-Sensor ist infolge eines technischen Defekts seit April 2008 allerdings nicht mehr funktionsfähig (LP DAAC 2009). Daher konnten im Rahmen dieser Arbeit nur Daten des VNIR-Systems verwendet werden.

ASTER-Szenen umfassen eine Fläche von 60 x 60 km und werden im HDF-EOS-Format ausgeliefert, einer Modifikation des Hierarchical Data Format (HDF) (ERSDAC 2007). Die einzelnen Kanäle sind im BSQ-Format (BSQ = *band sequential*) abgespeichert. ASTER-Daten sind in verschiedenen Prozessierungsstufen verfügbar. Das grundlegende Datenprodukt ist Level 1A (AST\_L1A) mit der Bezeichnung Reconstructed Unprocessed Instrument Data V003 (ERSDAC 2007). Neben den Bilddaten aller drei Teleskope (*radiance at sensor*) enthalten L1A-Daten geometrische und radiometrische Korrekturkoeffizienten sowie weitere Metadaten (ABRAMS 2000, IWASAKI & FUJISADA 2005, SAKUMA et al. 2005). Im auf Anfrage verfügbaren Datenprodukt AST\_L1B Registered Radiance at the Sensor sind die in AST\_L1A-Daten enthaltenen Korrekturkoeffizienten bereits angewendet und die Szenen ins UTM-System mit dem zugrundeliegenden WGS84-Ellipsoiden projiziert (ERSDAC 2007). Die aufgezeichnete *radiance* liegt in der Einheit  $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$  vor. L1B-Daten bilden die Grundlage aller ASTER-Datenprodukte höherer Prozessierungsstufen mit Ausnahme der ASTER-Höhenmodelle, für die AST\_L1A verwendet werden (ABRAMS 2000). Die in dieser Arbeit verwendeten ASTER-Aufnahmen wurden zunächst über die Web-Applikation ASTER DAR Tool (LP DAAC 2013) des Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) des USGS in Sioux Falls (South Dakota) beantragt und anschließend nach erfolgreicher Aufnahme im Laufe der Zeit über verschiedene Webportale des USGS beziehungsweise im Rahmen des Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) der National Aeronautics and Space Administration (NASA) bezogen. Für autorisierte Nutzer sind ASTER-Daten zurzeit kostenlos über das Web-Portal Reverb (EOSDIS 2013) verfügbar.

### 3.2.4 IRS-P6

Bei IRS-P6 (auch als Resourcesat-1 bezeichnet) handelt es sich um einen Erdbeobachtungssatelliten des Fernerkundungsprogramms der indischen Regierung (Indian Remote Sensing, IRS), der sich seit Oktober 2003 in einem sonnensynchronen polnahen Orbit

befindet. IRS-P6 verfügt mit dem Linear Imaging Self-scanning Sensor-III (LISS-III), dem LISS-IV und dem Advanced Wide Field Sensor (AWiFS) über verschiedene multispektrale Aufnahmesysteme von feiner bis moderater räumlicher Auflösung (5,8-70 m) (NRSA 2003). Im Rahmen dieser Arbeit wurden aufgrund der zuvor formulierten Anforderungen ausschließlich Daten des LISS-III-Sensors verwendet. Der LISS-III-Sensor verfügt über vier multispektrale Kanäle im Spektralbereich vom sichtbaren Licht bis ins kurzwellige Infrarot (SWIR), bei einer räumlichen Auflösung von 23,5 m und einer *swath width* von 141 km. Er kann damit in Bezug auf die räumliche Auflösung und die *swath width* zwischen ASTER (VNIR) und Landsat (TM/ETM+) eingeordnet werden. Bei der Auswahl der Bänder wurde wie bei ASTER auf einen Kanal im Blau verzichtet. Der LISS-III verfügt dafür aber über einen mit ASTER-Band 4 oder Landsat-TM-Band 5 vergleichbaren Kanal im SWIR. Aufgrund dieser Eigenschaften wurden LISS-III-Daten als geeignete Ergänzung zu den zuvor beschriebenen Sensoren angesehen. Tabelle 3.4 fasst die Orbitparameter der IRS-P6-Mission sowie die wichtigsten Eigenschaften des LISS-III-Sensors zusammen.

Tabelle 3.4: Eigenschaften der IRS-P6-Mission und des LISS-III-Sensors (NRSA 2003).

Startdatum	17. Oktober 2003
Orbithöhe	817 km (sonnensynchron)
Inklination	98,7°
Orbitdauer	101,35 min
Anzahl der Orbits pro Tag	14
Überquerung des Äquators	10:30h (lokale Sonnenzeit)
Sensortyp	multispektraler optoelektronischer Scanner (pushbroom)
Swath Width	141 km
Bodenpixelauflösung	23,5 m
Wiederholrate	24 Tage
radiometrische Auflösung	7 bit
Spektralbänder	
Grün (B2)	0,52-0,59 $\mu\text{m}$
Rot (B3)	0,62-0,68 $\mu\text{m}$
Nahes Infrarot (B4)	0,77-0,86 $\mu\text{m}$
SWIR (B5)	1,55-1,70 $\mu\text{m}$

Der Vertrieb von IRS-P6-Daten für europäische Gebiete erfolgt zurzeit über die Euromap GmbH. IRS-P6-LISS-III-Daten werden von Euromap in verschiedenen Szenengrößen (70 x 70 km oder 140 x 140 km), Datenformaten (Fast Format, Super Structure oder TIFF) und entsprechenden Prozessierungsstufen (Radiometrically Corrected oder System Corrected) angeboten. Bei den Datenformaten Fast Format und Super Structure (jeweils Datenspeicherung im BSQ-Format) handelt es sich um originäre IRS-Datenformate, wobei letzteres neben den reinen Bilddaten zusätzlich Metadaten enthält (NRSA 2003). Höhere Prozessierungsstufen werden von Euromap in einer räumlichen Auflösung von 20 m im TIFF-Format abgegeben. Während bei der Prozessierungsstufe Radiometrically Corrected nur

sensorspezifische radiometrische Korrekturen durchgeführt werden, ist das Datenprodukt System Corrected (plus Ortho Kit) bereits in Bezug auf uneinheitliche Detektoreigenschaften radiometrisch sowie im Hinblick auf systemabhängige Verzerrungen geometrisch korrigiert und georeferenziert. Darüber hinaus enthält das Produkt Ortho Kit zusätzlich rationale Polynomkoeffizienten (*rational polynomial coefficients*, RPC), um eine Orthorektifizierung durchführen zu können.

### 3.2.5 RapidEye

Neben den multispektralen Fernerkundungssatellitensensoren mit moderater räumlicher Auflösung standen für diese Arbeit ab dem Jahr 2009 zusätzlich räumlich hochauflösende Fernerkundungsdaten des RapidEye-Systems der RapidEye AG ([www.rapideye.com](http://www.rapideye.com)) zur Verfügung. Ab dem Jahr 2010 wurden die RapidEye-Daten zudem nach einer Antragsbewilligung kostenfrei über das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderte RapidEye Science Archive (RESA) bezogen. Daher konnten auch für das Jahr 2009 nachträglich Szenen in die Analysen einbezogen werden, die zuvor aus Kostengründen nicht verwendet werden konnten. Bei RapidEye (RE) handelt es sich um eine Konstellation aus fünf baugleichen Satelliten in einem sonnensynchronen Orbit, die es ermöglichen, theoretisch tägliche Aufnahmen von einem Punkt der Erde durchzuführen (RAPIDEYE 2012). Die RE-Satelliten sind mit einem multispektralen *pushbroom*-Sensor mit 5 Bändern im VNIR-Spektralbereich ausgestattet (vgl. Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Eigenschaften des RapidEye-Systems (RAPIDEYE 2012).

Startdatum	17. Oktober 2003
Orbithöhe	817 km (sonnensynchron)
Inklination	98,7°
Orbitdauer	101,35 min
Anzahl der Orbits pro Tag	14
Überquerung des Äquators	10:30h (lokale Sonnenzeit)
Sensortyp	multispektraler optoelektronischer Scanner ( <i>pushbroom</i> )
Swath Width	141 km
Bodenpixelauflösung	23,5 m
Wiederholrate	24 Tage
radiometrische Auflösung	7 bit
Spektralbänder	
Grün (B2)	0,52-0,59 $\mu\text{m}$
Rot (B3)	0,62-0,68 $\mu\text{m}$
Nahes Infrarot (B4)	0,77-0,86 $\mu\text{m}$
SWIR (B5)	1,55-1,70 $\mu\text{m}$

Eine Besonderheit des RE-Sensors ist das *red edge*-Band, welches vor allem auf die verbesserte Charakterisierung von Vegetation abzielt (WEICHELT et al. 2012). Die RE-Sensoren verfügen über eine *swath width* von 77 km bei einer *ground sampling distance* (GSD) von 6,5 m (Nadir). Die RE-Sensoren zeichnen Bilddaten mit 12 bit auf, für die Datenprodukte erfolgt jedoch eine Skalierung zu *at sensor radiance*-Werten mit 16 bit Pixeltiefe (RAPIDEYE 2012). RE-Daten sind in zwei unterschiedlichen Datenprodukten verfügbar. Level 1B-Daten (L1B) werden in Szenen mit unterschiedlichem Längenausmaß bereitgestellt und sind vom Hersteller lediglich sensor-radiometrisch korrigiert. Sie enthalten allerdings Sensortelemetriedaten und weitere Metadaten, um eine geometrische Entzerrung oder weitere radiometrische Korrekturen mit geeigneten Fernerkundungssoftwareprodukten vorzunehmen. Daten der Prozessierungsstufe Level 3A (L3A) sind, neben der sensor-radiometrischen Korrektur, bereits orthorektifiziert und zeichnen sich daher durch eine verbesserte Lagegenauigkeit aus (RAPIDEYE 2012). Zur genauen Lagebestimmung dienen für deutsche Gebiete hochgenaue GCP des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG). Für Bereiche außerhalb Deutschlands werden hingegen Landsat-GCP verwendet, die von geringerer Genauigkeit sind (Seifert 2011, persönliche Kommunikation). Bei L3A-Daten ist die Pixelauflösung zudem auf 5 m hochgerechnet. L3A-Daten werden in fest definierten Kacheln (*tiles*) mit einem Ausmaß von 25 km x 25 km bereitgestellt, wobei sich benachbarte Kacheln jeweils um 1 km überlappen (RAPIDEYE 2012).

### 3.2.6 Digitale Orthophotos

Bei digitalen Orthophotos (DOP) handelt sich um hochauflösende Luftaufnahmen in einer Orthogonalprojektion, die durch Differenzialentzerrung eine verzerrungsfreie sowie maßstabstgetreue Abbildung der Erdoberfläche ermöglichen (BILL 2010). DOP können aufgrund ihrer sehr hohen räumlichen Auflösung von momentan bis zu 10 cm (BRK.NRW 2013) und exakter Georeferenzierung zur visuellen Interpretation auch als Ersatz für maßstabstgetreue Karten verwendet werden (LÖFFLER et al. 2005).

Tabelle 3.6: Eigenschaften digitaler Orthophotos (BRK.NRW 2013).

Plattform	Flugzeug
Flughöhe (kameraabhängig)	2-3,5 km
Sensortyp	versch. digitale RGB-Kameras (u.a. Microsoft Ultra Cam)
Szenenausmaß	2x2 km
Bodenpixelauflösung	
2007/2008 (DOP5)	0,3125 m
2010 (DOP20)	0,20 m
Aktualisierungsrate	3 Jahre
radiometrische Auflösung	8 bit



In Nordrhein-Westfalen erfolgt die Aktualisierung des flächendeckend vorliegenden Bestands an DOP im Dreijahresturnus. Dabei wird im Wechsel jeweils eine Hälfte der Landesfläche im Frühjahr (größtenteils ohne Belaubung) und die andere Hälfte im Sommer bei Vollblaubung aufgezeichnet (BRK.NRW 2013). Für die deutschen Bereiche des Untersuchungsgebiets standen daher aktuelle DOP für die Jahre 2007/2008 und 2010 zur visuellen Interpretation zur Verfügung (vgl. Tabelle 3.6 und Abbildung 3.7). Je nach Aufnahmejahr und eingesetzter Kamera unterscheiden sich die DOP etwas in der räumlichen Auflösung.

### **3.3 MDA-Teil GIS: Vektorbasierte Geobasisdaten und Fachdaten**

Für das Untersuchungsgebiet stehen zahlreiche Geo- und Geobasisdaten zur Verfügung, die für die Fragestellung der Arbeit entweder nützliche Landnutzungsinformationen enthalten oder durch ihre Kombination zur Ableitung von Landnutzungen dienlich sind. Die im Folgenden vorgestellte Datenauswahl liegt gänzlich im Vektorformat, jedoch in unterschiedlichen Maßstäben und Abdeckungsbereichen, vor. Wie bereits dargestellt, nimmt das ATKIS im Rahmen des MDA und somit auch in dieser Arbeit eine Sonderstellung ein.

#### **3.3.1 Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS)**

Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) ist das offizielle digitale Landschaftsmodell (DLM) für Deutschland und stand für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.2). Ende 2008 wurde in NRW das unter Federführung der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) entwickelte und deutschlandweit gültige AAA-Modell eingeführt, welches die Inhalte und Datenorganisation des ATKIS mit dem Amtlichen Festpunkt-Informationssystem (AFIS) sowie mit den Inhalten des Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystems (ALKIS) harmonisiert und vereinheitlicht (BRK.NRW 2012a). Die Inhalte sowie die Repräsentation der Objekte und Sachverhalte der Erdoberfläche unterscheiden sich bei ALKIS und ATKIS nach dem Abstraktionsgrad. Im ALKIS flächenförmige Objekte werden im ATKIS daher teilweise nur als Linien abgebildet (ADV 2008b). Während das ALKIS auf großmaßstäbliche Anwendungen abzielt, stellt das ATKIS Informationen vor allem für Anwendungen im mittleren und kleinen Maßstabsbereich bereit (BILL 2010).

Siedlung

Objektart	Funktion	Bauwerke / Anlagen
Ortslage		
Wohnbaufläche		
Fläche gemischter Nutzung		
Industrie-, Gewerbefläche	Werft	Klärbecken
	Handel	Windrad
	Ausstellung, Messe	Solarzellen
	Gärtnerei	Freileitungsmast
	Förderanlage	Funkmast
	Wasserwerk	Radioteleskop
	Kraftwerk	Schornstein, Schlot, Esse
	Umspannstation	Stollenmundloch
	Raffinerie	Schachtöffnung
	Heizwerk	Trockendock
	Kläranlage, Klärwerk	
	Abfallbehandlungsanlage	
	Deponie	
Fläche bes. funktionaler Prägung	Verwaltung	
	Bildung und Forschung	
	Kultur	
	Religiöse Einrichtung	
	Gesundheit, Kur	
	Soziales	
	Sicherheit und Ordnung	
Sport, Freizeit und Erholungsfläche	Sportanlage	Spielfeld
	Golfplatz	Rennbahn, Sportbahn,
	Freizeitanlage	Geläuf
	Zoo	Zuschauertribüne
	Safaripark, Wildpark	Stadion
	Freizeitpark	Schwimmbecken
	Freilichttheater	Sprungschanze
	Freilichtmuseum	Schießanlage
	Modellflugplatz	Gradierwerk
	Wochenend- und Ferienhausfläche	Wildgehege
	Schwimmbad, Freibad	
	Campingplatz	
	Grünanlage	
	Park	
	Kleingarten	
Halde		
Bergbaubetrieb		
Tagebau, Grube, Steinbruch		
Friedhof		
Hafen		
Schleuse		
Turm		
Vorratsbehälter		Silo
Speicherbauwerk		Tank
		Gasometer
Transportanlage		Rohrleitung, Pipeline
		Förderband
		Pumpe
Leitung	Freileitung	
Historische Bauwerke oder – Einrichtungen		
Sonstige Bauwerke oder Einrichtungen	Mauer	
		Zaun
		Denkmal, -stein, Standbild
		Brunnen
		Brunnen (Trinkwasser)
		Spundwand
		Höckerlinie

Verkehr

Objektart	Funktion	Bauwerke / Anlagen
<b>Straßenverkehr</b>		
Straße		Furt
Straßenachse		Autobahnknoten
Fahrbahnachse		Platz
Fahwegachse		
Weg, Pfad, Steig	Fußweg	
	Radweg	
	Reitweg	
Platz	Fußgängerzone	
	Parkplatz	
	Rastplatz	
	Raststätte	
	Festplatz	
<b>Bahnverkehr</b>		
Bahnstrecke	Eisenbahn	Bahnhof
	S-Bahn	Haltestelle
	Stadtbahn	Haltepunkt
	Straßenbahn	
	U-Bahn	
Seilbahn, Schwebebahn		
<b>Schiffsverkehr</b>		
	Hafenanlage	Bake
	Schleuse	Leuchtfeuer
		Anleger

Objektart	Funktion	Bauwerke / Anlagen
<b>Flugverkehr</b>		
	Flughafen	Startbahn, Landebahn
	Internat. Flughafen	Zurollbahn, Taxiway
	Regionallughafen	Vorfeld
	Verkehrslandeplatz	Hubschrauberlandeplatz
	Hubschrauberflugplatz	
	Landepplatz, Sonderlandeplatz	
	Segelfluggelände	
<b>Bauwerke im Verkehrsbereich</b>		
		Brücke
		Steg
		Hochbahn, Hochstraße
		Tunnel, Unterführung
		Schutzgalerie
		Schleusenkammer
		Durchfahrt

Vegetation

Objektart	Funktion	Bauwerke / Anlagen
Landwirtschaft	Ackerland	
	Streuobstacker	
	Hopfen	
	Grünland	
	Streuobstwiese	
	Gartenland	
	Baumschule	
	Weingarten	
	Obstplantage	
Wald	Laubholz	
	Nadelholz	
	Laub- und Nadelholz	
Gehölz		
Heide		
Moor		
Sumpf		
Unland,		
Vegetationslose Fläche		
Fläche zur Zeit unbestimmbar		
Vegetationsmerkmal	Nadelbaum	
	Laubbaum	
	Hecke	
	Baumreihe	
	Gehölz	
	Röhricht, Schilf	

Gewässer

Objektart	Besondere Eigenschaften	Bauwerke / Anlagen
Fließgewässer	Quelle	Durchlass
	Wasserfall	Düker
Wasserlauf	Stromschnelle	Staumauer
	Sandbank	Staudamm
Kanal	Watt	Wehr
	Priel	Sicherheitsstor
Gewässerachse		Siel
	<b>Bes. Angaben zum Gewässer</b>	Sperwerk
Hafenbecken	Wasserspiegelhöhe	Schöpfwerk
	Schifffahrtslinie, Fährverkehr	Uferbefestigung
Stehendes Gewässer	Gewässerstationierungssache	Wellenbrecher, Buhne
	Sickerstrecke	Lahnung
Meer		Hafendamm, Mole
		Ufer-, Kaimauer

Relief

Objektart	Funktion	Bauwerke / Anlagen
Böschung, Kliff		
Damm, Wall, Deich	Hochwasser-, Sturmflutschutz	
Höhleneingang		
Felsen, Felsblock,		
Felsnadel		
Düne		
Höhenpunkte (z.B. Kuppen, Mulden)		
Höhenlinie		
Geländekante		

Gebiete

Öffentlich-rechtliche	Geographische	Administrative
Naturschutzgebiet	Insel	Kommunales Gebiet
Naturdenkmal	Wohnplatz	Gebietsgrenze
Nationalpark		
Pfahlbau		
Steinmal		
Truppen-, Standortübungsplatz		
Rieselfeld		
Hafenbecken		

Rot = wird zur zeit neu erfasst

Abbildung 3.5: Wesentliche Objektarten, Attribute und Werte des ATKIS-Basis-DLM (BRK.NRW 2012a), verändert.

Die Grundflächen von Nutzungskategorien, die anwendungsbedingt in beiden Informationssystemen vorkommen, weisen trotz der unterschiedlichen Maßstabsebene und des Detailgrads jedoch in beiden Systemen das gleiche Ausmaß auf (ADV 2008b), wodurch die Kombination beider Systeme möglich ist. Durch seine Funktion als Basisinformationssystem ist das ATKIS so konzipiert, dass sich dessen topographischer Datenbestand als Basis für Fachinformationssysteme (FIS) beispielsweise aus dem Bereich Umwelt oder Planung eignet. In vielen Bundesländern ist zudem gesetzlich geregelt, dass Fachinformationssysteme öffentlicher Einrichtungen an das ATKIS oder ALKIS anzupassen oder darauf aufzubauen sind (BILL 2010). So basieren beispielsweise die Bezeichnungen und Geometrien der Gewässerstationierungskarte von NRW zunehmend auf dem ATKIS-Basis-Landschaftsmodell (ATKIS Basis-DLM) (LANUV NRW 2013b). Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete ATKIS-Basis-DLM stellt die höchste Auflösungsstufe des ATKIS dar. Der Informationsumfang orientiert sich am Inhalt der Topographischen Karte 1:25.000. Im ATKIS-Basis-DLM sind daher Objekte enthalten, die im Maßstabsbereich 1:10.000-1:25.000 eine topographische Bedeutung haben. Wichtige punkt- und linienförmige Objekte weisen zudem eine höhere Lagegenauigkeit von  $\pm 3$  m auf (BKG 2011a). Für kleinere Maßstabsebenen beinhaltet das ATKIS auch gröber strukturierte DLM mit geringerem Informationsumfang (BRK.NRW 2012a). Nach dem AAA-Datenmodell sind die ATKIS-Informationen hierarchisch in Objektartenbereiche, Objektartengruppen und Objektarten (OBA) gegliedert (ADV 2008c). Mit dem Objektartenbereich „Tatsächliche Nutzung“ enthält das ATKIS-Basis-DLM, neben topographischen Informationen, zahlreiche räumliche Informationen zur Flächennutzung beziehungsweise Landnutzung. Die darin enthaltenen Informationen sind thematisch in die Objektartengruppen *Siedlung* (41000), *Verkehr* (42000), *Vegetation* (43000) und *Gewässer* (44000) eingeteilt (ADV 2008b), wodurch zunächst eine grobe Gliederung der Landschaft nach grundsätzlichen Nutzungen in Form von Objektarten erfolgt. Über zusätzliche Attribute (ATI) wird diese Einteilung präzisiert. Im AAA-Modell führen die Objektarten jeweils das Präfix AX\_. Auf die Angabe dieses Zusatzes wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch im Sinne der Lesbarkeit verzichtet. Objektarten werden daher im Text *kursiv* hervorgehoben.

Abbildung 3.5 stellt die wesentlichen Objektarten des ATKIS tabellarisch dar. In der Objektartengruppe *Vegetation* werden beispielsweise landwirtschaftliche Nutzflächen von Waldgebieten oder anderen Vegetationsflächen unterschieden. Innerhalb der Objektart *Landwirtschaft* erfolgt die Ausweisung (zum Beispiel) von Ackerland anhand eines zusätzlichen Attributs. Die Objekte der Landschaft werden auch innerhalb der einzelnen Objektarten als Punkte, Linien oder Flächen beschrieben (ADV 2008b). So wird beispielsweise das Wegenetz teilweise als Polygone vor allem aber als Linien erfasst. Wie in Abbildung 3.5 aufgeführt, enthält das ATKIS neben Topographie- und Landnutzungsinformationen auch administrative Grenzen wie beispielsweise Gemeindegrenzen oder Markierungen der Ortslagen. Für NRW ist das ATKIS über die Abteilung Geobasis NRW (ehemals Landesvermessungsamt NRW) der Bezirksregierung Köln zu beziehen. Die Datenabgabe der AAA-ATKIS-Daten erfolgt in den

Aufbereitungsvarianten Kompakt oder Ebenen, die jedoch den gleichen inhaltlichen Umfang aufweisen und im Koordinatensystem ETRS89/UTM vorliegen.

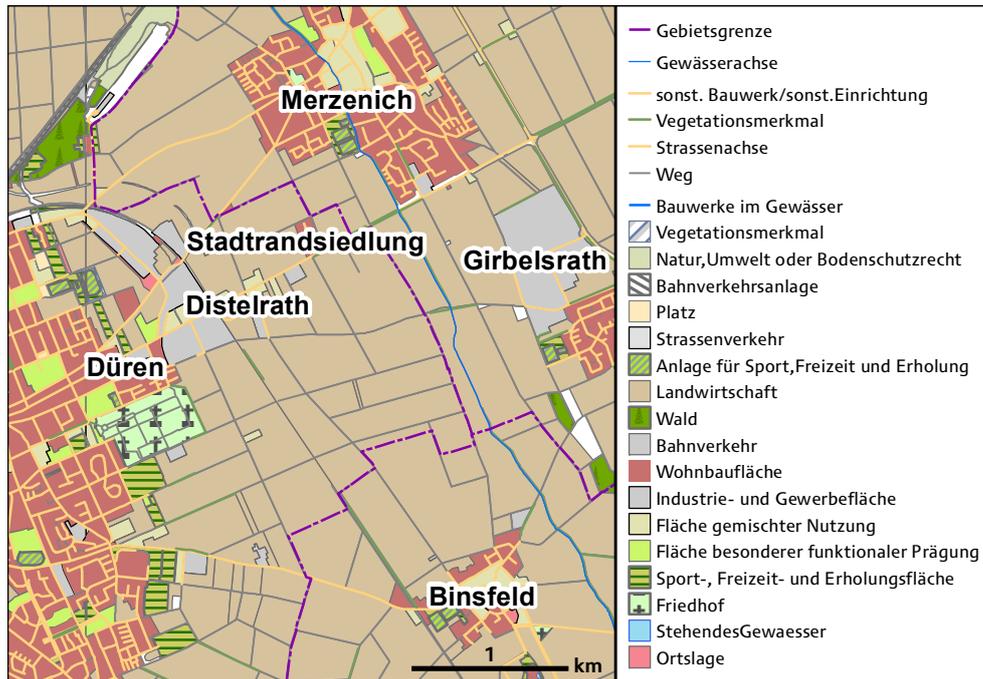


Abbildung 3.6: Darstellung des AAA-ATKIS mit Originalsymbolisierung für einen Ausschnitt östlich von Düren im Maßstab 1:50.000 (Datenquelle: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2011).

Während das Basis-DLM (AAA-Kompakt) vor allem auf die Möglichkeit der differenziellen Datenaktualisierung abzielt, ist die Datenstruktur des Basis-DLM (AAA-Ebenen) auf eine einfachere thematische Gliederung zur Visualisierung und Verarbeitung in GIS ausgerichtet (BKG 2011a). Für die Analysen dieser Arbeit wurde daher die letztere Variante bezogen (Datenbestand 05/2011). Da im Rahmen der Arbeit ausschließlich diese Daten zum Einsatz kamen, werden die Begriffe ATKIS, ATKIS-Basis-DLM und AAA-ATKIS im Folgenden synonym verwendet. Abbildung 3.6 stellt die ATKIS-Daten im GIS kartographisch im offiziellen Layout aufbereitet dar. In der Ebenen-Variante werden die Objektarten zunächst nach ihrer Hierarchie (Rangfolge der Überlagerung) in mehrere Ebenen (01-07) eingeordnet, die wiederum mehrere Datenschichten umfassen. Diese AAA-Ebenen (eigene Bezeichnung) sind daher nicht mit einzelnen (thematischen) Ebenen oder Layern im Sinne einer Datenschicht im GIS zu verwechseln. Innerhalb einer AAA-Ebene sind semantisch zusammengehörige Objektarten in mehrere thematische Ebenen/Layer zusammengefasst, die mit zahlreichen beschreibenden Attributen versehen sind. Die Abgabe erfolgt in Form von (ESRI-) Shape-Dateien. Da diese nur jeweils einen Geometrietyp (Punkt, Linie oder Fläche) enthalten können, sind die thematischen Informationen einer Objektart innerhalb einer Ebene zudem nach Geometrietyp in mehrere Layer gegliedert (BKG 2011a). So enthält die Shape-Datei *ver01\_l* linienhafte Informationen aus Ebene 01 zum Straßennetz wie beispielsweise die *Straßenachse* (42003), während die Datei *ver01\_f* Flächen wie *Rastplätze* (OBA 42009, ATT

(FKT) 5310) aus Ebene 01 ausweist. Information zu Wirtschaftswegen wie *Fabrwegachse* (53003) sind hingegen in Datei *ver02\_1* in Ebene 02 enthalten.

### 3.3.2 Feldblöcke

Weitere Daten die nützliche Landnutzungsinformationen für das Untersuchungsgebiet enthalten, sind die Feldblöcke (FB). Es handelt sich dabei um Vektordaten die Flächeninformationen zur agrarischen Nutzfläche in Form von Polygonen bereitstellen. In Nordrhein-Westfalen (NRW), aber auch in weiteren Bundesländern bilden die Feldblöcke die räumliche Basis für die Beantragung und Kontrolle von Subventionen im Rahmen der Agrarfördermaßnahmen der Europäischen Union (EU), dem sogenannten Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) (BMELV 2004, LWK NRW 2004). Die Feldblockinformationen sind somit Teil des EU-weiten Land Parcel Identification System (LPIS), das die Erhebung, Speicherung und Verwaltung von räumlichen Informationen zur landwirtschaftlichen Nutzflächen in einer GIS-Umgebung vorsieht (EU 2009). Die Feldblöcke enthalten daher sämtliche förderungsfähige Landwirtschaftsflächen.

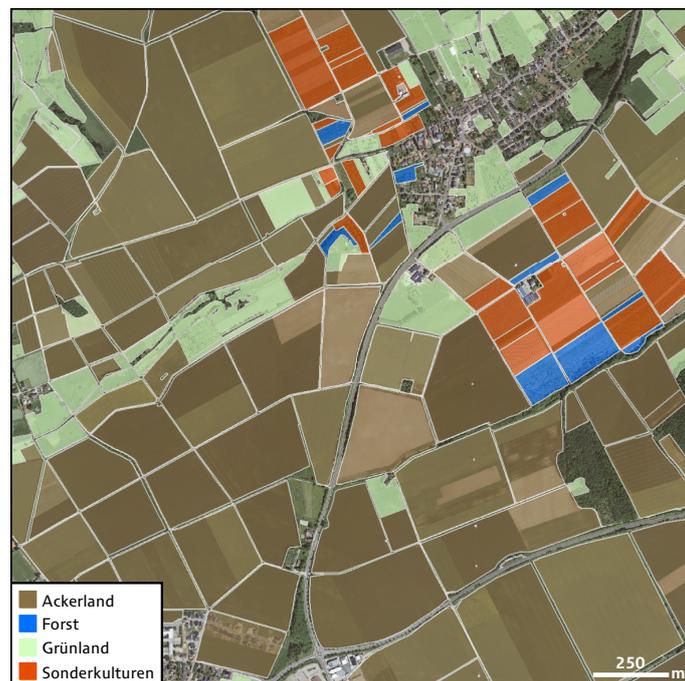


Abbildung 3.7: Darstellung der Feldblöcke 2008 für ein Gebiet nördlich von Nideggen. (Datengrundlage: Landwirtschaftskammer NRW 2008; Bildhintergrund: Digitale Orthophotos (DOP40), Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2013).

Während die jährliche schlagbezogene Flächennutzung auf den entsprechenden Flächen aus Datenschutzgründen nicht verfügbar ist, können die Außengrenzen von landwirtschaftlichen Flächen in Form der Feldblöcke kostenpflichtig bezogen werden. In NRW werden die Feldblöcke von der Landwirtschaftskammer NRW verwaltet und herausgegeben (LWK NRW

2005, MIK NRW 2005). Wie Abbildung 3.7 durch die kombinierte Darstellung von Feldblöcken und Orthophotos zeigt, bilden sich einzelne Feldblöcke (weiß umrandet) aus einer oder mehreren Landwirtschaftsparzellen der gleichen Hauptbodennutzungsart wie Ackerland, Grünland, Dauerkulturen oder geförderten Forstflächen. Eine weitere Unterscheidung von Ackerland nach einzelnen Feldern oder Schlägen sowie nach Eigentumsverhältnissen findet allerdings nicht statt. Feldblöcke enthalten also keine Informationen zum Anbau von Feldfrüchten und werden von beständigen Landschaftselementen wie dem Wegenetz, Flüssen oder Waldflächen begrenzt (LWK NRW 2011). Aufgrund der sich jährlich ändernden Landnutzung und ihrer enormen Bedeutung als Berechnungsgrundlage werden der Datenbestand des LPIS und damit auch die Feldblockdaten jährlich aktualisiert. Als Datengrundlage für die Erzeugung und Aktualisierung der Feldblock-Geometrien dienen neben Katasterdaten (ALK- beziehungsweise ALKIS-Daten) aktuelle Orthophotos der Landesvermessung, hochauflösende Satellitendaten sowie Ergebnisse aus Feldbegehungen (LWK NRW 2004, BUCK et al. 2011). Laut der Verordnung (EG) Nr.73/2009 (EU 2009) muss die Datengrundlage des LPIS (in diesem Fall also der Feldblöcke) eine Genauigkeit mindestens dem Maßstab 1:10 000 entsprechend gewährleisten. Daher zeichnen sich die Feldblockdaten durch eine, für die angestrebte Maßstabsebene der Arbeit, mehr als ausreichende räumliche Genauigkeit aus. Zudem ist die räumliche Lage der Feldblock-Daten durch die Verwendung von Daten der offiziellen Landesvermessung zum Beispiel aus ATKIS angeglichen, so dass zur räumlichen Verschneidung keine Lageanpassung notwendig ist. Für den Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit (2008-2010) konnte jährlich ein aktueller Datensatz im ESRI-Shape-Format über die Landwirtschaftskammer NRW bezogen werden.

### 3.3.3 Corine Land Cover (2006)

Da für die Bereiche des Untersuchungsgebiets außerhalb Deutschlands keine adäquaten Daten zum ATKIS bezogen werden konnten, wurde für die entsprechenden Bereiche in den Niederlanden und Belgien auf die Landbedeckungsdaten des CORINE Land Cover (CLC) mit dem Bezugsjahr 2006 (CLC2006) zurückgegriffen (vgl. auch Kapitel 2.2). Der erste CLC-Datensatz erschien für das Referenzjahr 1990. Aktualisierungen des CLC-Inventars erfolgten für die Referenzjahre 2000 und 2006. Während sich die Datengrundlage und Erfassungsmethodik für die einzelnen Datensätze veränderte, blieben der Maßstab sowie die Nomenklatur der Bodennutzungsklassen weitestgehend bestehen (EEA 2007). Die Hauptdatenquelle bildet jeweils eine Basis aus orthorektifizierten multispektralen Satellitendaten. Die Erzeugung der Bodennutzungsinformationen erfolgt hauptsächlich durch die visuelle Interpretation dieser Fernerkundungsdaten unter Zuhilfenahme von Luftbildern oder weiterer Zusatzdaten wie topographische Karten oder Statistiken (EEA 1995).

Tabelle 3.7: CLC-Nomenklatur in Deutsch (KEIL et al. 2010), verändert.

<b>Ebene 1</b>	<b>Ebene 2</b>	<b>CLC Code/Ebene 3</b>	
1 Bebaute Flächen	11 Städtisch geprägte Flächen	111 Durchgängig städtische Prägung	
		112 Nicht durchgängig städtische Prägung	
	12 Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	121 Industrie- und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	
		122 Straßen-, Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen	
		123 Hafengebiete	
		124 Flughäfen	
	13 Abbauflächen, Deponien und Baustellen	131 Abbauflächen	
		132 Deponien und Abraumhalden	
		133 Baustellen	
	14 Künstlich angelegte, nicht landwirtschaftlich genutzte Grünflächen	141 Städtische Grünflächen	
		142 Sport- und Freizeitanlagen	
	2 Landwirtschaftliche Flächen	21 Ackerflächen	211 Nicht bewässertes Ackerland
			212 Regelmäßig bewässertes Ackerland
			213 Reisfelder
22 Dauerkulturen		221 Weinbauflächen	
		222 Obst- und Beerenobstbestände	
		223 Olivenhaine	
23 Grünland		231 Wiesen und Weiden	
		241 Einjährige Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen	
24 Landwirtschaftliche Flächen heterogener Struktur		242 Komplexe Parzellenstrukturen	
		243 Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	
		244 Land- und forstwirtschaftliche Flächen	
3 Wälder und naturnahe Flächen	31 Wälder	311 Laubwälder	
		312 Nadelwälder	
		313 Mischwälder	
	32 Strauch- und Krautvegetation	321 Natürliches Grünland	
		322 Heiden und Moorheiden	
		323 Hartlaubbewuchs	
		324 Wald-Strauch-Übergangsstadien	
	33 Offene Flächen ohne/mit geringer Vegetation	331 Strände, Dünen und Sandflächen	
		332 Felsflächen ohne Vegetation	
		333 Flächen mit spärlicher Vegetation	
		334 Brandflächen	
335 Gletscher und Dauerschneegebiete			
4 Feuchtflächen	41 Feuchtflächen im Landesinnern	411 Sümpfe	
		412 Torfmoore	
	42 Feuchtflächen an der Küste	421 Salzwiesen	
		422 Salinen	
		423 In der Gezeitenzone liegende Flächen	
5 Wasserflächen	51 Wasserflächen im Landesinnern	511 Gewässerläufe	
		512 Wasserflächen	
		521 Lagunen	
	52 Meeresgewässer	522 Mündungsgebiete	
		523 Meere und Ozeane	

Die Bodenbedeckungsinformationen im CLC besitzen in allen drei Datensätzen einen Maßstab von 1:100.000 und beruhen auf einer MMU von 25 ha (EEA 2007). Lineare Strukturen wie Fließgewässer sind ab einer Breite von 100 m enthalten (EEA 1995). Für das Referenzjahr 2006 (CLC2006) setzt sich die Fernerkundungsdatengrundlage aus SPOT-4-, SPOT-5- und IRS-P6-LISS-III-Daten zusammen (EEA 2007), wobei zur besseren Unterscheidung von Landnutzungstypen Daten jeweils aus den Jahreszeiten Frühjahr und Sommer verwendet wurden (KEIL et al. 2010).

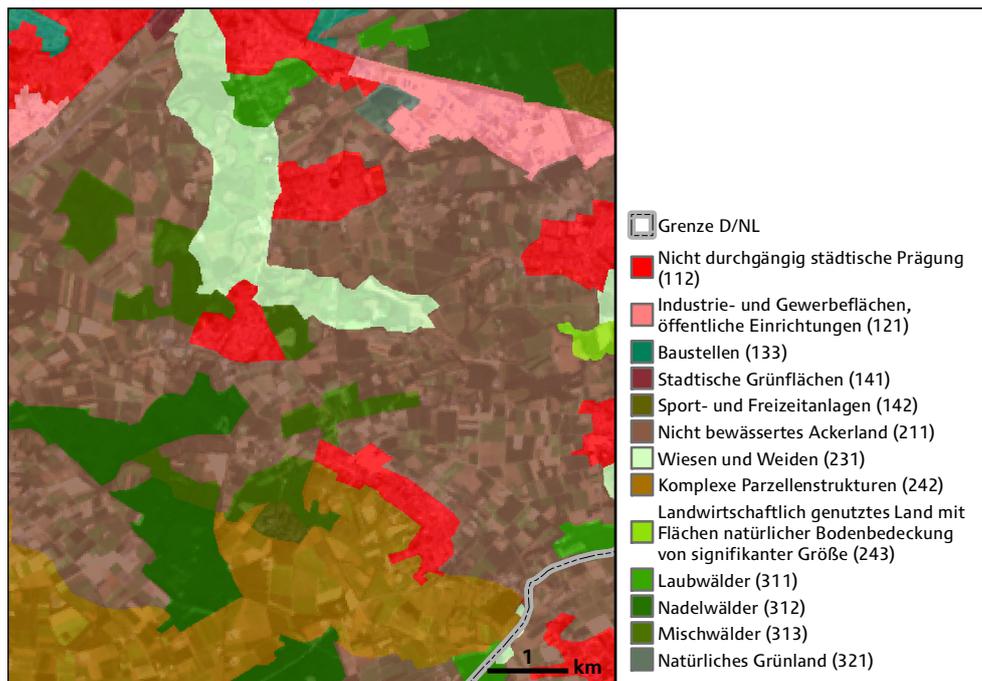


Abbildung 3.8: Darstellung der CLC 2006-Daten für ein Gebiet südöstlich von Roermond im Maßstab 1:100.000 für die Teile des Untersuchungsgebiets in den Niederlanden und Belgien (Datengrundlage: EEA 2011; Bildhintergrund: Landsat-8, USGS 2013).

Wie in Tabelle 3.7 dargestellt, besteht die Standard-Nomenklatur des CLC aus drei hierarchischen Ebenen, in welche die insgesamt 44 Bodenbedeckungsklassen eingruppiert sind. In der ersten Ebene (Ebene 1) werden die fünf Hauptklassen *bebaute Flächen*, *Landwirtschaftliche Flächen*, *Wälder und naturnabe Gebiete*, *Feuchtflächen* und *Wasserflächen* unterschieden (KEIL et al. 2010). Über Ebene 2 und Ebene 3 werden die Landnutzungsinformationen der Hauptklassen weiter präzisiert. So werden *Landwirtschaftliche Flächen* in Ebene 2 in *Ackerflächen*, *Grünland*, *Dauerkulturen* und *Landwirtschaftliche Flächen heterogener Struktur* unterschieden. In Ebene 3 wird Ackerland beispielsweise in *nicht bewässertes Ackerland*, *regelmäßig bewässertes Ackerland* und *Reisfelder* nochmals untergliedert. Im Unterschied zum ATKIS befinden sich die einzelnen Bodenbedeckungsklassen im Datensatz auf einer thematischen Ebene (Layer), so dass in den Daten selbst nur die Abgrenzungen der Bodenbedeckungsklassen aus Ebene 3 ausgewiesen werden. Da die Datenanalyse zur Produktion der CLC-Daten im Vektordatenmodell erfolgt, werden die Daten hauptsächlich als Vektordaten bereitgestellt. Die CLC-Daten sind allerdings auch bereits gerastert als Datensätze mit 100 m



und 250 m Zellengröße verfügbar. Zur besseren Harmonisierung der CLC-Daten mit den anderen in dieser Arbeit eingesetzten Datenquellen, wurde das Vektorformat jedoch bevorzugt. Die hierzu verwendeten CLC2006-Daten (Version 15, 08/2011) wurden über die Webseite der EEA ([www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)) bezogen. Dort stehen die Daten für alle abgedeckten Staaten, nach Landbedeckungsklasse unterteilt, kostenlos im (ESRI-) Shape-Format zum Download zur Verfügung. Abbildung 3.8 zeigt einen Ausschnitt der CLC-Daten für einen Ausschnitt südöstlich von Roermond im Erfassungsmaßstab 1:100.000. Durch Darstellung mit den hinterlegten Fernerkundungsdaten wird deutlich, dass sich die CLC Daten trotz des im Vergleich zum ATKIS deutlich geringeren Maßstabs, dennoch für diese Arbeit zur Unterscheidung von grundsätzlichen Landnutzungstypen eignen.

### 3.3.4 OpenStreetMap

Da die für die Bereiche des Rureinzugsgebiets in den Niederlanden und Belgien ausgewählten CLC-Daten nur flächenhafte Landnutzungsdaten bereitstellen, wurden OpenStreetMap-Daten (OSM) als zusätzliche Datenquelle für topographische Informationen herangezogen.

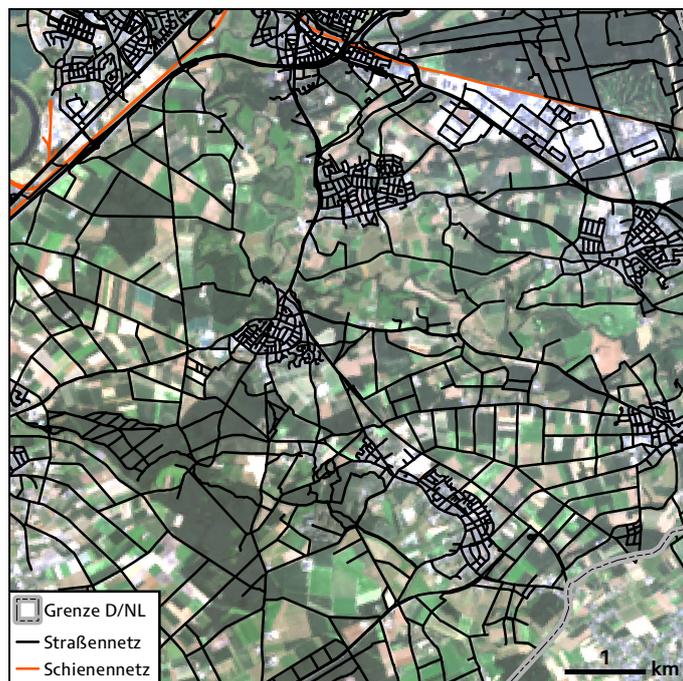


Abbildung 3.9: Darstellung der verwendeten OSM-Daten des Straßen- und Schienennetzes südöstlich von Roermond für die Teile des Untersuchungsgebiets in den Niederlanden und in Belgien (Datenquelle: OSM/Geofabrik GmbH 2011; Bildhintergrund: Landsat-8, USGS 2013).

Bei OSM handelt es sich um ein im Jahr 2004 ins Leben gerufenes freies gemeinnütziges Projekt, um geographische Informationen kostenlos und ohne Nutzungseinschränkungen frei zugänglich über das Internet verfügbar zu machen (OSM-WIKI 2008). Im Jahre 2006 erfolgte die Gründung der OpenStreetMap-Foundation ([www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)) als internationale

freie gemeinnützige Organisation. Das OSM-Projekt umfasst dabei sowohl die Erfassung als auch die Entwicklung von Software zur Speicherung, Bearbeitung und Bereitstellung der OSM-Daten (OSM-WIKI 2008). Neben linienhaften Objekten zu Straßen, Schienen- oder Wasserwegen, werden im Vektordatenmodell auch flächenhafte Erscheinungen wie Waldgebiete, Parks oder Gewässerflächen als Polygone sowie Orte von Interesse als punktförmige Objekte erfasst. Die Datenaufnahme erfolgt dabei beispielsweise durch das Abschreiten oder Abfahren von Straßen bei gleichzeitiger Aufzeichnung der zurückgelegten Strecke durch einen GPS-Empfänger oder durch das Digitalisieren oder Editieren von Objekten auf Grundlage von frei verfügbaren Luft- oder Satellitenbildern im GIS (OSM-WIKI 2008). Erhobene Daten können anschließend in der OSM-Infrastruktur gespeichert und editiert werden. Heutzutage dienen OSM-Daten hauptsächlich zur Erzeugung von Straßenkarten oder zur Routenberechnung, beispielsweise per WebGIS-Anwendung. Exemplarisch seien hierfür Dienste wie OpenStreetMap ([www.openstreetmap.de/karte.html](http://www.openstreetmap.de/karte.html)) oder auch MapQuest Open ([open.mapquest.com](http://open.mapquest.com)) genannt. OSM-Daten können allerdings auch in unterschiedlichen Aufbereitungsstufen (teilweise kostenpflichtig) über verschiedene Datenprovider oder über die OpenStreetMap-Foundation ([planet.openstreetmap.org](http://planet.openstreetmap.org)) bezogen werden. Für Analysen im Rahmen der Arbeit wurde auf OSM-Daten zurückgegriffen, die von der Firma der Geofabrik GmbH ([www.geofabrik.de](http://www.geofabrik.de)) bereitgestellt werden. Neben kostenpflichtigen Bearbeitungsstufen wurden OSM-Daten zum Zeitpunkt des Downloads im OSM-Datenformat oder als (ESRI-)Shape-Dateien kostenfrei angeboten. Bei Daten im OSM-Format handelt es sich um nach Regionen unterteilte und täglich aktualisierte Versionen eines Schnappschusses der Rohdaten der OSM-Datenbank ([planet.osm](http://planet.osm) oder auch [planet-file](http://planet-file) genannt) (GEOFABRIK 2011b). Im Shape-Format abgegebene Daten sind bereits leicht aufbereitete Daten, die mit Ausnahme des Wegenetzes im Umfang reduziert wurden (GEOFABRIK 2011a). Wie ein stichprobenartiger Vergleich beider Datenformate für einige Bereiche des Untersuchungsgebiets anhand von Orthophotos zeigte, enthielten die Daten im OSM-Format zwar mehr Informationen. Insgesamt erschienen die Daten im Shape-Format aber bereits von groben Datenfehlern bereinigt und daher qualitativ hochwertiger. Da im Rahmen dieser Arbeit nur die OSM-Informationen zum Wegenetz von Bedeutung waren, wurden die im Shape-Format bereitgestellten OSM-Daten gewählt. Abbildung 3.9 stellt die verwendeten OSM-Daten (Veröffentlichungsdatum: 17.11.2011) für ein Gebiet südöstlich von Roermond exemplarisch dar, für die keine ATKIS Informationen vorlagen.

### 3.3.5 Naturräumliche Einheiten in NRW

Die bereits für die Einordnung der landschaftlichen Gegebenheiten des Untersuchungsgebiets verwendeten Naturräumlichen Haupteinheiten (NHE) (vgl. Abbildung 3.3 und Kapitel 3.1.3) standen für diese Arbeit georeferenziert (DHDN/GK Zone 2) im Vektorformat zur

Verfügung und werden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW) kostenlos als Naturräumliche Einheiten in NRW zum Download angeboten (LANUV NRW 2011). Der Datensatz enthält neben den Abgrenzungen der einzelnen NHE im Maßstab 1:200.000 auch Sachdaten in Form von Beschreibungstexten zu den einzelnen Einheiten, die bereits in Kapitel 3.1.3 zur Beschreibung des Untersuchungsgebiets verwendet wurden. Die Abgrenzungen resultieren aus einer geographischen Landesaufnahme, die von der ehemaligen Bundesanstalt für Landeskunde und Raumordnung im Maßstab 1:200.000 für die Bundesrepublik Deutschland durchgeführt wurde, die wiederum auf den Inhalten des Handbuchs der naturräumlichen Gliederung Deutschlands (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1953-1962) aufbaut. Die Abgrenzungen und Beschreibungstexte der NHE im Bereich des Untersuchungsgebiets beruhen dabei auf den Arbeiten von PAFFEN et al. (1963), H. FISCHER & GRAAFEN (1974) und GLÄBER (1978) und wurden vom LANUV NRW zur digitalen Veröffentlichung überarbeitet (Ochat-Frankl 2012, persönliche Kommunikation). In der Hierarchie der Naturräumlichen Gliederung Deutschlands bilden die Haupteinheiten Großregionen der zweiten Ordnung. Obwohl es sich bei den NHE nicht um Landnutzungsinformationen im eigentlichen Sinne handelt, können, wie in Kapitel 3.1.3 dargestellt, grundsätzliche Landnutzungsstrukturen oder auch phänologische Vegetationszeiten mit den einzelnen Naturräumen verknüpft und unterschieden werden. Für die Landnutzungsanalysen im Rahmen dieser Arbeit wurden die NHE daher als nützliche Ergänzung zur Stratifizierung angesehen.

### 3.4 Agrarstatistik

Neben den zuvor vorgestellten (räumlichen) Geodaten, die durch ihre Geometrie und Georeferenzierung einen direkten Raumbezug herstellen, finden sich jedoch auch Sachdaten wie Statistiken, die durch den Bezug auf eine räumliche Einheit einen indirekten Raumbezug aufweisen. Auch Informationen solcher Daten lassen sich im Rahmen des MDA zur Landnutzungsanalyse verwenden, indem sie mit geeigneten Geodaten verknüpft werden. Im Fall des Untersuchungsgebiets werden für NRW zahlreiche statistische Daten durch öffentliche Stellen oder Behörden erhoben, die über den Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) zu beziehen sind ([www.it.nrw.de/statistik](http://www.it.nrw.de/statistik)). Unter anderem bezüglich der Bodennutzung auf landwirtschaftlichen Flächen werden in NRW alle vier Jahre umfangreiche Erhebungen auf Gemeindeebene inklusive aller Fruchtarten und Hauptnutzungs- und Kulturarten durchgeführt. Für den Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit standen daher die Ergebnisse der Agrarstrukturerhebung 2007 und der Landwirtschaftszählung 2010 zur Verfügung. Diese lassen sich beispielsweise mit den ATKIS-

Daten räumlich verknüpfen und zur Abschätzung oder Validierung des Flächenanteils von Ackernutzungen im Rahmen der Landnutzungsanalysen heranziehen.

### **3.4.1 Agrarstrukturerhebung 2007**

Die Agrarstrukturerhebung 2007 stellt mit der darin enthaltenen Bodennutzungshaupterhebung unter anderem die Nutzung auf Ackerland, Grünland sowie auf Flächen mit Dauerkulturen außerhalb der Fruchtfolge dar. Hinsichtlich des Anbaus auf Ackerland werden darin die Flächenbeträge der Hauptnutzungs- und Kulturarten (inklusive alle Fruchtarten) auf der Kreis- und Gemeindeebene in Hektar (ha) zusammengefasst. In die Erhebung wurden alle landwirtschaftlichen Betriebe einbezogen, die über eine Fläche von 2 ha oder mehr verfügten. Zusätzlich sind aber auch die Flächen von Betrieben unterhalb dieser Mindestflächengröße enthalten, sofern beispielsweise für Gemüse, Obst, Tabak oder Blumen bestimmte Mindesterzeugungseinheiten erreicht wurden (IT.NRW 2009).

### **3.4.2 Landwirtschaftszählung 2010**

Im Jahr 2010 erfolgte die Bodennutzungshaupterhebung im Rahmen der Landwirtschaftszählung. Als sogenannte integrierte Erhebung wurden dabei, gegenüber den vierjährig wiederholten Agrarstrukturerhebungen, beispielsweise auch Produktionsmethoden wie Bodenbearbeitung oder Tierhaltungsverfahren stichprobenartig erhoben. Auch diese Daten standen nach Gemeinden aufgelöst zur Verfügung. Im Vergleich zur Agrarstrukturerhebung 2007 wurde die Mitteilungspflicht in Bezug auf die Bodennutzung zur Reduktion des Bearbeitungsaufwands jedoch auf Betriebe mit mindestens 5 ha an landwirtschaftlich genutzter Fläche (außer Dauerkulturen, etc.) angehoben. Ebenso wurden die Mindesterzeugungseinheiten für beispielsweise Dauerkulturen, Gemüse, Blumen, Baumschulen oder Obstanbau angehoben. Dadurch waren etwa 20 % der Betriebe in NRW nicht auskunftspflichtig, wodurch etwa 2 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche nicht erfasst wurden. Diese Ergebnisse sind daher nur eingeschränkt mit denen der Agrarstrukturerhebung 2007 vergleichbar (IT.NRW 2012).

## 4 Datenaufbereitung für den Multidaten-Ansatz

Die zur Landnutzungsanalyse im Rahmen dieser Arbeit ausgewählten Daten (vgl. Kapitel 3) lagen in verschiedenen Datenmodellen oder Prozessierungsstufen vor und mussten daher in unterschiedlichem Maße aufbereitet werden, um (gemeinsam) genutzt werden zu können. Darüber hinaus mussten die ausgewählten Daten zur räumlichen und inhaltlichen Verschneidung anhand der in dieser Arbeit weiterentwickelten MDA-Methodik bestimmte Kriterien erfüllen, die bereits bei der Aufbereitung zu berücksichtigen und umzusetzen waren (vgl. Kapitel 4.2). Zur Durchführung der Datenaufbereitung und der nachfolgenden MDA-Landnutzungsanalysen bestehen zudem bestimmte Ansprüche an die Arbeitsumgebung in Bezug auf die Hardware und Softwareausstattung. Begonnen wird daher in diesem Kapitel zunächst mit der Darstellung der Arbeitsumgebung sowie der generellen Anforderungen an die Datengrundlage. Anschließend erfolgt die Erläuterung der Aufbereitung der einzelnen Fernerkundungsdatensätze sowie der vektorbasierten Geodaten für den MDA.

### 4.1 Arbeitsumgebung: Hardware und Software

Der Aufbau der Arbeitsumgebung entspricht im Wesentlichen einem typischen Desktop-GIS. Abgesehen von der gelegentlichen Nutzung von Web Map Services (WMS-Diensten), zum Beispiel zum Zugriff auf aktuelle digitale Orthophotos, erfolgte die Datenspeicherung sowie die Bearbeitung und Analyse der Datengrundlage lokal auf einem Desktop-Rechner. Die Bearbeitung großer räumlicher Datensätze und Datenmengen sowie die Einbeziehung unterschiedlicher Datentypen und Dateiformate in einer FE- & GIS-Umgebung stellen gehobene Ansprüche an die zu verwendende Hardware. Dementsprechend wurden die Berechnung im Rahmen der Arbeit auf Desktop-Workstation-Rechnern mit Mehrkern-CPU (4 Kerne à 3,6 GHz), mehr als 8 Gigabyte an Arbeitsspeicher sowie ausreichend Speicherplatz für die Fernerkundungs- und Geodaten durchgeführt. Zur Datenanalyse wurden im Wesentlichen die Softwareprodukte Environment for Visualizing Images (ENVI) der Firma Exelis Visual Information Solutions und ArcGIS der Firma ESRI herangezogen. Die beiden Programme zeichnen sich besonders durch ihre weitreichende Interoperabilität und zunehmende Verzahnung des Arbeitsablaufs aus (EXELISVIS 2013). Zur Bearbeitung der Fernerkundungsdaten wurde die Software ENVI gewählt, da sie für alle in dieser Arbeit verwendeten Fernerkundungsdatensätze Aufbereitungsmodule bereitstellt und über eine Vielzahl an unterschiedlichen Klassifikationsalgorithmen sowie Post-Klassifizierungswerkzeuge verfügt. Dementsprechend erfolgten (mit Ausnahme der Georeferenzierung) die

gesamten Fernerkundungsanalysen von der sensorspezifischen Datenaufbereitung, der Klassifikation, der Anwendung von Post-Klassifikationsmethoden bis zur Genauigkeitsanalyse (*accuracy assessment*) in ENVI. Dabei wurde ENVI während des gesamten Bearbeitungszeitraums stets in der aktuellsten Version (4.4 bis 5.0) verwendet. Für die weitere Bearbeitung der Fernerkundungsanalyseergebnisse sowie zur Aufbereitung der Geodaten wurde die Software ArcGIS (ArcInfo Desktop) genutzt, die als hybrides System sowohl Vektor- als auch Rasterdaten verarbeiten kann (KAPPAS 2011). Ferner wurden sämtliche weiterführenden Landnutzungs- und Fruchtfolgenanalysen anhand des MDA, die über die in Kapitel 5.5 beschriebenen Analyseschritte hinausgehen, mit ArcGIS durchgeführt. Auch die kartographische Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte größtenteils in ArcGIS, wobei die Versionen (9.3 bis 10.2) zum Einsatz kamen.

## 4.2 Anforderungen an Daten zur Integration mit dem Multidaten-Ansatz

Die ausgewählten Daten unterscheiden sich neben ihren unterschiedlichen Bezugsquellen vor allem im Datenmodell, -format oder -typ, und liegen zudem in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen, räumlichen Bezugssystemen, Lagegenauigkeiten und in unterschiedlichen räumlichen Abdeckungen vor. Um alle Daten räumlich miteinander zu verschneiden und kombiniert analysieren zu können, war die Vereinheitlichung dieser Eigenschaften notwendig. Im Folgenden werden daher diese zu vereinheitlichenden Dateneigenschaften genauer erläutert und die erforderlichen Bearbeitungsschritte zur Angleichung allgemein beschrieben. In den Kapiteln 4.3 und 4.4 wird die Aufbereitung explizit für die verschiedenen Datensätze dargestellt.

### 4.2.1 MDA-Datenmodell: Raster

Von übergeordneter Wichtigkeit für die Integration unterschiedlicher Datentypen ist die Wahl des Datenmodells, da eine Datenverschneidung, wie in den Grundlagen beschrieben, nur in einem einheitlichen Datenmodell möglich ist (KAPPAS 2011). Wie in Kapitel 2.4.3 dargestellt, erfolgte die Datenintegration anhand des MDA in den Arbeiten von BARETH (2001), ROHIERSE & BARETH (2004) und BARETH (2008) nach Abschluss der Fernerkundungsanalysen im Vektordatenmodell. Da jedoch die Ergebnisse dieser Arbeit primär zu Modellierungszwecken einerseits im Rasterdatenmodell benötigt werden, und durch die hohe Anzahl an Fernerkundungsdaten der überwiegende Teil der Daten andererseits als Raster

vorliegt, wurde für diese Arbeit ein regelmäßiges Rastermodell auch für die MDA-GIS-Analysen beibehalten. Das Rasterdatenmodell bietet in Bezug auf die gemeinsame Speicherung der verwendeten Daten, beispielsweise in einem *layer stack*, Leistungsvorteile beim Datenzugriff gegenüber dem Vektorformat (EHLERS & SCHIEWE 2012). Zudem ist die flächenhafte Datenverschneidung mittels Overlay-Analysen im Vektordatenmodell deutlich komplexer und zeitaufwändiger, da eine Überführung aller Datensätze in eine einheitliche topologische Struktur notwendig ist. Diese war allerdings aufgrund der unterschiedlichen Datenmodelle, in denen die Eingabedaten vorliegen, nicht gegeben. Die Layer-Verschneidung im Vektordatenmodell hätte daher womöglich eine intensive Datenhomogenisierung und Bereinigung zur Vermeidung von *sliver polygons* („Splitter- oder Artefaktpolygone“) erfordert (HEYWOOD et al. 2011, KAPPAS 2011). Im Rasterdatenmodell ist diese räumliche passgenaue Überlagerung von verschiedenen Datensätzen für Overlay-Analysen durch die Anpassung an ein einheitliches Grid (Gitter) relativ leicht zu erzielen (LILLESAND et al. 2008). Die Etablierung einer Lageübereinstimmung der räumlichen Informationen verschiedener Datensätze im Rastermodell ist davon allerdings unberührt und muss vor oder im Zuge der Georeferenzierung erfolgen (vgl. Kapitel 4.2.4 und 4.2.5).

## 4.2.2 Koordinatensystem & Projektion

Die für die Analysen verwendeten Geodaten lagen in unterschiedlichen Projektionen vor, denen zudem teilweise ein anderes Referenzellipsoid zugrunde liegt. Da eine räumliche Verschneidung nur in einem einheitlichen räumlichen Bezugssystem erfolgen kann, war zunächst eine Angleichung aller Datensätze notwendig. Wie aus der Beschreibung der Fernerkundungsdatengrundlage hervorgeht, ist vor allem bei Satellitendaten die Kombination aus räumlichem Referenzsystem und Projektion WGS84/UTM sehr verbreitet. Dementsprechend lagen auch alle Fernerkundungsszenen in dieser Projektion vor. Im Gegensatz zu den Fernerkundungsdaten ist die Projektion der vektorbasierten Geodaten weniger einheitlich. Im Allgemeinen werden in Deutschland zwar alle Geodaten von öffentlichen Einrichtungen in einem einheitlichen räumlichen Bezugssystem abgegeben. Da aber im Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit in Deutschland die – je nach Einrichtung und Datensatz zeitlich versetzte – Umstellung vom alten Bezugssystem Deutsches Hauptdreiecksnetz/Gauß-Krüger (DHDN/GK) ins neue europaweit gültige System Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989 in der UTM-Abbildung (ETRS89/UTM) vollzogen wurde, erfolgte die Bereitstellung der Daten teilweise im alten und im neuen System. Da ETRS89/UTM für Deutschland mittlerweile das standardmäßige Referenzsystem ist und durch die Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie (EU 2007) für viele weitere Länder Europas zum Standard wird (INSPIRE 2010), hätte es sich angeboten, dieses System auch für die vorliegende Arbeit zu verwenden. Mit den Fernerkundungsdaten lag allerdings der mit

Abstand größte Teil der verwendeten Daten in der Kombination WGS84/UTM vor. Um daher den enormen Arbeitsaufwand der notwendigen Umrechnung der Fernerkundungsdaten in ein anderes Referenzsystem zu umgehen, wurde die Kombination WGS84/UTM als Standard für diese Arbeit gewählt. Dies ist im Sinne der Verwendbarkeit der Ergebnisdatensätze dieser Arbeit aber kein wirklicher Nachteil, da ETRS89 und WGS84 im Allgemeinen als identisch angesehen werden. Die zugrundeliegenden Referenzellipsoide besitzen bis auf physikalische Zusatzparameter dieselben geometrischen Parameter. Mögliche Abweichungen von Koordinatenwerten der beiden Bezugssysteme sind daher so gering, so dass sie in der Praxis nicht berücksichtigt werden (FLACKE et al. 2010). Da sich das Untersuchungsgebiet zum überwiegenden Anteil in UTM-Zone 32 befindet, lagen die meisten Fernerkundungsdaten auch in dieser Projektion vor. Demzufolge wurde diese Zone als maßgebend bestimmt. Allerdings verläuft die Grenze zur UTM-Zone 31 am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets, so dass einige Satellitenszenen, je nach abgedecktem Gebiet, in UTM-Zone 31 geliefert wurden. Die entsprechenden Daten mussten daher im Rahmen der Datenaufbereitung neu projiziert werden. Da eine mathematische Beziehung zwischen unterschiedlichen UTM-Zonen besteht, war eine Umrechnung mit Standardmethoden die Fernerkundungssoftware enthält, problemlos möglich. Etwas anders stellte sich die Situation allerdings bei den Geobasisdaten dar, die in der Kartenprojektion DHDN/GK oder ETRS89/UTM vorliegen. Zwischen unterschiedlichen Bezugsellipsoiden besteht im Allgemeinen keine logische Beziehung. Eine mathematisch eindeutige Umrechnung ist daher nicht möglich (BRK.NRW 2012b). Um dennoch einen Bezugssystemwechsel vorzunehmen zu können, werden Transformationsmethoden eingesetzt. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um mathematische Formeln, bei denen die Koordinatenanpassung mit Hilfe von bestimmten Parametern erfolgt. Diese Parameter sind beispielsweise über in beiden Systemen bekannte Stützpunkte zuvor zu bestimmen. Zum Übergang vom einen zum anderen Referenzellipsoid stehen verschiedene Methoden für unterschiedliche Genauigkeitsansprüche zur Verfügung. Eine häufig verwendete, sogenannte räumliche Ähnlichkeitstransformation, ist die 7-Parameter-Helmert-Transformation (FLACKE et al. 2010). Dabei werden drei Parameter zur Translation und drei Parameter zur Rotation der Koordinatenachsen sowie ein weiterer Parameter zur Maßstabsanpassung (Skalierung) verwendet (EHLERS & SCHIEWE 2012). Die Eignung der verfügbaren Parameter hat dabei enormen Einfluss auf die Güte des Transformationsergebnisses. WGS84 und ETRS89 bilden hier allerdings eine Ausnahme. Da beide Systeme generell als identischen erachtet werden, sind die Transformationsparameter hier gleich Null. Daten können somit ohne Genauigkeitsverlust umgeformt werden (FLACKE 2006). Die Durchführung der Transformation ist allerdings dennoch notwendig, da alle Daten softwarebedingt eine Projektion mit identischer Bezeichnung aufweisen müssen. Im Falle der Transformation zwischen DHDN/GK und WGS84 (oder ETRS89)/UTM sind hingegen in Deutschland für jedes Bundesland eigene Parametersätze notwendig, um eine hohe Lagegenauigkeit zu erzielen (GRIWODZ 2009). Um daher eine bundesweit gültige



Transformationsmethode zur Überführung von bundeslandübergreifenden Datenbeständen wie ATKIS vom DHDN ins ETRS89/WGS84 zur Verfügung zu haben, wird die sogenannte Bundeseinheitliche Transformation für ATKIS (BeTA2007) von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) seit dem Jahr 2008 bereitgestellt. Anhand von BeTA2007 sind Transformationsgenauigkeiten im Submeterbereich (einige Dezimeter) für das gesamte Bundesgebiet zu erzielen (ADV 2012), so dass diese Transformationsmethode für die vorliegende Arbeit gewählt wurde. BeTA2007 wird zudem für die Transformation aller am ATKIS ausgerichteten Datensätze empfohlen (ADV 2008a). BeTA2007 beruht auf der als Open Source-Software erhältlichen National Transformation Version 2 (NTv2), einer für das Gebiet Kanadas entwickelten Transformationsmethode zum Bezugssystemwechsel. Grundlage für die Änderung des Bezugssystems ist ein achsenparalleles Gitter mit Verschiebungswerten (auch als Shiftwerte bezeichnet) auf Basis geographischer Koordinaten mit einer Maschenweite von  $6' \times 10'$ . Shiftwerte für Bereiche innerhalb der Gittermaschen werden dabei durch bilineare Interpolation berechnet (ADV 2012). Bei der Transformation werden diese Shiftwerte an die Koordinaten angefügt, um die Koordinaten des Zielsystems zu ermitteln (KREITLOW 2010). Die BeTA2007-Methode ist seit Version 9.3 in ArcGIS implementiert, so dass alle betreffenden Datensätze während der Datenaufbereitung ins Zielsystem WGS84/UTM transformiert werden konnten.

### 4.2.3 Räumliche Auflösung

Wie bereits in den Kapiteln 3.2 und 3.3 dargestellt, liegen die für den MDA ausgewählten Daten in verschiedenen räumlichen Auflösungen vor. Die räumliche Verschneidung ist im Rasterdatenmodell jedoch nur in einer einheitlichen räumlichen Auflösung möglich (DE SMITH et al. 2009), so dass diese für alle Datensätze angepasst werden muss. Da beispielsweise nach ANDERSON et al. (1976) die einzelnen Landnutzungstypen unterschiedliche Maßstabebenen zur Erfassung und Darstellung erfordern, stellt die Festlegung der Pixelgröße im Hinblick auf den Informationsgehalt oder den Aggregationsgrad der einzelnen zu erzeugenden Landnutzungsklassen eine zentrale Weichenstellung dar. Je nach Maßstabebene kann die genaue Klassifikation beziehungsweise Unterscheidung von Vegetation und Bebauung in urbanen oder suburbanen Bereichen daher problematisch sein (WOODCOCK & STRAHLER 1987). Nach MCCLOY & KICKNER (2006) lassen sich Daten mit einer Pixelgröße von 25 m grundsätzlich für den angestrebten Zielmaßstab von 1:50.000 verwenden. Infolgedessen wurde die minimale räumliche Auflösung der Fernerkundungsdaten daher zunächst  $\leq 30$  m Pixelgröße (bezüglich Landsat) eingegrenzt. Die Pixelgröße schwankte jedoch zwischen 5 m (RapidEye) und 30 m, wobei die ASTER-Daten mit 15 m sowie die RapidEye-Daten den Großteil der Datengrundlage ausmachten. Die Auflösung der RapidEye-Daten

wurde jedoch zum Zeitpunkt der Festlegung nicht in Betracht gezogen, da die Datenverfügbarkeit zum einen noch nicht abzusehen war. Zum anderen wurde eine räumliche Auflösung von 5 m für Vegetationsflächen für die Fragestellung dieser Arbeit darüber hinaus als zu fein angesehen, da hiermit eine zu hohe spektrale Variabilität und Detailliertheit beispielsweise innerhalb eines Schläges verbunden war. Dies könnte wiederum zu einer Verkomplizierung der Fernerkundungsklassifikation führen (vgl. LATTY et al. (1985)). Des Weiteren wurde die zu bewältigende Datenmenge bei einer Pixelgröße von 5 m in Bezug auf den Berechnungsaufwand und Speicherbedarf als problematisch eingeschätzt. Die Auswahl der Pixelgröße erfolgte daher im Hinblick auf eine Minimierung unnötiger Varianz innerhalb einer Klasse (vgl. MARCEAU et al. (1994)) und Wahrung der Unterscheidbarkeit von Ackernutzungen auf Schlagebene. Zur Festlegung der Rastergröße war allerdings auch der Maßstab der vektorbasierten Geobasisdaten zu berücksichtigen. Feldblöcke und ATKIS stellen Informationen in einem höheren Maßstab von 1:10.000 (EU 2009) respektive 1:25.000 (BKG 2011a) bereit und erlauben daher eine vergleichsweise feinere Pixelgröße. Die CLC-Daten verfügen hingegen über einen Maßstab von 1:100.000, beruhen allerdings auf der visuellen Interpretation von Fernerkundungsdaten mit vornehmlich 30 m Pixelgröße. Eine besondere Bedeutung kam hierbei linienhaften Objekten wie dem Straßennetz des ATKIS zu, da diese bei der Überführung ins Rastermodell mindestens die „Breite“ eines Pixels einnehmen würden. Dies betraf vor allem die Wirtschaftswege, die die landwirtschaftliche Nutzfläche unterteilen. Eine zu grobe Pixelgröße würde demnach zu einer Überrepräsentation des Wegenetzes in einer Landnutzungsclassifikation im Rastermodell führen. Aus diesem Grund wurde einerseits die ungefähre Breite von Wirtschaftswegen in der Realität unter Einbeziehung der Randbegrünung wie Grünstreifen oder Gebüsch mit Hilfe von Orthophotos veranschlagt und mit den unterschiedlichen Rastergrößen visuell verglichen. Andererseits erfolgte der visuelle Vergleich der Repräsentation von einzelnen Feldern (beziehungsweise Schlägen) in den unterschiedlichen Fernerkundungsdaten ebenfalls im Vergleich mit Orthophotos. Als Ergebnis wurde eine Pixelgröße von 15 m als ein guter Kompromiss zwischen einer angemessenen Repräsentation der Wirtschaftswege im Rastermodell und der Erfassung einzelner Schläge einerseits und der damit für die MDA-Analysen anfallenden Datenmenge andererseits angesehen. Für den Rahmen dieser Arbeit wurde die Pixelgröße daher auf 15 m festgelegt. Diese räumliche Auflösung ist allerdings zur fernerkundungsbasierten Unterscheidung verschiedener urbaner Landnutzungen mitunter nur bedingt geeignet. Die gute Erfassung von Ackernutzungen wurde dem jedoch übergeordnet. Zudem muss die Unterscheidung von Siedlungsnutzungen, durch den Einsatz von Daten wie dem ATKIS, nicht ausschließlich aufgrund der Fernerkundungsdatengrundlage erfolgen.

#### 4.2.4 Georeferenz

Eine weitere wichtige Anforderung, die alle Datensätze für multitemporale Multidaten-Analysen erfüllen müssen, ist eine hohe Lagegenauigkeit. Dies betrifft zum einen die Lagegenauigkeit in Bezug auf die entsprechende Position auf der Erdoberfläche (Georeferenz). Zum anderen muss eine ausreichend hohe Lageübereinstimmung der verwendeten Daten zueinander vorliegen (Koregistrierung). Dies wird beim Umgang mit Geodaten zwar im Allgemeinen als selbstverständlich angesehen, da die Verortung von Daten die fundamentale Eigenschaft von GI-Systemen darstellt. In der Praxis sind diese beiden Anforderungen allerdings vor allem bei Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Herkunft, aber auch bei anderen Geodaten, oftmals nicht in ausreichendem Maße gegeben. Fernerkundungsdaten werden in der Regel zwar georeferenziert oder gar orthorektifiziert bereitgestellt. Je nach Sensor und Datenprodukt betragen die Lagefehler von Daten mit moderater räumlicher Auflösung dennoch einige Meter bis mitunter über 100 m. Darüber hinaus enthalten Fernerkundungsdaten geometrische Verzerrungen, die beispielsweise aus dem Zusammenwirken von Aufnahmewinkel und Relief resultieren und nicht bei jedem Datenprodukt vom Hersteller korrigiert sind.

Eine unzureichende Koregistrierung zeigt sich bei der Verwendung unterschiedlicher Datensätze besonders an Landnutzungsgrenzen. Im Rahmen von Change Detection-Analysen verursacht dies beispielsweise sogenannte *false changes* (WARNER et al. 2009a). Dadurch werden Landnutzungsänderungen für Bereiche ausgewiesen, an denen keine Änderung der Nutzung stattgefunden hat, da eigentlich benachbarte (aber unterschiedliche) Landnutzungen in diesen Grenzbereichen „überlagert“ wurden. Bei einer räumlichen Verschneidung unzureichend koregistrierter Daten werden neben geometrischen Fehlern somit auch inhaltliche Fehlinformationen erzeugt, die sich in der Regel kaum noch korrigieren lassen. Diese pflanzen sich dann über die gesamte Analyseketten fort, und verstärken sich mit der Anzahl der einbezogenen Daten-Layer. Die Durchführung einer Koregistrierung aller Datensätze anhand von Stützpunkten, ist daher im Rahmen der Datenaufbereitung zwingend notwendig. TOWNSHEND et al. (1992) kommen bei einer Vergleichsanalyse beruhend auf NDVI-Wertänderungen für Daten mit 250 m und 500 m räumlicher Auflösung diesbezüglich zu dem Ergebnis, dass eine Registrierungsgenauigkeit von 0,2 Pixeln oder weniger notwendig ist, um eine Fehlertoleranzquote von etwa 10 % einhalten zu können. Hierzu wird jedoch von WARNER et al. (2009a) angemerkt, dass eine entsprechende Lageübereinstimmung von mehreren Datensätzen in der Praxis nur sehr schwer zu erreichen ist. Von LILLESAND et al. (2008) wird demnach eine Lageübereinstimmung von 0,25 bis 0,5 Pixel beziehungsweise von JENSEN (2005) ein RMS-Fehler der Stützpunkte für die Koregistrierung von  $\leq 0,5$  Pixel als erforderlich und umsetzbar erachtet.

Um eine möglichst hohe Lageübereinstimmung der verwendeten Fernerkundungsdaten zu erreichen, wurde ein Referenzdatensatz bestimmt, der bereits über eine präzise Georeferenzierung verfügt und an den alle Daten-Layer, vergleichbar mit der Vorgehensweise beim *rubber sheeting*, räumlich ausgerichtet (registriert) wurden (DE WIT & CLEVERS 2004, MERCHANT & NARUMALANI 2009, KAPPAS 2011). Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierzu die Vektordaten des ATKIS-Wegenetzes (hier vor allem die Layer *ver01\_l* und *ver02\_l*) gewählt (vgl. ROHIERSE & BARETH (2004)), die sich über das weite Teile des Untersuchungsgebiets sehr engmaschig erstrecken. Da die Gestalt des Wegenetzes in der Regel gut in den verwendeten Fernerkundungsdaten zu identifizieren ist, bietet es ein enormes Potential zur Ableitung von Stützpunkten für die räumliche Transformation. Durch die Herkunft aus der Landesvermessung verfügt das ATKIS zudem über eine sehr hohe Lagegenauigkeit von  $\pm 3$  m für die einzelnen Knotenpunkte (ADV 2008b), welche für die ausgewählte räumliche Auflösung mehr als ausreichend ist. Wie bereits erläutert, stimmt die Lage aller Geodatenätze von öffentlichen Institutionen in Deutschland in ausreichendem Maße mit der Georeferenz des ATKIS überein, so dass die Koregistrierung nur die Fernerkundungsdaten betrifft (vgl. Kapitel 4.3.1).

#### 4.2.5 MDA-Referenz-Grid

Die notwendige exakte Lageübereinstimmung der Rasterzellen der verwendeten Datensätze (vgl. Kapitel 4.2.4) wird bei Fernerkundungsdaten allein durch die Koregistrierung trotz sorgfältiger Stützpunktauswahl in der Regel nicht erreicht, so dass immer noch ein kleiner Lageversatz der Rasterzellen von weniger als einem Pixel zurückbleibt. Auch bei der Vektor-zu-Raster-Konvertierung ist die Festlegung der genauen Lage der Rasterzellen neben der Angabe der Zellengröße notwendig, da diese, ansonsten aus der geometrischen Gestalt des Ursprungsdatensatzes resultiert. Trotz einer hohen Lageübereinstimmung zweier Layer im Vektormodell, kann die Konvertierung daher – nach eigener Erfahrung – zu einem relativen Lageversatz dieser Daten-Layer im Rastermodell führen. Zur Bildung von *layer stacks* aus mehreren unterschiedlichen thematischen Ebenen (Layern) im Rahmen der MDA-Analysen müssen die Rasterzellen der einzelnen Layer allerdings absolut passgenau übereinander liegen. Andernfalls erfolgt bei solch einer Prozedur eine automatische Einpassung der Rasterzellen (sogenanntes *snapping*), wodurch der Lageversatz zwischen Layern (durch Anpassung in die falsche Richtung) unter Umständen verstärkt oder erst herbeigeführt wird. Mit steigender Layer-Anzahl, steigt daher auch hierbei die Gefahr von Überlagerungsfehlern stark an.

Neben der Zellenausrichtung ist zudem die Abgrenzung des Analysebereichs (*processing extent*) für die MDA-Analysen von fundamentaler Wichtigkeit, da alle Layer bei der Datenverschneidung mit dem dazu ausgewählten Werkzeug (*combine*), unabhängig von der

tatsächlichen Datenabdeckung, das identische Ausmaß aufweisen müssen. Andernfalls wird die Zielfeile auf das kleinste gemeinsame Ausmaß begrenzt (ESRI 2013a).

Zur Aufbereitung aller Datensätze hinsichtlich der Anforderungen für die MDA-Analysen, wurde daher ein Referenz-Raster erzeugt, im Folgenden als MDA-Referenz-Grid (MDA-RG) bezeichnet, das die zuvor beschriebenen Anforderungen in Bezug auf die Kartenprojektion (WGS84/UTM-Zone32N), die Größe (15 m) und Lage der Rasterzellen im Untersuchungsgebiet sowie das notwendige Ausmaß in sich vereint. Das MDA-RG bildete nachfolgend die Basis, an die alle Eingabedatensätze passgenau ausgerichtet wurden.

Die Grundlage für das MDA-RG bildeten, wie auch zur Koregistrierung der Fernerkundungsdaten, die Layer *ver01\_1* und *ver02\_1* des ATKIS-Wegenetzes. Zur Erzeugung des MDA-RG in ArcGIS wurden beide Layer zunächst (per *merge*-Befehl) zu einem Layer verschnitten, um eine einheitliche räumliche Rasterstruktur sicherzustellen. Anschließend erfolgte die Vektor-zu-Raster-Konvertierung (mittels *polyline-to-raster*-Befehl) unter Berücksichtigung der zuvor formulierten Anforderungen. Anknüpfend an die hierdurch festgelegte Zellenstruktur, erfolgte die Erweiterung des Ausmaßes des MDA-RG etwas über die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets hinaus, falls eine nachträgliche Erweiterung des Analysebereichs erforderlich werden sollte. Im Zuge der Georeferenzierung beziehungsweise Koregistrierung der Fernerkundungsdaten, der Vektor-zu-Raster-Konvertierung und der Verschneidung von Datensätzen wurde das MDA-RG stets als ein sogenanntes *snap raster* (Fang-Raster) zur Angleichung der Rasterzellenposition sowie als *processing extent* zur Anpassung des Layer-Ausmaßes eingesetzt.

### 4.3 Aufbereitung der Fernerkundungsdaten

Die Datenaufbereitung der Fernerkundungsdaten umfasste im Allgemeinen sensorbeziehungsweise datenspezifische radiometrische und geometrische Korrekturen, eine Mosaikbildung sowie stets eine Koregistrierung mit dem ATKIS-Wegenetz mit anschließender Anpassung an das MDA-RG (vgl. Kapitel 4.2.5). Bei der Aufbereitung der Fernerkundungsdaten wurde bei allen Datensätzen auf eine atmosphärische Korrektur verzichtet, da im Hinblick auf eine qualitative Analyse keine Steigerung der Klassifikationsgenauigkeit durch die Bestimmung der *surface reflectance* zu erwarten war (SONG et al. 2001, DE WIT & CLEVERS 2004). Die Durchführung allerdings wäre mit einem erheblichen zusätzlichen Arbeitsaufwand verbunden gewesen. Die Vorgehensweise bei der Georeferenzierung beziehungsweise Koregistrierung war für alle Fernerkundungsdaten weitestgehend identisch und wird daher zunächst allgemeingültig im folgenden Unterkapitel 4.3.1 erläutert. Die daran anschließenden

Erläuterungen der datenspezifischen Aufbereitungen behandeln vor allem besondere Aspekte oder Abweichungen von der grundsätzlichen Vorgehensweise.

### 4.3.1 Registrierung der Fernerkundungsdaten

Zur genauen Georeferenzierung der Fernerkundungsdaten wurde eine Koregistrierung mit dem ATKIS-Wegenetz durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2.4). Die Auswahl von Passpunkten (GCP) anhand von Kreuzungen des Straßennetzes ist eine allgemein gebräuchliche Methode, um Fernerkundungsdaten in der verwendeten Maßstabsebene zu georeferenzieren (LILLESAND et al. 2008, ALBERTZ 2009). Dabei wird durch die Identifizierung von entsprechenden Straßenkreuzungen in den Fernerkundungsdaten und im Referenzdatensatz, eine Vereinheitlichung der Georeferenz erzielt. Mit dem im Allgemeinen sehr engmaschigen Straßennetz in Deutschland stehen damit unzählige markante Knoten zur Ableitung von GCP zur Verfügung.

Die Registrierung der Fernerkundungsdaten erfolgte in ArcMap, da diese durch die überlagerte Darstellung der zu korrigierenden Daten und des Referenz-Layers komfortabel erfolgen kann. ArcGIS verfügt mit Polynomtransformationen erster oder höherer Ordnung, *spline (rubber sheeting)* oder *adjust* über mehrere Transformationsfunktionen zur Lagekorrektur anhand ausgewählter GCP. Für den Rahmen dieser Arbeit wurde in der Regel die *adjust*-Transformation (Anpassungstransformation) verwendet, da sich diese sowohl zur Optimierung der lokalen als auch der globalen Lagegenauigkeit eignet (ESRI 2013b). Dadurch war es möglich, kleinräumig auftretende Lagefehler sowie einen großflächigen Lageversatz zu korrigieren. Bei der *adjust*-Transformation erfolgt die globale Lagekorrektur anhand der Passpunkte unter Verwendung einer Polynomtransformation, die auf der Methode der kleinsten Quadrate beruht. Die lokale Lagekorrektur wird über die Kombination mit TIN-Interpolationen (*triangulated irregular network*) hergestellt (ESRI 2013b). Mit der *adjust*-Transformation lassen sich, für den MDA notwendige, sehr detaillierte Lagekorrekturen erzielen. Allerdings sind hierzu mitunter sehr viele Passpunkte notwendig, auch wenn der RMS-Fehler in der Regel bereits nach wenigen Punkten gegen null geht. Eigene Erfahrungen ergaben, dass mit der *adjust*-Transformation auch bei RMS-Fehlern von über einem Pixel gute Registrierungsergebnisse möglich waren (vgl. exemplarisch Kapitel 4.3.2). Die Zuordnung der Pixelwerte in der registrierten Szene erfolgte anschließend im Allgemeinen mit dem Resampling-Verfahren *nearest neighbor*, um die ursprünglichen Pixelwerte der Ursprungsdaten bestmöglich zu erhalten.

### 4.3.2 Landsat-5

Wie bereits bei der Vorstellung der Landsat-TM-Daten angesprochen, wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei unterschiedliche Landsat-TM-Datenprodukte herangezogen. Beim Datenimport in ENVI ergaben sich dadurch leichte Unterschiede. Die nachfolgenden Aufbereitungsschritte waren hingegen identisch. Abbildung 4.1 zeigt das Ablaufschema der Landsat-TM-Datenaufbereitung.

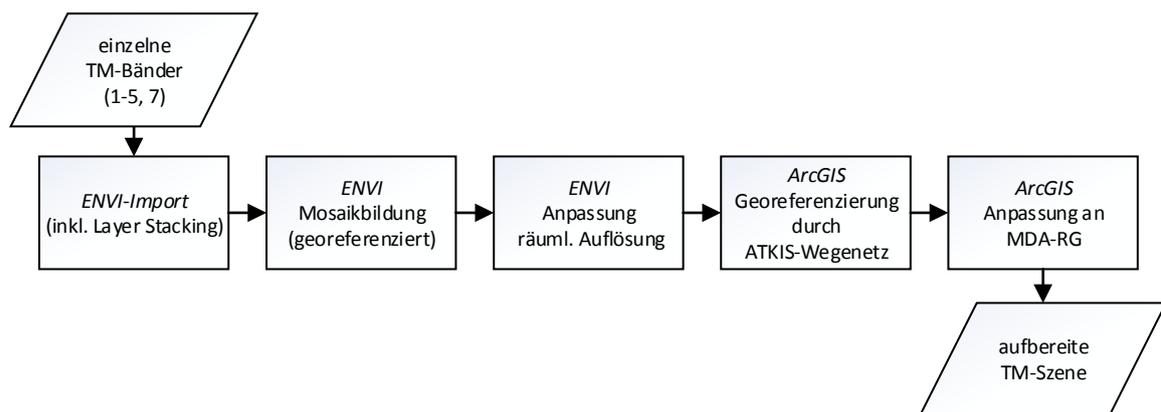


Abbildung 4.1: Aufbereitungsablauf der Landsat-TM-Szenen.

Beim vom USGS bezogenen Datenprodukt L1T handelte es sich um eine sehr fortgeschrittene Bearbeitungsstufe, so dass die Daten bereits ins richtige Koordinatensystem projiziert und als einzelne TIFF-Dateien vorlagen. Beim Import in ENVI mittels der mitgelieferten Metadatenfile erfolgte eine automatische Stapelbildung (*layer stacking*) aus den einzelnen Multispektralbändern. Die Daten im ESA CEOS-Format lagen ebenfalls als einzelne TM-Bänder im Koordinatensystem WGS84/UTM vor. Ebenso erfolgte ein *layer stacking* beim Import in ENVI. Da diese Szenen allerdings noch eine Satellitenpfad-Ausrichtung aufwiesen, war die Rotation anhand vorgegebener Winkel zur Karten-Ausrichtung notwendig. Dies erfolgte im ENVI-Modul *rotate/flip data* (EXELISVIS 2012e), wobei das Resampling-Verfahren *nearest neighbor* zur Berechnung der Ausgabe datei diente. In Abhängigkeit von der Aufnahme erfolgte die Abdeckung des Untersuchungsgebietes mit einer oder zwei Landsat-Szenen, so dass zur effizienten Datenanalyse gegebenenfalls eine Mosaikbildung notwendig war. Da die Szenen immer aus dem gleichen Aufnahmestreifen stammten, war eine georeferenzbasierte Mosaikbildung (*georeferenced mosaicking*) (EXELISVIS 2012b) möglich. Dies beinhaltete in einigen Fällen den automatisch durchgeführten Wechsel der UTM-Zone mittels Triangulation (Resampling-Verfahren: *nearest neighbor*). Zur georeferenzierten Mosaikbildung in ENVI wurden stets folgende Parameter verwendet: *feathering distance*: 50; *color balancing*: no; *stats from overlapping region*; Resampling-Verfahren: *nearest neighbor*. Zur Vereinfachung werden Mosaik im Folgenden auch als Szene bezeichnet. Da die verwendeten Landsat-TM-Daten eine Pixelgröße von 30 m aufweisen, erfolgte im nächsten Schritt bereits die Anpassung auf 15 m, um die

nachfolgende Koregistrierung zu erleichtern. Hierzu wurde das Resampling-Verfahren *nearest neighbor* eingesetzt, damit die ursprünglichen DN-Werte bei der damit verbundenen Viertelung der Ursprungspixel zunächst unverändert blieben. Die Koregistrierung mit dem ATKIS-Wegenetz im GIS (vgl. Kapitel 4.3.1) mit anschließender Anpassung an das MDA-RG (vgl. Kapitel 4.2.5) war trotz der geometrischen Korrektur durch den Datenprovider bei allen Szenen notwendig, um eine ausreichende Lageübereinstimmung mit den anderen Datensätzen zu erzielen. Für eine Szene vom 09.09.2008 waren hierzu 71 GCP mit einem RMS-Fehler von 0,88 ausreichend. Bei einer Szene vom 14.08.2010 wurde mit der *adjust*-Transformation eine gute Lageübereinstimmung trotz eines RMS-Fehlers von 1,26 mit 26 Punkten erreicht.

### 4.3.3 Landsat-7

Abbildung 4.2 fasst die Datenaufbereitung der Landsat-7-ETM+-Daten zusammen. Da das verwendete Datenprodukt dem der Landsat-5-TM-Daten des USGS entsprach, war der Aufbereitungsablauf im Grunde identisch (vgl. Kapitel 4.3.2). Einzige Ausnahme stellte die Behandlung der Datenlücken dar, die durch den mittlerweile nur noch möglichen SLC-off-Aufnahmemodus des ETM+-Sensors entstehen (vgl. Kapitel 3.2.2).

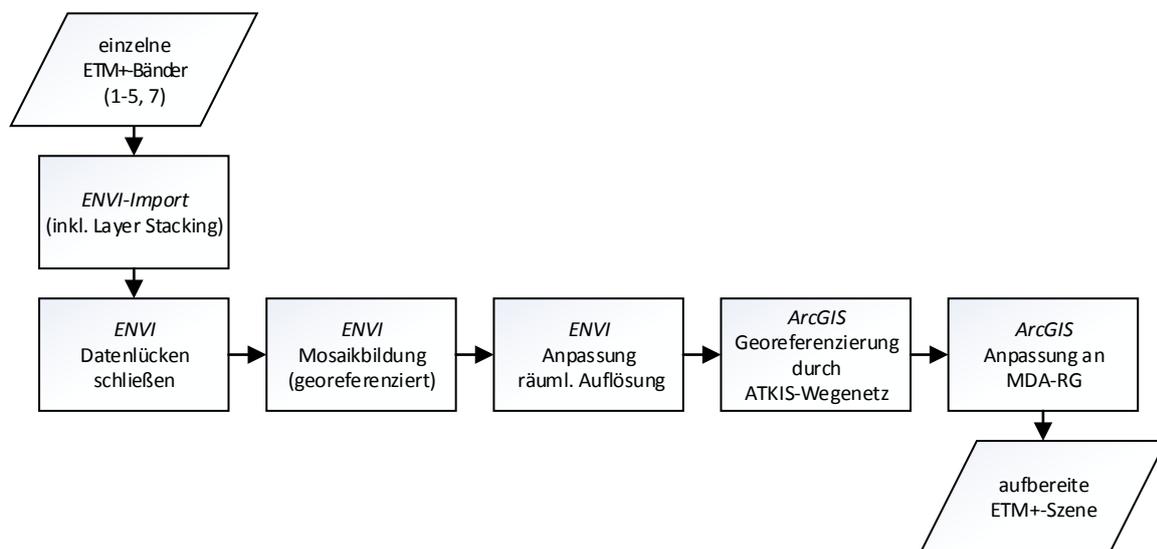


Abbildung 4.2: Aufbereitungsablauf der Landsat-ETM+-Szenen.

Zur Schließung der Datenlücken stehen zahlreiche Verfahren wie die beispielsweise von STOREY et al. (2005) oder MAXWELL et al. (2007) zur Verfügung. Diese Verfahren benötigen allerdings in den meisten Fällen eine weitere Szene des entsprechenden Gebiets (mit ähnlichem Aufnahmedatum). Vor allem aufgrund des zusätzlichen Datenbedarfs und Prozessierungsaufwands, aber auch aufgrund der mit einem anderen Aufnahmedatum verbundenen veränderten spektralen Erscheinung der entsprechenden Bereiche (anderer Zustand der Landbedeckung), wurden diese Verfahren zur Klassifikation von Feldfrüchten



nur als bedingt geeignet eingeschätzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher der als Plug-in über die ENVI-Herstellerwebseite verfügbare Landsat Gapfill-Algorithmus von MINARI (2009) eingesetzt. Dieser ermöglicht die Füllung der Datenlücken durch eine auf Triangulation beruhende Interpolation, so dass keine weiteren Daten notwendig sind.

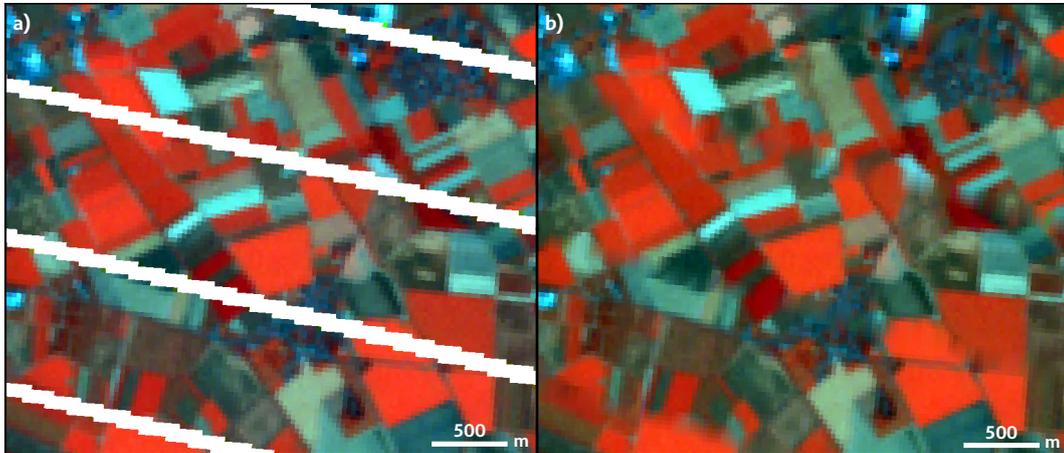


Abbildung 4.3: Ausschnitt einer im SLC-off-Modus aufgezeichneten Landsat-7-Szene vom 15.07.2008 vor (a) und nach (b) der Füllung der Datenlücken (weiße Balken in a) mit den Verfahren von MINARI (2009).

In der Abfolge der Aufbereitungsschritte folgte dieser Schritt daher zwischen dem Import in ENVI und der (eventuellen) Mosaikbildung. Abbildung 4.3 zeigt einen Ausschnitt der Landsat-7-Szene vom 15.07.2008 vor (a) und nach (b) der Interpolation zur Füllung der Datenlücken. Die Koregistrierung dieser Szene mit dem ATKIS-Wegenetz erfolgte anhand der *adjust*-Transformation mit 49 GCP (RMS-Fehler: 0,40).

#### 4.3.4 ASTER

Die Aufbereitung der ASTER-Daten umfasste im Wesentlichen die Arbeitsschritte Import in ENVI, Anwendung radiometrischer und geometrischer Korrekturen, Mosaikbildung, Koregistrierung sowie Anpassung an das MDA-RG. Abbildung 4.4 stellt den generellen Ablauf der ASTER-Datenaufbereitung dar. Vom ASTER-Instrument wurden für diese Arbeit ausschließlich Daten des VNIR-Sensors verwendet (vgl. Kapitel 3.2.3). Allerdings wurden sowohl L1A- als auch L1B-Daten eingesetzt. Auf die späteren Analysen hatte die Wahl des Datenprodukte jedoch keinen Einfluss, da beide Datenprodukte durch den Import in ENVI, zum Beispiel durch Anwendung der geometrischen und radiometrischen Kalibrierungskoeffizienten bei den L1A-Daten, angeglichen wurden (EXELISVIS 2012d). Die Georeferenzierung und Überführung der L1A-Daten in die ausgewählte Kartenprojektion WGS84/UTM-Zone32N lässt sich in ENVI mit dem Modul *Georeference ASTER* anhand der in den Daten enthaltenen Parameter herstellen (EXELISVIS 2012c). Hierbei ist neben der

Zielprojektion die Angabe der Anzahl von Stützpunkten (ausgewählte Anzahl: 150), des Resampling-Verfahrens (Auswahl: *nearest neighbor*) sowie der Koordinatenberechnungsmethode (Auswahl: Delaunay-Triangulation) für die Registrierung notwendig. L1B-Daten sind bereits in das Koordinatensystem WGS84/UTM projiziert, liegen allerdings noch in der Pfad-orientierten Ausrichtung vor (ERSDAC 2007).

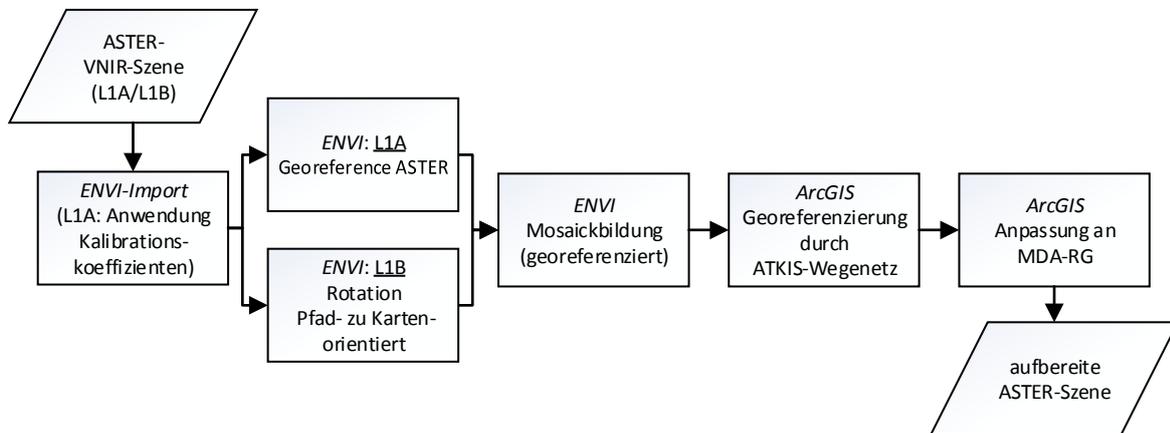


Abbildung 4.4: Aufbereitungsablauf der ASTER-Szenen.

Die Überführung der L1B-Daten in eine Karten-orientierte Ausrichtung erfolgte, wie auch bei den Landsat-Daten, mit in den Daten enthaltenen Rotationswerten. Je nach Observation wurde das Untersuchungsgebiet von zwei oder drei ASTER-Szenen erfasst. Da alle Szenen ebenfalls jeweils aus dem gleichen Aufnahmestreifen stammten, war eine georeferenzbasierte Mosaikbildung in ENVI (EXELISVIS 2012b) in der Regel ohne die Erzeugung von „Schweißnähten“ möglich. Die zur Mosaikbildung verwendeten Parameter entsprechen denen zur Landsat-Aufbereitung (vgl. Kapitel 4.3.2). Die gemeinsame Darstellung mit den ATKIS-Vektordaten im GIS offenbarte in der Regel ein deutliche Verzerrung sowie einen Lageversatz der ASTER-Szenen von bis zu über 100 m. Dabei nahm der Lageversatz im Allgemeinen, vermutlich aufgrund der erhöhten Reliefenergie, in der Südhälfte des Untersuchungsgebiets deutlich zu. Zur Koregistrierung der ASTER-Daten (vgl. Kapitel 4.3.1) waren daher je nach Szene mehrere hundert bis teilweise über tausend GCPs notwendig.

#### 4.3.5 IRS-P6

Die Aufbereitung der IRS-P6-LISS-III-Daten umfasste die Arbeitsschritte Import, *layer stacking*, Projizierung, Reduktion der räumlichen Auflösung, Registrierung ans ATKIS-Wegenetz und Anpassung ans MDA-RG (vgl. Abbildung 4.5). In der verwendeten Prozessierungsstufe Ortho Kit stellt Euromap die Daten der LISS-III-Bänder als einzelne TIFF-Dateien in Satellitenpfad-Ausrichtung mit entsprechenden *rational polynomial coefficients*-

Werten (RPC) bereit, über die sich eine Georeferenzierung herstellen lässt. Im Anschluss an den Import in ENVI erfolgte zunächst ein *layer stacking* zu einer Datei. Die mitgelieferten RPC-Werte wurden dabei automatisch eingelesen, so dass in diesem Zuge bereits die Projizierung der Szenen in die Kartenprojektion WGS84/UTM-Zone 32N sowie die Anpassung der Pixelgröße auf 15 m erfolgten.

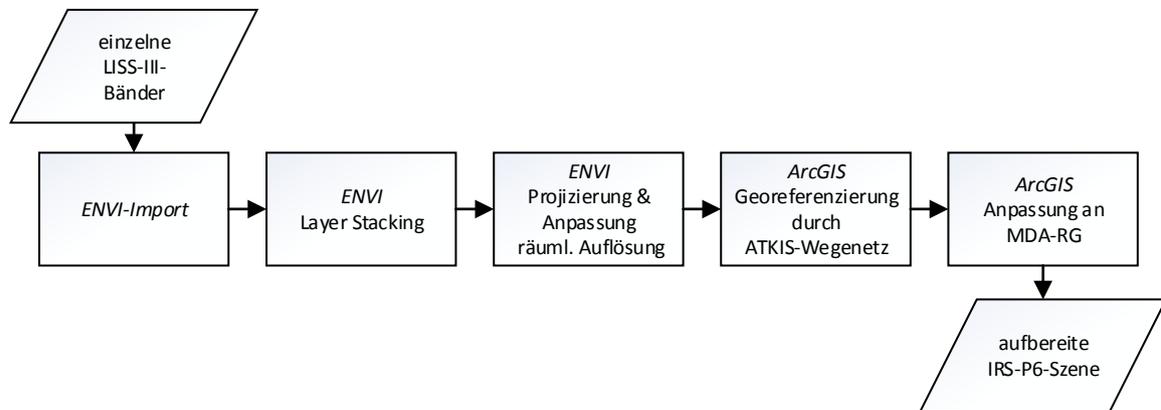


Abbildung 4.5: Aufbereitungsablauf der IRS-P6-Szenen.

Hierzu wurde das Resampling-Verfahren *cubic convolution* gewählt, da das zunächst favorisierte Verfahren *nearest neighbor* zu einer verzerrten visuellen Erscheinung der Bilddaten führte. Eine Registrierung mit dem ATKIS-Wegenetz, war da trotz der Anwendung der RPC-Informationen zur Lagekorrektur und Entzerrung notwendig. Die Co-Registrierung der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 wurde anhand von 409 GCP mit der *adjust*-Transformation sowie dem Resampling-Verfahren *nearest neighbor* durchgeführt.

### 4.3.6 RapidEye

Die Aufbereitung der RapidEye-Daten umfasste die Arbeitsschritte Import in ENVI, Mosaikbildung, Registrierung ans ATKIS-Wegenetz, Reduktion der räumlichen Auflösung sowie Anpassung an das MDA-RG (vgl. Abbildung 4.6). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Prozessierungsstufe Level 3A (L3A) genutzt, da diese bereits orthorektifiziert ist. Damit war im Hinblick auf die Registrierung der RapidEye-Daten mit dem ATKIS eine deutliche Reduzierung des Arbeitsaufwands verbunden. Eine mit der höheren Bearbeitungsstufe einhergehende stärkere Veränderung der originalen *radiance*-Werte sowie die Unterteilung des Untersuchungsgebiets in mehrere Kacheln wurden daher in Kauf genommen. Zur Analyse einer ganzen RapidEye-Szene war daher eine Mosaikbildung notwendig. Eine vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebiets umfasst dabei 13 Kacheln. L3A-Daten wurden vollständig aufbereitet im TIFF-Format bereitgestellt. Beim Import über die mitgelieferten XML-Metadaten werden die einzelnen Bänder in ENVI zudem mit den entsprechenden Wellenlängeninformationen verknüpft. Da keine weiteren Datenkorrekturen erforderlich

waren, erfolgte die Mosaikbildung im Anschluss an den Datenimport. Die Mosaikbildung auf Basis der Georeferenz (*georeferenced mosaicking*) war mit dem L3A-Datenprodukt problemlos möglich. Bei Kacheln, die derselben Szene entstammten, waren keine Einstellungen zur Fusion von Pixelwerten aus überlappenden Kacheln notwendig, so dass die Mosaikbildung mit folgenden Parametern vorgenommen wurde: *feathering distance*: 0; *color balancing*: no; Resampling-Verfahren: *nearest neighbor*. Trotz der herstellerseitigen Orthorektifizierung war bei allen verwendeten RapidEye-Szenen ein mehr oder weniger deutlich ausgeprägter Lageversatz gegenüber dem ATKIS als Referenz sowie auch zwischen unterschiedlichen RapidEye-Szenen erkennbar.

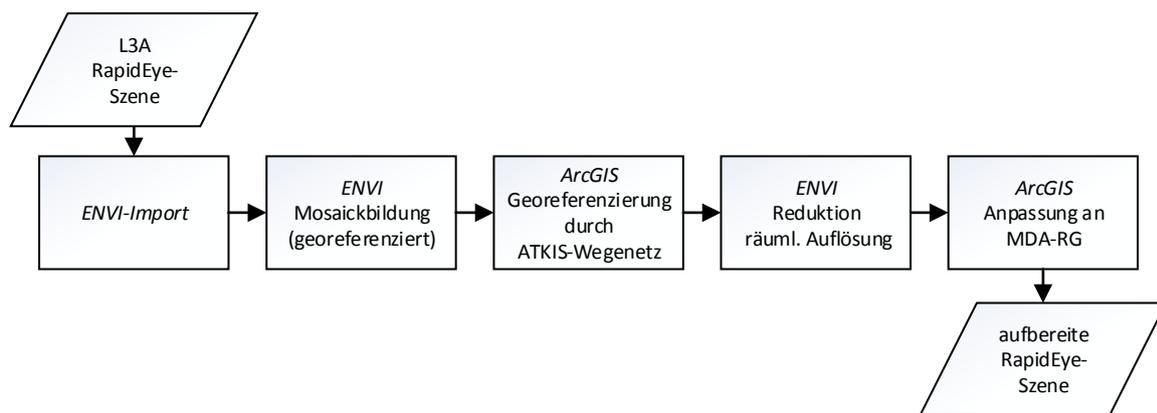


Abbildung 4.6: Aufbereitungsablauf der ASTER-Szenen.

Eine Registrierung mit dem ATKIS war dementsprechend auch hier erforderlich. Zur Erzielung einer möglichst hohen Genauigkeit, erfolgte diese in der Originalauflösung. Im Allgemeinen war jedoch beispielsweise im Vergleich zu den ASTER-Daten nur eine leichte Verzerrung zu verzeichnen. Neben der sonst gewöhnlich verwendeten *adjust*-Transformation, wurde daher des Öfteren bereits mit einer affinen Polynomtransformation eine gute Lageübereinstimmung erzielt. Für eine Szene vom 24.05.2009 waren hierzu bereits 19 GCP (RMS-Fehler: 0,37779) ausreichend. Die anschließende Reduktion der räumlichen Auflösung auf 15 m Pixelgröße erfolgte wieder in ENVI, da die verwendete Einstellung *pixel aggregate* der ENVI-Funktion *resize data* speziell zur Reduktion der räumlichen Auflösung von Fernerkundungsdaten dient. Dabei erfolgt eine Mittelwertbildung auf Basis aller Pixel, die am Ausgabepixelwert Anteil haben. Diese wurde gegenüber anderen Resampling-Verfahren wie *nearest neighbor* als besser eingeschätzt, um die Gestalt einer Szene zu erhalten. Mit der anschließenden Anpassung an das MDA-RG war die Aufbereitung der RapidEye-Daten abgeschlossen.

## 4.4 Aufbereitung der vektorbasierten Geodaten

Die Aufbereitung der Vektordaten betraf im Besonderen die Überführung ins Rasterdatenmodell. Dazu waren je nach Geometrietyp verschiedene Konvertierungsverfahren anzuwenden. Neben dem teilweise notwendigen Wechsel des zugrundeliegenden Koordinatensystems, war oftmals eine Umorganisation der Inhalte notwendig, damit ausgewählte Informationen ins Rastermodell übernommen werden konnten. Mit der Raster-zu-Vektor-Konvertierung war jeweils die Anpassung an das MDA-Referenz-Grid (MDA-RG) verbunden. Die Aufbereitung aller Vektordaten erfolgte ausschließlich in ArcGIS.

### 4.4.1 ATKIS (AAA-Modell)

Die Aufbereitung der ATKIS-Daten umfasste die Arbeitsschritte Wechsel des Koordinatensystems, Datenauswahl, räumliche Verschneidung und Umorganisation sowie die Vektor-zu-Raster-Konvertierung, in der die Anpassung an das vordefinierte MDA-RG inbegriffen war (vgl. Abbildung 4.7).

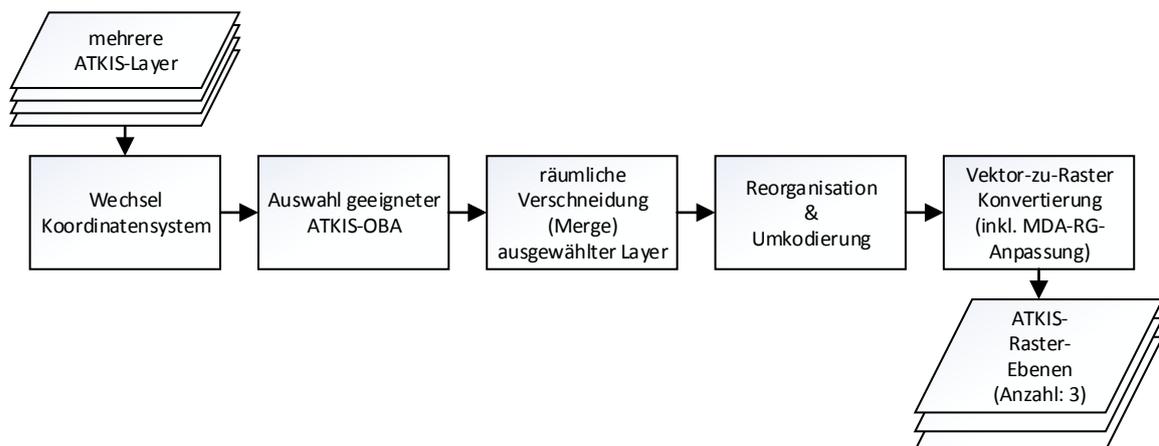


Abbildung 4.7: Aufbereitungsablauf der ATKIS-Daten.

Da die ATKIS-Daten in der Projektion ETRS89/UTM-Zone 32n ausgeliefert wurden, konnte der Wechsel der Kartenprojektion zu WGS84/UTM-Zone 32n anhand der BeTA2007 problemlos in ArcGIS erfolgen. Die Vektor-zu-Raster-Konvertierung wurde als letzter Aufbereitungsschritt mit den Werkzeugen *polyline-to-raster* beziehungsweise *polygon-to-raster* durchgeführt. Aufgrund der Informationsfülle des ATKIS nahm die Auswahl und Umstrukturierung von ATKIS-Informationen, die für diese Arbeit nützlich erschienen, einen bedeutenden Teil der Datenaufbereitung ein.

Tabelle 4.1: In der ATKIS-Raster-Grundebene zusammengefasste flächenhafte Objektarten, die das ATKIS-Abdeckungsgebiet lückenlos und überschneidungsfrei einnehmen.

Thema	Ebene	Layer	Objektart	Objektart-Kennung [OBA]	Attribut	Attribut-Werteart	Wert [ATT]	ATKIS-Raster-Wert	
Siedlung	2	sie02_f	Wohnbauflaeche	41001	Art der Bebauung (BEB)	Bebauung Offen	1000	410011000	
						Bebauung Geschlossen	2000	410012000	
			Industrie Und Gewerbeflaeche	41002	Funktion (FKT)		-	-	41002
							Handel	1440	410021440
							Ausstellung, Messe	1450	410021450
							Gärtnerei	1490	410021490
							Wasserwerk	2520	410022520
							Kraftwerk	2530	410022530
							Umspannstation	2540	410022540
							Heizwerk	2570	410022570
							Kläranlage, Klärwerk	2610	410022610
							Abfallbehandlungsanlage	2620	410022620
			Deponie (oberirdisch)	2630	410022630				
			Halde	41003	-	-	-	41003	
			Bergbaubetrieb	41004	Abbaugut (AKT)		Steinkohle	4022	410044022
							-	-	41005
			Tagebau, Grube, Steinbruch	41005	Abbaugut (AKT)		Erden, Lockergestein	1000	410051000
							Sand	1008	410051008
							Kies, Kiessand	1009	410051009
							Steine, Gestein, Festgestein	2000	410052000
			Flaeche Gemischter Nutzung	41006	Art der Bebauung (BEB)		Braunkohle	4021	410054021
							Bebauung Offen	1000	410061000
			Flaeche Besonderer Funktionaler Praegung	41007	Funktion (FKT)		Bebauung Geschlossen	2000	410062000
							-	-	41007
			Sport Freizeit Und Erholungsflaeche	41008	Funktion (FKT)		Verwaltung	1110	410071110
							Bildung & Forschung	1120	410071120
							Kultur	1130	410071130
							Gesundheit, Kur	1150	410071150
							Soziales	1160	410071160
							Sicherheit & Ordnung	1170	410071170
							-	-	41008
							Sportanlage	4100	410084100
							Golfplatz	4110	410084110
							Freizeitanlage	4200	410084200
			Zoo	4210	410084210				
			Safaripark, Wildpark	4220	410084220				
			Freizeitpark	4230	410084230				
			Freilichttheater	4240	410084240				
			Freilichtmuseum	4250	410084250				
			Modellflugplatz	4290	410084290				
			Wochenend- und Ferienhausfläche	4310	410084310				
			Schwimmbad, Freibad	4320	410084320				
			Campingplatz	4330	410084330				
			Grünanlage	4400	410084400				
			Kleingarten	4440	410084440				
			Friedhof	41009	-	-	-	41009	
			Straßenverkehr	42001	-	-	-	42001	
Verkehr	1	ver01_f	Platz	42009	Funktion (FKT)	Fußgängerzone	5130	420095130	
						Parkplatz	5310	420095310	
						Rastplatz	5320	420095320	
						Raststätte	5330	420095330	
6	ver06_f	Flugverkehrsanlage	53007	-	-	53007			
Vegetation	1	veg01_f	Landwirtschaft	43001	Vegetations-Merkmal (VEG)	-	-	43001	
						Ackerland	1010	430011010	
						Hopfen	1012	430011012	
						Grünland	1020	430011020	
						Streubstwiese	1021	430011021	
						Gartenland	1030	430011030	
						Baumschule	1031	430011031	
Obstplantage	1050	430011050							

Thema	Ebene	Layer	Objektart	Objektart-Kennung [OBA]	Attribut	Attribut-Wertart	Wert [ATT]	ATKIS-Raster-Wert		
Vegetation	2	veg02_f	Wald	43002	Vegetationsmerkmal (VEG)	Laubholz	1100	<b>430021100</b>		
						Nadelholz	1200	<b>430021200</b>		
						Laub- & Nadelholz	1300	<b>430021300</b>		
	3	veg03_f	Unland/ Vegetationslose Fläche	43003	-	-	-	-	<b>43003</b>	
							43004	-	-	<b>43004</b>
							43005	-	-	<b>43005</b>
							43006	-	-	<b>43006</b>
							43007	-	-	<b>43007</b>
							43008	-	-	<b>43008</b>
	Gewässer	1	gew01_f	Stehendes Gewaesser	44001	-	-	-	<b>44001</b>	
								44006	-	-

Fortsetzung von Tabelle 4.1.

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschrieben, sind die räumlichen Informationen zur Flächennutzung im ATKIS (im Objektartenbereich *Tatsächliche Nutzung*) in den einzelnen Objektartengruppen *Vegetation*, *Siedlung Verkehr* und *Gewässer* je nach Objektart auf mehrere hierarchisch übereinander gelagerte Ebenen und zusätzlich nach Geometriertyp in unterschiedliche Layer (Shape-Dateien) verteilt. Darüber hinaus erfolgt die Bezeichnung der Flächennutzung je nach Objektart entweder direkt über die Objektart selber, oder sie wird durch weitere (jeweils unterschiedliche) Attributarten genauer aufgeschlüsselt. Zur Überführung der ausgewählten Objektarten ins Rasterdatenmodell waren daher, je nach Objektart und Geometriertyp, unterschiedliche Umstrukturierungsschritte notwendig. Neben einer Unterscheidung nach Geometriertyp, wurde auch bei der Aufbereitung eine Unterscheidung nach der Art und Hierarchie der Objektart (Ursprungs-Ebene) durchgeführt.

Für diese Arbeit wurden nur flächen- oder linienhafte ATKIS-Informationen verwendet. Zur Aufbereitung ließen sich die ATKIS-Objektarten in drei Gruppen unterteilen. Bezüglich flächenhafter ATKIS-Landnutzungsinformationen listet Tabelle 4.1 die erste Gruppe von Objektarten und deren Ursprung-Layer im ATKIS auf, die für die Analysen im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt wurden. Es handelt sich dabei um Objektarten, die landwirtschaftliche Nutzflächen, Waldflächen, anderweitige naturnahe Vegetationsflächen und Siedlungsflächen betreffen und im jeweiligen Thema (Objektartengruppe) jeweils die unterste (Informations-) Ebene darstellen. Diese Objektarten bilden im ATKIS eine vollständige lückenlose und überschneidungsfreie Abdeckung des gesamten ATKIS-Abdeckungsgebiets.

Im Falle von Objektarten, bei denen die Flächennutzung durch ein Attribut weiter differenziert wird, enthält Tabelle 4.1 zusätzlich die entsprechende Attributart sowie die dazugehörigen Attributwerte. Damit sichergestellt gestellt war, dass die räumliche Überschneidungsfreiheit der einzelnen Objektarten auch nach der Konvertierung ins Raster-Format bestehen blieb, wurden diese Objektarten zunächst aus den einzelnen Shape-Dateien extrahiert und in ArcGIS per *merge*-Funktion zu einem Vektor-Layer verschnitten. Darüber hinaus diente diese Vorgehensweise dazu, die Anzahl der ATKIS-Raster-Layer ohne Informationsverlust möglichst klein zu halten.

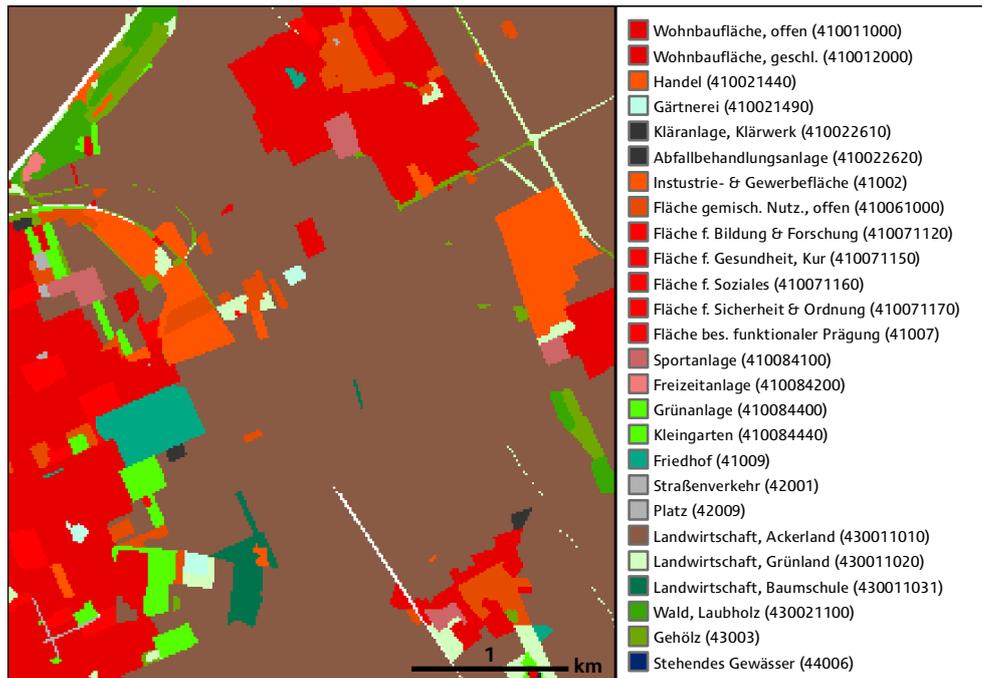


Abbildung 4.8: Ausschnitt der ATKIS-Raster-Grundebene, die aus der Datenreorganisation und Vektor-zu-Raster-Konvertierung der in Tabelle 4.1 aufgeführten Objektarten des Objektartenbereichs ‚Tatsächliche Nutzung‘ resultierte. Der Ausschnitt entspricht dem in Abbildung 3.6 dargestellten Bereich (Quelle der Ursprungsdaten: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2011).

Da Rasterzellen bei der Vektor-zu-Raster-Konvertierung nur Werte aus einer Attributspalte zugewiesen werden, war zudem die Umklassifizierung der AKTIS-Informationen notwendig, um die auf zusätzlichen Attributen beruhende Differenzierung der Landnutzungsinformationen auch ins Rasterdatenmodell übertragen zu können. Zu diesem Zweck wurden die Objektart-Kennung und der entsprechende Attributwert der betreffenden Attributart in einer neuen Attributspalte zu einem neuen eindeutigen Zahlenwert kombiniert (Spalte ATKIS-Raster-Wert in Tabelle 4.1). Dabei wurden die kombinierten Klassenwerte auf folgende Weise erzeugt:  $[OBA] + [ATT] = \text{ATKIS-Raster-Wert}$ . Beispielsweise für die ATKIS-Landnutzungsinformation *Ackerland* lautete der neu erzeugte Wert dementsprechend  $43001 + 1010 = 430011010$ . Lag keine weitere Differenzierung über ein zusätzliches Attribut vor, wurde nur die Objektart-Kennung übertragen. Die Übernahme nur der Attributarten war hingegen nicht möglich, da diese im ATKIS zur weiteren Differenzierung mit mehreren



Objektarten verknüpft sind und somit Überschneidungen entstünden. Abbildung 4.8 zeigt einen Ausschnitt des resultierenden ATKIS-Raster-Layers. Dieser wird im weiteren Text als ATKIS-Raster-Grundebene bezeichnet.

Die zweite Gruppe von flächenbasierten Objektarten, die ins Rasterdatenmodell überführt wurden, ist in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Hierbei handelte es sich mit *Bauwerk Oder Anlage Fuer Sport Freizeit Und Erholung* (51006) und *Vegetationsmerkmal* (54001) um Objektarten aus höheren ATKIS-Ebenen, die einzelne der in Tabelle 4.1 aufgelisteten Objektarten überlagern und für Teilbereiche eine zusätzliche Differenzierung der Landnutzungsinformation über Attribute herbeiführen. Die Objektart *Ortslage* (52001) fasst im Gegensatz dazu mehrere Objektarten zusammen, die in engem funktionalem und räumlichen Zusammenhang stehen (ADV 2008c). Eine weitere Unterscheidung erfolgt somit nicht.

Tabelle 4.2: In der mittleren ATKIS-Raster-Ebene zusammengefasste Objektarten, die eine weitere Differenzierung von Landnutzungen ermöglichen.

Thema	Ebene	Layer	Objektart	Objektart-Kennung [OBA]	Attribut	Attribut-Werteart	Attribut-Wert [ATT]	ATKIS-Raster-Wert
Siedlung	1	sie01_f	Ortslage	52001	-	-	-	<b>52001</b>
	3	sie03_f	Bauwerk Oder Anlage Fuer Sport Freizeit Und Erholung	51006	Bauwerksfunktion (BWF)	Spielfeld	1410	<b>510061410</b>
						Schwimmbecken	1450	<b>510061450</b>
Vegetation	4	veg04_f	Vegetationsmerkmal	54001	Bewuchs (BWS)	Baumbestand, Laubholz	1021	<b>540011021</b>
						Baumbestand, Nadelholz	1022	<b>540011022</b>
						Baumbestand, Laub- und Nadelholz	1023	<b>540011023</b>
						Gehölz	1250	<b>540011250</b>
						Gebüsch	1260	<b>540011260</b>
						Gras	1500	<b>540011500</b>
Administrative Gebietseinheiten	1	geb01_f	Kommunales Gebiet	75003	Administrative Funktion (ADM) (6001=Gemeinde)	SchlüsselGesamt (SCH)	SCH (Regionalschlüssel der Gemeinden)	<b>SCH</b>

Die Objektart *Kommunales Gebiet* (75003) dient hingegen durch das Attribut *SchlüsselGesamt* (SCH) zur Unterscheidung von *Gemeinden* als administrative Einheiten und transportiert damit keine Landnutzungsinformation. Sie ist daher in Tabelle 4.2 separat aufgeführt. Die räumliche Unterscheidung von Gemeinden eröffnet im Rahmen des MDA allerdings verschiedene Möglichkeiten bei der Datenverschneidung. Darüber hinaus ließen sich der Abdeckungsbereich des ATKIS und damit der deutsche Bereich des Untersuchungsgebiets genau eingrenzen. Daher wurde *Kommunales Gebiet* aus praktischen Gründen einmal mit und einmal ohne Unterscheidung nach den Gemeinden ebenfalls zur Überführung ins Rasterdatenmodell

ausgewählt. Auch bei dieser Gruppe wurden gegebenenfalls die Objektart-Kennung und ergänzende Attributwerte, wie zuvor für die ATKIS-Raster-Grundebene beschrieben, zu einem ATKIS-Raster-Wert zusammengefügt. Es wurden jedoch nicht alle der in den Ursprungs-Shape-Dateien enthaltenen Objektarten für die Analysen dieser Arbeit entnommen. Im Unterschied zur ersten Gruppe blieb die ursprüngliche Aufteilung der Objektarten auf verschiedene Layer aus praktischen Gründen in dieser Gruppe bestehen. Abbildung 4.9 stellt die erzeugten Rasterdatensätze der einzelnen ATKIS-Layer mit Ausnahme der Objektart *Kommunales Gebiet* in einer Zusammenschau, nach ihren Ursprungsebenen sortiert, dar.

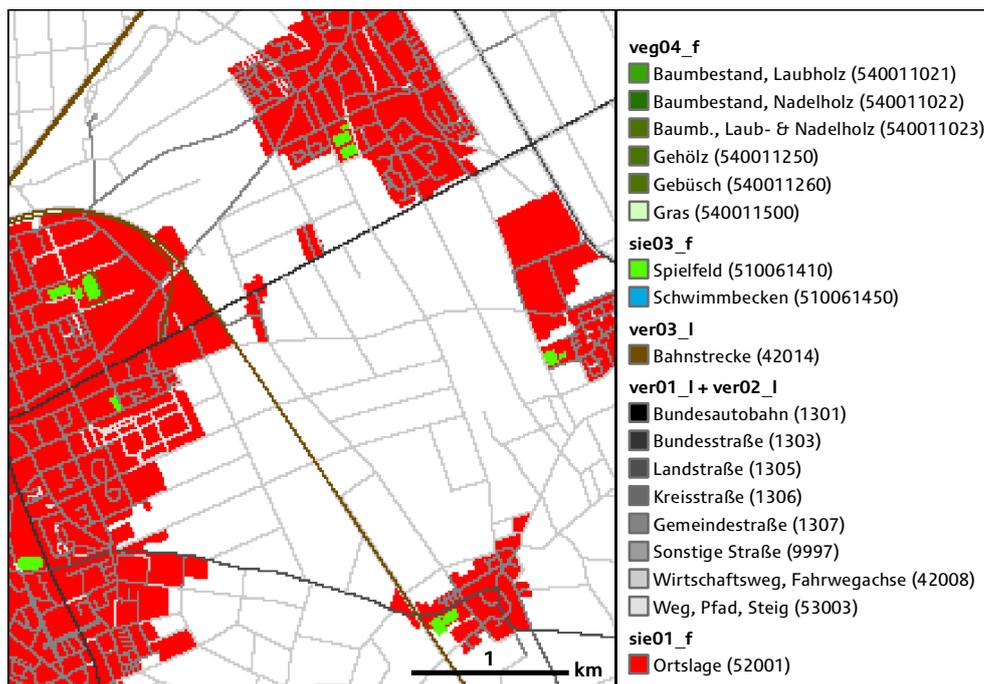


Abbildung 4.9: Ins Rasterdatenmodell konvertierte Objektarten der oberen und mittleren ATKIS-Raster-Ebene inklusive der Objektart Ortslage (Quelle der Ursprungsdaten: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2011).

Darüber hinaus enthält Abbildung 4.9 die bereits konvertierten ATKIS-Layer des Verkehrsnetzes, deren Liniengeometrien als dritte Gruppe in Tabelle 4.3 zusammengefasst sind. Auch das Verkehrsnetz ist im AAA-Datenmodell des ATKIS in mehrere Ebenen und auf verschiedene Layer aufgeteilt. Bei Straßen wird einerseits zwischen den Objektarten *Straßenachse* (42003) für Straßen mit einer Fahrbahn pro Fahrtrichtung und *Fahrbahnachse* (42005) für Straßen mit mehreren Fahrbahnen pro Fahrtrichtung unterschieden. Beide Objektarten sind im Layer *ver01\_I* (Ebene 01) enthalten. Mit der Attributart *Widmung* (WDM) enthalten die beiden Objektarten *Straßenachse* und *Fahrbahnachse* jeweils Informationen zur Verkehrsbedeutung der einzelnen Straßen. Dieses Attribut wurde als das aussagekräftigste angesehen, um die Verkehrswege zu kategorisieren. Es wurde daher zur weiteren Untergliederung dieser beiden Objektarten verwendet und, wie zuvor beschrieben, bei der Konvertierung als Zahlencode ins Rastermodell mitgeführt. Wie in Tabelle 4.3 dargestellt,

wurden die Objektart-Kennungen jedoch in diesem Fall teilweise verworfen, wenn diese zur Unterscheidung keine Relevanz hatten. Neben den Objektarten für befestigte Straßen werden im ATKIS darüber hinaus die Objektarten *Weg, Pfad, Steig* (53003) sowie *Fahrwegachse* (42008) für Wirtschaftswege in Datei *ver02\_1* separat ausgewiesen. Eine weitere Differenzierung war in beiden Fällen anhand der vorhandenen Attributarten nicht möglich, so dass nur die Objektartkennung zur Klassifizierung der Nutzung verwendet wurde. Ebenso konnte bei der Objektart *Bahnstrecke* zur Ausweisung des Schienennetzes keine weitere Differenzierung anhand von dafür geeigneten Attributen vorgenommen werden. Zur Reduktion der Layer-Anzahl wurden alle Objektarten zum Verkehrsnetz vor der Konvertierung ins Rasterdatenmodell zu einem Datensatz zusammengefügt. Wie bereits in Kapitel 4.2.5 beschrieben, wurden die Objektarten der ATKIS-Layer *ver01\_1* und *ver02\_1* bereits zuvor mit einander verschnitten, da sie für das MDA-RG und zur Koregistrierung der Fernerkundungsdaten als Grundlage dienten.

Tabelle 4.3: Zur MDA-Analyse ausgewählte linienhafte Objektarten des Verkehrsnetzes. Die Geometrien des Straßennetzes wurden für die MDA-Analysen in einem Layer zur obersten ATKIS-Raster-Ebene zusammengefügt.

Thema	Ebene	Layer	Objektart	Objektart-Kennung [OBA]	Attribut	Attribut-Wertart	Attributwert [ATT]	ATKIS-Raster-Wert
Verkehr	1	ver01_1	Strassenachse	42003	Widmung (WDM)	Bundesautobahn	1301	1301
						Bundesstraße	1303	1303
						Landesstraße, Staatsstraße	1305	1305
						Kreisstraße	1306	1306
						Gemeindestraße	1307	1307
						Attribut trifft nicht zu	9997	9997
						Fahrbahnachse	42005	Widmung (WDM)
			Bundesstraße	1303	1303			
			Landesstraße, Staatsstraße	1305	1305			
			Kreisstraße	1306	1306			
			Gemeindestraße	1307	1307			
			Attribut trifft nicht zu	9997	9997			
			Fahrwegachse	42008	-	-	-	42008
			2	ver02_1	Weg Pfad Steig	53003	-	-
3	ver03_1	Bahnstrecke	42014	-	-	-	42014	

In Bezug auf die Attributwerte, die bei der Konvertierung in die resultierende Rasterdatei übernommen wurden, waren allerdings mehrere Aspekte zu berücksichtigen. Bei Liniengeometrien unterschiedlicher Kategorie kommen an Kreuzungen oder bei nahe beieinander verlaufenden Linien eventuell mehrere Objekte infrage, von denen eine Zelle in einem Ausgabe-Raster mit 15 m räumlicher Auflösung ihren Wert erhält. Da Liniengeometrien, egal welcher Kategorie, im Rastermodell logischerweise mindestens die Fläche beziehungsweise die Breite eines Pixels einnehmen, war es von besonderer Wichtigkeit, dass bei Konflikten jeweils die Kategorie mit der höchsten Ordnung übernommen wurde. Damit

beispielsweise bei der Kreuzung einer Autobahn mit einem Wirtschaftsweg, die übergeordnete Information *Autobahn* übernommen wurde, erhielten die Objektarten *Straßenachse* (42003) und *Fahrbahnachse* (42005) für die Konvertierung eine höhere Priorität. Den Informationen zu *Bahnstrecken* wurde gegenüber Straßen eine geringere Priorität zugewiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit war die Einteilung der ATKIS-Objektarten zur Vektor-zu-Raster-Konvertierung in drei Gruppen in der Regel auch als inhaltliche und hierarchische Neuauftellung in drei ATKIS-Raster-Informationsebenen zu verstehen. Die in der ATKIS-Raster-Grundebene zusammengefassten Objektarten bilden dabei die unterste Ebene. Mit Ausnahme der Objektarten *Ortslage* und *Kommunales Gebiet* stellen die in Tabelle 4.2 aufgeführten Objektarten die mittlere ATKIS-Raster-Ebene dar, in der ergänzende Landnutzungsinformationen eingeordnet sind. Die Objektarten *Ortslage* und *Kommunales Gebiet* wurden aufgrund ihres inhaltlichen Charakters separat behandelt und daher nicht zu den ATKIS-Raster-Ebenen gezählt (vgl. Kapitel 3.3.1). Wie auch bereits durch die Darstellung in Abbildung 4.9 angedeutet, überlagern die Objektarten des Verkehrsnetzes aus Tabelle 4.3 alle anderen Objektarten und stellen die dritte und oberste ATKIS-Raster-Ebene dar.

#### 4.4.2 Feldblöcke

Die Aufbereitung der Feldblockdaten umfasste die Arbeitsschritte Wechsel des Koordinatensystems, Umklassifizierung der Bodennutzungsklassen in Zahlenwerte und Vektor-zu-Raster-Konvertierung mit Anpassung an das MDA-RG (vgl. Abbildung 4.10).

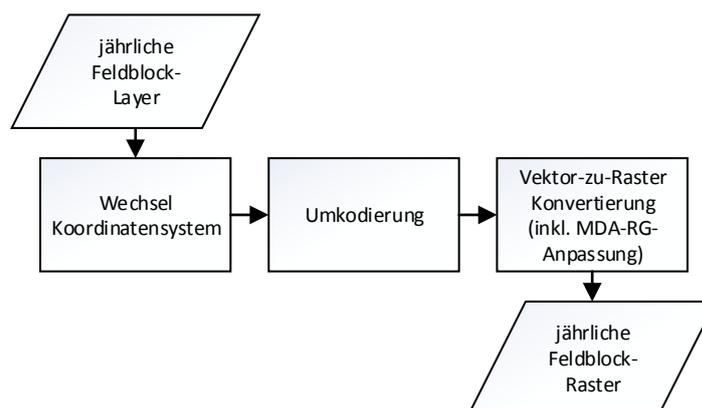


Abbildung 4.10: Aufbereitungsablauf der jährlichen Feldblock-Daten.

Da die jährlichen Feldblock-Daten noch in der Projektion DHDN/GK3 geliefert wurden, erfolgte jeweils der Wechsel des Koordinatensystems zu WGS84/UTM-Zone 32N mithilfe der Transformation BeTA2007 (vgl. Kapitel 4.2.2). Wie auch bei den ATKIS-Daten erfolgte anschließend die Zuweisung von Zahlenwerten für die vorhandenen Bodennutzungen in einer neuen Attributspalte. Die Werte dieser Spalten wurden dann den Rasterzellen bei der Raster-

zu-Vektor-Konvertierung mittels des *feature-to-raster*-Werkzeugs zugewiesen. Im Zuge der Konvertierung erfolgte die Anpassung an das MDA-RG.

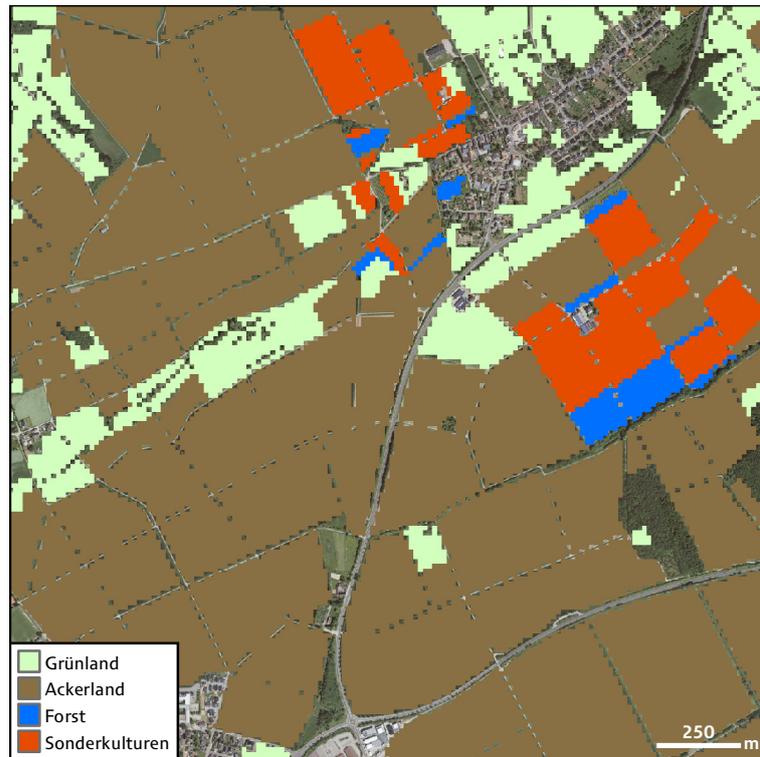


Abbildung 4.11: Darstellung der gerasterten Feldblöcke für 2008. Der Bildausschnitt stimmt mit dem von Abbildung 3.7 überein (Datengrundlage: Landwirtschaftskammer NRW 2008).

Abbildung 4.11 stellt die gerasterten Feldblöcke für 2008 exemplarisch für denselben Ausschnitt wie in Abbildung 3.7 dar. Die Rasterzellen der Bereiche außerhalb der Feldblöcke wurden zur Darstellung transparent geschaltet. Die Rasterisierung führte beim gewählten Verfahren in manchen Fällen zur Verbindung von eigentlich getrennten Feldblock-Bereichen beispielsweise über Straßen hinweg. Dies wurde im Hinblick auf spätere Verschneidung mit anderen Landnutzungsdaten als vernachlässigbar eingeschätzt, zumal die Verwendung anderer Parameter bei der Konvertierung, die solche Verbindungen vermieden hätten, zu einer deutlichen Reduktion der Feldblock-Flächen im Rastermodell geführt hätten.

#### 4.4.3 Corine Land Cover

Die Aufbereitung der CLC-Daten umfasste die räumliche Verschneidung von Layern, die Entfernung nicht benötigter Gebiete, den Wechsel des Koordinatensystems sowie die Vektor-zu-Raster-Konvertierung mit der Anpassung an das MDA-RG (vgl. Abbildung 4.12). Die CLC-Daten waren zur besseren Anpassung an die Eigenschaften des MDA-RG in Bezug auf die Projektion der Daten sowie hinsichtlich der Anpassung der räumlichen Auflösung im

Vektordatenmodell bezogen worden. Im Rahmen dieser Arbeit kam der Datensatz Corine Land Cover 2006 seamless vector data - Version 15 (08/2011) zum Einsatz.

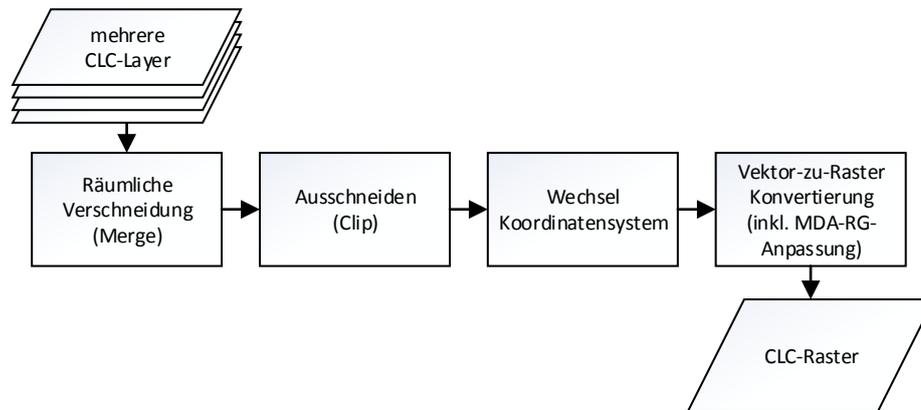


Abbildung 4.12: Aufbereitungsablauf der Corine Land Cover 2006-Daten.

In diesem Datenprodukt werden die einzelnen CLC-Landnutzungsklassen von der EEA als separate Shape-Dateien bereitgestellt. In Analogie zur Aufbereitung der ATKIS-Daten erfolgt daher zunächst die räumliche Verschneidung (per *merge*) zu einem Vektor-Layer. Die CLC-Datensätze der EEA umfassen allerdings jeweils alle abgedeckten Länder, so dass das Ausmaß des CLC-Layers (per *clip*-Funktion) zur Datenreduktion bereits zu diesem Punkt auf das des Untersuchungsgebiets reduziert wurde. Da die CLC-Daten in der Kartenprojektion ETRS89/Lambert Azimuthal Equal Area bereitgestellt werden, erfolgte anschließend zunächst die Transformation zu WGS84 und in einem weiteren Schritt die Projektion in das UTM-System. Bei der Konvertierung ins Rasterdatenmodell per *feature-to-raster*-Funktion wurden den Rasterzellen (ohne vorherige Umklassifizierung) die Zahlencodes der CLC-Landnutzungsklassen aus der Attributspalte *code\_06* zugewiesen.

#### 4.4.4 OpenStreetMap

Wie in Kapitel 3.3.4 erläutert, wurden für diese Arbeit OSM-Straßen- und Schienennetzdaten der Firma Geofabrik GmbH im Shape-Format ausgewählt. Diese Datensätze werden jeweils nach Verkehrswegkategorie und für jedes Land in separaten Datensätzen im Koordinatensystem WGS84 abgegeben. Die Aufbereitung der OSM-Daten umfasste daher die Arbeitsschritte räumliche Verschneidung, Wechsel der Kartenprojektion zu WGS84/UTM, Umkodierung sowie die Vektor-zu-Raster-Konvertierung inklusive Anpassung an das MDA-RG (vgl. Abbildung 4.13). Ein Lagevergleich mit dem ATKIS-Wegenetz im Überlappungsbereich beider Datensätze ergab eine gute Übereinstimmung, so dass bei den OSM-Daten keine Anpassungen notwendig waren. Die räumliche Verschneidung aller Datensätze zu einem OSM-Vektor-Layer erfolgte per *merge*-Befehl.

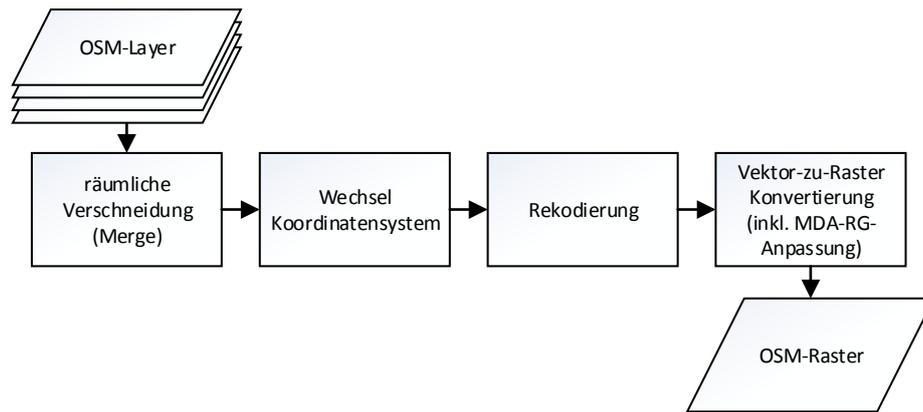


Abbildung 4.13: Aufbereitungsablauf der OpenStreetMap-Daten.

Zur Übernahme der Klassenbezeichnungen ins Rasterdatenmodell (als Zellenwerte) war eine Umkodierung der OSM-Klassen notwendig. Bei der anschließenden Vektor-zu-Raster-Konvertierung wurde, wie auch beim ATKIS-Wegenetz, dem Straßennetz eine höhere Priorität gegenüber dem Schienennetz eingeräumt (vgl. Kapitel 4.4.1).

#### 4.4.5 Naturräumliche Einheiten in NRW

Die Aufbereitung der Naturräumlichen Einheiten in NRW für den MDA umfasste die Arbeitsschritte Wechsel des zugrundeliegenden Koordinatensystems, eine Zusammenfassung von naturräumlichen Haupteinheiten (NHE), die Erweiterung auf die Bereiche des Untersuchungsgebiets außerhalb Deutschlands sowie die Vektor-zu-Raster-Konvertierung (mit Anpassung an das MDA-RG). Da die Daten noch in der Kartenprojektion DHDN/GK2 bereitgestellt wurden, erfolgte zunächst die Überführung ins räumliche Bezugssystem WGS84/UTM-Zone 32N mithilfe der BeTA2007-Methode (vgl. Kapitel 4.2.2). Anhand der naturräumlichen Gliederung wird das Untersuchungsgebiet in 13 NHE unterteilt (vgl. Abbildung 3.3).

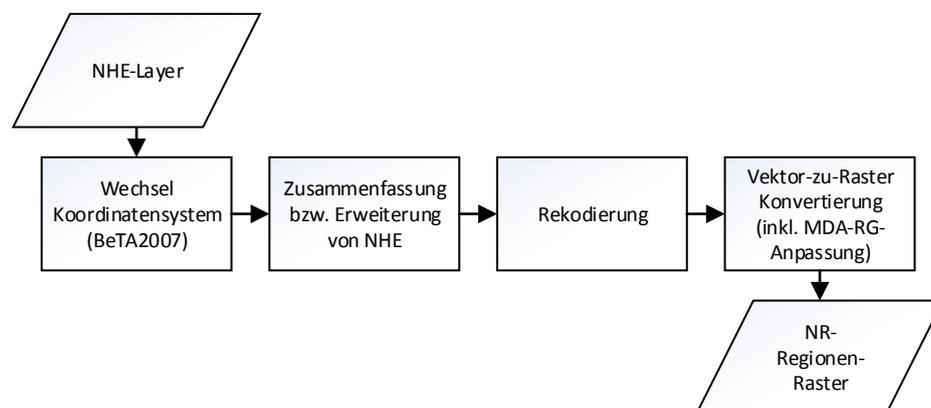


Abbildung 4.14: Aufbereitungsablauf der Erzeugung des NR-Regionen-Layers.

Da sich jedoch die prinzipielle Landnutzungsstruktur nicht zwischen allen benachbarten NHE wesentlich unterscheidet, wurden einige Haupteinheiten aus praktischen Gründen zur Verwendung im Rahmen des MDA zusammengefasst. Ausgehend von der ursprünglichen Gliederung, wurden im Bereich der Niederrheinischen Bucht die NHE *Selkant*, *Schwalm-Nette-Platte* und *Jülicher Börde* zusammengefasst. Darüber hinaus wurden das *Aachener Hügelland* und die *Vennfussfläche* sowie im Bereich der Eifel die Einheiten *Rureifel*, *Kalkeifel*, *Westliche Hocheifel* und *Abreifel* vereinigt. Die NHE decken allerdings nur die deutschen Bereiche des Rureinzugsgebiets ab. Es wurde aber angenommen, dass sich diese Unterteilung außerhalb Deutschlands analog fortführen lässt. Da zudem keine äquivalenten Daten auf belgischer und niederländischer Seite verfügbar waren, wurden die Abgrenzungen der NHE daher durch visuelle Luftbildinterpretation sowie durch die Begutachtung der (Digitalen) Topographischen Karte 1:50.000, welche diese Gebiete noch größtenteils abdeckt, mittels GIS auf die Bereiche außerhalb Deutschlands erweitert. Die daraus resultierten Gebiete werden im Folgenden als NR-Regionen bezeichnet.

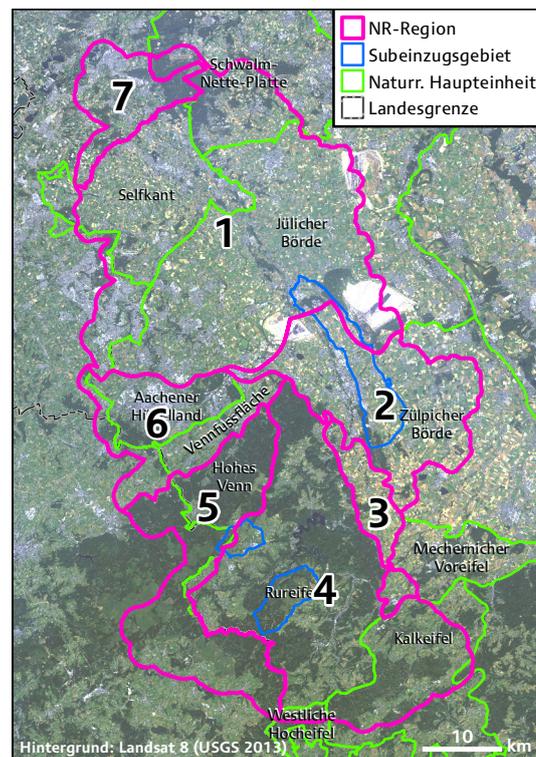


Abbildung 4.15: Gliederung des Untersuchungsgebiets in NR-Regionen auf Basis der Naturräumlichen Haupteinheiten in NRW (Datengrundlage: LANUV NRW 2011).

Abbildung 4.15 stellt die Abgrenzungen der sieben NR-Regionen im Vergleich zu den NHE dar, die zur Unterscheidung im Rasterdatenmodell nummeriert wurden. Die NR-Regionen 1, 2 und 7 bilden dabei eine Gruppe von Regionen der Niederrheinischen Bucht, die in Bezug auf die landwirtschaftliche Nutzung stark von Ackerbau geprägt sind. Im Fall von NR-Region 7 wurde die Trennung dieses Bereichs trotz der hohen naturräumlichen Ähnlichkeit zu NR-Region 1 beibehalten, da die Unterscheidung von deutschen und niederländischen Bereichen



in diesem Fall für die MDA-Analysen praktische Vorteile bot. Die NR-Regionen 4 & 5 fassen die von Wald und Grünland geprägten Hochflächen der Eifel und des Hohen Venns zusammen. Die NR-Regionen 3 & 6 repräsentieren hingegen eher naturräumliche Übergangsbereiche (vgl. Kapitel 3.1.3).



## 5 Weiterentwicklung und Anpassung des Multidaten-Ansatzes

Für diese Arbeit wurde das Konzept des MDA (vgl. Kapitel 2.4.3 und Abbildung 2.11) aufgegriffen, um disaggregierte Landnutzungsdaten der Jahre 2008-2010 für das Rureinzugsgebiet zu erzeugen. Daraus sollte in einem weiteren Schritt eine Fruchtfolgenkarte erzeugt werden, damit den Datenanforderungen komplexer (Agrar-)Ökosystemmodelle besser entsprochen werden kann. Die dazu weiterentwickelte und angepasste MDA-Methodik beinhaltet daher zunächst den Aufbau und die Anwendung einer Wissensbasis zur Erzeugung jährlicher Landnutzungsdaten durch die multitemporale Analyse multispektraler Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Sensoren (vgl. Kapitel 3.2). Darauf aufbauend wurde durch die Kombination der Ergebnisse der Fernerkundungsanalysen und ausgewählter Informationen bereits bestehender Landnutzungsdatenprodukte, insbesondere der ATKIS und der Feldblock-Daten (vgl. Kapitel 3.3 & 3.4), eine weitere Steigerung des Informationsgehalts in einer GIS-Umgebung angestrebt. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Arbeiten von BARETH (2001), ROHIERSE & BARETH (2004) oder BARETH (2008), die das Konzept des MDA im Vektordatenmodell verfolgen, wurde hier das Rasterdatenmodell gewählt (vgl. Kapitel 4.2.1) und die MDA-Methodik diesbezüglich angepasst. Soweit notwendig, wurden die verwendeten Daten dementsprechend im Rahmen der Datenaufbereitung (vgl. Kapitel 4) gerastert und entsprechend der in Kapitel 4.2 formulierten Vorgaben vereinheitlicht. Abbildung 5.1 stellt das grundlegende Ablaufschema der entwickelten MDA-Landnutzungsanalyse mit Fernerkundungsteil und GIS-Teil und deren einzelner Komponenten dar.

Der FE-Teil umfasste die typischen Komponenten, die zur Analyse von Fernerkundungsdaten anhand überwachter Klassifikationsverfahren erforderlich sind. Begonnen wird mit der Darstellung der vorbereitenden Arbeitsschritte Aufnahmeplanung der Fernerkundungsdaten (Kapitel 5.1) sowie Erzeugung und Management der entsprechenden Referenzdatengrundlage (Kapitel 5.2). Kapitel 5.3 erläutert die Gründe, die zur Auswahl der verwendeten überwachten Klassifikationsverfahren führten. Kapitel 5.4 behandelt die generelle Organisation und den Ablauf der Fernerkundungsanalysen („Übergeordnete Klassifikationsmethodik“) im Hinblick auf eine Steigerung der Klassifikationsgüte auf Ackerflächen sowie einen Vergleich der ausgewählten Klassifikationsverfahren. Die genaue Verfahrensweise bei der überwachten Klassifikation der einzelnen Fernerkundungsszenen schildert Kapitel 5.5 („Untergeordnete Klassifikationsmethodik“).

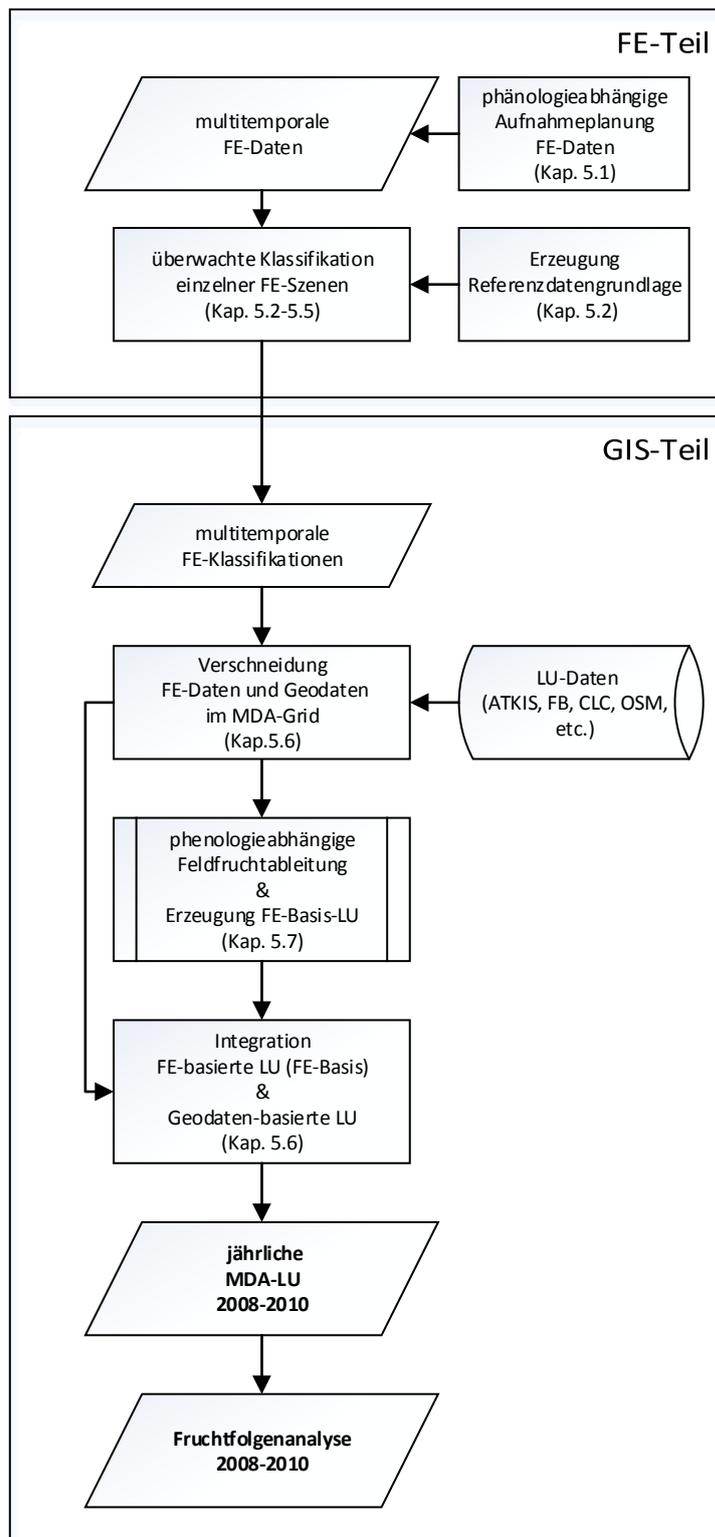


Abbildung 5.1: Grundlegendes Ablaufschema des angepassten Multidaten-Ansatzes.

Der GIS-Teil umfasst die Vorgehensweisen zur räumlichen Datenverschneidung und Integrationen der Landnutzungsinformationen aus den einzelnen Quellen zur Erzeugung der finalen MDA-Landnutzungen (MDA-LU) sowie der MDA-Fruchtfolgenkarte. Kapitel 5.6 schildert die angewendeten regelbasierten Techniken zur räumlichen rasterbasierten Datenverschneidung und Ableitung von Landnutzungsinformationen und Fruchtfolgen sowie

die Datenstruktur des dazu ausgewählten Grid-Formats. Darauf aufbauend erläutert Kapitel 5.7 die Wissensbasis und die Vorgehensweise zur Entnahme und Ableitung von Feldfruchtinformationen aus der multitemporalen Fernerkundungsdatengrundlage sowie der Erzeugung der fernerkundungsdatenbasierten Basislandnutzung (FE-Basis) als Zwischenergebnis. In diese FE-Basis erfolgte anschließend die Integration der Landnutzungsinformationen aus den weiteren Geodaten. Die Darstellung der dazu erstellten Wissensbasis, als Grundlage zur Erzeugung von Produktionsregeln, erfolgt im Ergebniskapitel nach der Darstellung der Fernerkundungsanalyseergebnisse.

## 5.1 MDA-Teil FE: Modell zur phänologieabhängigen Planung der Aufnahme von Fernerkundungsdaten

Die Analyse multispektraler Fernerkundungsdaten diente in besonderem Maße der Disaggregation der Nutzungsinformation zu landwirtschaftlichen Flächen auf jährlicher Basis. Die Aufnahmeplanung der Fernerkundungsdaten zielte daher primär auf die Erfassung der im Untersuchungsgebiet dominant vorkommenden Feldfrüchte ab. Darüber hinaus sollten aber auch alle anderen Landnutzungen und Vegetationstypen außerhalb von landwirtschaftlichen Flächen (beispielsweise Laub- und Nadelwald) bestmöglich unterschieden werden. Beruhend auf der in Kapitel 3.1.3 dargestellten Landnutzungsstruktur sowie den Erkenntnissen aus Geländebegehungen im Untersuchungsgebiet, sind auf Ackerflächen vor allem Wintergetreide wie Winterweizen (Winterroggen) und Wintergerste, Winterraps, Zuckerrüben, Kartoffeln, Mais sowie je nach Region auch Sommergerste (in der Regel Braugerste) anzutreffen.

Die einzelnen Feldfrüchte kommen aufgrund ihrer spezifischen Anbauzeiträume (Sommer- und Winterfrüchte) und phänologischen Eigenschaften jeweils zu unterschiedlichen Zeiträumen innerhalb der Hauptvegetationsperiode auf den Ackerflächen vor (vgl. Abbildung 5.2). Zusätzlich sind die einzelnen Feldfrüchte jeweils erst ab einem bestimmten Wachstumsstadium beziehungsweise Bedeckungsgrad mit multispektralen Fernerkundungsdaten von moderater räumlicher Auflösung zu detektieren (ODENWELLER & JOHNSON 1984). Darüber hinaus ähnelt sich die spektrale Erscheinung von Feldfrüchten durch die in dieser Hinsicht eher groben spektralen – und teilweise auch geringen radiometrischen – Auflösung der verfügbaren multispektralen Daten oftmals sehr stark. Die Identifizierung und Unterscheidung von Feldfrüchten ist mit monotemporalen multispektralen Daten daher oftmals problematisch, da feine aber signifikante wellenlängenabhängige Reflektionsunterschiede nicht erfasst werden können (MURTHY et al. 2003, JENSEN 2007).

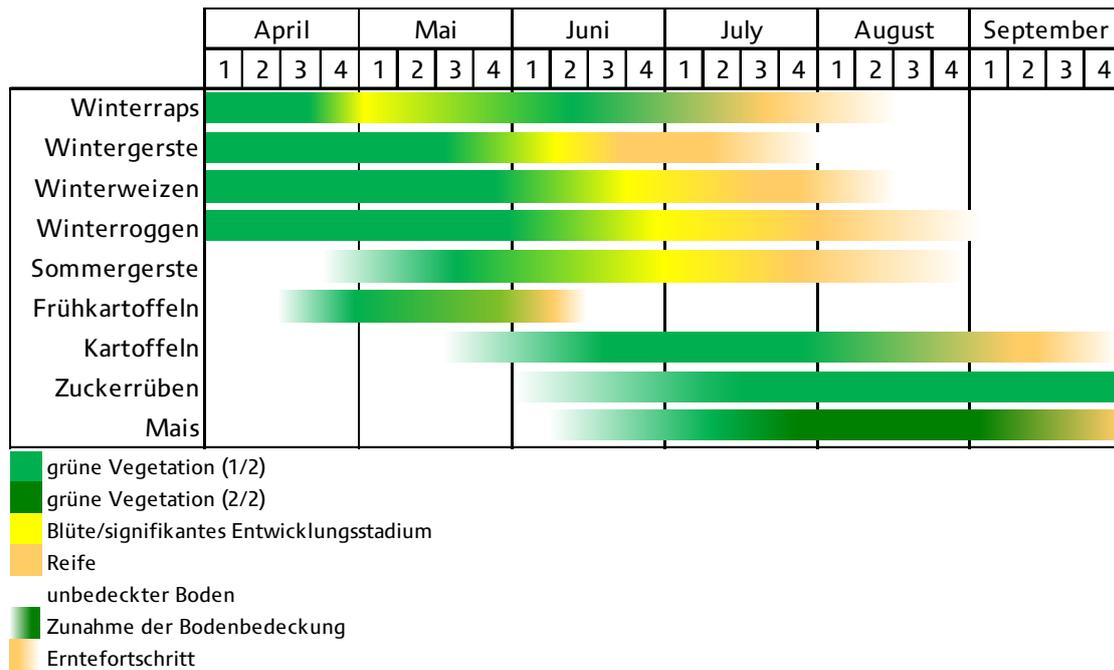


Abbildung 5.2: Modell zur Phänologie ausgewählter Feldfrüchte im Untersuchungsgebiet. Die Farbgebung kennzeichnet signifikante Entwicklungsstadien zur potentiell besseren Detektier- und Unterscheidbarkeit durch multispektrale Fernerkundungsdaten im dargestellten Zeitraum. Eigene Abbildung basierend auf Erkenntnissen aus Geländekartierungen, Literaturrecherche (MEIER 2001, MUNZERT 2006, LWK NRW 2008, KBTL 2009, DIEPENBROCK et al. 2012), Zeitungsrecherche zu regionalen Ernteterminen (diverse Lokalpresse) und persönlicher Kommunikation mit Landwirten.

Die Unterscheidungsmöglichkeit mit multispektralen Fernerkundungsdaten von moderater räumlicher Auflösung kann erhöht werden, wenn multitemporale Aufnahmen innerhalb bestimmter zeitlicher Phasen während der Vegetationsperiode erfolgen, in denen die unterschiedliche phänologische Entwicklung der einzelnen Feldfruchtarten temporär zu spektral stärkeren Unterschieden führt (JENSEN & CHERY 1980, HIXSON et al. 1982, PAXLENNEY & WOODCOCK 1997, KEY et al. 2001, DE WIT & CLEVERS 2004, VAN NIEL & McVICAR 2004, TURKER & ARIKAN 2005). Abbildung 5.2 fasst die zur Planung der Fernerkundungsdatenakquise zu berücksichtigenden phänologischen Eigenschaften der ausgewählten Feldfrüchte modellhaft für den Betrachtungszeitraum April bis September unter Kennzeichnung signifikanter Entwicklungsstadien zusammen. Die Abbildung stellt eine Zusammenstellung dar, die auf Literatur zum Pflanzenbau (MUNZERT 2006, KBTL 2009, DIEPENBROCK et al. 2012), dem Entwicklungsverlauf von Feldfrüchten nach MEIER (2001), der Auswertung von Zeitungsartikeln der Lokalpresse zu regionalen Ernteterminen sowie auf Feldbegehungen, persönlicher Kommunikation mit Landwirten und Erkenntnissen der Landnutzungsanalysen ab dem Jahr 2007 beruht. Lage und Farbgebung der Balken markieren die Zeitspanne des Vorhandenseins beziehungsweise der potentiellen „Detektierbarkeit“ der Feldfrüchte auf den Ackerflächen (vor der Ernte beziehungsweise der Reife) für die Fernerkundungssensoren. Zur besseren Differenzierung wurden die einzelnen Monate in Abbildung 5.2 in vier Abschnitte unterteilt. Die zeitliche Lage der Farbbalken ist allerdings vor allem auch relativ zueinander zu sehen, da beispielsweise infolge jährlicher Witterungs-

unterschiede und dem damit verbundenen Management Verschiebungen in der allgemeinen Pflanzenentwicklung von mehreren Wochen möglich sind. Dies ist durch die zunehmende beziehungsweise abnehmende Opazität der Balken angedeutet. Das linke Ende der Farbbalken markiert den – im Schnitt – ungefähren Beginn der „Detektierbarkeit“ der Pflanzen (durch die zunehmende Schließung der Pflanzendecke) für den Fernerkundungssensor, gekennzeichnet durch die Zunahme der Farbintensität des Grün, sofern sich dies erst innerhalb des Betrachtungszeitraums vollzieht. Das rechte Ende repräsentiert den ungefähren Erntezeitraum (angedeutet durch die Abnahme der Farbintensität des Beige) beziehungsweise das Ende des Betrachtungszeitraums. Grüne Farbtöne symbolisieren das Vorhandensein von grüner Vegetation. Hellgrüne und gelbe Bereiche markieren für Winterfrüchte und Sommergerste jeweils die ungefähre zeitliche Stellung der Entwicklungsstadien (in der Regel Makrostadium 6 (Blüte) nach der BBCH-Skala (MEIER 2001)), in denen diese Feldfrüchte aufgrund ihrer temporär signifikanten spektralen Erscheinung potentiell besser von anderen Feldfrüchten zu unterscheiden sind. So führt beispielsweise die Blüte des Winterrapses im Zeitraum Ende April bis Mitte Mai (in Abbildung 5.2 als gelber Bereich im Farbbalken angedeutet) zu einer signifikanten spektralen Erscheinung. Während anderer Wachstumsstadien unterscheiden sich die Reflektionseigenschaften beispielsweise von Winterraps und Wintergetreide für optische Fernerkundungssensoren deutlich weniger. Farbübergänge von Grün oder Gelb nach Orange markieren bei den entsprechenden Feldfrüchten den Übergang der Entwicklungsstadien von der Fruchtentwicklung bis zur Reife beziehungsweise Ernte. Auch zur Unterscheidung anderer Feldfrüchte bieten sich bestimmte Zeiträume während der Vegetationsperiode an. Bei Kartoffeln, Zuckerrüben und Mais ist die Ausbildung charakteristischer spektraler Erscheinungen zu bestimmten Wachstumsstadien allerdings weniger ausgeprägt. Vielmehr bauen sich im Laufe der Pflanzenentwicklung allmählich spektrale Unterschiede auf, die durch unterschiedliche Grüntöne gekennzeichnet sind.

Die geplante Aufnahme einer multitemporalen Fernerkundungsdatengrundlage erschien daher hilfreich. Zur bestmöglichen und effizienten Unterscheidung der Hauptfeldfruchtarten im Untersuchungsgebiet wurden daher, basierend auf deren phänologischen Eigenschaften, jährlich mehrere Aufnahme Fenster (AF) während der Hauptphase der Vegetationsperiode definiert, innerhalb derer jeweils eine komplette räumliche Abdeckung des Untersuchungsgebiets durch Fernerkundungsdaten (im Idealfall durch eine Szene) erfolgen sollte. In Bezug auf die Wahl der zeitlichen Position der Aufnahme Fenster mussten, neben den bereits erwähnten jährlichen witterungsbedingten Schwankungen in der Vegetationsentwicklung, allerdings weitere Aspekte berücksichtigt werden. So waren auch Variationen in der phänologischen Entwicklung der einzelnen Feldfrüchte aufgrund unterschiedlicher landschaftlicher und klimatischer Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet zu bedenken. Demgemäß beginnt die Vegetationsperiode in Abhängigkeit von der Höhenlage in der Niederrheinischen Bucht im Allgemeinen etwas früher als in den höher gelegenen Regionen wie Nordeifel und Mechnicher Voreifel (vgl. Kapitel 3.1.2). Eine Feldfruchtart kann daher

durch unterschiedliche Anbauregionen und die damit verbundenen variierenden Wachstumsphasen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Jahr unterschiedliche spektrale Signaturen aufweisen. Darüber hinaus führt das unterschiedliche Flächenmanagement der Landwirte in Bezug auf Saat- und Erntetermine wiederum dazu, dass auch lokal Feldfrüchte in leicht unterschiedlichen Entwicklungsstadien auftreten. Daher wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Aufnahmefenster zeitlich nicht zu scharf abgegrenzt sind. In Bezug auf die Datenakquise wurde berücksichtigt, dass durch Bewölkung oder das Ausbleiben einer Aufnahme für ein Aufnahmefenster keine oder nur eine Teilabdeckung des Untersuchungsgebiets erfolgen kann. Daher wurden die Aufnahmefenster zusätzlich so gewählt, dass das Fehlen von Fernerkundungsdaten für ein Aufnahmefenster zu einem gewissen Grad durch Daten eines anderen zu kompensieren ist. Einige Erfassungsziele sind daher für mehrere Aufnahmefenster definiert.

Tabelle 5.1: Jährlich geplante Aufnahmefenster für multispektrale Fernerkundungsdaten und der damit verfolgte Zweck (die Datumsangaben sind als Richtwerte zu verstehen).

<b>Aufnahmefenster (AF)</b>	<b>Zeitraum</b>	<b>Angestrebte Erfassung</b>
1	Ende April bis Ende Mai (25.04. - 25.05.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung von Wintergetreide</li> <li>- Unterscheidung von Winterraps</li> <li>- Abgrenzung von Flächen mit Sommergetreide (v.a. Braugerste)</li> <li>- Erfassung von unbedecktem Boden (potentiell Sommerfrüchte)</li> <li>- Erfassung von Frühkartoffeln</li> <li>- Unterscheidung von Laubwald und Nadelwald</li> </ul>
2	Anfang bis Mitte Juni (01.06. - 15.06.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterscheidung von Winterweizen/ Winterroggen und Wintergerste</li> <li>- Erfassung von Sommergetreide</li> <li>- Erfassung von Kartoffeln</li> </ul>
3	2. Julihälfte bis Anfang August (15.07. - 07.08.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung des Erntefortschritts von Wintergerste (v.a. in der Börde)</li> <li>- eventuell Unterscheidung von Kartoffeln, Zuckerrüben und Mais</li> </ul>
4	Mitte bis Ende August (15.08. - 31.08.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erntefortschritt von Winterraps, Winterweizen und Winterroggen</li> <li>- Erntefortschritt in Eifel (v.a. Braugerste)</li> <li>- Unterscheidung von Mais, Zuckerrüben und Kartoffeln</li> </ul>
5	Anfang bis Mitte September (01.09. - 15.09.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterscheidung Mais, Zuckerrüben und Kartoffeln</li> </ul>

Tabelle 5.1 listet die für diese Arbeit ausgewählten „idealen“ Aufnahmefenster sowie die jeweils angestrebten Erfassungsziele auf. Die Gesichtspunkte, die für die Auswahl der



einzelnen Zeitfenster ausschlaggebend waren, werden im Folgenden genauer erläutert. Die Anzahl der Aufnahme Fenster richtet sich dabei einerseits nach der Anzahl der Phasen, in denen die einzelnen Feldfrüchte potentiell am besten zu unterscheiden sind. Andererseits sollte die Anzahl der Aufnahme Fenster so gering wie möglich sein, um das zu analysierende Datenaufkommen möglichst gering zu halten und redundante Informationen zu vermeiden. Insgesamt wurden daher fünf Aufnahme Fenster pro Vegetationsperiode veranschlagt, aus denen für die jährliche multitemporale Landnutzungsanalyse dementsprechend fünf Zeitschnitte (ZS) resultieren sollten.

Das erste AF mit Beginn Ende April wurde gewählt, da sich Fernerkundungsdaten aus diesem Zeitraum besonders für die Erfassung und Unterscheidung von Wintergetreide und Winterraps eignen. Wie der Vergleich der entsprechenden Farbbalken in Abbildung 5.2 zeigt, befinden sich diese Feldfrüchte dann in Wachstumsstadien, in denen sie aufgrund ihrer unterschiedlichen Phänologie in Fernerkundungsdaten in der Regel gut unterscheidbar sind. So blüht Winterraps in diesem Zeitraum für gewöhnlich und ist somit deutlich von Wintergetreide zu unterscheiden. Wintergetreide wiederum hat zwar eine vollständige Bodenbedeckung erreicht, Getreidearten sind allerdings wahrscheinlich noch nicht zu trennen. Sommergetreide ist dann tendenziell erst schwächer entwickelt und zeigt durch einen prognostizierten geringeren Bodenbedeckungsgrad eine andere spektrale Erscheinung, die eine Unterscheidung begünstigt. Falls eine Aufnahme innerhalb des ersten AF allerdings erst sehr spät erfolgt, ist Sommergetreide gegebenenfalls bereits relativ weit entwickelt, wodurch eine Unterscheidung von Wintergetreide erschwert würde. Die Identifizierung von Winterraps wurde demgegenüber jedoch als wichtiger eingeschätzt und das AF aus diesem Grund bis Ende Mai ausgeweitet, da die Blüte des Winterrapses in der Eifel etwas verzögert erfolgen kann. Sommerfrüchte wie Zuckerrüben oder Mais sind hingegen noch nicht zu detektieren, da sie in diesem Zeitraum gerade erst oder noch nicht gesät sind. Auf entsprechenden Parzellen ist dann lediglich unbedeckter Boden zu sehen. Allerdings können bereits Frühkartoffeln auf den Feldern auftreten. Diese lassen sich in der Börde allerdings aufgrund ihrer spektralen Erscheinung in diesem Zeitraum erfahrungsgemäß deutlich von Winterfrüchten abgrenzen. Durch die gemeinsame Erfassung von bereits bewachsenen und unbewachsenen Flächen in diesem AF, kann eine grundlegende Trennung von Flächen mit Winter- und Sommerfrüchten erfolgen, die für die spätere Landnutzungsanalyse eine sehr wichtige Information darstellt.

Das zweite AF zielte besonders auf die Unterscheidung von Winterweizen, Winterroggen und Wintergerste ab. Wintergerste ist dann besonders in der Börde gegenüber Winterweizen und Winterroggen für gewöhnlich zwei bis drei Wochen weiter in ihrer Entwicklung. So befindet sich Wintergerste im Schnitt bereits in der Blüte (Makrostadium 6 nach BBCH-Skala (MEIER 2001)), während sich Winterweizen eher noch im Makrostadium 4 (Ährenscheiden) oder im Makrostadium 5 (Ährenschieben) befindet. Damit ist verbunden, dass sich Wintergerste in diesem Zeitraum im optischen Spektralbereich etwas stärker von Winterweizen und

Winterroggen unterscheiden kann (vgl. Abbildung 5.2). Zu späteren Zeitpunkten gleicht sich die Erscheinung von Wintergetreide insgesamt wieder stärker an. Kartoffeln sollten zu diesem Zeitraum deutlich detektierbar sein. Darüber hinaus kann auf ersten Flächen mit Zuckerrüben in den Fernerkundungsdaten bereits Vegetation erkennbar werden. Für eine umfassende Erfassung von Zuckerrüben eignen sich Aufnahmen aus diesem AF jedoch gewöhnlich nicht.

Im Zeitraum des dritten AF sollte die Ernte von Wintergerste in den Börden bereits beendet oder weit fortgeschritten sein, so dass hier gegebenenfalls noch einmal eine Abgrenzung zu Winterweizen und Winterroggen erfolgen konnte, die im Durchschnitt etwa zwei bis drei Wochen länger auf den Feldern stehen. Zudem sollten nun auch Felder mit Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais in Fernerkundungsdaten deutlich erkennbar sein. Die genaue Unterscheidung von Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais, wurde aber besonders ab dem vierten AF angestrebt, da die spektralen Unterschiede erst dann in Fernerkundungsdaten deutlicher ausgeprägt sind. Bei Aufnahmen ab Mitte August sind für gewöhnlich die meisten Winterweizenfelder abgeerntet, so dass nun Hackfrüchte und Mais die Ackerflächen dominieren. Da die phänologische Entwicklung von Braugerste allerdings witterungsbedingt stärkeren Schwankungen unterliegt, kann diese in den Anbaugebieten der Eifel nach eigener Erfahrung, in diesem Zeitraum noch auf dem Feld stehen.

Falls die bis dahin vorhandenen Fernerkundungsdaten keine zufriedenstellende Trennung einiger Feldfrüchte (z.B. Sommergerste/Hackfrüchte, Mais) ergab, sollte dies mit Aufnahmen des fünften AF erzielt werden, da zu diesem Zeitraum von den Hauptfeldfrüchten im Allgemeinen nur noch Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais auf den Feldern vorkommen.

## 5.2 MDA-Teil FE: Erzeugung der Referenzdatengrundlage

Zur fernerkundungsgestützten Erfassung der Landnutzung muss neben multitemporalen Fernerkundungsdaten auch eine geeignete (Gelände)-Referenzdatenbasis zur Verfügung stehen, welche die Grundlage für Trainings- oder Validierungsgebiete während der Fernerkundungsanalyse darstellt. Da der Qualität der Trainingsdaten ein immenser Einfluss auf die Klassifikations- und Analyseergebnisse im Rahmen dieser Arbeit beigemessen wurde, nahm die Erzeugung der Referenzflächenbasis einen ähnlich hohen Stellenwert wie die Akquise der Fernerkundungsdaten ein. Daher werden in diesem Kapitel einige Aspekte bezüglich der Erhebung der Referenzdaten etwas ausführlicher thematisiert, die für Fernerkundungsanalysen mitunter als selbstverständlich angesehen werden. Grundsätzlich müssen für jede Landnutzung repräsentative Referenzflächen in ausreichender Anzahl aufgenommen werden, damit die spektrale Variabilität innerhalb einer Landnutzungs-kategorie

sowie auch in Bezug auf die Gesamtheit aller Landnutzungsklassen hinreichend erfasst werden kann (LILLESAND et al. 2008). Darüber hinaus sind weitere Referenzflächen in mindestens gleichem Umfang notwendig, damit eine unabhängige Validierung der Klassifikationsergebnisse anhand von Testgebieten erfolgen kann (vgl. Kapitel 2.3.5.3). Je nach Landnutzungskategorie bestehen allerdings unterschiedliche Anforderungen beispielsweise bezüglich der Gestalt, der Aktualität oder des Detailgrads der Referenzdaten, die auf die Auswahl der Erfassungsmethode Einfluss haben. Zur Erfassung der hauptsächlich angebauten Feldfrüchte auf Ackerflächen, sind jährlich umfangreiche Geländekartierungen unumgänglich, da sich die Landnutzung (in diesem Fall genauer die Landbedeckung) auf Ackerflächen sowohl jährlich als auch innerhalb eines Jahres ändert. Landnutzungskategorien wie Siedlung oder Wald unterliegen hingegen weit weniger starken zeitlichen Veränderungen und können daher eventuell in weitaus größeren Zeitintervallen betrachtet werden (JENSEN 2007). Zudem sind Geländekartierungen in einer hohen Detailliertheit nicht für alle Landnutzungsklassen erforderlich. So kann von einer intensiven Geländekartierung unterschiedlicher Siedlungsnutzungen abgesehen werden, wenn wie im Fall dieser Arbeit, die verwendete Fernerkundungsdatengrundlage aufgrund der hierzu zu groben räumlichen Auflösung im Allgemeinen nur eingeschränkt geeignet ist (vgl. Kapitel 2.3.3 und Kapitel 4.2.3). Für entsprechende Landnutzungsklassen können somit auch andere Methoden zur Referenzdatenerhebung, wie die visuelle Interpretation aktueller hochauflösender DOPs oder die Verwendung von (digitalem) Kartenmaterial, in Betracht gezogen werden (LILLESAND et al. 2008, CAMPBELL & WYNNE 2011). Im Hinblick auf eine möglichst kosten- und zeiteffiziente Datenerhebung wurden daher für die betrachteten Landnutzungsklassen unterschiedliche Erhebungsmethoden verwendet.

### **5.2.1 Referenzdatenaufnahme durch Geländekartierungen**

Aufgrund der großen Bedeutung der Referenzdaten für die Klassifikation der im Untersuchungsgebiet dominanten Feldfrüchte, treten die für die Jahre 2008-2010 durchgeführten Geländekartierungen gegenüber anderen Erfassungsmethoden deutlich in den Vordergrund. Da im Rahmen dieser Arbeit aber auch die fernerkundungsbasierte Ableitung von raumzeitlichen Landnutzungsmustern in Form von Fruchtfolgen verfolgt wurde, sind jährlich aufeinanderfolgende Geländekartierungen auch für die Ableitung von Referenzinformationen zu praktizierten Fruchtfolgen von Bedeutung. Für die Erzeugung von geeigneten Referenzflächen war für die Planung der Geländekartierungen, neben der Auswahl geeigneter Kartierungsgebiete und Kartierungstermine, zunächst jedoch die Bestimmung der notwendigen Gestalt der Kartierungsflächen eine Grundvoraussetzung. Zunächst werden daher die Anforderungen an geeignete Kartierungsflächen erläutert und anschließend die Planung und Umsetzung der jährlichen Geländekartierungen dargestellt.

### 5.2.1.1 Gestalt von Kartierungsflächen

Im Hinblick auf die räumliche Auflösung der Fernerkundungsdatengrundlage mussten die Kartierungsflächen über ein ausreichendes Ausmaß verfügen. Dadurch wurde sichergestellt, dass diese Flächen in den entsprechenden Fernerkundungsdaten genügend reine Pixel einer Landnutzung und nicht nur Mischpixel enthalten. Sogenannte Mischpixel entstehen, wenn der Bereich der Erdoberfläche, der von einem Pixel erfasst wird, mehr als eine Landnutzung enthält. Das entsprechende Pixelspektrum setzt sich dabei anteilmäßig aus den spektralen Signaturen der erfassten Landnutzungen zusammen (LILLESAND et al. 2008). Mischpixel treten dementsprechend beispielsweise im Grenzbereich von Parzellen mit unterschiedlichen Feldfrüchten oder an Feldgrenzen durch die Vermischungen mit Signaturen des Wegenetzes oder angrenzenden Gebüschs auf. Zudem ist der sogenannte atmosphärische *adjacency effect* während der Fernerkundungsdatenaufnahme zu berücksichtigen, der dazu führt, dass sich benachbarte Pixel in der Regel zu einem gewissen Maße beeinflussen, oder genauer gesagt, Strahlung von benachbarten Flächen zum Zeitpunkt der Aufnahme in den Bereich des momentanen Gesichtsfeldes (IFOV) des Fernerkundungssensors gelangt (KAUFMAN 1984, KEREKES 2009). Selbst wenn also im Abdeckungsbereich eines Pixels nur eine einzige homogene Nutzung auftritt, kann dessen spektrale Signatur beeinflusst werden, wenn in der Umgebung andere Landnutzungen auftreten (TOWNSHEND et al. 2000). Die Kartierungsflächen wurden daher in der Regel groß genug gewählt, um bei der späteren Entnahme der Trainings- oder Validierungsgebiete anhand der Fernerkundungsdaten gegebenenfalls einen Abstand von 2-3 Pixeln vom Rand einer Nutzung zum Inneren frei lassen zu können, damit spektral reine Pixel (*endmember*) entnommen werden konnten. Im Hinblick auf die räumliche Auflösung der verwendeten Fernerkundungsdaten von (teilweise kleiner als) 15 m, mussten Kartierungsflächen demzufolge als Richtwert eine Mindestkantenlänge von etwa 50 m aufweisen.

### 5.2.1.2 Kartierungsgebiete

Da sich das Untersuchungsgebiet über mehrere Naturräume (Börden/Mittelgebirge) mit unterschiedlichen andauernden Vegetationsperioden und verschiedenen Landnutzungsstrukturen erstreckt (vgl. Kapitel 3.1.3), waren Kartierungen in mehreren Bereichen des Untersuchungsgebiets notwendig, um alle wesentlichen Landnutzungsklassen und deren spektrale Variationen zu erfassen. Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebiets war es jedoch nicht möglich, das gesamte Untersuchungsgebiet gleichmäßig zu erfassen. Bei der Auswahl der Kartierungsgebiete musste daher den Faktoren Kosten- und Zeitintensivität Rechnung getragen werden. Zur Kartierung wurden daher mehrere charakteristische Kerngebiete ausgewählt, welche die unterschiedlichen Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet bestmöglich widerspiegeln und über eine ausreichende Anzahl an

Ackerparzellen mit der zuvor festgelegten Mindestgröße verfügten. Zudem war eine relativ gute Erreichbarkeit der Kartierungsgebiete sowie der zu kartierenden Flächen von Bedeutung, um möglichst viele Flächen zu erfassen. Der Schwerpunkt der Kartierungen wurde dementsprechend auf Regionen im Bereich der drei Subeinzugsgebiete gelegt, da diese bereits die vorherrschenden Landnutzungstypen im Untersuchungsgebiet repräsentierten (TR32 2006), und letztendlich genau aus diesem Grund als Intensivmessgebiete des TR32 ausgewählt wurden.

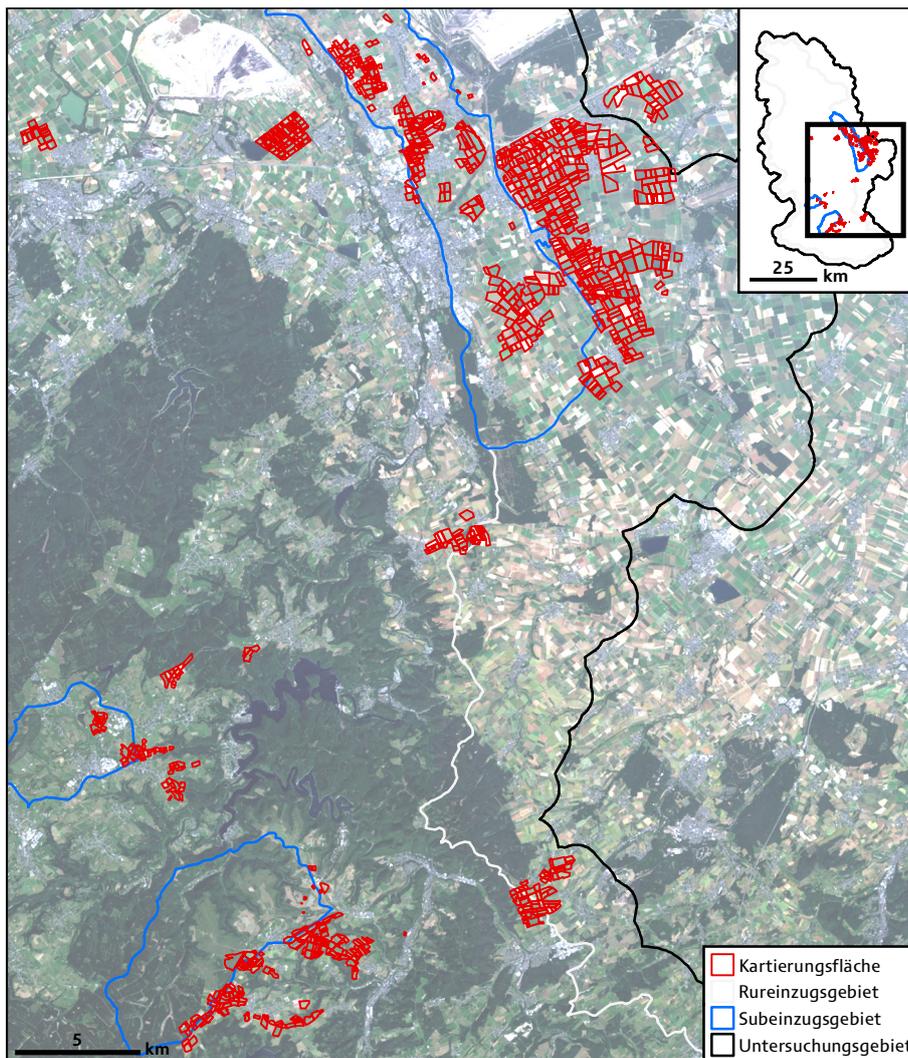


Abbildung 5.3: Kartierungsflächen zur Erzeugung der Referenzflächenbasis für Ackerland für die Jahre 2008-2010. Anmerkung: Nicht jede der dargestellten Flächen wurde in allen drei Jahren wiederholt kartiert (Abbildungshintergrund: Landsat-8, USGS 2013).

Abbildung 5.3 zeigt eine Übersicht der jährlich besuchten Kartierungsgebiete und die daraus resultierenden Referenzflächen. Viele der einzelnen Flächen wurden von Jahr zu Jahr wiederholt aufgesucht, damit neben den jährlichen Referenzinformationen zu Feldfrüchten, zusätzlich Referenzinformationen bezüglich der praktizierten Fruchtfolgen abzuleiten waren. Bei den Kartierungskampagnen im Bereich des Ellebachs lag der Schwerpunkt in der Erzielung einer möglichst repräsentativen Abdeckung der verschiedenen ackerbaulichen

Nutzungen der Börde. Im Bereich der Subeinzugsgebiete Kall und Erkenruhr wurde besonders die charakteristische ackerbauliche Nutzung der Nordeifel erfasst. Eine Ausnahme bildeten die landwirtschaftlichen Flächen westlich von Merken sowie einige der Parzellen um das TR32-Testfeld bei Selhausen. Diese wurden nicht ausschließlich im Rahmen dieser Arbeit kartiert, sondern für 2008 zum Teil von Projektpartnern des TR32 zur Verfügung gestellt. Neben den Kartierungsgebieten in der Umgebung der drei Subeinzugsgebiete, wurden zudem jährlich Flächen bei Nideggen und bei Wallenthal in der Mechernicher Voreifel kartiert. Die landschaftlichen Gegebenheiten in diesen Bereichen sind durch den Übergang von der Börde zum Mittelgebirge charakterisiert und stellen somit eine Art Übergangszone dar, in der typische Feldfrüchte aus beiden Hauptregionen vorkommen können. Darüber hinaus dienten Geländebegehungen nordwestlich von Dürwiß, in der östlichen Rureifel bei Tondorf sowie in den Hochmoorgebieten des Naturparks Hohes Venn-Eifel im Bereich des „Grande Fagne“ in Belgien zur Einschätzung der allgemeinen Landnutzungsstruktur in weiteren Bereichen außerhalb der Hauptkartierungsgebiete. Jährliche Geländekartierungen in diesen Gebieten konnten allerdings aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

### 5.2.1.3 Geländekartierungskampagnen

Wie im Falle der Fernerkundungsaufnahmen, waren auch bei der Feldkartierung, bedingt durch die unterschiedliche Phänologie (vgl. Abbildung 5.2) in der Regel mehrere Kartierungsfenster notwendig, um Referenzdaten für die auftretenden Feldfrüchte zu erhalten. Dementsprechend wurden pro Jahr mehrere Kartierungskampagnen während der Vegetationsperiode veranschlagt. Die jährlichen Geländekartierungen orientierten sich zeitlich an den in Kapitel 5.1 beschriebenen Aufnahme Fenstern für die Fernerkundungsaufnahme (vgl. Tabelle 5.1). Diese begannen demnach wie auch die Fernerkundungsdatenakquise ab etwa Ende April/Anfang Mai und waren auch in der Folge so terminiert, dass ein möglichst geringer Zeitraum zwischen Fernerkundungsaufnahme und Feldkartierung bestand. Die taggenaue Kartierung mit einer Satellitenbilddaufnahme war in der Regel nicht planbar, da sich das exakte Aufnahmedatum bei den verwendeten Sensoren nicht genau prognostizieren ließ beziehungsweise nicht früh genug bekannt war. Feldkartierungen am Tag einer Aufnahme waren allerdings für die Fragestellung der Arbeit auch nicht unbedingt notwendig, da keine Pflanzenparameter oder Spektralmessungen einbezogen wurden. Die Kartierungsziele der einzelnen Kampagnen entsprachen im Wesentlichen den Erläuterungen zur Auswahl der Aufnahme Fenster der Fernerkundungsdaten. Demnach diente die erste jährliche Kampagne einerseits der Kartierung von Flächen mit Wintergetreide und Winterraps. Andererseits wurden im gleichen Umfang auch Parzellen mit (noch) unbedecktem Boden kartiert. Wie in Kapitel 5.1 angesprochen, diente dies der eindeutigen Abgrenzung von bereits bewachsenen Parzellen mit Winterfrüchten und unbedeckten Flächen mit potenziellen Sommerfrüchten wie

vor allem Kartoffeln, Mais oder Zuckerrüben, aber auch Sommergetreide. Eine erneute Kartierung dieser Parzellen war somit erforderlich. Die zweite Kartierungskampagne orientierte sich ebenfalls am zweiten Aufnahmezeitfenster, um zwischen den Wintergetreidearten Winterweizen, Winterroggen und Wintergerste zu unterscheiden und um die Nutzungen beziehungsweise Sommerfrucht der zuvor als unbedeckter Boden kartierten Parzellen zu erfassen. Daher sollten vor allem Schläge mit Kartoffeln, Zuckerrüben und Mais und – soweit vorhanden – mit Sommergetreide erfasst werden. Frühkartoffeln, die unter Folie gepflanzt werden, können sich dann auch bereits im Erntestadium befinden. In den südlichen Kartierungsgebieten im Bereich der Eifel zielte die Kartierungskampagne besonders auf die Aufnahme von Flächen mit Wintergetreide, Winterraps und Braugerste (Sommergetreide) sowie Mais ab. Je nach dem allgemeinen Entwicklungszustand der Vegetation sind einige Feldfrüchte allerdings möglicherweise erst zu einem späteren Zeitpunkt gut zu unterscheiden (z.B. Identifizierung der Getreideart). Weitere Kartierungstermine im Juli und im August, während der entsprechenden Aufnahmezeitfenster, dienten einerseits der ungefähren Erfassung des Erntefortschritts zunächst von Wintergerste, dann von Winterweizen und Winterraps. Andererseits konnten weitere Kartierungen von Parzellen mit Zuckerrüben und Mais notwendig sein. Zudem können ab Ende August weitere Schläge auftreten, auf denen Kartoffeln bereits geerntet sind. In den Gebieten in der Eifel mit Braugersteanbau dienten Kartierungen im August der Aufnahme geernteter Felder. Je nachdem wie die allgemeine Vegetationsentwicklung in einem Jahr verlief, variierte die Anzahl der notwendigen Kartierungskampagnen. Pro Kartierungskampagne waren etwa 5-6 Geländetage notwendig, um alle Standorte zu kartieren.

### 5.2.2 Geländedatenaufnahme und Referenzflächenmanagement

Für die Datenaufnahme im Gelände wurde eine Kombination aus Verortung mittels PDA mit GPS samt mobilem GIS (ArcPad) und Einzeichnung der erfassten Landnutzung auf zuvor erstelltem analogem (ausgedrucktem) Kartenmaterial gewählt. Um eine korrekte Verortung der aufgenommenen Informationen zu gewährleisten, wurden vor der jeweiligen Kampagne entsprechende Karten in analoger und in digitaler Form angefertigt. Diese enthielten in der Regel die gleichen Informationen wie zum Beispiel topographische Elemente aus dem AKTIS (Wegenetz) oder Daten der Digitalen Topographischen Karte 1:50.000 (DTK50), die gegebenenfalls mit den aktuellsten Fernerkundungsdaten des jeweiligen Jahres unterlegt waren. Auf diese Weise war es möglich, sich exakt im Gelände zu verorten und das räumliche Ausmaß einer Nutzung zu erkennen, so dass es im Allgemeinen nur selten notwendig war, die Fläche einer Nutzung im Gelände per GPS genau einzumessen. Darüber hinaus enthielt das Kartenmaterial mit der Zeit zunehmend die Geometrien bereits aufgenommener Flächen, so dass diese gezielt aufgesucht werden konnten. Die vorhandene Ausrüstung ermöglichte

auch die direkte Digitalisierung der Referenzflächen im Gelände. Es wurde jedoch davon abgesehen, da sich dies in der Praxis als viel zu zeitaufwendig herausstellte. Die Digitalisierung und Zusammenführung der auf dem Kartenmaterial markierten Nutzungen erfolgte daher nachträglich im Desktop-GIS (ArcGIS) im Vektorformat. Unter Zuhilfenahme aktueller DOP, zum Zeitpunkt der Kartierung bereits verfügbarer aktueller Multispektraldaten sowie topographischer Daten aus dem ATKIS konnten die kartierten Flächen mit hoher Lagegenauigkeit digitalisiert beziehungsweise von Kartierung zu Kartierung aktualisiert werden.

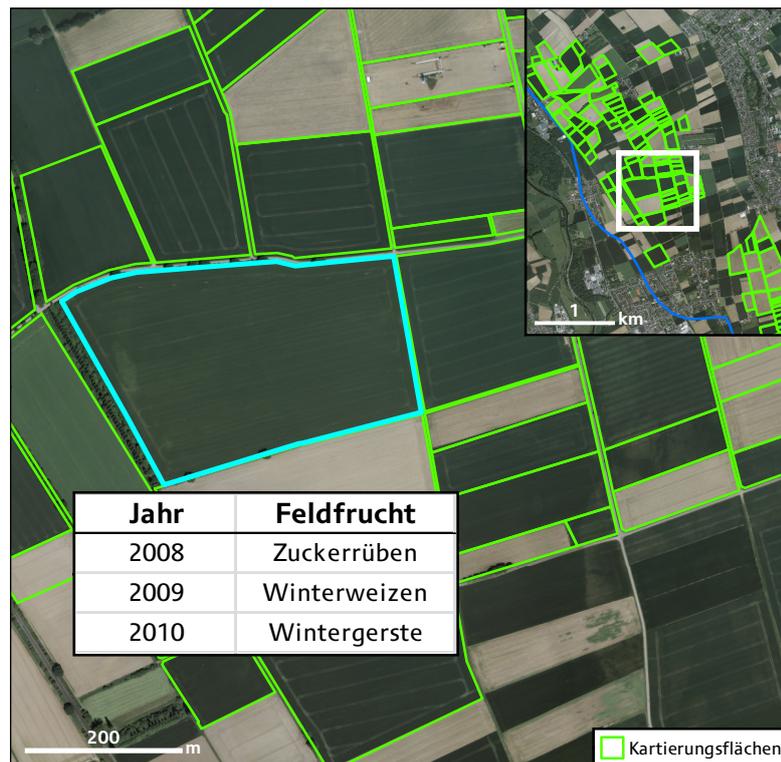


Abbildung 5.4: Aus Geländekartierung und Nachbearbeitung erzeugte Referenzflächen für Ackernutzungen (Abbildungshintergrund: Digitale Orthophotos, © Geobasis NRW 2013).

Abbildung 5.4 zeigt einen Ausschnitt der resultierten Geometrien der aufbereiteten Geländereferenzdatenbasis in der die Ergebnisse der einzelnen Kartierungen zusammengefügt und mit Attributdaten hinterlegt sind. Jedes Einzelpolygon enthält dementsprechend die Landnutzungsinformationen für die kartierten Jahre als separaten Attributwert. Für Flächen, die in allen Jahren kartiert wurden, sind dementsprechend Referenzfruchtfolgen ableitbar. Bei der Aufnahme der Kartierungsflächen für landwirtschaftliche Nutzungen wurde in der Regel das gesamte Flächenausmaß einer Nutzung kartiert. Für die direkte und vollständige Übernahme einzelner Polygone dieses Datensatzes als Trainings- oder Validierungsgebiete waren diese Flächen daher nicht vorgesehen. Vielmehr dienten die kartierten Referenzflächen während der Klassifizierungsphase als Grundlage, um daraus homogene und möglichst repräsentative Trainings- und Validierungsflächen (ROI) für die jeweilige Nutzung zu entnehmen.



### 5.2.3 Referenzflächenbestimmung durch visuelle Luftbildinterpretation

Für die deutschen Bereiche des Untersuchungsgebiets standen für die Jahre 2007/2008 und 2010 aktuelle hochauflösende Orthophotos (DOP) zur Verfügung (vgl. Kapitel 3.2.6). Daher konnten durch die visuelle Interpretation im GIS Referenzgebiete für Landnutzungsklassen, die bei der Geländekartierung nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt oder erfasst wurden, ergänzt werden. Die Luftbildinterpretation erfolgte dabei, wie bereits angesprochen, nur für Landnutzungen, die sich durch eine zeitlich verhältnismäßig langsame Veränderung auszeichneten. Zudem wurden nur Bereiche ausgewählt, die zweifelsfrei als eine bestimmte Nutzung identifiziert werden konnten. Diese Bereiche umfassten versiegelte Siedlungs- oder Gewerbeflächen, Straßen oder Gewässer. Daneben wurden die DOP auch als Quelle für die Auswahl von Laub- und Nadelwald- oder Gehölz-Referenzflächen genutzt. Sofern Vieh auf Grünflächen zu erkennen war, eignete sich die räumliche Auflösung der DOP auch zur Kartierung von Grünlandflächen. Mit den jährlichen Feldblockdaten stand hierfür jedoch eine noch besser geeignete Informationsquelle zur Verfügung. Durch die großräumige Abdeckung der DOP musste die Erzeugung von Referenzdaten, die aus visueller Interpretation resultierten, zudem nicht auf die zuvor beschriebenen Kartierungsgebiete begrenzt werden. Für Landnutzungsklassen wie Wald, Gehölz, Grünland, Siedlung (versiegelte Flächen) und Gewässer war daher eine großflächigere und gleichmäßigere Verteilung der Referenzflächen über das Untersuchungsgebiet möglich. Die Auswahl von Flächen durch visuelle Luftbildinterpretation erfolgte aus praktischen Gründen in der Regel parallel zur Auswahl der Trainings- beziehungsweise Validierungsgebiete im Rahmen des Klassifizierungsprozesses.

## 5.3 MDA-Teil FE: Auswahl des Klassifikationsverfahrens

Zur überwachten Klassifikation von Fernerkundungsdaten zur Landnutzungsanalyse stehen heutzutage, mit pixelbasierten oder objektbasierten Ansätzen einerseits und parametrischen oder nicht-parametrischen Algorithmen andererseits, zahlreiche prinzipiell geeignete Verfahren zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.3.3). Zur Bestimmung eines geeigneten Klassifikationsverfahrens zur Landnutzungsanalyse im Rahmen dieser Arbeit waren verschiedene Faktoren von Belang. Neben der erzielbaren Klassifikationsgüte, waren die räumliche Auflösung der Fernerkundungsdatengrundlage sowie die Anzahl der potentiell zu analysierenden Szenen unterschiedlicher Sensoren die wesentlichen Aspekte. Aufgrund der jährlich geplanten Akquise von multitemporalen Fernerkundungsdaten (vgl. Kapitel 5.1), wurde dem Arbeitsaufwand pro Klassifikation (für Training, Parametrisierung und Berechnung) im Verhältnis zum erzielbaren Ergebnis dementsprechend eine große Bedeutung beigemessen.

Objektbasierte Methoden (vgl. Kapitel 2.3.4) kommen in den letzten Jahren auch vermehrt bei der Landnutzungsanalyse mit Fernerkundungsdaten von moderater räumlicher Auflösung erfolgreich zur Anwendung. Ein eindeutiger Vorteil gegenüber der Verwendung pixelbasierter Verfahren konnte – nach eigener Einschätzung – allerdings nicht festgestellt werden. Auch ergab die Vergleichsanalyse von GAO (2008) von objektbasierten (eCognition, Multiresolution-Segmentation) und pixelbasierten Verfahren (MLC) bei der Anwendung auf ASTER-Daten mit 15 m räumlicher Auflösung keine wesentlichen Genauigkeitsverbesserungen in der Klassenunterscheidung durch die Verwendung objektbasierter Verfahren. Auf Basis eigener Klassifikationsversuche im Vorfeld dieser Arbeit wurde der Trainingsprozess zur Bestimmung von geeigneten Parametern zur Segmentierung bei objektbasierten Verfahren gegenüber pixelbasierten Methoden als deutlich aufwendiger und diffiziler bewertet. Ebenso wurde die Übertragbarkeit von entwickelten *rule sets* auf unterschiedliche Datensätze (vgl. Kapitel 2.3.3) als unsicher eingeschätzt. Mögliche Vorteile, die die Verwendung eines objektbasierten Verfahrens in Bezug auf die Klassifikationsgüte bieten könnte, wurden daher im Hinblick auf die Anzahl der zu analysierenden Datensätze relativiert, zumal eine Steigerung der Klassifikationsgüte durch die Integration verschiedener Daten primär durch den MDA angestrebt wurde. Diese Einschätzungen ließen sich durch neuere Untersuchungen bestätigen. So ergab auch ein Vergleich von DINGLE ROBERTSON & KING (2011) keine wesentlichen Genauigkeitsunterschiede zwischen pixelbasierten (MLC) und objektbasierten Methoden (eCognition, *multiresolution segmentation*) bei Landnutzungs-klassifikationen anhand von Landsat-TM-Daten. FRANKLIN et al. (2011) kommen zum Fazit, dass bei einem objektbasierten Ansatz bei Anwendung auf Daten unterschiedlicher Sensoren die Komplexität der Analyse im Hinblick auf die Bestimmung geeigneter Segmentierungsparameter zunimmt. Auch DURO et al. (2012) argumentieren, dass der zeitliche Aufwand zur Auswahl von Trainingsdaten für objektbasierte und pixelbasierte Verfahren zwar in etwa gleich ist. Da die Auswahl geeigneter Parameter bei objektbasierten Verfahren allerdings nicht trivial ist, muss noch zusätzliche Zeit für die Findung geeigneter Einstellungen veranschlagt werden. Dies trifft besonders für Fälle zu, bei denen große Gebiete mit vielen sich überschneidenden Fernerkundungsszenen vorliegen. Zudem kommen DURO et al. (2012) ebenfalls zum Ergebnis, dass bei Daten mit mittlerer räumlicher Auflösung (10-30 m) keine wesentlichen Unterschiede der Klassifizierungsergebnisse (nach Postklassifizierung) zwischen objektbasierten und pixelbasierten Methoden auftreten. Objektbasierte Verfahren wurden daher für den Rahmen dieser Arbeit nicht in Betracht gezogen. Aus den genannten Gründen (bezüglich der Komplexität, Zeitaufwand und ungewisser Übertragbarkeit) wurde auch von einer Integration von Zusatzdaten im Klassifikationsprozess selber abgesehen und die Auswahl auf ein pixelbasiertes überwachtes Klassifikationsverfahren, das allein die spektrale Information der Fernerkundungsdaten verwendet, beschränkt.

Um auch die große Vielfalt an pixelbasierten Verfahren weiter einzuschränken, wurden zwei Verfahren aufgrund ihrer Popularität ausgewählt, die erfolgreich in vielen Studien zur

Landnutzungsanalyse eingesetzt wurden und die beide in der verwendeten Fernerkundungssoftware ENVI implementiert sind. Die Wahl fiel dabei auf das parametrische MLC-Verfahren sowie das nicht-parametrische SVM-Verfahren. Diese Klassifikationsmethoden stehen sich sowohl in technischer Hinsicht als auch in der aktuellen allgemeinen Wahrnehmung gewissermaßen gegenüber. MLC gilt als das klassische parametrische Verfahren, dessen Funktionsweise allgemein gut verstanden wird und das sich in über 40 Jahren der Anwendung zur Standardmethode entwickelt hat. Auch heutzutage ist es noch eines der am häufigsten genutzten Klassifikationsverfahren (JENSEN et al. 2009). SVM benötigt als nicht-parametrisches Verfahren hingegen keine Annahmen über die Verteilung der zugrundeliegenden Daten und soll daher auch bei eingeschränkter Verfügbarkeit von Trainingsdaten immer noch gute bis sehr gute und allgemein bessere Klassifikationsergebnisse als mit MLC ermöglichen (FOODY & MATHUR 2006, DIXON & CANDADE 2008, MATHER & KOCH 2011). Dies führte in den letzten Jahren zu einem deutlichen Anstieg an Publikationen, die SVM im Fernerkundungskontext einsetzen (MOUNTRAKIS et al. 2011). Ein Vergleich beider Verfahren anhand der Fernerkundungsdaten für 2008 sollte daher ermitteln, welchen Einfluss die Wahl des Algorithmus tatsächlich auf die Klassifikationsergebnisse hat und welches Verfahren sich insgesamt für diese Arbeit am besten eignet. Auf Basis dieses Ergebnisses wurde dann über die weitere Verwendung der Klassifikationsverfahren entschieden. Da die grundlegenden Funktionsweisen beider Verfahren für den Klassifizierungsprozess und besonders für die Auswahl der Trainingsgebiete von großer Bedeutung sind, werden die beiden Verfahren zunächst genauer erläutert.

### 5.3.1 Maximum Likelihood Klassifikation (MLC)

Als parametrische Methode berechnet das MLC-Verfahren die Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit von Pixeln (Pixelvektoren,  $\chi$ ) anhand statistischer Kenngrößen (Parametern) und weist die unterschiedlichen Pixel der Klasse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zu (RICHARDS 2012). Gegeben ist dabei, dass Spektralklassen einer Fernerkundungsszene durch

$$\omega_i, i = 1, \dots, M \quad (5.1)$$

repräsentiert werden, wobei  $M$  der Gesamtanzahl an Klassen  $\omega_i$  entspricht. Die Klassenzuweisung erfolgt beim MLC-Verfahren nach der Formel:

$$x \in \omega_i \text{ wenn } g_i(\chi) > g_j(\chi) \text{ für alle } j \neq i \quad (5.2)$$

MLC verwendet zur Beschreibung der Klassenverteilung im Merkmalsraum die Mittelwertvektoren und die Kovarianzmatrizen der einzelnen Trainingsklassen (MATHER & KOCH 2011). Diese sind in der Regel unbekannt und müssen für jede Klasse berechnet werden. Damit die Verteilungsmuster der Klassen hierdurch vollständig beschrieben werden können, wird angenommen, dass die Gesamtheit der Trainingsdaten (Pixelvektoren) einer Klasse jeweils normalverteilt ist (JENSEN 2005). Die Klassenzuweisung erfolgt dann über die berechnete statistische Wahrscheinlichkeit anhand von sogenannten Wahrscheinlichkeitsdichte- oder Trennfunktionen (LILLESAND et al. 2008, RICHARDS 2012). In ENVI wird die Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit für einbezogene Pixel mit dem MLC-Verfahren anhand folgender Trennfunktion  $g_i(x)$  bestimmt (EXELISVIS 2012a, RICHARDS 2012):

$$g_i(x) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m)^t \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \quad (5.3)$$

Wobei:

- $i$  = Klasse
- $x$  = n-dimensionale Daten (wobei n der Anzahl der Bänder entspricht)
- $p(\omega_i)$  = Wahrscheinlichkeit, dass Klasse  $\omega_i$  im Fernerkundungsdatensatz vorkommt (a priori-Wahrscheinlichkeit); wird für alle Klasse gleich angenommen
- $|\Sigma_i|$  = Determinante der Kovarianzmatrix der Daten in Klasse  $\omega_i$
- $\Sigma_i^{-1}$  = dessen inverse Matrix
- $m_i$  = Mittelwertvektor

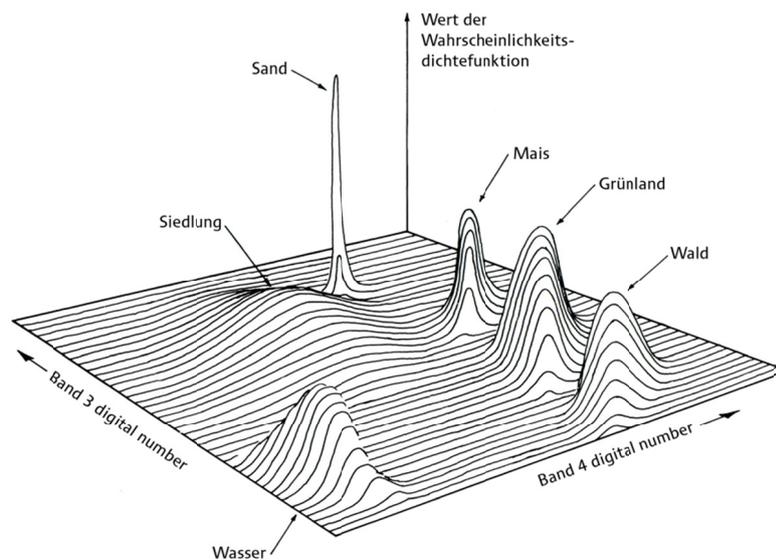


Abbildung 5.5: Beispiele normalverteilter Wahrscheinlichkeitsfunktionen von sechs hypothetischen Landnutzungsklassen anhand von zwei Bändern eines multispektralen Datensatzes (LILLESAND et al. 2008), verändert.

Wie Abbildung 5.5 zeigt, lassen sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen graphisch als glockenförmige Oberflächen darstellen. Die Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit eines Pixels nimmt von den Gipfeln nach außen ab (LILLESAND et al. 2008). In der Literatur wird oftmals betont, dass für MLC Trainingsdaten in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen müssen, damit die einzelnen Klassen ausreichend repräsentiert sind. Ist dies der Fall, sind mit der MLC sehr gute und genaue Klassifikationsergebnisse zu erzielen (ALBERTZ & WIGGENHAGEN 2008, CAMPBELL & WYNNE 2011). Unter den parametrischen Verfahren gilt die MLC allerdings als eine sehr rechenaufwendige Methode, da viele Parameter berücksichtigt werden. Vor allem bei der Verwendung von hyperspektralen Daten mit vielen Bändern steigt der Berechnungsaufwand enorm an (LILLESAND et al. 2008, JENSEN et al. 2009).

### 5.3.2 Support Vector Machines (SVM)

In ENVI ist das SVM-Klassifikationsverfahren auf Basis der Programmbibliothek LIBSVM implementiert (CHANG & LIN 2011). SVMs berechnen anhand der Trainingsdaten zur Klassifikation eine sogenannte *optimal separating hyperplane* (optimal separierende Hyperebene, OSH), welche die einzelnen Klassen im Merkmalsraum linear optimal voneinander trennt (HUANG et al. 2002). Die genaue mathematische Auflösung der Funktionsweise von SVMs ist für die Durchführung der Klassifikationen im Rahmen dieser Arbeit nicht notwendig. Daher wird an dieser Stelle nur auf die zugrundeliegenden Konzepte sowie auf die wesentlichen Eigenschaften eingegangen, welche die Klassifikationsergebnisse von SVM beeinflussen. Eine detaillierte Einführung in die Funktionsweise von SVM bieten beispielsweise VAPNIK (1995), HUANG et al. (2002), FOODY & MATHUR (2004b) und oder RICHARDS (2012).

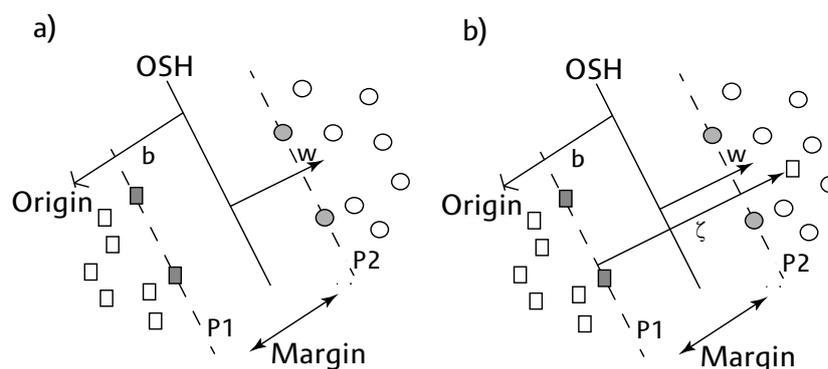


Abbildung 5.6: Grundlegende Aspekte der Klassifikation mit SVM für (a) linear trennbare und (b) zum Teil untrennbare Fälle. Die in grau dargestellten Stützvektoren (support vectors) befinden sich auf den Hyperebenen P1 und P2, die parallel zur optimal separierenden Hyperebene (optimal separating hyperplane, OSH) liegen.  $\xi$  sind Schlupfvariablen (slack variables) zur Klassifikation von Pixeln auf der „falschen“ Seite der OSH,  $b$  ist die Distanz zum Ursprung,  $w$  ist der Normalenvektor der OSH (FOODY & MATHUR 2006), verändert.

Im Gegensatz zu beispielsweise MLC, bei der Mittelwertvektoren der einzelnen Trainingsklassen zur Unterscheidung dienen, wird die OSH anhand von Trainingspixeln bestimmt, die sich im Merkmalsraum an der Grenze der jeweiligen Klassenverteilung zur benachbarten Klasse befinden. Die für die Berechnung der OSH ausgewählten Pixelvektoren werden als sogenannte *support vectors* (Stützvektoren) bezeichnet (vgl. Abbildung 5.6a) (FOODY & MATHUR 2006). Die *support vectors* für die einzelnen Klassen befinden sich dabei ebenfalls auf Hyperebenen (P1 & P2 in Abbildung 5.6), welche die einzelnen Klassen begrenzen und parallel zur OSH liegen. Wie in Abbildung 5.6a dargestellt, liegt die OSH somit an einer Position genau zwischen zwei Klassen im Merkmalsraum, wobei sich alle Pixel einer Klasse auf derselben Seite der OSH befinden. Die Distanz (*Margin* in Abbildung 5.6) der OSH zum nächsten Trainingspixel der einzelnen Klassen ist dabei soweit wie möglich gewählt. Auf diese Weise wird die Spanne zwischen zwei Klassen maximiert, damit die Fähigkeit zur Generalisierung des Klassifikationsalgorithmus möglichst hoch ist und Pixel, die nicht exakt einer Klasse entsprechen, noch zuverlässig klassifiziert werden (FOODY & MATHUR 2004b). Alle anderen Pixel eines Trainingsdatensatzes, die sich zum Zentrum der jeweiligen Klassenverteilung orientieren, sind somit für das Trainings des Algorithmus nicht notwendig und werden daher auch nicht in den Klassifizierungsprozess einbezogen (FOODY & MATHUR 2006). Da sich reale Daten in der Regel zu einem gewissen Grad überlappen, ist eine lineare Trennbarkeit von Klassen selten gegeben. Damit wären die Rahmenbedingungen für eine SVM-Klassifikation nicht erfüllt (Abbildung 5.6b). Um die Einpassung einer OSH zu ermöglichen, werden daher sogenannte Schlupfvariablen (*slack variables*) ( $\xi$  in Abbildung 5.6b) eingesetzt (RICHARDS 2012). Diese kennzeichnen die Distanz eines Pixelvektors auf der falschen Seite der OSH zur der Hyperebene der entsprechenden Klasse. Die Schlupfvariablen erlauben es somit diese Pixel „falsch“ zu klassifizieren, „bestrafen“ die Fehlzuweisung jedoch gleichzeitig (FOODY & MATHUR 2006). Durch die Angabe des Parameters  $C$ , oftmals *penalty parameter* (Strafparameter) oder teilweise auch *regularisation parameter* genannt, kann die maximal tolerierbare Größe der Schlupfvariablen für die Klassifikation jedoch begrenzt werden (FOODY & MATHUR 2006, RICHARDS 2012). Der Parameter  $C$  reguliert somit den Kompromiss zwischen einer zu strikten Klassentrennung, die eine Überanpassung zur Folge haben kann, und einem gewissen Grad an Fehlzuweisungen, wodurch im Allgemeinen die Generalisierungsfähigkeit des Klassifikationsalgorithmus gesteigert wird (EXELISVIS 2012a). Um die Klassifikationsfähigkeit von nicht-linear trennbaren Daten mit SVM zu erweitern, lassen sich die Daten durch Lagrange-Multiplikatoren und verschiedene Kernel-Funktionen in einen hoch-dimensionalen Merkmalsraum übertragen, in dem die zuvor überlappenden Klassen linear trennbar werden. Die Wahl der Kernel-Funktion kann mitunter großen Einfluss auf die Klassifikationsergebnisse haben (HUANG et al. 2002). In ENVI stehen die Kerntypen *Linear*, *Polynomial*, *Radial Basis Function* (RBF) und *Sigmoid* zur Verfügung (EXELISVIS 2012a). Für Klassifikationen im Rahmen der Fernerkundung werden im Allgemeinen nur der RBF- oder der Polynomial-Kernel verwendet (HSU et al. 2003, FOODY &

MATHUR 2006, RICHARDS 2012). Die wesentlichen Parameter, die beispielsweise die Auswirkungen der RBF-Kernelfunktion beeinflussen, sind der Strafparameter Parameter  $C$  sowie der für die Weite des Kernels verantwortliche Parameter  $\gamma$  (FOODY & MATHUR 2004b). Beide Parameter müssen vom Nutzer bestimmt werden. Darüber hinaus sind SVM in ihrer ursprünglichen Form eigentlich binäre Klassifikationsverfahren, die nur zwei Klassen voneinander unterscheiden können. Durch die Kombination mehrerer binärer SVM besteht allerdings die Möglichkeit, mehrere Klassen zu unterscheiden. Die Umsetzung erfolgt dabei vor allem mit der paarweisen „eine-gegen-eine“- oder der „eine-gegen-alle“-Strategie (FOODY & MATHUR 2004a). ENVI implementiert die SVM-Variante der paarweisen Klassifikation (WU et al. 2004, EXELISVIS 2012a). Dabei bestimmt ENVI die Klassenzugehörigkeit für jedes Pixel anhand von Wahrscheinlichkeitswerten zwischen 0 und 1. Die Wahrscheinlichkeitswerte eines Pixels für alle Klassen summieren sich dabei zu 1. Die Klassenzuweisung erfolgt dementsprechend zur Klasse mit dem höchsten Wahrscheinlichkeitswert. Um die Klassenzuweisung auf eine minimal zu akzeptierende Wahrscheinlichkeit zu begrenzen, lassen sich in ENVI zusätzlich Grenzwerte setzen (EXELISVIS 2012a).

## 5.4 MDA-Teil FE: Übergeordnete Klassifikationsmethodik

Wie bei der Vorstellung der MDA-Methodik (vgl. Kapitel 5) angesprochen, wurde die Verfahrensweise der Fernerkundungsanalysen zur Erläuterung in ein „übergeordnetes“ Ablaufschema und in eine „untergeordnete Abfolge“ von Arbeitsschritten gegliedert. Das „übergeordnete“ Ablaufschema regelte den generellen Analyseablauf pro Fernerkundungsszene (beziehungsweise Zeitschnitt (ZS)) und diente vor allem der verbesserten Klassifikationsgüte von Ackerfrüchten im Vergleich zu konventionellen Verfahrensweisen sowie dem Vergleich der beiden Klassifikationsverfahren MLC und SVM. Abbildung 5.7 stellt den (generellen) übergeordneten Ablauf der MDA-Fernerkundungsanalysen dieser Arbeit schematisch dar. Dieser ist grundsätzlich in die zwei Prozessketten Klassifikation-ALL & -FB gliedert. Alle Fernerkundungsszenen der einzelnen ZS durchliefen dieses Schema in Bezug auf den Klassifikationsprozess autark von anderen Szenen und unabhängig vom Aufnahmezeitfenster, aus dem sie stammten (vgl. Kapitel 5.1). Auch der abgedeckte Bereich des Untersuchungsgebiets (komplett oder nur Teilabdeckung) spielte dabei in der Regel keine Rolle.

Mit der Prozesskette Klassifikation-ALL (in Abbildung 5.7 links) erfolgte einerseits jeweils eine überwachte Klassifikation der vollständigen Fernerkundungsszene beziehungsweise des gesamten abgedeckten Bereichs des Untersuchungsgebiets. Dabei wurden alle Landnutzungen im Untersuchungsgebiet (flächendeckend) erfasst. Zum Vergleich der beiden Klassifikations-

verfahren erfolgte die Klassifikation der Fernerkundungsdaten für 2008 jeweils mit MLC und SVM. Die Verwendung der beiden Klassifikationsverfahren für die Analysen der Jahre 2009 und 2010 wird in Kapitel 6.1 erläutert. Zur Erzeugung der finalen MDA-Landnutzungs-klassifikation wurde allerdings nur das jeweils beste Ergebnis weiterverwendet.

Durch die Prozesskette Klassifikation-FB (in Abbildung 5.7 rechts) wurde die Steigerung der Klassifikationsgüte für Ackerland angestrebt, indem durch eine erste Stratifizierung anhand der verfügbaren Geodaten Ackerflächen in deutschen Gebieten separat von allen anderen Landnutzungskategorien betrachtet wurden (JANSSEN et al. 1990, SMITH & FULLER 2001, LUCAS et al. 2007, LILLESAND et al. 2008, LUCAS et al. 2011).

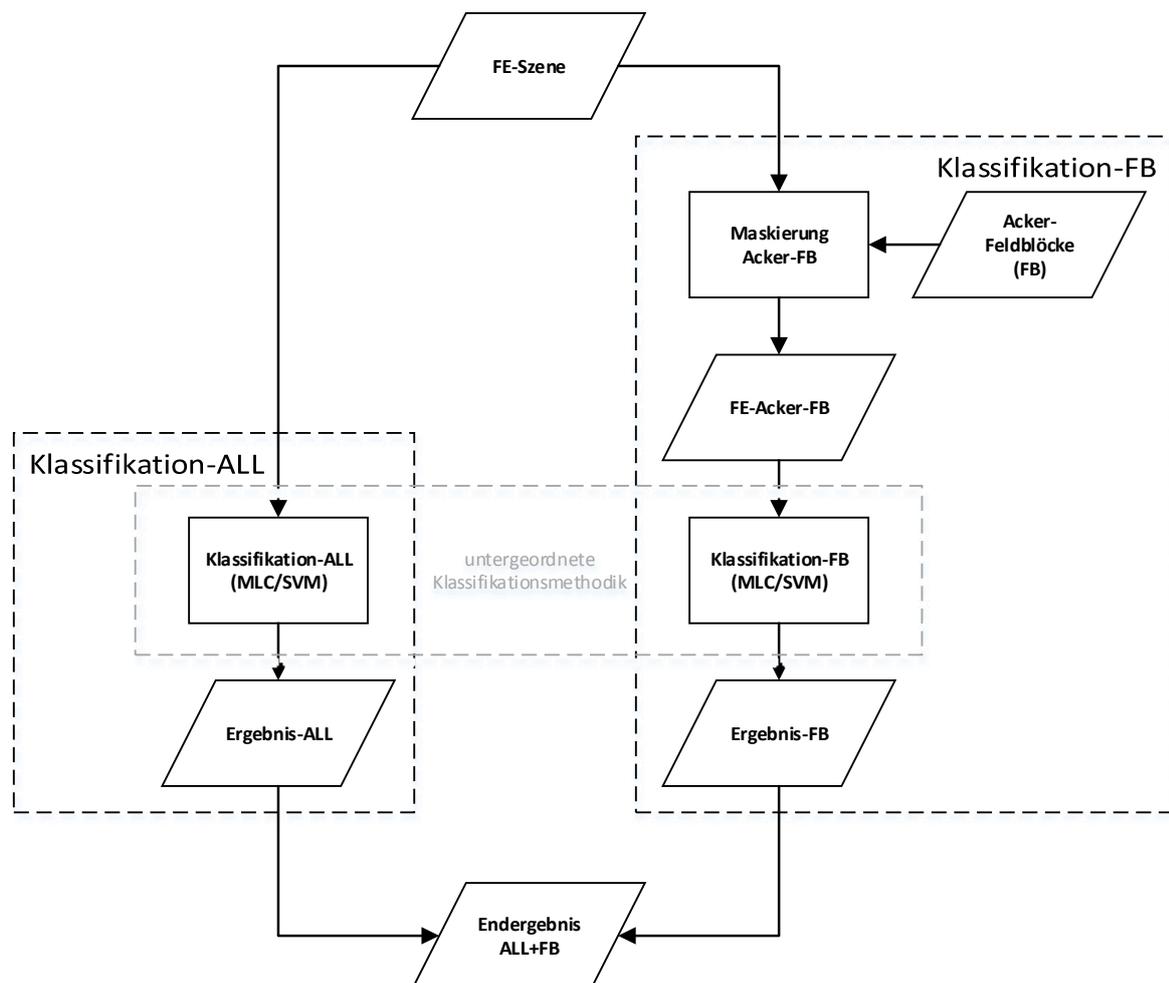


Abbildung 5.7: Übergeordnetes Ablaufschema der MDA-Fernerkundungsanalysen, gegliedert in die zwei Prozessketten Klassifikation-ALL für gesamte Szenen und Klassifikation-FB für die separate Klassifikation von Ackerland auf Basis der Acker-Feldblöcke.

Dieser Vorgehensweise liegt zugrunde, dass die Klassifizierungsgüte von Feldfrüchten in multispektralen Daten moderater räumlicher Auflösung durch die teilweise hohe spektrale Ähnlichkeit zu anderen Vegetationstypen (im Besonderen zu Grünland aber auch zu Laubvegetation) in hohem Maße beeinträchtigt werden kann. So können beispielsweise bei der



Klassifikation von Getreide und Grünland in beiden Klassen gegenseitige Falschzuweisungen auftreten, da es sich jeweils um Gräser handelt (und somit um die gleiche Landbedeckung), die in vielen Entwicklungsstadien eine hohe spektrale Ähnlichkeit aufweisen. Die Eingrenzung des Merkmalraums auf Ackerland sollte daher zu einer Reduzierung von Fehlklassifikationen und damit zur Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit führen. Die Grundlage für die räumliche Abgrenzung von Ackerland bildeten dabei die Feldblock-Daten. Wie bereits in Kapitel 3.3.2 erläutert, enthalten die Feldblock-Daten für die deutschen Gebiete unter anderem alle Ackerflächen, die nach Verordnung (EG) Nr.73/2009 (EU 2009) förderungsfähig sind. Daher wurde davon ausgegangen, dass in den Feldblock-Daten im Hinblick auf den Zielmaßstab dieser Arbeit, alle wesentlichen Ackerflächen enthalten sind und dementsprechend eine umfassende räumliche Unterscheidung von Acker- und Nicht-Ackerflächen erfolgen konnte. Die während der Datenaufbereitung bereits gerasterten jährlichen Feldblock-Daten wurden daher vor der Klassifikation jeder Szene als Masken-Layer eingesetzt, um alle Bereiche in den Fernerkundungsdaten zu maskieren, die laut Feldblock-Daten keine Ackerflächen darstellen.

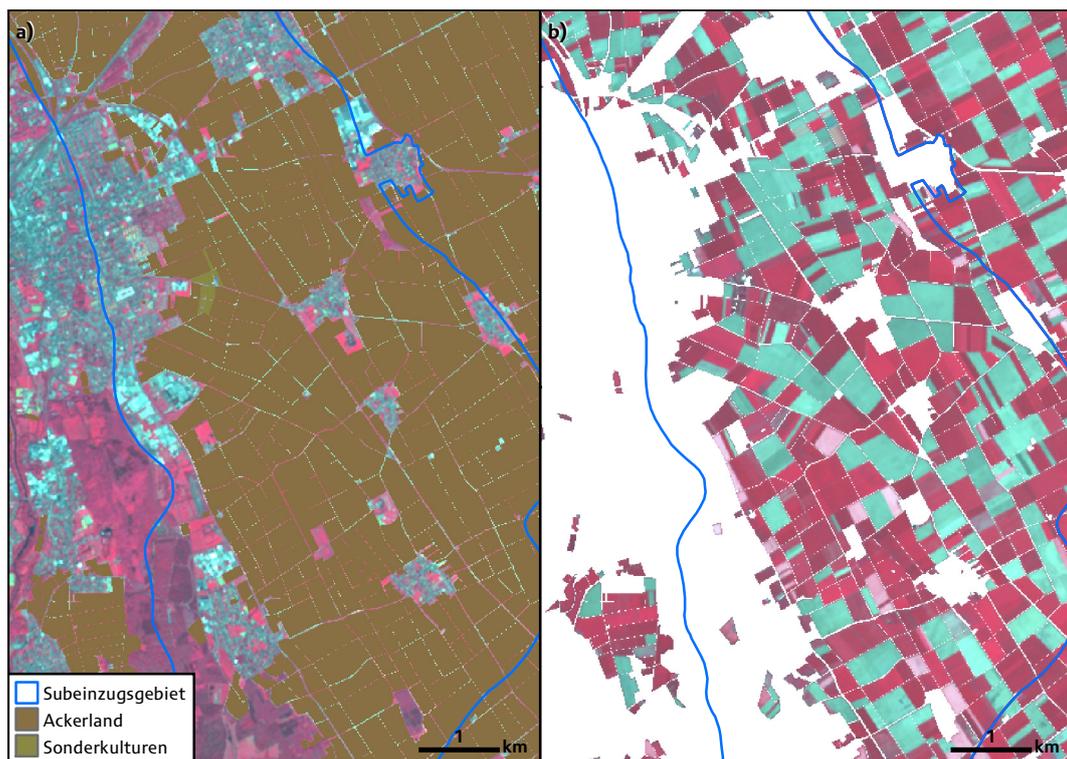


Abbildung 5.8: Beispiel der jährlichen Ackerland-Maske auf Basis der Acker-Feldblöcke (a) und des Maskierungsergebnisses für die ASTER-Szene vom 05.05.2008, in dem nur noch die Ackerflächen in den Fernerkundungsdaten zurückbleiben (b) (Datengrundlage: Landwirtschaftskammer NRW 2008, USGS 2008).

Abbildung 5.8a stellt beispielhaft die aus den Feldblock-Daten erzeugte Ackerland-Maske (braune und olivgrüne Flächen) für das Jahr 2008. Zur Erzeugung der Ackerland-Maske wurden die Feldblock-Bodennutzungen *Ackerland* und *Sonderkulturen* verwendet, da es sich bei Letzteren in der Regel ebenfalls um Ackerflächen handelt. Abbildung 5.8b stellt den

identischen Ausschnitt der ausmaskierten Ackerflächen für eine ASTER-Szene vom 05.05.2008 dar. Bei der Klassifikation der ausmaskierten Ackerflächen (FE-Acker-FB in Abbildung 5.7) wurden folglich jeweils ausschließlich Trainingsdaten für Feldfrüchte sowie gegebenenfalls unbedeckter Boden eingesetzt. In Übereinstimmung mit der Vorgehensweise bei den ALL-Klassifikationen erfolgte auch anhand der Fernerkundungsdaten mit ausschließlich den Ackerflächen (FE-Acker-FB) der Vergleich der Klassifikationsverfahren MLC und SVM. Auch hiervon wurde jeweils nur das bessere Klassifikationsergebnis weiter verwendet.

Aus der Fernerkundungsanalyse jeder Szene resultierten daher mit der ALL- und der FB-Klassifikation (in der Regel) zwei Ergebnisdatensätze. Diese wurden für die weiteren MDA-Analysen als ein Datensatz(-Paar) oder ein ZS betrachtet, wobei das FB-Ergebnis die entsprechenden Bereiche der ALL-Klassifikation ersetzte. Das ALL-Ergebnis wurde dementsprechend für die Acker-FB-Bereiche verworfen. Bei der Klassifikation der gesamten Szenen (Klassifikation-ALL), war die Klassifikation der Ackerflächen dennoch notwendig, da die Feldblock-Daten nur die deutsche landwirtschaftliche Nutzfläche im Untersuchungsgebiet abdeckten. Die fernerkundungsbasierte Erfassung der Landnutzung der Gebiete in den Niederlanden und Belgien beruhte daher ausschließlich auf den Ergebnissen der ALL-Klassifikationen.

## 5.5 MDA-Teil FE: Untergeordnete Klassifikationsmethodik

Die „untergeordnete Klassifikationsmethodik“ der MDA-Fernerkundungsanalysen umfasst die Arbeitsschritte innerhalb der übergeordneten Klassifikationsmethodik, die den eigentlichen Klassifizierungsprozess der einzelnen Fernerkundungsdatensätze betreffen (vgl. Abbildung 5.7). Dazu zählen die im Grundlagenkapitel bereits angesprochenen Arbeitsschritte zur Auswahl geeigneter Trainings- und Validierungsflächen (Trainings- beziehungsweise Test-ROI) in den Fernerkundungsdaten, die Durchführung der Klassifizierungen, die Validierung der Klassifikationsergebnisse sowie die Nachbearbeitung der Klassifikationsergebnisse mittels Post-Klassifizierungsverfahren.

Abbildung 5.9 zeigt den schematischen Ablauf der untergeordneten Klassifikationsmethodik. Die Durchführung der Arbeitsschritte, des eigentlichen Klassifikationsprozesses erfolgte in der Regel iterativ bis keine weitere Verbesserung der Klassifikationsgüte mehr erreicht wurde. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden genauer erläutert.

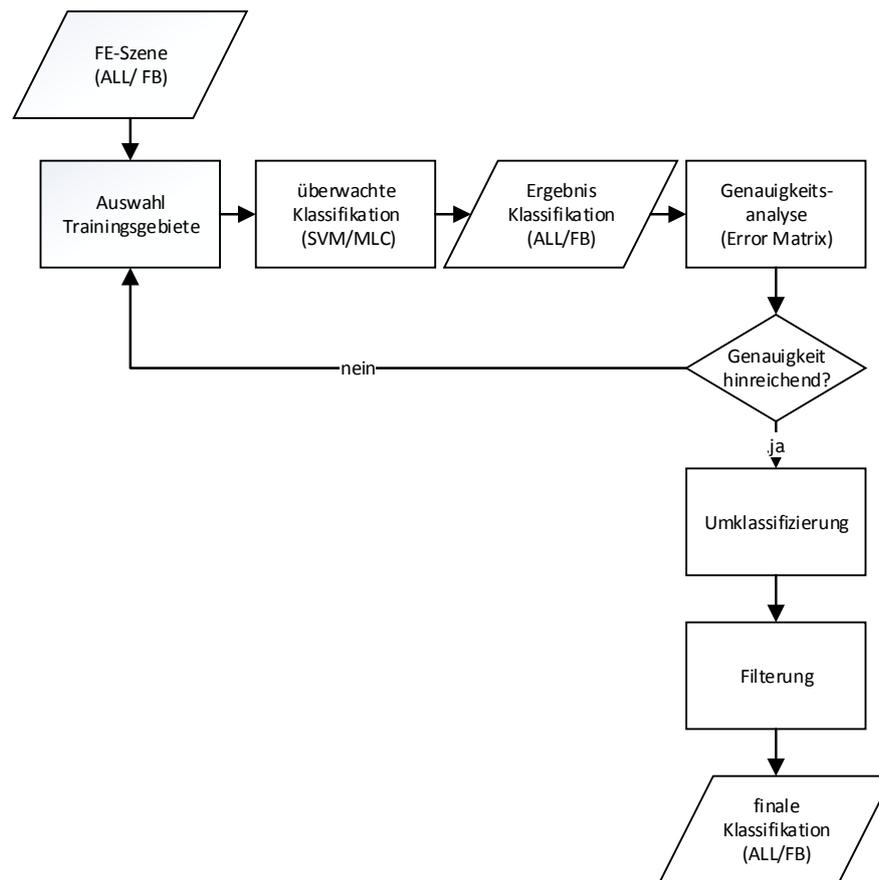


Abbildung 5.9: Schematischer Ablauf der „untergeordneten“ Klassifikationsmethodik im Rahmen des MDA zur Analyse der einzelnen Fernerkundungsdatensätze (ALL & FB).

### 5.5.1 Auswahl der Trainingsgebiete

Für die Unterscheidung der einzelnen Landnutzungsklassen und für die Verwendung mit beiden Klassifikationsverfahren SVM und MLC spielte die Auswahl der Trainingsgebiete eine wichtige Rolle. Um für den Vergleich der Klassifikationsverfahren die gleichen Voraussetzungen für beide Algorithmen zu schaffen, war daher die Klassifikation anhand der jeweils gleichen Trainingsgebietssätze notwendig. Die Trainingsdaten mussten sich daher gleichermaßen für beide Klassifikationsalgorithmen eignen. Die Auswahl der Trainingsgebiete sowie deren Gestalt erfolgten daher unter verschiedenen Gesichtspunkten. Vor allem im Hinblick auf das MLC-Verfahren müssen alle Landnutzungsklassen sowie die spektrale Variabilität innerhalb einer Landnutzungsklasse in ausreichendem Maße erfasst werden, damit die Trainingsgebiete eine möglichst umfassende Beschreibung jeder Klasse ermöglichen (LILLESAND et al. 2008). Als Richtwerte zur ausreichenden Erfassung der spektralen Variabilität einer Landnutzungsklasse finden sich in der Literatur daher zahlreiche Angaben hinsichtlich der notwendigen Mindestanzahl einbezogener Pixel. JENSEN (2005) gibt als Grundregel eine Pixelanzahl pro Klasse von  $>10n$  an, wobei  $n$  der Anzahl der Bänder des

Fernerkundungsdatensatzes entspricht. MATHER & KOCH (2011) empfehlen, wenigstens  $30n$  Pixel pro Klasse zu verwenden. LILLESAND et al. (2008) halten hingegen je nach Heterogenität einer Szene  $100n$  oder mehr für sinnvoll. In Bezug auf die Anzahl der Trainingsgebiete empfehlen beispielsweise LÖFFLER et al. (2005) oder auch CAMPBELL & WYNNE (2011) nach Möglichkeit mindestens zehn über die Szene verteilte Gebiete auszuwählen, um die spektrale Heterogenität innerhalb einer Klasse erfassen zu können. Hinsichtlich der Gestalt der Trainingsgebiete und der einbezogenen Pixelspektren wird im Allgemeinen empfohlen, und wie bereits in Kapitel 5.2.1.1 angesprochen, nur möglichst spektral reine Pixel einer Klasse zu verwenden. Dabei sollen besonders Randpixel beispielsweise von einer Ackerfläche gemieden werden, da diese oftmals Mischpixel darstellen (LILLESAND et al. 2008). Vor allem bezüglich der Angabe der Mindestpixelanzahl sowie spektraler Aspekte weisen jedoch beispielsweise FOODY & MATHUR (2004b) darauf hin, dass dies oftmals auf die Nutzung mit statistischen (parametrischen) Klassifikationsverfahren wie MLC abzielt. Da nicht-parametrische Verfahren wie SVM hingegen andere Anforderungen an Trainingsgebiete stellen (vgl. Kapitel 5.3.2), können sie bei gezielter Auswahl der Trainingsgebiete mitunter auch mit einer geringeren Pixelanzahl zur erfolgreichen Klassifikation führen. FOODY & MATHUR (2006) reduzieren daher die Anzahl der benötigten Trainingspixel zur Unterscheidung von Ackerfrüchten mit SVM, indem sie – im Gegensatz zu den generellen Empfehlungen – nur Trainingspixel im unmittelbaren Bereich von Nutzungsgrenzen innerhalb landwirtschaftlicher Nutzflächen entnehmen. Diese Pixelvektoren werden als eine Art graduelle Mischung der angrenzenden Nutzungen eingeschätzt und können in ihrer Studie genug *support vectors* für eine gute Klassenunterscheidung bereitstellen. Für die Auswahl der Trainingsgebiete im Rahmen dieser Arbeit wurde dieser vielversprechende Ansatz adaptiert.

Zur Umsetzung der Anforderungen an Trainingsgebiete im Hinblick auf das MLC-Verfahren wurden insbesondere für Ackerflächen, Gewässerflächen oder Waldgebiete mehrere möglichst großflächige Trainingsgebiete ausgewählt, damit für die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen ausreichend Trainingsfälle zur Verfügung standen, um die Heterogenität einer Nutzung möglichst gut abzubilden. Die Anzahl der in der Literatur empfohlenen Mindestpixelanzahl wurde dabei in der Regel erreicht oder übertroffen. Eine Ausnahme bildeten allerdings Trainingsgebiete für versiegelte Flächen in Siedlungen oder für Straßen. Hier wurde aufgrund der heterogenen Zusammensetzung der Siedlungsbereiche und der schmalen linienhaften Gestalt von Straßen zwar eine ausreichende, aber teilweise geringere Anzahl, als die empfohlene Menge an Trainingspixeln verwendet. Um die spektralen Unterschiede innerhalb einer Klasse hinreichend zu erfassen, wurden die Trainingsgebiete zudem über die verschiedenen Kartierungsgebiete beziehungsweise in Abhängigkeit von der Landnutzungs-kategorie über das Untersuchungsgebiet verteilt. Besonders hinsichtlich der SVM-Klassifikation wurden die Grenzen der Trainingsgebiete für Feldfrüchte in Anlehnung an FOODY & MATHUR (2006) bei einigen Trainingsgebieten absichtlich relativ nahe an Nutzungsgrenzen gesetzt, um Fehlklassifikationen (unter anderem) in den Randbereichen von

Ackerflächen zu reduzieren, die auf Mischpixel von unterschiedlichen Oberflächen (zum Beispiel Feldfrucht und Asphalt) zurückzuführen sind (vgl. THUNNISSEN et al. (1992)). Dies zielte besonders auf die separate Klassifikation von Ackerland (Klassifikation-FB) ab, da hierbei möglichst homogene Bereiche klassifiziert werden sollten.



Abbildung 5.10: Gestalt der Trainingsflächen für Ackerland für eine RapidEye-Szene vom 20.05.2010 (Datengrundlage: RESA 2010).

Abbildung 5.10 zeigt beispielhaft die Gestalt einiger Trainingsflächen (auch als Regions-of-Interest, ROI) bezeichnet, die zur Klassifizierung von Ackerland dienen. Die in grau dargestellten Umrisslinien stellen die kartierten Flächen dar. In der oberen Bildhälfte reichen die Grenzen der Trainingsflächen für *Winterraps* und *Winterweizen* nahe an die Nutzungsgrenze. Die an deren Rand markierten Pixel stellen wahrscheinlich bereits Mischpixel dar, die einen geringen Anteil der spektralen Signatur der benachbarten Nutzung enthalten. Diese könnten daher potentielle Stützvektoren für die SVM-Klassifikation liefern. In Bezug auf das MLC-Verfahren wurde jedoch darauf geachtet, dass hierdurch keine unbeabsichtigten Überschneidungen von Trainingsklassen verursacht wurden, um die Klassenunterscheidung nicht zu beeinträchtigen. Unabhängig davon offenbarte sich während der Auswahl der Trainingsgebiete, dass die spektrale Variabilität innerhalb von Klassen wie *Grünland*, *Winterraps*, *Laubwald*, für Getreide, aber auch bei *versiegelten Flächen* teilweise sehr hoch war. So zeigte Grünland typischerweise, je nach Zeitpunkt des letzten Schnitts (von gerade gemäht bis hin zu kurz vor dem nächsten Schnitt), derart unterschiedliche spektrale Signaturen, dass daraus abgeleitete Trainingsdaten als eine einzige Klasse keine zufriedenstellenden Klassifikationsergebnisse ermöglichten.



Abbildung 5.11: Trainingsgebiete für unterschiedliche Erscheinungen von Grünland für eine RapidEye-Szene vom 20.05.2010 (Datengrundlage: RESA 2010).

Abbildung 5.11 stellt Trainings-ROI von Grünland exemplarisch für eine RapidEye-Szene vom 20.05.2010 dar. Die unterschiedliche Erscheinung von Grünland ist darin deutlich sichtbar. Daher war es notwendig, solche Nutzungsklassen (Informationsklassen) in mehrere Spektralklassen zu untergliedern (LILLESAND et al. 2008, RICHARDS 2012). Im Fall von Grünland erfolgte daher oftmals die Untergliederung in drei Spektralklassen. Zur Auswahl und Bewertung geeigneter Trainingsgebiete einer Landnutzungsklasse wurden neben der visuellen Betrachtung der Fernerkundungsdaten und Testklassifikationen auch die beiden Messmethoden Jeffries-Matusita Distance (JM-Distance) und Transformed Divergence (TD) eingesetzt. Diese berechnen jeweils ein Wert für ROI-Paarungen zwischen 0 und 2, der darüber Auskunft gibt, inwieweit sich die zu vergleichenden Trainingsgebiete statistisch voneinander unterscheiden (JENSEN 2005, RICHARDS 2012). Werte größer 1,9 weisen auf eine gute Trennbarkeit der Klassen hin, während geringere Werte auf eine gewisse Überschneidung deuten. Werte von unter 1 legen nahe, dass sich die zu vergleichenden Trainingsgebiete statistisch kaum unterscheiden (EXELISVIS 2012a).

Tabelle 5.2: JM-Distanzen und TD-Werte für Winterweizen im Vergleich zu Wintergerste und Subklassen von Grünland der Trainingsdaten für die ASTER-Szene vom 05.05.2008.

Ausgangsklasse	Vergleichsklasse	JM-Distance	TD
Winterweizen	Wintergerste	1,5965	1,8664
	Grünland 1	1,9069	1,9827
	Grünland 2	1,9924	1,9998
	Grünland 3	1,3028	1,3472

Tabelle 5.2 zeigt beispielhaft ausgewählte Unterscheidungswerte der beiden Verfahren für Trainingsdaten einer ASTER-Szene vom 05.05.2008, bei der die Klasse *Winterweizen* mit der Klasse *Wintergerste* sowie Subklassen von *Grünland* verglichen wurde. Die Unterscheidung

dieser Klassen ist mit multispektralen Daten, wie bereits angesprochen, des Öfteren problematisch. Auch hier zeigte sich, dass in den Trainingsdaten gewisse Ähnlichkeiten zu *Wintergerste* und zu *Grünland 3* bestehen.

Tabelle 5.3: JM-Distanzen und TD-Werte für Grünland 1 im Vergleich zu Wintergerste und weiteren Subklassen von Grünland der Trainingsdaten für die ASTER-Szene vom 05.05.2008.

<b>Ausgangsklasse</b>	<b>Vergleichsklasse</b>	<b>JM-Distance</b>	<b>TD</b>
Grünland 1	Wintergerste	1,2633	1,4079
	Winterweizen	1,9069	1,9827
	Grünland 2	1,9951	1,9999
	Grünland 3	1,9413	1,9961

In Tabelle 5.3 wird hingegen die Klasse *Grünland 1* mit den anderen Klassen aus dem gleichen Datensatz wie in Tabelle 5.2 verglichen. Sie zeigt, dass es nur sehr geringe Ähnlichkeiten unter den Trainingsklassen für Grünland gibt, *Grünland 1* sich mit der Trainingsklasse *Wintergerste* jedoch stark überschneidet. Auf diese Weise konnte die Qualität der Trainingsgebiete bereits im Vorfeld der Klassifikation abgeschätzt werden. Oftmals war es allerdings auch nach mehrfacher Nachbearbeitung der Trainingsgebiete nicht möglich eine bessere Trennung der Trainingsgebiete zu erzielen, was auf eine zu hohe Ähnlichkeit der spektralen Signaturen der Klassen in multispektralen Daten zurückgeführt wurde. In diesen Fällen bestand somit die Möglichkeit, dass das endgültige Klassifikationsergebnis von dadurch verursachten Fehlklassifikationen beeinträchtigt war.

Für jede Fernerkundungsszene beziehungsweise jedes Aufnahme Fenster mussten die Trainingsgebietsdatensätze in der Regel neu erstellt werden. Gründe hierfür waren die unterschiedliche räumliche Abdeckung der einzelnen Szenen, die unterschiedliche Vegetationsbedeckung der Erdoberfläche (aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmedaten) oder die Beeinträchtigung der Datenqualität durch Bewölkung. In einigen Fällen konnten die Trainingsgebiete allerdings teilweise vom einen zum anderen Datensatz übertragen werden.

## 5.5.2 Klassifikation der Fernerkundungsdaten

Die Klassifikation der Fernerkundungsdaten erfolgte anhand von Trainingsgebieten (Regions-of-Interest, ROI), die an die jeweilige Szene angepasst waren. Wie zuvor erwähnt, wurden zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse, für beide Klassifizierungsverfahren jeweils die identischen Trainingsgebiete verwendet. Zur Klassifikation der Acker-FB-Bereiche (Klassifikation-FB) enthielten die Trainingsdatensätze nur die entsprechenden Klassen für Feldfrüchte beziehungsweise unbedeckten Boden.

Die Klassifikationsalgorithmen konnten durch die Veränderung unterschiedlicher Parameter angepasst werden. Zur Modifikation des MLC-Verfahrens bietet ENVI die Angabe von Wahrscheinlichkeitswerten für die einzelnen Klassen, um Klassenzuweisungen unterhalb von Schwellenwerten zu verhindern. Da diese sogenannten *prior probabilities* nur sehr grob hätten geschätzt werden können, wurden keine Wahrscheinlichkeitsschätzungen angegeben. Zur Anpassung der SVM-Klassifizierung ist in ENVI die Wahl des Kernel, die Veränderung der dazugehörigen Parameter  $C$  und  $\gamma$ , die Reduktion der Auflösung während der Trainingsphase des Algorithmus (anhand von temporären Pyramidendateien) sowie die Angabe von Wahrscheinlichkeitsschätzungen bezüglich der Klassenzuweisung möglich. Für diese Arbeit wurde der RBF-Kernel gewählt, da dieser im Allgemeinen empfohlen (HSU et al. 2003, FOODY & MATHUR 2006) und auch häufig verwendet wird (OTUKEI & BLASCHKE 2010). Zudem ergaben die Untersuchungen von HUANG et al. (2002), dass die Berechnung von SVM mit dem alternativen Polynomial-Kernel bei vergleichbaren Ergebnissen deutlich länger dauert, als mit dem RBF-Kernel. Die Vergleichsanalyse zur Eignung beider Kernel-Typen zur Landnutzungsklassifikation anhand von ASTER und Landsat ETM+-Daten von KAVZOGLU & COLKESEN (2009) ergab darüber hinaus eine um 2 % bessere Klassifikationsgenauigkeit bei Verwendung des RBF-Kernels. In ENVI wird der  $\gamma$ -Parameter automatisch anhand der einbezogenen Bänder berechnet (EXELISVIS 2012a). Da sich mit dieser Einstellung gute Ergebnisse erzielen ließen, wurde der errechnete Wert nicht verändert. Auch der Standardwert für den Strafparameter  $C$  wurde als geeignet eingeschätzt und daher beibehalten. Auf die Angabe von Wahrscheinlichkeitswerten für die einzelnen Klassen wurde wie auch bei der MLC verzichtet. Um das Potential des SVM-Verfahrens voll auszuschöpfen, wurden die Trainingsberechnungen jeweils auf der vollen Auflösung der Fernerkundungsdaten durchgeführt.

### 5.5.3 Validierung der Klassifikationsergebnisse

Neben der visuellen Inspektion der Klassifikationsergebnisse, diente die Erstellung einer Fehlermatrix (Error Matrix, EM) und die daraus abzuleitenden Genauigkeitswerte zur Bewertung der einzelnen Klassifikationsergebnisse (vgl. Kapitel 2.3.5.3). Die Berechnung der EM erfolgte anhand von Testgebieten mit bekannter Landnutzung. Die Testgebiete wurden prinzipiell in gleicher Weise wie die Trainingsgebiete erzeugt. Für Landnutzungsklassen für die geeignete Referenzinformationen durch visuelle Interpretation von DOP erzeugt werden konnten (vgl. Kapitel 5.2.3), wurden die Testgebiete über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Validierungs-ROI für Feldfrüchte wurden anhand der während der Geländekartierung aufgenommenen Flächen erstellt. Landnutzungsklassen, bei denen während der Klassifikation eine Unterteilung in unterschiedliche spektrale Subklassen erfolgte, wurden dementsprechend auch bei den Testdaten untergliedert. Darüber hinaus wurde sichergestellt, dass keine



Überschneidungen zwischen Trainings- und Validierungsdatensätzen der einzelnen Szenen bestanden, damit die Unabhängigkeit der Validierung gewährleistet war. Da die Validierungsflächen zur Überprüfung dienten, wie umfassend eine Landnutzungs Klasse durch die Klassifikation erfasst wurde, erfolgte die Eintragung der Grenzen der Testgebiete zum Beispiel für Ackerflächen im Allgemeinen möglichst großflächig und bis nahe an die Nutzungsgrenze, ohne allerdings Mischpixel einzubeziehen. Als Beispiel für die Beschaffenheit der Testflächen für Feldfrüchte zeigt Abbildung 5.12 einen Ausschnitt der Validierungs-ROI für die Klassifikation einer ASTER-Szene vom 05.05.2008.

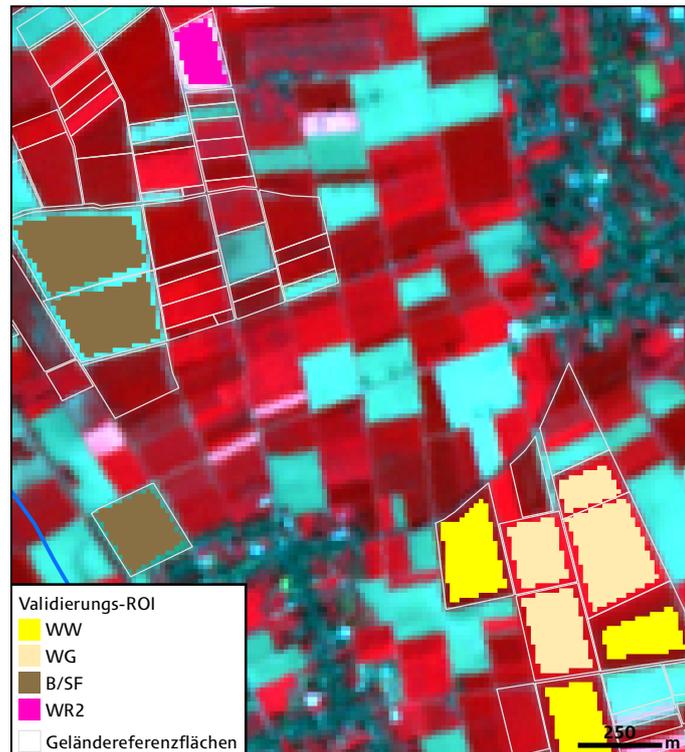


Abbildung 5.12: Beispiele für Validierungsflächen für die ALL-Klassifikation einer ASTER-Szene vom 05.05.2008 (Datengrundlage: USGS 2008.)

Die Testflächen konnten aus denselben Gründen wie auch die Trainingsgebiete in der Regel nicht allgemeingültig für ein Jahr erstellt werden. Dementsprechend wurde für jede Szene oder jeden Zeitschnitt ein eigener Testgebietsdatensatz erstellt. Die Auswahl der Testgebiete erfolgte in einem separaten Prozess, gewöhnlich im Anschluss an die Wahl der Trainingsgebiete. Um die Klassifikationsgenauigkeit hinreichend bewerten zu können, wurden im Allgemeinen deutlich mehr Testflächen als Trainingsflächen verwendet. Dabei wurde die Menge der Testflächen pro Klasse auch von der Bedeutung der einzelnen Klasse abhängig gemacht (LILLESAND et al. 2008, CONGALTON & GREEN 2009). So wurden für die dominierenden Feldfrüchte wie Wintergetreide oder Zuckerrüben insgesamt mehr Testgebiete erzeugt, als beispielsweise für Sommergetreide.

## 5.5.4 Post-Klassifizierungsverfahren

Die Post-Klassifizierungsverfahren zur Nachbearbeitung der endgültigen Klassifikationsergebnisse umfassten im Wesentlichen die Schritte der Zusammenfügung von Subklassen und die anschließende „Glättung“ der Klassifikationsergebnisse.

### 5.5.4.1 Umklassifizierung

Für Landnutzungsklassen, die bei der Klassifikation in Spektralklassen untergliedert wurden, erfolgte vor der weiteren Nutzung in der Regel eine Zusammenführung zur Hauptlandnutzungs-klasse, da aus den Subklassen im Allgemeinen keine zusätzlich nutzbaren Informationen abgeleitet werden konnten. So wurde beispielsweise die Unterteilung des Grünlands in verschiedene Spektralklassen aufgehoben, da hierdurch keine verlässliche Unterscheidung, beispielsweise in Weide oder Futtergras-Nutzung, abzuleiten war. Hierzu wurde entweder die Funktion *Combine Classes* in ENVI oder das Werkzeug *Reclassify* in ArcGIS verwendet, wodurch zusätzlich eine Vereinheitlichung der Klassenbezeichnungen (genauer gesagt der entsprechenden Grid-Werte) für alle Klassifikationen erfolgte.

### 5.5.4.2 Post-Klassifizierungsglättung

Als letzter Schritt der untergeordneten Klassifikationsmethodik wurde eine Optimierung der Klassifikationsergebnisse durch eine moderate räumliche Filterung angestrebt (vgl. Kapitel 2.3.5.4.). Verwendet wurde hierzu das Modul *Include Classes* (GAGLIANO 2007), das als Add-in für ENVI über die User Community der Herstellerwebseite zu beziehen ist. *Include Classes* ist der *Eliminate*-Funktion der Fernerkundungssoftware ERDAS IMAGINE nachempfunden (GAGLIANO 2007). Das Modul entfernt Pixel (-gruppen) einer Klasse, deren Anzahl kleiner als ein anzugebender Wert ist und weist sie der dominierenden angrenzenden oder sie umgebenden Klasse zu. Neben der minimalen Gruppengröße, ist auch die Anzahl der berücksichtigten Nachbarpixel (4 oder 8) anzugeben. Für die Nachbearbeitung der Klassifikationsergebnisse dieser Arbeit wurde grundsätzlich eine minimale Gruppengröße von 4 Pixeln und die Anzahl von 8 Nachbarpixeln gewählt. Diese Einstellung wurde als guter Kompromiss zwischen möglichst geringer „Verwischung“ der ursprünglichen Klassengrenzen und ausreichend effizienter Eliminierung von Pixeln mit unwahrscheinlicher Klassen-zuweisung erachtet. Eine Ausnahme stellten allerdings die Klassifikationsergebnisse von Landsat-Szenen dar. Hier wurde die Gruppengröße auf 16 Pixel und die Anzahl der Nachbarpixel auf 4 modifiziert, da die Landsat-Daten ursprünglich eine räumliche Auflösung von 30 m haben. Durch das Resampling auf 15 m wurde jedes 30 m-Pixel lediglich in vier 15 m-Pixel mit identischen Grauwerten aufgeteilt. Folglich wurden diese Pixel alle der gleichen

Klasse zugewiesen, so dass hier eine größere Mindestanzahl an Pixeln notwendig war, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen. Abbildung 5.13 stellt den „Glättungseffekt“, der durch die Filterung erzielt wurde, am Beispiel von Ackerflächen dar. Besonders im Grenzbereich zwischen zwei Nutzungen kommt es durch die dort auftretenden Mischpixel zu Fehlklassifikationen. So wurden beispielsweise in der Bildmitte von Abbildung 5.13a einzelne Pixel zwischen den angrenzenden Klassen *unbedeckter Boden* und *Wintergerste* der Klasse *Winterraps* zugeordnet. Ebenso wurden im Grenzbereich zwischen *Winterweizen* und *Winterraps* einige Mischpixel nachweisbar falsch als *Grünland* klassifiziert.

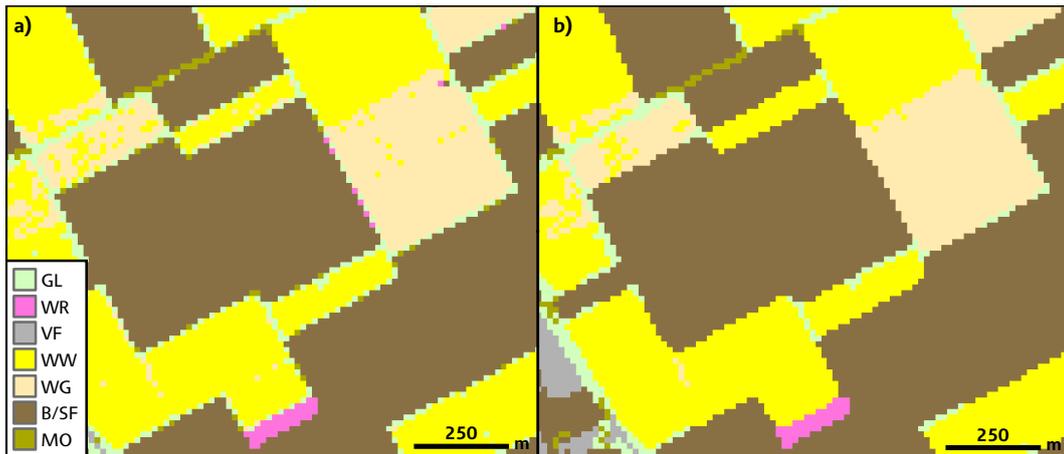


Abbildung 5.13: Auswirkung der Post-Klassifikationsfilterung am Beispiel einer SVM-Klassifikation einer RapidEye-Szene vom 23.05.2010 für Ackerlandbereiche vor (a) und nach der Filterung (b).

In Abbildung 5.13b ist derselbe Abschnitt nach der Filterung dargestellt. Die Anzahl einzelner und sehr wahrscheinlich falsch zugeordneter Pixel wurde deutlich verringert, so dass die Klassifikation hierdurch insgesamt homogener erscheint. In Bezug auf die Klassifikationsgenauigkeit zeigten einzelne Tests, dass diese Nachbearbeitung in der Regel zu einer leichten Verbesserung im Bereich von etwa einem Prozent führte. Alle Angaben in dieser Arbeit zur Genauigkeit der Klassifikationen beziehen sich aber auf die Klassifikationsergebnisse bevor diese Nachbearbeitung durchgeführt wurde. Neben der Verbesserung des optischen Eindrucks und der leichten Erhöhung der Klassifikationsgenauigkeit, spielte die Reduktion solcher Pixel besonders für die multitemporale Datenverschneidung eine wichtige Rolle, um etwa die Anzahl „falscher“ Abfolgen bei der Fruchtfolgenanalyse möglichst gering zu halten.

## 5.6 MDA-Teil GIS: MDA-Methodik im Rasterdatenmodell

Nach Abschluss der Fernerkundungsanalysen lagen die einzelnen Klassifikationen (beziehungsweise Zeitschnitte) sowie die weiteren Geodaten jeweils als einzelne Raster-Layer vor. Im Rahmen der MDA-GIS-Analysen erfolgte nun die räumliche Verschneidung und

Datenintegration durch Raster-Overlay-Analysen. Da die geometrische Angleichung aller Datensätze bereits während der Datenaufbereitung erfolgte (vgl. Kapitel 4), war eine räumliche Verschneidung nun problemlos möglich. Übliche Raster-Overlay-Analysen anhand mathematischer Operationen sind allerdings bei der Integration zahlreicher Raster-Layer mit kategorischen Informationen mit einer sehr hohen Komplexität verbunden (vgl. Kapitel 2.4.1.4). Für den rasterbasierten MDA war daher ein Datenformat notwendig, das die Integration von Informationen vieler unterschiedlicher Datenquellen praktikabel und effizient ermöglicht.

### 5.6.1 ESRI-Grid-Datenformat

Zur Durchführung der MDA-GIS-Analysen wurde daher das ESRI-Grid-Format gewählt, in das alle Datensätze überführt und per *combine*-Befehl zu einer Multi-Layer-Rasterdatei zusammengeführt wurden. Beim ESRI-Grid, im Folgenden auch als Grid-Format bezeichnet, handelt es sich um ein von der Firma ESRI entwickeltes Rasterdatenformat (ESRI 2012a). Im ESRI-Grid lassen sich mehrere Raster-Layer, bestehend aus diskontinuierlichen Ganzzahlenwerten (*integer*) oder aus kontinuierlichen (reellen) Zahlenwerten (*float*), zu einer Multi-Layer-Datei zusammenzufassen. Bei Mischungen von Raster-Layern mit *integer*- und *float*-Daten (oder nur *float*-Rastern) erfolgt die Speicherung als *layer stack*, bei dem die einzelnen Raster als eigene Ebenen erhalten bleiben, wie dies bei gängigen Rasterformaten wie beispielsweise TIFF üblich ist. Werden ausschließlich *integer*-Daten verschnitten, werden die Informationen hingegen in einem neuen Grid mit einem sogenannten *value attribute table* (VAT) abgespeichert.

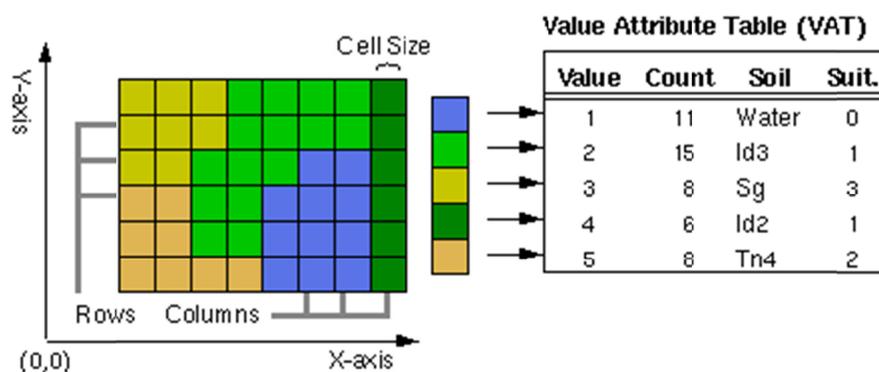


Abbildung 5.14: Schematischer Aufbau des value attribute table eines ESRI-Grids (ESRI 2012a).

Wie in Abbildung 5.14 dargestellt, erhält dabei jeder Eingabe-Layer eine Spalte im VAT, wodurch Rasterzellen mit mehreren Werten verknüpfbar sind (ESRI 2012b). Der Verständlichkeit halber, werden die einzelnen Eingabedatensätze, die in die VAT-Spalten übertragen wurden, weiterhin als Layer bezeichnet. VAT enthalten immer die Spalten Rowid, VALUE und COUNT, die aneinander gebunden sind. Die Rowid ist dabei eine vom

Dateiformat definierte laufende Nummer für jede Zeile im VAT. Die Zellenwerte im VALUE-Feld sind eindeutige Werte und entsprechen beispielsweise einer bestimmten Landnutzungs-kategorie, während im damit assoziierten COUNT-Feld aufgeführt ist, wie viele Rasterzellen mit diesem Wert im Datensatz vorkommen. Die Attributspalten des VAT können allerdings nicht nur numerische Werte sondern auch Textinformationen (Strings) enthalten. Grids bieten daher die Möglichkeit vielfältige Informationen aus unterschiedlichen Quellen im Rasterdatenmodell miteinander zu verschneiden. Ebenso können auch andere Attributtabelle per *join* mit dem VAT eines Grids verknüpft werden. Vom Prinzip her sind VAT daher mit Attributtabelle von Vektordaten wie beispielsweise ESRI-Shape-Dateien verwandt und bieten in ArcGIS damit auch vergleichbare Möglichkeiten zur Datenanalyse. So können mit der Abfragesprache relationaler Datenbanksysteme SQL Abfragen auf die VAT-Spalten durchgeführt werden. Wie bereits in den Grundlagen dargestellt enthalten SQL-Abfragesequenzen im GIS dabei typischerweise die Befehle SELECT, FROM und WHERE in Kombination mit Boole'schen Ausdrücken wie AND, OR, <, >, = (DE SMITH et al. 2009, KAPPAS 2011). Dabei bezieht sich SELECT auf eine Spalte, FROM auf eine Tabelle (in diesem Fall den VAT des Grids) und WHERE leitet eine Bedingung ein (BARTELME 2005). Eine einfache Abfrage könnte demnach beispielsweise lauten:

SELECT FROM MDA-Grid WHERE:

Abfrage		
<b>Spalte_X = 8</b>	AND	<b>Spalte_Y = 4</b>

wobei die Zahlen (=Rasterzellenwerte, *kursiv*) beispielsweise unterschiedliche Landnutzungs-klassen und die Spalten (**fett**) unterschiedliche Datenquellen beziehungsweise Layer darstellen. Durch die Abfrage wird eine Selektion von bestimmten Informationen einer VAT-Spalte unter Berücksichtigung von Informationen aus anderen Spalten durchgeführt, indem diese Informationen miteinander kombiniert werden. Auf diese Weise lassen sich somit auch (experten-)wissensbasierte Regeln nach folgendem Schema für kategorische Daten umsetzen (vgl. Kapitel 2.4.2.2):

WENN (Bedingung) ➔ DANN (Schlussfolgerung)

Dabei können unzählige Bedingungen miteinander verknüpft werden. Hinsichtlich der Integration räumlicher Informationen aus unterschiedlichen Quellen, wurden daher anhand solcher Abfragen (wissensbasierte) Produktionsregeln erzeugt, um (andere) Informationen entweder zu übertragen oder durch gezielte Abfragen neue Informationen abzuleiten. Die Werte, die aus der Abfrage resultierten Teilmenge, ließen sich dann beispielsweise in eine neue Spalte übertragen. In ArcGIS erfolgt dies unter Verwendung des *Field Calculator*, wodurch auf Basis der Auswahl in der Zielspalte selektierte Zellen (neu) berechnet werden (ESRI 2009). Für die MDA-Analysen wurden daher alle verwendeten Datensätze in einen Grid (im weiteren Text als MDA-Grid bezeichnet) zusammengefasst, wobei jeder Datensatz eine Spalte im VAT

einnahm. Zu den Einschränkungen des ESRI-Grid-Formats zählen allerdings die Limitierung des Dateinamens von Raster-Layern auf 9 Zeichen zur Zusammenfügung zu einem Grid sowie die maximale Anzahl von 20 Raster-Datensätzen, die zu einem Grid kombiniert werden können.

Aufgrund letzterer Einschränkung mussten die Analysen teilweise auf mehrere MDA-Grid-Dateigenerationen verteilt erfolgen oder Layer zusammen gefügt werden. Dies erfolgte ebenfalls im ESRI-Grid-Format, indem die jeweiligen Raster zunächst per *combine*-Befehl zusammengefügt wurden. Durch Selektion mittels SQL-Abfrage und *Field Calculator* wurden dann die einzelnen Klassifikationsergebnisse in eine neue Zielspalte übertragen. Mit dem *lookup*-Befehl ließen sich Zielspalten aus dem VAT in ein einzelnes Raster übertragen.

### 5.6.2 Aufbau des MDA-Grids

Das MDA-Grid bildete die Ausgangsbasis für alle MDA-GIS-Analysen von der jährlichen Feldfruchtableitung auf Ackerland bis hin zur Erzeugung der endgültigen jährlichen MDA-Landnutzung, so dass für gewöhnlich von Beginn an alle notwendigen Daten-Layer darin enthalten waren. Tabelle 5.4 stellt die typische Layer-Zusammensetzung (beziehungsweise Spalten) des VAT eines MDA-Grids für die jährliche Landnutzungsanalyse modellhaft dar. Die Reihenfolge war dabei unerheblich. Neben den Standardspalten Rowid, VALUE und COUNT, lassen sich die darin enthaltenen Layer zur Erläuterung ihrer Herkunft und ihrer unterschiedlichen Funktionen in verschiedene Gruppen einordnen. Zum einen umfasste das MDA-Grid stets die Klassifikationsergebnisse der Fernerkundungsanalysen der einzelnen Zeitschnitte (ZS). Die ZS wurden hierzu in ihrer Aufnahmereihenfolge durchnummeriert, wobei die Nummerierung nicht zwangsläufig dem Aufnahmezeitraum, aus dem die Fernerkundungsdaten stammten, entsprach. Die jeweiligen ALL- und FB-Ergebnisse eines ZS waren dabei entweder aus praktischen Gründen oder als Folge der begrenzten Anzahl an möglichen Eingangsrastern für das MDA-Grid teilweise separat, teilweise bereits zu einem Layer zusammengefügt vertreten (vgl. Kapitel 5.6.1). Zum anderen enthielt das MDA-Grid die Gruppe der Geobasis- und Fachdaten, die in der jeweiligen aufbereiteten Form, entweder auf eine oder mehrere VAT-Spalten verteilt waren. So umfassten beispielsweise die jährlichen Feldblöcke (FB), der CLC-Layer oder das OSM-Wegenetz jeweils eine Spalte, während die ATKIS-Raster-Ebenen (vgl. Kapitel 4.4.1) mehrere Spalten einnahmen. Auch bei dieser Gruppe führte die bereits angemerkte Beschränkung der Layer-Anzahl eines ESRI-Grids dazu, dass nicht immer alle Layer in der gleichen Form (je nach Bearbeitungsstand der MDA-Analysen) im MDA-Grid enthalten waren. Je nach Fortschritt der MDA-Analysen wurden daher Layer, die noch nicht oder nicht mehr benötigt wurden, ausgelassen. In anderen Fällen wurden mehrere Layer zu einem Layer (bzw. einer Spalte) zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Typische Layer-Zusammensetzung des MDA-Grids für die jährliche Landnutzungsanalyse.

VAT-Spalte	Erläuterung/Urprung	Funktion für MDA-Analysen	
Rowid	ESRI-Grid-Format spezifische Spalten		
VALUE			
COUNT			
ZS1ALL	Fernerkundungsklassifikationen (Zeitschnitte, ZS)	LU-Information	
ZS1FB			
ZS2ALLFB			
ZS3ALL			
ZS3FB			
ZSn			
FB	Feldblöcke	LU-Information/Stratifizierung	
VER01L02L	ATKIS-Straßennetz	LU-Information	oberste ATKIS-Raster-Ebene
VER03L	ATKIS-Bahnstrecke		
SIE03F	ATKIS-Bauwerke & Einrichtung	LU-Information	mittlere ATKIS-Raster-Ebene
VEG04F	ATKIS-Vegetationsmerkmal		
A3MERGE	flächenhafte & überschneidungsfreie ATKIS-Klassen	LU-Information/Stratifizierung	ATKIS-Raster-Grundebene
CLC06	Corine Land Cover 2006	LU-Information/Stratifizierung	
OSM	OpenStreetMap Straßen- & Schienennetz	LU-Information	
NR-REG	NR-Regionen (ehemals Naturr. Haupteinheiten)	Stratifizierung	
GRENZEN	Abgrenzung ATKIS & Untersuchungsgebiet	Stratifizierung	
SIE01F	ATKIS-Ortslage	Stratifizierung	
MDA-LU	MDA-LU-Zielspalte		

Die bisher genannten Gruppen dienten vornehmlich zu Entnahme von unterschiedlichen Landnutzungsinformationen. Mit den NR-Regionen, dem ATKIS-Layer SIE01F (*Ortslage*) und dem Layer GRENZEN enthielt das MDA-Grid eine weitere Gruppe von Layern, die zwar keine Landnutzungsinformationen im engeren Sinne trugen, aber für die MDA-Analysen von hoher Bedeutung waren. Wie auch einige Layer der zuvor beschriebenen Gruppe, dienten diese Layer während unterschiedlicher Phasen zur Stratifizierung des Untersuchungsgebiets nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, um einzelne Analyseschritte auf Regionen oder grundsätzliche Landnutzungskategorien eingrenzen zu können (vgl. Kapitel 2.4.2.1). So diente der Layer GRENZEN zur Unterscheidung der Bereiche des Untersuchungsgebiets in Deutschland von denen in den Niederlanden und Belgien, während Datenverschnidungen anhand des Layers NR-Regionen auf Naturräume beschränkt werden konnten.

Die Fruchtfolgenanalyse wurde ebenfalls auf Basis eines MDA-Grids durchgeführt. Dieses enthielt, im Unterschied zu den jährlichen MDA-Grids, die finalen MDA-Landnutzungs-klassifikationen der Jahre 2008-2010 anstatt der Zeitschnitte sowie alle jährlichen Feldblock-Layer zur Verknüpfung der Feldfruchtnutzung auf Ackerland. Weiterhin waren für die Fruchtfolgenanalyse die Layer GRENZEN, MDAREG, SIE01F, CLC06 und A3MERGE von Bedeutung.

### 5.6.3 Aufbau und Funktion der MDA-Produktionsregeln

Wie zuvor beschrieben, erfolgte die Erzeugung wissensbasierter MDA-Produktionsregeln (MDA-Regeln) in Form von SQL-Abfragen auf die VAT-Spalten des MDA-Grids. Diese Abfragen waren aus einem oder mehreren ‚Abfragegliedern‘ zusammengesetzt. Im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Inhalten der einzelnen Layer im MDA-Grid dienten die Abfrageglieder dazu, um Selektionen (Stratifizierungen) unter (hauptsächlich) thematischen (nach der Landnutzung) oder (vornehmlich) unter räumlichen Gesichtspunkten (nach einem Gebiet) durchzuführen. So ließ sich beispielsweise durch die nachfolgende Kombination eine Selektion von allen Zellen mit der Landnutzung *Winterweizen* im Zeitschnitt 1 (ZS1) durchführen, die sich zudem innerhalb des Abdeckungsbereichs der Bodennutzung *Ackerland* des Layers Feldblöcke (FB) befanden. Somit wurde der MDA-LU-Zielspalte die Landnutzung *Winterweizen* zugewiesen (*DANN*), *WENN* es sich um Ackerland handelte.

Typ 1: *SELECT FROM MDA-Grid WHERE:*

Abfrage			MDA-LU
ZS1 = <i>Winterweizen</i>	AND	FB = <i>Ackerland</i>	<i>Winterweizen</i>

In diesem Fall handelte es sich bei der Abfrage der Feldblock-Informationen vor allem um eine thematische Einschränkung. Durch die Kombination mit Abfragen auf die Layer GRENZEN oder NR-Regionen war eine zusätzliche räumliche Einschränkung möglich, wie im folgenden Beispiel auf die NR-Region 1 (vgl. Kapitel 5.6.2):

Typ 1: *SELECT FROM MDA-Grid WHERE:*

Abfrage				MDA-LU	
ZS1 = <i>Winterweizen</i>	AND	FB = <i>Ackerland</i>	AND	MDAREG = 1	<i>Winterweizen</i>

Durch die Kombination mehrerer Abfrageglieder, war folglich eine mehrfache Einschränkung unter verschiedenen Gesichtspunkten möglich. Der grundlegende Aufbau der MDA-Regeln war darüber hinaus von mehreren Faktoren wie der Art der betrachteten Landnutzungsinformation, der Weise der Verwendung von Informationen sowie der Datenabdeckung abhängig. Es konnten allerdings zwei grundsätzliche Typen von MDA-Regeln unterschieden werden. Die bisherigen Beispiele lassen sich dabei dem MDA-Regel-Typ 1 zuordnen, der zur direkten Übertragung von Landnutzungsinformationen aus einer Quellspalte in eine Zielspalte (für gewöhnlich die MDA-LU-Spalte) diente. Dabei wurde lediglich die Klassenbezeichnung an die MDA-Legende angepasst (vgl. Tabelle 6.17). Beim MDA-Regel-Typ 2 handelt es sich hingegen um Produktionsregeln zur Kombination von Informationen mehrerer Spalten, um eine (neue) Landnutzungsinformation beziehungsweise Landnutzungsklasse abzuleiten. Die nachfolgende Regel ermöglichte zum Beispiel eine weitere Präzisierung der ATKIS-Objektart



*Spielfeld* durch die Verschneidung mit der fernerkundungsbasierten Landnutzungsinformation *Grünland*, so dass dadurch die Landnutzung *Rasenplatz* a priori abgeleitet werden konnte.

Typ 2: *SELECT FROM MDA-Grid WHERE:*

Abfrage		MDA-LU
<i>ATKIS = Spielfeld</i>	AND	<i>ZS1 = Grünland</i>
		<i>Rasenplatz</i>

Aufgrund der jährlich etwas veränderten Zusammensetzung des MDA-Grids, infolge unterschiedlicher Fernerkundungsdaten und Klassifikationsergebnisse, erfolgte die Formulierung von MDA-Regeln gezielt für jede MDA-Analyse. Zur Strukturierung der Analysen und zur Formulierung der MDA-Regeln dienten dazu entwickelte Ablaufschemata und Entscheidungs- oder Ableitungstabellen. Diese Vorlagen bildeten damit die Wissensbasis zur Durchführung der jährlichen MDA-Landnutzungsanalysen sowie zur Fruchtfolgenanalyse und werden im Ergebniskapitel beziehungsweise im Falle der Feldfruchtableitung und Erzeugung der fernerkundungsbasierten Basislandnutzung (FE-Basis) in Kapitel 5.7 präsentiert und genauer erläutert.

Im Rahmen der Fruchtfolgenanalyse diente die Anwendung von Produktionsregeln zum einen der Selektion von „gültigen“ Zellen, die Feldfruchtclassen in den einzelnen jährlichen MDA-Landnutzungsclassifikationen enthielten. Zum anderen dienten Produktionsregeln zur Abfrage und (räumlichen) Identifizierung von Fruchtfolgen. Dabei wurde für jede Fruchtfolge eine eigene Produktions- beziehungsweise Identifizierungsregel formuliert.

## 5.7 MDA-Teil GIS: Feldfruchtableitung und Erzeugung der Basislandnutzung

Wie aus der grundsätzlichen Gliederung der MDA-Analysen am Anfang dieses Kapitels hervorgeht, diente der erste Teil der MDA-GIS-Analysen nach der Bildung des MDA-Grids vornehmlich der Übertragung oder Ableitung von Informationen zur Disaggregation der Landnutzung auf Ackerland. Zur besseren Eingrenzung des Ackerlandes wurden, soweit vorhanden, erneut die Informationen der Feldblock-Daten herangezogen. Darüber hinaus erfolgte in diesem Stadium auch die Übertragung fernerkundungsbasierter Informationen zu allen anderen Landnutzungskategorien, was die Erzeugung der FE-Basislandnutzung (FE-Basis) als Zwischenergebnis zum Ziel hatte. Im weiteren Text werden die Bezeichnungen von Landnutzungsclassen *kursiv* hervorgehoben.

Zur Disaggregation der Landnutzung auf Ackerland wurde die zur Planung der Fernerkundungsakquise entwickelte Modellvorstellung zur Phänologie von Feldfrüchten und

deren damit verbundenen Erscheinungen in multispektralen Fernerkundungsdaten (vgl. Kapitel 5.1) für die GIS-Analysen erneut aufgegriffen. Diese wurde nun eingesetzt, um die Feldfruchtverteilung auf Basis der multitemporalen Fernerkundungsklassifikationen (Zeitschnitte), zu bestimmen (vgl. Kapitel 5.4).

Neben der angestrebten direkten Klassifikation von Feldfrüchten zu definierten Zeitschnitten (ZS), in denen diese gut von anderen zu unterscheiden waren, wurde davon ausgegangen, dass sich die spezifische Phänologie der Feldfrüchte durch die gemeinsame Betrachtung der chronologischen Zeitschnitte in gewissem Maße nachvollziehen lässt (ODENWELLER & JOHNSON 1984, MURTHY et al. 2003). Dies hatte zum Ziel, Rückschlüsse auf die Feldfruchtnutzung ziehen zu können, falls die direkte Bestimmung anhand einer einzelnen Klassifikation, beispielsweise aufgrund einer zu hohen spektralen Ähnlichkeit zu anderen Feldfrüchten zum Zeitpunkt des ZS, nicht möglich war (vgl. ROHIERSE (2004)).

In Anlehnung an Verfahrensweisen wie von VAN NIEL & MCVICAR (2004) sah die entwickelte Methodik weiterhin vor, dass für Flächen (Parzellen), für die die Feldfrucht mit ausreichender Genauigkeit in einem ZS bestimmt wurde, die Klassifikationsergebnisse nachfolgender ZS in der Regel nicht mehr berücksichtigt wurden. Durch eine nacheinander erfolgende Bestimmung von Feldfrüchten und deren Verteilung im Untersuchungsgebiet, war somit auch eine sukzessive Reduktion von Flächen mit noch zu bestimmender Ackernutzung verbunden, bis für alle Flächen die Nutzung final bestimmt war. Allerdings waren zur besseren Abgrenzung jeweils alle in einer Szene vorkommenden Spektralklassen klassifiziert worden, um eine bessere räumliche Klassenabgrenzung zu erzielen. Aus diesem Grund wurden in einigen ZS auch Klassen für bereits geerntete Feldfrüchte vergeben.

Tabelle 5.5 stellt die modellhafte Grundlage zur Erstellung von Produktionsregeln dar. Die Regeln dienten sowohl zur Übertragung der Klassifikationsergebnisse der einzelnen ZS als auch zur Ableitung von Feldfruchtinformationen auf Basis der gemeinsamen Betrachtung von mehreren ZS. Tabelle 5.5 gibt darüber Auskunft, welche Feldfrüchte primär mit einem ZS aus einem bestimmten Aufnahmezeitraum erfasst werden sollten, beziehungsweise inwieweit eine Klassifikation für die Entnahme einer bestimmten Feldfruchtinformation geeignet war. Im Fall einer allgemein guten Eignung eines ZS, ist das Feldfruchtkürzel **fett** gedruckt und der Hintergrund der Zelle grau unterlegt. Anderenfalls bestehen eventuell hohe spektrale Ähnlichkeiten mit anderen Feldfrüchten, beziehungsweise die entsprechenden Feldfrüchte treten im ZS gewöhnlich nicht auf, so dass beispielsweise nur *unbedeckter Boden* (B) klassifiziert wird.

Tabelle 5.5: Analyseablauf und Grundlage zur Bildung von Produktionsregeln zur Ableitung der jährlichen Landnutzung auf Ackerflächen. Mit der Klassifikation von ZS1, wurde die Unterscheidung von Winterfrucht- (WF) und Sommerfrucht-Flächen (SF) ultimativ festgelegt. Danach wurden WF- und SF-Flächen grundsätzlich separat durch die Integration nachfolgender ZS weiter disaggregiert.

Aufnahmefenster (Zeitschnitt)	Mai (ZS1)		Juni	Juli	August	September	MDA-LU	
Feldfrucht	WR		Winterfrucht-Flächen (WF)	WR	B*	B*	B*	WR
	Wintergetreide	WW		WW	WW	B*	B*	WW
		WG		WG	B*	B*	B*	WG
	unbedeckter Boden (B)		Sommerfrucht-Flächen (SF)	B	B/M	M	M	M
				B	B/ZR	ZR	ZR	ZR
	B/KT			B/KT	KT/B*	KT/B*	KT/B*	KT
	B/SG			SG	SG	SG/B*	SG/B*	SG

Analyseablauf



Erläuterung:

Feldfruchtkürzel **fett** und graue Schattierung = geeigneter ZS für direkte Klassifikation

Feldfruchtkürzel normal = Klassifikation nicht oder nur eventuell möglich

B = unbedeckter Boden

B\* = abgeerntete Flächen

Zur Erläuterung der Feldfruchtkürzel siehe auch Tabelle 6.17

Der erste Zeitschnitt (ZS1) bildete für den Ablauf der jährlichen Landnutzungsanalyse in mehrfacher Hinsicht eine Art „Master-Zeitschnitt“. In Bezug auf die allgemeine Erfassung der jährlichen Landnutzung boten sich Klassifikationen aus dem Monat Mai an, um Landnutzungskategorien wie versiegelte Siedlungsflächen, Grünland, Ackerland, Laub- und Nadelwald sowie Gewässer grundsätzlich zu unterscheiden. Diese waren daher als Basis zur Integration von Landnutzungsinformationen nachfolgender ZS oder der Geobasisdaten gedacht, um die eventuell grobe Unterscheidung einiger Landnutzungen weiter zu präzisieren und Klassen zu disaggregieren. Hinsichtlich Ackerland war, aufbauend auf den in Kapitel 5.1 dargestellten Modellvorstellungen, mit ZS1 einerseits die Klassifikation von Winterraps (WR) und die Erfassung von Flächen mit Wintergetreide angedacht. Eine erfolgreiche Klassifikation von *Winterraps* (WR) in ZS1 führte dazu, dass diese Klasse den entsprechenden Zellen in der MDA-LU-Spalte des MDA-Grids bereits endgültig zugewiesen wurde. Eine Überschreibung dieser Zuweisung war nur im Fall einer nachfolgenden Klassifikation mit einer höheren Genauigkeit vorgesehen. Andererseits ließ sich mit der Klassifikation von zu diesem Zeitpunkt noch *unbedecktem Boden* (B) und gegebenenfalls früh angebauten *Kartoffeln* (KT) eine grundlegende Trennung von Flächen mit Winterfrüchten und mit Sommerfrüchten herbeiführen. Lediglich bei vergleichsweise früh entwickelter *Sommergerste* (SG) war aufgrund

der spektralen Ähnlichkeit zu Wintergetreide eventuell mit Unstimmigkeiten im Bereich der Eifel zu rechnen. Für den Großteil des Untersuchungsgebiets wurde hierdurch aber für den weiteren Analyseverlauf bereits festgelegt, ob es sich bei einer Fläche (beziehungsweise Pixel), um eine Winterfrucht-Fläche (WF) oder um eine Sommerfrucht-Fläche (SF) handelte (in Tabelle 5.5 durch die jeweils in fett dargestellte vertikale Linie nach ZS1 und die daran angrenzende horizontale Trennlinie symbolisiert). Folglich wurde die Unterscheidung von *Winterweizen* (WW) und *Wintergerste* (WG) mit nachfolgenden ZS ausschließlich auf WF-Flächen beschränkt. Falls eine direkte Unterscheidung von WW und WG aufgrund spektraler Unterschiede nicht erzielt wurde, ermöglichte somit ein ZS aus dem Juli-Aufnahmefenster eine nachträgliche Unterscheidung aufgrund des späteren Erntetermins von Winterweizen (vgl. Kapitel 5.1). Die Übertragung von Klassifikationsergebnissen für *Zuckerrüben* (ZR), *Kartoffeln* (KT) und *Mais* (M) aus späteren ZS war ebenso nur auf SF-Flächen einzugrenzen. Die Klassifikationen zum Beispiel von *Zuckerrüben* auf Bereichen, die als WF-Flächen festgelegt wurden, waren somit als Fehlklassifikation einzuschätzen.

Um möglichen Unstimmigkeiten bei der räumlichen Klassenverteilung infolge von zu hohen spektralen Ähnlichkeiten bestimmter Feldfrüchte zu begegnen (vgl. Kapitel 5.1), wurde zusätzlich der NR-Regionen-Layer eingesetzt (vgl. Abbildung 4.15). Dieser diente zur (*post-classification*-) Stratifizierung des Untersuchungsgebiets nach Naturräumen beziehungsweise Anbauregionen, um auf diese Weise Feldfrüchte für eine bestimmte Region ausschließen zu können (WHITE et al. 1995, HOMER et al. 2004). Darüber hinaus war die Hinzunahme von Gemeindegrenzen (Layer *Kommunales Gebiet* vgl. Kapitel 4.4.1) dazu bestimmt, um anhand der Verknüpfung mit Agrarstatistiken (vgl. Kapitel 3.4) Wahrscheinlichkeiten abzuleiten, in welchem Umfang Feldfrüchte in einer bestimmten Region angebaut werden. Die auf Tabelle 5.5 beruhenden Produktionsregeln umfassten daher üblicherweise Abfrageglieder zur Einschränkung zunächst auf Ackerflächen (beispielsweise durch die Feldblöcke). Daran anknüpfend erfolgte anhand der Klassifikationsergebnisse von ZS1 eine weitere Stratifizierung in SF- und WF-Flächen. Anschließend wurde die zu übertragende Feldfruchtverteilung eines bestimmten ZS abgefragt. Die folgende MDA-Regel diente beispielsweise zur Selektion von Bereichen mit *Winterweizen*, die in einem ZS aus dem zweiten Aufnahmefenster (vgl. Tabelle 5.1) klassifiziert wurden:

Typ 1: *SELECT FROM MDA-Grid WHERE:*

Abfrage							MDA-LU
<b>FB = Ackerland</b>	AND	<b>ZS1 = WF</b>	AND	<b>ZS2 = WW</b>	AND	<b>ZS1 &lt;&gt; WR</b>	WW

Dabei erfolgte ebenfalls, wie zuvor beschrieben, der Ausschluss von Zellen, die im vorangegangenen ZS bereits mit hoher Genauigkeit als *Winterraps* bestimmt wurden, um Fehlklassifikationen zwischen *Winterweizen* und *Winterraps* zu reduzieren.

## 6 Ergebnisse

Die Präsentation der Ergebnisse folgt weitestgehend der Reihenfolge, in der die Analysen durchgeführt wurden. Begonnen wird mit der Darstellung des Ergebnisses der Gegenüberstellung der Klassifikationsverfahren MLC und SVM, da dies Auswirkungen auf die nachfolgenden Fernerkundungsanalysen hatte. Im Anschluss werden die Ergebnisse der multitemporalen Fernerkundungsanalysen zur Feldfruchtableitung und zur Erzeugung der Basis-Landnutzungsklassifikation (FE-Basis) für die Jahre 2008, 2009 und 2010 erläutert und validiert. Diese Ergebnisse beruhen auf der in Kapitel 5.7 vorgestellten Vorgehensweise. Daran anknüpfend wird beschrieben, wie und auf welcher Grundlage die Integration der Landnutzungsinformationen aus den Datenätzen ATKIS, Feldblöcke, CLC und OSM in die jährliche FE-Basis erfolgte. Abschließend werden die Ergebnisse zur Fruchtfolgenanalyse 2008-2010 und zur Validierung der Landnutzungsprognose für 2011 vorgestellt.

### 6.1 Verwendung der Klassifikationsmethoden MLC & SVM

Bei den MDA-Fernerkundungsanalysen für das Jahr 2008 war, neben der Ableitung von Landnutzungsinformationen, der Vergleich der beiden pixelbasierten Klassifikationsverfahren MLC und SVM ein weiteres Ziel. Die Klassifikationsmethode, die die insgesamt besseren Ergebnisse ermöglichte, sollte für die Analysen der übrigen Jahre verwendet werden. Da in diesem Kapitel die Bewertung der beiden Klassifikationsmethoden im Vordergrund steht, wird an dieser Stelle hauptsächlich auf die Klassifikationsgüte der beiden Algorithmen eingegangen. Die genauere Betrachtung der verwendeten Fernerkundungsdaten der Systeme Landsat-5 (L5), Landsat-7 (L7), ASTER und IRS-P6 sowie der Klassifikationsergebnisse im Hinblick auf die erzeugten Landnutzungsinformationen erfolgt im nachfolgenden Kapitel. In die Gegenüberstellung der beiden Algorithmen wurden sowohl die Klassifikationsergebnisse der gesamten Szenen (ALL), als auch die Ergebnisse der ausschließlichen Klassifikation der Acker-Feldblock-Bereiche (FB) einbezogen. Die entsprechenden Datensätze sind im weiteren Text durch die entsprechenden Suffixe oder Präfixe gekennzeichnet. Wie in den Kapiteln 2.3.5.3 und 5.5.3 beschrieben, erfolgte die Bewertung der Klassifikationsgenauigkeit beider Algorithmen anhand von Fehlermatrizen (*Error Matrices*, EM), wobei die Übereinstimmung der Klassifikationen mit Referenzinformationen in Form von Testgebieten mit bekannter Klassenzugehörigkeit bestimmt wird. Neben der reinen Klassifikationsgenauigkeit wurden außerdem der visuelle Eindruck sowie die Klassifikationsdauer in die abschließende Bewertung der beiden Verfahren einbezogen. In Tabelle 6.1 sind jeweils die

Gesamtgenauigkeit (*Overall Accuracy*, OA) und der Kappa-Koeffizient für alle SVM- und MLC-ALL-Klassifikationen (vor der Post-Klassifizierungsfilerung) dargestellt. Die vollständigen EM aller Klassifikationen befinden sich in Anhang A. Tabelle 6.2 enthält die entsprechenden Genauigkeitswerte für die FB-Klassifikationen. Hierbei ist anzumerken, dass für die Landsat-7-Szene, aufgrund der eingeschränkten Datenqualität, nur Klassifikationen der FB-Bereiche durchgeführt wurden.

Tabelle 6.1: Overall Accuracy und Kappa-Koeffizient für die SVM- und MLC-ALL-Klassifikationen der Fernerkundungsdaten für 2008.

ALL	SVM		MLC	
	OA (%)	Kappa	OA (%)	Kappa
ASTER	92,04	0,91	90,85	0,89
IRS-P6	93,38	0,92	94,24	0,93
L5 (TM)	97,44	0,97	97,02	0,96

Wie die Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 zeigen, wurden mit beiden Klassifikationsmethoden, insgesamt hohe bis sehr hohe Genauigkeitswerte erzielt. Daher wurde zunächst geschlussfolgert, dass die Trainingsdaten die einzelnen Landnutzungsklassen im Allgemeinen gut repräsentierten.

Tabelle 6.2: Overall Accuracy und Kappa-Koeffizient für die SVM- und MLC-FB-Klassifikationen der Fernerkundungsdaten für 2008.

FB	SVM		MLC	
	OA (%)	Kappa	OA (%)	Kappa
ASTER	95,82	0,94	96,49	0,95
IRS-P6	81,81	0,77	77,23	0,71
L7 (ETM+)	89,30	0,87	87,27	0,84
L5 (TM)	94,49	0,93	93,19	0,91

Nur für die FB-Klassifikationen der IRS-P6-Daten wurde – vermutlich datenbedingt – jeweils eine etwas schlechtere Gesamtgenauigkeit errechnet. Wichtiger als die absolute Klassifikationsgüte, waren für den Methodenvergleich aber die berechneten Genauigkeiten pro Datensatz im Verhältnis zueinander. In dieser Untersuchung wurden für SVM in den meisten Fällen höhere OA berechnet. In zwei Fällen lieferte hingegen MLC geringfügig bessere Werte. Die größten Unterschiede bei der Klassifikationsgenauigkeit lagen mit 4,58 % bei den IRS-P6-FB-Klassifikationen. Alle weiteren Unterschiede befanden sich in Bereich von unter 1 % bis etwa 2 %, so dass sich die errechneten Klassifikationsgenauigkeiten (OA) im Schnitt um 1,58 % zwischen SVM und MLC unterschieden. Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass beide Algorithmen vergleichbare Genauigkeiten erzielten. Abbildung 6.1 zeigt das SVM- und das MLC-Ergebnis der ASTER-ALL-Klassifikation für das Subset des Untersuchungsgebiets östlich von Merzenich (vgl. Abbildung 3.1).



Abbildung 6.1: SVM- und MLC-ALL-Klassifikationsergebnis einer ASTER-Szene vom 05.05.2008 für das Subset Merzenich (vgl. Abbildung 3.1).

Auch bei der visuellen Begutachtung zeigte sich, dass beide Methoden insgesamt vergleichbare Ergebnisse produzierten. Nur bei genauer Betrachtung fallen Unterschiede bei der Klassenzuweisung auf. So ist die vollständige Unterscheidung von *Wintergerste*, *Winterweizen* und *Grünland* bzw. Grünflächen aufgrund der spektralen Ähnlichkeiten, wie bereits angesprochen, generell problematisch. Dies spiegelt sich auch in Abbildung 6.1 beispielsweise in der Bildmitte wieder, wo eine etwas unterschiedliche Zuweisung zu diesen Klassen zu erkennen ist.

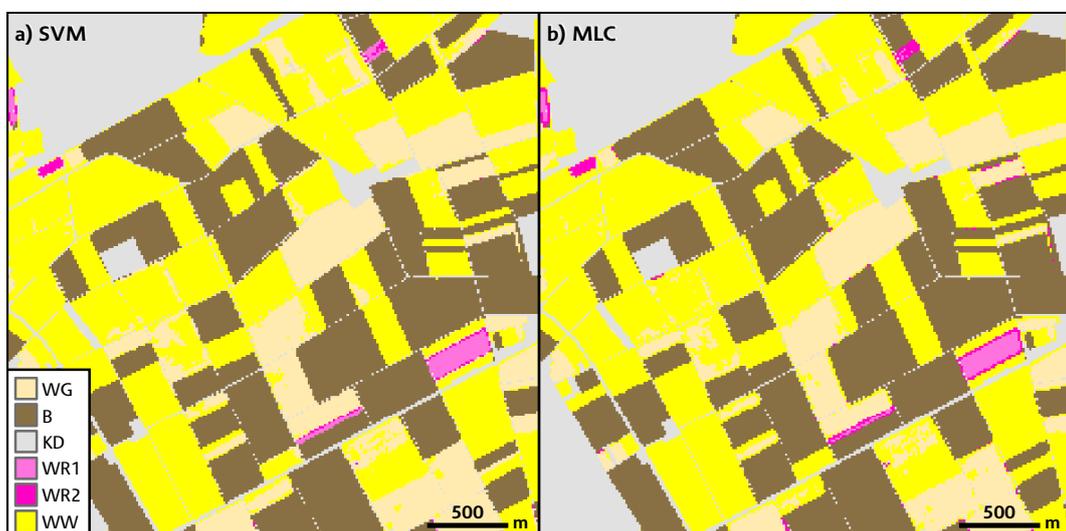


Abbildung 6.2: SVM- und MLC-FB-Klassifikationsergebnis einer ASTER-Szene vom 05.05.2008 für das Subset Merzenich (vgl. Abbildung 3.1).

Abbildung 6.2 zeigt die äquivalenten FB-Ergebnisse der SVM- und MLC-Klassifikationen. Die berechneten OA der Ergebnisse unterscheiden sich um weniger als ein Prozent, sowie beim Kappa-Koeffizienten um lediglich 0,01 Punkte. Durch die Reduzierung der zu klassifizierenden Landnutzungen auf die der Ackerflächen, zeigt sich bei der visuellen

Betrachtung dementsprechend ein noch ähnlicheres Bild. Auch die räumlichen Muster in Bereichen in denen beispielsweise die Trennung von *Winterweizen* und *Wintergerste* aufgrund der spektralen Ähnlichkeit problematisch war, sind in beiden Klassifikationen vergleichbar. Bezüglich der Klassifikation von Mischpixeln im Bereich von Nutzungsgrenzen sind bei der SVM-Klassifikation allerdings etwas weniger einzelne oder kleinere Gruppen von Pixeln sichtbar, die willkürlich einer Klasse zugeordnet erscheinen, und damit nicht einer der vorherrschenden angrenzenden Klassen entsprachen. Deutliche Unterschiede zwischen beiden Klassifikationsverfahren ergaben sich allerdings bei der Berechnungszeit. Die SVM-Klassifikationen dauerten auf dem für diese Arbeit verwendeten Desktop-Rechner je nach Datensatz durchschnittlich mehrere Stunden, wohingegen die MLC-Klassifikation nur maximal einige Minuten zur Berechnung benötigte. So betrug die Berechnungszeit der MLC-ALL-Klassifikation der ASTER-Szene vom 05.05.2008 mit 55 Sekunden unter einer Minute. Die Berechnung der entsprechenden SVM-Klassifikation dauerte hingegen 1 Stunde und 54 Minuten. Da in der Regel mehrere Klassifikationsversuche notwendig waren bis ein endgültiges Ergebnis vorlag, führte dies in der Praxis zu einem deutlichen erhöhtem Zeitaufwand, auch wenn während der Trainingsphase nur Teilgebiete einer Szene klassifiziert wurden. In Bezug auf die Klassifikation von Mischpixeln an Nutzungsgrenzen konnte, anhand der visuellen Begutachtung der Ergebnisse, dem SVM-Verfahren die insgesamt etwas bessere Generalisierungsfähigkeit bescheinigt werden. Dies wird auch in der Literatur oftmals als ein positives Merkmal dieses Verfahrens genannt (MELGANI & BRUZZONE 2004, CHI et al. 2008, DIXON & CANDADE 2008). Aufgrund der Ergebnisse früherer Vergleichsstudien von DIXON & CANDADE (2008) oder von HUANG et al. (2002), war im Vorfeld dieses Vergleichs jedoch eine größere Diskrepanz zwischen den Klassifikationsgenauigkeiten beider Verfahren zu Gunsten der SVM-Methode erwartet worden. Im Gegensatz dazu waren die Ergebnisse beider Verfahren in dieser Arbeit, vor allem bei den FB-Klassifikationen sehr ähnlich. Infolge der bedeutend längeren Berechnungszeiten der SVM-Klassifikationen relativierte sich die nachgesagte Überlegenheit dieses Verfahrens gegenüber MLC für diese Arbeit. Daher wurde geschlussfolgert, dass, sofern zuvor eine sorgfältige Auswahl der Trainingsgebiete erfolgte, durch die Verwendung unterschiedlicher Klassifikationsverfahren, keine grundlegenden Unterschiede bei der Erfassung der Landnutzung zu erwarten waren. Dieses Ergebnis untermauert die Einschätzungen von HIXSON et al. (1980), RICHARDS & JIA (2006), CAMPBELL & WYNNE (2011) oder LILLESAND et al. (2008), die die Qualität der Trainingsdaten oftmals als wichtiger bewerten, als die Wahl des Klassifikationsverfahrens. In Bezug auf die weitere Verwendung der beiden Klassifikationsverfahren wurde daher entschieden, dass für die Datensätze der Jahre 2009 und 2010 zunächst eine Klassifikation anhand des MLC-Verfahrens durchgeführt wurde. Falls mit diesem Verfahren allerdings kein endgültig zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wurde, erfolgte die Klassifikation alternativ mit SVM. Das bessere Klassifikationsergebnis wurde anschließend weiterverwendet. Ausschlaggebend waren



hierbei neben der OA und dem Kappa-Wert, auch die PA und UA besonders wichtiger Landnutzungsklassen sowie auch der visuelle Eindruck der Klassifikationen.

## 6.2 Ergebnisse der MDA-Fernerkundungsanalyse 2008

Bei der Darlegung der Ergebnisse der Landnutzungsanalyse für das Jahr 2008 wird zunächst mit der Präsentation der ausgewählten Fernerkundungsdaten begonnen, da die verfügbare Datengrundlage und die daraus resultierenden Zeitschnitte (ZS) einen grundlegenden Einfluss auf den Analyseverlauf und die nachfolgenden Ergebnisse hatten. Anschließend werden die ausgewählten Einzelklassifikationsergebnisse dargestellt, die in den VAT des MDA-Grids aufgenommen wurden. Daran anknüpfend erfolgte die Beschreibung der wesentlichen Kriterien für Produktionsregeln zur Ableitung der finalen MDA-Landnutzungsklassen für Ackerland (Feldfrüchte) sowie zur Erzeugung der vornehmlich auf Fernerkundungsdaten beruhenden MDA-Basis-Landnutzungskarte (FE-Basis) für 2008. Abschließend wird das Ergebnis der ortsbezogenen Evaluierung für Ackerland dargestellt. Diese Abfolge der Präsentationen der Ergebnisse wiederholt sich für 2009 und 2010.

### 6.2.1 Fernerkundungsdatenabdeckung 2008

Für die Fernerkundungsanalysen des Jahres 2008 wurden Satellitendaten von vier unterschiedlichen Aufnahmetermen sowie von vier unterschiedlichen Sensorsystemen verwendet. Leider konnte nur durch das Zurückgreifen auf mehrere Sensoren eine ausreichende räumliche und vor allem zeitliche Abdeckung erzielt werden.

Tabelle 6.3: Fernerkundungsdaten der MDA-Landnutzungsanalyse des Jahres 2008.

Sensor	Datenprodukt	Aufnahmedatum	Zeitschnitt (ZS)
ASTER (VNIR)	L1B	05. Mai	1
IRS-P6 (LISS III)	Super Structure	10. Juni	2
Landsat-7 (ETM+)	L1T	15. Juli	3
Landsat-5 (TM)	CEOS	09. September	4

Tabelle 6.3 fasst die ausgewählten Szenen mit Sensorsystem, Aufnahmedatum und Datenprodukt zusammen. Die einzelnen Szenen bilden in ihrer Aufnahmereihenfolge auch die Zeitschnitte (ZS) für die Landnutzungsanalysen. Abbildung 6.3 stellt die ausgewählten Szenen sowie den jeweils abgedeckten Bereich des Untersuchungsgebiets dar. Ein Mosaik aus drei ASTER-Aufnahmen (Datenprodukt: L1B) vom 05. Mai 2008 bildet Zeitschnitt 1 (ZS1). Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, wurde nicht das gesamte Rureinzugsgebiet abgedeckt, so dass für

den Südosten im Bereich um Nettersheim und Blankenheim keine Daten vorlagen. Außerdem wurde ein kleiner Bereich im Osten bei Zülpich nicht erfasst.

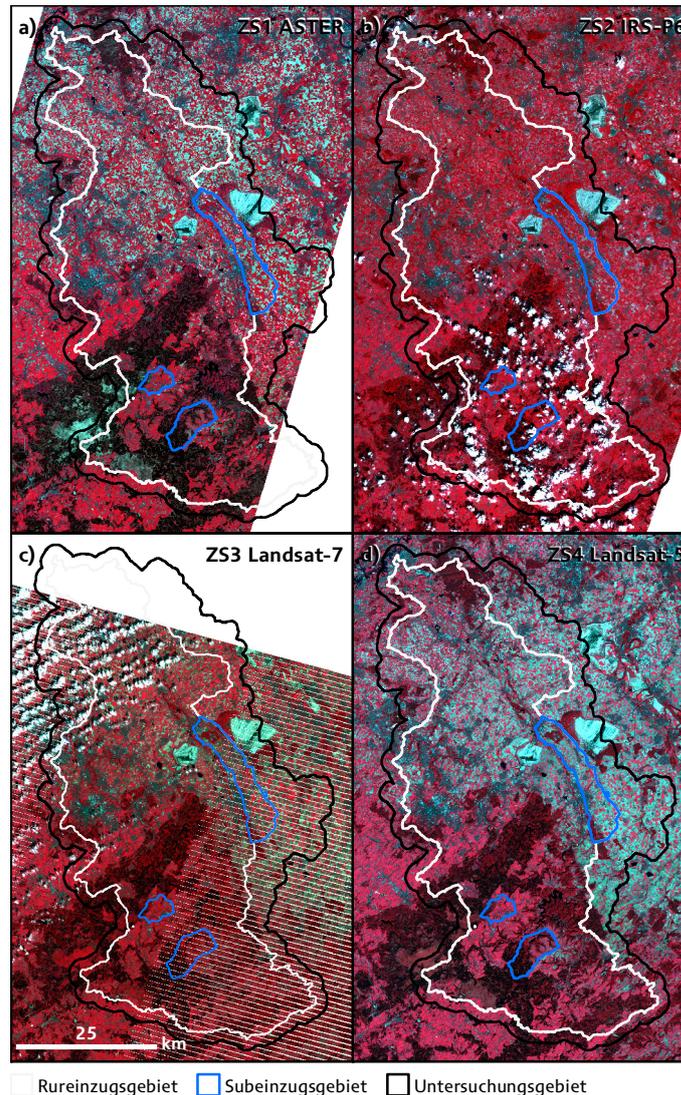


Abbildung 6.3: Fernerkundungsdatenabdeckung der MDA-Landnutzungsanalyse 2008, bestehend aus vier Zeitschnitten (Datenquellen: USGS 2008, Euromap 2008).

Als Zeitschnitt 2 (ZS2) wurde eine IRS-P6-Szene vom 10. Juni 2008 ausgewählt. Diese Szene deckte das Untersuchungsgebiet, bis auf einen sehr kleinen Bereich im Südosten, vollständig ab. Die Qualität der Aufnahme ist allerdings vor allem im Bereich der Eifel durch Bewölkung und Wolkenschatten sehr stark beeinträchtigt. Aus Mangel an Alternativen für dieses Zeitfenster, wurde dennoch auf diese Szene zurückgegriffen. Für Zeitschnitt 3 (ZS3) wurde eine Landsat-7-Szene vom 15. Juli 2008 genutzt. Besonders im nordwestlichen Teil (im Bereich Selfkant) ist die Szene durch starke Bewölkung gekennzeichnet. Zudem wird der äußerste Norden des Untersuchungsgebiets nicht von der Szene abgedeckt. Bereiche mit starker Bewölkung wurden daher ausmaskiert. Darüber hinaus sind alle Landsat-7-Szenen ab 2003, wie bereits in Kapitel 3.2.2 erläutert, durch streifig angeordnete Datenlücken gekennzeichnet. Diese Lücken wurden zwar mittels Interpolationsverfahren bei der

Datenaufbereitung geschlossen (vgl. Kapitel 4.3.3). Bei sehr heterogenen Gebieten mit kleinräumigen Nutzungsänderungen (z.B. Siedlungsbereiche) waren Interpolationsartefakte jedoch deutlich sichtbar. Aus diesem Grund erfolgte für diesen ZS lediglich die FB-Klassifikation. Auch für diesen Aufnahmezeitraum konnte keine besser geeignete Szene gefunden werden. Die Szene wurde daher mit der Erwartung in die Analysen einbezogen, dass für unbeeinträchtigte Bereiche dennoch nützliche Feldfruchtinformationen zu entnehmen sind. Eine Landsat-5-Aufnahme vom 09. September 2008 bildet Zeitschnitt 4 (ZS4). Sie deckt das Untersuchungsgebiet vollständig und wolkenfrei ab. Somit wurde lediglich mit dieser Szene eine vollständige räumliche Abdeckung erreicht.

### 6.2.2 Ausgewählte Klassifikationen 2008

Mit Ausnahme der Landsat-7-Daten wurde für alle ZS jeweils das gesamte Untersuchungsgebiet (ALL) und Ackerland auf Basis der Feldblöcke (FB) mit den beiden Klassifikationsverfahren MLC und SVM klassifiziert (vgl. Kapitel 6.1). In Tabelle 6.4 sind davon die Klassifikationen mit OA und Kappa-Koeffizient aufgeführt, die für die einzelnen Zeitschnitte in die Produktion der finalen MDA-Landnutzungsklassifikation eingeflossen sind (die EM der einzelnen Klassifikationsergebnisse befinden sich in Anhang A).

Tabelle 6.4: Für die MDA-Analyse 2008 ausgewählte Klassifikationen. Für 2008 wurden ausschließlich SVM-Klassifikationsergebnisse verwendet.

<b>Zeitschnitt</b>	<b>Aufnahmedatum</b>	<b>Sensor</b>	<b>Gebiet</b>	<b>Verfahren</b>	<b>OA (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>EM</b>
1	05.05.2008	ASTER	ALL	SVM	92,04	0,91	A.2
			FB		95,82		
2	10.06.2008	IRS-P6 (LISS III)	ALL	SVM	93,38	0,92	A.6
			FB		81,81		
3	15.07.2008	L7 (ETM+)	FB	SVM	89,30	0,87	A.10
4	09.09.2008	L5 (TM)	ALL	SVM	97,44	0,97	A.12
			FB		94,49		

Bezüglich der FB-Klassifikation der ASTER-Daten wurde nach visueller Begutachtung der Klassifikationsergebnisse das SVM-Ergebnis gewählt, obwohl für die MLC-Klassifikation eine um 0,67 % höhere Gesamtgenauigkeit berechnet wurde. Ebenso wurde für ZS2 die ALL-SVM-Klassifikation der IRS-P6-Szene gewählt, obwohl auch hier die entsprechende MLC-Klassifikation eine um 0,86 % bessere Gesamtgenauigkeit hatte. In beiden Fällen ist dies damit zu begründen, dass vor allem an Nutzungsgrenzen, wie bereits angesprochen, das SVM-Verfahren oftmals eine plausiblere Klassenzuordnung erzeugte (vgl. Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2). Da sich die berechneten Genauigkeiten nur sehr geringfügig unterschieden,

wurde diese Auswahl als zulässig erachtet. Abgesehen von einzelnen Ausnahmen, wurden die ALL- und FB-Klassifikationen der einzelnen Zeitschnitte bei der nachfolgenden Datenverschneidung (auch für die Jahre 2009 und 2010) als ein Daten-Layer betrachtet. Die durch die FB-Klassifikationen abgedeckten Bereiche ersetzten dabei die entsprechenden Bereiche in den ALL-Klassifikationen, die somit verworfen wurden. Bei der Beschreibung der Klassifikationsergebnisse für Ackerflächen in Deutschland stehen daher die FB-Ergebnisse im Vordergrund. In Bezug auf die Gesamtheit der durch Fernerkundung erfassten Landnutzungskategorien wurden bei den ALL-Klassifikationen, abgesehen von den diversen Ackerfrüchten, *Grünland* und Ackerflächen mit *unbedecktem Boden*, in der Regel noch die Klassen *versiegelte Flächen* (inklusive Straßen und Gebäuden), *Laub-* und *Nadelwald*, *Moor*, *Gebölz* (spärlich mit Vegetation bedeckte Flächen, ähnlich der Objektart *Gebölz* des ATKIS) und *Gewässer* unterschieden. Eine weitergehende Unterscheidung von Landnutzungen war anhand der Datengrundlage nicht möglich. Darüber hinaus konnten schlechte Genauigkeitswerte von spektralen Subklassen, die auf eine minderwertige Trennung innerhalb einer Informationsklasse zurückzuführen waren, in der Regel ignoriert werden, da sie nach Abschluss der Klassifikation zu einer Klasse zusammengefügt wurden. Die Klassifikation der Klassen *Laub-* und *Nadelwald*, *Gewässer* und *versiegelte Flächen* erfolgte dabei in der Regel mit einer hohen Genauigkeit. Residuale Fehlklassifikationen, die bei diesen Landnutzungsklassen außerhalb von Ackerflächen nicht weiter reduziert werden konnten, wurden zunächst vernachlässigt, da eine spätere Korrektur durch die Verschneidung mit den Geobasisdaten erfolgen konnte. Bei der Beschreibung der Klassifikationsgenauigkeiten liegt der Fokus daher auf den Nutzungsklassen zum Ackerland.

Abbildung 6.4 zeigt jeweils einen Ausschnitt der ausgewählten ALL-Klassifikationen für die vier ZS für einen Bereich des Untersuchungsgebietes östlich von Merzenich. Für ZS3 wurde keine ALL-Klassifikation durchgeführt. Während die EM auf den ursprünglichen Klassifikationsergebnissen beruhen, wurden für die Darstellung der Klassifikationen in den Abbildungen gegebenenfalls die einzelnen Spektralklassen einer Informationsklasse bereits zusammengefügt. Darüber hinaus wurde die Post-Klassifizierungsfilterung bereits angewendet. Abbildung 6.5 stellt die entsprechenden FB-Klassifikationsergebnisse dar, welche die Klassifikationsergebnisse der ALL-Klassifikationen für die deutschen Ackerflächen vollständig ersetzten. Neben den Klassen *versiegelte Flächen*, *Laub-* und *Nadelwald*, *Gebölz*, *Moor* und *Gewässer* wurde in ZS1 auf Ackerflächen *Winterweizen*, *Wintergerste*, *Winterraps* sowie *unbedeckter Boden* (potentiell Sommerfrucht-Flächen) klassifiziert. Wie in der entsprechenden EM (vgl. Tabelle A.4) zu sehen, bestanden bei der FB-Klassifikation trotz der guten OA von über 95 % dennoch eine gewisse Überschneidungen zwischen *Winterweizen* und *Wintergerste* sowie zwischen *Wintergerste* und *Winterraps*. Die UA aller Klassen lag jedoch jeweils über 88 % und erreichte teilweise 100 %.

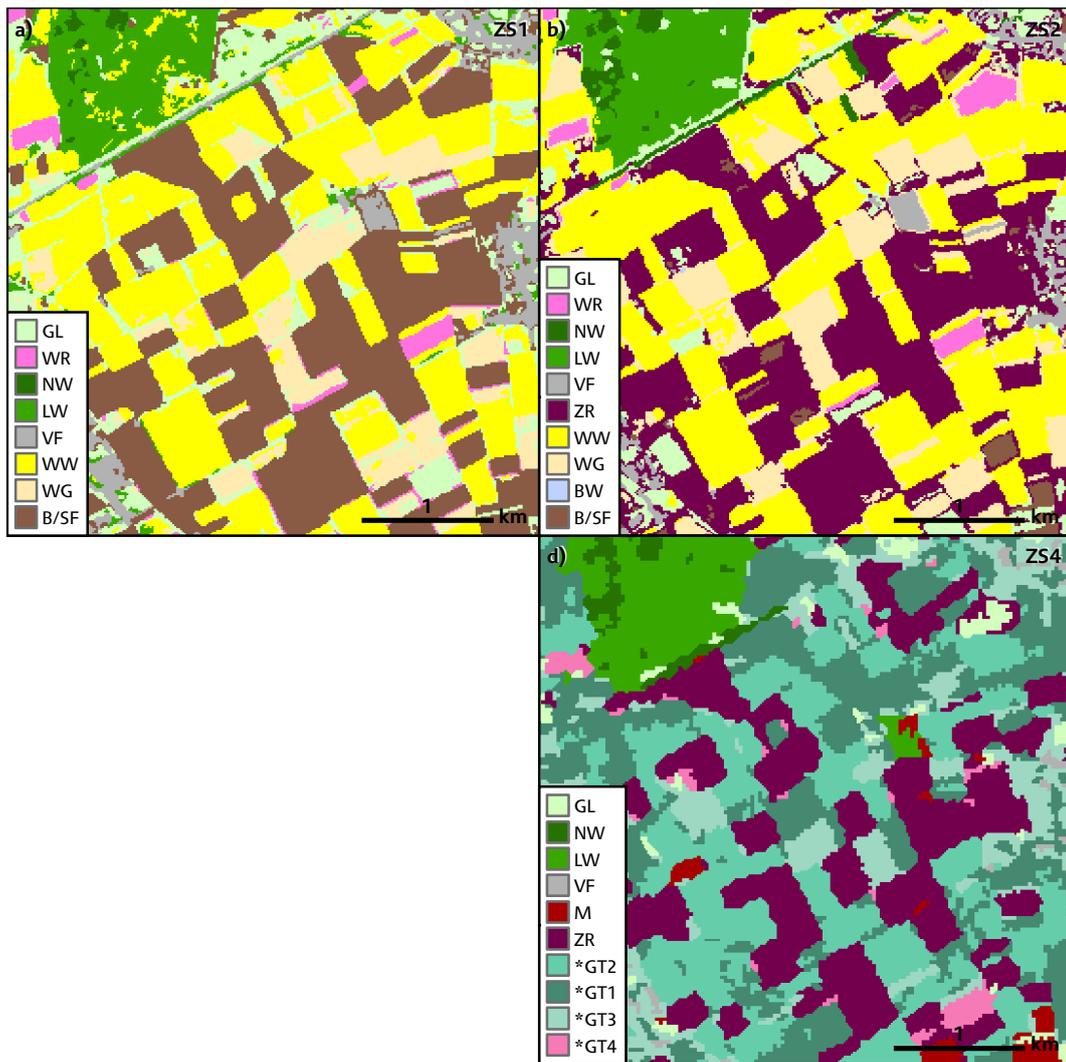


Abbildung 6.4: ALL-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2008 (alle SVM) für das Subset Merzenich (vgl. Abbildung 3.1). Für ZS3 wurde keine ALL-Klassifikation erstellt. Mit \* markierte Feldfrüchte waren zum Aufnahmezeitpunkt bereits geerntet.

Im Vergleich zur ALL-Klassifikation (vgl. Tabelle A.2) konnte die Genauigkeit von *Wintergerste* mit der FB-Klassifikation jedoch deutlich gesteigert werden. In der ALL-Klassifikation wurden, neben der Fehlklassifikation als *Winterweizen*, fast 30 % der entsprechenden Testgebiete als *Grünland* klassifiziert. Erwartungsgemäß konnte anhand von ZS1 insgesamt eine hohe Genauigkeit bei der Unterscheidung von Flächen mit *unbedecktem Boden* (Hack-/Sommerfrüchte) und Winterfrucht-Flächen erreicht werden. Die visuelle Betrachtung offenbarte jedoch Fehlklassifizierungen zwischen *unbedecktem Boden* und *versiegelten Flächen* in Siedlungsbereichen sowie die Klassifizierung von Getreideklassen außerhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche wie zum Beispiel innerhalb von Waldgebieten (vgl. Abbildung 6.4a). Auch die unvollständige Trennung von *Grünland* und Getreide war bei der visuellen Betrachtung sichtbar. Dies spielte allerdings nur für Bereiche außerhalb der Abdeckung der Feldblöcke und der ATKIS-Daten eine Rolle.

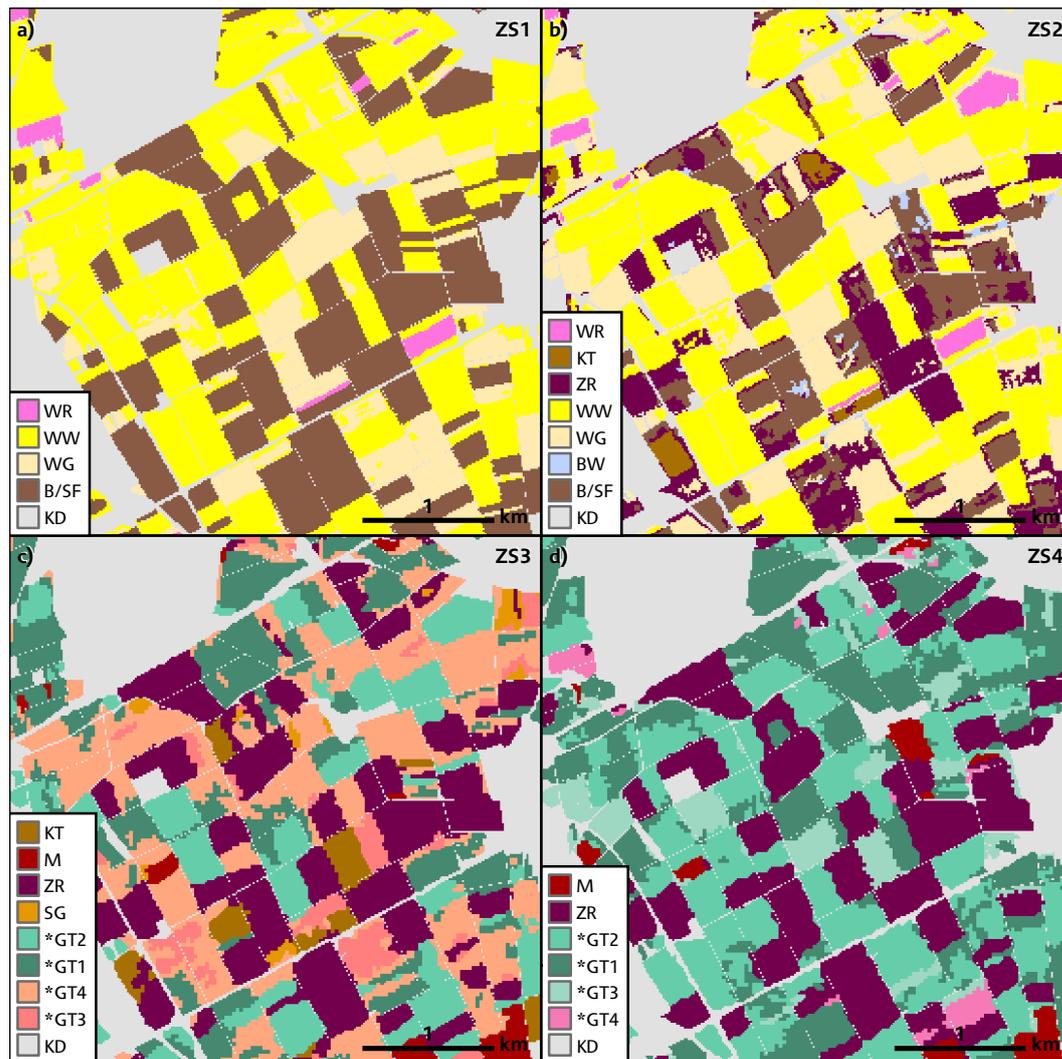


Abbildung 6.5: FB-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2008 (alle SVM) für das Subset Merzenich (vgl. Abbildung 3.1). Mit \* markierte Feldfrüchte waren zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits geerntet.

Im Fall der IRS-P6-Daten für ZS2 führte die verminderte Datenqualität vor allem bei der FB-Klassifikation zur Beeinträchtigung der Gesamtgenauigkeit. Angesichts der weiter fortgeschrittenen Entwicklung der Vegetation von etwa fünf Wochen gegenüber ZS1, wurde mit ZS2 vor allem für die unbewölkten Bereiche eine verbesserte Trennung des Wintergetreides sowie eine erste Untergliederung von Sommerfrüchten auf zuvor noch unbewachsenen Ackerflächen angestrebt. Dementsprechend wurden die Klassen *Zuckerrüben* und *Kartoffeln* zur Klassifikation hinzugefügt. Des Weiteren erfolgte die Klassifikation von *Bewölkung*, da sich gegen eine Ausmaskierung der betroffenen Bereiche entschieden wurde. Dies hatte zur Folge, dass Bereiche im Wolkenschatten fälschlicherweise überwiegend als Gewässerflächen klassifiziert wurden. Darüber hinaus traten an den Wolkengrenzen saumartige Fehlklassifikationen, vermutlich aufgrund der dort stark variierenden Reflektionseigenschaften, auf. Bezüglich der Unterscheidung von Hackfrüchten zeigte die visuelle Betrachtung als auch die EM (vgl. Tabelle A.8), dass zu diesem Zeitpunkt keine zufriedenstellende Trennung von Flächen mit noch vornehmlich *unbedecktem Boden* und

*Zuckerrüben* möglich war. *Kartoffeln* wurden hingegen gut unterschieden. Allerdings konnten in der Börde nur relativ wenige Flächen überhaupt als *Kartoffeln* klassifiziert werden. Auch aus diesem Grund wurde die relativ häufige Klassifikation von *Kartoffeln* in Bereichen der Eifel nahe der Subeinzugsgebiete Kall und Erkenruhr als fragwürdig eingeschätzt. Ähnlich wie bei der ASTER-Szene wurden zudem *unbedeckter Boden* und *Zuckerrüben* vermehrt in Siedlungsbereichen fehlklassifiziert. Ebenso zeigten sich erneut starke Überschneidung von *Winterweizen* und *Wintergerste* zugunsten von Winterweizen sowie die Klassifizierung von (sehr wahrscheinlich) *Laubwald* als *Winterweizen* in der ALL-Klassifikation (vgl. Tabelle A.6).

Als ZS3 diente die SVM-Klassifikation der L7-Szene auf Basis der Feldblöcke mit einer OA von 89,31 %. Aufgrund der Stärke der Bewölkung wurde sich bei dieser Szene zur Ausmaskierung der entsprechenden Bereiche entschieden. Somit stand für diesen ZS zusätzlich das Gebiet etwa nordwestlich der Linie Alsdorf-Titz nicht zur Verfügung. Zum Aufnahmezeitpunkt der Szene war Wintergetreide und Winterraps bereits weitestgehend totreif oder geerntet. Um die entsprechenden Flächen von anderen Nutzungen abzugrenzen, wurden mehrere Klassen anhand der unterschiedlichen Erscheinung der geernteten Flächen erzeugt. Das Hauptaugenmerk lag bei dieser Klassifikation auf der Klassifizierung von *Kartoffeln*, *Zuckerrüben*, *Mais* und *Sommergerste*. Wie die entsprechende EM (vgl. Tabelle A.10) zeigt, kam es vor allem zwischen den Klassen für bereits geerntete Flächen zu deutlichen Fehlzugeisungen. Da diese Klassen jedoch nicht in die finale Landnutzungskarte einfließen, war dies vernachlässigbar. Die visuelle Betrachtung deutete zwar auf eine plausible Unterscheidung zusammenhängender Flächen von *Mais* und *Zuckerrüben* hin. Laut EM wurden jedoch etwa 20 % der Testpixel von *Mais* als *Zuckerrüben* klassifiziert. Sehr gut konnten hingegen *Kartoffeln* klassifiziert werden. Auch *Sommergerste* wurde in ZS3 gut von *Kartoffeln* unterschieden. Mit anderen Klassen bestanden allerdings einige Überschneidungen, sodass etwa 18 % der Testpixel für *Braugerste* fehlklassifiziert waren.

ZS4 bestand wieder aus einer ALL- und einer FB-Klassifikation. Wie auch schon beim dritten ZS wurden Flächen, auf denen vormals Wintergetreide oder Winterraps stand, durch entsprechende „Ersatzklassen“ abgegrenzt. Fehlzugeisungen innerhalb dieser Klassen waren erneut vernachlässigbar. Laut EM (vgl. Tabelle A.14) erfolgte mit der FB-Klassifikation eine sehr gute Unterscheidung von *Zuckerrüben* und *Mais*. In Bezug auf das Ergebnis der ALL-Klassifikation offenbarte die visuelle Betrachtung jedoch vereinzelte und eher unwahrscheinliche Klassifikationen von *Mais* innerhalb von Waldflächen. Für alle weiteren Klassen wurden insgesamt hohe bis sehr hohe Genauigkeiten berechnet. Allerdings war, wie auch bei der L7-Klassifikation, deutlich zu erkennen, dass die zugrundeliegenden Fernerkundungsdaten ursprünglich eine räumliche Auflösung von 30 m hatten und daher etwas gröber wirkten.

### 6.2.3 Produktion der fernerkundungsbasierten MDA-Landnutzungs-Basis-Karte 2008

Im Folgenden werden die wichtigsten Analyseschritte erläutert, die zur Ableitung der finalen Ackerlandnutzung (auf Grundlage der Acker-Feldblöcke) durch die Synthese der einzelnen Zeitschnitte nötig waren und die zur Erzeugung der fernerkundungsbasierten MDA-Basis-Landnutzungskarte 2008 (FE-Basis) als Zwischenergebnis führten. Für den Ablauf der Produktion der FE-Basis für 2008 war die unterschiedliche räumliche Abdeckung des Untersuchungsgebiets in den einzelnen ZS maßgebend. Die Bearbeitung wurde daher neben der geplanten Stratifizierung nach NR-Regionen, in Abhängigkeit von der Fernerkundungsdatenabdeckung, zusätzlich in drei Teilbereiche gegliedert. Ebenso erfolgte die Verschneidung der ZS in den Gebieten außerhalb Deutschlands, aufgrund der dort fehlenden Abgrenzung von Ackerflächen anhand der Feldblöcke, für einige Landnutzungsklassen separat.

Für den Großteil des Untersuchungsgebiets diente, wie geplant, ZS1 (ASTER-Klassifikationen) als Grundlage in welche die Informationen der übrigen ZS integriert wurden. Die Klassifikationsergebnisse von ZS1 wurden daher zunächst vollständig in die Ziel-Spalte im VAT des MDA-Grids übertragen. Für Bereiche, für die keine ASTER- aber IRS-P6-Daten (ZS2) vorlagen, dienten letztere Daten als Grundlage. Für einige wenige kleine Bereiche, die von keinen der beiden Datensätze abgedeckt wurden, stellten die L5-Daten (ZS4) die Ausgangsbasis dar. Wie im Falle der ASTER-Daten wurden die IRS-P6- beziehungsweise L5-Klassifikationsergebnisse zunächst vollständig für die entsprechenden Bereiche übernommen. Bezüglich des Potentials Landnutzungsinformationen durch die Verschneidung mehrerer ZS abzuleiten, ergaben sich somit drei unterschiedliche Bereiche. Abbildung 6.6 zeigt die unterschiedlichen Bereiche der Datenabdeckung. Für Bereich 3 waren nur Informationen auf Basis der L7- und L5-Daten verfügbar. Bereich 2 wurde zusätzlich von den IRS-P6-Daten abgedeckt und für Bereich 1 standen alle ZS zur Verfügung. Die Erläuterung der Verfahrensweise erfolgt allerdings nicht chronologisch, sondern fasst die wesentlichen Operationen nach den abgegrenzten Gebieten und den einzelnen Klassen zusammen.

In Bereich 3 wurden zunächst alle Informationen zu Sommerfrüchten aus der FB-Klassifikation aus ZS3 übertragen. Dies beinhaltete die Klassen *Kartoffeln*, *Mais*, *Zuckerrüben* und *Braugerste*. Zur Präzisierung der Erfassung von *Kartoffeln* und *Mais* wurden die entsprechenden Informationen mit den Klassifikationsergebnissen von ZS4 ergänzt. Aufgrund des Datenmangels konnte die Erfassung von Wintergetreide nur indirekt über die Klassifikation bereits geernteter Flächen erfolgen. Da es sich nur um eine sehr geringe Anzahl an betroffenen Flächen handelte, wurden sie der in dieser Region hauptsächlich vorkommenden Klasse *Winterweizen* zugeordnet.



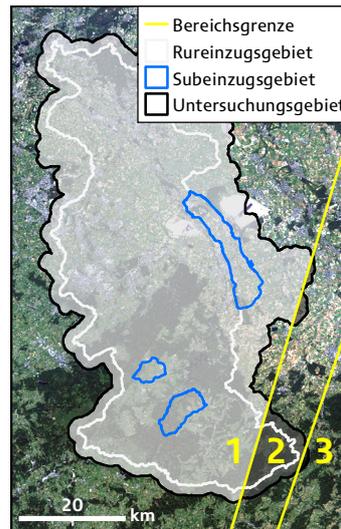


Abbildung 6.6: Analysebereiche der MDA-Landlandnutzungsanalyse 2008, die sich aufgrund der Fernerkundungsdatenabdeckung für die Verschneidung von Klassifikationsergebnissen ergaben (Hintergrund: Landsat-8, USGS 2013.)

Für den Bereich 2 dienten im Allgemeinen die Landnutzungsinformationen aus ZS2 als Grundlage für die Integration weiterer ZS. Da dieser ZS jedoch infolge von Bewölkung Bereiche mit unbrauchbaren Informationen aufwies, wurden die entsprechenden Lücken mit Daten aus ZS4 ergänzt. Die Trennung von Flächen mit Winterfrüchten (Wintergetreide, *Winterraps*) und Sommerfrüchten (*Braugerste*, *Hackfrüchte*) wurde ebenfalls anhand von ZS2 vorgenommen. Die Klassen *Winterweizen*, *Wintergerste* und *Winterraps* stammten in Bereich 2 ausschließlich aus ZS2, da keine weiteren Daten zur Verfügung standen. Zur Disaggregation der Sommerfrucht-Bereiche wurden als *Mais* und als *Zuckerrüben* klassifizierte Flächen kombiniert aus ZS3 und ZS4 übernommen. Die Verbreitung von *Kartoffeln* setzte sich aus der Kombination von ZS2 und ZS3 zusammen. Die als *Sommergerste* ausgewiesenen Bereiche entstammten ZS3. Der Vergleich von ZS2 und ZS3 offenbarte allerdings, dass in einigen Bereichen, wie NR-Region 4, hohe spektrale Ähnlichkeiten von *Sommergerste*, *Kartoffeln* und *Zuckerrüben* zum Zeitpunkt der Aufnahmen bestanden. Da infolge der Bewölkung in ZS2 keine geeigneten Trainingsgebiete für *Braugerste* verfügbar waren, wurden viele Bereiche als *Kartoffeln* klassifiziert. In ZS3 wurden viele dieser Bereiche allerdings *Sommergerste* zugeordnet. Laut der Agrarstrukturerhebung 2007 (IT.NRW 2008) wurden beispielsweise in der Gemeinde Kall allerdings kaum Kartoffeln oder Zuckerrüben angebaut. Ebenso konnten bei Geländekartierungen keine derartigen Felder gefunden werden, so dass eine entsprechende Zuordnung zu Kartoffeln oder Zuckerrüben unwahrscheinlich erschien. Daher erfolgte die endgültige Zuordnung der entsprechenden Bereiche in NR-Region 4 zur Klasse *Sommergerste*.

In Bereich 1 konnten zur Erzeugung der disaggregierten Landnutzungsinformationen für Ackerflächen alle ZS einbezogen werden. Zunächst werden nur die wesentlichen Produktionsschritte für die Bereiche in Deutschland erläutert. Wie methodisch vorgesehen, konnte ZS1 als Grundlage zur deutlichen Trennung von Bereichen mit Winterfrüchten und

Sommerfrüchten genutzt werden. Bei der Übertragung der Feldfruchtinformationen wurde bei den Winterfrucht-Flächen mit *Winterraps* begonnen. Dabei offenbarte die Analyse der Fehlermatrizen von ZS1 und ZS2, dass einige Bereiche von *Winterraps* fälschlicherweise *Wintergerste* zugeordnet wurden (vgl. Tabelle A.4 und Tabelle A.8). Um die Ausweisung von Flächen mit *Winterraps* zu optimieren, wurden daher alle Pixel übernommen, die in ZS1 und ZS2 *Winterraps* zugeordnet wurden. Anschließend wurden alle übrigen Ackerflächen zur besseren Unterscheidung zunächst als Sommerfrucht oder Winterfrucht ausgewiesen. Diese wurden anschließend sukzessive anhand der Feldfruchtinformationen der nachfolgenden ZS disaggregiert. Wie bereits bei der Beschreibung der einzelnen Klassifikationsergebnisse dargestellt, konnte in einigen Bereichen keine eindeutige Trennung von *Winterweizen* und *Wintergerste* erfolgen. Auch der Vergleich von ZS1 und ZS2 ergab kein eindeutiges Ergebnis. Von einer Zusammenfassung beider Klassen wurde allerdings abgesehen, da sowohl die visuelle Erscheinung der Klassifikationen als auch die berechneten Genauigkeiten die bestehende Trennung rechtfertigten. Demzufolge wurden jeweils die Bereiche übernommen, welche in beiden Klassifikationen derselben Klasse entsprachen. Bezüglich der Sommerfrucht-Flächen wurde mit der Übertragung der Klasse *Mais* aus ZS3 und ZS4 begonnen, da *Mais* darin zuverlässig klassifiziert war. Als *Kartoffeln* klassifizierte Bereiche wurden aus ZS3 übertragen. Für die übrigen Flächen musste nun nur noch eine Unterscheidung von Sommergerste und Zuckerrüben erfolgen. Bei Geländekartierungen wurde in der Börde (NR-Region 1 & 2) keine Braugerste/Sommergerste vorgefunden. Da Sommergerste auch laut der Agrarerhebung 2007 (IT.NRW 2008) beispielsweise in Gemeinden wie Düren so gut wie nicht vorkam, wurden dort als *Sommergerste* klassifizierte Bereiche als Fehlklassifikation erachtet. Dementsprechend wurden für diese Regionen die Klassifikationsergebnisse für *Zuckerrüben* aus ZS3 und ZS4 übernommen. Wie bereits für Bereich 2 erläutert, konnten allerdings Bereiche die in NR-Region 4 als *Kartoffeln* oder *Zuckerrüben* klassifiziert wurden, anhand der Agrarerhebung 2007 (IT.NRW 2008) beispielsweise für die Gemeinde Schleiden als sehr unwahrscheinlich oder falsch eingestuft werden. Diese Bereiche wurden dementsprechend, wie auch in ZS3 klassifiziert, der wahrscheinlicheren Klasse *Sommergerste* zugeordnet. Weiter offenbarte der Vergleich von ZS1 und ZS2 mit den Kartierungsflächen, dass viele Bereiche die in NR-Region 4 aus ZS1 stammten und als *Wintergerste* ausgewiesen wurden, eher *Winterraps* darstellten. Diese Bereiche konnten teilweise anhand von ZS2 umklassifiziert werden. Die Übertragung beziehungsweise Ableitung der Feldfrüchte war damit für die Bereiche in Deutschland weitestgehend abgeschlossen.

Für die Gebiete in den Niederlanden und in Belgien diente ZS1 ebenfalls als Grundlage zur Integration von Landnutzungsinformationen der nachfolgenden ZS. Zur besseren Eingrenzung von Ackerflächen dienten hier die CLC-Klassen zur Unterstützung. Auch in diesen Gebieten wurden als *Winterraps* klassifizierte Bereiche aus ZS1 in die finale MDA-Landnutzung übernommen. Ebenso dienten die Klassifikationsergebnisse aus ZS1 für *unbedeckten Boden* auch hier zur Ausweisung von Flächen auf denen potentiell Sommerfrüchten

angebaut wurden. Als *Zuckerrüben*, *Kartoffeln* oder *Mais* klassifizierte Bereiche wurden nachfolgend aus Z2 und Z4 auf diese Flächen übertragen.

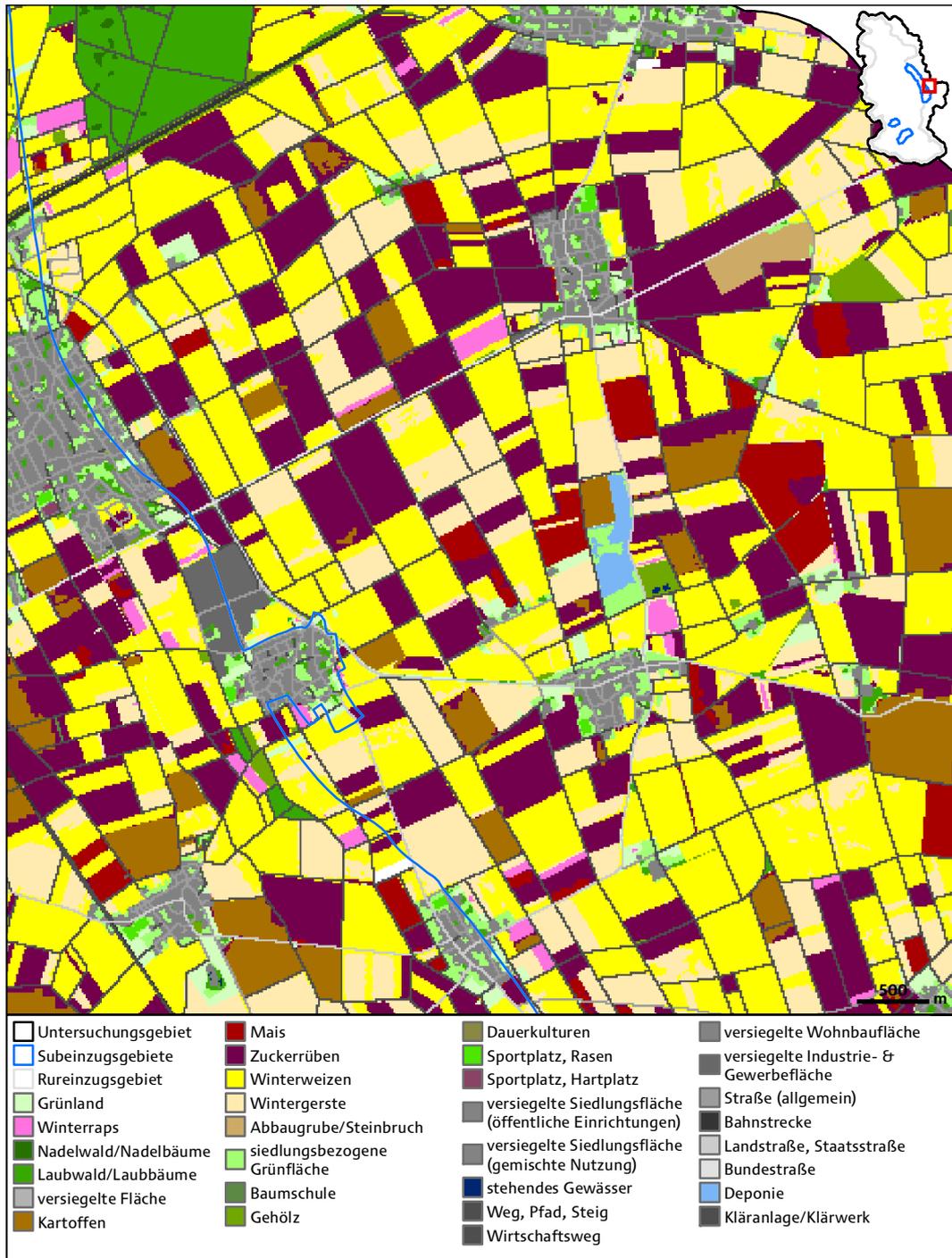


Abbildung 6.7: Ausschnitt der MDA-Landnutzungsklassifikation 2008 für ein Gebiet östlich von Merzenich.

Während für *unbedeckten Boden* auch in diesen Gebieten ein visuell plausibles Ergebnis erzeugt wurde, deuteten die Klassifikationsergebnisse von *Wintergetreide* und *Grünland* auf die bereits zuvor beschriebene mäßige Unterscheidung, vor allem zwischen *Wintergerste* und *Grünland*, hin. Zur Verbesserung der Klassifikation von *Winterweizen* dienten die Ergebnisse aus ZS2. *Wintergerste* war jedoch auch in ZS2 nicht von *Grünland* zu trennen. Um eine verbesserte

Unterscheidung von *Laub-* und *Nadelwald* zu erzielen, wurden die Klassifikationsergebnisse von ZS1 mit denen aus ZS2 und ZS4 ergänzt. Die Synthese der fernerkundungsbasierten Landnutzungsinformationen der einzelnen ZS zur Bildung der FE-Basis 2008 war damit abgeschlossen. Abbildung 6.7 zeigt einen Ausschnitt der finalen MDA-Landnutzungs-klassifikation 2008. Der Fokus der Abbildung soll in diesem Abschnitt des Ergebniskapitels nur auf der Unterscheidung der dominierenden Feldfrüchte liegen. Das vollständige Ergebnis zeigt Abbildung B.1 in Anhang B.

#### 6.2.4 Evaluierung fernerkundungsbasierter MDA-Landnutzungsklassen für Ackerland 2008

Mit der Fertigstellung der FE-Basis war auch die Ableitung von Feldfruchtinformationen zur Disaggregation von Ackerland anhand der MDA-Methodik abgeschlossen. Zur abschließenden Bewertung der Klassifikationsgüte der entsprechenden MDA-Landnutzungs-klassen diente eine erneute ortsspezifische Evaluierung anhand einer EM. Tabelle 6.5 listet die berechnete Gesamtgenauigkeit, den Kappa-Koeffizienten sowie die *Producer's Accuracy* (PA), *User's Accuracy* (UA), *Commission Error* (CE) und *Omission Error* (OE) für die einbezogenen Feldfruchtclassen für 2008 auf. Darüber hinaus enthält die EM zusätzlich die Genauigkeitsangaben für Wald, da auch diese Klassen in der finalen MDA-Landnutzung im Wesentlichen auf den Fernerkundungsanalysen beruhen. Bezüglich der verwendeten Testgebiete ist zu bemerken, dass es aufgrund der Nutzung der Referenzdaten während der Klassifizierung der einzelnen Zeitschnitte nicht mehr möglich war nur Referenzflächen einzubeziehen, die zuvor noch nicht in einen Trainingsprozess einbezogen waren. Da die Auswahl der Trainings- und Testgebiete von Klassifikation zu Klassifikation verschieden war, wurde dies dennoch als zulässig eingeschätzt. Daher wurden zur Evaluierung möglichst viele Referenzdaten verwendet.

Wie in Tabelle 6.5 dargestellt, konnten für die vornehmlich fernerkundungsbasierten Landnutzungsklassen für Ackerland und Waldgebiete der finalen MDA-Landnutzungskarte für 2008 eine OA von 93,85 % anhand der Testgebiete berechnet werden. Auch der Kappa-Wert von 0,93 spiegelt dies wieder. Ebenso lagen die UA und PA für alle Klassen oberhalb von 86 %, in den meisten Fällen über 90 %.

Während eine generelle Trennung von Sommer- und Winterfeldfrüchten durch die multitemporale Analyse sehr zuverlässig erfolgte und hier kaum Fehlzuweisungen zurück blieben, zeigt die Betrachtung einzelner Klassen innerhalb beider Feldfruchtgruppen, dass auch nach der Integration aller ZS, nicht alle Klassen gänzlich getrennt werden konnten.

Tabelle 6.5: Error Matrix für vornehmlich fernerkundungsbasierte Landnutzungsklassen der MDA-Landnutzungsanalyse 2008.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)									Total	CE (%)	UA (%)
	WR	KT	M	ZR	WW	WG	SG	NW	LW			
WR	3422	0	0	0	0	0	0	0	0	3422	0,00	100,00
KT	0	4163	0	371	0	0	0	0	0	4534	8,18	91,82
M	0	2	3230	75	0	0	16	0	0	3323	2,80	97,20
ZR	0	539	96	11206	7	0	0	0	0	11848	5,42	94,58
WW	11	0	0	0	11642	1246	124	0	0	13023	10,60	89,40
WG	210	0	0	0	977	8046	0	0	0	9233	12,86	87,14
SG	0	0	84	0	0	0	2368	0	0	2452	3,43	96,57
NW	0	0	0	0	0	0	0	9427	1	9428	0,01	99,99
LW	0	0	0	0	0	0	0	344	9105	9449	3,64	96,36
Total	3643	4704	3410	11652	12626	9292	2508	9771	9106	66712	-	-
OE (%)	6,07	11,50	5,28	3,83	7,79	13,41	5,58	3,52	0,01	-	OA(%)	93,85
PA (%)	93,93	88,50	94,72	96,17	92,21	86,59	94,42	96,48	99,99	-	Kappa	0,93

So wurden die Fehlklassifikationen innerhalb von Wintergetreide durch die Verschneidung der vorhandenen ZS zwar etwas reduziert, aber nicht gänzlich behoben. Die EM deutet daher immer noch auf eine Überschneidung (CE) zwischen *Winterweizen* auf *Wintergerste* von jeweils etwa 10 % hin. Für die räumliche Verteilung von *Winterraps* lässt sich eine hohe Genauigkeit ableiten, wobei Verwechslungen mit *Wintergerste* nicht vollständig zu beheben waren. Bereits während der Verschneidung der ZS erwies sich deren Unterscheidung besonders in der Eifel, durch die gegenüber der Börde etwas andere phänologische Entwicklung beider Feldfrüchte, als problematisch. Bezüglich der Sommerfrüchte ergaben die Berechnungen eine insgesamt sehr gute Ableitung und Trennung von Flächen mit *Mais* und *Zuckerriiben*. Vermutlich aufgrund der stark variierenden Anbauzeiträume von *Kartoffeln* und dem Mangel an Zeitschnitten mit günstigerem Aufnahmedatum, erfolgte die Unterscheidung von *Zuckerriiben* und *Kartoffeln* jedoch nicht in gleichem Maße. Beiden Klassen wurden daher gegenseitig etwa zu 5 % bei *Zuckerriiben* und etwa zu 8 % bei *Kartoffeln* der jeweils anderen Klasse falsch zugeordnet. Eine sehr gute Trennung konnte hingegen durch die Verschneidung der vorhandenen ZS und der Einbeziehung von Landnutzungsstatistiken bei *Kartoffeln* und *Braungerste* erzielt werden. Vor allem in der Eifel waren zuvor viele Bereiche als *Kartoffeln* klassifiziert worden, obwohl diese dort nur sehr vereinzelt vorkommen. Sehr hohe Genauigkeiten konnten zudem bei der Unterscheidung von *Laub-/Mischwald* und vornehmlich *Nadelwald* erzielt werden.

### 6.3 Ergebnis der MDA-Fernerkundungsanalyse 2009

Die Ergebnisdarstellung der MDA-Fernerkundungsanalysen für 2009 entspricht dem Aufbau und der Präsentation der Ergebnisse für 2008. Demgemäß erfolgt zunächst die Darstellung

der verwendeten Fernerkundungsdaten, gefolgt von den Erläuterungen und Bewertungen der Einzelklassifikationsergebnisse. Anschließend wird die Ableitung der finalen Landnutzungsklassen vornehmlich für Ackerland erläutert und das Endergebnis ortsspezifisch evaluiert. Die MDA-Landnutzungsanalyse für 2009 wurde von den betrachteten Jahren ursprünglich zuerst durchgeführt. Nachdem die Fernerkundungsanalysen für 2008 und 2010 abgeschlossen waren, erfolgte jedoch eine umfassende Neubearbeitung der MDA-Landnutzungsanalyse für 2009, bei der die Verbesserung der Feldfruchterfassung im Vordergrund stand. Zu diesem Zweck wurden zusätzlich ZS2, ZS4 und ZS5 einbezogen. Außerdem wurden alle Klassifikationen auf Basis der Feldblock-Daten erst bei der erneuten Analyse durchgeführt, da diese zuvor noch nicht zur Verfügung standen. Zwar erfolgte dabei jeweils die vollständige Klassifikation der einzelnen Zeitschnitte (ZS). In die finale MDA-Landnutzungsklassifikation 2009 wurde allerdings nur die Klassenverteilung bezüglich des Ackerlands integriert. Da diese MDA-Landnutzungsanalyse als letzte durchgeführt wurde und für 2008 und 2010 bereits eine hinreichende Erfassung aller übrigen Landnutzungsklassen erfolgt war, die zudem durch eine deutlich langsamere zeitliche Veränderung gekennzeichnet sind, wurden die entsprechenden Klassen aus der MDA-Landnutzungsanalyse für 2010 übernommen (vgl. Kapitel 7.4.2c).

### 6.3.1 Fernerkundungsdatenabdeckung 2009

Zur Erzeugung der multitemporalen fernerkundungsbasierten Landnutzungskarte (FE-Basis) für 2009 wurden Satellitendaten von sechs unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten herangezogen (vgl. Tabelle 6.6). Leider deckten die verfügbaren Daten in der Regel nur Teilbereiche des Untersuchungsgebiets in unterschiedlichem Ausmaß ab. Daher stand für kein Aufnahmedatum eine vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebiets zur Verfügung.

Tabelle 6.6: Fernerkundungsdaten der MDA-Landnutzungsanalyse des Jahres 2009.

<b>Sensor</b>	<b>Datenprodukt</b>	<b>Aufnahmedatum</b>	<b>Zeitschnitt (ZS)</b>
RapidEye	L3A	24. Mai	1
RapidEye	L3A	01. Juni	2
ASTER (VNIR)	L1B	27. Juli	3
RapidEye	L3A	15./16. August	4
RapidEye	L3A	31. August	5
RapidEye	L3A	08. September	6

Darüber hinaus waren von einigen Szenen zum Zeitpunkt der Durchführung der Analysen nicht alle L3A-Kacheln der vorhandenen RapidEye-Szenen prozessiert beziehungsweise für den beantragten Nutzer-Account freigeschaltet. Daher wurde versucht, diese Datenlücken mit Kacheln eines anderen Aufnahmedatums zu schließen. Abbildung 6.8 zeigt die Abdeckung der verwendeten Fernerkundungsdaten für die einzelnen ZS.

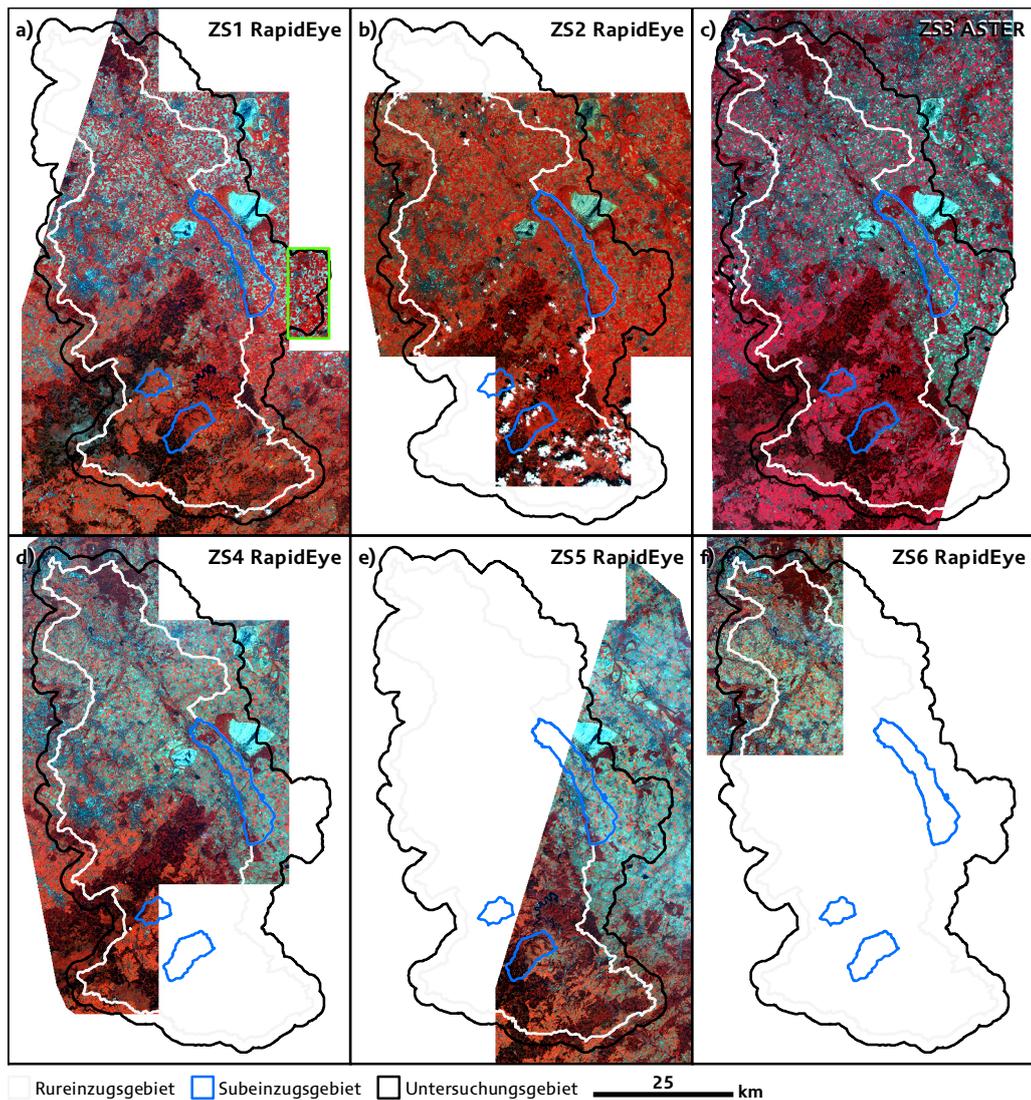


Abbildung 6.8: Fernerkundungsdatenabdeckung der MDA-Landnutzungsanalyse 2009, bestehend aus sechs Zeitschnitten (Datenquellen: RESA 2009, USGS 2009).

Für ZS1 wurden RapidEye-Daten vom 25.05.2009 gewählt. Für die hierdurch angestrebte Unterscheidung von Winter- und Sommerfrüchten standen leider keine Daten früheren Datums zur Verfügung. Wie Abbildung 6.8a zeigt, wurden im Norden nicht alle Bereiche des Untersuchungsgebietes abgedeckt beziehungsweise die notwendige Kachel der Szene stand nicht zur Verfügung. Ein Bereich östlich des Ellebach-Subeinzugsgebiets (grün eingerahmter Bereich in Abbildung 6.8a) konnte zudem erst nachträglich bezogen werden, nachdem der Rest der Szene bereits fertig klassifiziert war. Dementsprechend setzt sich dieser ZS aus zwei Teilen zusammen. Bis auf einzelne kleine Bereiche ist der ZS weitestgehend wolkenfrei.

ZS2 bildeten RapidEye-Daten vom 01.06.09 (Abbildung 6.8b). Obwohl die Aufnahme nur etwa eine Woche später erfolgte, wurde hierdurch eine verbesserte Unterscheidung der Feldfrüchte in den Börderegionen erwartet, da in diesem Zeitraum der Wachstumsperiode mit einer raschen Weiterentwicklung der Vegetation gerechnet wurde. Besonders im Süden, aber auch im Norden, waren die verfügbaren Kacheln durch Bewölkung beeinträchtigt.

ASTER-Daten vom 27.07.2009 (Abbildung 6.8c) stellen ZS3 dar. Bis auf einige Bereiche im Südosten, deckten die Daten den Großteil des Untersuchungsgebiets ab. Im westlichen Bereich ist die Aufnahme durch vereinzelte Bewölkung gekennzeichnet.

Als ZS4 wurde nachträglich ein Mosaik aus RapidEye-Daten vom 15./16.08.2009 (Abbildung 6.8d) gewählt. Der nordwestliche Teil stammt von einer Aufnahme am 16.08.2009 wohingegen der übrige Bereich von Daten vom 15.08.2009 stammt. Da beide Aufnahmen zeitlich nur einen Tag voneinander abweichen und sich im Überlappungsbereich kaum unterscheiden, konnte eine multitemporale Mosaikbildung durchgeführt werden. Auch in diesem Fall resultierte diese Vorgehensweise aus der fragmethaften Datenverfügbarkeit.

ZS5 vom 31.08.2009 (Abbildung 6.8e) diene vor allem zur Abdeckung des östlichen Untersuchungsgebiets, das nicht durch ZS4 erfasst wurde. Da die Aufnahmedaten zeitlich zu weit auseinander lagen, war die Zusammenfügung zu einem ZS nicht möglich. Innerhalb des Untersuchungsgebiets ist die verwendete RapidEye-Szene so gut wie wolkenfrei.

Bei ZS6 handelt es sich um RapidEye-Daten vom 08.09.2009 (Abbildung 6.8f), die lediglich den Nordwesten des Untersuchungsgebiets erfassen. Diese Daten sollten besonders für die Bereiche des Untersuchungsgebietes in den Niederlanden weitere Informationen zur Landnutzung liefern.

### 6.3.2 Ausgewählte Klassifikationen 2009

Tabelle 6.7 enthält die Klassifikationsergebnisse mit OA und Kappa-Wert für die einzelnen ZS, die zur Produktion der vornehmlich auf Fernerkundungsdaten beruhenden MDA-Basis-Landnutzungskarte (FE-Basis) für 2009 verwendet wurden. Die vollständigen EM für die einzelnen Klassifikationen befinden sich in Anhang A.

Abbildung 6.9 stellt eine Zusammenschau von Ausschnitten der ALL-Klassifikationen der einzelnen ZS dar. Für ZS2 und ZS5 wurden keine ALL-Klassifikationen durchgeführt. Die ALL-Klassifikationsergebnisse wurden auch für 2009 innerhalb der Abdeckung der Acker-Feldblöcke durch die entsprechenden in Abbildung 6.10 dargestellten FB-Klassifikationsergebnisse ersetzt.

Neben der grundlegenden Erfassung der unterschiedlichen Landnutzungen im Untersuchungsgebiet als Ausgangsbasis für die Datenverschneidung, sollte ZS1 im Hinblick auf die erarbeitete Unterscheidungsmethodik erneut vor allem die Basis für die Trennung von Winter- und Sommerfrüchten liefern. Die Grundlage für den überwiegenden Teil des Untersuchungsgebiets bildete dazu die MLC-Klassifikation ALL1. Wie die entsprechende EM



(vgl. Tabelle A.15) zeigt, konnte mit der MLC-Klassifikation zwar eine sehr hohe Genauigkeit von über 97 % erzielt werden. Dazu war allerdings die Unterteilung der Landnutzungsklassen *Grünland* und (Winter-) *Getreide* in bis zu sechs Spektralklassen nötig, um eine ausreichende Unterscheidung zu ermöglichen. Bei den in Abbildung 6.9 dargestellten Ausschnitten sind zusammengehörige Spektralklassen bereits zu Informationsklassen zusammengefügt worden.

Tabelle 6.7: Für die MDA-Analyse 2009 ausgewählte Klassifikationen.

<b>Zeitschnitt</b>	<b>Aufnahmedatum</b>	<b>Sensor</b>	<b>Gebiet</b>	<b>Verfahren</b>	<b>OA (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>EM</b>
1	24.05.2009	RapidEye	ALL1	MLC	97,61	0,97	A.15
			ALL2	SVM	93,95	0,93	A.16
			FB1	MLC	95,59	0,94	A.17
			FB2	MLC	95,56	0,94	A.18
2	01.06.2009	RapidEye	FB	SVM	88,22	0,85	A.19
3	27.07.2009	ASTER	ALL	MLC	85,55	0,84	A.20
			FB	SVM	97,42	0,96	A.21
4	15./16.08.2008	RapidEye	ALL	MLC	84,75	0,83	A.22
			FB	SVM	85,05	0,81	A.23
5	31.08.2009	RapidEye	FB	SVM	95,91	0,94	A.24
6	08.09.2009	RapidEye	ALL	MLC	95,82	0,95	A.25
			FB	MLC	98,69	0,98	A.26

Eine weitere Unterscheidung von Wintergetreide anhand der Spektralklassen war jedoch nicht möglich. Obwohl dies nicht aus der EM hervorging, zeigte die visuelle Betrachtung des Ergebnisses zudem eine gewisse Überschneidung der Klassen für *unbedeckten Boden* (Sommerfrüchte) und *versiegelte Flächen*. Ebenso bestand eine leichte Überschneidung zwischen Getreide-Klassen und *Laubwald* sowie zwischen Getreide-Klassen und *Grünland*. Für das kleine nachträglich hinzugefügte Gebiet um Nörvenich, wurde hingegen ein SVM-Ergebnis (ALL2) verwendet. Mit knapp 94 % wurde hierfür eine etwas geringere OA erzielt. Insgesamt lieferten beide Klassifikationen jedoch sehr ähnliche Ergebnisse wie die Klassifikation ALL1.

Die genauere Unterscheidung der Feldfrüchte wurde anhand der FB-Klassifikationen erzielt. Dabei gelang die Unterscheidung von Wintergetreide und Sommerfrüchten (zum Aufnahmezeitpunkt noch überwiegend *unbedeckter Boden*) erwartungsgemäß sehr gut (vgl. Tabelle A.17 & Tabelle A.18). Die Unterscheidung von *Winterweizen* und *Wintergerste* einerseits und von *Sommergerste*, *Winterraps* und *Wintergerste* andererseits gestaltete sich hingegen problematisch, da die Entwicklung der Sommergerste schon relativ weit fortgeschritten war.



Abbildung 6.9: ALL-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2009 für die in Abbildung 3.1 dargestellten Subsets: a, c, d) Merzenich; f) Braunsrath. Für ZS2 und ZS5 wurden keine ALL-Klassifikationen durchgeführt. Mit \* markierte Feldfrüchte waren zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits geerntet.

Bereits bei der Auswahl der Trainingsgebiete für *Winterweizen* und *Wintergerste* deutete sich an, dass eine Unterscheidung mit diesem ZS nicht möglich sein könnte, da die spektrale

Variabilität innerhalb beider Klassen größer war, als die Unterschiede der Klassen zueinander. Visuell konnten in der RapidEye-Szene grob zwei bis drei Klassen beziehungsweise Entwicklungsstadien von Wintergetreide unterschieden werden. Auch die Berechnungsergebnisse der Jeffries-Matusita Distance und der Transformed Divergence von über 1,73 beziehungsweise 1,91 rechtfertigten diese Unterteilung. Leider deckte sich diese Unterscheidung besonders in der Börde nicht mit den Kartierungsergebnissen für die Wintergetreideklassen. Daher dienten die verschiedenen Spektralklassen von Wintergetreide auch bei den Acker-FB-Bereichen letztlich nur zur besseren Abgrenzung von den Klassen *Sommergerste* und *Winterraps*.

Vermutlich aufgrund der bereits angesprochenen regionsbedingten unterschiedlichen phänologischen Entwicklung zwischen Eifel und Börde, führte die Klassifikation von *Sommergerste* vor allem in NR-Region 3 und in der Börde zu deutlichen Überschneidungen mit *Winterraps* im Besonderen, aber teilweise auch mit Wintergetreide. In den Bereichen der Eifel führte die Einbeziehung von Trainingsdaten für *Sommergerste* hingegen zu einer guten Unterscheidung bei den betrachteten Referenzflächen. Aufgrund eigener Kartierungen und als Schlussfolgerung aus der Sichtung der Agrarstrukturerhebung 2007 (IT.NRW 2008) wurde der Anteil von *Sommergerste* an Ackerflächen in der Börde als vernachlässigbar eingeschätzt. So betrug die Anbaufläche von Sommergerste in der Gemeinde Düren im Jahr 2007 etwa 9 ha. Dagegen war in der Gemeinde Schleiden – bei einer signifikant kleineren Gesamtackerfläche – mit etwa 198 ha fast ein Drittel der Ackerflächen mit Sommergerste bestellt. Um daher die Unterscheidung von Sommer- und Wintergetreide zu verbessern, wurden für die Gebiete der Eifel und der Mechernicher Voreifel (NR-Region 3, 4 & 5) einerseits, und für die Bördegebiete (vor allem NR-Region 1, 2 aber auch NR-Regionen 6) andererseits, zwei separate Klassifikationen FB1 und FB2 durchgeführt. Dabei wurden in die Klassifikation FB2 keine Trainingsdaten für *Sommergerste* einbezogen.

Für ZS2 wurden aufgrund des Abdeckungsbereichs nur die Flächen der Acker-Feldblöcke klassifiziert. Die Klassifikation sollte vor allem der Verbesserung der bereits in ZS1 angestrebten Unterscheidung von Wintergetreide sowie insbesondere zur Erfassung von Kartoffelfeldern in den Bördegebieten dienen. Um eine bessere Abgrenzung von *Kartoffeln* im Merkmalsraum zu erzielen, wurden neben der Unterteilung in zwei Spektralklassen auch Trainingsgebiete für *Zuckerrüben* und *Mais* ausgewiesen, obwohl eine zuverlässige Erfassung dieser beiden Feldfrüchte zu diesem Zeitpunkt der Vegetationsperiode noch nicht möglich war. Die diesen Klassen zugeordneten Bereiche dienten lediglich als „Platzhalter“ für Hackfrüchte und nicht zur weiteren Verwendung bei der Verschneidung der Zeitschnitte.

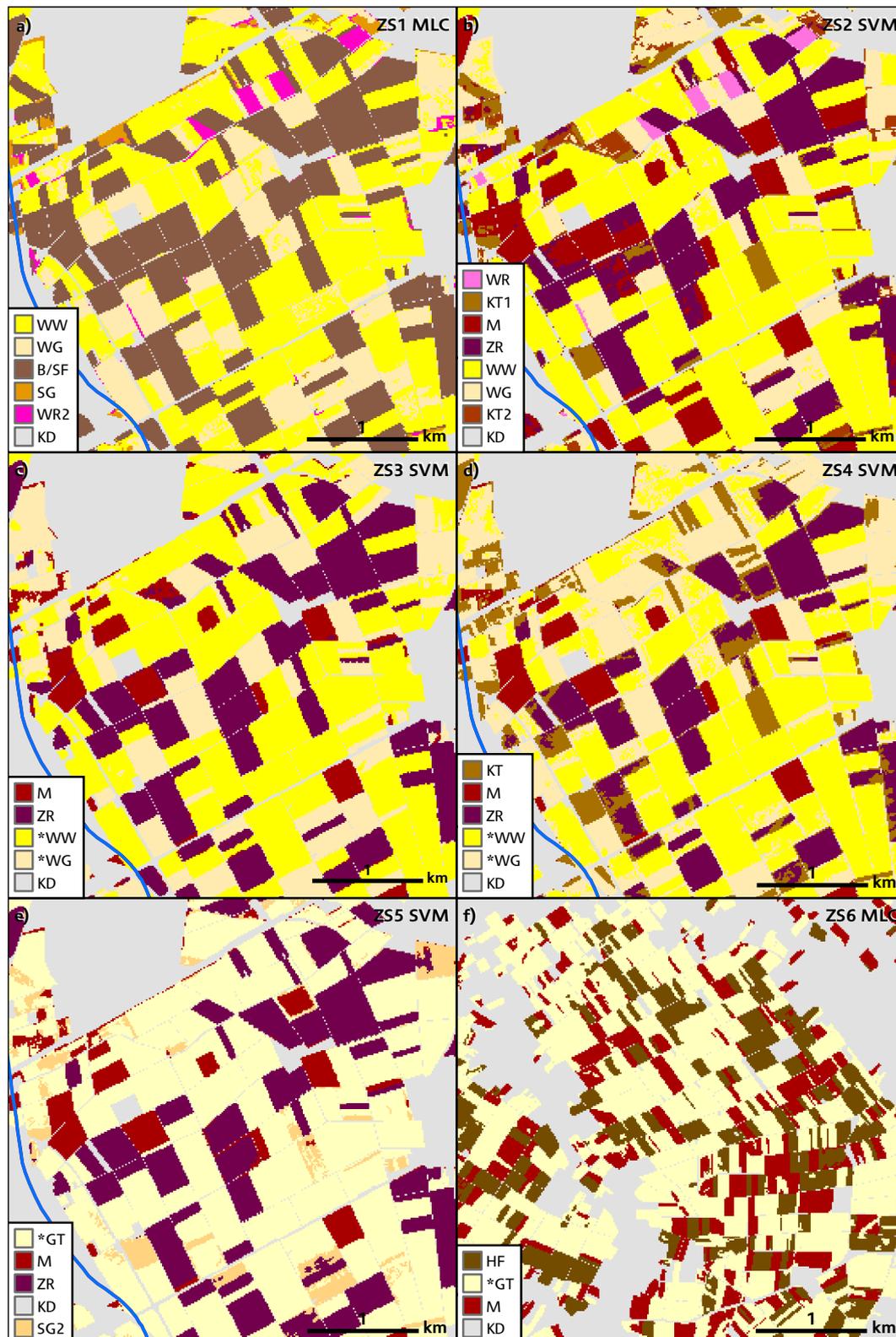


Abbildung 6.10: FB-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2009 für die in Abbildung 3.1 dargestellten Subsets: a-e) Merzenich; f) Braunsrath. Mit \* markierte Feldfrüchte waren zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits geerntet.

Wie die EM (vgl. Tabelle A.19) zeigt, wurde zwar der Großteil der Testgebiete mit *Kartoffeln* richtig klassifiziert. Es stand allerdings auch nur eine relativ geringe Anzahl an Testgebieten zur Verfügung. Die in der EM ausgewiesene Klassenzuordnung bekräftigt daher dennoch den

visuellen Eindruck der Klassifikation, dass eine Unterscheidung von anderen Hackfrüchten zu diesem Zeitpunkt nur teilweise möglich war. Bezüglich der Trennung von *Winterweizen* und *Wintergerste* wurde hingegen eine Verbesserung der Unterscheidung gegenüber ZS1 erzielt. Es wurden jedoch immer noch etwa ein Drittel aller Testpixel für *Wintergerste* der Klasse *Winterweizen* zugeordnet, so dass es bei *Winterweizen* zu einer gewissen Überbestimmung kam. *Winterraps* wurde hingegen mit einer sehr hohen UA von über 96 % klassifiziert.

Zum Aufnahmezeitpunkt des ZS3 war die Ernte der Winterfrüchte im Untersuchungsgebiet bereits sehr weit fortgeschritten, sodass Hackfrüchte in der ASTER-Szene deutlich hervortraten. Das Klassifikationsergebnis des gesamten Untersuchungsgebiets (ALL) wurde mit dem MLC-Verfahren durchgeführt (vgl. Tabelle A.20). Dieses Ergebnis war allerdings nur für Bereiche im Norden von Bedeutung, die in den vorangegangenen ZS noch nicht erfasst wurden. Zwar wurde für die einbezogenen Landnutzungsklassen mit etwa 85 % eine relativ hohe OA errechnet, sowohl die visuelle Betrachtung als auch die EM zeigten jedoch, dass viele Landnutzungsklassen außerhalb der Testgebiete nicht vollständig voneinander zu trennen waren. Überschneidungen bestanden zum Beispiel zwischen *Mais* und *Laubwald* sowie zwischen einer Spektralklasse von *Grünland* und *Zuckerrüben*. Bei der visuellen Betrachtung waren viele Bereiche erkennbar, in denen *Mais* innerhalb von Waldgebieten klassifiziert wurde, oder *Zuckerrüben* auf Flächen markiert wurden, die anhand der Feldblock-Daten eindeutig als *Grünland* identifiziert werden konnten. Ebenso wurde *Grünland* auf Flächen klassifiziert, die als Hackfrüchte kartiert wurden. Für die Feldblock-Bereiche wurde eine SVM-Klassifikation gewählt (vgl. Tabelle A.21). Durch die Einschränkung auf Ackerflächen konnte eine deutlich bessere Trennung der Feldfrüchte mit einer OA von über 97 % erfolgen. Hierzu ist anzumerken, dass eine Unterscheidung von Zuckerrüben und Kartoffeln nicht möglich war. Dies wurde zum einen auf eine zu hohe spektrale Ähnlichkeit beider Feldfrüchte zum Aufnahmezeitpunkt und zum anderen auf das vermutlich mittlerweile geminderte radiometrische Auflösungsvermögen des ASTER-VNIR-Sensors zurückgeführt. Die Unterscheidung von *Mais* und *Zuckerrüben* (inklusive Kartoffeln) war jedoch insgesamt sehr gut und zeigte auch bei der visuellen Betrachtung eine stimmige Erscheinung. Da der Großteil des Getreides bereits geerntet war, konnte eine direkte Klassifikation unterschiedlicher Getreidearten nicht mehr erfolgen. Allerdings ließen sich die meisten abgeernteten und als *Winterweizen* kartierten Flächen von den als *Wintergerste* markierten Flächen bei der Klassifikation deutlich unterscheiden. Für die spätere Ableitung der Getreidearten wurde diese Information daher als sehr hilfreich eingeschätzt.

ZS4 wurde nachträglich in die Analyse integriert. Die damit verfolgten Ziele lagen vornehmlich in der Verbesserung der Unterscheidung von Hackfrüchten in der Börde auf Basis der FB-Klassifikation sowie zur Verbesserung der Landnutzungsinformationen für die Bereiche des Untersuchungsgebiets in den Niederlanden und in Belgien. Im Vergleich zu ZS3, zeichnete sich die MLC-Klassifikation des gesamten Datensatzes (ALL) durch eine auch

visuell deutlich klarere Unterscheidung von *Laub-* und *Nadelwald* aus (EM, vgl. Tabelle A.22). Außerdem konnten die Mooregebiete des Hohen Venns erstmals für dieses Jahr von anderen Landnutzungen unterschieden werden. Bezüglich der Klassifikation von Ackerflächen zeigte vor allem die visuelle Betrachtung, dass die Unterscheidung von Ackerflächen (vor allem von *Zuckerrüben*) und *Grünland* in vielen Bereichen nur bedingt möglich war. *Mais* konnte jedoch sehr gut unterschieden werden. Zudem bestand eine leichte Überschneidung von *Grünland* und *Laubwald*. Etwas überraschend war die verhältnismäßig hohe Fehlklassifikation von *Gewässern* als *versiegelte Flächen*. Für die Acker-FB wurde bei ZS4 ein SVM-Ergebnis verwendet. Wie die EM in Tabelle A.23 zeigt, war hierbei auch eine deutliche Trennung von *Mais* gegenüber anderen Feldfrüchten möglich. Im Gegensatz zu ZS3 wurde aufgrund der besseren radiometrischen Qualität der RapidEye-Daten ein erneuter Versuch unternommen, Flächen mit *Kartoffeln* in den Feldblöcken zu klassifizieren. Beim Vergleich der berechneten Genauigkeiten für *Kartoffeln* und *Zuckerrüben* zeigte sich jedoch, dass auch hier eine Trennung der beiden Hackfrüchte nicht im gewünschten Maße erfolgte. So deutet die EM auf eine deutliche Überbestimmung von *Kartoffeln* gegenüber *Zuckerrüben* hin. Bezüglich der Unterscheidung von Getreide wurde ähnlich zu ZS3 versucht, die Unterscheidung von *Winterweizen* und *Wintergerste* nachträglich zu verbessern. Auch wenn die Validierungsergebnisse für *Winterweizen* und *Wintergerste* auf eine relativ gute Trennung beider Klassen hindeuten, so wurden sie jedoch eher als Spektralklassen für unterschiedliche Zustände von abgeernteten Ackerflächen eingeschätzt.

ZS5 wurde zusätzlich in die Fernerkundungsanalysen einbezogen, um die Feldfruchtunterscheidung für Gebiete zu verbessern, die im Osten und Südosten nicht durch ZS4 abgedeckt wurden. Dementsprechend wurden lediglich Bereiche auf Basis der Feldblöcke mit dem SVM-Verfahren klassifiziert. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Unterscheidung von *Zuckerrüben* und *Mais*. Zusätzlich wurde versucht, die Erfassung von *Braunergerste* auf noch nicht abgeerntet Feldern zu optimieren. Da zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits die meisten Felder abgeerntet waren, und es somit nur noch wenige Feldfrüchte zu unterscheiden gab, konnte mit knapp 96 % (EM siehe Tabelle A.24) eine sehr hohe Gesamtgenauigkeit erzielt werden. Leichte Überschneidungen zwischen *Zuckerrüben* und *Mais* wurden trotzdem nicht restlos beseitigt.

ZS6 diente noch einmal der Verbesserung der Landnutzungsklassifizierung im niederländischen Teil des Rureinzugsgebiets im Nordwesten. Aufgrund des späten Aufnahmedatums und dem Mangel an geeigneten Trainingsdaten wurde lediglich eine grobe Unterscheidung der Landnutzung unternommen. Da für Ackerland in diesem Teil des Untersuchungsgebiets keine Geländekartierung durchgeführt werden konnte, standen für diesen ZS keine Geländedaten zur Verfügung. Die Trainingsgebiete wurden daher zum Teil durch visuelle Interpretation von Luftbilddaten erzeugt. Um die Auswahl der Trainingsdaten weiter zu präzisieren, wurde zusätzlich eine Vorgehensweise gewählt, die an die *chain*

*classification* von KNORN et al. (2009) angelegt ist. Dabei nutzten die Autoren ein initiales Klassifikationsergebnis als Quelle für Trainingsdaten zur Analyse einer sich damit teilweise überlappenden Szene, für die ursprünglich keine Referenzdaten zur Verfügung standen. Trotz des Mangels an Bodenreferenzdaten zum Training des Klassifikationsverfahrens, berechneten sie für benachbarte Landsat-Szenen eine Minderung der Klassifikationsgenauigkeit um lediglich 1,9 % (KNORN et al. 2009). Zur Klassifikation von ZS6 erfolgte die Auswahl der Trainingsgebiete für Ackerland dementsprechend anhand eines Klassifikationsergebnisses eines vorangegangenen ZS, das sich mit der zu klassifizierenden Szene überlappt. Bereiche die im bestehenden Klassifikationsergebnis im Überlappungsbereich homogen einer Landnutzung zugeordnet wurden, dienten dabei als Quelle für Trainingsgebiete der neuen Klassifikation. Auf diese Weise wurden Klassen für Hack- beziehungsweise Sommerfrüchte und bereits geernteten Flächen ausgewiesen. Trainingsgebiete für *Grünland* konnten anhand der FB-Daten auf dem deutschen Gebiet markiert werden. Die Gesamtgenauigkeit der MLC-Klassifikation betrug dabei 95.82 % (EM, vgl. Tabelle A.25). Dazu mussten allerdings einige Klassen in Spektralklassen untergliedert werden. Außerdem ist hierbei zu betonen, dass die Testgebiete zur Berechnung der Klassifikationsgenauigkeit für die entsprechenden Klassen auf dieselbe Weise wie die Trainingsgebiete erzeugt wurden, und folglich selbst auf Klassifikationsergebnissen beruhen. Obwohl dies im Grunde bei der Genauigkeitsberechnung anhand von EM immer der Fall ist, gibt diese EM (entsprechend auch die der FB-Klassifikation) im Besonderen lediglich über den Grad der Übereinstimmung zwischen Trainings- und Testgebieten Auskunft. Für die deutschen Bereiche wurde die entsprechende FB-Klassifikation nur zu Verfeinerung der Klassifikation von *Mais* genutzt. Daher dienten die weiteren Klassen lediglich zur Abgrenzung der Klasse für *Mais* im Merkmalsraum. Dementsprechend wurde auch für diese MLC-Klassifikation eine sehr hohe Genauigkeit von über 98 % ermittelt (EM siehe Tabelle A.26).

### 6.3.3 Produktion der fernerkundungsbasierten MDA-Landnutzungs-Basis-Karte 2009

Im Vergleich zur MDA-Analyse für 2008, war die Analyse für 2009 infolge der Fernerkundungsdatengrundlage durch eine noch stärkere räumliche und zeitliche Fragmentierung gekennzeichnet. Beispielsweise konnte die räumliche Abdeckung für Teilgebiete im Nordosten um Wegberg und im Nordwesten westlich von Wassenberg bis hin zur deutsch-niederländischen Grenze erst mit ZS3 erzielt werden (vgl. Abbildung 3.1 & Abbildung 6.8). Ersteres Gebiet wurde zudem von keinem weiteren ZS abgedeckt. Die generelle Trennung von Winter- und Sommerfrüchten war daher in solchen Fällen eingeschränkt. Neben der vorgesehenen getrennten Behandlung von einzelnen NR-Regionen

(oder Gruppen von NR-Regionen) mussten daher einige Teilgebiete separat für die Übertragung und Ableitung der einzelnen Landnutzungsklassen betrachtet werden.

Abgesehen von diesen Teilregionen, konnten für die meisten Landnutzungsklassen jeweils die NR-Regionen 1, 2 & 6 sowie 4 & 5 aufgrund der ähnlichen Landnutzungsstruktur in der Regel gemeinsam betrachtet werden. NR-Region 3 musste hingegen aufgrund ihres Charakters einer Übergangsregion zwischen Börde und Eifel und der damit verbundenen komplexeren Landnutzungsstruktur für die meisten Landnutzungsklassen separat behandelt werden. Die Erläuterungen bezüglich NR-Region 3 erfolgen daher auch gesondert. Ebenso werden für NR-Region 4 einige Sonderfälle noch mal getrennt dargestellt.

Für den Großteil des Untersuchungsgebiets diente ZS1 zur grundlegenden Trennung von Winter- und Sommerfrüchten und als Ausgangsbasis zur Anreicherung der Informationen aus den einzelnen ZS. Für Gebiete im Norden des Untersuchungsgebiets musste die Datenverschneidung auf ZS2 oder ZS3 aufbauen. Neben der Unterscheidung von Flächen mit Wintergetreide und Sommerfrüchten wurde die Verbreitung von *Winterraps* (vor allem für die NR-Regionen 1, 2 & 6 sowie 4 & 5) bereits mit ZS1 weitestgehend festgelegt und in die finale MDA-Landnutzung übernommen. Mit Hilfe der entsprechenden Informationen aus ZS2 wurde die Abdeckung von *Winterraps* noch etwas verfeinert, wobei vor allem Fehlklassifikationen in Randbereichen von Feldern reduziert wurden.

Zur verbesserten Unterscheidung von *Wintergerste* und *Winterweizen* dienten ZS2 und ZS3. Dabei wurden zunächst die in ZS2 klassifizierten Bereiche für *Winterweizen* und *Wintergerste* auf Winterfrucht-Flächen übertragen, die noch nicht von *Winterraps* eingenommen waren. Gebiete die nicht durch ZS2 abgedeckt wurden, erhielten die entsprechenden Informationen aus ZS3.

Wie bereits bei der Beschreibung der Klassifikationsergebnisse erläutert, wurde für den südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets in ZS1 (NR-Regionen 3 & 4) zusätzlich Sommergetreide (*Sommergerste*) klassifiziert. In NR-Region 4 konnte mit ZS1 bereits gute eine Trennung der verschiedenen Getreidearten und *Winterraps* erfolgen, sodass die entsprechenden Klassen, abgesehen von späteren leichten Korrekturen, dort ebenfalls vornehmlich aus ZS1 stammten.

Bezüglich der Flächen mit Hackfrüchten konnte *Mais* innerhalb dieser Kategorie ab ZS3 im Allgemeinen gut von den anderen Feldfrüchten unterschieden werden. Daher wurde *Mais* innerhalb von Sommerfrucht-Flächen bei Überschneidungen mit *Zuckerrüben* oder *Kartoffeln* (vergleichbar mit der Klasse *Winterraps*) in der Regel bevorzugt übertragen. Je nach dem abgedeckten Gebiet, dienten die Klassifikationsergebnisse besonders aus ZS3, aber auch aus ZS4, ZS5 und ZS6 zur Vervollständigung der Abdeckung von *Mais*.



Die noch nicht besetzten Hackfrucht-Flächen erhielten, je nach Abdeckung, die Klassifikationsergebnisse für *Zuckerrüben* hauptsächlich aus ZS3 sowie zur Reduktion von Fehlklassifikationen aus ZS4, ZS5 und ZS6. Aufgrund der oftmals hohen Ähnlichkeit von Zuckerrüben und Kartoffeln konnte, trotz des Vergleichs aller ZS, eine deutliche Trennung nur für einen Teil der Flächen erfolgen. In den meisten Fällen waren Kartoffeln nicht von Zuckerrüben unterscheidbar, so dass dem Großteil der restlichen Hackfrucht-Flächen *Zuckerrüben* zugewiesen werden musste.

Im Gegensatz zu NR-Region 4, kam es in NR-Region 3 beginnend mit ZS1 zu einer deutlich stärkeren Überschneidung von *Winterraps*, *Wintergetreide* und *Sommergerste*. Obwohl die (spektrale) Trennung auch hier in vielen Fällen gelang, zeigten andere Bereiche deutliche Überschneidungen zwischen *Sommergerste* und *Winterraps* sowie zwischen *Sommergerste* und *Wintergetreide*. Auch anhand von späteren ZS war eine Ableitung der Landnutzung zur Reduktion der Fehlzusweisungen zwischen *Braugerste* und *Wintergerste* und zwischen *Braugerste* und *Winterraps* nur bedingt erfolgreich. So wurden in ZS2 beispielsweise deutliche Überschneidungen von *Getreide/Winterraps* und *Kartoffeln* klassifiziert, obwohl aufgrund der Agrarstrukturerhebung 2007 (IT.NRW 2008) geschlussfolgert werden konnte, dass Kartoffeln in der entsprechenden Region (zum Beispiel Gemeinde Nideggen: 1,72 ha von 1465,42 ha Gesamtackerfläche) äußerst selten vorkommen. Dementsprechend wurden die Klassifikationsergebnisse für *Kartoffeln* nicht in das endgültige Ergebnis übernommen. Zur Verbesserung der Unterscheidung des Wintergetreides konnte allerdings auch hier ZS3 dienen. Die Optimierung der Unterscheidung beziehungsweise Abdeckung von Zuckerrüben und Mais wurde auch in NR-Region 3 durch eine Kombination von ZS3 und ZS5 erzielt.

Im Osten von NR-Region 4 war die Bestimmung von Feldfrüchten auf Sommerfrucht-bereichen für einige Flächen erst mit ZS5 möglich, wovon manche als *Zuckerrüben* klassifiziert wurden. Ähnlich der Klassifikation von Kartoffeln in NR-Region 3, konnten bei Geländebegehungen keine Zuckerrüben in dieser Region gefunden werden. Auch nach Betrachtung der Agrarstrukturerhebung 2007 (IT.NRW 2008) wurde dies als sehr unwahrscheinlich eingestuft, da im Jahr 2007 in der entsprechenden Gemeinde Nettersheim keine Zuckerrüben angebaut wurden, Braugerste hingegen den höchsten Flächenanteil bei Sommerfrüchten hatte. Aufgrund der im Satellitenbild sehr ähnlichen spektralen Erscheinung beider Feldfrüchte, wurden diese Flächen zugunsten von Braugerste umklassifiziert. Die Klassifikation von *Mais* wurde in diesem Gebiet jedoch aus ZS5 übernommen.

Für die Gebiete in den Niederlanden und Belgien diente, wie bereits erläutert, erst ZS4 als Ausgangsbasis da dieses Ergebnis hier deutlich besser geeignet erschien als ZS1 beziehungsweise ZS3. Aufgrund der vorhandenen Datenbasis war jedoch kaum eine Verbesserungen des Klassifikationsergebnisses von ZS1 möglich. So wurden lediglich die Klassifikationsergebnisse für Getreide aus ZS3 zur Unterscheidung von *Getreide* und *Grünland*

integriert. Von weiteren Datenverschnitten auf landwirtschaftlichen Flächen, zum Teil eingegrenzt durch die CLC-Daten (vgl. Kapitel 6.5.3.1), wurde abgesehen.

Nach Anwendung aller Produktionsregeln bezüglich des Ackerlands blieben innerhalb der Sommerfrucht-Flächen noch einige Fälle übrig, für die trotz der Betrachtung mehrerer ZS anhand der Datengrundlage keine Feldfrucht abgeleitet werden konnte. Diese Restpixel verblieben daher als Klasse *unbedeckter Boden/Sommerfrucht*.

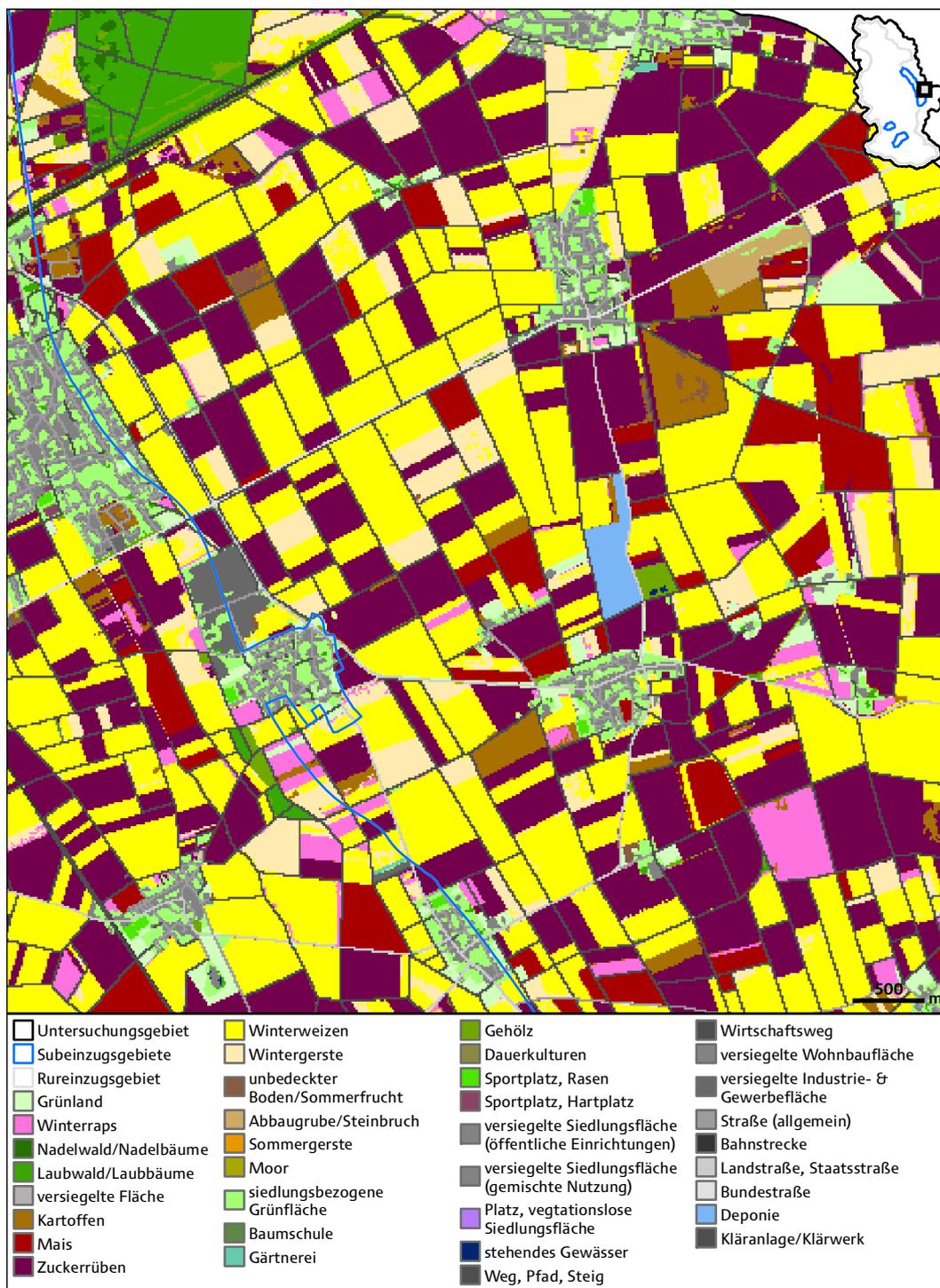


Abbildung 6.11: Ausschnitt der MDA-Landnutzungsclassifikation 2009 für ein Gebiet östlich von Merzenich.

Abbildung 6.11 zeigt einen Teil der finalen MDA-Landnutzungs-klassifikation 2009 für den selben Bereich wie Abbildung 6.7. Der Fokus der Abbildung soll auch in diesem Abschnitt des Ergebniskapitels nur auf der Unterscheidung der dominierenden Feldfrüchte liegen. Das vollständige Ergebnis zeigt Abbildung B.2 in Anhang B.

### 6.3.4 Evaluierung fernerkundungsbasierter MDA-Landnutzungs-klassen für Ackerland 2009

Tabelle 6.8 enthält die EM mit den berechneten Genauigkeiten für die vornehmlich fernerkundungsbasierten finalen MDA-Landnutzungs-klassen für Ackerflächen für 2009, die durch die Verschneidung der einzelnen ZS erzeugt wurden.

Tabelle 6.8: Error Matrix für vornehmlich fernerkundungsbasierte Landnutzungs-klassen der MDA-Landnutzungs-analyse 2009.

		Referenzdaten (Pixel)							Total	CE (%)	UA (%)	
		WR	KT	M	ZR	WW	WG	SG				
Klassifikation (Pixel)	Klasse	WR	6561	6	1	0	4	27	2	6601	0,61	99,39
	KT	0	1183	0	0	0	0	0	1183	0,00	100,00	
	M	0	0	6384	0	0	0	0	6384	0,00	100,00	
	ZR	0	2558	111	12114	0	0	0	14783	18,05	81,95	
	WW	0	0	0	0	14057	2537	1	16595	15,29	84,71	
	WG	0	55	0	0	288	7184	235	7762	7,45	92,55	
	SG	8	0	20	0	35	18	3169	3250	2,49	97,51	
	Total	6569	3802	6516	12114	14384	9766	3407	56558	-	-	
	OE (%)	0,12	68,88	2,03	0,00	2,27	26,44	6,99	-	OA(%)	89,56	
	PA (%)	99,88	31,12	97,97	100	97,73	73,56	93,01	-	Kappa	0,87	

Wie auch schon im Fall von 2008, war es aufgrund der Nutzung der Bodenreferenzdaten für die Analysen der einzelnen ZS nicht mehr möglich nur Testgebiete einzubeziehen, die zuvor noch nicht als Trainingsgebiete verwendet wurden. Daher wurden zur Verifizierung des Gesamtergebnisses erneut möglichst viele Referenzdaten einbezogen. Mit einer OA von 89,56 % sowie einem Kappa-Wert von 0,87 wurde für die Klassifikation von Feldfrüchten eine insgesamt nicht ganz so hohe, aber dennoch vergleichbare OA wie für 2008 erzielt.

Bei Sommerfrüchten wurde für die räumliche Verteilung von *Mais* jeweils eine sehr hohe PA und UA berechnet. Insgesamt konnte *Mais*, mit nur geringer Überschneidung mit *Zuckerrüben*, damit deutlich unterschieden werden. Auch bei *Zuckerrüben* legen die Werte der EM nahe, dass Flächen mit Zuckerrüben umfassend klassifiziert werden konnten. Die gemeinsame Betrachtung mit der Klasse *Kartoffeln* spiegelt allerdings die, bereits während der Beschreibung des Analyseablaufs angesprochene, hohe Ähnlichkeit von *Kartoffeln* und *Zuckerrüben* in den

meisten verfügbaren ZS wieder. Oftmals konnte anhand der verfügbaren Daten keine eindeutige Trennung erfolgen, so dass laut EM lediglich etwa ein Drittel der Flächen richtig als *Kartoffeln* ausgewiesen wurden. Der überwiegende Teil der Kartoffelfelder war nicht von Zuckerrüben zu unterscheiden und wurde folglich *Zuckerrüben* zugeordnet. Auf Grundlage der Testgebiete haben Kartoffeln demnach einen Anteil von etwa 18 % an der Klasse *Zuckerrüben*. Beide Klassen hätten auch zu einer Klasse zusammengefügt werden können. Da in diesem Fall jedoch keine Rückschlüsse mehr auf den relativen Anteil von Kartoffeln an der Ackerfläche möglich gewesen wären, wurde die Klasse *Kartoffeln* beibehalten. Für die Klasse *Sommergerste* konnte durch die Verschneidung der einzelnen ZS eine PA und UA von jeweils über 90 % erzeugt werden. Eine vollständige Unterscheidung von *Wintergerste* gelang allerdings nicht, sodass knapp 7 % der Referenzpixel für *Sommergerste* als *Wintergerste* klassifiziert wurden.

Bei den Winterfrüchten war erneut eine sehr gute Klassifikation von *Winterraps* möglich, so dass die EM auf eine verlässliche Unterscheidung schließen lässt. Auch für 2009 wurde die Unterscheidung von *Winterweizen* und *Wintergerste* angestrebt. Wie auch in 2008 war die spektrale Ähnlichkeit in allen verfügbaren ZS scheinbar zu hoch, so dass auch nach der Verschneidung der ZS noch 27 % der Testgebiete für *Wintergerste* fälschlicherweise *Winterweizen* zugeordnet waren. Flächen, die laut Referenzdaten mit *Winterweizen* bestellt waren, wurden hingegen zu über 97 % richtig zugeordnet. Darüber hinaus zeigt die EM, dass sich die Gruppen Sommerfrüchte und Winterfrüchte insgesamt nur sehr gering überschneiden.

## 6.4 Ergebnisse der MDA-Fernerkundungsanalyse 2010

Die Ergebnisdarstellung der MDA-Fernerkundungsanalysen für 2010 folgt dem Aufbau der vorangegangenen Kapitel bezüglich der Jahre 2008 und 2009.

### 6.4.1 Fernerkundungsdatenabdeckung 2010

Die Fernerkundungsanalyse 2010 besteht aus drei Zeitschnitten (ZS). Dabei setzen sich die ersten beiden ZS aus mehreren Teilszenen mit unterschiedlichen Aufnahmezeiten zusammen.

Tabelle 6.9: Fernerkundungsdaten der MDA-Landnutzungsanalyse des Jahres 2010.

Sensor	Datenprodukt	Aufnahmedatum	Zeitschnitt (ZS)	Bezeichnung
RapidEye (RE5)	L3A	20.05.2010	1	West-Szene
RapidEye (RE4)	L3A	23.05.2010	1	Ost-Szene
RapidEye (RE1)	L3A	07.07.2010	2	Haupt-Szene
RapidEye (RE2)	L3A	08.07.2010	2	NW-Szene(1/2)
RapidEye (RE4)	L3A	10.07.2010	2	NW-Szene (2/2)
Landsat-5 (TM)	L1T	14.08.2010	3	-

Tabelle 6.9 listet die ausgewählten Einzelszenen mit Aufnahmedatum, Aufnahmesystem, Datenprodukt, Bezeichnung sowie der Einordnung in die drei ZS auf. Abbildung 6.12 stellt die daraus resultierte Fernerkundungsdatenabdeckung des Untersuchungsgebiets für die einzelnen ZS dar.

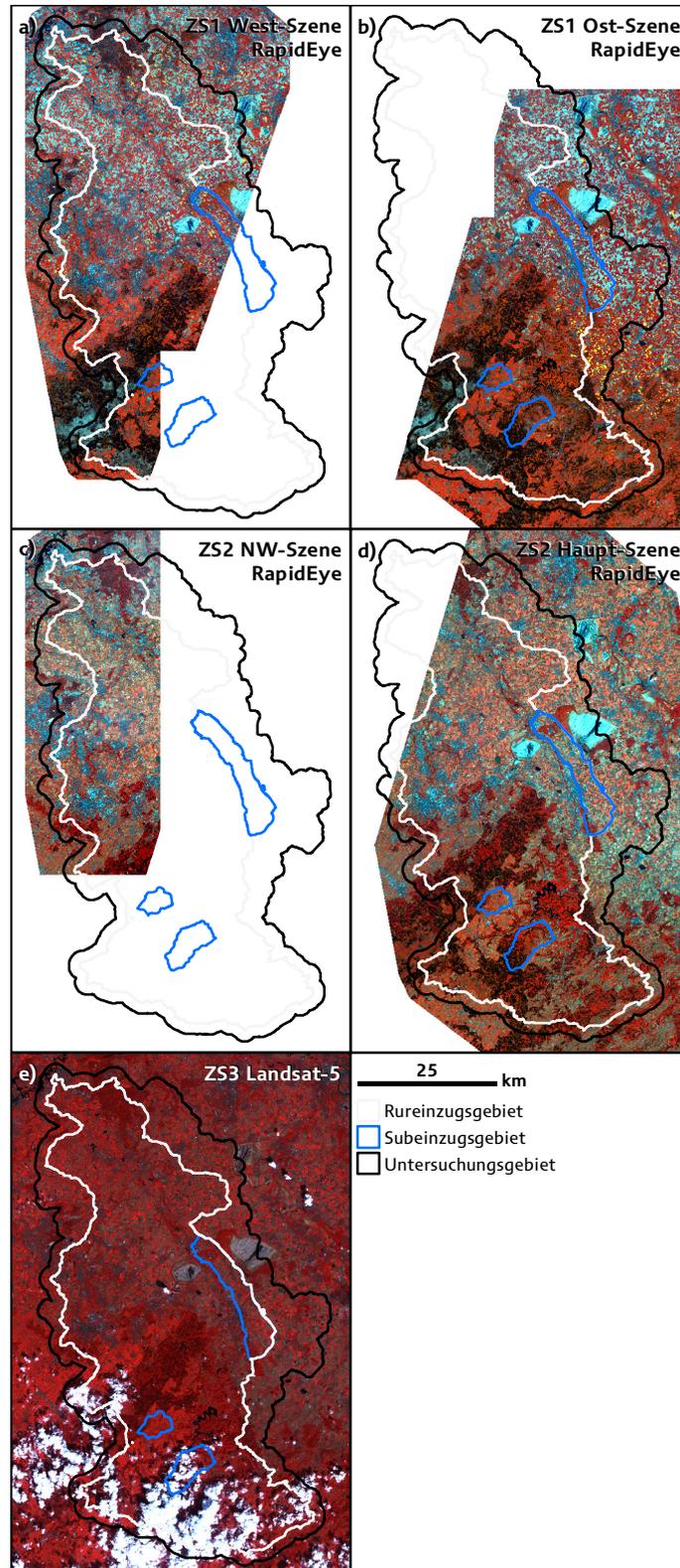


Abbildung 6.12: Fernerkundungsdatenabdeckung der MDA-Landnutzungsanalyse 2010, bestehend aus drei Zeitschnitten (Datenquellen: USGS 2010, RESA 2010).

Für ZS1 wurde eine RapidEye-Aufnahme von 20.05.2010 (West-Szene) sowie eine weitere Szene vom 23.05.2010 (Ost-Szene) verwendet, um das Untersuchungsgebiet vollständig abzudecken. Die Szene vom 20.05.2010 deckt dabei vornehmlich die Nordwesthälfte ab, wohingegen die Szene vom 23.05.2010 die Südosthälfte erfasst. In einem etwa in der Mitte des Untersuchungsgebiets angeordneten, und sich nordost-südwest erstreckenden Bereich, überlappen sich beide Szenen um ca. 15-20 km. Innerhalb des Untersuchungsgebiets sind beide Szenen der visuellen Erscheinung nach, von guter Qualität sowie wolkenfrei. Obwohl die Aufnahmedaten der beiden Fernerkundungsdatensätze relativ nahe beieinander lagen, wurde von einer Mosaikbildung abgesehen, da die visuelle Betrachtung des Überlappungsbereiches bereits zu deutliche spektrale Unterschiede zwischen beiden Datensätzen offenbarte. Die räumliche Verschneidung erfolgte daher erst nach der separaten Klassifikation. Dabei wurden die Daten der West-Szene im Überlappungsbereich verworfen.

Eine wolkenfreie RapidEye-Szene vom 07.07.2010 (Haupt-Szene) wurde für ZS2 ausgewählt, um den Großteil des Untersuchungsgebiets abzudecken. Der westliche Rand der Szene verläuft ebenfalls in Nordost-Südwest-Richtung ungefähr entlang der Linie Brüggen-Vaals (vgl. Abbildung 3.1). Für den übrigen Bereich wurde ein multitemporales Mosaik aus drei RapidEye-Kacheln (Nordwest-/NW-Szene) erzeugt. Hierzu dienten zwei RapidEye-Kacheln vom 08.07.2010 sowie eine weitere vom 10.07.2010, die alle von Nord nach Süd angeordnet sind. Die Kachel vom 10.07.2010 wird dabei von den beiden Kacheln vom 08.07.2010 flankiert. Wie auch schon für 2009 beschrieben, war es aus den gleichen Gründen leider nicht möglich eine mittlere RapidEye-Kachel vom 08.10.2010 zu beziehen. Die Daten verfügten jedoch über eine ausreichende Ähnlichkeit, so dass eine Mosaikbildung möglich war. Von einer weiteren Mosaikbildung von Haupt- und Nordwest-Szene zur Erzeugung einer einzigen Mosaikdatei wurde allerdings abgesehen, da hierbei die radiometrischen Unterschiede zu deutlich erschienen. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die einzelnen Szenen von unterschiedlichen RapidEye-Satelliten beziehungsweise -Sensoren stammten und deren Kalibration leichte Abweichungen aufgewiesen haben könnte. Daher wurden auch im Fall des ZS2 erst die Klassifikationsergebnisse räumlich verschnitten. Im Überlappungsbereich beider Datensätze wurden die Ergebnisse der Nordwest-Szene verworfen.

Als ZS3 wurde eine Landsat 5-Szene vom 14.08.2010 genutzt. Die Szene umfasste zwar das gesamte Untersuchungsgebiet, war allerdings besonders im Süden, aber auch vereinzelt in anderen Teilen des Untersuchungsgebiets von Bewölkung beeinträchtigt. Im Süden der Szene wurden daher die stark bewölkten Bereiche, die sich außerhalb der Acker-FB befanden, bei der Datenaufbereitung großflächig ausmaskiert.

### 6.4.2 Ausgewählte Klassifikationen 2010

Tabelle 6.10 fasst die ausgewählten Einzel-Klassifikationsergebnisse mit OA und Kappa-Wert zusammen, die zur MDA-Fernerkundungsanalyse und somit zur Bildung der MDA-Basis-Landnutzungskarte (FE-Basis) verwendet wurden.

Tabelle 6.10: Für die MDA-Analyse 2010 ausgewählte Klassifikationen.

Zeitschnitt	Aufnahmedatum	Sensor	Gebiet	Verfahren	OA (%)	Kappa	EM
1	20.05.2010 (West-Szene)	RapidEye	ALL	SVM	94,42	0,94	A.29
			FB	SVM	98,53	0,97	A.30
	23.05.2010 (Ost-Szene)		ALL	SVM	91,59	0,91	A.27
			FB	SVM	91,11	0,88	A.28
2	07.07.2010 (Haupt-Szene)	RapidEye	ALL	SVM	90,79	0,90	A.31
			FB	SVM	90,18	0,87	A.32
	08. & 10.07.2010 (Nordwest-Szene)		ALL1	SVM	89,06	0,88	A.33
			ALL2	MLC	87,78	0,86	A.34
			FB	SVM	88,39	0,86	A.35
3	14.08.2010	Landsat-5	ALL	SVM	92,11	0,91	A.36
			FB	SVM	95,83	0,94	A.37

Die vollständigen EM für die einzelnen Klassifikationen befinden sich in Anhang A. Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14 zeigen jeweils Ausschnitte der ALL und FB-Klassifikationen der einzelnen ZS.

ZS1 sollte wie auch in den Jahren zuvor, als Grundlage zur Disaggregation der Landnutzungskarte dienen. Neben den üblichen verwendeten Landnutzungsklassen für Ackerflächen, *Wald*, *Gewässer*, *versiegelte Flächen* wurde die Landnutzungsklasse *Moor* für die Mooregebiete des Hohen Venns einbezogen. Darüber hinaus sollte die an die gleichnamige ATKIS-Objektart angelegte Klasse *Gebölk* erneut eine bessere Differenzierung von reinen Grasflächen und Flächen mit schütterem Bewuchs innerhalb oder am Rand von Waldflächen erzielen. Zur besseren Abgrenzung der einzelnen Klassen wurden zudem die Klassen *Grünland*, *Laub-/Mischwald* und *versiegelte Flächen* erneut in mehrere Spektralklassen unterteilt. Bezüglich der Erfassung der Landnutzung auf landwirtschaftlichen Flächen dienten die Klassifikationen der gesamten Szenen (ALL) bei allen ZS erneut nur für die Gebiete des Untersuchungsgebiets außerhalb Deutschlands. Die ALL-Klassifikationsergebnisse der Fernerkundungsdaten vom 23.05.2010 (Ost-Szene) wurden für ZS1 als Hauptdatensatz gewählt, da hierdurch der größere Teil des Untersuchungsgebiets abgedeckt wurde. Da das abgedeckte Gebiet kaum Ackerflächen außerhalb Deutschlands umfasste, dienten die entsprechenden Klassen lediglich zur Abgrenzungen der einzelnen Klassen im Merkmalsraum, sie wurden jedoch nicht weiter benötigt. Für die ausgewählte SVM-Klassifikation wurde eine OA von 91,59 % bestimmt (EM siehe Tabelle A.27).



Abbildung 6.13: ALL-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2010 (alle SVM), für die in Abbildung 3.1 dargestellten Subsets: a) Selhausen; b, d, e) Merzenich; c), Karken. Mit \* markierte Feldfrüchte waren zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits geerntet.

Bei der visuellen Betrachtung der Klassifikationsergebnisse wurde mehrfach beobachtet, dass *unbedeckter Boden* (Ackerboden) – wie auch hier – innerhalb von Ortschaften klassifiziert



wurde. Ebenso war die spektrale Ähnlichkeit der Klassen *Moor* und *unbedeckter Boden* so hoch, so dass viele Bereiche des Hohen Venn als *unbedeckter Boden* klassifiziert wurden.

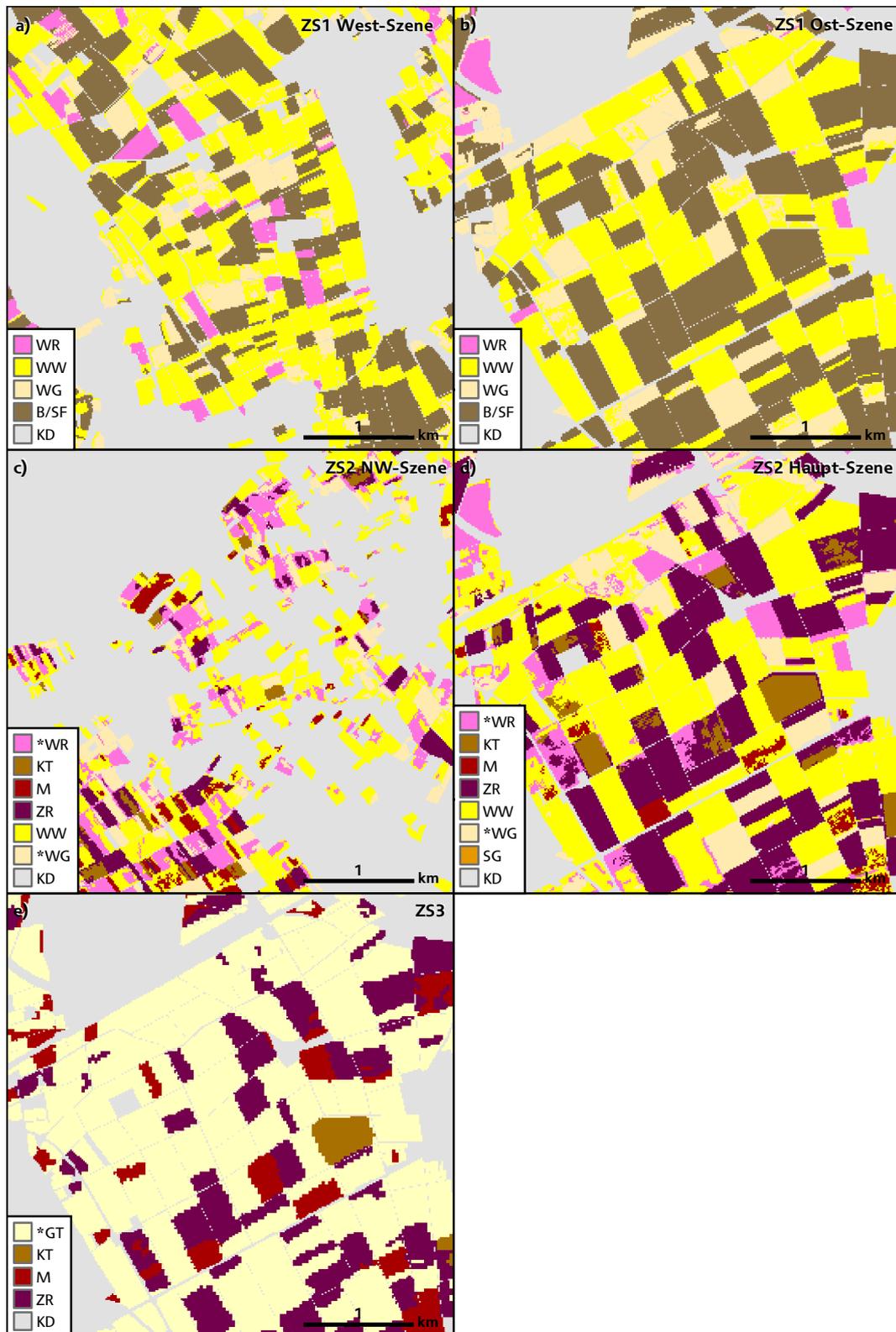


Abbildung 6.14: FB-Klassifikationen der MDA-Landnutzungsanalyse 2010 (alle SVM), für die in Abbildung 3.1 dargestellten Subsets: a) Selhausen; b, d, e) Merzenich; c), Karken. Mit\* markierte Feldfrüchte waren zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits geerntet.

Auch innerhalb von Ortschaften wurden kleine Pixelgruppen *Moor* zugeordnet. Von der Ausweisung von Klassen für die Tagebauflächen wurde erneut abgesehen, da keine Unterscheidung von spektral ähnlichen Klassen wie *versiegelte Fläche* oder *unbedeckter Boden* erzielt werden konnte. Bezüglich Waldgebieten und Grünflächen zeigten sich erneut leichte Überschneidungen der Klassen für Getreide, *Grünland* und *Laubwald*. *Nadelwald* und *Gewässer* wurden hingegen sehr deutlich von anderen Klassen unterschieden. Für die westlichen Gebiete, welche die Daten des 23.05.2010 nicht abdeckten, wurde die RapidEye-Szene vom 20.05.2010 (West-Szene) ebenfalls mit dem SVM-Verfahren klassifiziert. Infolge der Datenabdeckung standen vor allem für die Klassifikation von Ackerflächen leider deutliche weniger Bodenreferenzdaten für Trainings- und Testgebiete zur Verfügung. Die berechnete OA der ALL-Klassifikation war mit 94,42 % etwas höher (vgl. Tabelle A.29), als das Ergebnis für die Ost-Szene. Der visuelle Vergleich der beiden Ergebnisse im Überlappungsbereich erbrachte jedoch, dass in beiden Klassifikationen im Wesentlichen die gleichen Bereiche unterschieden wurden, so dass eine Verschneidung beider Ergebnisse zulässig war.

Die zwangsläufig unterschiedliche Trainingsdatengrundlage führte allerdings besonders innerhalb von Siedlungsflächen zu einer leicht veränderten Klassenzusammensetzung. Ebenso wurden Ackerflächen mit unbedecktem Boden in einigen Fällen *versiegelter Fläche* zugeordnet. Sehr ähnlich erfolgte aber die Klassifikation der Gebiete des Hohen Venns in der Ost- und in der West-Szene. Bezüglich der landwirtschaftlichen Nutzfläche außerhalb der deutschen Gebiete, deutete die visuelle Begutachtung auf eine plausible Klassifikation von *unbedecktem Boden* hin. Die Unterscheidung von Getreide und *Grünland* erschien hingegen oftmals unklar.

Bei der Klassifikation der FB-Bereiche beider Szenen wurden die Klassen *unbedeckter Boden*, *Winterweizen*, *Wintergerste* und *Winterraps* unterschieden. Bei der SVM-Klassifikation der Ost-Szene konnte mit 91,11 % erneut eine hohe OA erzielt werden (EM siehe Tabelle A.28). Besonders die Klassifikation von *unbedecktem Boden* (Sommerfrüchte) und *Winterraps* gelang mit hoher Genauigkeit. Die Betrachtung der EM zeigte im Hinblick auf die Unterscheidung von *Winterweizen* und *Wintergerste* jedoch, dass dies erneut anhand der Fernerkundungsdatengrundlage nicht eindeutig möglich war. So führten die fast nur gegenseitigen Fehlzusweisungen bei den beiden Wintergetreidearten bei *Winterweizen* zu einer PA von 86,18 % und einer UA von 87,63 %. Bei *Wintergerste* wurden mit 75,62 % (PA) und 73,38 % (UA) jeweils etwa ein Viertel der Pixel falsch zugewiesen. Für FB-Klassifikation der West-Szene wurde mit 98,53 % eine sehr hohe OA berechnet (EM vgl. Tabelle A.30). So ergab die Klassifizierung von *Winterraps* und *unbedecktem Boden* erneut eine sehr hohe Genauigkeit. Gegenüber dem Klassifikationsergebnis der Ost-Szene wurde in Bezug auf Wintergetreide auch eine deutlich bessere Unterscheidung von *Winterweizen* und *Wintergerste* errechnet. Hierzu muss allerdings erneut betont werden, dass für diese Szene deutlich weniger Referenzdaten zur Verfügung standen. Da die visuelle Betrachtung der Überlappungsbereiche beider Klassifikationen eine sehr hohe Ähnlichkeit beider Klassifikationen erbrachte, wurde die

Klassifikationsgenauigkeit in Bezug auf Wintergetreide jedoch als schlechter und eher vergleichbar mit der Genauigkeit der Ost-Szene eingeschätzt.

Für ZS2 zielte die ALL-Klassifikation der RapidEye-Daten vom 07.07.2010 (Haupt-Szene) vor allem auf die Verbesserung der Unterscheidung der Wald-Klassen sowie auf die bessere Erfassung der Moorgebiete im Südwesten des Untersuchungsgebiets ab. Mit 90,79 % wurde auch für diese Klassifikation eine hohe OA berechnet (EM siehe Tabelle A.31). Die visuelle Betrachtung deutete jedoch darauf hin, dass starke Überschneidungen zwischen *Winterweizen* und *Grünland* sowie zwischen der spektralen (Misch-)Signatur aus *versiegelter Fläche* und Vegetation bestanden. Vor allem in Siedlungsbereichen führte diese zu sehr häufigen Fehlklassifikationen, so dass *Winterweizen* in dieser Klassifikation deutlich überrepräsentiert war. Leider führten weitere Klassifikationsversuche zu keiner Verbesserung der Unterscheidung. Die Abgrenzung von *Laubwald* und *Nadelwald* war hiervon allerdings kaum betroffen. Die Erfassung der Moorgebiete des Hohen Venns konnte mit dieser Klassifikation gegenüber ZS1 verbessert werden, da deutlich weniger Bereiche als *unbedeckter Boden* klassifiziert wurden. Um die Differenzierung bestimmter Landnutzungsklassen zu ermöglichen, wurden die Klassen *Grünland*, *Laubwald* und *Moor* erneut in mehrere Spektralklassen untergliedert. Die Ergebnisse der Klassifikation in Bezug auf Ackerflächen konnten weitestgehend ignoriert werden, da kaum Ackerland außerhalb Deutschlands von dieser Szene erfasst wurde. Mit der Klassifikation der entsprechenden FB-Bereiche der Haupt-Szene wurde im Besonderen die Erfassung von Sommergetreide (*Braugerste*) im Bereich der Eifel sowie die Unterscheidung von Hackfrüchten in *Zuckerrüben*, *Mais* und *Kartoffeln* angestrebt. Während Winterweizen meistens noch auf den Feldern stand, waren die Felder mit Winterraps (mit Ausnahme der Eifel) und Wintergerste zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits weitestgehend abgeerntet. In den meisten Fällen waren die geernteten Flächen von Wintergerste und Winterraps allerdings anhand ihrer spektralen Signaturen gut voneinander zu unterscheiden. Um daher die Unterteilung von Wintergetreide in Weizen und Gerste noch nachträglich verbessern zu können, wurde zusätzlich die indirekte Klassifikation von *Winterraps* und *Wintergerste* durchgeführt. Für das ausgewählte SVM-Ergebnis wurde eine OA von 90,18 % berechnet (EM vgl. Tabelle A.32). Trotz leichter Überschneidungen konnte durch die Klassifikation eine insgesamt gute Unterscheidung von geernteten Flächen von *Wintergerste* und *Winterraps* erfolgen. Während für die Klasse *Winterraps (geerntet)* eine PA und eine UA von jeweils über 95 % berechnet wurden, lagen die Genauigkeitswerte für *Wintergerste (geerntet)* besonders durch Überschneidungen mit *Winterweizen* knapp unter 85 %. Wie im Falle der ALL-Klassifikation, war auch bei der FB-Klassifikation trotz einer hohen PA von über 90 % keine vollständige Abgrenzung von *Winterweizen* von anderen Klassen möglich. So bestand, neben leichten Überschneidungen mit *Sommergerste*, vor allem noch eine hohe Ähnlichkeit zu *Mais*, so dass laut der EM über ein Drittel der Testpixel für *Mais* falsch als *Winterweizen* klassifiziert wurden (vgl. auch Abbildung 6.14d). Abgesehen von vereinzelten Fehlklassifikationen von Winterweizen als *Mais*, wurde Mais ansonsten gut von allen anderen

Feldfrüchten unterschieden. Dies traf auch auf *Sommergerste* zu. Bezüglich *Zuckerrüben* und *Kartoffeln* zeigte sich, dass trotz einer insgesamt sehr guten Klassifikation von *Zuckerrüben*, eine eindeutige Trennung von *Kartoffeln* erneut nicht vollständig möglich war. Von den Testgebieten für *Kartoffeln* wurden etwa ein Viertel in die Klasse *Zuckerrüben* eingeordnet. Ebenso wurden einige Testpixel für *Zuckerrüben* als *Kartoffeln* klassifiziert.

Da der zweite Fernerkundungsdatensatz für ZS2 (NW-Szene) nur einen schmalen Bereich des Untersuchungsgebiets abdeckte, standen wie auch schon in einem Fall in 2009, keine Bodenreferenzdaten für Ackerland zur Verfügung. Um die betreffenden Landnutzungen dennoch klassifizieren zu können, wurde erneut auf die in Kapitel 6.3.2 (ZS6) beschriebene Vorgehensweise in Anlehnung an die *chain classification* (KNORN et al. 2009) zurückgegriffen. Als Grundlage für Trainings- und Testgebiete für Ackerland diente die FB-Klassifikation vom 07.07.2010, da sich beide Datensätze ausreichend überlappten. Entsprechende Gebiete für *Grünland* wurden den Grünland-Feldblöcken entnommen. Alle weiteren Klassen beruhten wie üblich auf der visuellen Interpretation von Luftbilddaten. Bei der Auswertung der EM ist die Herkunft der Testgebiete somit erneut besonders zu berücksichtigen. Abgesehen von Sommergetreide (*Braugerste*) wurden für die Nordwest-Szene dieselben Trainingsklassen wie für die Haupt-Szene verwendet. Da mit ZS1 bereits eine vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebiets erfolgt war, diente die Klassifikation ALL1 hauptsächlich zur Erfassung von Veränderungen auf Ackerflächen außerhalb der deutschen Gebiete. Für das verwendete SVM-Ergebnis wurde eine OA von 89,06 % berechnet (EM siehe Tabelle A.33). Insgesamt wurde anhand der visuellen Betrachtung des Überlappungsbereichs mit dem ALL-Klassifikationsergebnis der Haupt-Szene eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Klassifikationen bestimmt, so dass nachfolgend eine Verschneidung zu einem einzigen Datensatz möglich war. Wie auch bei der Haupt-Szene ließ die visuelle Betrachtung des ALL1-Ergebnisses auf eine starke Überschneidung von *Winterweizen* und den Klassen für *Grünland* schließen. Deutlich stärker war jedoch die bereits bei der Haupt-Szene beschriebene Überschneidung zwischen *Winterweizen* und *Mais* ausgeprägt, so dass Bereiche mit *Mais* überwiegend der Klasse *Winterweizen* zugeordnet wurden. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine MLC-Klassifikation ALL2 des Datensatzes in die Analyse einbezogen. Mit einer OA von 87,78 % wurde hierbei ein etwas schlechteres, insgesamt aber vergleichbares, Ergebnis erzielt (EM vgl. Tabelle A.34). Die Unterscheidung von *Mais* und *Winterweizen* gelang hierbei jedoch besser. Aus diesem Grund wurde, zur Erleichterung der nachfolgenden Analysen, (ausschließlich) das Klassifikationsergebnis für *Mais* (PA: 78,92 %, UA: 84,34 %) mit dem SVM-Ergebnis (ALL1) verschnitten. Dabei wurden nur *Mais*-Pixel übertragen, die im SVM-Ergebnis als *Winterweizen* klassifiziert wurden. Für die Gebiete in Deutschland, die nicht durch die Haupt-Szene abgedeckt wurden, erfolgte ebenfalls eine FB-Klassifikation der Nordwest-Szene. Auch hier dienten die Ergebnisse der FB-Klassifikation der Haupt-Szene als Grundlage. Für die verwendete SVM-Klassifikation wurde eine OA von 88,39 % berechnet (EM siehe Tabelle A.35). Insgesamt wurde aus der visuellen Begutachtung des

Überlappungsbereichs mit der FB-Klassifikation der Haupt-Szene eine gute Übereinstimmung geschlossen. Auch hier traten die Überschneidungen zwischen *Winterweizen* und *Mais* in vergleichbarem Maß auf. Etwas stärker kamen jedoch Fehlzuzuweisungen zwischen *Zuckerrüben* und der Klasse *Winterraps* vor. So wurde *Winterraps* oftmals – vermutlich aufgrund von Unterschieden in der Bewuchsdichte – innerhalb von Bereichen klassifiziert, die vornehmlich *Zuckerrüben* zugewiesen wurden (vgl. Abbildung 6.14c).

Die Klassifikationsergebnisse des ZS3 sollten vornehmlich zur Verbesserung der Klassifikation von Ackerflächen dienen, da alle weiteren Landnutzungen bereits durch die vorherigen ZS ausreichend erfasst wurden. Aufgrund des Aufnahmedatums sowie als Rückschluss aus der visuellen Inspektion der L5-Daten, konnte davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt Getreide weitestgehend abgeerntet war. Demzufolge wurde die Auswahl der Trainingsgebiete besonders auf die weitere Differenzierung von Hackfrüchten ausgelegt und nicht auf die umfassende Unterscheidung aller Landnutzungen. Die anderen Landnutzungsklassen wurden daher vor allem zur besseren Abgrenzung von Hackfrucht-Klassen einbezogen. Als ALL-Klassifikation diente ein SVM-Ergebnis mit einer OA von 92,11 % (EM vgl. Tabelle A.36). Trotz der hohen Gesamtgenauigkeit spiegelte sich die ursprüngliche gröbere räumliche Auflösung der L5-Daten (sowie vermutlich auch das hohe Alter des Sensors) deutlich im Klassifikationsergebnis wieder. So war die Klasse für abgeerntete Felder beziehungsweise *unbedeckter Boden*, dem visuellen Eindruck nach, deutlich überrepräsentiert. Zudem wurde etwa ein Viertel der Testgebiete für *Laubwald* als *Mais* klassifiziert. Die PA von *Mais* war mit fast 98 % hingegen sehr hoch. Auch *Zuckerrüben* wurden mit einer PA und einer UA von jeweils über 92 % insgesamt sehr gut unterschieden, wobei 5,94 % der Testgebiete als *Mais* klassifiziert wurden. Bezüglich *Kartoffeln* wurden knapp 10 % der Testgebiete *Zuckerrüben* zugeordnet und weitere 7,70 % mit *Grünland* verwechselt. Die UA von *Kartoffeln* betrug allerdings fast 100 %. Mit der entsprechenden FB-Klassifikation (SVM, OA 95.83 %) konnte die Klassifikationsgenauigkeit für die Ackerflächen in Deutschland noch etwas verbessert werden (EM siehe Tabelle A.37). Insgesamt zeigte sowohl der visuelle Vergleich mit der ALL-Klassifikation als auch der Vergleich der beiden EM eine sehr hohe Übereinstimmung. Die Klassifikationsverbesserungen wurden vor allen darauf zurückgeführt, dass keine Überschneidungen mit Grünland möglich waren.

### 6.4.3 Produktion der fernerkundungsbasierten MDA-Landnutzungs-Basis-Karte 2010

Wie auch für die Jahre 2008 und 2009, werden im Folgenden nur die wesentlichen Analyseschritte beschrieben, die zur Erzeugung der vornehmlich fernerkundungsbasierten Landnutzungsklassen geführt haben. Da die Aufnahmezeitpunkte der Fernerkundungsdaten

innerhalb der einzelnen Zeitfenster zeitlich eng beieinander lagen, konnten für 2010 Zeitschnitte erstellt werden, die abgesehen von bewölkten Bereichen in ZS3, jeweils das gesamte Untersuchungsgebiet räumlich abdeckten. Bei der Anwendung von Produktionsregeln musste daher lediglich nach Abdeckungsbereich der Feldblock-Daten sowie nach NR-Regionen unterschieden werden. Wie in den Jahren zuvor, wurden die NR-Regionen 3 & 4 sowie die Gebiete in den Niederlanden und in Belgien für einige Klassen separat behandelt.

Auch für 2010 dienten die Analyseergebnisse des ZS1 als Ausgangsbasis für alle fernerkundungsbasierten MDA-Landnutzungsklassen und als Grundlage zur Verschneidung der Landnutzungsinformationen der einzelnen ZS. Neben den Landnutzungsklassen auf Ackerflächen, wurden in der Ausgangsbasis zunächst die Klassen *Grünland*, *Laub-/Nadelwald*, *Gewässer*, *versiegelte Flächen*, *Gebölz* und *Moor* unterschieden. Obwohl die Aufnahmen der Fernerkundungsdaten für ZS1 erneut erst relativ spät im ersten Zeitfenster erfolgten, war Sommergetreide vor allem in NR-Region 4 noch nicht so weit entwickelt wie in 2009. Mit Ausnahme von NR-Region 3, wo als *Sommergerste* kartierte Flächen bereits deutlich Bewuchs erkennen ließen und bei der Klassifikation nicht von *Wintergerste* zu unterscheiden waren, ergaben die Klassifikationsergebnisse des ZS1 für alle anderen Gebiete eine deutliche Unterteilung der Ackerfläche. Basierend auf ZS1 wurden daher zunächst Bereiche mit *Winterweizen*, *Wintergerste*, *Winterraps* und Flächen mit *unbedecktem Boden* (Sommerfrüchte) unterschieden. Aufgrund der sehr guten Klassifikationsergebnisse war die räumliche Verteilung von *Winterraps* bereits mit ZS1 festgelegt. Die entsprechenden Flächenbereiche wurden daher bei der weiteren Datenverschneidung, von leichten Korrekturen abgesehen, nicht mehr berücksichtigt beziehungsweise ausgeschlossen. Wie es die hierfür entwickelte methodische Vorgehensweise vorsah, wurde die übrige Klasseneinteilung der Ackerflächen auf Basis des ZS1 verwendet, um als Masken-Layer für die strikte räumliche Trennung von Flächen mit Wintergetreide und mit Sommerfrüchten für die weiteren Analysen zu dienen.

In NR-Region 3 konnte hingegen zunächst nur eine Unterscheidung von Getreide und Hackfrucht-Flächen erfolgen. Die Unterscheidung von Sommer- und Wintergetreide sowie die Disaggregation von Hackfrüchten sollte mit Hilfe des ZS2 ermöglicht werden. Darüber hinaus wurde die deutlichere Trennung von *Winterweizen* und *Wintergerste* angestrebt. Um zunächst die räumliche Verbreitung von *Winterweizen* zu verbessern, wurden Bereiche die – zusätzlich zu ZS1 – in ZS2 als *Winterweizen* klassifiziert wurden, in den finalen Landnutzungs-Layer übertragen. Da *Wintergerste* bereits geerntet war und nicht mehr direkt bestimmt werden konnte, wurde geschlussfolgert, dass als *Winterweizen* klassifizierte Bereiche auf Wintergetreideflächen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch dem entsprachen. Zusätzlich offenbarte der Vergleich von ZS1 und ZS2 auf Kartierungsflächen, dass *Winterweizen*, jedoch nicht *Wintergerste*, auf Wintergetreideflächen zudem oftmals als *Zuckerrüben* oder *Winterraps*, teilweise auch als *Mais* klassifiziert wurde. Durch die Umklassifizierung auch dieser Bereiche zu *Winterweizen* sollten fehlerklassifizierte Bereiche zusätzlich reduziert werden. Produktionsregeln

zur expliziten Präzisierung der Klassifikation von *Wintergerste* konnten jedoch nicht angewendet werden, da hierfür keine eindeutigen Muster beim Vergleich der ZS erkennbar waren. Wie bereits in Kapitel 6.4.2 erläutert, konnten auch spektrale Überschneidungen von *Winterweizen* mit anderen Feldfrüchten bei der Klassifikation in ZS2 nicht vollständig beseitigt werden. So wurde auch auf Hackfrucht-Flächen eine bedeutende Anzahl von Pixeln als *Winterweizen* klassifiziert, die jedoch mit hoher Sicherheit *Mais* repräsentierten (siehe Abbildung 6.14d). Verwechslungen von *Winterweizen* mit *Zuckerrüben* oder *Kartoffeln* konnten hingegen nicht identifiziert werden. Demzufolge wurden alle Pixel, die auf Sommerfrucht-Flächen als *Winterweizen* klassifiziert wurden in der finalen Landnutzung als *Mais* ausgewiesen.

Die räumliche Verteilung von *Zuckerrüben* wurde zunächst ebenfalls aus ZS2 übertragen. Obwohl dies nicht bei den Kartierungsflächen beobachtet werden konnte, zeigte die visuelle Betrachtung von ZS2, dass besonders innerhalb von Flächen die dominant als *Zuckerrüben* klassifiziert wurden, einzelne Bereiche oftmals *Winterraps* zugeordnet wurden. Bei Flächenbereichen die vornehmlich als *Mais* oder *Kartoffeln* klassifiziert wurden, trat dieses Phänomen jedoch äußerst selten bis gar nicht auf. Um die Abdeckung von *Zuckerrüben* zu verbessern, wurden entsprechende Bereiche zu *Zuckerrüben* zugeordnet. Sommerfrucht-Flächen, die in ZS2 und ZS3 als *Kartoffeln* klassifiziert wurden, erhielten in der finalen Landnutzung zunächst diese Klasse. Da für *Zuckerrüben* in der Regel höhere Klassifikationsgenauigkeiten als für *Kartoffeln* berechnet wurden, hatten die Klassifikationsergebnisse für *Zuckerrüben* jedoch eine höhere Priorität bei der Verschneidung. *Mais* wurde hingegen infolge der höchsten Klassifikationsgenauigkeit auch mit der höchsten Priorität übertragen. Nachdem ZS1-3 mit einander verschnitten waren, blieben in den Börden auf Hackfrucht-Flächen einige Bereiche zurück, für die auch durch die Kombination der einzelnen ZS keine Feldfruchtinformation zugewiesen werden konnte. Es wurde vermutet, dass es sich dabei um *Kartoffeln* handelte. Da dies anhand der vorhandenen ZS nicht mit ausreichender Sicherheit abzuleiten war, verblieben diese Flächen als Klasse *unbedeckter Boden/Sommerfrucht*.

In den NR-Regionen 3 & 4 wurde mit ZS2 zusätzlich *Sommergerste* klassifiziert. Allen entsprechenden Bereichen wurde daher diese Klasse zugewiesen. Klassifikationsergebnisse aus ZS1 wurden dementsprechend überschrieben. Die vollständige Unterscheidung von Wintergetreide war jedoch nicht immer möglich. Außerhalb dieser beiden Regionen wurde *Sommergerste* nur selten klassifiziert und daher nicht übertragen. Anhand von ZS3 konnten diese Flächen oftmals als *Mais* erkannt werden.

In NR-Region 4, und teilweise auch in NR-Region 3, wurde die Abdeckung von *Mais* durch die Klassifikationsergebnisse aus ZS3 ergänzt, da *Mais* manchmal erst zu diesem Zeitpunkt direkt detektiert werden konnte. Bereiche die in NR-Region 4 in ZS3 auf Sommerfrucht-Flächen als *Zuckerrüben* ausgewiesen waren, wurden ebenfalls als *Mais* übertragen, da dies als eine Fehlklassifikation aufgrund der hohen spektralen Ähnlichkeit eingeschätzt wurde. In 2010

wurden laut Landwirtschaftszählung 2010 für NRW (IT.NRW 2011) in den entsprechenden Gemeinden (beispielsweise in Nettersheim oder Schleiden) keine Zuckerrüben angebaut. Flächen die allerdings in NR-Region 3 in ZS2 auf Hackfrucht-Flächen als *Zuckerrüben* klassifiziert wurden, behielten in der Regel diese Klasse, da Zuckerrüben in dieser Region noch vereinzelt kartiert werden konnten. Laut Landwirtschaftszählung 2010 (IT.NRW 2011) wurden diese in den betreffenden Gemeinden auch angebaut.

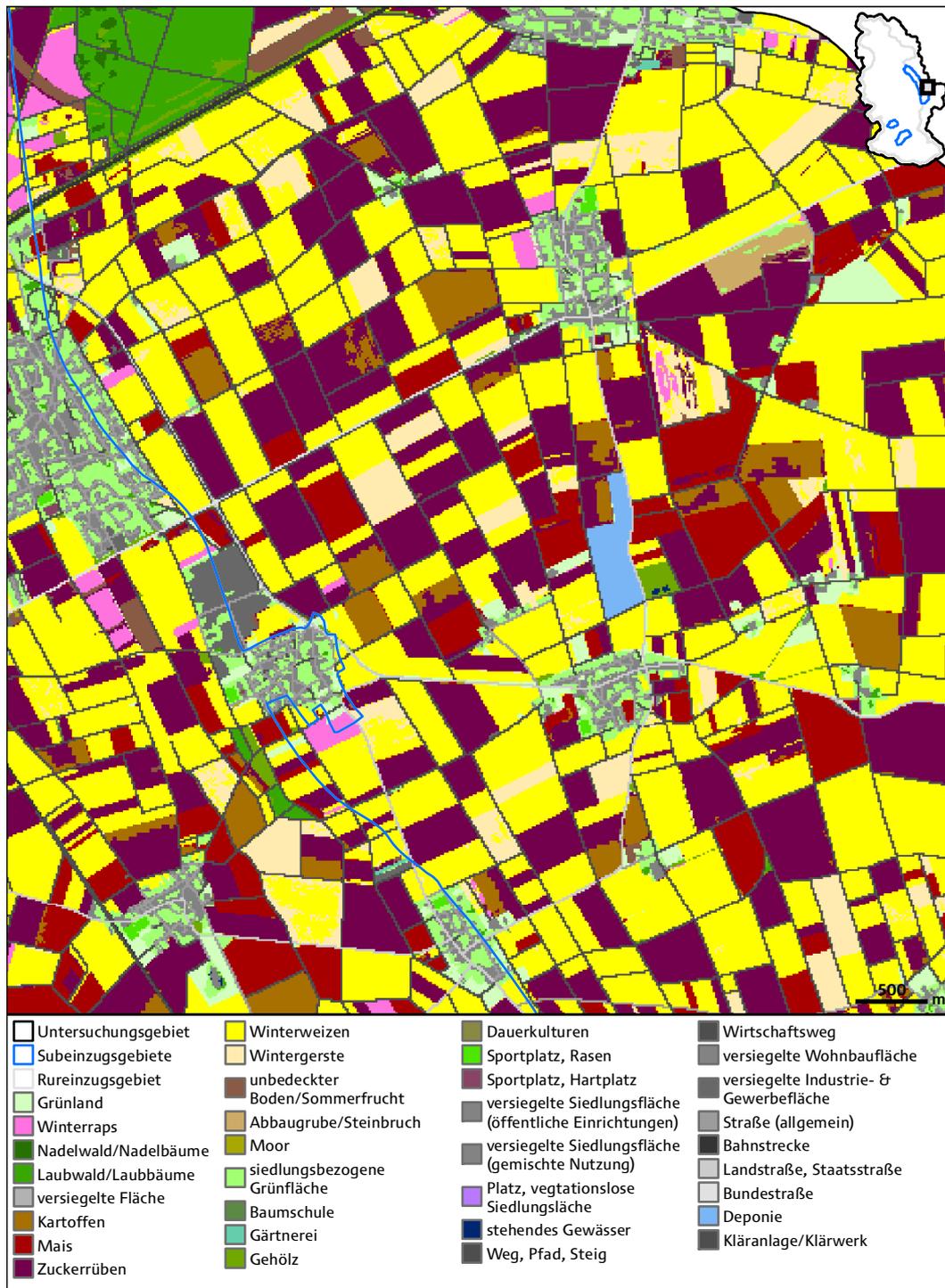


Abbildung 6.15: Ausschnitt der MDA-Landnutzungs-klassifikation 2010 für ein Gebiet östlich von Merzenich.



Für die Bereiche des Untersuchungsgebiets in den Niederlanden und in Belgien diente ZS1 ebenfalls als Grundlage für die Unterscheidung von Sommer und Winterfrüchten. Durch das Fehlen von räumlichen Informationen, die mit den Feldblock-Daten vergleichbar waren, konnte die Unterscheidung von Ackerland und Grünland jedoch erneut nicht in ähnlicher Form wie für die deutschen Bereiche erfolgen. Da in ZS2, in den Gebieten außerhalb Deutschlands, starke Überschneidungen zwischen Getreide und Grünland offensichtlich waren, wurde dieser ZS lediglich für Bereiche verwendet, die in ZS1 als Hackfrüchte (bzw. Sommerfrüchte) klassifiziert wurden. Die Informationen bezüglich *Wintergetreide* und *Winterraps* stammen daher fast ausschließlich aus ZS1. Bezüglich Siedlungsbereichen wurden die Klassifikationsergebnisse zu *versiegelten Flächen* aus ZS2 genutzt, um Fehlklassifikationen zwischen *versiegelter Fläche* und *unbedecktem Boden/Sommerfrucht* zu reduzieren.

Bezüglich der Sommerfrucht-Flächen traten auch in ZS2 die bereits beschriebenen Überschneidungen zwischen *Mais* und *Winterweizen* (und hier zusätzlich mit *Laubwald*) sowie zwischen *Zuckerrüben* und *Winterraps* auf. Auch hier wurden diese Bereiche in der zuvor beschriebenen Weise aus ZS2 entnommen und umklassifiziert. Zusätzlich deutete der Vergleich von ZS1 und ZS2 auf eine Fehlklassifikation von *Kartoffeln* als *Grünland* hin. Bereiche die auf Sommerfrucht-Flächen in ZS2 als *Kartoffeln* oder *Grünland* klassifiziert wurden, erhielten in der finalen Landnutzung daher die Klasse *Kartoffeln*. Informationen aus ZS3 wurden in den Gebieten außerhalb Deutschlands nur zur Verbesserung der Unterscheidung von *Mais* und *Zuckerrüben* übertragen. Zur Optimierung der Unterscheidung von *Laubwald* und *Nadelwald* wurden die Klassifikationsergebnisse von ZS1 mit ZS2 ergänzt. Die Synthese der einzelnen ZS zur Bildung der FE-Basis war damit für 2010 abgeschlossen. Abbildung 6.15 zeigt einen Teil der finalen MDA-Landnutzungs-klassifikation 2009. Der Fokus der Abbildung soll auch in diesem Abschnitt des Ergebniskapitels nur auf der Unterscheidung der dominierenden Feldfrüchte liegen. Das vollständige Ergebnis zeigt Abbildung B.3 in Anhang B.

#### 6.4.4 Evaluierung fernerkundungsbasierter MDA-Landnutzungs-klassen für Ackerland 2010

Auch für die vornehmlich fernerkundungsbasierten Landnutzungs-klassen für Ackerland und Wald der MDA-Landnutzungs-klassifikation 2010 diente die Berechnung einer EM zur ortsspezifischen Evaluierung der MDA-Analysen. Diesbezüglich ist erneut zu erwähnen, dass die hierfür eingesetzten Referenzdaten bereits während des Klassifikationsprozesses der einzelnen ZS verwendet wurden. Demzufolge wurden auch hier möglichst viele Testgebiete verwendet. Im Vergleich zu 2009 konnte die OA von 93,94 % und der Kappa-Wert von 0,93 wieder etwas gesteigert werden.

Tabelle 6.11: Error Matrix für vornehmlich fernerkundungsbasierte Landnutzungsklassen der MDA-Landnutzungskarte 2010.

		Referenzdaten (Pixel)									Total	CE (%)	UA (%)
		NW	LW	WR	KT	M	ZR	WW	WG	SG			
Klassifikation (Pixel)	Klasse	9722	0	0	0	0	0	0	0	0	9722	0	100,00
	LW	14	9096	0	0	0	0	0	0	0	9110	0,15	99,85
	WR	0	0	7486	0	0	0	0	0	5	7491	0,07	99,93
	KT	0	0	0	6907	3	147	0	0	0	7057	0,13	97,87
	M	0	0	8	6	8315	228	46	0	127	8730	4,75	95,25
	ZR	0	0	0	2187	212	18080	0	0	2	20481	11,72	88,28
	WW	0	0	0	81	0	0	16382	1499	52	18014	9,06	90,94
	WG	0	0	7	5	0	0	651	6342	154	7159	11,41	88,59
	SG	0	0	0	0	0	0	140	0	4004	4144	3,38	96,62
	Total	9736	9096	7501	9186	8530	18455	17219	7841	4344	91908		
	OE (%)	0,14	0,00	0,20	24,81	2,52	2,03	4,86	19,12	7,83		OA(%)	93,94
	PA (%)	99,86	100	99,8	75,19	97,48	97,97	95,14	80,88	92,17		Kappa	0,93

Wie Tabelle 6.11 zeigt, konnte erneut eine sehr gute Unterscheidung von *Nadelwald* und *Laubwald* erfolgen. Auch für *Winterraps* konnte für die verwendeten Referenzflächen eine eindeutige Trennung von anderen Landnutzungsklassen erzielt werden. Ebenso ließ sich *Mais* durch die Unterscheidung von Winterfrucht- und Sommerfrucht-Flächen klar von *Zuckerrüben* und *Kartoffeln*, aber auch von *Winterweizen* abgrenzen. Die Genauigkeit der Unterscheidung von *Zuckerrüben* und *Kartoffeln* tritt demgegenüber – wie auch in den Jahren zuvor – etwas zurück. Auch in 2010 wurden *Zuckerrüben* mit einer hohen PA klassifiziert. Die entsprechende, etwa um 10% niedrigere UA, spiegelt aber erneut Probleme bei der Unterscheidung von *Kartoffeln* wieder. Für Flächen, die in der finalen Klassifikation als *Kartoffeln* ausgewiesen sind, konnte eine Übereinstimmung mit den Testgebieten von fast 98 % berechnet werden. Allerdings wurden etwa ein Viertel der Referenzflächen für *Kartoffeln* im Wesentlichen als *Zuckerrüben* klassifiziert. Für *Winterweizen* konnte gegenüber den Klassifikationsergebnissen des ZS1 eine leichte Verbesserung im Bereich von 3-5 % bei der PA und der UA durch die MDA-Analysen erzielt werden. Bei *Wintergerste* konnte die UA durch die Verwendung mehrerer ZS etwa um 5 % gegenüber ZS1 auf knapp unter 90 % gesteigert werden. Allerdings wurden knapp 20 % der Referenzflächen für *Wintergerste* als *Winterweizen* klassifiziert. Für die Bereiche des Untersuchungsgebiets in denen *Sommergerste* (*Braugerste*) vermehrt angebaut wird, konnte ebenfalls eine sehr gute Unterscheidung von anderen Feldfrüchten ermittelt werden.

## 6.5 Erzeugung der MDA-Landnutzungs-klassifikationen

Aufbauend auf den Ergebnissen der MDA-Fernerkundungsanalysen zur Bildung der jährlichen FE-Basis, erfolgte mit der Integration von Informationen aus den Geodatensätzen

Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS), Feldblöcke (FB), Corine Land Cover (CLC) und OpenStreetMap (OSM) der nächste Abschnitt des MDA zur Erzeugung der finalen MDA-Landnutzungs-klassifikationen. Die hierfür entwickelte Vorgehensweise ist weitestgehend unabhängig von den Ergebnissen, die während der MDA-Fernerkundungsanalyse des jeweiligen Jahres erzielt wurde (Kapitel 6.2-6.4). Daher erfolgt die Beschreibung der Ergebnisse zur Integration von Informationen aus Geodaten unabhängig von den fernerkundungsbasierten Jahresergebnissen.

Bis zu diesem Stadium beruhten die jährlichen MDA-Landnutzungsdaten fast ausschließlich auf fernerkundungsbasierten Informationen, die durch Verschneidung und Ableitung aus den einzelnen Zeitschnitten erzeugt wurden. In Bezug auf die grundlegenden Landnutzungs-kategorien landwirtschaftliche Nutzfläche, Wald, sonstige Vegetationsfläche, Siedlungsfläche und Gewässer wurde in den vorangegangenen fernerkundungsdaten-dominierten MDA-Analyseabschnitten zwar die Grundlage zur Unterscheidung aller Kategorien gelegt. Vor allem aber wurde auf die landwirtschaftliche Nutzfläche und speziell auf Ackerland fokussiert. Letzteres wurde für die Teile des Untersuchungsgebietes in NRW auf die Acker-Feldblöcke eingeschränkt und weitestgehend separat behandelt.

Das Ziel der Integration der geodatenbasierten Landnutzungs-information war vor allem die Steigerung des Informationsgehalts außerhalb der Ackerflächen. Daneben diente die Integration dieser Informationen aber auch der Reduktion der bereits angesprochenen Fehl-klassifikationen zwischen Grünland, Feldfrüchten und Laubwald oder Gehölz, die sich bei den Fernerkundungsanalysen außerhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche ergaben. Die grundlegende Trennung von Flächen mit agrarischer Nutzung und anderen Vegetationsflächen stellte daher oftmals ein bedeutendes Kriterium für die Entwicklung von Produktionsregeln dar (vgl. Kapitel 5.6.3). Mit der zusätzlichen Unterscheidung übergeordneter Landnutzungs-kategorien ging zudem eine Strukturierung der Analysen einher.

Im Weiteren erfolgt zunächst die Präsentation der entwickelten Gesetzmäßigkeiten für Produktionsregeln zur Integration der zuvor ausgewählten (übrigen) Feldblock- und ATKIS-Informationen. Daran anschließend folgen die Darstellungen zur Integration der CLC- und OSM-Daten für die Gebiete in den Niederlanden und Belgien. Die folgenden Tabellen enthalten diese Gesetzmäßigkeiten und bilden damit die Wissensbasis zur Erzeugung der Produktionsregeln.

In Analogie zur Abgrenzung von Ackerflächen anhand der Acker-Feldblöcke, wurden auch für die übrigen Bereiche des Untersuchungsgebiets in Deutschland zunächst verschiedene Layer ausgewählt, anhand derer eine grundlegende Stratifizierung des Untersuchungsgebiets nach Landnutzungs-kategorien erfolgte (vgl. Tabelle 6.12).

Tabelle 6.12: Abgrenzung grundlegender Landnutzungskategorien und Prioritäten bei konkurrierenden Informationen zur Übernahme in den finalen MDA-Landnutzungsdatensatz (1=höchste Priorität).

LU-Kategorie	Datenquelle	Stratifizierungsgrundlage (Objektart)	Priorität
Ackerland	Feldblöcke	Acker & Dauerkulturen	1
Grünland	Feldblöcke	Grünland	1
Siedlung/Verkehr	ATKIS	Siedlung (41001-41009) Ortslage (52001) Verkehr (42000)	2
Wald	ATKIS	Wald (43002)	2
übrige Vegetation	ATKIS	Vegetation (43003-43008) (ohne Ackerland, Grünland & Wald)	2
Gewässer	ATKIS	Gewässer (44000)	2

Zur Abgrenzung von Grünland standen – wie auch bei Ackerland – die räumlichen Informationen der Feldblöcke und des ATKIS für die Verwendung in dieser Arbeit in Konkurrenz, da Grünland in beiden Datensätzen ausgewiesen wird. Die Genauigkeit in Bezug auf die räumliche Abgrenzung von Flächen (also der höhere Erfassungsmaßstab) sowie die korrekte Klassifizierung wurde bei den jahresaktuellen Feldblock-Daten als deutlich höher eingeschätzt. Zur jährlichen Unterscheidung von landwirtschaftlich genutztem – und damit besonders gemanagtem – Grünland und anderen Grasflächen wurden demzufolge die Grünland-Feldblöcke gegenüber den ATKIS-Informationen bevorzugt (siehe Tabelle 6.12). Die Favorisierung der Feldblock-Daten bezog sich allerdings auch auf Überschneidungen mit anderen Landnutzungskategorien (beispielsweise Siedlung oder Wald). Abgesehen von wenigen Ausnahmen (s.u.), wurden jeweils die Informationen innerhalb der Feldblöcke in die finalen MDA-Landnutzungsdaten (LU-Zielspalte im MDA-Grid) übertragen. Wie Tabelle 6.12 zeigt, beruht die Unterscheidung aller weiteren Landnutzungskategorien für die MDA-Analysen mit Ausnahme der Objektart *Ortslage* (52001) auf den ATKIS-Objektarten, die bereits während der Datenaufbereitung zur ATKIS-Raster-Grundebene zusammengefügt wurden (vgl. Kapitel 4.4.1). Da sich diese flächenbasierten Objektarten nicht räumlich überschneiden, erhielten sie dieselbe Priorität. Die Eingrenzung von Siedlungsflächen erfolgte anhand der betreffenden Objektarten der ATKIS-Objektartengruppe *Siedlung* sowie anhand der Objektart *Ortslage*. Die Objektart *Ortslage* war für Siedlungsbereiche betreffende Produktionsregeln von besonderer Bedeutung, da die *Ortslage* die unterschiedlichen Nutzungen zusammenhängenden Siedlungsflächen umschließt und somit eine Abgrenzung zur Feldlage oder zu Waldflächen darstellt (ADV 2008c). Sie ermöglichte es daher zusammenhängende Siedlungsflächen im Kontext zu betrachten. Die *Ortslage* umschließt allerdings auch einzelne Objektarten aus anderen Objektartengruppen, wie etwa *Vegetation* oder *Gewässer*, und konnte daher nicht mit der räumlichen Abdeckung der Objektartengruppe *Siedlung* gleichgesetzt werden. Auch Waldgebiete und Gewässer wurden anhand der entsprechenden ATKIS-Objektarten unterschieden. Zur Unterscheidung anderweitiger Vegetationsflächen, die nicht primär einer forst- oder landwirtschaftlichen Nutzung oder einer Siedlungsnutzung angehören, dienten die übrigen Objektarten der Objektartengruppe *Vegetation*.

### 6.5.1 Integration von Feldblock-Informationen

Bei der schrittweisen Integration der ausgewählten Landnutzungsklassen des ATKIS und der Feldblöcke wurde gewöhnlich mit den restlichen Feldblock-Informationen begonnen. Zur Erfassung von landwirtschaftlich genutztem Grünland wurden alle Flächen, die in den Feldblock-Daten des entsprechenden Jahres als *Grünland* deklariert waren, komplett übertragen. Die Ergebnisse der Fernerkundungsanalysen wurden dabei für die entsprechenden Bereiche vollständig ersetzt (MDA-Regel Typ 1). Für landwirtschaftlich genutztes Grünland wurden somit auch alle Fehlklassifikationen (zum Beispiel als Getreide) eliminiert. Die Trennung von Ackerland und landwirtschaftlich genutztem Grünland war für die deutschen Gebiete somit weitestgehend vollzogen. Die Bodennutzung *Dauerkulturen* wurde zwar bereits während der Fernerkundungsanalysen zur Bildung der Ackerland-Maske zu den Ackerfeldblöcken hinzugezählt. Eine Klassifikation entsprechender Feldfrüchte konnte während der Fernerkundungsanalysen allerdings nicht erzielt werden. Daher erhielten Flächen, die von den Feldblöcken als *Dauerkulturen* eingeordnet wurden, im Rahmen der Geodatenintegration wieder diese Klasse zugewiesen. Die fernerkundungsbasierte Klassenzuweisung wurde in diesen Bereichen somit wieder überschrieben. Neben *Ackerland*, *Dauerkulturen* und *Grünland* enthielten die jährlichen Feldblöcke immer auch einige wenige Flächen der Bodennutzung *geförderte Forstflächen*. Zur Ableitung einer tatsächlichen Landnutzung erwies sich diese Kategorie jedoch als ungeeignet. Da auch durch die visuelle Begutachtung der entsprechenden Flächen in aktuellen Luftbildern keine eindeutige Einordnung zu einer bestimmten Forstnutzung möglich war, wurde diese Klasse nicht weiter berücksichtigt. Die Integration der Feldblock-Daten war damit abgeschlossen.

### 6.5.2 Integration von ATKIS-Informationen

Die einzelnen ATKIS-Objektarten waren durch die Neuordnung in die drei ATKIS-Raster-Ebenen während der Datenaufbereitung bereits für unterschiedliche Verwendungszwecke vorbereitet beziehungsweise vorsortiert worden. Die Einordnung in die unterschiedlichen Ebenen erfolgte unter anderem in Abhängigkeit vom ursprünglichen Geometriotyp einer Objektart sowie vom Grad der Aggregation beziehungsweise der Detailliertheit der transportierten Landnutzungsinformation (vgl. Kapitel 4.4.1). Mit dieser Einordnung war zudem eine Zuweisung von unterschiedlichen Prioritäten für die Objektarten der drei ATKIS-Rasterebenen zueinander verbunden, wodurch die Integrationsreihenfolge der Landnutzungsinformationen der einzelnen Objektarten in die FE-Basis bereits weitestgehend festgelegt war. Begonnen wurde dementsprechend mit den Objektarten, die in der ATKIS-Raster-Grundebene zusammengefasst waren und die die unterste Raster-Ebene bildeten. Anschließend folgten die Informationen der mittleren ATKIS-Raster-Ebene. Die ehemals

linienhaften Informationen zum Verkehrsnetz der obersten ATKIS-Raster-Ebene wurden somit als letztes integriert.

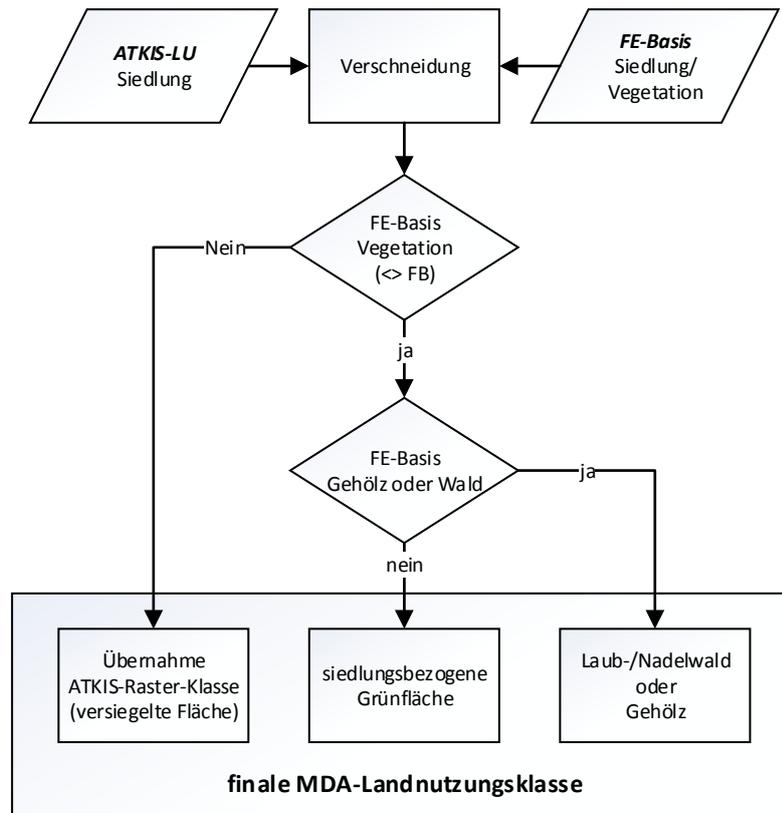


Abbildung 6.16: Ableitung der MDA-Landnutzungs-klasse innerhalb von Siedlungen (ATKIS-Objektarten aus dem Thema Siedlung oder Verkehr) durch die Verschneidung von ATKIS-Informationen und den Klassifikationsergebnissen der FE-Basis zur Differenzierung von und vegetationsdominierten und versiegelten Flächenbereichen.

Bei der Integration der ATKIS-Objektarten in die finale MDA-Landnutzung eines Jahres, sind grundsätzlich zwei Vorgehensweisen zu unterscheiden. Einerseits wurden ausgewählte Objektarten, vergleichbar mit der Vorgehensweise bei den Grünland-Feldblöcken, jeweils vollständig in die endgültige MDA-Landnutzung übertragen (MDA-Regel Typ 1, vgl. Kapitel 5.6.3). In diesen Fällen wurde lediglich die Klassenbezeichnung an die entwickelte MDA-Landnutzungslegende (siehe dazu Kapitel 6.6) angepasst. Die fernerkundungsbasierten Klassifikationsergebnisse wurden demnach im Abdeckungsbereich der entsprechenden Objektart komplett ersetzt. Andererseits wurden die Landnutzungsinformationen anderer Objektarten hingegen inhaltlich mit den Klassifikationsergebnissen der Fernerkundungsanalysen (FE-Basis) verknüpft, um daraus die endgültige MDA-Landnutzungs-klasse zu bilden und dabei die bestehende fernerkundungsbasierte Unterteilung weiter zu präzisieren (MDA-Regel Typ 2). Dabei wurde bei der Bildung dieser Produktionsregeln grundsätzlich unterschieden, ob es sich im Abdeckungsbereich einer ATKIS-Objektart in der FE-Basis um Landnutzungs-klassen handelte, die versiegelte beziehungsweise vegetationslose und unbewachsene Flächen auswiesen, oder ob Landnutzungs-klassen vegetationsdominierte Flächen repräsentierten. Teilweise wurde darüber hinaus berücksichtigt, um welche

Vegetationsklasse es sich in der FE-Basis handelte. Wie bereits mehrfach angesprochen, wird diese Flächenunterscheidung in unterschiedliche Landbedeckungen in den ATKIS-Objektarten nur in wenigen Fällen mitgeführt beziehungsweise durch überlagernde Objektarten ergänzt (vgl. Kapitel 4.4.1). Die Klassifikationsergebnisse der Fernerkundungsanalysen enthielten somit diesbezüglich oftmals deutlich detailliertere Flächeninformationen.

Die Unterscheidung von versiegelten/vegetationslosen und vegetationsbedeckten Flächen auf Grundlage der FE-Basis war vor allem zur Bestimmung der endgültigen Landnutzung in Kombination mit Objektarten für Siedlungsbereiche und Verkehrsflächen der ATKIS-Raster-Grundebene von besonderer Bedeutung. Daher zeigt Abbildung 6.16 schematisch, wie die Ableitung der endgültigen Landnutzungs-kategorie am Beispiel von Siedlungsbereichen erfolgte. Diese Vorgehensweise wird im nachfolgenden Unterkapitel anhand der Objektartengruppe *Siedlung* genauer erläutert.

### 6.5.2.1 Integration der Objektarten der ATKIS-Raster-Grundebene

Tabelle 6.13 stellt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Klassifikationsschema dar, das als Wissensbasis für Produktionsregeln zur Ableitung der finalen MDA-Landnutzungs-kategorie aus der Kombination der Objektarten der ATKIS-Raster-Grundebene und den Klassifikationsergebnissen der FE-Basis diente. Die Anwendungsreihenfolge der Produktionsregeln war dabei innerhalb der ATKIS-Raster-Grundebene unerheblich, da hier keine räumlichen Überschneidungen vorlagen. Die Objektarten bei denen eine Unterscheidung anhand der Landnutzungs-kategorie der FE-Basis vorgenommen wurden, enthalten auf der rechten Seite der Tabelle 6.13 dementsprechend eine mögliche abgeleitete MDA-Landnutzungs-kategorie für versiegelte oder vegetationslose Flächen sowie eine weitere Kategorie für vegetationsdominierte Flächen. ATKIS-Objektarten bei denen diese Unterscheidung nicht vorgenommen wurde, sondern nur eine Landnutzungs-kategorie möglich war, enthalten in Tabelle 6.13 folglich nur in einer Spalte die Angabe der endgültigen MDA-Landnutzungs-kategorie.

Eine Ausnahme bestand jedoch für Bereiche die von der ATKIS-Objektart *Wald* abgedeckt wurden. Hierbei waren in Bezug auf vegetationsdominierte Flächen zwei unterschiedliche MDA-Landnutzungs-kategorien möglich (s.u.). Die Spalte für die Vegetations-kategorie enthält in diesen Fällen daher zwei Klassen. Wie in Abbildung 6.16 dargestellt, bestand darüber hinaus für die in der FE-Basis als Wald (*Laub-/Mischwald*, *Nadelwald*) oder *Gebölz* klassifizierten Bereiche eine weitere Ausnahme. Diese Klassen wurden im Formalfall bei Produktionsregeln zur Integration von ATKIS-Informationen aus der ATKIS-Raster-Grundebene ausgelassen.

Tabelle 6.13: Grundlage zur Kombination von LU-Informationen der ATKIS-Raster-Grundebene und fernerkundungsbasierten LU-Informationen (FE-Basis), gegliedert nach ATKIS-Objektartengruppen.

Objektart- gruppe	Objektart	Attribut	ATKIS- RASTER- Wert	Priorität gegenüber FB-Daten	MDA-LU-Klasse bei FE-Basis-Landnutzung	
					versiegelt/ unbewachsen	Vegetations- klassen
	Wohnbaufläche	offen	410011000	2	83	27
		geschlossen	410012000	2	83	27
	Industrie- & Gewerbefläche	-	41002	2	84	27
		Handel	410021440	2	84	27
		Messe/Ausstellung	410021450	2	84	27
		Gärtnerei	410021490	1	84	41
		Wasserwerk	410022520	2	84	27
		Kraftwerk (Braunkohle)	410022530	2	92	-
		Umspannstation	410022540	2	95	27
		Heizwerk	410022570	2	93	27
Kläranlage/Klärwerk		410022610	2	94	27	
Abfallbehandlungsanlage		410022620	2	96	-	
Halde	Deponie	410022630	2	90	-	
	Halde	41003	2	91	-	
Bergbaubetrieb	Steinkohle	410044022	2	98	-	
	-	41005	2	20	27	
Tagebau, Grube, Steinbruch	Erden, Lockergestein	410051000	2	20	27	
	Sand	410051008	2	20	27	
	Kies, Kiessand	410051009	2	20	27	
	Steine, Gestein	410052000	2	20	27	
	Braunkohle	410054021	1	19	-	
Siedlung	Fläche gemischter Nutzung	offen	410061000	2	63	27
		geschlossen	410062000	2	63	27
	-	41007	2	62	27	
Fläche besonderer Funktionaler Prägung	Verwaltung	410071110	2	62	27	
	Bildung & Forschung	410071120	2	62	27	
	Kultur	410071130	2	62	27	
	Gesundheit, Kur	410071150	2	62	27	
	Soziales	410071160	2	62	27	
Sport-, Freizeit- & Erholungsfläche	Sicherheit & Ordnung	410071170	2	62	27	
	-	41008	2	83	27	
	Sportanlage	410084100	2	83	27	
	Golfplatz	410084110	2	83	58	
	Freizeitanlage	410084200	2	83	27	
	Zoo	410084210	2	83	27	
	Safaripark/Wildpark	410084220	2	83	27	
	Freizeitpark	410084230	2	83	27	
	Freilichtmuseum	410084250	2	83	27	
	Modellflugplatz	410084290	2	83	27	
	Ferienhausfläche	410084310	2	83	27	
	Schwimmbad, Freibad	410084320	2	83	27	
	Campingplatz	410084330	2	83	27	
	Grünanlage	410084400	2	83	27	
	Kleingarten	410084440	2	83	27	
Verkehr	Friedhof	41009	2	83	27	
	Straßenverkehr	-	42001	2	85	27
Verkehr	Platz	-	42009	2	64	27
	Flugverkehrsanlage	-	53007	2	78	-
Landwirtschaft	-	43001	2	(18)	-	
	Ackerland	430011010	2	(18)	-	
	Hopfen	430011012	2	-	39	
	Grünland	430011020	2	-	(3)	
	Streuobstwiese	430011021	2	-	50	
	Gartenland	430011030	1	-	15	
	Baumschule	430011031	1	-	40	
	Obstplantage	430011050	1	-	15	
	Vegetation	Laubwald	430021100	2	-	6/55
		Nadelwald	430021200	2	-	5/55
Vegetation	Laub- & Nadelwald	430021300	2	-	6/55	
	Gehölz	-	43003	2	-	55
	Heide	-	43004	2	-	59
	Moor	-	43005	2	-	24
	Sumpf	-	43006	2	-	60
	Unland/ Vegetationslose Fläche	-	43007	2	28	27
	Fläche unbestimmt	-	43008	2	28	27
Gewässer	Fließgewässer	-	44001	2	71	-
	Stehendes Gewässer	-	44006	2	70	-



Dem lag zugrunde, dass räumliche Informationen zur Verbreitung von Baumbeständen oder waldähnlichem Flächenbewuchs, wie zuvor erwähnt, im ATKIS nur für wenige Flächen bereitgestellt werden. Da die fernerkundungsbasierte Klassifikation von Wald- oder Baumvegetation im Allgemeinen in einer sehr hohen Genauigkeit erfolgt war, wurden daher auch im Abdeckungsbereich anderer Objektartengruppen generell die entsprechenden Klassifikationsergebnisse der Fernerkundungsanalysen (FE-Basis) in der finalen MDA-Landnutzung beibehalten. In Tabelle 6.13 werden die Landnutzungsklassen für Wald daher, mit Ausnahme bei der Objektart *Wald* selber, nicht als mögliche MDA-Vegetationsklasse in der entsprechenden Spalte aufgeführt.

Wie in Abbildung 6.16 dargestellt, diente innerhalb der Abdeckung einer ATKIS-Objektart aus den ATKIS-Objektartengruppen *Siedlung* und *Verkehr* die entsprechende ATKIS-Information dazu, die bestehende Landnutzungsinformation von Bereichen, die in der FE-Basis als versiegelte Fläche klassifiziert wurden, zu präzisieren. In der FE-Basis als *versiegelte Fläche* klassifizierte Bereiche, die sich beispielsweise innerhalb der ATKIS-Objektart *Wohnbaufläche, offen* (41001100) befanden, erhielten in der endgültigen MDA-Landnutzungs-klassifikation dementsprechend die MDA-Klasse *versiegelte Wohnbaufläche* (83). Zur Markierung von Vegetationsflächen mit Siedlungsbezug, diente in vielen Fällen hingegen nicht unmittelbar eine der in Tabelle 6.13 aufgeführten Objektarten selbst, sondern die Objektart *Ortslage*. Die Verwendung der *Ortslage* als Abfragemaske hatte den Vorteil, dass somit der Großteil dieser Vegetationsflächen durch nur eine Produktionsregel behandelt werden konnte. Die Abfrage bezüglich Vegetationsflächen musste daher zum Beispiel für die ATKIS-Objektart *Wohnbaufläche, offen* nicht separat von anderen Objektarten erfolgen. Nur Vegetationsflächen, die sich außerhalb der *Ortslage* befanden, aber laut ATKIS einen Siedlungsbezug aufwiesen (zum Beispiel Gewerbeflächen außerhalb von Ortschaften), mussten durch zusätzliche Produktionsregeln bearbeitet werden. Die durch Feldblock-Daten markierten Flächen wurden dabei von Abfragen in Kombination mit der Objektart *Ortslage* aufgrund ihrer in Tabelle 6.12 ausgewiesenen höheren Priorität jeweils explizit ausgeschlossen. Für Bereiche, die sich innerhalb der Objektartengruppe *Siedlung* beziehungsweise *Ortslage* befanden, und in der FE-Basis einer Vegetationsklasse zugeordnet wurden, erfolgte die Zuweisung zur MDA-Landnutzungsklasse *siedlungsbezogene Grünfläche*, sofern es sich nicht um eine Waldklasse handelte oder keine anderweitige Differenzierung des Vegetationstyps durch eine Objektart (beispielsweise *Gehölz*) möglich war (vgl. Abbildung 6.16). Dies betraf einerseits alle entsprechenden Pixel, die in der FE-Basis als *Grünland* klassifiziert wurden. Da durch die Feldblöcke bereits alle wesentlichen landwirtschaftlich genutzten Flächen identifiziert waren, wurden die übrigen Bereiche umklassifiziert, da mit diesen Flächen ein anderer Nutzungscharakter in Bezug auf das Management und damit keine landwirtschaftliche Nutzung im engeren Sinne verbunden wurde. Ebenso wurden Pixel, die anhand des ATKIS innerhalb von Siedlungsbereichen als Feldfrucht fehlklassifiziert wurden, als *siedlungsbezogene Grünfläche* in die MDA-Landnutzungsspalte übernommen. Zwar handelte es sich hierbei in

Bezug auf die Erfassung der Pflanzenart oder der Pflanzenvergesellschaftung um Fehlklassifikationen. Die generelle Zuweisung zu einer Vegetationsklasse war aber eine wertvolle Information, die durch die visuelle Interpretation von den Fernerkundungsszenen und Luftbilddaten bestätigt werden konnte. Durch die Kombination mit den ATKIS-Informationen konnten diese Bereiche daher als vegetationsdominierte Flächen mit Siedlungsbezug ausgewiesen und von anderen Vegetationsklassen unterschieden werden. Die ATKIS-Informationen dienten somit zur Reduktion der Fehlklassifikation von Feldfrüchten. Eine Differenzierung nach Vegetationstyp war allerdings nicht möglich. Die hohe spektrale Ähnlichkeit von Landnutzungsklassen wie beispielsweise *unbedeckter Boden* und *versiegelte Fläche* führte im Rahmen der Fernerkundungsanalysen, wie bereits beschrieben, ebenfalls zu Fehlklassifikationen innerhalb von Siedlungsflächen. Die fehlklassifizierten Bereiche, die unbewachsenen Flächen entsprachen, wurden innerhalb der Objektartengruppe *Siedlung* daher mit der Klasse *versiegelte Fläche* gleichgesetzt. Sie erhielten somit jeweils die gleiche MDA-Landnutzungsklasse zugewiesen. Wie Tabelle 6.13 zeigt, erfolgte in der ATKIS-Objektartengruppe *Siedlung* nicht für jede Objektart eine Unterscheidung von versiegelten Flächen und Vegetationsbereichen. So wurde bei einigen gewerblichen Nutzungen wie *Tagebau*, *Grube*, *Steinbruch*, *Braunkohle* (410054021) das abgedeckte Gebiet als jeweils eine Landnutzungsklasse übertragen. Auch die Objektarten *Halde* (41003) und *Industrie- & Gewerbefläche, Deponie* (410032630) wurden zur besseren Erfassung des tatsächlichen Flächenmaßes dieser Nutzungen nicht weiter in Bezug auf Bewuchs differenziert, zumal der Anteil von Vegetationsbereichen im Allgemeinen sehr gering war. Des Weiteren wurde *versiegelten Flächen* (vor allem bei der Objektartengruppe *Siedlung*) im Abdeckungsbereich von verschiedenen Objektarten in der finalen MDA-Landnutzungs-klassifikation die gleiche MDA-Landnutzungsklasse zugewiesen, wenn die Unterscheidung der entsprechenden Objektarten nicht konkret auf unterschiedliche Stoffflussmuster schließen ließ und somit kaum Relevanz für die Anwendung der Landnutzungsdaten im Kontext der (Agrar-)Ökosystemmodellierung hatte. Die Objektarten *Industrie- & Gewerbefläche, Handel* (410021440) und *Industrie- & Gewerbefläche, Messe/Ausstellung* (410021450) wurden daher beispielsweise in der MDA-Landnutzungs-klassifikation nicht mehr unterschieden, sondern nur allgemein als versiegelte *Industrie- & Gewerbefläche* (84) ausgewiesen. Ebenso wurde beispielsweise bei Objektarten und deren Unterklassen wie *Fläche besonderer funktionaler Prägung* (41007), *Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche* (41008) oder *Friedhof* (41009) verfahren.

In der Objektartengruppe *Vegetation* wurde die Objektart *Landwirtschaft* durch mehrere Attribute in die unterschiedlichen Landnutzungen gliedert. Wie zu Beginn dieses Kapitels dargestellt, wurden die Landnutzungsklassen *Ackerland* und *Grünland* zwar in Rasterformat überführt, allerdings aufgrund des Vorhandenseins der Feldblock-Daten im Rahmen der Datenverschneidung (zunächst) nicht weiter berücksichtigt. Die entsprechenden MDA-Landnutzungsklassen sind daher in Tabelle 6.13 in Klammern gesetzt. Die übrigen Landnutzungsklassen der Objektart *Landwirtschaft* wie *Hopfen* (430011012), *Streuobstwiese*

(430011021), *Gartenland* (430011030), *Baumschule* (430011031) und *Obstplantage* (430011050) wurden hingegen vollständig in die finale MDA-Landnutzung integriert. In Bezug auf die generelle Bevorzugung der Feldblock-Daten gegenüber den ATKIS-Informationen, stellt die Behandlung dieser ATKIS-Klassen (außer *Streuobstwiese*) eine Ausnahme dar. Inklusive der Nutzung *Industrie- & Gewerbefläche, Gärtnerei* (410021490) aus der Objektartengruppe *Siedlung*, treten diese ATKIS-Klassen auch vermehrt innerhalb der Abdeckung der Feldblock-Bodennutzungskategorie *Dauerkulturen* auf. Da das ATKIS in diesen Fällen gegenüber den Feldblock-Daten die detaillierteren Nutzungsinformationen enthält, erfolgte hier die Übertragung der ATKIS-Klassen auch auf Feldblock-Bereiche. Da eine Unterscheidung der Klassen *Gartenland* (430011030) und *Obstplantage* (430011050), für den Nutzungszweck der MDA-Landnutzungsdaten nicht notwendig erschien, zumal auch keine Unterscheidung von Feldfrüchten durch die Fernerkundungsanalysen möglich war, wurden diese Klassen in der finalen MDA-Landnutzung zusammengefasst. Die Klasse *Gärtnerei* erhielt in der MDA-Landnutzung allerdings eine eigene MDA-Klasse, da es sich dabei, auch innerhalb der Feldblock-Bodennutzungskategorie *Dauerkulturen*, oftmals um Gewächshäuser handelte.

Die ATKIS-Objektart *Wald* diente im Rahmen dieser Arbeit vornehmlich zur Abgrenzung von Waldgebieten. Zwar werden im ATKIS *Laubwald* (430021100), *Nadelwald* (430021200) und Mischwaldflächen (*Laub- & Nadelwald*, 430021300) unterschieden, wohingegen anhand der Fernerkundungsklassifikationen strenggenommen nur eine Unterscheidung von Mischwald und Nadelwald möglich war. Der visuelle Vergleich der durch die Fernerkundungsklassifikationen unterschiedenen Waldbereiche und der Unterteilung der Waldgebiete im ATKIS ergab jedoch, dass die Fernerkundungsanalysen eine deutliche detailliertere Unterscheidung von Waldflächen ermöglichten. In der FE-Basis einer Waldklasse zugeordnete Bereiche wurden daher, wie bei den Siedlungsflächen, vollständig übertragen. Ebenso erfolgte die Abgrenzung von Waldgebieten, vergleichbar mit der Verwendung der Objektart *Ortslage*, anhand der Objektart *Wald*. Damit wurden Bereiche oder einzelne Pixel markiert, die unrichtig einer anderen Nutzung zugewiesen wurden. So traten bei der Fernerkundungsanalyse des Öfteren zu gewissen Anteilen Fehlklassifikation von Laubwald zum Beispiel als *Winterweizen* oder *Mais* auf. Die Klassenzuweisung konnte durch die Eingrenzung von Waldflächen dementsprechend korrigiert werden. Auffallend waren auch häufig auftretende Fehlklassifikationen von Bereichen in Waldgebieten als *Grünland* oder Moor/Sumpf, bei denen es sich jedoch um Lichtungen oder um schütterten Bewuchs handelte, wie die Begutachtung aktueller Luftbilder offenbarte. Um diese Flächen besser zu erfassen, war bereits bei der Fernerkundungsanalyse teilweise die Klasse *Gebölz* verwendet worden, in die einige dieser Bereiche korrekt eingeordnet wurden. Für Pixel, die dennoch unkorrekt als Grünland oder Moor/Sumpf ausgewiesen wurden, erfolgte somit eine Umklassifizierung zur Klasse *Gebölz* (vgl. Tabelle 6.17), eingeschränkt auf Waldflächen. Wie in Tabelle 6.13 dargestellt, war daher innerhalb der Abdeckung der Objektart *Wald* die MDA-Landnutzungs-kategorie *Gebölz* als dritte Nutzung neben den beiden Waldklassen möglich.

Sowohl die fernerkundungsbasierte Landnutzungs-kategorie als auch die MDA-Landnutzungs-kategorie *Gebölz* waren von der Definition her an die gleichnamige ATKIS-Objektart *Gebölz* (43003) angelegt, die ebenso für die MDA-Analysen gewählt wurde. Zur weiteren Reduzierung der Fehlklassifikation von Flächen, die durch eine unterschiedliche Bestockung von Baumgruppen, Büschen oder Sträuchern gekennzeichnet sind, wurde die Objektart *Gebölz*, außer bei räumlichen Überschneidungen mit Feldblock-Bereichen, vollständig in die MDA-Landnutzung übertragen.

Auch die übrigen ATKIS-Objektarten der Objektartengruppe *Vegetation* wurden verwendet, um die übrigen vegetationsdominierten Bereiche des Untersuchungsgebiets weiter zu gliedern. Die Objektart *Heide* (43004) hatte jedoch sehr große räumliche Überschneidungen mit der Feldblock-Bodennutzung *Grünland*. Zudem wurden viele Flächen innerhalb von *Heide* in der FE-Basis als Waldflächen klassifiziert. Daher wurden nur Flächen als *Heide* in die MDA-Landnutzung übertragen, die außerhalb der Feldblock-Abdeckung lagen und nicht als Wald klassifiziert waren. In Bezug auf die Produktionsregelbildung zur Übertragung der ATKIS-Objektarten *Moor* (43005) und *Sumpf* (43006) wurde in gleicher Weise wie bei der Objektart *Heide* verfahren.

Bei den Objektarten *Unland/vegetationslose Fläche* (43007) und *Fläche zur Zeit unbestimmbar* (43008) handelte es in der Regel um unversiegelte Flächen oder Vegetationsflächen in Siedlungsbereichen. Vegetationsflächen wurden daher die Klasse *siedlungsbezogene Grünfläche* zugewiesen, wohingegen unversiegelte Flächen als MDA-Landnutzungs-kategorie *unbedeckter Boden (außerhalb von Ackerland)* übertragen wurden.

Gewässerflächen wurden in der FE-Basis zwar in der Regel gut unterschieden. Mit den Objektarten *Fließgewässer* (44001) und *Stehendes Gewässer* (44006) aus der Objektartengruppe *Gewässer* wurde die räumliche Abgrenzung vor allem auch von kleinen Gewässern präzisiert. Sie wurden daher vollständig und als jeweils eigene MDA-Kategorie übertragen. Dabei ersetzten sie alle bereits vorhandenen Klassenzuweisungen im Abdeckungsbereich.

Mit der Übertragung der vollständigen Fläche der Objektart der *Flugverkehrsanlage* (53007) aus der Objektartengruppe *Bauwerke, Anlagen und Einrichtungen für den Verkehr*, bei der es sich ausschließlich um versiegelte Flächen handelte, waren alle Objektarten der ATKIS-Raster-Grunde-bene integriert.

### 6.5.2.2 Integration der Objektarten der mittleren ATKIS-Raster-Ebene

Tabelle 6.14 enthält die Grundlage für die Integration der Objektarten, die während der Datenaufbereitung in die mittlere ATKIS-Raster-Ebene eingeordnet wurden. Diese Objektarten ergänzen oder präzisieren Nutzungsinformationen, die in der ATKIS-Raster-

Grundebene enthalten sind. Da sie in ihrer ATKIS-Hierarchie (Priorität) höher eingestuft sind, überschrieben sie bei ihrer Übertragung teilweise die zuvor vorhandenen Informationen in ihrem Abdeckungsbereich. Eine Gruppe bilden dabei die Objektarten der Objektartengruppe *Besondere Vegetationsmerkmale*. Durch diese Objektarten erfolgt im ATKIS eine Differenzierung anderer Objektarten, indem innerhalb der Abdeckung von Objektarten, die in der ATKIS-Raster-Grundebene enthalten sind, zusätzlich Vegetationsbereiche ausgewiesen werden. Nach intensiver Prüfung und einem Vergleich der betreffenden Flächen mit den Klassifikationsergebnissen in der FE-Basis, wurde entschieden, diese Objektarten in dieser Arbeit nicht zu integrieren. Die Flächenunterscheidung war diesbezüglich in der FE-Basis in der Regel bereits detaillierter erfolgt. Die MDA-Landnutzungsclassen, die diese Objektarten bei einer Integration erhalten hätten, sind daher in Tabelle 6.14 in Klammern gesetzt.

Tabelle 6.14: Grundlage zur Kombination von LU-Informationen der mittleren ATKIS-Raster-Ebene und fernerkundungsbasierten LU-Informationen (FE-Basis), gegliedert nach ATKIS-Objektarten. Die eingeklammerten MDA-LU-Klassen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht die finalen MDA-Landnutzungsdaten integriert.

Objektart- gruppe	Objektart	Attribut	ATKIS- RASTER- Wert	Priorität Gegenüber FB-Daten	MDA-LU-Klasse bei FE-Basis-Landnutzung	
					versiegelt/ unbewachsen	Vegetations- klassen
Bauwerke und Einrichtungen in Siedlungsflächen	Bauwerk oder Anlage für Sport, Freizeit & Erholung	Spielfeld	510061410	2	<b>61</b>	<b>58</b>
		Schwimmbecken	510061450	2	<b>72</b>	-
Besondere Vegetations- merkmale	Vegetationsmerkmal	Baumbestand, Laubholz	540011021	2	-	<b>(6)</b>
		Baumbestand, Nadelholz	540011022	2	-	<b>(5)</b>
		Baumbestand, Laub- und Nadelholz	540011023	2	-	<b>(6)</b>
		Gehölz	540011250	2	-	<b>(55)</b>
		Gebüsch	540011260	2	-	<b>(55)</b>
		Gras	540011500	2	-	<b>(27)</b>

Je nach Güte der Datengrundlage wurden die Objektarten aber dennoch grundsätzlich als dienlich angesehen, um Flächennutzungsinformationen in Bezug auf Vegetationsflächen weiter zu differenzieren. Die Objektarten aus der mittleren ATKIS-Raster-Ebene, die in die MDA-Landnutzung übertragen wurden, stammten aus der Objektartengruppe *Bauwerke und Einrichtungen in Siedlungsflächen* und der Objektart *Bauwerk oder Anlage für Sport, Freizeit und Erholung*. Daraus wurde die Unterkategorie *Schwimmbecken* genutzt, um anthropogene Wasserflächen von natürlichen Wasserflächen zu unterscheiden, beziehungsweise solche Wasserflächen in der MDA-Landnutzung zu ergänzen. Die Unterkategorie *Spielfeld* diente ebenfalls zur weiteren Differenzierung von Siedlungsflächen. Dabei wurde durch Kombination mit den Fernerkundungsergebnissen eine Unterscheidung erzielt, ob es sich dabei um einen Rasenplatz (in der FE-Basis als jegliche Vegetation klassifiziert) oder um einen Hart- oder Aschenplatz (in der FE-Basis als versiegelte oder vegetationslose Fläche klassifiziert) handelte.

### 6.5.2.3 Integration der Objektarten der obersten ATKIS-Raster-Ebene

Als letzter Abschnitt der Integration der ATKIS-Informationen erfolgte die Behandlung der ehemals linienhaften Informationen zum Verkehrsnetz. Da das Verkehrsnetz die oberste ATKIS-Raster-Ebene bildete, und damit die höchste Priorität hatte, wurden die einzelnen Klassen ohne Einschränkungen in die finale MDA-Landnutzung übertragen. Dabei wurden alle bereits bestehenden Klassenzuweisungen im Abdeckungsbereich vollständig ersetzt und lediglich die Klassenbezeichnung an die MDA-Landnutzungsklassenlegende anhand von Tabelle 6.15 angepasst.

Tabelle 6.15: Aus dem ATKIS-Verkehrsnetz abgeleitete MDA-Landnutzungsklassen. Diese Klassen überschrieben bei der Integration alle anderen Klassenzuweisungen.

Objektartgruppe	Objektart	Attribut	ATKIS-RASTER-Wert	MDA-LU-Klasse
Verkehr	Straßenachse/ Fahrbahnachse	Bundesautobahn	1301	<b>89</b>
		Bundesstraße	1303	<b>88</b>
		Landstraße, Staatsstraße	1305	<b>87</b>
		Kreisstraße	1306	<b>85</b>
		Gemeindestraße	1307	<b>85</b>
		Attribut trifft nicht zu (sonstige Straßen)	9997	<b>85</b>
		Fahrgeschwindigkeit	-	-
	Fahrgeschwindigkeit (Wirtschaftsweg)	-	42008	<b>80</b>
	Weg Pflag Steig	-	53003	<b>79</b>
	Bahnstrecke	-	42014	<b>86</b>

In Bezug auf die unterschiedliche Verkehrsbedeutung der einzelnen Verkehrswege zueinander erfolgte, mit Ausnahme der Klasse *Bahnstrecke*, bereits während der Vektor-zu-Raster-Konvertierung eine Sortierung (vgl. Kapitel 4.4.1), so dass das Straßennetz komplett durch eine Produktionsregel übertragen wurde. Dem Straßennetz wurde gegenüber dem Schienennetz eine höhere Bedeutung zugewiesen und somit bei Überschneidungen bevorzugt integriert. Die Integration von ATKIS-Landnutzungsdaten in die finalen jährlichen MDA-Landnutzungsdaten war im Rahmen dieser Arbeit damit abgeschlossen.

### 6.5.3 Integration von Landnutzungsinformationen für den niederländisch-belgischen Teil

Da im Rahmen dieser Arbeit für die Niederlande und Belgien keine mit den ATKIS- und Feldblock-Daten vergleichbaren Datensätze beschafft werden konnten, wurde für die außerdeutschen Bereiche eine Präzisierung der fernerkundungsbasierten Landnutzungsinformationen der FE-Basis durch die Integration von CLC-Landnutzungsinformationen sowie von OSM-Daten zum Verkehrsnetz angestrebt.

### 6.5.3.1 Integration von Corine Land Cover-Information

In Anlehnung an die Verwendung des ATKIS wurden die CLC-Klassen genutzt, um eine räumliche Trennung von grundlegenden Landnutzungskategorien wie Ackerland, Grünland, Siedlungs- und Gewerbeflächen vorzunehmen. Dadurch sollten Fehlklassifikationen identifiziert und anhand der CLC-Informationen möglichst korrigiert werden. Dies beinhaltet erneut im Besonderen die Verbesserung der Unterscheidung von landwirtschaftlichen Nutzflächen und Vegetationsbereichen im Kontext von Siedlungen. Darüber hinaus sollten Fehlklassifikationen zwischen Feldfrüchten und anderen Vegetationsklassen reduziert werden.

Tabelle 6.16: Grundlage zur Korrektur der fernerkundungsbasierten LU-Informationen (FE-Basis) für den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets anhand von ausgewählten CLC-Klassen. Mit \* markierte Klassen wurden im Rahmen der MDA-Fernerkundungsanalysen zur besseren Trennung von Ackerflächen verwendet.

Ebene 1	Ebene 2	CLC-Code / Ebene 3	MDA-LU-Klasse bei FE-Basis-Landnutzung		
			versiegelt/ unbewachsen	Vegetations- klassen	
1 Bebaute Flächen	11 Städtisch geprägte Flächen	111 Durchgängig städtische Prägung	8	27	
		112 Nicht durchgängig städtische Prägung	8	27	
		121 Industrie- und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	8	27	
	12 Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	122 Straßen-, Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen	8	27	
		123 Hafengebiete	8	27	
		131 Abbauflächen	20	27	
		132 Deponien und Abraumhalden	90	27	
	13 Abbauflächen, Deponien und Baustellen	133 Baustellen	8	27	
		141 Städtische Grünflächen	8	27	
	14 Künstlich angelegte, nichtlandwirtschaftlich genutzte Grünflächen	142 Sport- und Freizeitanlagen	8	27	
		21 Ackerflächen	211 Nicht bewässertes Ackerland	18*	-
	2 Landwirtschaftliche Flächen	23 Grünland	231 Wiesen und Weiden	18*	3
			242 Komplexe Parzellenstrukturen	18*	-
		24 Landwirtschaftliche Flächen heterogener Struktur	243 Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	18*	-
3 Wälder und naturnahe Flächen			31 Wälder	311 Laubwälder	55
	312 Nadelwälder	55		6/55	
	313 Mischwälder	55		6/55	
	32 Strauch- und Krautvegetation	322 Heiden und Moorheiden	24	59/55	
		324 Wald-Strauch-Übergangsstadien	55	55	
4 Feuchtfächen	41 Feuchtfächen im Landesinnern	411 Sümpfe	60	55	
		412 Torfmoore	24	24	
5 Wasserflächen	51 Wasserflächen im Landesinnern	511 Gewässerläufe	-	-	
		512 Wasserflächen	-	-	

Zwar enthält das CLC theoretisch auch Informationen, durch die eine weitere Präzisierung einzelner Landnutzungen möglich ist. Die direkte Übertragung einzelner CLC-Klassen war allerdings selten möglich, so dass die Korrektur von Fehlklassifikationen im Vordergrund stand. Da das CLC nur über eine Datenebene verfügt, in der alle CLC-Klassen angeordnet sind, war die Anwendungsreihenfolge für die Integration unerheblich.

Tabelle 6.16 listet die CLC-Klassen auf, die im Untersuchungsgebiet in den Niederlanden und in Belgien vorkommen. In Analogie zur Präsentation der ATKIS-Integration enthalten die beiden rechten Spalten die MDA-Zielklasse für Produktionsregeln zur Ableitung der finalen MDA-Landnutzung. Je nachdem ob es sich in der FE-Basis um Landnutzungsklassen für versiegelte beziehungsweise (vornehmlich) vegetationslose Flächen oder für vegetationsdominierte Bereiche handelte, wurden bestimmte Landnutzungsklassen innerhalb der betrachteten CLC-Klassenabdeckung zur Bildung der finalen MDA-Landnutzungsklasse neu zugewiesen. In der FE-Basis als Wald (*Laub-*, *Nadelwald* oder *Gebölz*) klassifizierte Bereiche wurden hierbei wie auch im Fall des ATKIS bei keiner CLC-Klasse berücksichtigt beziehungsweise von Produktionsregeln explizit ausgeschlossen. Die Klassenzuweisung blieb dementsprechend in der finalen MDA-Landnutzungskarte bestehen. Aufgrund der Definition der CLC-Klassen wurden allerdings nicht alle der in Tabelle 6.16 aufgeführten Klassen verwendet. Die Felder der MDA-Zielklassen enthalten dann keinen Eintrag (-).

Bereits vor der Verschneidung der einzelnen Klassifikationszeitschnitte im Rahmen der MDA-Fernerkundungsanalysen wurde eine verbesserte Ausweisung von Ackerflächen mit unbedecktem Boden (Sommerfrucht-Flächen) mit Hilfe der CLC-Klassen zu landwirtschaftlich genutzten Flächen als Ersatz für die Felblock-Daten angestrebt. Die CLC-Klassen *nicht bewässertes Ackerland* (211), *Komplexe Parzellenstrukturen* (242) und *Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe* (243) wurden genutzt, um Bereiche die innerhalb dieser Flächen in ZS1 der Fernerkundungsklassifikationen als *versiegelt Fläche*, als *Sumpf* oder als *Moor* fehlklassifiziert wurden, als *unbedeckten Ackerboden* auszuweisen. Diesen wurden dann nachfolgend die Feldfruchtinformationen zu Sommerfrüchten aus den einzelnen Zeitschnitten zugewiesen. Zur besseren Unterscheidung von Getreide und Grünland sollte die Klasse *Wiesen und Weiden* (231) dienen, um Flächen die fälschlicherweise als Getreide klassifiziert wurden, als landwirtschaftlich genutztes *Grünland* auszuweisen. Der visuelle Vergleich der einzelnen Klassifikationsergebnisse mit den CLC-Daten und aktuellen Luftbildern erweckte aber oft den Eindruck, dass bedeutende Flächenanteile innerhalb dieser CLC-Klasse Ackerflächen darstellen könnten. Daher wurde diese CLC-Klasse nur in den vornehmlich durch Grünlandnutzung charakterisierten Bereichen in NR-Region 6 zur Reduktion von Fehlklassifikationen zwischen Getreideklassen und Grünland genutzt. Ebenso erwiesen sich die ausgewählten CLC-Klassen *Komplexe Parzellenstrukturen* (242) und *Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe* (243) als nur bedingt geeignet, um eine verbesserte Trennung von



landwirtschaftlich genutzten Grünflächen, Ackerflächen mit Winterfruchtnutzung und anderen naturnahen Vegetationsbereichen zu ermöglichen. Daher wurden diese CLC-Klassen nicht direkt in Produktionsregeln zur Ableitung der finalen MDA-Landnutzungsklassen einbezogen.

Entsprechend der Vorgehensweise beim ATKIS wurden die CLC-Klassen für *Wälder* (31) zur Korrektur von Fehlklassifikationen genutzt. So wurden Pixel, die innerhalb von CLC-Waldflächen die Klasse einer Feldfrucht aufwiesen (oftmals *Winterweizen* oder *Mais*), der MDA-Klasse *Laubwald* (*Laub-* und *Mischwald*) zugewiesen. Sofern einzelne Klassen mit Flächen von schütterem Bewuchs korrelierten (oftmals *Grünland*), erfolgte die Zuweisung zur MDA-Klasse *Gebölz*.

Die CLC-Klassen aus der CLC-Ebene 1 *bebaute Flächen* dienten zur Ausweisung von urbanen Grünflächen sowie zur Reduktion der Klassifikation von Ackerfrüchten innerhalb von Siedlungen. Flächen denen innerhalb der entsprechenden CLC-Klassen in der FE-Basis *unbedeckter Boden* (in Abhängigkeit der Fernerkundungsdatengrundlage und dem Aufnahmedatum teilweise auch *Moor/Sumpf*) zugewiesen war, wurden dementsprechend die Klasse *versiegelte Fläche* zugewiesen. Die weitere Unterscheidung von unterschiedlichen Siedlungsnutzungen des CLC wurde allerdings nicht in die MDA-Landnutzung übernommen. Auch hierfür erschien die Flächenunterscheidung als zu grob. Lediglich die CLC-Klassen *Abbauflächen* (131) und *Deponien und Abraumbalden* (132) waren prinzipiell geeignet, um eine Unterscheidung von versiegelten und unbewachsenen Flächen zu erzielen.

Mit den CLC-Klassen *Heiden und Moorheiden* (322), *Sümpfe* (411) und *Torfmoore* (412) ließen sich im Südwesten des Rureinzugsgebiets die Moorbereiche des Hohen Venns oder die Heidelandschaft nördlich von Elsenborn eingrenzen. Moorflächen wurden in der FE-Basis des Öfteren als *unbedeckter Boden* (Ackerboden) fehlklassifiziert und konnten somit als Moorflächen ausgewiesen werden. Bereiche die innerhalb der CLC-Klasse *Heiden und Moorheiden* als *Grünland* oder als eine Ackernutzung erfasst wurden, erhielten hingegen die MDA-Klasse *Heide* und waren somit von stärker landwirtschaftlich genutzten Grünlandbereichen zu unterscheidbar. Flächen, die innerhalb der CLC-Klasse *Wald-Strauch-Übergangsstadien* (324) in der FE-Basis nicht einer Waldklasse zugeordnet wurden, erhielten die MDA-Landnutzungsklasse *Gebölz*.

Die CLC-Informationen zu *Wasserflächen* (5) wurden aufgrund des zu groben Maßstabs nicht berücksichtigt. Hier war die Abgrenzung durch die Fernerkundungsklassifikationen deutlich präziser.

### 6.5.3.2 Integration von OpenStreetMap-Daten zum Wegenetz

Da das CLC nur flächenhafte Informationen größer der Mindesterfassungseinheit von 25 ha darstellt (vgl. Kapitel 3.3.3), sind Informationen zum Verkehrsnetz in mit dem ATKIS vergleichbarer Form nicht enthalten. Daher erfolgte die Integration der OSM-Informationen zum Wegenetz. Wie auch schon bei der Integration der ATKIS-Daten wurde dem während der Datenaufbereitung erzeugten Raster-Layer der OSM-Daten zum Wegenetz die höchste Priorität zugewiesen. Dementsprechend wurden bei der Übertragung alle bereits vorhandenen Klassenzuweisungen im Abdeckungsbereich vollständig von den OSM-Informationen ersetzt. Da eine Untergliederung der OSM-Daten in unterschiedliche Straßenkategorien zum Bezugszeitpunkt noch nicht bestand, wurden lediglich Straßen von Bahnstrecken unterschieden. Bereits bei der Raster-zu-Vektor-Konvertierung war dem Straßennetz bei Konflikten bei der Klassenzuweisung gegenüber den Bahnstrecken (beispielsweise an Kreuzungen) bereits eine höhere Priorität zugewiesen worden.

## 6.6 Legende der MDA-Landnutzungsklassifikationen

In Tabelle 6.17 ist die Legende der MDA-Landnutzungsklassen aufgeführt, die zur Darstellung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet im Hinblick auf den vorgesehenen Verwendungszweck der Landnutzungsdaten entwickelt wurde. Die Legende enthält die MDA-Landnutzungsklassen, eingeordnet in die Kategorien *Landwirtschaft*, *naturnahe Vegetation*, *Gewässer*, *Siedlung* und *Verkehrsnetz*, die in den einzelnen jährlichen MDA-Landnutzungsdatensätzen unterschieden wurden. Resultierend aus der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen und Methoden für die MDA-Analyse, lassen sich die MDA-Landnutzungsklassen darüber hinaus nach Art der Erzeugung, der Art der Datengrundlage und der Art der Landnutzungsinformation charakterisieren (vgl. Tabelle 6.17, Spalte *Ursprung*). In Bezug auf die Art der Erzeugung sind zunächst die fast ausschließlich auf multitemporaler Fernerkundungsanalyse (FE) basierenden Landnutzungsklassen zu nennen. Diese waren nach Abschluss der Fernerkundungsanalysen bereits endgültig erfasst und wurden daher in dieser Form in die finale Landnutzungsklassifikation übernommen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die MDA-Klassen für Feldfrüchte der landwirtschaftlichen Nutzfläche, die während der Geländekampagnen kartiert und darauf beruhend klassifiziert wurden. Mit leichten Einschränkungen können hierzu auch die Klassen für Wald gezählt werden, deren räumliche Verteilungen nur moderat durch Landnutzungsinformationen des ATKIS und der CLC-Daten korrigiert wurden. Einige der fernerkundungsbasierten Landnutzungsklassen (zum Beispiel zu abgeernteten Flächen oder Bewölkung), die während der Klassifikation der einzelnen Fernerkundungszeitschnitte vorkamen, wurden nicht in die finalen Datensätze übernommen. Diese sind daher nicht in Tabelle 6.17 enthalten.

Tabelle 6.17: Legende der MDA-Landnutzungs-klassifikationen, gegliedert nach den Kategorien Landwirtschaft, naturnahe Vegetation, Gewässer, Siedlung/Gewerbe und Verkehrsnetz. Die Spalte ‚Ursprung‘ gibt über die Art der Erzeugung beziehungsweise die Datengrundlage Auskunft. Bei FE+ATKIS und FE+CLC wurden diese Datensätze mit Fernerkundungsergebnissen zur Ableitung der MDA-Landnutzungs-kategorie kombiniert.

Kategorie	Wert	MDA-Landnutzungs-kategorie	Kürzel	Ursprung
Landwirtschaft	1	Hackfrüchte	HF	FE
	2	Getreide	GT	FE
	3	Grünland	GL	FE,FB
	18	unbedeckter Boden /Sommerfrucht (auf Ackerflächen)	B/SF	FE
	4	Winterraps	WR	FE
	9	Kartoffeln	KT	FE
	10	Mais	M	FE
	11	Zuckerrüben	ZR	FE
	12	Winterweizen	WW	FE
	13	Wintergerste	WG	FE
	22	Sommergerste (Braugerste)	SG	FE
	15	Obstplantage/Gartenland	OBG	ATKIS
	39	Hopfen	HO	ATKIS
	40	Baumschule	BS	ATKIS
	41	Gärtnerei	GA	ATKIS
	50	Streuobstwiese	STW	ATKIS
	57	Dauerkulturen	KU	FB
naturnahe Vegetation	5	Nadelwald/Nadelbäume	NW	FE+ATKIS
	6	Laubwald/Laubbäume (auch Mischwald)	LW	FE+ATKIS
	55	Gehölz	GH	FE, ATKIS
	24	Moor	MO	FE, FE+ATKIS, FE+CLC
	59	Heide	HE	FE+ATKIS, FE+CLC
	60	Sumpf	SU	FE+ATKIS, FE+CLC
Gewässer	7	Gewässer	GW	FE
	70	Stehendes Gewässer	SGW	ATKIS
	71	Fließgewässer	FGW	ATKIS
	72	Schwimmböden	SCHW	ATKIS
	8	versiegelte Fläche	VF	FE
Siedlung	28	unversiegelte, vegetationslose Fläche (außerhalb von Ackerflächen)	UVF	FE+ATKIS
	27	siedlungsbezogene Grünfläche	GF	FE+ATKIS
	83	versiegelte Wohnbaufläche	WBF	FE+ATKIS
	62	versiegelte Siedlungsfläche (öffentliche Einrichtungen)	ÖSF	FE+ATKIS
	63	versiegelte Siedlungsfläche, gemischte Nutzung	GSF	FE+ATKIS
	64	Platz, vegetationslose Siedlungsfläche	PL	FE+ATKIS
	58	Sportplatz, Rasen	SPR	FE+ATKIS
	61	Sportplatz, Hartplatz	SPH	FE+ATKIS
	84	versiegelte Industrie- & Gewerbefläche	IGF	FE+ATKIS
	19	Tagebau (Braunkohle)	TB	ATKIS
	20	Abbaugrube/Steinbruch für Gestein, Kies, Sand, Erden	GR	FE+ATKIS
	90	Deponie	DP	ATKIS, CLC
	91	Halde	HA	ATKIS
	92	Kraftwerk (Braunkohle)	KWB	ATKIS
	93	Heizwerk	HW	FE+ATKIS
	94	Kläranlage/Klärwerk	KLW	FE+ATKIS
	95	Umspannstation	US	FE+ATKIS
96	Abfallbehandlungsanlage	AFB	ATKIS	
97	Wasserwerk	WAW	FE+ATKIS	
98	Bergbau (Steinkohle)	BBS	ATKIS	
Verkehrsnetz	85	Straße (allgemein)	ST	ATKIS, OSM
	87	Landstraße, Staatsstraße	LS	ATKIS
	88	Bundesstraße	BS	ATKIS
	89	Bundesautobahn	BA	ATKIS
	79	Weg, Pfad, Steig	WPS	ATKIS
	80	Wirtschaftsweg (Feldweg)	WSW	ATKIS
	86	Bahnstrecke	BNS	ATKIS, OSM
	78	Flugverkehrsanlage (Rollbahn)	FLU	ATKIS
	99	keine Daten	KD	

Eine große Gruppe bilden MDA-Klassen, die auf den Ergebnissen der Fernerkundungs-analysen aufbauen und die durch Integration der Datensätze ATKIS und CLC weiter präzisiert wurden (FE+ATKIS, FE+CLC). Die Definition der Klassenbezeichnungen erfolgte

dabei oftmals in Anlehnung an die Nomenklatur des ATKIS (AAA-Modell), da hieraus die meisten Landnutzungen außerhalb von Ackerflächen abgeleitet wurden. So wurde beispielsweise die MDA-Klasse *versiegelte Industrie und Gewerbefläche* (84) durch die Synthese der fernerkundungsbasierten Information zur Flächenversiegelung mit der ATKIS-Objektart *Industrie und Gewerbefläche* gebildet. Die Landnutzungsklasse *siedlungsbezogene Grünfläche* (27) wurde hingegen durch die Kombination der ATKIS-Objektart *Ortslage* (Siedlungsbezug) oder den CLC-Klassen aus der Kategorie *bebaute Flächen* mit fernerkundungsbasierten Vegetationsinformationen abgeleitet. Andere Landnutzungsklassen des ATKIS (Objektarten) wie *Tagebau (Braunkohle)* oder *Dauerkulturen* der Feldblöcke wurden nach der Vektor-zu-Raster-Konvertierung 1:1 übernommen, wobei die Klassenbezeichnung nur an die MDA-Nomenklatur angepasst wurde. Von dieser Gruppe sind wiederum MDA-Klassen wie beispielsweise zum Wegenetz zu unterscheiden, deren räumliche Abdeckung zwar ebenfalls 1:1 übernommen wurde, die allerdings je nach Abdeckungsgebiet aus verschiedenen Quellen stammten. Die räumliche Verteilung anderer Klassen wie *Grünland* der Feldblöcke oder *Gebölz* des ATKIS wurde dagegen einerseits vollständig aus einem jeweiligen Datensatz übernommen. Andererseits wurde die räumliche Ausbreitung dieser MDA-Klassen durch Ergebnisse der Fernerkundungsanalysen ergänzt oder vervollständigt. Diese MDA-Klassen fassen daher auch Informationen aus mehreren Quellen zusammen.

Aufgrund der unterschiedlichen Quellen, stellt die Gesamtheit der MDA-Landnutzungsklassen zudem eine Mischung aus Klassen mit unterschiedlichem Informationsgehalt dar. Einerseits stellen MDA-Klassen wie zum Beispiel *Winterweizen* (12) oder *Mais* (10) disaggregierte Informationen zur Landnutzung auf Ackerland durch die Ausweisung dezidierter Feldfrüchte bereit. Andererseits weisen MDA-Klasse wie *versiegelte Industrie und Gewerbefläche* (84), trotz der Kombination von Fernerkundungsergebnis und (zum Beispiel) DLM-Information des ATKIS, einen höheren Aggregationsgrad der Nutzungsinformation auf.

Infolge der unterschiedlichen räumlichen Abdeckung der verwendeten Datenquellen und deren variierendem Informationsgehalt, werden einige Landnutzungen abhängig von der Region unterschiedlich stark differenziert. So wird das Wegenetz in Deutschland durch die ATKIS-Information mit sieben MDA-Klassen abgebildet, während in den Niederlanden und in Belgien lediglich zwei MDA-Klassen zum Wegenetz auftreten. Ebenso wird beispielsweise die fernerkundungsbasierte MDA-Klasse *Gewässer* in Deutschland durch ATKIS-Informationen zusätzlich in die MDA-Klassen *Fließgewässer* und *stehendes Gewässer* unterteilt.

## 6.7 MDA-Fruchtfolgenanalyse 2008-2010

Die Ergebnisse der Fruchtfolgenanalyse bestehen aus drei Teilen. Begonnen wird mit der Auswertung der Referenzfruchtfolgenkartierung sowie der Erläuterung der generellen Vorgehensweise bei der Fruchtfolgenableitung. Darauf aufbauend erfolgt die Analyse der Frucht(-ab-)folgenkarte, die auf der Verschneidung der MDA-Landnutzungs-klassifikationen der Jahre 2008-2010 beruht. Die Fruchtfolgenanalyse wurde, aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten Ackerflächen abzugrenzen, für den deutschen Bereich und für die Gebiete in den Niederlanden und Belgien getrennt durchgeführt. Bezüglich der Fruchtfolgenanalyse wird nochmals darauf hingewiesen, dass diese, wie in den Grundlagen dargestellt, unter der Annahme erfolgte, dass im Untersuchungsgebiet hauptsächlich dreijährige (beziehungsweise dreifeldrige) Fruchtfolgen praktiziert werden.

### 6.7.1 Analyse der Fruchtfolgenkartierung

Die Referenzfruchtfolgen für die fernerkundungsbasierte Fruchtfolgenanalyse beruhen auf den jährlichen Geländekartierungskampagnen (vgl. Kapitel 5.2.1). Der Pool an zur Fruchtfolgenanalyse geeigneten Referenzflächen setzt sich dabei grundsätzlich aus allen Schlägen zusammen, für die die angebaute Feldfrucht in allen drei Jahren bestimmt wurde. Da die Schläge mit vollständigen Fruchtfolgen erst nach Abschluss der Kartierungen bestimmt wurden, erfolgte das Zustandekommen dieser Datenbasis im Rahmen der Vorgehensweise bei den jährlichen Kartierungen weitestgehend unbeeinflusst. Einschränkungen bestanden nur insofern, dass nur Schläge mit Feldfrüchten einbezogen wurden, die im Rahmen der jährlichen Fernerkundungsanalysen klassifiziert wurden. Kartierte Flächen mit vergleichsweise selten auftretenden Feldfrüchten wie beispielsweise Hafer, Spargel oder Erbsen in der Abfolge wurden daher verworfen. Eine Ausnahme bilden allerdings Schläge mit Winterroggen (beziehungsweise Triticale). Dieser wurde im Verhältnis zu den zuvor genannten Feldfrüchten relativ oft kartiert, konnte allerdings, wie bereits beschrieben, in keiner Fernerkundungs-klassifikation von Winterweizen unterschieden werden. Um den Anteil von Winterroggen in Fruchtfolgen besser einschätzen zu können, wurden Fruchtfolgen mit Winterroggen (RO) daher einbezogen. Darüber hinaus konnte Wintergetreide in einigen Fällen zum jeweiligen Kartierungszeitpunkt nicht weiter differenziert werden. Daher enthalten einige Fruchtfolgen nur die Halmfruchtinformation *Wintergetreide* (GT).

Insgesamt wurden 450 Schläge mit einer Gesamtfläche von annähernd 2822 ha ermittelt, auf denen eine gültige Fruchtfolge für die Jahre 2008-2010 kartiert wurde. Die Auswertung dieser Grundlage sollte vor allem Einblicke in das Spektrum der tatsächlich praktizierten Fruchtfolgen und deren Relevanz für das Untersuchungsgebiet geben. Zu diesem Zweck

wurden die identifizierten Fruchtfolgen bezüglich ihrer Kartierungshäufigkeit sowie im Hinblick auf ihren Anteil an der Gesamtfläche der kartierten Schläge betrachtet.

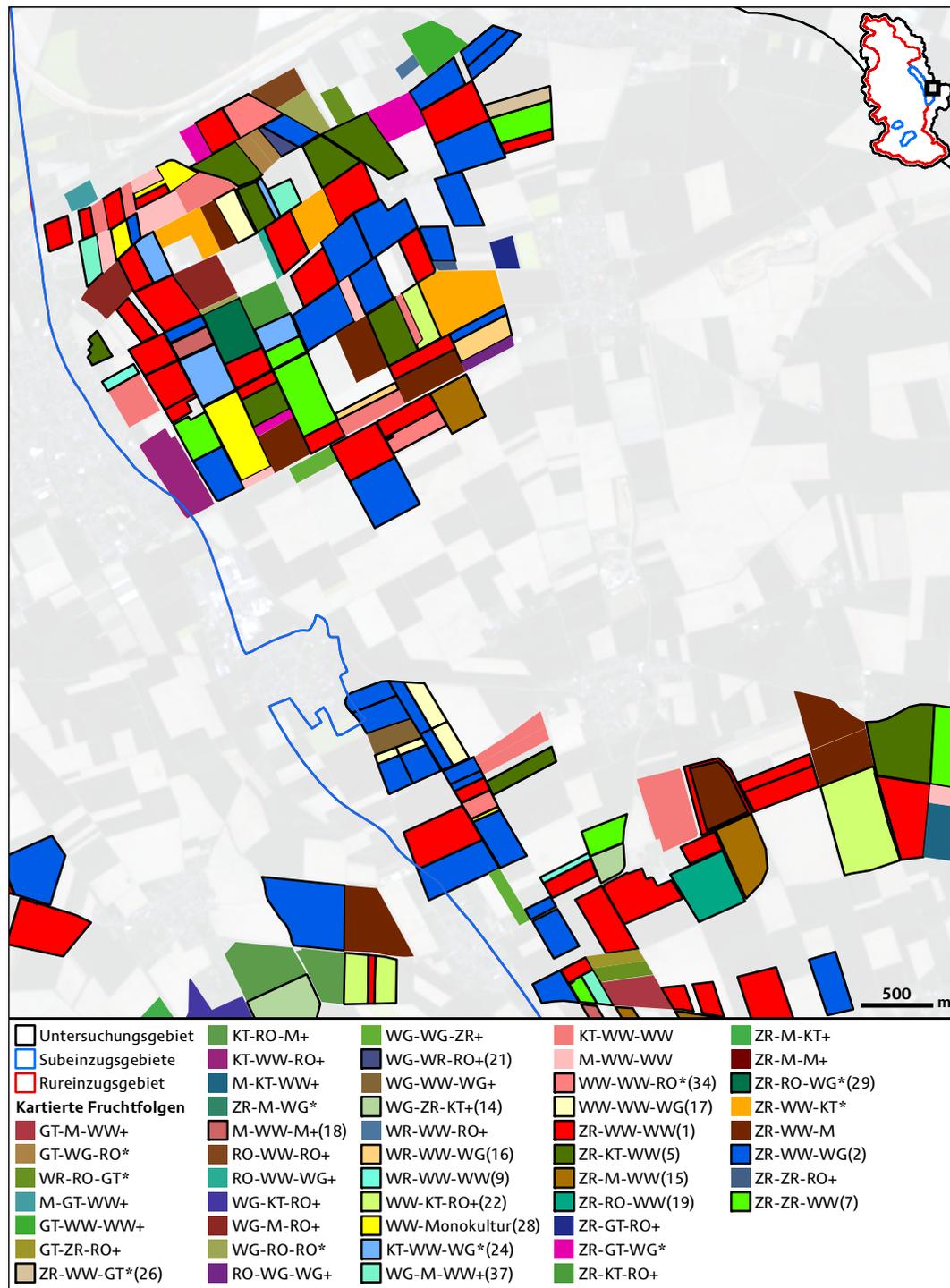


Abbildung 6.17: Durch die Geländekartierungen 2008-2010 ermittelte Fruchtfolgen für ein Gebiet östlich von Merzenich. Schwarz umrahmte Flächen stellen in Tabelle 6.18 aufgeführte Fruchtfolgen dar. Die Zahlen in Klammern entsprechen der Fruchtfolgennummer in der Tabelle (Bildhintergrund: RESA 2010).

Die Identifizierung von Fruchtfolgen auf Basis der Kartierungsergebnisse erfolgte in zwei Schritten im Vektordatenmodell. Zunächst wurden die Kartierungsergebnisse (Feldfrucht-klassen) der einzelnen Jahre aus den separaten Spalten zu einer multitemporalen Information

in einer neuen Attributspalte zusammengefügt. Dabei handelte es sich pro Schlag zunächst noch um die reine Abfolge der Feldfruchtnutzungen der betrachteten Jahre. Unter der Prämisse der Praktizierung dreijähriger Fruchtfolgen und der Betrachtung drei aufeinanderfolgender Jahre, sind pro Fruchtfolge demnach drei unterschiedliche (zeitliche) Ausprägungen möglich, in denen eine Fruchtfolge vorkommen kann. Die Fruchtfolge Zuckerrüben-Winterweizen-Wintergerste (ZR-WW-WG) kann daher auch in den Ausprägungen WW-WG-ZR oder WG-ZR-WW auftreten. Zur Identifikation der Fruchtfolgen wurden daher im zweiten Schritt MDA-Regeln erstellt, anhand derer alle drei möglichen Ausprägungen einer Fruchtfolge selektiert und zusammengefasst wurden. Bezüglich dieser Auswertung muss allerdings betont werden, dass sie eher Stichprobencharakter hat und sich unter Umständen lediglich Tendenzen und keine statistisch gesicherten Aussagen ableiten lassen. Abbildung 6.17 zeigt einen Teil der kartierten Fruchtfolgen für einen Bereich östlich von Merzenich.

Auf den 450 zur Fruchtfolgenanalyse geeigneten Schlägen (s.o.) wurden insgesamt 88 Referenzfruchtfolgen aus 131 unterschiedlichen Abfolgen abgeleitet. Tabelle 6.18 listet die 37 häufigsten und mindestens dreimal kartierten Fruchtfolgen, zunächst nach ihrer Kartierungshäufigkeit und dann nach ihrem Flächenanteil sortiert, auf. In Anlehnung an den in Kapitel 2.5 dargestellten Aufbau von Fruchtfolgen aus Fruchtfolgegliedern beginnen deren Bezeichnungen – soweit vorhanden – stets mit einer Blattfrucht (inklusive Mais) in der Rangfolge ZR, WR, M und KT. Nur Halmfrüchte enthaltende Fruchtfolgen beginnen in der Rangfolge GT, WW, WG, RO und SG. Bei den mit einem \* markierten Fruchtfolgen wurden nur zwei der drei möglichen zeitlichen Stellungen kartiert. Bei den mit einem + markierten Abfolgen wurde nur eine Abfolgeausprägung erfasst. Bei Letzteren wurden die Bezeichnungen daher nicht angepasst, sondern die kartierte Abfolge beibehalten.

Die 37 in Tabelle 6.18 aufgeführten Fruchtfolgen decken 384 Schläge (85,33 % von 450) ab und nehmen mit knapp 2419,61 ha etwa 85,74 % der gesamten Kartierungsfläche ein. 15 weitere Fruchtfolgen (Flächenanteil 6,35 %, Anteil an der Gesamtanzahl 6,67 %) wurden jeweils zweimal kartiert und die übrigen 36 Fruchtfolgen jeweils einmal (Flächenanteil 7,91 %, Anteil an der Gesamtanzahl 8,00 %). Lediglich die ersten zehn Fruchtfolgen weisen in der Kartierungshäufigkeit zweistellige Werte auf. Diese decken sowohl hinsichtlich der Gesamtheit der kartierten Schläge (52,44 %, 236 Schläge), als auch in Bezug auf ihren Anteil an der gesamten Kartierungsfläche (52,96 %, 1494,54 ha) jeweils über die Hälfte aller Schläge ab. Die Rheinische Fruchtfolge ZR-WW-WG (#2, blaue Flächen in Abbildung 6.17) hat in Bezug auf die Gesamtheit der kartierten Schläge mit 13,33 % den größten Flächenanteil (ca. 439 ha bei 60 kartierten Schlägen). Dabei wurde die Abfolge (jeweils 2008-2009-2010) WG-ZR-WW auf 13 Schlägen, die Abfolge WW-WG-ZR auf 29 Schlägen und die Abfolge ZR-WW-WG auf 14 Schlägen kartiert. In Bezug auf die Kartierungshäufigkeit belegte diese Fruchtfolge den zweiten Rang hinter der Fruchtfolge ZR-WW-WW (#1), die auf 63 Schlägen

eine Fläche von ca. 394 ha umfasste. Bei letzterer Fruchtfolge (rote Flächen in Abbildung 6.17) ist anzumerken, dass dabei die Selbstfolge von Winterweizen in 32 Fällen kartiert wurde (50,79 %). In 31 Fällen wurde die Abfolge WW-ZR-WW kartiert. Dies ist die am häufigsten kartierte Abfolge überhaupt. Die beiden Fruchtfolgen #1 & #2 konnten nur in der Börde (im Bereich des Ellebach-Subeinzugsgebiets) kartiert werden und decken mit 29,50 % fast ein Drittel der gesamten kartierten Fläche ab. Damit umfassen sie 27,33 % der kartierten Schläge.

Tabelle 6.18: Rangfolge der 37 häufigsten und mindestens dreimal kartierten Fruchtfolgen. Die Sortierung erfolgte zunächst nach der Kartierungshäufigkeit und dann nach dem Flächenanteil. \* = nur zwei zeitliche Stellungen wurden kartiert, + = nur diese zeitliche Stellung wurde kartiert.

Nr. (#)	Fruchtfolge	Anzahl	Fläche (ha)	Flächenanteil (%)	Anteil nach Anzahl (%)	Rang (Fläche)	Rang (Anzahl)
1	ZR-WW-WW	63	393,64	13,95	14,00	2	1
2	ZR-WW-WG	60	438,90	15,55	13,33	1	2
3	Mais-Monokultur	26	81,52	2,89	5,78	8	3
4	WR-WW-SG	17	97,80	3,47	3,78	6	4
5	ZR-KT-WW	15	139,40	4,94	3,33	3	5
6	ZR-WW-M	12	102,58	3,64	2,67	4	6
7	ZR-ZR-WW	11	87,83	3,11	2,44	7	7
8	KT-WW-WW	11	65,93	2,34	2,44	10	7
9	WR-WW-WW	11	36,91	1,31	2,44	21	7
10	M-WW-WW	10	50,03	1,77	2,22	16	10
11	ZR-WW-KT*	9	102,09	3,62	2,00	5	11
12	WR-SG-SG	9	40,30	1,43	2,00	18	11
13	SG-Monokultur	9	39,35	1,39	2,00	19	11
14	WG-ZR-KT+	8	63,05	2,23	1,78	11	14
15	ZR-M-WW	8	58,07	2,06	1,78	13	14
16	WR-WW-WG*	7	38,82	1,38	1,56	20	16
17	WW-WW-WG	7	19,76	0,70	1,56	28	16
18	M-WW-M+	7	15,49	0,55	1,56	40	16
19	ZR-RO-WW*	6	74,80	2,65	1,33	9	19
20	ZR-WW-RO	6	58,61	2,08	1,33	12	19
21	WG-WR-RO+	6	56,94	2,02	1,33	14	19
22	WW-KT-RO+	6	53,36	1,89	1,33	15	19
23	GT-WG-WR+	6	41,98	1,49	1,33	17	19
24	KT-WW-WG*	5	31,70	1,12	1,11	22	24
25	WW-SG-SG	5	29,46	1,04	1,11	23	24
26	ZR-WW-GT*	5	13,35	0,47	1,11	43	24
27	M-SG-M+	5	13,21	0,47	1,11	44	24
28	WW-Monokultur	4	24,42	0,87	0,89	26	28
29	ZR-RO-WG*	4	21,49	0,76	0,89	27	28
30	M-WW-RO	4	19,27	0,68	0,89	30	28
31	ZR-GT-WG*	4	16,91	0,60	0,89	34	28
32	SG-WW-WR+	3	19,73	0,70	0,67	29	32
33	WR-RO-WW*	3	17,58	0,62	0,67	32	32
34	WW-WW-RO*	3	16,58	0,59	0,67	36	32
35	SG-SG-WG+	3	15,67	0,56	0,67	39	32
36	WR-WW-WR+	3	12,20	0,43	0,67	45	32
37	WG -M-WW+	3	10,86	0,38	0,67	48	32



Alle weiteren kartierten Fruchtfolgen treten sowohl in Bezug auf die Häufigkeit als auch bezüglich der eingenommenen Fläche deutlich zurück. So nimmt die flächenmäßig dritthäufigste Fruchtfolge ZR-KT-WW (#5) mit knapp 140 ha (für 15 Schläge kartiert) eine deutlich geringere Fläche ein. Allerdings wurde mit der Abfolge ZR-WW-KT (#11) eine sehr ähnliche Fruchtfolge mit veränderter Reihenfolge von Kartoffeln und Zuckerrüben neunmal kartiert (Flächenanteil 102,01 ha). Von der Kartierungshäufigkeit auf dem dritten Rang liegend, nimmt Mais in Monokultur (#3) mit 81,52 ha (26x kartiert) wiederum eine noch geringere Fläche ein. Die nur im Bereich der Eifel (NR-Regionen 3 & 4) mit 17 Schlägen vergleichsweise häufig kartierte Fruchtfolge WR-WW-SG (#4) nimmt den vierten Rang ein. Weiter herauszustellen ist die ebenfalls nur in der Eifel kartierte Monokultur von Sommergerste (#13). Von den 37 in Tabelle 6.18 aufgeführten Fruchtfolgen enthalten lediglich zehn keinen Winterweizen. Mit 304 Schlägen und 2029,17 ha handelt es somit auf 71,91 % der Flächen und 67,56 % der Schläge um WW-Fruchtfolgen. Obwohl WW-Fruchtfolgen oftmals auch Zuckerrüben enthalten, wurden ZR-Fruchtfolgen hingegen mit einer Anzahl von 211 auf deutlich weniger Schlägen und mit einer Fläche von 1570,71 ha kartiert. Dabei handelt es sich aber dennoch um 55,66 % der Gesamtfläche und 46,89 % der Schläge. Im Zusammenhang mit der für Fruchtfolge #1 beschriebenen Selbstfolge von WW ist zudem anzumerken, dass wenn die Fruchtfolgen #8 (6/11), #9 (7/11), #10 (3/10) und #17 (4/7) zusammen betrachtet werden, 51,28 % der entsprechenden Schläge ebenfalls diese Selbstfolge aufweisen. Auf vier weiteren Schlägen wurde WW in Monokultur (#28) kartiert. Eine Selbstfolge beispielsweise von Zuckerrüben wurde zwar wie in Fruchtfolge #7 auch kartiert. Im Vergleich zu Winterweizen kann diese Anzahl jedoch fast als vernachlässigbar betrachtet werden. Als bedeutende Feldfrucht ist Wintererbsen (WR) in den in Tabelle 6.18 aufgeführten Fruchtfolgen in 9 Fällen enthalten. Entsprechende Fruchtfolgen wurden auf 65 Schlägen (14,44 %) mit einer Fläche von 362,28 ha (12,84 % der Gesamtfläche) kartiert. In Bezug auf das Auftreten von Winterroggen (RO) in Fruchtfolgen finden sich allein in den 37 häufigsten Fruchtfolgen acht RO-Fruchtfolgen, die auf 38 Schläge verteilt, eine Fläche von 318,63 ha einnehmen. Wie beschrieben, werden diese bei der Fernerkundungsanalyse als WW-Fruchtfolgen bestimmt.

### **6.7.2 Fruchtfolgenkarte für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets**

Die rasterbasierte Analyse der Fruchtfolgen für die Jahre 2008-2010 erfolgte in ähnlicher Weise, wie die Analyse der kartierten Flächen. Dabei wurde ebenfalls davon ausgegangen, dass nur dreijährige (beziehungsweise dreifeldrige) Fruchtfolgen auftreten. Da die Unterscheidung einzelner Schläge aufgrund des Mangels an Schlaggrenzen im Gegensatz zu den Kartierungsflächen (und zudem im Rasterdatenmodell) nur schwer möglich ist, erfolgte die Auswertung

auf Basis der Flächenanteile. In Analogie zur Kartierungsauswertung, wurden die fernerkundungsbasierten Feldfruchtinformationen der einzelnen Jahre pro Rasterzelle zu einer multitemporalen Fruchtfolge in einer neuen Attributspalte im MDA-Grid zusammengefügt. Diese Attributspalte bildete die Basis für die fernerkundungsbasierte Fruchtfolgenkarte des Untersuchungsgebiets. Zur Identifikation von Fruchtfolgen wurden erneut Produktionsregeln formuliert, um die jeweils drei möglichen Ausprägungen einer Fruchtfolge unter einer Fruchtfolgenbezeichnung zusammenzufassen und deren Flächenanteil zu bestimmen.

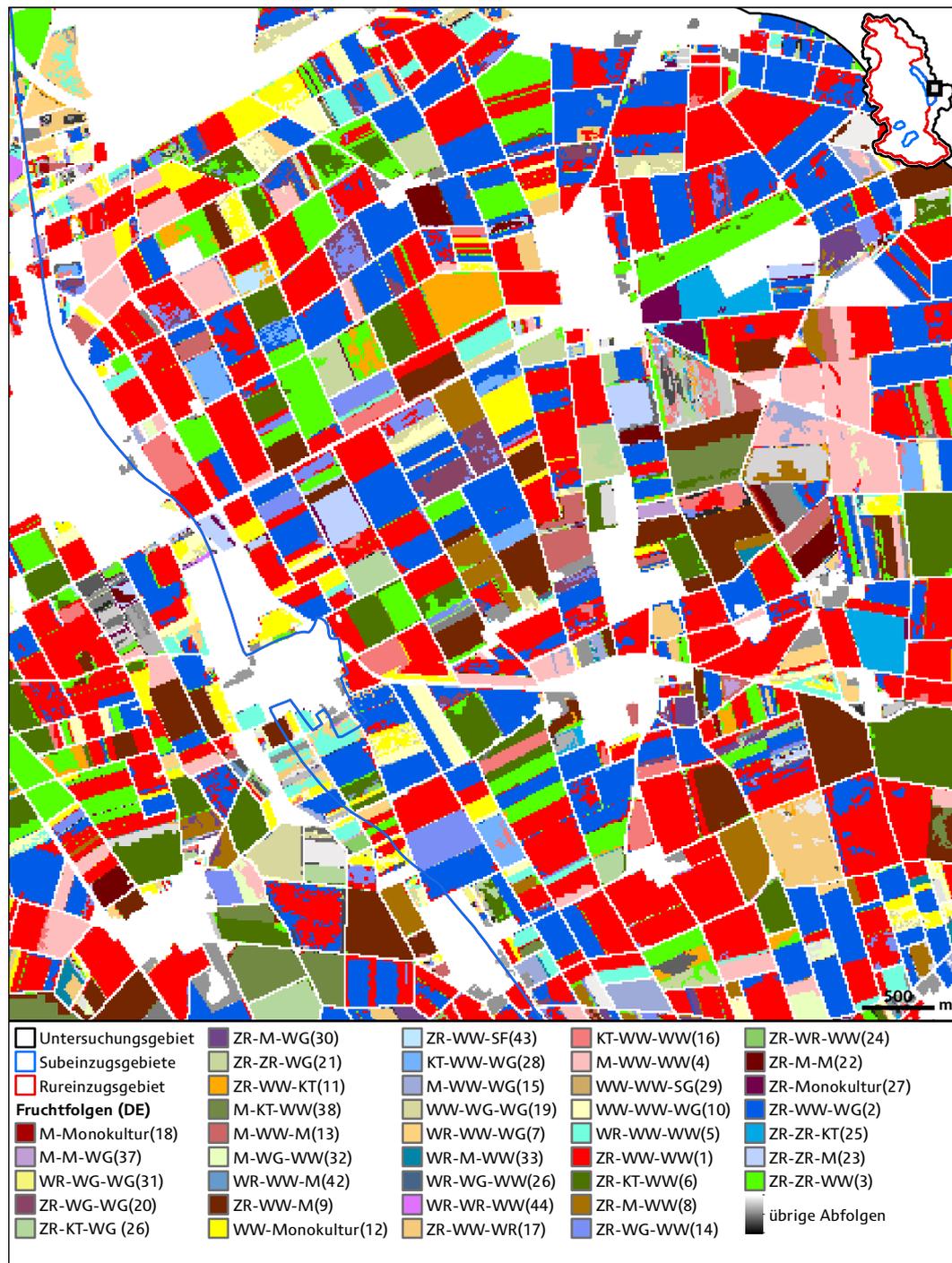


Abbildung 6.18: Ausschnitt der Fruchtfolgenkarte 2008-2010 des deutschen Teils des Untersuchungsgebiets für ein Gebiet östlich von Merzenich (identisch mit Abbildung 6.17). Die Zahlen in Klammern entsprechen dem jeweiligen Rang in Tabelle 6.19.

Die räumliche Grundlage der Fruchtfolgenkarte beziehungsweise -analyse stellen für die deutschen Bereiche die jährlichen Abgrenzungen des Ackerlands anhand der Feldblöcke dar. Dabei wurden sämtliche Zellen einbezogen, die sich in jedem Jahr innerhalb der Acker-Feldblöcke befanden und nicht vom Wegenetz eingenommen wurden. Aufgrund des etwas anderen Flächenausmaßes einzelner Feldblöcke in den verschiedenen Jahren, waren in dieser Auswahl in Randbereichen auch vereinzelt Landnutzungsklassen enthalten, die nicht Feldfrüchten entsprachen. Diese Zellen wurden daher von der Analyse ausgeschlossen. Für die Fruchtfolgenanalyse resultierte daraus eine betrachtete Gesamtfläche von insgesamt 92.246,13 ha. Diese Fläche wird im weiteren Verlauf des Kapitels der Einfachheit halber als Ackerfläche bezeichnet.

Diese Gesamtfläche enthält allerdings auch einzelne Bereiche mit einer gemeinsamen Fläche von 619,72 ha (0,67 % der Gesamtackerfläche), die in einen oder in zwei Jahren anhand der Feldblöcke *Grünland* darstellten, in den übrigen Jahren jedoch *Ackerland* zugeordnet waren. Für diese Bereiche ließ sich somit im engeren Sinne keine Fruchtfolge ableiten, es handelt sich aber dennoch um gültige raumzeitliche Landnutzungsmuster. Abbildung 6.18 zeigt die fernerkundungsbasierte Fruchtfolgenkarte 2008-2010 für den selben Bereich wie bereits in Abbildung 6.17 dargestellt. Die gesamte Fruchtfolgenkarte zeigt Abbildung B.4 in Anhang B. Die unterschiedlichen Einfärbungen der Ackerflächen repräsentieren dabei jeweils identifizierte Fruchtfolgen. Tabelle 6.19 listet dazu insgesamt 48 Fruchtfolgen auf, die im Rahmen der Analyse identifiziert und aufgrund ihres Flächenanteils von mindestens 200 ha für das Untersuchungsgebiet als relevant erachtet wurden. Diese Fruchtfolgen decken 94,21 % der Gesamtackerfläche ab. Die Fruchtfolgen unter 200 ha, die die übrigen Bereiche betreffen, sind in Abbildung 6.18 in unterschiedlichen Grautönen dargestellt.

Bezüglich der Fruchtfolgenanalyse ist zu berücksichtigen, dass diese auf den Ergebnissen der jährlichen Landnutzungsanalysen beruht. Die ermittelten Flächenanteile sind daher immer im Kontext der Klassifikationsgenauigkeiten der einzelnen Feldfrüchte in den einzelnen Jahren 2008-2010 zu sehen (vgl. Tabelle 6.5, Tabelle 6.8 & Tabelle 6.11). So ist beispielsweise die in Kapitel 6.3.4 erwähnte eingeschränkte Klassifikationsgenauigkeit von Kartoffeln (Unterbestimmung vor allem in 2009) zu berücksichtigen (vgl. Tabelle 6.8). Gleiches gilt im Hinblick auf die Unterscheidung von Winterweizen und Wintergerste. Darüber hinaus ist auch die bereits mehrfach angesprochene Zuzählung von Winterroggen zu Winterweizen zu beachten, woraus zusätzliche Diskrepanzen zwischen den Kartierungsergebnissen und den fernerkundungsbasierten Ergebnissen resultieren.

Auf Basis der durch die jährlichen Landnutzungsanalysen erzeugten Datengrundlage hatte die Fruchtfolge ZR-WW-WW (rote Bereiche in Abbildung 6.18) mit 18783,74 ha den mit Abstand größten Anteil an der Ackerfläche (20,36 %). Dabei wurde die Selbstfolge von Winterweizen (WW-WW) für 9718,97 ha (51,74 % der Fläche mit dieser Fruchtfolge) erfasst.

Tabelle 6.19: Auf Basis der jährlichen MDA-Landnutzungs-klassifikationen identifizierte Fruchtfolgen für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets, sortierten nach dem Flächenanteil. Für die Einordnung der Ergebnisse sind die entsprechenden Ränge in der Geländekartierungsanalyse für übereinstimmende Fruchtfolgen aufgeführt.

Rang	Fruchtfolge	Fläche (ha)	Fläche (%)	# in Tab. 6.18	Kartierungs-rang nach	
					Fläche	Anzahl
1	ZR-WW-WW	18783,74	20,36	1	2	1
2	ZR-WW-WG	10879,81	11,79	2	1	2
3	ZR-ZR-WW	9093,71	9,86	7	7	7
4	M-WW-WW	3681,11	3,99	10	16	10
5	WR-WW-WW	3501,83	3,80	9	21	7
6	ZR-KT-WW	3390,46	3,68	5	3	5
7	WR-WW-WG	2732,00	2,96	16	20	16
8	ZR-M-WW	2494,60	2,70	15	13	14
9	ZR-WW-M	2471,40	2,68	6	4	6
10	WW-WW-WG	2205,83	2,39	17	28	16
11	ZR-WW-KT	2145,08	2,33	11	5	11
12	WW-Monokultur	1816,76	1,97	28	26	28
13	M-WW-M	1703,68	1,85	18	40	16
14	ZR-WG-WW	1573,74	1,71	47	57	38
15	M-WW-WG	1569,56	1,70	37	48	32
16	KT-WW-WW	1432,67	1,55	8	10	7
17	ZR-WW-WR	1263,26	1,37	39	25	38
18	M-Monokultur	1027,42	1,11	3	8	3
19	WW-WG-WG	1018,15	1,10	68	66	53
20	ZR-WG-WG	898,85	0,97	45	55	38
21	ZR-ZR-WG	823,64	0,89	88	88	53
22	ZR-M-M	741,49	0,80	43	47	38
23	ZR-ZR-M	732,02	0,79			
24	ZR-WR-WW	680,60	0,74			
25	ZR-ZR-KT	672,39	0,73			
26	WR-WG-WW	661,01	0,72			
27	ZR-Monokultur	654,23	0,71			
28	KT-WW-WG	626,04	0,68	24	22	24
29	WW-WW-SG	578,25	0,63	52	75	38
30	ZR-M-WG	559,69	0,61	41	33	38
31	WR-WG-WG	509,36	0,55			
32	M-WG-WW	502,76	0,55			
33	WR-M-WW	486,83	0,53			
34	WR-WW-SG	483,64	0,52	4	6	4
35	WW-SG-SG	469,64	0,51	25	23	24
36	ZR-KT-WG	435,58	0,47	14	11	14
37	M-M-WG	432,61	0,47	81	81	53
38	M-KT-WW	356,81	0,39	56	42	53
39	WW-SG-WG	335,95	0,36			
40	M-WW-KT	318,78	0,35			
41	ZR-WG-M	312,55	0,34			
42	WR-WW-M	289,78	0,31			
43	ZR-WW-SF	286,58	0,31			
44	WR-WR-WW	278,26	0,30	36	45	32
45	SG-Monokultur	269,60	0,29	13	19	11
46	M-WW-SG	259,54	0,28			
47	M-WG-WG	259,00	0,28			
48	M-SG-SG	206,55	0,22			

Bei der Geländekartierung wurde diese Fruchtfolge in Bezug auf die Anzahl der kartierten Schläge am häufigsten erfasst. Bezüglich des Flächenanteils an den Kartierungsflächen wurde für diese Fruchtfolge der zweite Rang ermittelt (vgl. Tabelle 6.18 und Tabelle 6.19). Als zweithäufigste Fruchtfolge wurde die als Rheinische Fruchtfolge bezeichnete typische Rotation ZR-WW-WG (blaue Bereiche in Abbildung 6.18) auf einer Fläche von 10879,81 ha bestimmt (11,79 % der Ackerfläche). Dabei nahm die Abfolge WG-ZR-WW 5523,89 ha, die Abfolge WW-WG-ZR 2938,79 ha und die Abfolge ZR-WW-WG 2417,13 ha ein. In der Geländekartierung nahm diese Fruchtfolge (#2 in Tabelle 6.18) den größten Flächenanteil ein und wurde zudem am zweithäufigsten kartiert. Mit einer Fläche von 9093,7127 ha und einem Flächenanteil von 9,86 % bildete die Rotation ZR-ZR-WW (hellgrüne Bereiche in Abbildung 6.18) die dritthäufigste Fruchtfolge (#7 in Tabelle 6.18). Neben der Abfolge ZR-WW-ZR (4840,52 ha) wurde die Selbstfolge von Zuckerrüben (ZR-ZR) dabei für 46,77 % (4253.1975 ha) der entsprechenden Bereiche bestimmt. Die ersten drei Fruchtfolgen deckten mit 38757,2625 ha bereits 42,02 % der gesamten Ackerfläche ab. Alle weiteren Fruchtfolgen machten jeweils weniger als 4 % der Gesamtfläche aus, wobei der Flächenanteil ab Rang 20 bei jeweils unter einem Prozent lag. Flächenmäßig bedeutende Fruchtfolgen sind dennoch M-WW-WW (Rang 4 in Tabelle 6.19) und WR-WW-WW (Rang 5 in Tabelle 6.19) mit 3681,11 ha und 3501,83 ha. Die Selbstfolge von Winterweizen erfolgte dabei auf 1460,9725 ha (39,69 % der Fläche) beziehungsweise auf 1651,185 ha (47,15 % der Fläche). Der Überfruchtwechsel ZR-KT-WW ist mit 3390,46 ha, die letzte Fruchtfolge, die mit 3,68 % einen Flächenanteil von über 3 % aufweist. Weiterhin erwähnenswert ist, dass die beiden Überfruchtwechsel ZR-M-WW (Rang 8 in Tabelle 6.19) und ZR-WW-M (Rang 9 in Tabelle 6.19), die sich lediglich in der Abfolge von Zuckerrüben und Mais unterscheiden, mit 2494,60 ha und 2471,40 ha in nahezu identischem Flächenausmaß auftraten.

Durch die Zusammenfassung der ersten zehn Fruchtfolgen mit den größten Flächenanteilen werden bereits 64,21 % der Ackerflächen abgedeckt. Zur weiteren Einordnung der Relevanz der identifizierten Fruchtfolgen, wurden in Tabelle 6.19 zusätzliche Unterteilungen für Fruchtfolgen mit Flächenanteilen >500 ha und >300 ha eingetragen. So deckten die 32 Fruchtfolgen mit der Flächengröße von jeweils > 500 ha bereits 88,27 % der Ackerflächen auf den deutschen Bereichen des Untersuchungsgebiets Seite ab. Bei einem Flächenanteil von jeweils >300 ha kommen weitere neun Fruchtfolgen hinzu (in der Summe 41), wodurch 92,21 % der Ackerflächen erfasst wurden. Für sieben weitere Fruchtfolgen wurde eine Fläche von jeweils >200 ha berechnet. Alle weiteren Fruchtfolgen unterhalb einer Flächenabdeckung von 200 ha hatten jeweils nur noch einen Anteil von 0,20 % oder weniger an der Gesamtackerfläche und wurden daher für die Darstellung der praktizierten Fruchtfolgen als vernachlässigbar eingestuft.

### 6.7.3 Fruchtfolgenkarte für den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets

Der überwiegende Teil des Ackerlands des niederländisch-belgischen Bereichs des Untersuchungsgebiets befindet sich im äußersten Nordwesten südöstlich von Roermond. Abbildung 6.19 stellt die Ergebnisse der Fruchtfolgenanalyse daher für einen Ausschnitt aus diesem Bereich exemplarisch dar. Die vollständige Fruchtfolgenkarte befindet sich in Anhang B (siehe Abbildung B.5).

Die methodische Vorgehensweise der rasterbasierten Fruchtfolgenanalyse für den niederländisch-belgischen Teil entsprach grundsätzlich der des deutschen Teils. Wie in den Unterkapiteln zu den jährlichen MDA-Landnutzungsanalysen dargestellt, war allerdings besonders in den Niederlanden und in Belgien eine klare Unterscheidung von naturnaher Vegetation, Grünland und Feldfrüchten aber auch von versiegelten Flächen und Ackerboden anhand der Fernerkundungsdatengrundlage nicht immer zufriedenstellend möglich. Mangels äquivalenter Daten zu den Feldblöcken, dienten daher ausgewählte CLC-Klassen zur Eingrenzung landwirtschaftlich genutzter Flächen. Dabei wurde, trotz in den Fernerkundungsklassifikationen vermuteter fehlklassifizierter Bereiche, aufgrund des zu groben Maßstabs von einer strikten Unterscheidung von Ackerland und Grünland durch die CLC-Daten abgesehen (vgl. Kapitel 6.5.3). In Übereinstimmung mit der Erzeugung der jährlichen MDA-Landnutzungsanalysen wurden für die Fruchtfolgenkarte daher zunächst alle Zellen herangezogen, die sich pro MDA-Landnutzungsanalyse jeweils innerhalb der Gesamtabdeckung der CLC-Klassen *nicht bewässertes Ackerland* (211), *Wiesen und Weiden* (231), *komplexe Parzellenstrukturen* (242) und *landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe* (243) befanden und einer Feldfrucht-Landnutzungsanalyse entsprachen. Der Ausschluss von Grünland aus der Fruchtfolgenanalyse erfolgte daher allein auf Basis der Fernerkundungsklassifikationsergebnisse, indem alle Zellen, die in allen drei Jahren als Grünland (GL) klassifiziert waren, verworfen wurden. Die Fläche mit Fruchtfolgen belief sich somit auf 6441,66 ha. Durch die nur zum Teil erzielte Unterscheidung von Grünland und Feldfrüchten enthielten davon allerdings 3325 ha (51,62 %) unterschiedliche Abfolgen, in denen Grünland in mindestens einem Jahr vorkam. Die drei flächenmäßig bedeutendsten Abfolgen waren GL-ZR-GL mit 342,70 ha, GL-GL-WG mit 283,03 ha und SF-GL-GL mit 129,98 ha. Durch den Ausschluss dieser Abfolgen reduzierte sich die auswertbare Fläche auf 3116,66 ha. Darüber hinaus wurden von dieser Fläche etwa ein Drittel (34,54 %) der Abfolgen (1076,36 ha) separiert, da bei den jährlichen Landnutzungsanalysen für einige Bereiche in einem oder auch in zwei Jahren keine Feldfrucht, sondern nur eine Unterscheidung in Sommer- oder Winterfruchtnutzung ableitbar war. Innerhalb dieser Gruppe relativ großflächig vorkommende Abfolgen waren zum Beispiel ZR-M-SF (101,54 ha), M-M-SF (78,95 ha), M-SF-WG (59,65 ha), ZR-SF-M (47,32 ha), M-SF-WW (45,54 ha) oder ZR-ZR-SF (38,16 ha). In der Fruchtfolgenkarte (Abbildung 6.19) sind diese

Abfolgen durch das Suffix ‚#‘ markiert. Abzüglich der zuvor genannten Abfolgen umfasste der Analysebereich mit vollständigen Feldfruchtfolgen eine Fläche von 2040,30 ha.

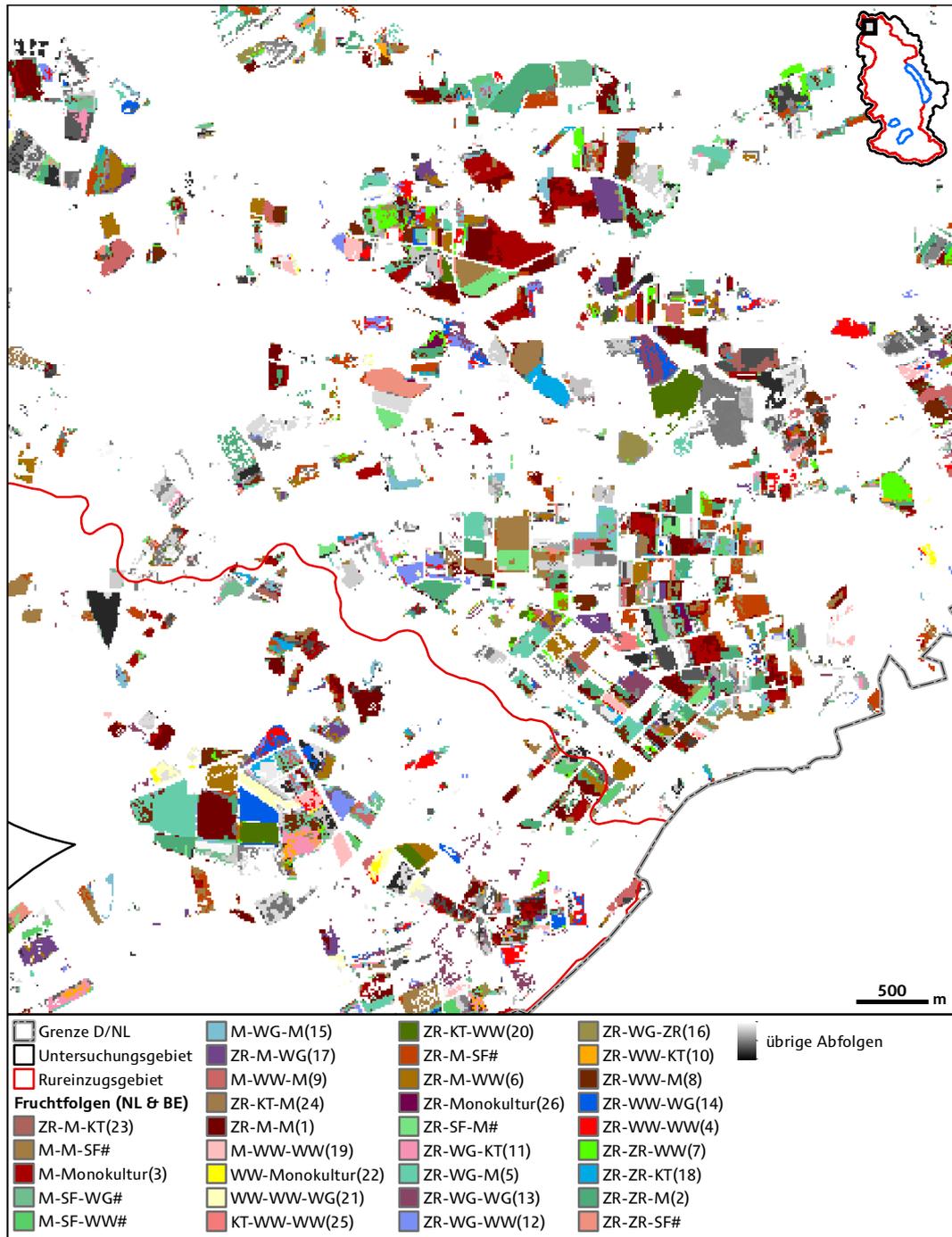


Abbildung 6.19: Ausschnitt der Fruchtfolgenkarte 2008-2010 des niederländisch-belgischen Teils des Untersuchungsgebiets für einen Ausschnitt südöstlich von Roermond. Die Zahlen in Klammern entsprechen dem Rang in Tabelle 6.20. Mit # markierte Abfolgen enthalten nur unvollständige Fruchtfolgen (siehe Erläuterung im Text). Die Abdeckungen aller weiteren Abfolgen sind in unterschiedlichen Grautönen dargestellt.

In Tabelle 6.20 sind 26 häufig auftretende Fruchtfolgen ihrem Flächenanteil nach dargestellt, die jeweils mindestens 1 % des Analysebereichs umfassten. Zusätzlich sind (sofern vorhanden) der Rang einer identifizierten Fruchtfolge für den deutschen Bereich und der Rang bei der

Geländekartierung aufgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Abgrenzungen der Analysebereiche ist ein direkter Vergleich allerdings nur eingeschränkt möglich. Die aufgeführten Fruchtfolgen umfassen insgesamt 89,64 % des Analysebereichs. Alle übrigen Abfolgen (in Abbildung 6.19 in Grautönen dargestellt) wurden aufgrund ihres geringen Flächenanteils nicht für die Analyse berücksichtigt. Den höchsten Flächenanteil aller identifizierten Fruchtfolgen hatte die Fruchtfolge ZR-M-M mit 10,82 % (220,82 ha). Im deutschen Bereich des Untersuchungsgebiets wurde hierfür beispielsweise nur der 22. Rang ermittelt. Auch die zweit- und dritthäufigste Fruchtfolge ZR-ZR-M (150,03 ha) und M-Monokultur (8135,88 ha) hatten auf deutschem Gebiet mit den Positionen 23 und 18 deutlich niedrigere Ränge.

Tabelle 6.20: Für den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets identifizierte Fruchtfolgen, sortiert nach dem Flächenanteil. Soweit zutreffend ist als Ergänzung der Rang der Fruchtfolgen im deutschen Bereich sowie in der Geländekartierungsanalyse aufgeführt.

Rang	Fruchtfolge	Fläche (ha)	Fläche (%)	Rang im deutschen Bereich	# in Tab. 6.18	Kartierungsrang nach	
						Fläche	Anzahl
1	ZR-M-M	220,82	10,82%	22	43	47	38
2	ZR-ZR-M	150,03	7,35%	23			
3	M-Monokultur	135,88	6,66%	18	3	8	3
4	ZR-WW-WW	115,45	5,66%	1	1	2	1
5	ZR-WG-M	104,67	5,13%	41			
6	ZR-M-WW	104,56	5,12%	8	15	13	14
7	ZR-ZR-WW	86,65	4,25%	3	7	7	7
8	ZR-WW-M	80,75	3,96%	9	6	4	6
9	M-WW-M	67,46	3,31%	13	18	40	16
10	ZR-WW-KT	59,54	2,92%	11	11	5	11
11	ZR-WG-KT	59,24	2,90%				
12	ZR-WG-WW	59,13	2,90%	14	47	57	38
13	ZR-WG-WG	58,61	2,87%	20	45	55	38
14	ZR-WW-WG	57,76	2,83%	2	2	1	2
15	M-WG-M	57,04	2,80%	37	81	81	53
16	ZR-WG-ZR	56,86	2,79%	21			
17	ZR-M-WG	47,70	2,34%	30	41	33	38
18	ZR-ZR-KT	45,11	2,21%	25			
19	M-WW-WW	44,30	2,17%	4	10	16	10
20	ZR-KT-WW	39,24	1,92%	6	5	3	5
21	WW-WW-WG	38,72	1,90%	10	17	28	16
22	WW-Monokultur	30,87	1,51%	12	28	26	28
23	ZR-M-KT	30,78	1,51%		73	72	53
24	ZR-KT-M	30,74	1,51%				
25	KT-WW-WW	25,49	1,25%	16	8	10	7
26	ZR-Monokultur	21,49	1,05%	27			

Die auf deutschem Gebiet am häufigsten auftretende Fruchtfolge ZR-WW-WW belegte hier mit 115,45 ha den vierten Rang. Abgesehen von der Fruchtfolge ZR-WG-M (104,67 ha) auf Rang fünf, wurden für die nachfolgenden Fruchtfolgen bis Position 13 auf deutschem und niederländisch-belgischem Gebiet insgesamt ähnliche Ränge ermittelt. Die klassische



Rheinische Fruchtfolge ZR-WW-WG folgt hier jedoch erst auf Rang 14. Während diese Fruchtfolge auf deutschem Gebiet auf knapp 12 % der Flächen bestimmt wurde, hatte sie hier einen Flächenanteil von unter 3 %. Auch die auf deutschem Gebiet vierthäufigste Fruchtfolge M-WW-WW belegte hier nur den 19. Rang. Ähnlich verhält es sich mit der Fruchtfolge ZR-KT-WW, die auf deutschem Gebiet den sechsten und hier den 20. Rang belegte.

## 6.8 Prognose der Ackerlandnutzung für 2011

Ausgehend von der Annahme, dass im Untersuchungsgebiet hauptsächlich dreijährige Fruchtfolgen auftreten, war anhand der erzeugten Fruchtfolgenkarte 2008-2010 eine Simulation der Landnutzung für die Jahre 2011-2013 möglich. Beim Festhalten an einer Fruchtfolge befand sich demnach jeder Schlag, innerhalb des Fruchtfolgefilds dem er zugeordnet ist, im Jahr 2011 in derselben Abfolgeposition/-Stellung wie in 2008, in 2012 wie in 2009 und in 2013 wie im Jahr 2010. Beispielsweise in 2011 sollte pro Schlag demnach jeweils die entsprechende Feldfrucht wie im Jahr 2008 angebaut werden. Da bei Fruchtfolgen grundsätzlich für eine mehrfache Wiederholung angenommen werden kann (FREYER 2003), es sei denn es erfolgen grundlegende Änderungen der ökonomischen Rahmenbedingungen oder in der Nachfrage, befähigt diese Datengrundlage auch die weitere Fortschreibung über die nächsten drei Jahre hinaus. Folglich wäre dann auch eine Prognose für die darauffolgenden Jahre wie 2014-2016 möglich. Um eine erste Einschätzung zu erhalten, inwieweit die Simulation raumzeitlicher Landnutzungsmuster auf Ackerland für das Rureinzugsgebiet anhand der Fruchtfolgenkarte 2008-2010 möglich ist, wurde eine prognostizierte Landnutzung für 2011 (LU11p) für die deutschen Gebiete mit Ergebnissen einer separat durchgeführten Landnutzungsanalyse für 2011 (LU11) verglichen. Es handelte sich bei der LU11 um eine fernerkundungsbasierte Landnutzungsanalyse, die zwar anhand der in dieser Arbeit vorgestellten Umsetzung des MDA durchgeführt wurde, aber nicht mehr Bestandteil der vorliegenden Arbeit war. Dabei kamen multitemporale Fernerkundungsdaten des Jahres 2011 sowie erneut die entsprechenden Zusatzdaten wie ATKIS, Feldblöcke und CLC zum Einsatz (LUSSEM & WALDHOFF 2013). Abbildung C.1 in Anhang C stellt die entsprechende MDA-Landnutzungskarte 2011 von LUSSEM & WALDHOFF (2013) vollständig dar. Die MDA-Landnutzungsklassifikation 2011 (LU11) unterscheidet dieselben Landnutzungsklassen und Feldfrüchte wie die Ergebnisdatensätze dieser Arbeit. Wie die entsprechende EM (vgl. Tabelle C.1 in Anhang C) zeigt, wurde für die LU11 eine OA von 85,96 % sowie ein Kappa-Wert von 0,81 bestimmt. Die Gesamtgenauigkeit liegt somit etwas unterhalb der im Rahmen dieser Arbeit erzielten Güterwerte. Wie auch bei den Analysen im Rahmen dieser Arbeit, wurden einzelne Feldfruchtclassen mit unterschiedlicher Genauigkeit bestimmt. Die Betrachtung der EM offenbart Fehlzugeisungen vor allem zwischen *Zuckerrüben* und *Kartoffeln* sowie zwischen

*Winterweizen* und *Wintergerste*. Dies wurde als eine nicht vollständig erzielte spektrale Unterscheidung dieser Feldfruchtpaare aufgrund der Fernerkundungsdatengrundlage gedeutet, die zuvor auch in unterschiedlichem Maße für die MDA-Landnutzungs-klassifikationen dieser Arbeit beschrieben wurde.

Für den Vergleich wurden zunächst alle als Feldfrucht klassifizierten Bereiche für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets aus beiden Datensätzen entnommen. Da die Abgrenzung von Ackerflächen für beide Datensätze auf Feldblockdaten beruht, stimmten die Datenabdeckungen bis auf eine geringe Anzahl an Zellen überein. Diese Zellen wurden aus beiden Datensätzen entfernt. Der Vergleich erfolgte nun indem auch hier eine EM berechnet wurde, bei der die simulierte oder prognostizierte Ackernutzung 2011 mit der klassifizierten Ackernutzung 2011 als Referenz verglichen wurde. Im Gegensatz zur üblichen Verwendung einer EM wurden dazu sämtliche Zellen mit Feldfrucht-klassen beider Datensätze einbezogen.

Tabelle 6.21: Error Matrix bezüglich der Übereinstimmung der simulierten und der klassifizierten Landnutzung auf Ackerland für das Jahr 2011 für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets.

		Referenzdaten (Prozent)								CE (%)	OA (%)
		WR	KT	M	ZR	WW	WG	SG	Total		
Klassifikation (Prozent)	WR	17,88	0,81	2,78	1,79	2,91	5,82	7,52	3,78	69,88	<b>30,12</b>
	KT	2,94	13,58	1,86	4,89	3,58	1,50	0,08	3,77	91,04	<b>8,96</b>
	M	3,93	3,87	24,52	4,66	5,68	4,43	9,77	7,09	65,81	<b>34,19</b>
	ZR	19,50	29,14	20,40	45,82	22,18	15,83	1,11	27,74	53,95	<b>46,19</b>
	WW	34,76	40,45	35,09	30,69	48,94	34,17	49,38	40,34	46,13	<b>53,87</b>
	WG	19,78	12,13	14,61	12,16	16,06	36,20	4,85	16,20	84,36	<b>15,64</b>
	SG	1,22	0,02	0,75	0	0,65	2,05	25,28	1,08	54,16	<b>45,84</b>
	Total	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-
	OE (%)	82,12	86,42	75,72	54,18	51,06	63,8	74,72	-	<b>OA (%)</b>	<b>41,44</b>
	PA (%)	17,88	13,58	24,52	45,82	48,94	36,2	25,28	-	<b>Kappa</b>	<b>0,19</b>

Tabelle 6.21 stellt die errechnete EM dar. Mit einer OA von 41.44 % wurde eine Übereinstimmung für weniger als die Hälfte der Ackerfläche berechnet. WW und ZR sind zudem die einzigen Klassen, die jeweils eine UA und PA im Bereich von 50% aufweisen. Die geringste Übereinstimmung wurde für KT berechnet, bei der die UA weniger als 10 % beträgt. Die Bewertung dieses Ergebnisses und eine Schlussfolgerung erfolgt in Kapitel 7.3.2.

## 7 Diskussion

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Aspekte dieser Studie hinsichtlich der formulierten Fragestellungen und Zielsetzungen, der eingesetzten Daten, der Umsetzung und der erzielten Ergebnisse behandelt. Die Gliederung des Diskussionskapitels entspricht weitestgehend der bisherigen Abfolge. Begonnen wird mit den Daten und Methoden zur Feldfruchtableitung, gefolgt von der Diskussion der Resultate. Bezüglich der jährlichen MDA-Landnutzungs-klassifikationen erfolgt abschließend eine Gegenüberstellung mit einer anderen fernerkundungsbasierten Landnutzungs-klassifikationen des Rureinzugsgebiets sowie ein kurzer Vergleich mit Landnutzungsdaten der amtlichen Statistik für 2010. Nachfolgend werden die Verfahrensweise bei der Fruchtfolgenanalyse und -prognose sowie die Ergebnisse diskutiert. Abschließend erfolgt die Auseinandersetzung mit den einbezogenen Daten, Methoden und den erzielten Ergebnissen hinsichtlich der Zielsetzung insgesamt möglichst disaggregierte Landnutzungsdaten anhand des MDA für die gewählte räumliche Auflösung zu produzieren. Wie auch schon bei der Darstellung der Ergebnisse, erfolgt die Diskussion der angewendeten Methoden und Daten für die Gebiete des Untersuchungsgebiets außerhalb Deutschlands größtenteils separat, da in diesen Gebieten die Wechselwirkungen zwischen Daten und Methoden viel stärker ausgeprägt waren.

### 7.1 MDA-Fernerkundungsanalyse und multitemporale Feldfruchtableitung

Die Datenverfügbarkeit der einzelnen Datenquellen hatte in zeitlicher wie auch räumlicher Hinsicht großen Einfluss auf den Analyseablauf und die erzielten Ergebnisse. Zunächst wird daher die Verfügbarkeit der Fernerkundungsdaten diskutiert. Anschließend erfolgt die Bewertung der angewendeten Verfahrensweisen zur Feldfruchtableitung und Erzeugung der FE-Basis.

#### 7.1.1 Verfügbarkeit und Qualität der eingesetzten Fernerkundungsdaten

Hinsichtlich einer zeitlich wie auch räumlich ausreichenden Fernerkundungsdatengrundlage wurde bereits bei der Planung dieser Studie die Verwendung einer multisensoralen Daten-grundlage als unabdingbar erachtet. Insgesamt wurden mit ASTER, Landsat-5, Landsat-7, RapidEye (ab 2009) und IRS-P6 Fernerkundungsdaten von fünf Systemen einbezogen. Nach

weiteren Daten von Systemen wie SPOT oder ALOS-(AVNIR-2) wurde kontinuierlich recherchiert, oftmals allerdings ohne Erfolg. Einzelne alternativ verfügbare Datensätze beispielsweise von SPOT-Systemen konnten aus Kostengründen nicht berücksichtigt werden. Trotz der Verwendung mehrerer Datenquellen konnte für die drei betrachteten Jahre (2008-2010) dieser Arbeit nur für zwei Zeitschnitte (ZS4 in 2008, ZS3 in 2010) eine Vollabdeckung des Untersuchungsgebiets mit jeweils Landsat-5-Daten bezogen werden, wobei letztere Szene durch Bewölkung im Süden des Untersuchungsgebiets beeinträchtigt war. Alle übrigen Zeitschnitte mussten aus mehreren Szenen zusammengesetzt werden oder wiesen auch dann noch unterschiedlich große Abdeckungslücken auf. Außerdem konnten nicht immer Aufnahmen innerhalb der veranschlagten Aufnahmezeit bezogen werden. Wie in Kapitel 6 beschrieben, hatte dies eine mitunter starke Fragmentierung der jährlichen Fernerkundungsanalysen sowie der späteren Datenverschneidung im MDA-GIS-Teil zur Folge. Während die Aufnahmen von ASTER und RapidEye ab 2010 (RESA Projekt-ID 459) jeweils zu den in Kapitel 5.1 beschriebenen Aufnahmezeitfenstern per sogenanntem Data Acquisition Request (DAR) beantragt wurden, handelte es sich bei den anderen Systemen infolge der Datenpolitik der Datenprovider um Archivdaten. In Bezug auf ASTER und RapidEye waren zu den ausgewählten jährlichen Aufnahmezeitfenstern in der Regel für beide Systeme entsprechende DAR aktiv. Dennoch umfasst die verwendete Datengrundlage nahezu alle nützlichen und verwendbaren Szenen.

Hinsichtlich der Verfügbarkeit der RapidEye-Daten kam teilweise erschwerend hinzu, dass obwohl Roh- beziehungsweise Level 1B-Daten aufgezeichnet wurden, einzelne Kacheln nicht oder – seltener – erst verspätet im verwendeten Datenprodukt Level 3A bereitgestellt wurden (vgl. Kapitel 6.3.1 und Kapitel 6.4.1). Im seltenen Fall, dass für einen ZS die Auswahl zwischen mehreren Sensoren bestand, wurden Daten nach eigener Einschätzung der Qualität beziehungsweise insgesamt bester Eignung (unabhängig von Bewölkungsgrad oder sonstigen Beeinträchtigungen) üblicherweise in der Reihenfolge RapidEye>ASTER>IRS-P6>Landsat-5>Landsat-7 (infolge SLC-off-Modus, siehe Kapitel 3.2.2) ausgewählt. Diese Abfolge beruht auf Erkenntnissen hinsichtlich der radiometrischen, geometrischen sowie spektralen Eigenschaften, die durch die Verwendung der Datenprodukte gewonnen wurden. Eine direkte Vergleichsanalyse verschiedener Datentypen war allerdings, auch aufgrund des Mangels an Daten mehrerer Sensoren mit gleichem Aufnahmezeitfenster für ein Gebiet, selten möglich und daher nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Bei den verwendeten Datenquellen handelte es sich beim RapidEye-System um die jüngsten Sensoren mit der höchsten räumlichen und radiometrischen Auflösung. Die räumliche Auflösung wurde zwar wie beschrieben auf 15 m reduziert, zumindest subjektiv wurde hiermit aber die beste Unterscheidung von Feldfrüchten im Hinblick auf die spektralen und radiometrischen Eigenschaften der verwendeten Sensoren beobachtet. Bei allen übrigen Sensoren handelt es sich um Systeme, die bereits mehrere Jahre (ASTER, Landsat-7, IRS-P6)

oder gar Jahrzehnte (Landsat-5) über ihre geplante Missionsdauer hinaus operierten. Dementsprechend wurde die radiometrische Sensitivität – abgesehen von der generell geringeren radiometrischen Auflösung – bei allen anderen Systemen (besonders aber bei Landsat-5) als bereits degradiert bewertet. Zur Unterscheidung von Feldfrüchten war sie jedoch noch bei allen Systemen grundsätzlich ausreichend. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung wurden ASTER-Daten (bei Nichtvorhandensein von RapidEye-Daten) den anderen Sensoren vorgezogen. Die spektrale Einschränkung auf nur drei VNIR-Kanäle machte sich jedoch gegenüber den anderen Systemen zuweilen hinsichtlich der Unterscheidung von spektral sehr ähnlichen Landnutzungsklassen bemerkbar.

In Bezug auf die geometrische Qualität blieben die räumlich moderat auflösenden Datenprodukte gegenüber den bereits orthorektifizierten RapidEye-L3A-Daten deutlich zurück. Während für letztere Daten zumeist nur eine moderate geometrische Anpassung an das ATKIS mit wenigen Passpunkten und einer Funktion erster Ordnung ausreichte, erforderten alle anderen Datentypen eine sehr umfangreiche und akribische geometrische Entzerrung, wodurch sich die Datenaufbereitung oftmals zeitintensiver als der Klassifikationsprozess selber gestaltete.

### 7.1.2 MDA-Fernerkundungsanalyse und multitemporale Feldfruchtableitung

Die jährliche vornehmlich fernerkundungsdatenbasierte multitemporale Landnutzungsanalyse mittels des MDA umfasste im Wesentlichen die folgenden Aspekte zur Verbesserung der Feldfruchterfassung und -unterscheidung sowie zur Erzeugung der Basislandnutzung (FE-Basis):

- (a) Die Auswahl mehrerer Aufnahmefenster (AF) beziehungsweise Zeitschnitte (ZS) zur Erfassung einzelner Feldfrüchte zu signifikanten phänologischen Stadien beziehungsweise zur zeitschnittweisen Betrachtung der phänologischen Entwicklung.
- (b) Die Verwendung und Integration von Daten unterschiedlicher Sensoren zur Erzielung einer hinreichenden räumlichen und temporalen Abdeckung.
- (c) Eine Stratifizierung der Fernerkundungsdaten mittels Zusatzdaten im Vorfeld der Analyse zur separaten Klassifikation von Ackerland.
- (d) Die individuelle Klassifikation aller Szenen/Zeitschnitte.
- (e) Die darauffolgende Integration multitemporaler Klassifikationsergebnisse (*post-classification*) unter grundlegender Trennung von Sommer- und Winterfrucht-Flächen sowie das sukzessive Ausschließen bereits mit hinreichender Genauigkeit bestimmter Feldfruchtklassen beziehungsweise -flächen.

- (f) Eine Umklassifizierung mithilfe einer Post-Klassifizierungsstratifizierung zur Korrektur von Fehlklassifikationen anhand von Naturraumgrenzen unter Verwendung weiterer Informationen (mit indirektem Raumbezug) wie Statistiken.
- (g) Die Analyse jeweils der gesamten Fernerkundungsszene zur Klassifikation aller Landnutzungsklassen.
- (h) Die Verwendung von CLC-Klassen zur Stratifizierung der Fernerkundungsdaten für die separate Betrachtung von Ackerland im niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets.

Diese Aspekte werden im Folgenden genauer behandelt. Auch hier erfolgt die Diskussion der angewendeten Methodik für den deutschen und den niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets weitestgehend getrennt.

(a), (b) In keinem der betrachteten Jahre konnte für alle fünf veranschlagten AF eine vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebiets bezogen werden (vgl. Kapitel 6.2.1, 6.3.1 und 6.4.1). Die Feldfruchtableitung musste oftmals für verschiedene Gebiete getrennt und stets auf der Basis einer geringeren Anzahl an Zeitschnitten erfolgen. Darüber hinaus bestand nur selten die Möglichkeit innerhalb eines Zeitfensters aus verschiedenen Datensätzen die Szenen zu wählen, die signifikante phänologische Stadien bestimmter Feldfrüchte am besten widerspiegeln. Die pro Jahr verwendeten multitemporalen Datensätze stellen dementsprechend in den meisten Fällen das Maximum an nutzbaren Szenen dar. Die erhoffte Unterscheidung der dominanten Feldfrüchte konnte damit aber grundsätzlich zufriedenstellend, wenn auch nicht für alle Feldfrüchte in gleicher Genauigkeit, erfolgen. Neben der direkten Klassifikation war dazu oftmals die gemeinsame Betrachtung mehrerer ZS notwendig, um auf eine bestimmte Feldfrucht zu schließen.

Winterraps wurde anhand von Fernerkundungsdaten aus dem Monat Mai in allen Jahren zuverlässig mit einer PA und UA von teilweise weit über 90 % klassifiziert, sodass das erste Zeitfenster erwartungsgemäß gut zur dessen Klassifikation geeignet war. Leichte Fehlklassifikationen traten meist nur mit Winter- und Sommergerste auf.

Eine Klassifikation von Winterroggen (und Triticale) war zu Beginn dieser Arbeit ebenfalls geplant. Allerdings wurde während der Fernerkundungsanalysen schnell klar, dass eine spektrale Unterscheidung von Winterroggen und Winterweizen zu keinem der betrachteten ZS möglich war. Dementsprechend enthält die Klasse *Winterweizen* stets einen gewissen – jedoch laut Landwirtschaftszählung 2010 (IT.NRW 2011) als vergleichsweise vernachlässigbar einzuschätzenden – Anteil an Flächen mit diesen Getreidearten.

Die Unterscheidung von Wintergerste und Winterweizen und war hingegen grundsätzlich anhand von Fernerkundungsszenen aus AF1 und AF2 möglich. Für viele Referenzflächen wurden diese Getreidearten eindeutig unterschieden. Es traten allerdings auch deutliche

Verwechslungen zwischen den beiden Getreideklassen (teilweise auch von einem Zeitschnitt zum nächsten) auf, die auf eine hohe spektrale Variabilität zwischen unterschiedlichen Sorten (jeweils innerhalb von Winterweizen und Wintergerste) oder auf leichte Unterschiede in der Pflanzenentwicklung zurückgeführt wurden. Bei einem grundsätzlich deutlich großflächigeren Anbau von Winterweizen gegenüber Wintergerste (vgl. IT.NRW (2011)) erfolgte daher in der Summe stets eine Überbestimmung von Winterweizen zu Ungunsten von Wintergerste. Dadurch sank für das Jahr 2009 die UA von *Wintergerste* um bis zu 12 % und die UA von *Winterweizen* um ca. 25 %. Aus AF2 wurde für 2008 eine Szene vom 10.06.2008 und für 2009 eine Aufnahme vom 01.06.2008 verwendet. Für 2010 waren keine entsprechenden Daten verfügbar. Somit war nur in einem Jahr (2008) eine Szene aus der Mitte dieses Aufnahmefensters vorhanden, in der die potentiell stärkste spektrale Ausprägung der phänologischen Unterschiede zwischen Winterweizen und Wintergerste erwartet wurde. Der tatsächliche Nutzen dieses Aufnahmefensters lässt sich in dieser Hinsicht aufgrund der Datengrundlage daher nicht abschließend bestimmen. Allerdings deutete der nachträgliche Vergleich der ersten beiden ZS aus 2008 darauf hin, dass Fernerkundungsdaten eher ab dem zweiten Monatsdrittel und nicht bereits ab Anfang Juni eine bessere Trennung von Winterweizen und Wintergerste hätten hervorbringen können.

Die Klassifikation und Unterscheidung von Sommergerste (Braugerste) anhand der verwendeten ZS und Fernerkundungsdaten muss trotz der insgesamt hohen jährlich berechneten Genauigkeiten als problematisch bewertet werden. Aufgrund der zeitlichen und räumlichen Variabilität in der Phänologie von Sommergerste war die Unterscheidung von Winterraps und von anderen Getreidearten in vielen ZS aufgrund hoher spektraler Ähnlichkeiten schwierig. Dies zeigt sich auch bei der visuellen Begutachtung mancher Bereiche in den Endergebnissen, in denen eine teilweise diffuse Klassenzuordnung zurückblieb. Daher lässt sich schlussfolgern, dass ein zusätzliches Aufnahmefenster („AF0“) vor AF1, aus dem Zeitraum etwa Anfang bis Mitte April, das auf den Bedeckungsgrad abzielt, zur besseren flächenbezogenen Trennung der Sommergerste von anderen Feldfrüchten sinnvoll gewesen wäre. Für den Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit wären entsprechende Daten allerdings nur für das Jahr 2010 als Teilabdeckung verfügbar. Allerdings hätte ein früheres AF0 das AF1 nicht ersetzen können, da dann eventuell noch nicht alle Winterfrüchte eine für den Fernerkundungssensor homogen geschlossene Bodenbedeckung ausgeprägt haben. Die grundlegende Trennung von Winter- und Sommerfrüchten würde somit beeinträchtigt.

Besonders zu späteren Zeitpunkten in der Vegetationsperiode war zudem die Unterscheidung von Kartoffeln (und in einigen Fällen auch von Zuckerrüben) allein aufgrund der spektralen Informationen infolge ihrer hohen Ähnlichkeit oftmals beschwerlich. Vergleichbare Beobachtungen werden diesbezüglich beispielsweise auch von DE WIT & CLEVERS (2004) für ihre Untersuchung in den Niederlanden berichtet. Zur Unterscheidung von Kartoffeln und

Gerste war somit die Kombination mehrerer ZS notwendig. Teilweise war sie auch nur per Ausschlussverfahren mittels einer Stratifizierung nach (Anbau-)Regionen durch den NR-Regionen-Layer möglich (vgl. (f)).

Die korrekte Klassifikation von Kartoffeln wiederum umfasste, neben der Unterscheidung von Sommergerste, vor allem die Trennung von Zuckerrüben. Auch dies war besonders vom Vorhandensein geeigneter Fernerkundungsdaten für möglichst viele der veranschlagten AF abhängig. Vorhandene ZS mussten zudem umfassender als bei anderen Feldfrüchten, auch aufgrund des weitflächigen Anbaus, in der zeitlichen Aufeinanderfolge mehrerer ZS betrachtet werden. Klassifikationsergebnisse für 2008 ZS2 (AF2) zeigen beispielsweise, dass Fernerkundungsdaten aus AF2 in Kombination mit Daten auf AF1 und AF3 zur Abgrenzung von Frühkartoffeln verwendet werden können. Falls keine Daten für AF2 vorhanden sind, ist deren Identifizierung schwierig. Grundsätzlich traten Kartoffeln und Zuckerrüben nur durch sehr geringe spektrale Unterschiede in Erscheinung. So war beispielsweise eine Unterscheidung in AF3 mit ASTER-Daten (mit nur drei Bändern im VNIR) nicht möglich (beispielsweise 2009 ZS3), wohingegen dies mit Landsat-7-Daten (beispielsweise 2008 ZS3) oder auch mit RapidEye-Daten (beispielsweise 2009 ZS2) vergleichsweise gut gelang. In 2010 erfolgte die Klassifikation von Kartoffeln erst anhand von RapidEye-Daten die zwischen AF2 und AF3 aufgezeichnet wurden. Dabei wurden viele Bereiche (fast) komplett korrekt als Kartoffeln, andere komplett falsch als Zuckerrüben und wiederum andere Flächen partiell der einen oder der anderen Klasse zugewiesen. Im Rahmen dieser Arbeit führte die spektrale Ähnlichkeit oftmals zu einer starken Unterbestimmung von Kartoffeln (im Extremfall 2009: PA 31,12 %). In der Analyse für 2010 konnten – durch die Anzahl an ZS bedingt – nicht alle Sommerfrucht-Flächen mit Feldfruchtclassen besetzt werden, wobei allerdings vermutet wurde, dass es sich um Kartoffeln handeln könnte (vgl. Kapitel 6.4.3). Inwieweit eine umfassende Erfassung von Kartoffeln anhand der ausgewählten AF möglich ist, lässt sich aufgrund der diesbezüglich zu fragmentierten Datengrundlage und den darauf beruhenden Ergebnissen nicht abschließend beantworten. Es gibt allerdings auch keine Anhaltspunkte, die für eine Korrektur der zeitlichen Abgrenzung der Aufnahme Fenster sprechen würden, so dass an der Abgrenzung festgehalten wird.

Abgesehen von der spektralen Trennung von Zuckerrüben und Kartoffeln ergab sich hinsichtlich der Unterscheidung von Zuckerrüben und Mais insgesamt eine sehr gute Eignung der Aufnahme Fenster ab AF3, da Mais dann eine deutlich andere spektrale Signatur aufwies. Ab AF4 sollte Mais in günstigen Fällen auch in monotemporalen Analysen gut zu klassifizieren sein. Zu früheren AF war zur Klassifikation von Mais allerdings auch die Kombination mit weiteren (vorangegangenen) ZS notwendig, um Fehlklassifikationen mit verschiedenen anderen Feldfrüchten (beispielsweise zwischen Mais und Winterweizen) zu reduzieren, falls entsprechende Feldfrüchte dann noch auf den Feldern standen (siehe (e)).



(c) Die Ackerfeldblöcke bildeten für die deutschen Gebiete die Grundlage zur Stratifizierung, um Fehlklassifikationen durch spektrale Ähnlichkeiten mit unbedecktem Boden und Feldfrüchten einerseits und anderen Klassen wie Grünland, anderweitiger Vegetation oder versiegelten Flächen andererseits zu vermeiden. Ackerfeldblockflächen wurden dann pixelbasiert klassifiziert (FB-Klassifikationen). Wie ein Vergleich der Error Matrizen (EM) der ALL- und FB-Klassifikationen oftmals zeigte, wären die Endergebnisse ohne eine Stratifizierung anhand der Feldblöcke von beträchtlichen Fehlklassifikationen (beispielsweise zwischen Wintergetreide und Grünland) beeinträchtigt gewesen. Zudem war durch die Integration der Feldblöcke das Ausmaß der Ackerfläche bereits auf jährlicher Basis bestimmt. Trotz jahresaktueller Feldblockdaten handelte es sich dabei jedoch „lediglich“ um die Außengrenzen von Ackerflächen und nicht um Schlaggrenzen (mit jeweils nur einer Feldfrucht). Klassifikationen auf Basis einzelner Schläge (mit nur einer Feldfrucht) werden beispielsweise von JANSSEN et al. (1990), SMITH & FULLER (2001), DE WIT & CLEVERS (2004) oder TURKER & ARIKAN (2005) auf Grundlage topographischer Daten durchgeführt, die entweder teilweise oder größtenteils bereits einzelne Schläge differenzierten (vgl. Kapitel 2.4.2.1). Fehlende Schlaggrenzen werden dabei durch visuelle Interpretation von Bilddaten und manuellem digitalisieren hinzugefügt oder aktualisiert. Einzelne Schläge werden nachfolgend zwar pixelbasiert klassifiziert, aber als Objekte betrachtet, wobei beispielsweise die Landnutzungs-kategorie im Zentrum eines Objekts (SMITH & FULLER 2001) oder die mit dem größten Flächenanteil die finale Landnutzungs-kategorie des Objekts bildet (DE WIT & CLEVERS 2004, VAN NIEL & McVICAR 2004, TURKER & ARIKAN 2005). Auf diese Weise können auch Randeffekte, die sich in Fehlklassifikationen von Mischpixeln äußern, vermieden werden (SMITH & FULLER 2001). In Anbetracht der Größe des Untersuchungsgebiets und der – besonders in der Börde – hohen beobachteten Fluktuation der Schlaggrenzen von Jahr zu Jahr, wurde eine manuelle Ergänzung und jährliche Aktualisierung der Schlaggrenzen im Rahmen dieser Arbeit als zu arbeitsaufwendig eingestuft. Zudem hätte dies gleichermaßen der Verwendung einer multitemporalen Fernerkundungsdatengrundlage bedurft, da – wie auch die Feldfrüchte selber – deren Abgrenzung vor allem bei Sommerfrüchten erst im Laufe der Vegetationsperiode exakt erkennbar werden. Auch die Adaptierung oder Entwicklung eines automatisierten Bestimmungsverfahrens von Schlaggrenzen (vgl. BUTENUTH et al. (2007)) konnte aufgrund der Komplexität entsprechender Verfahren nicht berücksichtigt werden. Eine visuelle Überprüfung und gegebenenfalls manuelle Nachbearbeitung wurde dennoch als notwendig erachtet. Die Abgrenzung von Flächen mit unterschiedlichen Feldfrüchten innerhalb der Feldblöcke musste daher ausschließlich auf Basis der pixelbasierten überwachten Klassifikation erfolgen. Um Fehlklassifikationen aufgrund von Mischpixeln an Feldbeziehungswise Nutzungsgrenzen zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren, wurden im Trainingsprozess daher gezielt entsprechende Mischpixel in Trainingsgebiete für die überwachte Klassifikation mit den Verfahren SVM aber auch mit MLC aufgenommen. Wie bereits in Kapitel 6.1 dargestellt, wurden dabei oftmals vergleichbare Ergebnisse – mit leichten

Vorteilen bei SVM – erzielt. In Kombination mit der Umklassifizierung von fehlklassifizierten Pixeln durch die Anwendung der beschriebenen Post-Klassifikationsfilterung sowie der Integration weitere räumlicher Informationen wie dem Wegenetz des ATKIS konnten entsprechende Randeffekte deutlich reduziert, wenn auch nicht gänzlich vermieden werden. Bei der Kombination der Klassifikationsergebnisse der einzelnen Jahre zur Erzeugung der Fruchtfolgenkarte pflanzten sich diese jahresweise unterschiedlich auftretenden Artefakte allerdings fort, sodass entsprechende Zellen dementsprechend fehlerhafte Fruchtfolgen enthielten. Für die Fortführung der jährlichen MDA-Landnutzungsanalysen besonders hinsichtlich der Fruchtfolgenanalyse und -fortschreibung ist daher zu erwägen, einen Aufbereitungszwischenschritt im Vektordatenmodell in die Methodik zu integrieren, um fehlerhafte, isolierte Zellenwerte oder kleinflächige Bereiche auf Ackerflächen weiter zu reduzieren. Dies könnte beispielsweise mit verschiedenen Werkzeugen in ArcGIS erfolgen. Anschließend würde jedoch wieder die Rückführung in Rasterdatenmodell erfolgen. Aufgrund des Mangels an jeweils aktuellen, präzisen und geometrisch konformen Schlagabgrenzungen, wird die grundsätzliche Erzeugung von Fruchtfolgenkarten weiterhin im Rasterdatenmodell bevorzugt, da beim Polygon-Overlay, wie in den Grundlagen beschrieben, zahlreiche geometrische Probleme entstehen. In technischer Hinsicht spielen Änderungen der Schlaggrenzen beim Overlay im Rasterdatenmodell hingegen keine Rolle.

(d) Infolge des Mangels an Schlaggrenzen stimmte das Flächenausmaß der klassifizierten Feldfrüchte innerhalb der Feldblöcke von Zeitschnitt zu Zeitschnitt aufgrund unterschiedlicher phänologisch bedingter Bedeckungszustände oder unterschiedlicher Fernerkundungsdaten nicht exakt überein. Des Weiteren zeigten sich in den Klassifikationen saumartige Bereiche an Parzellenrändern, die einer anderen Klasse als im Inneren zugewiesen wurden (vgl. Abbildung 7.1, roter Kreis). Ebenso traten oftmals Zergliederungen von Flächen mit einer Feldfrucht durch die diffuse Einordnung der entsprechenden Pixel in zwei oder mehr Klassen auf (vgl. Abbildung 7.1, schwarzer Kreis), wenn die spektrale Trennung bestimmter Feldfrüchte besonders problematisch war. Im Rahmen der Fernerkundungsanalysen wurde daher von einem sukzessivem Ausmaskieren von bereits statistisch hinreichend klassifizierten Feldfrüchten im nachfolgenden Zeitschnitt zur Klassifikation, wie beispielsweise von VAN NIEL & MCVICAR (2004) praktiziert, grundsätzlich abgesehen. Somit erfolgte zunächst stets die separate Klassifikation der einzelnen Zeitschnitte und nachfolgend im MDA-GIS-Teil die sukzessive Integration der klassenspezifischen Klassifikationsergebnisse mit ausreichender (beziehungsweise höchster) Genauigkeit. Zur Erzielung einer hinreichenden Abdeckung einer Feldfrucht umfasste dies in der Regel damit aber auch die Zusammenfügung von Klassifikationsergebnissen zu einer Feldfrucht aus mehreren ZS.

(e) Zur Optimierung der räumlichen Abgrenzung und zur korrekten Ableitung und Unterscheidung von Feldfrüchten war die grundsätzliche Trennung von Winterfrucht- und Sommerfrucht-Flächen auf Basis eines ZS aus dem Monat Mai hinsichtlich der im

vorangegangenen Absatz angesprochenen Problematik sehr hilfreich. Beispielsweise in der MDA-Landnutzungsanalyse für 2010 musste ZS2 (RapidEye-Szene; Aufnahme datum 07.07.2010; aufgenommen zwischen AF2 und AF3) aus Mangel an geeigneten Alternativen einerseits als Grundlage für sämtliche Sommerfruchtclassen dienen. Andererseits wurde ZS2 auch zur besseren Trennung von Wintergetreide benötigt.

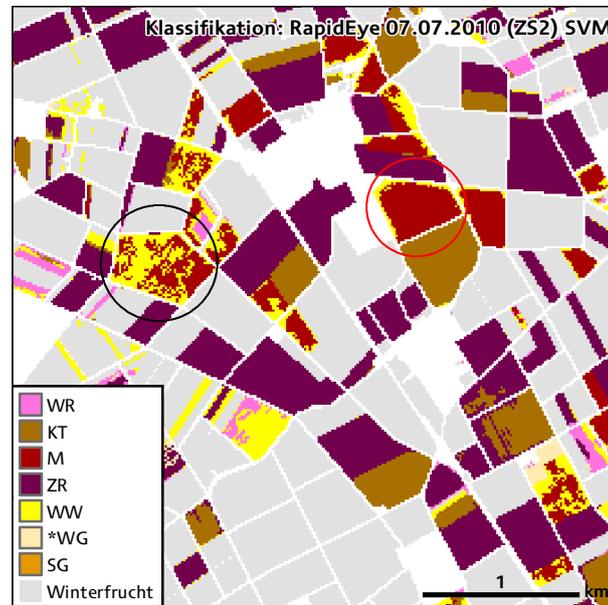


Abbildung 7.1: Trennung von Winterfrucht- und Sommerfrucht-Flächen zur Korrektur von Fehlklassifikationen. Winterfrucht-Flächen sind in grau dargestellt, alle übrigen Informationen wurden ausmaskiert (weiße Bereiche). Kreise markieren typische Erscheinungen von Fehlklassifikationen (hier von Mais als Winterweizen), die auf diese Weise identifiziert und korrigiert werden konnten.

Abbildung 7.1 zeigt einen Ausschnitt des Klassifikationsergebnisses der FB-Klassifikation der oben genannten RapidEye-Szene bei Binsfeld, in dem Winterfrucht-Flächen grau überdeckt sind. Für diesen ZS2 war keine eindeutige Unterscheidung von Winterweizen und Mais zu erzielen. Anhand der auf Basis von ZS1 erstellten Masken für Sommer- und Winterfrüchte konnten entsprechende Flächen gut unterschieden werden. Dass es sich bei den entsprechenden Flächen tatsächlich um Mais handelte, konnte durch den Vergleich mit Referenzflächen ermittelt werden. Pixel die dementsprechend auf Sommerfrucht-Flächen als Winterweizen klassifiziert wurden, ließen sich somit der Klasse Mais zuordnen, wohingegen Maispixel auf Winterfrucht-Flächen mit höchster Wahrscheinlichkeit Winterweizen darstellten und dementsprechend umklassifiziert werden konnten.

In diesem Zusammenhang kann angefügt werden, dass sich der Einfluss der in (c), (d) und (e) angesprochenen Maßnahmen zur Verbesserung der Klassifikationsergebnisse besonders hinsichtlich der Randbereiche von Ackerflächen zum Großteil abseits von dem vollzieht, was anhand von EM messbar ist. Da Testgebiete infolge der Mischpixelproblematik gewöhnlich nicht ganz an Grenzen herangesetzt werden können (da dann die tatsächliche Klassen-zugehörigkeit nicht mehr sichergestellt ist), finden Randpixel oftmals keine Berücksichtigung

in EM. Daher werden einerseits entsprechende Fehlklassifikationen oftmals nicht erfasst, andererseits aber auch nicht die Reduktionen von Fehlklassifikationen, die durch optimierte Klassifikationen erzielt wurden.

(f) Die zusätzliche Stratifizierung des Untersuchungsgebiets nach Naturregionen, stellte einen bedeutenden Aspekt der Feldfruchtableitungsmethodik dar. Trotz des deutlichen Mehraufwands bei der Analyse war der Grundgedanke dabei, spektral nur schwer unterscheidbare Feldfrüchte aufgrund der teilweise verschiedenen Anbaugebiete, die in etwa mit den Naturregionen verknüpft wurden, zu trennen. Bereiche die darauf fußend als Fehlklassifikationen identifiziert wurden, konnten somit im Nachhinein korrigiert werden. Zu diesem Zweck wurde das Untersuchungsgebiet auf Grundlage der Naturräumlichen Haupteinheiten für Nordrhein-Westfalen in insgesamt sieben Regionen (NR-Regionen) unterteilt, wobei in Abhängigkeit von der Datenlage eine zusätzliche Unterscheidung nach deutschen oder niederländisch-belgischen Gebieten erfolgte. Im Gegensatz zur Verwendung der Feldblöcke, wurde in jedem Jahr von neuem von einer Stratifizierung im Vorfeld der Klassifikationen zur Vermeidung von Verwechslungen abgesehen. Dies war ebenfalls mit der Datenabdeckung zu begründen und hätte ansonsten zu einer weiteren Fragmentierung der Analysen geführt. Zudem hatte diese Vorgehensweise den Vorteil, dass dabei (wie bei allen Post-Klassifizierungsstratifizierungen) nur Klassen oder Bereiche berücksichtigt werden mussten, für die eine Stratifizierung sinnvoll war. In vielen Fällen wurden die NR-Regionen 1, 2 & 6 sowie 4 & 5 zusammengefasst, da in den entsprechenden Regionen nur relativ selten Unterschiede in der Landnutzungsausprägung erkennbar waren. Anders stellte sich dies besonders innerhalb und um die NR-Region 3 dar. Der Übergang von der Börde zu den höher gelegenen Regionen der Eifel schlug sich hier des Öfteren in fragwürdigen Klassenzuweisungen und in den beschriebenen Verwechslungen zwischen Sommer- und Wintergetreide, Winterraps, Kartoffeln oder auch Zuckerrüben nieder. Die Abgrenzungen der Regionen waren allerdings aufgrund des Maßstabs der Grundlage (ca. 1:200.000) relativ grob. Da Regionsgrenzen daher mitunter mitten durch Schläge führten, hatte dies bei Anwendung der Stratifizierung mitunter zur Folge, dass Teile eines Schlags unterschiedliche Feldfruchtclassen erhielten. Diese Möglichkeit wurde zwar bereits bei der Datenauswahl bedacht, wurde aber aus Mangel an Alternativen letztendlich in Kauf genommen. Denn auch eine schlag- oder feldblockgenaue Abgrenzung hätte keine wesentliche Verbesserung herbeigeführt, da eine räumlich und zeitlich strikte Anbaugrenze einer Feldfrucht in der Realität nicht zu erwarten ist, sondern sich diese eher allmählich vollzieht und zudem Fluktuationen unterliegt. Wäre die Abgrenzungen genauer, würden zwar keine einzelnen Schläge unterteilt, in der Summe wäre der Unterschied aber vermutlich gering. Aus ähnlichen Gründen wurde auch eine Stratifizierung anhand von Höhendaten nicht in Erwägung gezogen. Zwar ist der Anbau bestimmter Feldfrüchte unter anderem an gewisse Höhenlagen geknüpft. Auch hier hätte eine Stratifizierung aber auf diskreten Höhenwerten beruhen müssen und zu entsprechenden Effekten geführt. Unterm Strich konnten die Erwartungen an

die Verwendung der Regionen besonders hinsichtlich der NR-Region 3 größtenteils nicht erfüllt werden, da sich beispielsweise die Anbaugrenze von Sommergerste zwar der eigenen Einschätzung nach in diesem Bereich vollzog, aber insgesamt zu wenig mit den vorgegebenen Naturraumgrenzen korrespondierte. Da in NR-Region 3 alle Getreidearten und Winterraps nebeneinander auftraten, konnte die Stratifizierung diesbezüglich nur selten eine Verbesserung des Klassifikationsergebnisses herbeiführen. Hinsichtlich der Unterscheidung von beispielsweise Kartoffeln und Sommergerste gelang dies für bestimmte Zeitschnitte unter Berufung auf Landnutzungsstatistiken besser. Vor allem zur Differenzierung der deutlich unterschiedlichen Landschaftsräume Börde und Nordeifel war die Trennung nach Regionen hilfreich, um auf die Trennung nur bestimmter Feldfrüchte zu fokussieren. Dennoch wird diese Form der Post-Klassifizierungsstratifizierung für eine Landnutzungsanalyse als grundsätzlich hilfreich betrachtet. Andernfalls wäre beispielsweise die Klassifikation von Zuckerrüben in den Höhenlagen der Eifel im Zweifel nur durch die vollständig separate Klassifikation vieler kleinräumiger Bereiche und der damit einhergehenden beträchtlichen Steigerung des Arbeitsaufwands zu vermeiden gewesen.

(g) In den meisten Fällen wurde für jede Fernerkundungsszene (beziehungsweise Zeitschnitt) eine separate Klassifikation der Ackerflächen (FB) und eine Klassifikation der gesamten Szene (ALL), in der alle Landnutzungsklassen unterschieden wurden, durchgeführt. Während zur Feldfruchtbestimmung die multitemporale Analyse wie beschrieben unumgänglich war, hätte zur hinreichenden Unterscheidung der meisten anderen Landnutzungsklassen (beispielsweise Wald, Siedlung, oder Gewässer) im Optimalfall auch eine monotemporale Betrachtung eines geeigneten ZS genügt. Für einige Landnutzungsklassen wie Gewässer, Verkehrsflächen oder mit Einschränkungen auch Wald war selbst die jährliche fernerkundungsbasierte Erfassung für den primären Verwendungszweck der Landnutzungsdaten aufgrund der Integration von Geobasisdaten als nicht zwingend notwendig erachtet worden (siehe Kapitel 7.4.2). Ursprünglich wurde daher bei der Konzeption der Verfahrensweise in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle Landnutzungsklassen außer Ackerland bereits nach einem oder zwei ZS vollständig klassifiziert sind. Folglich wären für alle weiteren ZS nur FB-Klassifikationen notwendig gewesen. Als Folge der oftmals fragmentierten Fernerkundungsdatenabdeckung und aufgrund des Mangels an den Feldblöcken entsprechenden Daten für den niederländisch-belgischen Teils des Untersuchungsgebiets, war dies aber nicht möglich. Zur Erfassung der Feldfrüchte in den entsprechenden Gebieten war daher in der Regel stets die zusätzliche ALL-Klassifikation notwendig. Um die wiederholte Klassifikation ganzer Szenen zu vermeiden, waren zunächst mehrere Versuche unternommen worden, um durch Klassifikationen von unbedecktem Boden für mehrere Jahre (jeweils mit Daten aus dem Zeitraum bis Mai) eine Ackerland-Maske für entsprechende Gebiete anzufertigen. Diese hätte als Ersatz für die Feldblöcke dienen sollen. Dazu wurde unterstellt, dass die meisten Flächen einer Fruchtfolge unterliegen und daher spätestens nach drei Jahren eine Sommerfrucht angebaut wird. Diese Flächen würden folglich in einem der Jahre im Mai unbedeckten Boden aufweisen. Falls auf

den entsprechenden Flächen eine dreijährige Fruchtfolge mit Raps als Blattfrucht praktiziert werden sollte (zum Beispiel WR-WW-WG), wären entsprechende Flächen auch dann gut zu identifizieren. Die ermittelten Flächen wären dann mit den Feldblockdaten verschnitten worden. Leider konnte mit den verfügbaren Fernerkundungsdaten kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden, sodass dies nicht in die Methodik integriert wurde. Für viele Bereiche des Untersuchungsgebiets wurden daher mehrfach redundante Informationen erhoben, die größtenteils verworfen wurden, aber Arbeitsaufwand verursachten, da zur gründlichen Unterscheidung der Nutzungen von Interesse in der Regel alle Klassen gut erfasst werden mussten.

(h) In Ermangelung an feldblockäquivalenten Daten wurden im niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets zur Stratifizierung von Ackerland die entsprechenden Klassen des Corine Land Cover (CLC) verwendet. Da der Maßstab und die damit verbundenen Klassendefinitionen bereits bei der Datenauswahl als vermutlich zu grob eingeschätzt wurden, erfolgte die Stratifizierung oftmals erst nach der Klassifikation. Dennoch erschien die Landschaftskomposition in Gebieten mit großflächiger landwirtschaftlicher Nutzung besonders im Nordteil heterogener als erwartet. Wie aus den Darstellungen im Ergebniskapitel zu entnehmen ist, müssen die entsprechenden CLC-Klassen zur verbesserten Unterscheidung von Ackernutzungen und Grünland im Kontext der Arbeit als nur bedingt nützlich bewertet werden. Infolge der unzureichenden Trennung von Ackerland und Grünland war auch die Unterscheidung nach Sommer- und Winterfrüchten üblicherweise stark in Mitleidenschaft gezogen worden, da Grünland – je nach Zustand – auch als unbedeckter Ackerboden klassifiziert werden konnte. Klassifikationsfehler durch multitemporale Betrachtungen zur reduzieren war daher nur beschränkt möglich. Allerdings konnten durch die verwendeten CLC-Klassen zumindest die Fehlklassifikationen von Laubwald innerhalb von Ackerland reduziert werden. Für die südliche Hälfte des Untersuchungsgebiets im Bereich des Hohen Venns und in grünlanddominierten Bereichen der Vennfußfläche reichte der Maßstab des CLC in der Regel aus, um Fehlklassifikationen von Grünland und Getreide zu korrigieren. Die Klassifikationsergebnisse für 2009 für den Nordwesten des Untersuchungsgebiets deuten beim genaueren visuellen Vergleich mit dem deutschen Teil an (vgl. Abbildung B.2), welchen Mehrwert die Integration geeigneter Daten ergibt. Andererseits zeigen die Daten, welche Klassifikationsergebnisse mit räumlich moderat auflösenden Multispektraldaten mitunter zu erwarten wären, wenn eine Trennung von Ackerland und Grünland durch die Integration zusätzlicher Daten überhaupt nicht angestrebt worden wäre. In dieser Hinsicht muss auch an dieser Stelle noch mal betont werden, dass die Genauigkeitsangaben, die den einzelnen EM zu entnehmen sind, nur zur Abschätzung der Klassifikationsgüte für die deutschen Bereiche herangezogen werden können.

## 7.2 Vergleich von MDA-Ergebnissen und anderen Landnutzungsdaten

Um die erzielten Klassifikationsergebnisse besser einordnen zu können, erfolgte einerseits der Vergleich mit der bereits bestehenden fernerkundungsbasierten Landnutzungsanalyse des Rureinzugsgebiets von MONTZKA (2007). Andererseits wurde eine nicht-ortsbezogene Evaluierung der MDA-Landnutzungsclassifikation 2010 für Ackerland anhand der statistischen Daten der Landwirtschaftszählung 2010 auf Gemeindeebene durchgeführt.

### 7.2.1 Gegenüberstellung mit einer anderen Landnutzungsanalyse des Rureinzugsgebiets

Eine mehrjährige fernerkundungsbasierte Landnutzungsanalyse wurde für das Rureinzugsgebiet, wie eingangs erwähnt, von MONTZKA (2007) für die Jahre 2000-2004 durchgeführt. Die räumliche Erfassung von Feldfrüchten war dabei ein wesentliches Ziel. Ebenso wurden auch Fruchtfolgen erfasst (siehe Kapitel 7.3.2). Eine kurze Gegenüberstellung soll daher Ähnlichkeiten und Unterschiede zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit beleuchten. Neben den betrachteten Jahren, stimmen allerdings auch die Abgrenzungen der Untersuchungsgebiete nicht ganz überein, so dass ein direkter Vergleich nur eingeschränkt möglich ist. Die Landnutzungsanalyse von MONTZKA (2007) basiert auf jährlichen überwachten allerdings monotemporalen Landnutzungsclassifikationen mittels räumlich moderat auflösender SPOT-, Landsat-7- und ASTER-Daten. Die Aufnahmezeitpunkte der verwendeten Szenen liegen dabei jeweils im Zeitraum Mitte Mai bis Ende Juli. Die Unterscheidung sämtlicher Feldfrüchte wird somit nur anhand einer Aufnahme durchgeführt. Die Landnutzungsanalysen basieren zwar auf ähnlichen Datenquellen wie die dieser Arbeit, es wurde jedoch ein neuronales Netzwerk als Klassifikationsverfahren eingesetzt. Dieses beruht auf dem Multiple Extended Kalman Algorithm (MEKA) und wird zu den Feed-Forward-Netzen gezählt (MONTZKA 2007). In Bezug auf die Klassifikationsgüte sind für die Landnutzungsclassifikationsergebnisse jeweils sehr hohe Kappa-Werte zwischen 0,90 und 0,99 angegeben. Auf Ackerflächen werden darin jeweils die Hauptfruchtarten Weizen, Zuckerrüben, Mais, Gerste und Kartoffeln unterschieden. Die Flächenanteile der einzelnen Feldfrüchte variieren in den einzelnen Jahren dabei nur gering (MONTZKA 2007). Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit sind die Feldfrüchte Winterraps und Sommergerste somit nicht enthalten (beziehungsweise es wird keine Unterscheidung von Winter- und Sommergerste vorgenommen). Tabelle 7.1 stellt die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten MDA-Landnutzungsclassifikationen mit der Landnutzungsclassifikation für 2001 für das Rureinzugsgebiet von MONTZKA (2007) nach den relativen Flächenanteilen (in Prozent) gegenüber. Die Flächenanteile im oberen Teil der Tabelle beziehen sich auf die

jeweilige Ackerfläche des entsprechenden Untersuchungsgebiets, während sich die Flächenanteile im unteren Teil auf die Gesamtfläche des jeweiligen Untersuchungsgebiets beziehen.

Tabelle 7.1: Für die MDA-Landnutzungsanalysen ermittelte Flächenanteile verschiedener Klassen im Vergleich zur Landnutzungsklassifikation 2001 des Rureinzugsgebiets von MONTZKA (2007).

Landnutzungs- klasse/ -kategorie	MDA- Landnutzungsanalysen			MONTZKA (2007)
	2008	2009	2010	2001
<b>Anteil an der Ackerfläche (%)</b>				
Hackfrüchte (allg.)	0,97	-	-	-
Getreide (allg.)	0,62	-	-	-
Winterraps	3,65	5,41	4,93	-
Kartoffeln	3,52	2,84	6,65	5,56
Mais	7,83	9,81	12,42	16,67
Zuckerrüben	27,85	28,95	23,46	36,11
Winterweizen (2001: Weizen)	38,79	39,13	42,34	36,11
Wintergerste (2001: Gerste)	15,72	11,14	8,67	5,56
Sommergerste	1,04	2,71	1,52	-
<b>Anteil am jeweiligen Untersuchungsgebiet (%)</b>				
Ackerland	28,56	27,84	28,04	36,00
Laub- & Nadelwald	26,36	25,38	25,60	39,00
Laubwald	15,05	14,13	14,40	22,00
Nadelwald	11,30	11,25	11,20	17,00
Grünland	15,76	16,14	16,09	15,00

Trotz des Vergleichs unterschiedlicher Jahre und einer anderen Klassenzusammensetzung ist die zum Teil relativ große Diskrepanz bei der relativen Klassenverteilung einiger Feldfrüchte zwischen den Ergebnissen dieser Arbeit und der Klassifikation von MONTZKA (2007) herauszustellen. So hatte beispielsweise die Klasse Gerste in der Klassifikation von MONTZKA (2007) einen Anteil von etwa 5,56 % an der Ackerfläche. In der MDA-Landnutzungs-klassifikation für 2008 wurde allein für die Klasse Wintergerste – trotz vermutlicher Unterbestimmung – ein Flächenanteil von knapp 16 % bestimmt. Allerdings sinkt der Anteil von Wintergerste auch in der vorliegenden Studie bis auf unter 9 % in 2010. Im Ergebnis von MONTZKA (2007) werden jeweils gleiche Flächenanteile von Zuckerrüben und Weizen bestimmt, während der Flächenanteil von Winterweizen in der vorliegenden Arbeit im Schnitt immer etwa 10 % (bei insgesamt jeweils ca. 40 % der Ackerfläche) höher ist als der von Zuckerrüben. Des Weiteren lassen die ortsspezifischen Evaluierungen der vorliegenden Studie schlussfolgern, dass Zuckerrüben auf Kosten von Kartoffeln vermutlich etwas überbestimmt sind. Demnach wäre die Diskrepanz der Klassifikationsergebnisse beider Studien bezüglich Winterweizen und Zuckerrüben noch größer. Flächenanteile von Kartoffeln wurden in beiden Studien wiederum mit ähnlicherem Ausmaß bestimmt. Bezüglich der Flächenanteile von Ackerland und Grünland ist anzumerken, dass diese – abgesehen von den außerdeutschen



Gebieten – im Fall der MDA-Analysen weitestgehend durch die Feldblöcke festgelegt sind. Zudem beziehen sich die Feldfruchtanteile von MONTZKA (2007) ursprünglich auf die Fläche des Rureinzugsgebiets und wurden zum Vergleich auf die Anteile an der Ackerfläche umgerechnet. Beim Vergleich der Flächenverhältnisse ausgewählter Landnutzungskategorien am jeweils gesamten Untersuchungsgebiet (unterer Teil von Tabelle 7.1) werden weitere Unterschiede deutlich. Während die Flächenanteile für Grünland in allen Ergebnissen weitestgehend übereinstimmen, wurde der Anteil der Ackerfläche für die Jahre 2008-2010 im Schnitt um etwa 8 % geringer bestimmt als von MONTZKA (2007). Ebenso zeigen sich hinsichtlich des Flächenanteils von Wald mit etwa 14 % Abweichung noch größere Unterschiede zwischen den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit und der Klassifikation von MONTZKA (2007). Für das in der vorliegenden Arbeit verwendete ATKIS wurde (nach Überführung ins Rasterdatenmodell) ein Flächenanteil von Wald von 25,19 % an der Gesamtfläche bestimmt. Demnach ist der hohe Flächenunterschied bei Wald erstaunlich. Trotz der hohen Genauigkeitswerte, die für die jährlichen, monotemporalen Klassifikationen von MONTZKA (2007) angegeben werden, lassen sich die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, dahingehend interpretieren, dass durch die multitemporale Betrachtung und die Einbeziehung verschiedener Datenquellen eine differenziertere Erfassung von Feldfrüchten und Flächenanteilen erzielt werden kann.

### **7.2.2 Vergleich der MDA-Landnutzungsklassifikation 2010 mit der Landwirtschaftszählung 2010**

Zur weiteren Evaluierung der Ergebnisse wurde die MDA-Landnutzungsklassifikation 2010 (MDA-LU10) mit den Ergebnissen der Landwirtschaftszählung 2010 (LZ10) für zehn ausgewählte Gemeinden unter Betrachtung der vier Feldfrüchte Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrüben und Mais sowie der gesamten Ackerfläche verglichen. Abbildung 7.2 hebt die ausgewählten Gemeinden innerhalb des Untersuchungsgebiets hervor. Zur Bestimmung der Gesamtackerfläche pro Gemeinde in der MDA-LU10 wurden die Flächen aller Rasterzellen, die laut Feldblock-Daten für 2010 innerhalb einer Gemeinde (Abgrenzung anhand des ATKIS-Layers *Kommunales Gebiet*) die Bodennutzung Ackerland aufwiesen, addiert. Ausgeschlossen wurden allerdings Zellen, die sich infolge der Vektor-zu-Rasterkonvertierung mit dem Wegenetz überschneiden. Dadurch war die Gesamtackerfläche bestmöglich eingegrenzt. Die Flächenanteile pro Feldfrucht wurden in analoger Weise bestimmt, indem die Flächen der entsprechenden Rasterzellen innerhalb einer Gemeinde addiert wurden. Infolge der Produktionsweise der MDA-Landnutzungsklassifikationen lagen alle Feldfruchtpixel der betrachteten Gemeinden ausschließlich innerhalb der Abdeckung der gerasterten Acker-Feldblöcke. Wie in Kapitel 3.4.2 bereits erläutert, waren für die LZ10 alle Betriebe in NRW auskunftspflichtig, die über eine landwirtschaftliche Nutzfläche von mehr als 5 ha verfügen.

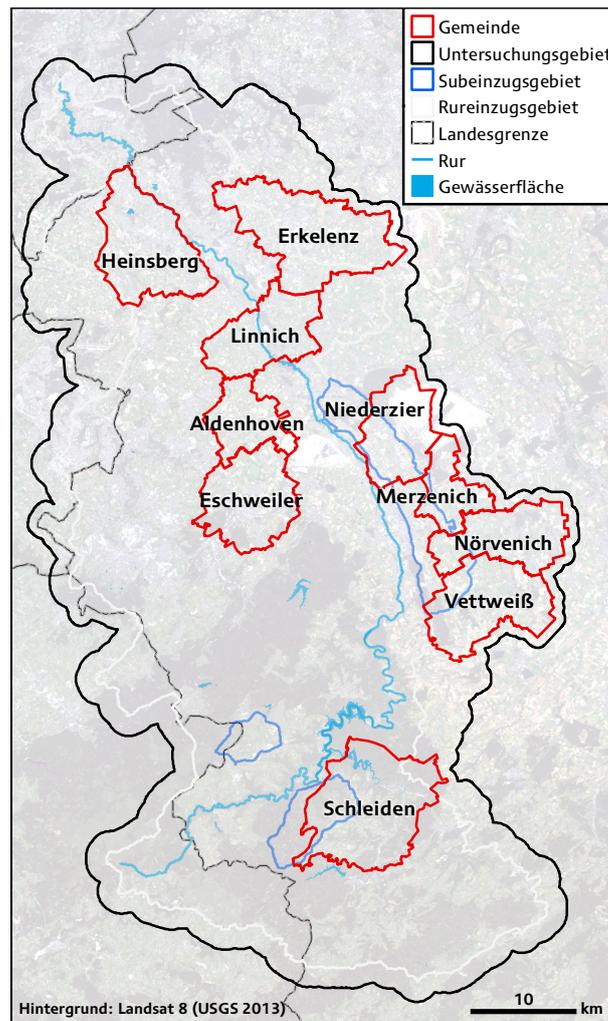


Abbildung 7.2: Vergleich der MDA-Landnutzungsclassifikation 2010 mit der Landwirtschaftszählung 2010 nach dem Flächenanteil von bestimmten Feldfrüchten für ausgewählte Gemeinden.

Daraus resultierte, dass etwa 20 % der Betriebe und etwa 2 % der Ackerfläche nicht in dieser Erhebung berücksichtigt wurden (IT.NRW 2012). Zudem ist hinsichtlich der LZ10 zu beachten, dass die Flächenangaben (nach dem Betriebsprinzip) von den Betrieben herrühren, die in der jeweiligen Gemeinde ansässig sind (DESTATIS 2014). Von einem Betrieb bewirtschaftete Flächen, die in anderen Gemeinden liegen, werden daher zur Gemeinde gezählt, in der sich der Betrieb befindet. Den Flächenbeträgen beider Datensätze liegen infolge der Rahmenbedingungen der LZ10 somit unterschiedliche Abgrenzungskriterien zugrunde. Es war daher grundsätzlich auch zu prüfen, inwieweit Schlüsse aus dieser Gegenüberstellung gezogen werden können. Dazu erfolgte zunächst der Vergleich der in der MDA-LU10 bestimmten Ackerfläche pro Gemeinde mit der in der LZ10 ausgewiesenen Ackerfläche als Referenz.

Abbildung 7.3 fasst das Ergebnis der Gegenüberstellung zusammen. Wie zu sehen, weichen die Flächenanteile für die Gesamtackerfläche der MDA-LU10 und der LZ10 in einigen Fällen deutlich voneinander ab. Die höchsten Abweichungen wurden für Merzenich mit ca. 134 % und für Eschweiler mit knapp 124 % bestimmt. Es treten aber auch geringere Flächenanteile

für die MDA-LU10 gegenüber der LZ10 (in ausgeglichener Anzahl, jeweils fünf Gemeinden) auf. Zählt man die Gemeinde Schleiden (110,86 %) noch dazu, ist die Abweichung bei über der Hälfte der Gemeinden mit bis zu etwa 10 % jedoch vergleichsweise gering. Bei der Gemeinde Linnich sind die jeweiligen Flächen bis auf etwa 20 ha (bei einer Ackerfläche von knapp 4300 ha) zudem so gut wie identisch. Auch bei Nörvenich liegt die Abweichung mit 100 ha bei unter 3 %. Die größte Diskrepanz hinsichtlich einer geringeren Ackerfläche in der MDA-LU10, wurde mit 84,20 % für die Gemeinde Heinsberg ermittelt. Da die Ackerfläche der MDA-LU10 für alle Gemeinden auf den Feldblöcken beruht, können diese Diskrepanzen nicht auf Klassifikationsfehler in der MDA-LU10 zurückgeführt werden, können aber zum Teil mit der Rasterzellengröße zusammenhängen. Aufgrund der positiven wie auch negativen Abweichungen zwischen den beiden Datensätzen ist eine Aussage hinsichtlich des Grads der Vergleichbarkeit der Ackerflächen im Einzelnen schwer zu treffen. Der Vergleich nach Feldfrüchten erfolgt daher nur nach der Fläche als solches und nicht nach dem relativen Flächenanteil an der Ackerfläche einer Gemeinde.

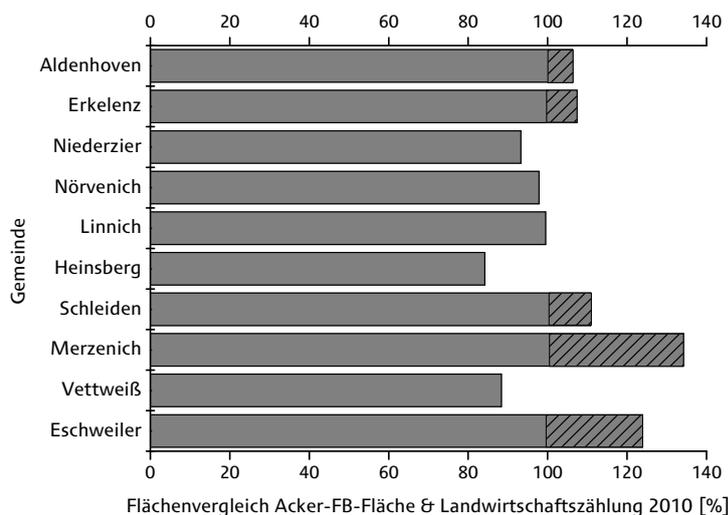


Abbildung 7.3: Ackerfläche der MDA-Landnutzungsklassifikation 2010 (MDA-LU10) im Vergleich zur Landwirtschaftszählung 2010 (LZ10) für ausgewählte Gemeinden in Prozent. 100 % entspricht dabei der vollständigen Übereinstimmung von MDA-LU10-Ackerfläche und der Ackerfläche der LZ10 als Referenz. Schraffuren markieren höher ermittelte Flächenbeträge in der MDA-LU10.

Abbildung 7.4 stellt die jeweiligen Hektarbeträge für die Ackerfläche sowie für die betrachteten Feldfrüchte aus beiden Quellen gegenüber. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, sind auch für die einzelnen Feldfrüchte sowohl negative als auch positive Flächenabweichungen zwischen den beiden Datensätzen zu verzeichnen. Vor allem aber für Nörvenich und Aldenhoven stimmen die berechneten Werte für Winterweizen und Wintergerste im Verhältnis sehr gut überein. So beträgt der Unterschied für Nörvenich bei über 2200 ha Weizenanbaufläche nur 55 ha. Bei Aldenhoven weicht die Anbaufläche (Größenordnung etwa 1200 ha) nur knapp 42 ha voneinander ab. Große Unterschiede sind hinsichtlich Winterweizen hingegen besonders bei Eschweiler (knapp 438 ha) aber auch bei

Erkelenz (fast 411 ha) - bei jedoch deutlich größerer Anbaufläche für letztere Gemeinde - zu verzeichnen. Abgesehen von Vettweiß wurde für Winterweizen in der MDA-LU10 stets eine höhere Fläche bestimmt als in der LZ10. Dies ist auch die einzige Gemeinde in der sowohl Winterweizen als auch Wintergerste eine geringere Fläche in der MDA-LU10 aufweisen. Wintergerste wurde in fünf Gemeinden in der MDA-LU10 im Vergleich zur Referenz teilweise deutlich unterbestimmt. In Aldenhoven stimmten die Beträge allerdings bis auf 3,6 ha überein. Die Ergebnisse für die Gemeinden Heinsberg, Erkelenz, Niederzier und Nörvenich deuten die bereits mehrfach geschilderte Überbestimmung von Winterweizen zu Ungunsten von Wintergerste an, die durch die ortsspezifische Evaluierung ermittelt wurde (vgl. Kapitel 6.4.4). Allerdings ist auch hier bezüglich der genauen Beträge erneut die unterschiedliche Bemessungsgrundlage zu berücksichtigen. Für Mais wurden für Erkelenz fast identische Werte bestimmt. Sehr ähnlich waren die Werte für Mais auch für Niederzier, Eschweiler und mit Abstrichen für Merzenich. Dagegen sind die Abweichungen beispielsweise für Heinsberg, Vettweiß und Linnich vergleichsweise deutlich, wobei erneut sowohl in der MDA-LU10 als auch der LZ10 mal der höhere und mal der niedrigere Wert vorkommt. Während die Flächenbeträge für Zuckerrüben beispielsweise für Nörvenich, Vettweiß, Heinsberg und mit Abstrichen für Niederzier jeweils sehr ähnlich sind, zeigen sich vor allem bei Erkelenz, Aldenhoven, Merzenich und Linnich deutliche Unterschiede. Die gegenüber der LZ10 höheren Flächenbeträge für Zuckerrüben der MDA-LU10 könnten die in den Kapiteln 6.2-6.4 angesprochene Überbestimmung von Zuckerrüben zu Ungunsten von Kartoffeln theoretisch untermauern. Der nachträgliche Vergleich von Flächenbeträgen für Kartoffeln, die nicht in Abbildung 7.4 aufgenommen wurden, ergab in dieser Hinsicht jedoch auch kein eindeutigeres Bild.

Die Gemeinde Schleiden wurde aufgrund ihres für die Eifel vergleichsweise hohen Anteils von Ackerland ausgewählt. Zur Ableitung verlässlicher Aussagen wurden die Flächenbeträge jedoch letztendlich als zu gering eingeschätzt. Im Vergleich zur LZ10 wurden hier alle betrachteten Feldfrüchte deutlich überbestimmt. Eine mögliche Erklärung wäre, dass sich die Gemeindegemeinschaften der Betriebe, die die entsprechenden Flächen bewirtschaften, infolge der vergleichsweise kleinen Ackerfläche, hier stärker ausgewirkt haben. Die deutliche Überbestimmung von Winterweizen und Wintergerste könnte allerdings auch als mögliche Fehlklassifikation interpretiert werden, die beispielsweise mit einer Unterbestimmung von Sommergerste, die dort verbreitet angebaut wird, einhergeht. Dies lässt sich durch den zusätzlichen Vergleich der entsprechenden Flächenbeträge der LZ10 und der MDA-LU10 allerdings nicht bestätigen. Auch Sommergerste wird – wenn man unterstellt, dass die LZ10 die korrekte Ackerfläche der Gemeinde widerspiegelt – um rund 100 ha überbestimmt. Ein gewisser Klassifikationsfehler liegt jedoch vor, da die hier vergleichsweise häufig auftretenden Feldfrüchte Hafer und Triticale grundsätzlich nicht von anderen Getreideklassen unterschieden werden konnten.

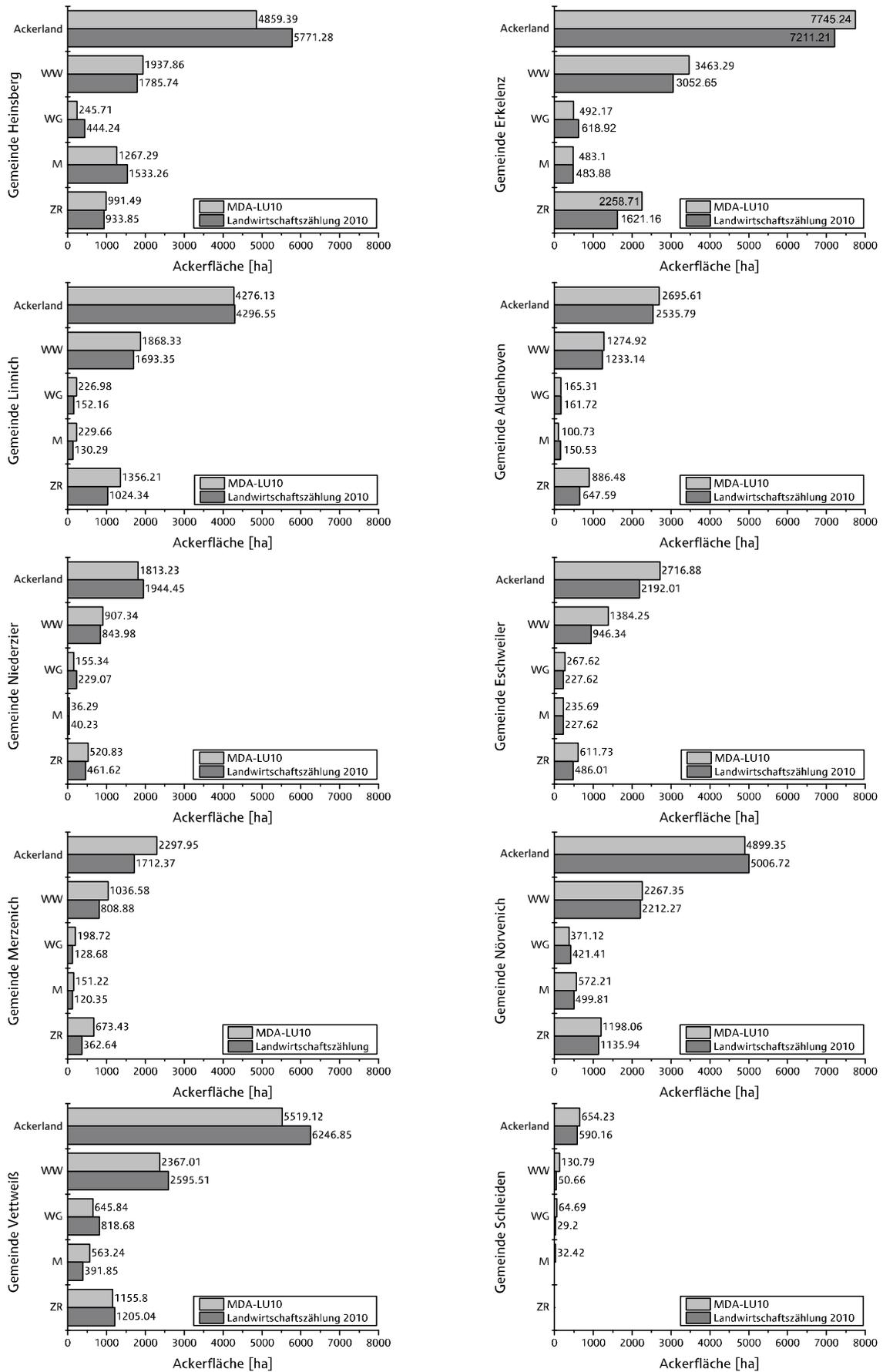


Abbildung 7.4: Vergleich der Flächenanteile ausgewählter Feldfrüchte und von Ackerland in der MDA-Landnutzungs-klassifikation 2010 und in der Landwirtschaftszählung 2010 für ausgewählte Gemeinden (vgl. Abbildung 7.2).

Auch wenn eine genaue Bewertung der Klassifikationsergebnisse für die betrachteten Feldfrüchte anhand der Datengrundlage als Fazit nicht möglich erscheint, lässt sich jedoch insgesamt eine prinzipielle Übereinstimmung der MDA-LU10 und der LZ10 ableiten. Dies wird damit begründet, dass die Flächen der betrachteten Feldfrüchte in der MDA-LU10 grundsätzlich in der gleichen Größenordnung klassifiziert wurden, wie in der LZ10 angegeben. Diese Schlussfolgerung wird auch dadurch bestärkt, dass viele Feldfrüchte pro Gemeinde eine hohe Übereinstimmung in beiden Datensätzen aufweisen. Eine genauere Einordnung der Ergebnisse könnte möglich sein, wenn statistische Daten nach der Belegenheit der bewirtschafteten Flächen verfügbar wären.

## **7.3 MDA-Fruchtfolgenanalyse und Prognose**

Im Gegensatz zur bisherigen Reihenfolge in dieser Arbeit, wird in diesem Kapitel zunächst das Ergebnis der Fruchtfolgenableitung für die niederländisch-belgischen Gebiete behandelt, bevor die Diskussion der Fruchtfolgenkarte und -prognose für den deutschen Teil des Untersuchungsgebiets erfolgt.

### **7.3.1 Fruchtfolgenanalyse für den niederländisch-belgischen Teil**

Wie in Kapitel 6.7.3 dargestellt, aber auch schon allein bei Begutachtung von Abbildung 6.19 zu erkennen ist, hatte die problembehaftete Ableitung der jährlichen Ackerntzung im niederländisch-belgischen Teil des Untersuchungsgebiets auch einen enormen Einfluss auf die Fruchtfolgenableitung. Viele Bereiche wirken zergliedert, da sie kleinräumig eine hohe Heterogenität in der Klassenzuweisung aufweisen. Dies ist vor allem auf Verwechslungen von Feldfrüchten und Grünland, aber auch auf Fehlklassifikationen von unbedecktem Boden und versiegelten Flächen zurückzuführen und hatte den Ausschluss zahlreicher Abfolgen beziehungsweise Flächenbereiche zur Folge. Trotzdem ergab dieser Flächenausschluss nicht den gewünschten Effekt, dass sich Bereiche mit plausiblerer Flächenabgrenzung herauskristallisieren ließen. Diese großen Diskrepanzen zu den Klassifikationsergebnissen des deutschen Teils des Untersuchungsgebiets könnten eventuell zu einem gewissen Anteil mit unterschiedlichen ökonomischen Gegebenheiten in den Niederlanden und Belgien begründet werden. Es ist jedoch wahrscheinlicher, dass diese Unterschiede auf lokal zu stark degradierte Jahresklassifikationsergebnisse zurückgehen. Von einer weiteren Analyse und Interpretation dieser Daten wurde daher abgesehen. Sämtliche Aspekte der Fruchtfolgenkarte und deren Analyse werden im nachfolgenden Kapitel behandelt.

### 7.3.2 Fruchtfolgenanalyse und Landnutzungsprognose für den deutschen Teil

Mit der Erzeugung der Fruchtfolgenkarte 2008-2010 für das Untersuchungsgebiet wurden mehrere Ziele verfolgt. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte herausgestellt und diskutiert. Sie umfassen

- (a) die Erfassung von Fruchtfolgen,
- (b) die Ableitung und Analyse von Fruchtfolgen als raumzeitliche Muster,
- (c) die Rahmenbedingungen für die Analyse und die Fortschreibung von Fruchtfolgen zur Simulation zukünftiger Landnutzungen.

(a) Die mehrjährige Fernerkundungsdatenanalyse diente der Bereitstellung raumzeitlicher Landnutzungsmuster auf Ackerland für den Betrachtungszeitraum. Durch die multitemporale Feldfruchtabelle mithilfe der Feldblockdaten konnten für den Großteil des Untersuchungsgebiets weitestgehend homogene und zusammenhängende Flächen (Parzellen) bestimmt werden, für die die Fruchtfolge als raumzeitliches Muster dargestellt wird. Als Resultat ist die jährliche Abfolge der Nutzungen grundsätzlich für jede Zelle, in einem Datensatz und als ein Attribut für das Untersuchungsgebiet fassbar. Zur regionalen Agrarökosystemmodellierung muss daher nicht mehr auf idealtypische Fruchtfolgen zurückgegriffen werden, da – Klassifikationsfehler außen vor gelassen – nun die tatsächlich praktizierten Fruchtfolgen auf Zellenbasis flächendeckend vorliegen.

(b) Diese raumzeitlichen Muster sind zwar in dieser Form verwendbar. Um den Wert dieser rohen Informationen weiter zu steigern, wurden darauf aufbauend die einzelnen Fruchtfolgen identifiziert. Damit wurde auch das Spektrum der tatsächlich praktizierten Fruchtfolgen im Untersuchungsgebiet weitestgehend für einzelne Schläge erfasst. Diese Informationen lagen zuvor – wenn überhaupt – nur sehr lückenhaft vor und konnten nun zur genaueren Auswertung und Charakterisierung der raumzeitlichen Landnutzungsmuster des Ackerlands im Untersuchungsgebiet genutzt werden. Die Erfassung erfolgte dabei für einige Bereiche anhand der Geländedaten zur Verifizierung, vor allem aber auf Basis der Fernerkundungsdaten durch die Betrachtung drei aufeinanderfolgender Jahre. Zur Identifizierung der einzelnen praktizierten Fruchtfolgen und deren Flächenanteile war die Zusammenfassung aller möglichen – beziehungsweise auftretenden – zeitlichen Ausprägungen einer Fruchtfolge notwendig. Hinsichtlich der erzielten Ergebnisse lässt sich zunächst festhalten, dass in Bezug auf die beiden Fruchtfolgen mit dem größten Flächenanteil, eine gute Übereinstimmung mit den Geländekartierungen besteht (vgl. Tabelle 6.19). Die durch die Kartierung gewonnene Einschätzung bezüglich der Rolle der Rheinischen Fruchtfolge wurde dadurch bestätigt. Sie nimmt zwar noch die zweitgrößte Fläche ein, hat ihren Status als die vorherrschende Fruchtfolge mit etwa 12 % Flächenanteil aber scheinbar verloren. Sie wird in der Rangfolge von zwei Fruchtfolgen flankiert, die nur aus den Feldfrüchten Winterweizen und Zuckerrüben

bestehen und zusammen rund 30 % der Ackerfläche ausmachen. Das Spektrum der übrigen Fruchtfolgen gestaltet sich sehr heterogen und setzt sich aus einer Vielzahl von Fruchtfolgen mit jeweils deutlich geringerem Flächenanteil zusammen. Insgesamt zeichnen sich viele der erfassten Fruchtfolgen erwartungsgemäß vor allem durch einen hohen Anteil ( $\geq 66$  %) an Winterweizen und – mit Abstrichen – auch an Zuckerrüben aus. Allerdings wurden oftmals auch Fruchtfolgen identifiziert, die nicht allgemeinen Expertenempfehlungen entsprechen. In diesem Zusammenhang ist exemplarisch besonders das häufige Auftreten der Selbstfolge von Winterweizen zu erwähnen. Diese wurde bereits bei den kartierten Flächen häufig beobachtet (vgl. Kapitel 6.7.1). In Analogie dazu, wurde diese Selbstfolge auch in der Fruchtfolgenanalyse für den deutschen Bereich auf 18 % der Ackerfläche (etwa 16,999 ha) bestimmt. Zwar kann es sich dabei teilweise um die beschriebenen Verwechslungen (Fehlklassifikationen) mit anderen Getreidearten (vor allem Wintergerste und Winterroggen) handeln. Der große Flächenanteil entsprechender Fruchtfolgen im Verhältnis zur gesamten Anbaufläche von Winterroggen oder Wintergerste, sowie die Tatsache, dass entsprechende Fruchtfolgen durch die Geländekartierungen bestätigt wurden, stützen jedoch das fernerkundungsbasierte Ergebnis. Da die Selbstfolge von Winterweizen und Zuckerrüben im Sinne des integrierten Pflanzenbaus infolge des erhöhten Risikos eines Schädlingsbefalls im Allgemeinen nicht zu empfehlen ist (vgl. Kapitel 2.5), war dieses häufige Auftreten a priori nicht zu erwarten. Als Konsequenz ist auf solchen Flächen zur Ertragssicherung mit entsprechendem Management (wie Düngung oder Pflanzenschutzmaßnahmen) zu rechnen, was dann vermutlich nur noch bedingt der guten fachlichen Praxis (gFP) entspricht (vgl. MUNZERT (2006)). Diesbezüglich ist jedoch anzumerken, dass hier nicht das vermeintliche Fehlverhalten von Landwirten angeprangert werden soll, sondern vielmehr die Annäherung an die Realität im Vordergrund steht.

Hinsichtlich der Modellierung von Stoffflüssen sind die neuen Erkenntnisse bezüglich der Fruchtfolgen im Untersuchungsgebiet von entscheidender Bedeutung. Denn wenn die tatsächlich klassifizierten Fruchtfolgen im Modell zur Anwendung kommen, anstatt wie bisher hauptsächlich empfohlene Fruchtfolgen, ist mit einer deutlichen Verbesserung der Modellierungsergebnisse zu rechnen. Die mittels Klassifikation im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Fruchtfolgen können für die gesamte Untersuchungsgebietsfläche mit weiteren Informationen verknüpft werden, um Einflüsse wie die Vorfruchtwirkung oder feldfrucht-spezifisches Flächenmanagement (Düngung, Bodenbearbeitung, Bodenzustand, etc.) für die nachfolgende Feldfruchtnutzung einzuschätzen.

(c) Durch die Auslegung der Studie auf drei Jahre, wurde sowohl bei der Auswertung der kartierten Fruchtfolgen als auch bei der Analyse der fernerkundungsbasierten Fruchtfolgekarte unterstellt, dass nur dreijährige Fruchtfolgen auftreten. Aufgrund dieser Prämisse wurden Fruchtfolgen zu Fruchtfolgen zusammengefasst und deren Häufigkeit beziehungsweise Flächenanteil bestimmt. In der früheren Studie von MONTZKA (2007) kann auf einen Betrachtungszeitraum von fünf Jahren zurückgegriffen werden. Bei einem entsprechenden



Zeitraum ist davon auszugehen, dass selbst wenn Fruchtfolgen auftreten sollten, die länger als drei Jahre andauern, diese in einem entsprechenden Zeitraum nahezu vollständig erfasst werden. Zwar wird in MONTZKA (2007) keine Fruchtfolgenkarte präsentiert, allerdings werden die zwanzig häufigsten Fruchtfolgen nach dem Flächenanteil in Prozent aufgeführt. Diese nehmen etwa 78 % der betrachteten Ackerfläche ein. Da Winterraps sowie der Winter- und Sommeranbau von Gerste in den zugrundeliegenden Landnutzungs-klassifikationen nicht unterschieden werden, sind diese folglich nicht Bestandteil der abgeleiteten Fruchtfolgen. Da zudem das darin betrachtete Gebiet nicht ganz mit dem der vorliegenden Arbeit übereinstimmt, sind die Ergebnisse nicht uneingeschränkt vergleichbar. Weiterhin sind die beschriebenen Klassifikationsfehler in beiden Studien zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Gebietsabgrenzung werden die möglichen Unterschiede für die Fruchtfolgenanalyse allerdings als vergleichsweise gering eingeschätzt, da ohnehin nur Tendenzen verglichen werden können. Im Gegensatz zur dieser Arbeit wurden bei MONTZKA (2007) unterschiedliche zeitliche Stellungen einer Fruchtfolge scheinbar nicht zusammengefasst. Die Rangfolge von MONTZKA (2007) wird daher auf den ersten fünf Rängen durch unterschiedliche zeitliche Ausprägungen des wiederholten Fruchtwechsels von Weizen und Zuckerrüben mit einem Anteil von 57 % an der Ackerfläche dominiert. Darin sind allerdings auch Selbstfolgen von Weizen und Zuckerrüben enthalten. Erst ab dem sechsten Rang enthalten Fruchtfolgen auch andere Feldfrüchte. Diese nehmen jeweils weniger als 4 % der Ackerflächen ein. Eine Abfolge in der die typische Rheinische Fruchtfolge (ZR-WW-WG) enthalten ist, wird beispielsweise erst an elfter Stelle mit 2,21 % gelistet. Zwar wurde die Studie von MONTZKA (2007) zeitlich vor dieser Arbeit durchgeführt. Dennoch überrascht der hohe Anteil der Wechselfolge von Zuckerrüben und Winterweizen (ZR-WW), auch wenn für beide Feldfrüchte jeweils identische Flächenanteile klassifiziert wurden (MONTZKA 2007). Auch die derart geringe Bedeutung der Rheinischen Fruchtfolge konnte durch die Kartierungsergebnisse und die fernerkundungs-basierte Fruchtfolgenkarte der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden. Zwar erscheint der darin geschilderte wiederholte Fruchtwechsel ZR-WW vor allem im Vergleich zum in der vorliegenden Arbeit ermittelten Flächenanteil der Rheinischen Fruchtfolge daher als zu hoch. Dies untermauert allerdings eine Schlussfolgerung, die sich aus den Analyseergebnissen der vorliegenden Arbeit ziehen ließ, nämlich dass auch durch die identifizierten Fruchtfolgen zu einem gewissen Anteil einfache ZR-WW-Fruchtwechsel abgebildet werden. Bei Betrachtung von nur drei aufeinanderfolgenden Jahren bestand bei der Ableitung einiger Fruchtfolgen mit nur zwei Feldfrüchten auch die Möglichkeit, dass es sich bei gewissen zeitlichen Stellungen wie WW-ZR-WW bei Fruchtfolge 1 in Tabelle 6.19 eigentlich um Fruchtwechselfolgen handelt. Die Abfolgen WW-WW-ZR, ZR-WW-WW und WW-ZR-WW wären somit keine gemeinsame Fruchtfolge. Unterstellt man daher, dass es sich einerseits bei der Fruchtfolge WW-ZR-WW (9064,775 ha), die zu Fruchtfolge 1 gezählt wurde und andererseits bei ZR-WW-ZR (4840,515 ha), die in Fruchtfolge 3 (vgl. Tabelle 6.19) enthalten ist, jeweils um Ausschnitte des wiederholten ZR-WW-Fruchtwechsels handelte, entsprächen diese

zusammengefasst einer Ackerfläche von 13.905,2925 ha und würden dann 15,07 % der Ackerfläche einnehmen. Die Möglichkeit des Auftretens einfacher (und wiederholter) Fruchtwechsel (Blattfrucht - Halmfrucht) wurde zwar bei der Betrachtung der Ergebnisse dieser Arbeit bereits vermutet. Aufgrund der dreijährigen Datengrundlage, wäre die Ausweisung solcher Abfolgen jedoch trotz einer gewissen Wahrscheinlichkeit spekulativ. Dies wurde daher in der Analyse zunächst nicht berücksichtigt. Für die Nutzung der Fruchtfolgenkarte für die betrachteten Jahre, etwa zur Parametrisierung von Agrarökosystemmodellen (zum Beispiel zur Berücksichtigung der Vorfruchtwirkung), hat diese Tatsache keine Auswirkung, da die abgebildete Fruchtfolge davon unberührt ist. Bei der Fortschreibung von Fruchtfolgen zur Simulation zukünftiger Landnutzungsmuster führt dies dann allerdings zu Abweichungen, wenn ein unterschiedlicher Aufbau der Fruchtfolgen zugrunde gelegt wird. Neben den beschriebenen Fehlerursachen wie der Klassifikationsgenauigkeit der verglichenen Datensätze, könnte dies ein Grund dafür sein, dass nur eine Übereinstimmung von der Landnutzungsprognose 2011 und dem Ergebnis der MDA-Landnutzungsclassifikation 2011 von 41,44 % erzielt werden konnte. Einige Stichproben deuten darauf hin. Bei der Betrachtung der Fruchtfolge der Jahre 2008-2011 für einzelne Schläge, für die eine falsche Feldfrucht prognostiziert wurde, konnte dies in vielen Fällen beobachtet werden. Allerdings waren darunter auch Schläge, bei denen sich eine Feldfrucht auch nach vier Jahren noch nicht wiederholt hatte. In diesen Fällen könnte es sich demnach auch um eine vierjährige Fruchtfolge (beispielsweise ein Doppelfruchtwechsel) oder um eine fünfjährige Fruchtfolge handeln. Die Berücksichtigung weiterer Jahre wäre demzufolge sinnvoll.

## **7.4 MDA-Methodik zur Integration von Fernerkundungs- und weiteren Geodaten**

Zunächst erfolgt eine kurze Bewertung grundsätzlicher methodischer und technischer Aspekte der Umsetzung des MDA in dieser Arbeit. Anschließend werden die Art und Weise der Integration von neu erzeugten fernerkundungsbasierten Landnutzungsinformationen und bereits bestehenden Landnutzungsdaten sowie die Hintergründe für die Auswahl und Repräsentation bestimmter Landnutzungsklassen diskutiert.

### **7.4.1 Allgemeine MDA-Umsetzung**

Die fundamentalen Gesichtspunkte bei der Umsetzung des MDA in dieser Arbeit waren

- (a) die Wahl des Datenmodells, genauer gesagt des Datenformats,
- (b) die technische Umsetzung der Overlay-Analysen zur räumlichen und thematischen Datenverschneidung durch die Formulierung und Anwendung von Produktionsregeln.

(a) Die Verwendung des Rasterdatenmodells zeichnete sich durch die erwartete unkomplizierte räumliche Datenverschneidung und Overlay-Analyse aus, nachdem die geometrische Lageübereinstimmung hergestellt wurde. Bei der Ausschließung oder Entfernung unerwünschter isolierter Randpixel (oder kleiner Pixelgruppen) in den Klassifikations- beziehungsweise Verschneidungsergebnissen kamen jedoch Einschränkungen des Rastermodells hinsichtlich der Berücksichtigung von Nachbarschaftsbeziehungen zum Tragen. Zur Nachbearbeitung von Klassifikationsergebnissen der einzelnen Zwischenschritte könnte daher ein vorübergehender Wechsel ins Vektordatenmodell eine Alternative darstellen (vgl. Kapitel 7.1.2). Die Verschneidung unterschiedlicher Flächenabdeckungen von Feldfruchtclassen aus den unterschiedlichen Zeitschnitten ist im Vektordatenmodell hingegen sehr aufwendig und wäre in dieser Form nicht durchführbar gewesen. Durch die Wahl des ESRI-Grid-Formats waren zudem alle verschnittenen Informationen zu einer Zelle in einer Attributtabelle verfügbar. Dadurch musste auch nicht auf Funktionalitäten zur thematischen Datenanalyse mittels SQL-Abfragen verzichtet werden, so dass die Umsetzung von wissensbasierten MDA-Produktionsregeln in äquivalenter Weise zum Vektordatenmodell möglich war. Als limitierender Faktor des ESRI-Grid-Formats erwies sich im Einzelnen allerdings die Beschränkung auf maximal 20 Layer bei der Datenzusammenfügung (*combine*). Diese Anzahl war mit den einbezogenen Datenquellen schnell erreicht, sodass mehrere Generationen des MDA-Grids für bestimmte Analyseschritte kompiliert werden mussten. Im Gegensatz zum Vektordatenmodell waren dem Grid diesbezüglich Grenzen gesetzt, was allerdings nicht die Verknüpfung von zusätzlichen Informationen über weitere Tabellen (*join*) betraf.

(b) Die Formulierung der MDA-Produktionsregeln zur Stratifizierung, Informationsverknüpfung und -ableitung erfolgte auf Basis der in Kapitel 5.7 beziehungsweise ab Kapitel 6.5 präsentierten Tabellen, die die Wissensbasis darstellten. Daraus ließen sich Gesetzmäßigkeiten entnehmen die regelten, je nachdem welche Klassen in den unterschiedlichen Datenschichten für eine Zelle auftraten, welche MDA-Klasse diese Zelle in der finalen MDA-Landnutzung erhielt. Die Produktionsregeln mussten dabei für jeden Vorgang neu formuliert werden, wobei oftmals aber auch die Anpassung einer bereits bestehenden Regel oder die Zusammenfügung von Regelgliedern möglich war. Die feste Formulierung von globalen, auf andere MDA-Datensätze übertragbare Produktionsregeln (beispielsweise von Jahr zu Jahr), war allerdings besonders bei der Feldfruchtabelleitung beziehungsweise Produktion der FE-Basis kaum möglich. Eine Ursache stellt die bereits mehrfach angesprochene stark fragmentierte und jährlich variierende Fernerkundungsdatenabdeckung dar. Produktionsregeln mussten daher jeweils auf einzelne Zeitschnitte und unterschiedliche Abdeckungsbereiche oder Betrachtungsregionen eingeschränkt werden. Weiterhin hatten die erzielten Klassifikationsergebnisse großen Einfluss auf die abzufragenden Klassen oder Sachverhalte. Die Ausführung von Regeln erfolgte daher zwar prinzipiell nach einem festen Schema, aber grundsätzlich individuell. Einerseits bietet die Verwendung von

Produktionsregeln sehr viele Möglichkeiten, die in den Datensätzen enthaltenen Informationen optimal auszuschöpfen. Andererseits führte eine leichte Steigerung der Heterogenität in der Datenzusammensetzung zu einer starken Zunahme der Komplexität der Analysen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dadurch Abfragen für zunehmend viele Teilbereiche separat – und somit in der Summe wiederholt – ausgeführt werden mussten. Vom Bestreben eine Automatisierung der Regelanwendung zu entwickeln musste daher in Rahmen dieser Arbeit Abstand genommen werden. Die Prüfung einer Teilautomatisierung wäre hinsichtlich einer Weiterentwicklung der Methodik zumindest für die Integration der ATKIS-Informationen in die jährliche FE-Basis ein möglicher Schritt. In diesem Fall könnte ein gewisser Automatisierungsgrad erreicht werden, da nach der abgeschlossenen Verschneidung der Fernerkundungsergebnisse die dafür besonders hinderlichen Sachverhalte (vor allem hinsichtlich der Feldfruchtklassifikation) gewöhnlich ausgeräumt sind.

#### 7.4.2 Verwendung der Geobasisdaten und Fachdaten

Das AAA-ATKIS-Basis-DLM bildete gemeinsam mit den Feldblöcken (für Ackerland und Grünland) die Grundlage zur Datenintegration in dieser Arbeit. Hinsichtlich der Verwendung dieser Daten werden im Folgenden verschiedene vornehmlich

- (a) geometrische Aspekte,
- (b) thematische Aspekte,
- (c) oder temporale Aspekte

sowie weitere Gesichtspunkte genauer beleuchtet. Teilweise bedingten sich gewisse Sachverhalte auch gegenseitig. Die Integration von räumlichen Informationen aus diesen Datensätzen erfolgte außerdem oftmals unter

- (d) Berücksichtigung der Fernerkundungsergebnisse
- (e) anderen Voraussetzungen (oftmals im Zusammenhang mit dem ATKIS).

Außerhalb Deutschlands sollte der Mangel an diesen äquivalenten Daten bestmöglich kompensiert werden durch

- (f) CLC- und OSM-Daten.

(a), (b) Zur Erzielung der essentiellen geometrischen Genauigkeit und Lageübereinstimmung unterschiedlicher Datenquellen diente das ATKIS beziehungsweise dessen linienhaftes Wegenetz als Grundlage. Außerhalb Deutschlands wurde dazu ersatzweise das OSM-Wegenetz eingesetzt, welches sich dazu als ausreichend genau herausstellte. Darauf fußend wurde, infolge der Festlegung auf das Rasterdatenmodell, ein geometrisches Referenzgitter

(MDA-RG) erstellt, an das alle Datensätze angepasst wurden. Dies führte dazu, dass großflächig geometrisch präzise Datenverschnidungen möglich waren. Mit der Verwendung der ATKIS-Objektartengruppen und den damit geometrisch konformen Feldblöcken war, abgesehen von den Gebieten außerhalb Deutschlands, auch die Geometrie der Abgrenzung der grundsätzlichen Landnutzungstypen (Ackerland, Grünland, Wald, Siedlung, etc.) in den Grundzügen vorgegeben.

Diese Abgrenzungen bildeten, abgesehen von Variationen innerhalb der Landnutzungs-kategorien oder deutlicher Flächennutzungsänderungen, in jedem MDA-Grid daher eine Art persistentes geometrisches Grundgerüst, wodurch die Integration von thematischen Informationen gestützt wurde. Im Vergleich zur rein fernerkundungsbasierten Landnutzungs-analysen, die automatisierte Klassifikationsverfahren einsetzen, war hierdurch in vielen Fällen eine klarere Abgrenzung unterschiedlicher Erdoberflächenobjekte oder Flächennutzungen möglich. Damit war beziehungsweise ist die geometrische Konformität einerseits zwischen unterschiedlichen MDA-Ergebnissen, andererseits durch den Ursprung des ATKIS in der Landesvermessung auch mit externen (öffentlichen) räumlichen Daten (wie beispielsweise Fachinformationssystemen) in diesem Maßstabsbereich gewährleistet. Ebenfalls aus Konformitätsgründen wurde sich dazu entschieden, ATKIS-Informationen nach dem neuen AAA-Schema, welches im Laufe der Bearbeitung dieser Studie verfügbar wurde, zu verwenden. Somit ist sichergestellt, dass die Integration von ATKIS-Informationen auch zukünftig grundsätzlich in entsprechender Weise erfolgen kann, auch nachdem der ATKIS-Datenbestand aktualisiert wurde.

(c) Im Rahmen dieser Arbeit wurden bei der Integration unterschiedlicher Datenquellen, zur Einschränkung der Komplexität, unterschiedliche Zeiträume für die einzelnen Landnutzungs-kategorien unterstellt, innerhalb denen Nutzungsänderungen auftreten oder sich vollziehen. Im Gegensatz zu Ackerland (und mit Abstrichen auch Grünland) mit jährlich enormen Nutzungsänderungen, wurde vor allem für urbane Landnutzungen eine deutlich langsamere Veränderung angenommen. Die Flächennutzung wurde zwar (abgesehen von 2009) auf jährlicher Basis durch die Analyse der Fernerkundungsdaten grundsätzlich neu erfasst. Anschließend wurden diese Informationen mit den zum Bezugszeitpunkt aktuellen, aber im Bearbeitungszeitraum statischen ATKIS-Daten verschnitten. Im Gegensatz zu Ackerland und Grünland mit jährlicher Aktualisierung wurden die übrigen Abgrenzungen, die das ATKIS für grundsätzliche Landnutzungskategorien vorgab, stets als hinreichend korrekt betrachtet, obwohl auch bei diesen Landnutzungsklassen Veränderungen innerhalb des Betrachtungs-zeitraums (2008-2010) zu erwarten waren beziehungsweise vorkamen. Dies ist allerdings auch damit verbunden, dass der Zyklus umfassender Aktualisierungen des ATKIS zurzeit drei Jahre beträgt. Höhere Aktualisierungsraten erfolgen nur für einzelne Objektarten wie Straßen (BRK.NRW 2012a). Eine jährliche oder gar halbjährliche Aktualisierung und Aufbereitung des ATKIS für den MDA wurde im Verhältnis zu den zu erwartenden Änderungen als zu

aufwändig erachtet. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Aktualisierungen des ATKIS nicht berücksichtigt. Einzelne eventuell darauf zurückzuführende Fehler im ATKIS wurden somit in Kauf genommen. Die Erfassung von Landnutzungsänderungen entsprechender Klassen, wie die Errichtung neuer (größerer) Gebäude oder der Bau neuer Straßen (hinsichtlich des Versiegelungsgrads), erfolgte daher hauptsächlich durch die Fernerkundungsanalysen. Eine darauf aufbauende Aktualisierung der ATKIS-Daten inklusive der Übertragung ins Vektordatenformat, wie beispielsweise von BUTENUTH et al. (2007) vorgeschlagen oder wie bei ARNOLD (2009) für das DLM-DE (BKG 2011b) geschildert, fand allerdings nicht statt. Die Bestimmung und Quantifizierung vor allem urbaner Landnutzungsänderungen hätte die Anwendung umfassender *Change Detection*-Methoden erfordert und konnte daher ebenfalls nicht zum Gegenstand dieser Arbeit gemacht werden. Falls jedoch beispielsweise eine Umwandlung von landwirtschaftlicher Nutzfläche zu Siedlungsfläche oder umgekehrt erfolgte, wurde dies in der Regel durch die jährlichen Aktualisierungen der Feldblockdaten erfasst. Entsprechende Flächen wurden dann entweder nicht mehr oder neu von einem Feldblock eingenommen.

(d, e) Aus den zahllosen räumlichen Informationen, die im ATKIS enthalten sind, wurden gezielt die ausgewählt, die hinsichtlich des primären Verwendungszwecks am sinnvollsten erschienen und mit denen sich Stoffflüsse oder bestimmte Eigenschaften des Flächenmanagements verknüpfen lassen.

Die Integration der ATKIS-Informationen erfolgte in vielen Fällen in Abhängigkeit von den Fernerkundungsergebnissen, um die detaillierte oder stärker disaggregierte Unterscheidung der Fernerkundungsdatengrundlage im Besonderen von urbanen Gebieten beizubehalten, (vgl. exemplarisch Abbildung 6.16). Dabei wurde grundsätzlich unterschieden, ob es sich um Vegetationsklassen oder um Klassen handelte, die vegetationslosen oder versiegelten Flächen entsprachen. Allerdings muss bei der verwendeten räumlichen Auflösung, vor allem in urbanen Bereichen durch die kleinräumig sehr heterogene Landbedeckungsstruktur, stets ein hoher Anteil an Mischpixeln veranschlagt werden. Folglich sollten die entsprechenden Klassen im Zweifel (wie auch bereits im Ergebniskapitel geschehen) einerseits eher als weitestgehend versiegelt (zum Beispiel *versiegelte Wohnbaufläche*) beziehungsweise andererseits als eher vegetationsdominiert eingeordnet werden. Eine genaue Abschätzung oder Berechnung des Versiegelungsgrads wie beispielsweise von MONTZKA (2007) wurde allerdings nicht durchgeführt. Eine Validierung der Ergebnisse hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Einordnung als weitestgehend versiegelte oder vegetationsdominierte Fläche erfolgte für die finalen MDA-Landnutzungsklassifikationen nur auf visueller Basis, anhand des Vergleichs mit den Luftbild- oder Satellitendaten. Die Genauigkeit, beispielsweise für die Klasse *versiegelte Fläche*, war allerdings zuvor für die jeweilige Ursprungsklassifikation berechnet worden. Die somit mitunter subjektive Bewertung ist vornehmlich auf einen Mangel an geeigneten Vergleichsdaten zurückzuführen, da das ATKIS selbst eine verwendete Datenquelle darstellt,

Bedeckungstypen aber folglich nicht unterscheidet und die CLC-Daten darüber hinaus maßstabsbedingt als zu grob eingeschätzt wurden. Auch das DLM-DE, welches aber nicht zur Verfügung stand, beruht auf dem ATKIS.

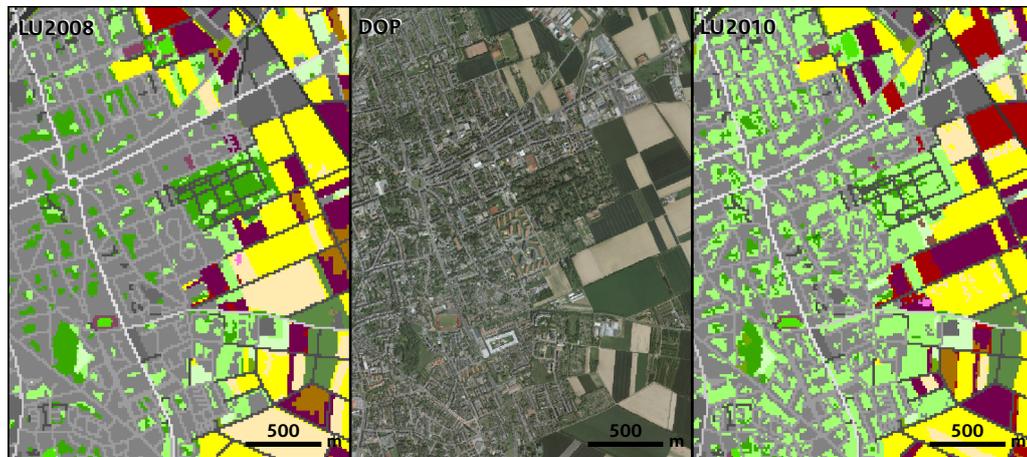


Abbildung 7.5: Vergleich der MDA-Landnutzungsclassifikationen 2008 und 2010 hinsichtlich der Unterscheidung von versiegelten und vegetationsdominierten Siedlungsbereichen für ein Ausschnitt im Osten Dürens.

Der stichprobenartige visuelle Vergleich mit aktuellen Luftbildern offenbarte jedoch sichtbare Unterschiede zwischen den Jahren 2008 und 2010. Insgesamt wurde das Ergebnis der MDA-Landnutzungsclassifikation für 2010 als treffender eingeschätzt (vgl. Abbildung 7.5). Dies wurde einerseits auf das unterschiedliche radiometrische Auflösungsvermögen der Fernerkundungsdatengrundlage zurückgeführt (ASTER in 2008, RapidEye in 2010). Andererseits erfolgte die RapidEye-Aufnahme zu einem etwas späteren Zeitpunkt im Jahr, sodass Vegetation im Allgemeinen weiter entwickelt war. Insgesamt wurde der Eindruck bestätigt, dass eine klarere Trennung von versiegelten und nicht-versiegelten Flächen in dieser räumlichen Auflösung kaum möglich erscheint.

Abgesehen von dieser Einschränkung, war durch die Kombination von ATKIS und Fernerkundungsergebnissen allerdings eine deutliche Informationssteigerung hinsichtlich urban geprägter Gebiete möglich. Die Erfassung von Vegetationsbedeckung mit urbanem Charakter erfolgte unter anderem mit der Objektart *Ortslage*. Während als *versiegelte Fläche* klassifizierte Pixel ausgewählte Nutzungsinformation des ATKIS zugewiesen bekamen, wurden jegliche Vegetationspixel (abgesehen von Wald, *Gebölz* und außerhalb der Feldblöcke) als *siedlungsbezogene Grünfläche* ausgewiesen. Sofern die Informationen für die MDA-Klasse *Gebölz* aus dem ATKIS stammte, überschrieb sie bei der Übertragung alle anderen Informationen. Durch die Verknüpfung mit weiteren ATKIS-Objektarten konnten Grünflächen beispielsweise zusätzlich als Rasenplätze (zum Beispiel Fußballfelder) oder Golfplätze ausgewiesen werden (vgl. Abbildung 7.5). Bis auf wenige Bereiche, die aufgrund unterschiedlicher Datenabdeckungen nicht erfasst werden konnten (s.u.), ließ sich in Kombination mit den Feldblöcken somit eine grundsätzliche Trennung von landwirtschaftlich

genutztem (und dementsprechend gemanagtem) Grünland und anderen Grünflächen für deutsche Gebiete vollziehen. Für Flächen außerhalb von Siedlungsbereichen erfolgte eine weitere Kategorisierung beziehungsweise Korrektur von Vegetationsflächen anhand von ATKIS-Objektarten wie *Wald*, *Moor* oder *Heide* (vgl. Kapitel 6.5.2). Die Klasse *siedlungsbezogene Grünfläche* nimmt beispielsweise in der MDA-Landnutzungsclassifikation 2010 rund 5 % der Gesamtfläche ein. Obwohl die MDA-Klassen wie *siedlungsbezogene Grünfläche* oder *Gebölz* selbst Sammelklassen für unterschiedliche Vegetationsbereiche darstellen, wäre ohne ihre Bildung (und der Nutzung der Feldblöcke zur Abgrenzung) vermutlich der Großteil der entsprechenden Flächen entweder mit landwirtschaftlich genutztem Grünland in einer einzigen Klasse („Grünflächen“), oder zum Teil anderen Klassen (am ehesten Getreideklassen) zusammengefasst worden. Durch diese Maßnahmen erfolgte für viele Flächen eine Korrektur von Fehlklassifikationen, vor allem von Feldfrüchten inmitten von Ortschaften oder Waldgebieten. Abgesehen von der Optimierung der Flächenverhältnisse der einzelnen Landnutzungen, wurde dadurch auch der visuelle Eindruck der Endergebnisse hinsichtlich ihrer Funktion als Karte erheblich verbessert.

Neben einer verbesserten Vegetationsunterscheidung, wurde mit der Integration von ATKIS-Informationen auch die Lokalisierung beziehungsweise Flächenbestimmung anderer anthropogener (siedlungsbezogener) Emissionsquellen verbunden. Exemplarisch können dazu beispielsweise integrierte Informationen der Objektarten *Halde* oder *Kraftwerk* dienen. So sind die wesentlichen Kraftwerke im Untersuchungsgebiet Kohlekraftwerke, von denen nennenswerte Emissionswerte ausgehen, die somit lokalisiert und berücksichtigt werden können. Ebenso handelt es sich bei den Flächen die aus der ATKIS Objektart *Halde* entnommen wurden im Untersuchungsgebiet oftmals um Abraumhalden des Braunkohlentagebaus oder des Steinkohlebergbaus. Beispielsweise bei Alsdorf kommt es darin des Öfteren noch zu Schwelbränden (STADT-ALSDORF 2014). Bei den oben behandelten Beispielen handelt es sich in einigen Fällen zwar um vergleichsweise kleine Flächenbereiche. In der Summe können diese Informationen bei Verwendung jedoch positive Einflüsse auf Modellierungsergebnisse haben.

Von zentraler Bedeutung für diese Arbeit war auch die Integration von Wegenetz-Informationen. Damit wurden mehrere Aspekte verbunden. Die beschriebene Nutzung entsprechender Linieninformationen zur geometrischen Anpassung (Rektifizierung/Georeferenzierung) von Rasterdaten kann als gängige Verfahrensweise bezeichnet werden. Die Überführung linienhafter Vektordaten ins Rastermodell und die anschließende vollständige Integration in rasterbasierte Landnutzungsdatensätze ist jedoch eher selten. Üblicherweise ist dies auf eine zu grobe Zellengröße zurückzuführen, die dann zu einer deutlichen Überrepräsentierung des Flächenausmaßes des Wegenetzes gegenüber anderen Landnutzungsklassen führt. Für die räumliche Auflösung dieser Arbeit von 15 m wurde die Integration des Wegenetzes nach Abwägung von Vor- und Nachteilen und nach Betrachtung



von Vergleichsdaten als zulässig erachtet (vgl. Kapitel 4.2.3). So sind selbst in multispektralen Landsat-Daten (30 m Pixelgröße) sogar gewöhnliche zweispurige Wege aufgrund des starken Kontrasts asphaltierter oder auch unbefestigter Straßenoberflächen zumindest in Form von Mischpixeln oftmals deutlich erkennbar. Bei einer Klassifikation würden diese Pixel dann gegebenenfalls auch eine lokale Flächenüberschätzung ergeben. Oftmals führen entsprechende Mischpixel jedoch zu Fehlklassifikationen die keinem der tatsächlich vorhandenen Oberflächentypen entsprechen. In Bezug auf Ackerland wurden Fehlklassifikationen an Feldgrenzen durch die Kombination des gewählten Klassifikationsverfahrens, der Stratifizierung der Ackerflächen anhand der Feldblöcke und durch das Overlay des gerasterten ATKIS-Wegenetzes deutlich reduziert. Außerdem wurde angenommen, dass die Fläche des Wegenetzes in gängigen Landnutzungsdatensätzen in der Regel eher unterrepräsentiert ist. So liegt das Flächenausmaß von Objekten des Wegenetzes meistens unterhalb einer festgelegten *minimum mapping unit* und wird daher nur bei einem Flächenausmaß oberhalb der MMU erfasst. Das Flächenausmaß von Wirtschaftswegen zwischen Ackerflächen wird daher wie beim ATKIS meistens zur Ackerfläche dazu gezählt. Durch die Integration des Wegenetzes geschah dies nicht. Ein weiterer Vorteil der Integration des ATKIS-Wegenetzes lag in der Kategorisierung der Verkehrswege durch das Attribut *Widmung*. Zwar lässt sich daraus nur grob auf die Nutzungsintensität einer Straße schließen, es können allerdings bestimmte Daten (beispielsweise CO<sub>2</sub>-Emissionen) daran geknüpft werden, um eine genauere Einordnung oder Eingrenzung von Emissionsherden vorzunehmen. Des Weiteren könnte mit der Kategorisierung der Wege auch ein ungefährender Versiegelungsgrad verknüpft werden, falls dies notwendig erscheint. Entsprechendes wäre beispielsweise für MDA-Klasse *Wirtschaftsweg* denkbar. So könnte beispielsweise berücksichtigt werden, dass darin auch ein gewisser Flächenanteil von begrünten Wegerändern enthalten ist. Hinsichtlich der Wahl des Attributs *Widmung* ist zu erwähnen, dass eine Kategorisierung von Verkehrswegen theoretisch auch über Attribute wie *Breites des Verkehrsweges*, *Verkehrsbedeutung Ueberoertlich* oder *Verkehrsbedeutung Inneroertlich* hätte erfolgen können. Die entsprechenden Attributspalten waren jedoch nur lückenhaft mit Werten besetzt, sodass davon Abstand genommen werden musste. Falls diese Attribute jedoch zukünftig flächendeckender vorliegen sollten, wäre eine genauere Einordnung anzustreben.

Neben den zahlreichen Möglichkeiten, offenbarte die Umsetzung der entwickelten Vorgehensweise zur Datenintegration allerdings auch Grenzen. So gab es beispielsweise im ATKIS auch Flächen, für die keine Nutzung ausgewiesen war (*FlaecheZurZeitUnbestimmbar*). Diese Flächen mussten dann meistens in ihrer Form nach Abschluss der Fernerkundungsdatenverschneidung verbleiben. Weiterhin traten vereinzelt Unregelmäßigkeiten durch den bereits angesprochenen statischen Charakter der Geobasisdaten auf. Hinsichtlich der gemeinsamen Verwendung von ATKIS und Feldblöcken zur Abgrenzung übergeordneter Landnutzungskategorien (Objektartengruppen) zeichneten sich diese Datensätze in der Regel durch eine sehr gute geometrische Konformität aus. Allerdings werden im ATKIS (und in den

Fernerkundungsklassifikationen) beispielsweise viele kleine Flächen als Grünland markiert, die zumindest laut den Feldblöcken keine landwirtschaftliche Nutzung aufweisen und sich außerhalb der *Ortslage* oder anderen übergeordneten Landnutzungskategorien befinden. Für diese Flächen wurde bisher keine zufriedenstellende Kategorisierung gefunden. Sie könnten lediglich als eine weitere Vegetationsklasse ausgewiesen werden. Da es sich dabei jedoch um einen vergleichsweise geringen Flächenanteil handelte wurden diese Bereiche als Grünland belassen.

(f) Hinsichtlich der Integration von CLC-Informationen können die in Kapitel 7.1.2 (h) gezogenen Schlüsse weitestgehend auf die übrigen Landnutzungskategorien übertragen werden. Teilweise wurde zwar eine moderate Reduktion von Fehlklassifikationen für Siedlungen und etwas besser für Wald, Moore oder Heiden herbeiführt. In der Regel war die räumliche Auflösung (beziehungsweise der Maßstab) aber deutlich zu grob. Zudem sind die CLC-Daten zwar von der Nomenklatur, der Datengrundlage und der Produktionsmethode über Landesgrenzen hinweg einheitlich. Bei genauerer Betrachtung fallen jedoch zwischen den Ländern deutliche Diskrepanzen bei der Trennung einzelner CLC-Klassen auf. Diese können besonders bei Siedlungsflächen nicht ausschließlich auf eine ländertypische Siedlungsstruktur zurückgeführt werden, sondern sind eher von der Art der Umsetzung abhängig. Dadurch sind die CLC-Daten nicht so homogen wie sie zunächst erscheinen und somit schwieriger einzusetzen.

## 8 Fazit und Ausblick

Diese Studie hatte zum Ziel, aufbauend auf dem MDA, eine Methodik zur Erzeugung räumlicher Landnutzungsdaten zu entwickeln und umzusetzen. Die Analyse multitemporaler Fernerkundungsdaten ermöglichte dabei, die dominierenden Feldfrüchte und Fruchtfolgen für einzelne Schläge zu unterscheiden. Das Ziel war es, den Anforderungen hochentwickelter Agrarökosystemmodelle, die auf der regionalen Skala operieren, besser zu entsprechen. Außerdem sollten zusätzlich bereits bestehende Landnutzungsinformationen verschiedener Quellen in einem Landnutzungsdatensatz integriert werden, um mögliche disaggregierte Landnutzungsinformationen auch für andere Landnutzungskategorien jenseits der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu erhalten. Die einzelnen in der Einleitung formulierten Teilziele konnten in dieser Arbeit umgesetzt werden.

Durch die Analyse multitemporaler Fernerkundungsdaten und der isolierten Betrachtung von Ackerland und durch die Trennung von Grünland wurden die dominanten Feldfrüchte mit einer deutlich höheren Gewissheit unterschieden, als dies eine monotemporale und rein fernerkundungsdatenbasierte Analyse ermöglicht hätte. Dies wurde beim Vergleich der jährlichen Endergebnisse mit den Klassifikationen der einzelnen Zeitschnitte sehr deutlich. Allerdings zeigten die Ergebnisse der MDA-Landnutzungsclassifikationen für die außerdeutschen Teile des Untersuchungsgebiets auch, dass vor allem die Verfügbarkeit von LPIS-Daten für entsprechende Gebiete erneut zu prüfen ist, oder eine Alternative gefunden werden muss. Andernfalls ist dort auch weiterhin durch eine multitemporale Analyse nur eine bedingte Verbesserung der Klassifikationsergebnisse gegenüber einer monotemporalen Untersuchung zu erwarten. Ist der Zugriff auf entsprechende LPIS-Daten hingegen möglich, wird der Arbeitsaufwand für die Landnutzungsanalyse des Rureinzugsgebiets insgesamt erheblich reduziert. Dann könnten die Analysen mehr auf andere Aspekte der Ergebnisoptimierung, wie der weiteren Verringerung von Fehlclassifikationen, ausgerichtet werden oder gar mehr Zeitschnitte einbezogen werden.

Die zur Feldfruchtunterscheidung ausgearbeitete multitemporale Verfahrensweise auf Grundlage phänologischer Unterschiede und die darauf beruhende zeitschnittabhängige Integration von Klassifikationsergebnissen wurde für mehrere Jahre angewendet. Dadurch wurde die grundsätzliche Praxistauglichkeit dokumentiert, so dass weitere Landnutzungsanalysen anhand dieser Verfahrensweise durchführbar sind und ähnliche oder bessere Ergebnisse erzielt werden können. Die MDA-Landnutzungsclassifikation von LUSSEM & WALDHOFF (2013) untermauert dies.

Bei der Klassifikation der Fernerkundungsdaten wurde sehr viel Wert auf die einbezogenen Trainingsdaten einerseits und die Validierung anhand von Testgebieten andererseits gelegt.

Dazu war eine umfassende Referenzdatengrundlage durch zahlreiche Geländekartierungen erstellt worden. Dies wird als einer der entscheidenden Faktoren angesehen, dass für die Klassifikation der meisten Feldfrüchte oftmals eine hohe Genauigkeit berechnet werden konnte. Trotz der insgesamt guten Ergebnisse hinsichtlich der Unterscheidung der dominierenden Feldfrüchte, muss die Trennbarkeit von den einzelnen Getreidearten oder beispielsweise von Zuckerrüben und Kartoffeln weiterhin als problematisch betrachtet werden. Dies wird besonders auf die eingeschränkte Verfügbarkeit der Fernerkundungsdatengrundlage zurückgeführt (s.u.). Hinsichtlich der Methodenentwicklung ist allerdings das Potential an einzusetzenden Techniken längst nicht ausgeschöpft, so dass, wie im Diskussionskapitel an einigen Stellen vorgeschlagen, einzelne Zwischenschritte optimiert, hinzugefügt oder Algorithmen ausgetauscht werden können.

Der Arbeitsaufwand der Fernerkundungsanalysen (inklusive Feldfruchtableitung im GIS) war insgesamt gesehen allerdings sehr hoch. Zwar war die Studie auf die Verwendung einer multitemporalen und mehrjährigen Fernerkundungsdatengrundlage ausgerichtet. Durch die in dieser Form nicht erwartete, sowohl temporal als auch räumlich, fragmentierte Datenabdeckung war die Erzielung einer hinreichenden Datenbasis mit großem zusätzlichen Aufwand und für einige Gebiete mit redundanten Analysen verbunden. Dies kann jedoch nicht als ein Schwachpunkt des MDA selbst bewertet werden, da geeignete Sensorensysteme grundsätzlich in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Eher unterstützt die ausgewählte Verfahrensweise die Verschneidung (nach der zunächst separaten Analyse) und Integration von Daten unterschiedlicher Sensoren oder unterschiedlicher räumlicher Abdeckung, da nur die (Zwischen-)Ergebnisse und nicht die Ausgangsdaten verschnitten werden.

Die unzureichende Verfügbarkeit optischer Fernerkundungsdaten ist daher weiterhin als ein wesentlicher limitierender Faktor für effiziente Landnutzungsanalysen zu sehen. Hinsichtlich der Fortführung multitemporaler fernerkundungsbasierter Landnutzungsanalysen auf regionaler Basis, ist auch in Zukunft damit zu rechnen, dass für eine ausreichende räumliche und zeitliche Abdeckung auf mehrere Sensoren zurückgegriffen werden muss. Datenkosten spielen dabei gerade im Rahmen der Wissenschaft eine bedeutende Rolle. Es werden daher viele Hoffnungen an Projekte wie das RapidEye Science Archive (RESA), an die aktuelle Landsat-8-Mission (Landsat Data Continuity Mission, LDCM) oder an die verschiedenen Sentinel-Missionen der ESA (BERGER et al. 2012) geknüpft, wodurch Daten kostenfrei verfügbar gemacht werden. In dieser Hinsicht sollte auch die Verwendung von Radar-Daten (beispielsweise Sentinel-1 (TORRES et al. 2012)) geprüft und gegebenenfalls integriert werden, um unabhängiger von Witterungsbedingungen zu werden und um die Unterscheidung spektral sehr ähnlicher Feldfrüchte wie Zuckerrüben und Kartoffeln zu unterstützen (DE WIT & CLEVERS 2004, WASKE & BENEDIKTSSON 2007). Sollte die veranschlagte Anzahl an Fernerkundungsabdeckungen in Zukunft zumindest annähernd erreicht werden, sollte dies zur besseren Unterscheidung der oben genannten Feldfrüchte führen.

Der Bedarf an den im Rahmen dieser Arbeit erzeugten Landnutzungsdaten lässt sich beispielsweise an Arbeiten wie von KORRES et al. (2013) ablesen. Sie nutzen die im Rahmen dieser Arbeit erzeugten Feldfruchtklassifikationsergebnisse für Winterweizen, Zuckerrüben und Mais für 2009 als räumliche Grundlage zur regionalen Modellierung der Bodenfeuchte für die ackerbaulich intensiv genutzte Nordhälfte des Rureinzugsgebiets. Dabei kam das dynamisch gekoppelte prozessorientierte hydroökologische Modell des DANUBIA Simulationsmodells zum Einsatz (KORRES et al. 2013). In diesem Zuge erfolgte auf Grundlage der Landnutzungsdaten darüber hinaus die räumliche Modellierung des Jahresverlaufs des *leaf area index* (LAI) für die Feldfrüchte Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrüben und Mais für die oben genannte Region (REICHENAU & KORRES 2013).

Aufgrund der erzielten Ergebnisse bei der jährlichen Feldfruchtklassifikation und der darauf aufbauenden mehrjährigen Fruchtfolgenableitung wird die Schlussfolgerung gezogen, dass auch die Erfassung raumzeitlicher Landnutzungsmuster für Ackerland anhand der präsentierten Vorgehensweise im Rahmen des MDA umzusetzen ist. Die resultierenden Landnutzungsmuster stehen flächendeckend zur Verfügung, so dass nicht auf idealtypischen Fruchtfolgen zur Modellierung von mehrjährigen Flächennutzungsmustern zurückgegriffen werden muss. Dies wird unabhängig davon, inwieweit Fruchtfolgen bei der Analyse zu Fruchtfolgen zusammengefasst werden, als wertvolle Information für Modellierungsaktivitäten im Rahmen des TR32 eingeschätzt. Allerdings muss auch bei der präsentierten Fruchtfolgenkarte ihr Ursprung und damit die einbezogenen Feldfrüchte und die Klassifikationsfehler berücksichtigt werden. Es ist auch hiermit nur eine weitere Annäherung an die Realität möglich. Dennoch lässt sich die Relevanz dieser Studie besonders am Spektrum der erfassten Fruchtfolgen festmachen. Dies ist einerseits von einer großen Diversität an praktizierten Fruchtfolgen gekennzeichnet. Auch wenn lediglich drei Jahre betrachtet wurden, ist daneben andererseits eine Tendenz zu engen Fruchtfolgen mit nur zwei Feldfrüchten herauszustellen (beispielsweise Winterweizen oftmals  $\geq 66\%$ ). Vor allem aber ist die Notwendigkeit einer fernerkundungsbasierten Fruchtfolgenableitung mit dem hohen Grad an Fruchtfolgen zu begründen, die, wie beispielsweise die Selbstfolge von Winterweizen, nicht dem Leitbild eines integrierten Pflanzenbaus entsprechen. Diese wurden auch bei den Geländekartierungen oft erfasst. Dies untermauert die in der Einleitung formulierte Hypothese, dass sich in die Fläche übertragene idealtypische Fruchtfolgen eher schlecht als Ersatz für reale Landnutzungssituation zur Agrarökosystemmodellierung eignen, da dabei Fruchtfolgen, die nicht der Lehrmeinung entsprechen, in der Regel nicht oder nur äußerst selten berücksichtigt werden (vgl. beispielsweise CASTELLAZZI et al. (2008) oder SCHÖNHART et al. (2011)).

Die erzielte Prognosegenauigkeit zukünftiger Landnutzungen anhand einer auf drei Jahren beruhenden Fruchtfolgenkarte ist jedoch noch nicht zufriedenstellend. Allerdings gibt die Betrachtung und Analyse der produzierten Ergebnisse Anlass zur Erwartung, dass durch eine

Ausweitung des Betrachtungszeitraums eine substantielle Verbesserung der Prognosegenauigkeit möglich ist. Die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit können daher als Ausgangspunkt dienen, um die Prognosemethodik raumzeitlicher Muster für Ackerland weiterzuentwickeln. In Kürze werden MDA-Landnutzungsklassifikationen des Untersuchungsgebiets für sechs aufeinanderfolgende Jahre zur Verfügung stehen. Damit sollte das Spektrum der praktizierten Fruchtfolgen weitestgehend erfasst sein. Eine erneute Validierung anhand von Fernerkundungsklassifikationsergebnissen könnte dann neue Erkenntnisse liefern. Aufbauend auf einer Datengrundlage die mehr Jahre enthält, könnte auch die Berücksichtigung unterschiedlicher Landnutzungsszenarios ein weiterer Schritt sein (vgl. KLÖCKING et al. (2003)). Dabei könnte man von der Hypothese ausgehen, dass einzelne Feldfrüchte zwar relativ einfach innerhalb einer Fruchtfolge (oder genauer innerhalb eines Fruchtfolgeglieds) austauschbar sind (zum Beispiel Blattfrucht gegen Blattfrucht). Grundlegende Änderungen der Fruchtfolgengestaltung und -länge würden allerdings nicht vorgenommen. Dazu müssten Fruchtfolgefelder mitunter neu arrangiert werden, was bei komplexen Fruchtfolgen mit einem deutlichen Mehraufwand für den Landwirt/die Landwirtin verbunden ist. Unter dieser Prämisse könnten die erfassten Fruchtfolgengrundrisse an sich zunächst beibehalten werden, während die Anteile bestimmter Feldfrüchte an einer Fruchtfolge variiert würden, wie dies in Fruchtfolgenmodellen bereits praktiziert wird (vgl. SCHÖNHART et al. (2011)).

Bezüglich der Integration von Geobasisdaten und Fachdaten wurde vor allem auf die Nutzung der Feldblöcke und die Auslotung der Möglichkeiten des ATKIS fokussiert. Das enorme Potential, das in der Verwendung unterschiedlicher Informationsquellen anhand des MDA liegt, lässt sich durch die Ergebnisse dieser Arbeit dokumentieren. Zahlreiche zusätzliche Landnutzungsunterscheidungen waren dadurch gegenüber einer reinen Fernerkundungsanalyse möglich. Zumindest einige davon sollten zu Modellierungszwecken dienlich sein (beispielsweise die Lokalisierung weiterer anthropogener Emissionsherde). Ebenso wurde durch die Unterscheidung von vornehmlich versiegelten oder vegetationsbedeckten Flächen auch gegenüber dem ATKIS eine bessere Landnutzungsdifferenzierung erzielt. Allerdings ist die Art der Integration oder Nutzung einzelner Informationen als *eine* von mehreren Möglichkeiten zu betrachten. Oftmals bestanden mehrere Alternativen, wovon sich in dieser Arbeit für die vielversprechendste entschieden wurde. Darüber hinaus enthält das ATKIS noch weitere Objektarten, die noch nicht berücksichtigt wurden, aber für gewisse Fragestellungen nützlich sein könnten. Diesbezüglich sind beispielsweise Informationen zu Hecken oder Baumreihen zu nennen, die bedingt durch die Zellengröße bisher nicht integriert wurden, für andere Fragestellungen und Auflösungsbereiche jedoch hilfreich sein können.

In Anbetracht der räumlichen Auflösung der RapidEye-Daten (beispielsweise) von 5 m und dem Maßstab des ATKIS von 1:25.000 und höher, erscheint die Umsetzung der vorgeschlagenen Methodik auch mit räumlich höher aufgelösten Fernerkundungsdaten

durchaus möglich. Darüber hinaus wären eine (zusätzliche) Stratifizierung anhand von ALK-Daten und/oder die Klassifikation mittels objektbasierter Verfahren zu erwägen, wodurch sich in diesem Auflösungsbereich Vorteile ergeben könnten.

Der MDA sieht, wie zuvor beschrieben, allerdings auch die Integration räumlicher Informationen zu Wasserschutzgebieten, Naturschutzgebieten oder Biotopen hinsichtlich landwirtschaftlich genutzter Flächen vor. Da der Fokus auf der Erzeugung der Landnutzungsinformationen selbst lag, wurde dieser Aspekt im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht behandelt. Nachdem jedoch nun schlagbezogene Feldfruchtinformationen vorliegen, wäre die Integration der genannten Informationen ein logischer nächster Schritt. Durch die Verschneidung mit entsprechenden Informationen würden Ackerflächen, einzelne Feldfrüchte oder Fruchtfolgen, je nachdem ob sie innerhalb einer Schutzzone (mit einer bestimmten Schutzstufe) auftreten, in Subklassen weiter unterschieden. Daran könnten dann Managementinformationen wie Düngergaben oder Pflanzenschutzmitteleinsatz geknüpft werden (ROHIERSE & BARETH 2004). Dies könnte durch die Verknüpfung mit Bodendaten (Bodentyp/Bodenart) zudem weiter differenziert werden (BARETH et al. 2001). Nachfolgende Studien könnten daher, aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, die Anreicherung entsprechender Informationen in Landnutzungsklassifikationen oder Fruchtfolgenkarten behandeln.





## Literaturverzeichnis

- ABRAMS, M., 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 21 (5), 847-859.
- ABRAMS, M., HOOK, S.J., 1995. Simulated ASTER data for geologic studies. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33 (3), 692-699.
- ADV - Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2008a. Bundeseinheitliche Transformation für ATKIS (BeTA2007). <http://www.adv-online.de/icc/extdeu/broker.jsp?uMen=9ae594bb-a094-311a-3b21-718a438ad1b2>, 18.12.2012.
- ADV - Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2008b. Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok) - Erläuterungen zum ATKIS® Basis-DLM (Version 6.0; Stand: 11.04.2008). [http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/organisation/abteilung07/produkte/landschaftsmodelle/atkis\\_basis\\_dlm/erlaeuterungen.pdf](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/produkte/landschaftsmodelle/atkis_basis_dlm/erlaeuterungen.pdf), 14.11.2012.
- ADV - Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2008c. Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok) - ATKIS-Katalogwerke - ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM - NRW-Erfassung, Version 6.0, Stand: 11.04.2008. [http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/organisation/abteilung07/produkte/landschaftsmodelle/atkis\\_basis\\_dlm/objektartenkatalog.pdf](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/produkte/landschaftsmodelle/atkis_basis_dlm/objektartenkatalog.pdf), 06.05.2013.
- ADV - Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2012. Bundeseinheitliche Transformation für ATKIS (BeTA2007) Version 1.5. <http://crs.bkg.bund.de/crseu/crs/desctrans/BeTA/BETA2007dokumentationV15.pdf>, 13.12.2012.
- ALBERTZ, J., 2009. Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- ALBERTZ, J., WIGGENHAGEN, M., 2008. Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung: Guide for Photogrammetry and Remote Sensing. Wichmann, Heidelberg.
- ANDERSON, J.R., HARDY, E.E., ROACH, J.T., WITMER, R.E., 1976. A Land Use And Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data - Geological Survey Professional Paper 964 - A revision of the land use classification system as presented in U.S. Geological Survey Circular 671. U.S. Geological Survey, Washington, <http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf>, 05.08.2013.
- ANTONARAKIS, A.S., RICHARDS, K.S., BRASINGTON, J., 2008. Object-based land cover classification using airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 112 (6), 2988-2998.
- ARNOLD, S., 2009. Integration of remote sensing data in national and European spatial data infrastructures - derivation of CORINE Land Cover data from the DLM-DE. *PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 2009 (2), 129-141.
- ASCHBACHER, J., MILAGRO-PEREZ, M.P., 2012. The European Earth monitoring (GMES) programme: Status and perspectives. *Remote Sensing of Environment* 120, 3-8.
- ASTERWEB - Jet Propulsion Laboratory, 2004. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>, 17.09.2013.
- ASTRIUM-GEO - Astrium GEO-Information Services, 2013. SPOT 1 bis SPOT 5 Satellitendaten. <http://www.astrium-geo.com/de/4425-spot-1-bis-spot-5-satellitendaten>, 02.11.2013.
- ATKINSON, P.M., TATNALL, A.R.L., 1997. Neural networks in remote sensing - Introduction. *International Journal of Remote Sensing* 18 (4), 699-709.
- AURBACHER, J., DABBERT, S., 2011. Generating crop sequences in land-use models using maximum entropy and Markov chains. *Agricultural Systems* 104 (6), 470-479.
- BAASER, U.V., 2010. Das CampusGIS der Universität zu Köln - webgestützte Geodatendienste für raumbezogene Anwendungen. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, Deutschland.
- BAATZ, M., SCHÄPE, A., 2000. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte geographische informationsverarbeitung* 12 (12), 12-23.
- BADHWAR, G.D., GARGANTINI, C.E., REDONDO, F.V., 1987. Landsat Classification of Argentina Summer Crops. *Remote Sensing of Environment* 21 (1), 111-117.
- BALTSAVIAS, E.P., 2004. Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: current status and steps towards operational systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58 (3-4), 129-151.

- BARETH, G., 1998. Generating a database to present the regional impacts of strategies to avoid greenhouse gases from agriculture and land use. Proceedings of the First International Conference on Geospatial Data in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, USA, 671-674.
- BARETH, G., 2000. Emissionen klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft - Regionale Darstellung und Abschätzung unter Nutzung von GIS am Beispiel des württembergischen Allgäus. Dissertation, Institut für Bodenkunde und Standortlehre, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland.
- BARETH, G., 2001. Integration einer IRS-1C-Landnutzungsklassifikation in das ATKIS zur Verbesserung der Information zur landwirtschaftlichen Nutzfläche am Beispiel des württembergischen Allgäus. GIS, Zeitschrift für raumbezogene Informationen und Entscheidungen 2001 (6), 40-45.
- BARETH, G., 2003. Möglichkeit und Grenzen der regionalen agrarumweltrelevanten Modellierung unter Nutzung von GIS in China am Beispiel der Nordchinesischen Tiefebene. Habilitationsschrift, Universität Hohenheim, Deutschland.
- BARETH, G., 2008. Multi-Data Approach (MDA) for Enhanced Land Use/Land Cover Mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008, Beijing, 1059-1066.
- BARETH, G., 2009. GIS- and RS-based spatial decision support: structure of a spatial environmental information system (SEIS). International Journal of Digital Earth 2 (2), 134-154.
- BARETH, G., HEINCKE, M., GLATZEL, S., 2001. Soil-land-use-system approach to estimate nitrous oxide emissions from agricultural soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems 60 (1-3), 219-234.
- BARTELME, N., 2005. Geoinformatik - Modelle Strukturen Funktionen. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- BARTHOLOMÉ, E., BELWARD, A.S., 2005. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. International Journal of Remote Sensing 26 (9), 1959-1977.
- BEHEYDT, D., BOECKX, P., SLEUTEL, S., LI, C., VAN CLEEMPUT, O., 2007. Validation of DNDC for 22 long-term N<sub>2</sub>O field emission measurements. Atmospheric Environment 41 (29), 6196-6211.
- BENDIG, J., BOLTEN, A., BARETH, G., 2013. UAV-based Imaging for Multi-Temporal, very high Resolution Crop Surface Models to monitor Crop Growth Variability. PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation 2013 (6), 551-562.
- BENEDIKTSSON, J.A., SWAIN, P.H., ERSOY, O.K., 1990. Neural Network Approaches Versus Statistical Methods in Classification Of Multisource Remote Sensing Data. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing 28 (4), 540-552.
- BENZ, U.C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I., HEYNEN, M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 58 (3-4), 239-258.
- BERGER, M., MORENO, J., JOHANNESSEN, J.A., LEVELT, P.F., HANSEN, R.F., 2012. ESA's sentinel missions in support of Earth system science. Remote Sensing of Environment 120 (0), 84-90.
- BERNHARDSEN, T., 2002. Geographic Information Systems: An Introduction. Wiley, New York.
- BILL, R., 2010. Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Wichmann, Berlin.
- BIZZELL, R., HALL, F., FEIVISION, A., BAUER, M.E., DAVIS, B., MALILA, W., RICE, D., 1975. Results from the Crop Identification Technology Assessment for Remote Sensing (CITARS) Project. Proceedings of the Tenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, October 6-10, Ann Arbor, Michigan, 1189-1196.
- BKG - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2011a. Digitales Basis-Landschaftsmodell (AAA-Modellierung) - Basis-DLM (AAA). Frankfurt am Main, <http://www.geodatenzentrum.de/docpdf/basis-dlm-aaa.pdf>, 29.08.2011.
- BKG - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2011b. Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland DLM-DE2009. Frankfurt am Main, <http://www.geodatenzentrum.de/docpdf/dlm-de2009.pdf>, 03.11.2011.
- BLAES, X., VANHALLE, L., DEFOURNY, P., 2005. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. Remote Sensing of Environment 96 (3-4), 352-365.
- BLASCHKE, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (1), 2-16.
- BLASCHKE, T., STROBL, J., 2001. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. GeoBIT/GIS 6 (01), 12-17.
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2004. Verordnung über die Durchführung von Stützungsregelungen und des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoSVerordnung - InVeKoSV). <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/invekosv/gesamt.pdf>, 04.10.2012.

- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2008. Gesetz über die Verarbeitung und Nutzung von Daten im Rahmen des integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems nach den gemeinschaftsrechtlichen Vorschriften für landwirtschaftliche Stützungsregelungen (InVeKoS-Daten-Gesetz - InVeKoSDG). <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/invekosdg/gesamt.pdf>, 04.03.2014.
- BMJ - Bundesministeriums der Justiz, 2012. Gesetz über Agrarstatistiken (Agrarstatistikgesetz - AgrStatG). <http://www.gesetze-im-internet.de/agrstatg/index.html>, 04.03.2014.
- BÖCKELS, L., 1999. 100 Jahre Wasserwirtschaft in der Nordeifel. Wasserverband Eifel-Rur (WVER), Düren.
- BOLTEN, A., BUBENZER, O., 2006. New elevation data (SRTM/ASTER) for geomorphological and geoarchaeological research in and regions. In: Eitel, B. (Hrsg.), *Holocene Landscape Development and Geoarchaeological Research*, Gebrüder Borntraeger, Stuttgart, 265-279.
- BOSSARD, M., FERANEC, J., OTAHEL, J., 2000. CORINE Land Cover Technical Guide – Addendum 2000. European Environment Agency (EEA), Kopenhagen, [http://www.eea.europa.eu/publications/tech40add/at\\_download/file](http://www.eea.europa.eu/publications/tech40add/at_download/file), 27.05.2013.
- BRINKHOFF, T., 2013. *Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis - Einführung in objektrelationale Geodatenbanken unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial*. Wichmann, Berlin Offenbach.
- BRINKMANN, T., 1950. *Das Fruchtfolgebild des deutschen Ackerbaus*. Bonn.
- BRK.NRW - Bezirksregierung Köln - Abteilung Geobasis NRW, 2012a. Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS®) - Digitale Landschaftsmodelle. Bonn, [http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/publikationen/abteilung07/pub\\_geobasis\\_atkis\\_digitale\\_landschaftsmodelle.pdf](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/publikationen/abteilung07/pub_geobasis_atkis_digitale_landschaftsmodelle.pdf), 11.12.2012.
- BRK.NRW - Bezirksregierung Köln - Abteilung Geobasis NRW, 2012b. ETRS89/UTM - Das amtliche Lagebezugssystem in Nordrhein-Westfalen. Bonn, [http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/presse/publikationen/geobasis/faltblatt\\_geobasis\\_etr8.pdf](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/presse/publikationen/geobasis/faltblatt_geobasis_etr8.pdf), 11.12.2012.
- BRK.NRW - Bezirksregierung Köln - Abteilung Geobasis NRW, 2013. Digitale Orthophotos (DOP). [http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/organisation/abteilung07/produkte/bildinformationen/orthophoto\\_dop/index.html](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/produkte/bildinformationen/orthophoto_dop/index.html), 01.11.2013.
- BROWN, J.F., LOVELAND, T.R., MERCHANT, J.W., REED, B.C., OHLEN, D.O., 1993. Using Multisource Data in Global Land-Cover Characterization - Concepts, Requirements, and Methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59 (6), 977-987.
- BROWN, M., GUNN, S.R., LEWIS, H.G., 1999. Support vector machines for optimal classification and spectral unmixing. *Ecological Modelling* 120 (2-3), 167-179.
- BRUZZONE, L., CONESE, C., MASELLI, F., ROLI, F., 1997. Multisource Classification of Complex Rural Areas by Statistical and Neural-Network Approaches. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63 (5), 523-533.
- BRYANT, N.W., 1988. *Managing expert systems*. Wiley, New York.
- BUCHNER, W., 2009. Ackerbau im Wandel. *Zuckerrübenjournal* 9 (1/2009), Rheinischer Landwirtschafts-Verlag GmbH, Bonn, <http://rrvbonn.de/portals/h1437631/Dokumente/ZR%20Journal%202001%202009.pdf>, 05.10.2010.
- BUCK, O., DeCOVER 2 – The German GMES extension to support land cover data systems: Status and Outlook. *Proceedings ESA Living Planet Symposium Bergen* 28.06.-02.07.2010, Bergen, Norwegen.
- BUCK, O., PETER, B., BÜKER, C., MÜTERTHIES, A., 2011. Satellit sieht mit - Agrarpolitik in Europa. *gis.BUSINESS* (8), 34-35.
- BURROUGH, P.A., 1992. Development of intelligent geographical information-systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 6 (1), 1-11.
- BURROUGH, P.A., MCDONNELL, R.A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, New York.
- BUTENUTH, M., GÖSSELN, G.V., TIEDGE, M., HEIPKE, C., LIPECK, U., SESTER, M., 2007. Integration of heterogeneous geospatial data in a federated database. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62 (5), 328-346.
- BÜTTNER, B., KOSZTRA, B., MAUCHA, G., PATAKI, R., 2012. Implementation and achievements of CLC2006. European Environment Agency (EEA), Kopenhagen, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version-2/>, 27.05.2013.
- CAMPBELL, J.B., WYNNE, R.H., 2011. *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press, New York.
- CARBONE, G.J., NARUMALANI, S., KING, M., 1996. Application of Remote Sensing and GIS Technologies with Physiological Crop Models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (2), 171-179.

- CASTELLAZZI, M.S., WOOD, G.A., BURGESS, P.J., MORRIS, J., CONRAD, K.F., PERRY, J.N., 2008. A systematic representation of crop rotations. *Agricultural Systems* 97 (1–2), 26-33.
- CHANG, C.-C., LIN, C.-J., 2011. LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 2 (3), 1-27.
- CHEN, D.M., STOW, D., 2003. Strategies for Integrating Information from Multiple Spatial Resolutions into Land-Use/Land-Cover Classification Routines. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69 (11), 1279-1287.
- CHEN, K.S., TZENG, Y.C., CHEN, C.F., KAO, W.L., 1995. Land-Cover Classification of Multispectral Imagery Using a Dynamic Learning Neural-Network. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61 (4), 403-408.
- CHI, M., FENG, R., BRUZZONE, L., 2008. Classification of hyperspectral remote-sensing data with primal SVM for small-sized training dataset problem. *Advances in Space Research* 41 (11), 1793-1799.
- CONGALTON, R.G., 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* 37 (1), 35-46.
- CONGALTON, R.G., GREEN, K., 2009. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Mapping Science Series CRC Press, Boca Raton.
- DAVIS, J.R., McDONALD, G., 1993. Applying a Rule-Based Decision Support System to Local Government Planning. In: Wright, J.R., Wiggins, L.L., Jain, R.K., Kim, T.J. (Hrsg.), *Expert systems in environmental planning*, Springer, Berlin, 23-46.
- DE FRIES, R.S., HANSEN, M., TOWNSHEND, J.R.G., SOHLBERG, R., 1998. Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing* 19 (16), 3141-3168.
- DE SMITH, M.J., GOODCHILD, M.F., LONGLEY, P., 2009. *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*. Matador, Leicester.
- DE WIT, A.J.W., CLEVERS, J.G.P.W., 2004. Efficiency and accuracy of per-field classification for operational crop mapping. *International Journal of Remote Sensing* 25 (20), 4091-4112.
- DEAN, A.M., SMITH, G.M., 2003. An evaluation of per-parcel land cover mapping using maximum likelihood class probabilities. *International Journal of Remote Sensing* 24 (14), 2905.
- DESTATIS - Statistisches Bundesamt, 2014. Erläuterungen zur Statistik - Unterscheidung "Landwirtschaftsfläche" und "landwirtschaftlich genutzten Fläche". <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Flaechennutzung/Methoden/Methodisches.html>, 01.05.2014.
- DIEPENBROCK, W., ELLMER, F., LÉON, J., 2012. *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung - Grundwissen Bachelor*. UTB, Stuttgart.
- DIGITALGLOBE, 2013. *DigitalGlobe's Core Imagery Product Guide V1.1*, May, 2013. DigitalGlobe, Inc., [http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DigitalGlobe\\_Core\\_Imagery\\_Products\\_Guide.pdf](http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf), 08.08.2013.
- DINGLE ROBERTSON, L., KING, D.J., 2011. Comparison of pixel- and object-based classification in land cover change mapping. *International Journal of Remote Sensing* 32 (6), 1505-1529.
- DIXON, B., CANDADE, N., 2008. Multispectral landuse classification using neural networks and support vector machines: one or the other, or both? *International Journal of Remote Sensing* 29 (4), 1185-1206.
- DOBSON, J.E., 1993. Commentary - A Conceptual Framework for Integrating Remote Sensing, GIS, and Geography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59 (10), 1491-1496.
- DURO, D.C., FRANKLIN, S.E., DUBÉ, M.G., 2012. A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of agricultural landscapes using SPOT-5 HRG imagery. *Remote Sensing of Environment* 118 (3), 259-272.
- DWD - Deutscher Wetterdienst, 2011. Download der Mittelwerte der Temperatur bezogen auf den Standort 1990. Offenbach, [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/download\\_\\_mw\\_\\_temp,templateId=raw,property=publicationFile.zip/download\\_mw\\_temp.zip](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/download__mw__temp,templateId=raw,property=publicationFile.zip/download_mw_temp.zip), 25.06.2012.
- DWD - Wetterdienst, D., 2012. Download der Mittelwerte des Niederschlags bezogen auf den Standort 1990. Offenbach, [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/download\\_\\_mw\\_\\_nieder,templateId=raw,property=publicationFile.zip/download\\_mw\\_nieder.zip](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/download__mw__nieder,templateId=raw,property=publicationFile.zip/download_mw_nieder.zip), 25.06.2012.
- E-GEOS, 2013. Price List, June 2013. <http://www.e-geos.it/products/pdf/prices.pdf>, 02.11.2013.
- EEA - European Environment Agency, 1995. CORINE Land Cover. [http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover/at\\_download/file](http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover/at_download/file), 27.05.2013.

- EEA - European Environment Agency, 2007. CLC2006 technical guidelines. Kopenhagen, [http://www.eea.europa.eu/publications/technical\\_report\\_2007\\_17/at\\_download/file](http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_17/at_download/file), 27.05.2013.
- EG - Europäische Gemeinschaften, 1992. Verordnung (EWG) Nr. 1765/92 des Rates vom 30. Juni 1992 zur Einführung einer Stützungsregelung für Erzeuger bestimmter landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31992R1765&qid=1407501739623&from=DE>, 04.03.2014.
- EHLERS, M., 1990. Remote Sensing and Geographic Information Systems: Towards Integrated Spatial Information Processing. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 28 (4), 763-766.
- EHLERS, M., 1992. Remote Sensing and Geographic Information Systems: Image-Integrated Geographic Information Systems. In: Johnson, A.I., Pettersson, C.B., Fulton, J.L. (Hrsg.), *Geographie Information Systems (GIS) and Mapping-Practices and Standards*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 53-67.
- EHLERS, M., SCHIEWE, J., 2012. *Geoinformatik. Geowissen kompakt* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- EOSDIS - Earth Observing System Data and Information System, 2013. Reverb - The Next Generation Earth Science Discovery Tool. <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>, 17.09.2013.
- ERSDAC - Earth Remote Sensing Data Analysis Center, 2005. ASTER User's Guide Part I General (Ver.4.0) July, 2005. [http://www.science.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/en/documnts/users\\_guide/part1/pdf/Part1\\_4E.pdf](http://www.science.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/en/documnts/users_guide/part1/pdf/Part1_4E.pdf), 17.09.2013.
- ERSDAC - Earth Remote Sensing Data Analysis Center, 2007. ASTER User's Guide Part II Level 1 Data Products (Ver.5.1) March, 2007. [http://www.science.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/en/documnts/users\\_guide/part1/pdf/Part2\\_5.1E.pdf](http://www.science.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/en/documnts/users_guide/part1/pdf/Part2_5.1E.pdf), 17.09.2013.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2009. Making field calculations. ArcGIS Desktop 9.3 Help, [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Making\\_field\\_calculations](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Making_field_calculations), 04.06.2010.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2012a. Esri Grid format. ArcGIS Desktop 10.0 Help, <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009t0000000w000000>, 04.07.2012.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2012b. Raster dataset attribute tables. ArcGIS Desktop 10.0 Help, [http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Raster\\_dataset\\_attribute\\_tables/009t00000009000000/](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Raster_dataset_attribute_tables/009t00000009000000/), 04.07.2012.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013a. Combine (Spatial Analyst). ArcGIS Desktop 10.1 Help, <http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.1/index.html#/na/009z0000007r000000/>, 24.09.2013.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013b. Grundlagen für die Georeferenzierung eines Raster-Datasets. ArcGIS Desktop 10.1 Help, <http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.1/index.html#/009t000000mn000000>, 25.09.2013.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013c. Polygon to Raster (Conversion) ArcGIS Desktop 10.1 Help, <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/001200000030000000>, 24.09.2013.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013d. Raster to Polygon (Conversion). ArcGIS Desktop 10.1 Help, <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/001200000008000000>, 24.09.2013.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013e. Was ist ein Shapefile? ArcGIS Desktop 10.1 Help, <http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.1/index.html#/005600000002000000>, 16.12.2013.
- EU - Europäische Union, 2007. Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE). Amtsblatt der Europäischen Union, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:108:0001:0014:DE:PDF>, 04.03.2014.
- EU - Europäische Union, 2009. Verordnung (EG) Nr. 73/2009 des Rates vom 19. Januar 2009. Amtsblatt der Europäischen Union, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:030:0016:0016:DE:PDF>, 04.10.2012.
- EU - Europäische Union, 2014. Das Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS). Amtsblatt der Europäischen Union, [http://ec.europa.eu/agriculture/direct-support/iacs/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/direct-support/iacs/index_de.htm), 04.03.2014.
- EXELISVIS - Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2012a. Applying Maximum Likelihood Classification. ENVI Classic Help.

- EXELISVIS - Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2012b. Building Georeferenced Mosaics. ENVI Classic Help.
- EXELISVIS - Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2012c. Georeferencing ASTER Data. ENVI Classic Help.
- EXELISVIS - Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2012d. Opening EOS Files. ENVI Classic Help.
- EXELISVIS - Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2012e. Rotating Images. ENVI Classic Help.
- EXELISVIS - Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2013. ENVI - Interoperability.  
<http://www.exelisvis.com/ProductsServices/ENVI/ENVI/Interoperability.aspx>, 31.07.2013.
- FERRO, C.J.S., WARNER, T.A., 2002. Scale and Texture in Digital Image Classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (1), 51-63.
- FLACKE, W., 2006. FAQs zu Koordinatensystemen in ArcGIS. ESRI Geoinformatik GmbH, Kranzberg,  
<http://support.esri.de/files/support/FAQs.pdf>, 11.12.2012.
- FLACKE, W., THOMSEN, B., DIETRICH, M., GRIWODZ, U., 2010. Koordinatensysteme in ArcGIS - Praxis der Transformationen und Projektionen. Points Verlag, Norden Halmstad.
- FOODY, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80 (1), 185-201.
- FOODY, G.M., 2004. Thematic Map Comparison: Evaluating the Statistical Significance of Differences in Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (5), 627-633.
- FOODY, G.M., MATHUR, A., 2004a. A Relative Evaluation of Multiclass Image Classification by Support Vector Machines. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42 (6), 1335-1343.
- FOODY, G.M., MATHUR, A., 2004b. Toward intelligent training of supervised image classifications: directing training data acquisition for SVM classification. *Remote Sensing of Environment* 93 (1-2), 107-117.
- FOODY, G.M., MATHUR, A., 2006. The use of small training sets containing mixed pixels for accurate hard image classification: Training on mixed spectral responses for classification by a SVM. *Remote Sensing of Environment* 103 (2), 179-189.
- FRANKEN, H., HÖVELMANN, L., 1998. Bodenschonende Bewirtschaftung landwirtschaftlich rekultivierter Böden. In: Pflug, W. (Hrsg.), *Braunkohlentagebau und Rekultivierung - Landschaftsökologie Folgenutzung Naturschutz*, Springer, Berlin Heidelberg New York, 224-234.
- FRANKLIN, S.E., HE, Y.H., PAPE, A., GUO, X.L., MCDERMID, G.J., 2011. Landsat-comparable land cover maps using ASTER and SPOT images: a case study for large-area mapping programmes. *International Journal of Remote Sensing* 32 (8), 2185-2205.
- FRANKLIN, S.E., WILSON, B.A., 1991. Spatial and spectral classification of remote-sensing imagery. *Computers & Geosciences* 17 (8), 1151-1172.
- FREYER, B., 2003. Fruchtfolgen. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- FRIEDL, M.A., BRODLEY, C.E., 1997. Decision Tree Classification of Land Cover from Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* 61 (3), 399-409.
- FRIEDL, M.A., MCIVER, D.K., HODGES, J.C.F., ZHANG, X.Y., MUCHONEY, D., STRAHLER, A.H., WOODCOCK, C.E., GOPAL, S., SCHNEIDER, A., COOPER, A., BACCINI, A., GAO, F., SCHAAF, C., 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment* 83 (1-2), 287-302.
- FRY, J., XIAN, G., JIN, S., DEWITZ, J., HOMER, C., YANG, L., BARNES, C., HEROLD, N., WICKHAM, J., 2011. Completion of the 2006 National Land Cover Database for the Conterminous United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 77 (9), 858-864.
- FUJISADA, H., 1995. Design and performance of ASTER instrument. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)* 2583, 16-25.
- FUJISADA, H., BAILEY, G.B., KELLY, G.G., HARA, S., ABRAMS, M.J., 2005. ASTER DEM Performance. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (12), 2707-2714.
- GAGLIANO, S., 2007. Include Classes. Exelis Visual Information Solutions, Inc., Boulder, CO, USA,  
<http://www.exelisvis.com/Default.aspx?tabid=1540&id=1100>, 17.01.2013.
- GAO, J., 2008. Mapping of Land Degradation from ASTER Data: A Comparison of Object-Based and Pixel-Based Methods. *GIScience & Remote Sensing* 45 (2), 149-166.
- GD.NRW - Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, 2011. Informationssystem Bodenkarte von NRW 1:50.000. Krefeld.
- GENBLER, L., 2010. Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen Daten und Hintergründe Fachbericht 27. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen,  
<http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe27/fabe27KW.pdf>, 21.12.2012.

- GEOFABRIK - Geofabrik GmbH, 2011a. Geofabrik - OpenStreetMap-Shapefiles. <http://www.geofabrik.de/data/shapefiles.html>, 14.10.2013.
- GEOFABRIK - Geofabrik GmbH, 2011b. Geofabrik Downloads - Data Extracts - Technical Details. <http://download.geofabrik.de/technical.html>, 14.10.2013.
- GILTRAP, D.L., LI, C., SAGGAR, S., 2010. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 136 (3–4), 292-300.
- GIRI, C., PENGRA, B., LONG, J., LOVELAND, T.R., 2013. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 25, 30-37.
- GIRI, C., ZHU, Z., REED, B., 2005. A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover data sets. *Remote Sensing of Environment* 94 (1), 123-132.
- GIRI, C.P., 2012. Brief Overview of Remote Sensing of Land Cover. In: Giri, C.P. (Hrsg.), *Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications*, CRC Press, Boca Raton, 3-12.
- GLÄBER, E., 1978. Geographische Landesaufnahme 1:200.000 - Naturräumliche Gliederung - 122/123 Köln-Aachen. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn - Bad Godesberg.
- GOMARASCA, M.A., 2009. *Basics of Geomatics*. Earth and Environmental Science Springer, Dordrecht Heidelberg New York.
- GONG, P., WANG, J., YU, L., ZHAO, Y., ZHAO, Y., LIANG, L., NIU, Z., HUANG, X., FU, H., LIU, S., LI, C., LI, X., FU, W., LIU, C., XU, Y., WANG, X., CHENG, Q., HU, L., YAO, W., ZHANG, H., ZHU, P., ZHAO, Z., ZHANG, H., ZHENG, Y., JI, L., ZHANG, Y., CHEN, H., YAN, A., GUO, J., YU, L., WANG, L., LIU, X., SHI, T., ZHU, M., CHEN, Y., YANG, G., TANG, P., XU, B., GIRI, C., CLINTON, N., ZHU, Z., CHEN, J., CHEN, J., 2013. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing* 34 (7), 2607-2654.
- GOODCHILD, M.F., 1994. Integrating GIS and Remote Sensing for Vegetation Analysis and Modeling: Methodological Issues. *Journal of Vegetation Science* 5 (5), 615-626.
- GÖRZ, G., SCHMID, U., WACHSMUTH, I., 2013. Einleitung. In: Görz, G., Schneeberger, J., Schmid, U. (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 1-18.
- GOWARD, S.N., ARVIDSON, T., WILLIAMS, D.L., IRISH, R., IRONS, J.R., 2009. Moderate Spatial Resolution Optical Sensors. In: Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M. (Hrsg.), *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, SAGE Publications Ltd, London, 123-138.
- GRANT, R.F., 2001. A Review of the Canadian Ecosystem Model - ecosys. In: Schaffer, M.J., Ma, L., Hansen, S. (Hrsg.), *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*, CRC Press, Boca Raton, 173-264.
- GRIWODZ, U., 2009. Von DHDN/GK nach ETRS89/UTM – formatunabhängige Koordinatentransformation. *VDVmagazin* 09 (6), 492-496.
- GROOM, G.B., FULLER, R.M., JONES, A.R., 1996. Contextual correction: techniques for improving land cover mapping from remotely sensed images. *International Journal of Remote Sensing* 17 (1), 69-89.
- GURNEY, C.M., TOWNSHEND, J.R.G., 1983. The Use of Contextual Information in the Classification of Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 49 (1), 55-64.
- H. FISCHER, H., GRAAFEN, R., 1974. Geographische Landesaufnahme 1:200.000 - Naturräumliche Gliederung - 136/137 Cochem. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Bonn-Bad Godesberg.
- HAKE, G., GRÜNREICH, D., MENG, L., 2002. *Kartographie*. De Gruyter Lehrbuch De Gruyter, Berlin New York.
- HANSEN, M., DUBAYAH, R., DEFRIES, R., 1996. Classification trees: An alternative to traditional land cover classifiers. *International Journal of Remote Sensing* 17 (5), 1075-1081.
- HANSEN, M.C., DEFRIES, R.S., TOWNSHEND, J.R.G., SOHLBERG, R., 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing* 21 (6-7), 1331-1364.
- HARBECK, R., 1994. Überblick über Konzeption, Aufbau und Datenangebot des Geoinformationssystems ATKIS. In: Harbeck, R. (Hrsg.), *Das Geoinformationssystem ATKIS und seine Nutzung in Wirtschaft und Verwaltung*, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn-Bad Godesberg, 13-32.
- HARRIS, P.M., VENTURA, S.J., 1995. The Integration of Geographic Data with Remotely Sensed Imagery to Improve Classification in an Urban Area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61 (8), 993-998.
- HAY, G.J., BLASCHKE, T., MARCEAU, D.J., BOUCHARD, A., 2003. A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57 (5-6), 327-345.

- HAZEU, G.W., 2006. Land use mapping and monitoring in the Netherlands (LGN5). Proceedings of the Second Workshop of the EARSeL SIG on Remote Sensing of Land Use & Land Cover, Bonn, 323-329.
- HENNINGSSEN, D., KATZUNG, G., 2006. Einführung in die Geologie Deutschlands. Spektrum Akademischer Verlag, München.
- HEYWOOD, I., CORNELIUS, S., CARVER, S., 2011. An Introduction to Geographical Information Systems. Prentice Hall, Harlow.
- HIXSON, M., SCHOLZ, D., FUHS, N., AKIYAMA, T., 1980. Evaluation of Several Schemes for Classification of Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 46 (12), 1547-1553.
- HIXSON, M.M., BAUER, M.E., SCHOLZ, D.K., 1982. An Assessment of Landsat Data Acquisition History on Identification and Area Estimation of Corn and Soybeans. *Remote Sensing of Environment* 12 (2), 123-128.
- HOMER, C., DEWITZ, J., FRY, J., COAN, M., HOSSAIN, N., LARSON, C., HEROLD, N., MCKERROW, A., VANDRIEL, J.N., WICKHAM, J., 2007. Completion of the 2001 National Land Cover Database for the conterminous United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73 (4), 337-341.
- HOMER, C., HUANG, C.Q., YANG, L.M., WYLIE, B., COAN, M., 2004. Development of a 2001 National Land-Cover Database for the United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (7), 829-840.
- HSU, C.-W., CHEN, P.-H., LIN, C.-J., 2003. A Practical Guide to Support Vector Classification. National Taiwan University, Taipei, <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>, 30.01.2013.
- HUANG, C., DAVIS, L.S., TOWNSHEND, J.R.G., 2002. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing* 23 (4), 725-749.
- HUANG, H., LEGARSKY, J., OTHMAN, M., 2007. Land-cover Classification Using Radarsat and Landsat Imagery for St. Louis, Missouri. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73 (1), 37-43.
- HUTCHINSON, C.F., 1982. Techniques for Combining Landsat and Ancillary Data for Digital Classification Improvement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 48 (1), 123-130.
- IM, J., JENSEN, J.R., 2005. A change detection model based on neighborhood correlation image analysis and decision tree classification. *Remote Sensing of Environment* 99 (3), 326-340.
- INSPIRE, 2010. D2.8.I.1 INSPIRE Specification on Coordinate Reference Systems - Guidelines V3.1. INSPIRE Thematic Working Group Coordinate Reference Systems and Geographical Grid Systems, [http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data\\_Specifications/INSPIRE\\_Specification\\_CRS\\_v3.1.pdf](http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_Specification_CRS_v3.1.pdf), 17.12.2012.
- IT.NRW - Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Geschäftsbereich Statistik), 2008. Agrarstrukturerhebung 2007 (Datensatz). Düsseldorf.
- IT.NRW - Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Geschäftsbereich Statistik), 2009. Agrarstrukturerhebung in Nordrhein-Westfalen 2007 Gemeinde- und Kreisstatistik der landwirtschaftlichen Betriebe – Betriebsgrößen, Bodennutzung und Viehhaltung; sozialökonomische Betriebstypen und betriebswirtschaftliche Ausrichtung; Arbeitskräfte –. Düsseldorf, <https://webshop.it.nrw.de/gratis/C969%20200751.pdf>, 25.10.2013.
- IT.NRW - Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Geschäftsbereich Statistik), 2011. Landwirtschaftszählung 2010 (Datensatz). Düsseldorf.
- IT.NRW - Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Geschäftsbereich Statistik), 2012. Landwirtschaftszählung in Nordrhein-Westfalen 2010 - Gemeinde- und Kreisstatistik der landwirtschaftlichen Betriebe Betriebsgrößen, Bodennutzung, Viehhaltung, sozialökonomische Betriebstypen, betriebswirtschaftliche Ausrichtung, Arbeitskräfte. Düsseldorf, <https://webshop.it.nrw.de/gratis/C919%20201051.pdf>, 25.10.2013.
- IWASAKI, A., FUJISADA, H., 2005. ASTER Geometric Performance. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (12), 2700-2706.
- JAAKKOLA, A., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., YU, X., KAARTINEN, H., LEHTOMÄKI, M., LIN, Y., 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (6), 514-522.
- JANSSEN, L.L.F., JAARMA, M.N., VANDERLINDEN, E.T.M., 1990. Integrating Topographic Data with Remote Sensing for Land-Cover Classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56 (11), 1503-1506.
- JANSSEN, L.L.F., MIDDELKOOP, H., 1992. Knowledge-based crop classification of a Landsat Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing* 13 (15), 2827-2837.
- JENSEN, J., IM, J., HARDIN, P., JENSEN, R., 2009. Image Classification. In: Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M. (Hrsg.), *The SAGE handbook of remote sensing*, SAGE Publications Ltd., London, 269-282.



- JENSEN, J.R., 2005. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
- JENSEN, J.R., 2007. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
- JENSEN, J.R., CHERY, D.L., 1980. Landsat crop identification for watershed water balance determinations. *International Journal of Remote Sensing* 1 (4), 345-359.
- JOBST, A., ERASMI, S., 2008. Klimawandel - Apfelblüte macht das Regionalklima sichtbar. Nationalatlas aktuell, Leibniz-Institut für Länderkunde (IfL), Leipzig, [http://aktuell.nationalatlas.de/Klimawandel.5\\_05-2008.0.html](http://aktuell.nationalatlas.de/Klimawandel.5_05-2008.0.html), 16.08.2013.
- JUDEX, M., THAMM, H.-P., MENZ, G., 2006. Improving land-cover classification with a knowledge based approach and ancillary data. *Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover*, 184-191.
- JUSTICE, C.O., TOWNSHEND, J.R.G., HOLBEN, B.N., TUCKER, C.J., 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 6 (8), 1271-1318.
- JUSTICE, C.O., VERMOTE, E., TOWNSHEND, J.R.G., DEFRIES, R., ROY, D.P., HALL, D.K., SALOMONSON, V.V., PRIVETTE, J.L., RIGGS, G., STRAHLER, A., LUCHT, W., MYNENI, R.B., KNYAZIKHIN, Y., RUNNING, S.W., NEMANI, R.R., WAN, Z.M., HUETE, A.R., VAN LEEUWEN, W., WOLFE, R.E., GIGLIO, L., MULLER, J.P., LEWIS, P., BARNESLEY, M.J., 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36 (4), 1228-1249.
- KÄÄB, A., HUGGEL, C., PAUL, F., WESSELS, R., RAUP, B., KIEFFER, H., KARGEL, J., 2003. Glacier monitoring from ASTER imagery: Accuracy and applications. *EARSeL eProceedings* 2 (1), 43-53.
- KAHMEN, H., 2005. *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. De Gruyter Lehrbuch Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- KÄMPF, R., 1983. *Fruchtfolge aktuell*. Verlagsunion Agrar, Frankfurt am Main.
- KANELLOPOULOS, I., VARFIS, A., WILKINSON, G.G., MEGIER, J., 1992. Land-cover discrimination in SPOT HRV imagery using an artificial neural network - a 20-class experiment. *International Journal of Remote Sensing* 13 (5), 917-924.
- KAPPAS, M., 2011. *Geographische Informationssysteme*. Das Geographische Seminar Westermann, Braunschweig.
- KAPTUÉ TCHUENTÉ, A.T., ROUJEAN, J.-L., DE JONG, S.M., 2011. Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13 (2), 207-219.
- KAUFMAN, Y.J., 1984. Atmospheric effect on spatial-resolution of surface imagery. *Applied Optics* 23 (22), 4164-4172.
- KAVZOGLU, T., COLKESEN, I., 2009. A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11 (5), 352-359.
- KAVZOGLU, T., MATHER, P.M., 2003. The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification. *International Journal of Remote Sensing* 24 (23), 4907-4938.
- KBTL, 2009. *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- KEIL, M., BOCK, M., ESCH, T., METZ, A., NIELAND, S., PFITZNER, A., 2010. *CORINE Land Cover Aktualisierung 2006 für Deutschland - Abschlussbericht*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Wessling, [http://www.corine.dfd.dlr.de/media/download/clc2006\\_endbericht\\_de.pdf](http://www.corine.dfd.dlr.de/media/download/clc2006_endbericht_de.pdf), 27.05.2013.
- KEREKES, J.P., 2009. Optical Sensor Technology. In: Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M. (Hrsg.), *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. Sage Publications Ltd, London, 95-107.
- KERSEBAUM, K.C., HECKER, J.-M., MIRSCHEL, W., WEGEHENKEL, M., 2007. Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems: a comparison of simulation models applied on common data sets. In: Kersebaum, K.C., Hecker, J.-M., Mirschel, W., Wegehenkel, M. (Hrsg.), *Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil-Crop Systems*, Springer, Dordrecht, 1-17.
- KEY, T., WARNER, T.A., MCGRAW, J.B., FAJVAN, M.A., 2001. A Comparison of Multispectral and Multitemporal Information in High Spatial Resolution Imagery for Classification of Individual Tree Species in a Temperate Hardwood Forest. *Remote Sensing of Environment* 75 (1), 100-112.
- KLAPP, E., 1967. *Lehrbuch des Acker -und Pflanzenbaues*. Verlag Paul Parey, Berlin Hamburg.

- KLÖCKING, B., STRÖBL, B., KNOBLAUCH, S., MAIER, U., PFÜTZNER, B., GERICKE, A., 2003. Development and allocation of land-use scenarios in agriculture for hydrological impact studies. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 28 (33–36), 1311-1321.
- KLOSTERMANN, J., 1992. Das Quartär der Niederrheinischen Bucht. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld.
- KNORN, J., RABE, A., RADELOFF, V.C., KUEMMERLE, T., KOZAK, J., HOSTERT, P., 2009. Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images. *Remote Sensing of Environment* 113 (5), 957-964.
- KORRES, W., REICHENAU, T.G., SCHNEIDER, K., 2013. Patterns and scaling properties of surface soil moisture in an agricultural landscape: An ecohydrological modeling study. *Journal of Hydrology* 498, 89-102.
- KOTTEK, M., GRIESER, J., RGEN, BECK, C., RUDOLF, B., RUBEL, F., 2006. World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3), 259-263.
- KRAMER, H.J., 2002. *Observation of the Earth and Its Environment - Survey of Missions and Sensors*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- KREITLOW, S., BRETTSCHEIDER, A., JAHN, C.-H., FELDMANN-WESTENDORFF, U., 2010. ETRS89/UTM – Der Bezugssystemwechsel und die Auswirkungen auf die Geodatenutzung. *Kartographische Nachrichten* 60 (4), 14.
- LANDGREBE, D.A., 1980. The development of a spectral-spatial classifier for earth observational data. *Pattern Recognition* 12 (3), 165-175.
- LANDIS, J.R., KOCH, G.G., 1977. Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33 (1), 159-174.
- LANGE, N., 2013. *Geoinformatik - in Theorie und Praxis*. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2010. *Digitale Gewässerstationierungskarte des Landes Nordrhein-Westfalen*. Recklinghausen.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2011. *Naturräumliche Einheiten in NRW*. Recklinghausen, [http://www.naturschutzinformationen-nrw.de/methoden/web/babel/media/nhe\\_nrw.zip](http://www.naturschutzinformationen-nrw.de/methoden/web/babel/media/nhe_nrw.zip), 07.09.2011.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2013a. *Gesetzlich geschützte Biotope in Nordrhein-Westfalen*. <http://www.naturschutzinformationen-nrw.de/p62/de/start>, 03.03.2014.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (FB 54 Wasserrahmenrichtlinie, Hydromorphologie), 2013b. *Gewässerstationierungskarte des Landes Nordrhein-Westfalen*. <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/gstat.htm>, 11.10.2013.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2013c. *Schutzwürdige Biotope in Nordrhein-Westfalen*. <http://www.naturschutzinformationen-nrw.de/bk/de/start>, 03.03.2014.
- LATTY, R.S., NELSON, R., MARKHAM, B., WILLIAMS, D., TOLL, D., IRONS, J., 1985. Performance Comparisons Between Information Extraction Techniques Using Variable Spatial Resolution Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 51 (9), 1459-1470.
- LAUER, D.T., MORAIN, S.A., SALOMONSON, V.V., 1997. The Landsat Program: Its Origins, Evolution, and Impacts. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63 (7), 831-838.
- LAWRENCE, R.L., WRIGHT, A., 2001. Rule-Based Classification Systems Using Classification and Regression Tree (CART) Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67 (10), 1137-1142.
- LENZ-WIEDEMANN, V.I.S., KLAR, C.W., SCHNEIDER, K., 2010. Development and test of a crop growth model for application within a Global Change decision support system. *Ecological Modelling* 221 (2), 314-329.
- LI, X., YEH, A.G.O., 1998. Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta. *International Journal of Remote Sensing* 19 (8), 1501-1518.
- LIEDTKE, H., MARCINEK, J., 2002. *Physische Geographie Deutschlands*. Klett-Perthes, Gotha.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W., CHIPMAN, J.W., 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York.
- LIU, J.-Y., ZHUANG, D.F., LUO, D., XIAO, X., 2003. Land-cover classification of China: Integrated analysis of AVHRR imagery and geophysical data. *International Journal of Remote Sensing* 24 (12), 2485-2500.
- LÖFFLER, E., HONECKER, U., STABEL, E., 2005. *Geographie und Fernerkundung*. Studienbücher der Geographie Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart.
- LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J., RHIND, D.W., 2011. *Geographic Information Systems and Science*. Wiley, West Sussex.

- LOVELAND, T.R., 2012. History of Land-Cover Mapping. In: Giri, C.P. (Hrsg.), Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications, CRC Press, Boca Raton, 13-22.
- LOVELAND, T.R., DEFRIES, R.S., 2004. Observing and Monitoring Land Use and Land Cover Change. In: DeFries, R.S., Asner, G.P., Houghton, R.A. (Hrsg.), Ecosystems and Land Use Change, American Geophysical Union, Washington, 231-246.
- LOVELAND, T.R., REED, B.C., BROWN, J.F., OHLEN, D.O., ZHU, Z., YANG, L., MERCHANT, J.W., 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 21 (6-7), 1303-1330.
- LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center, 2009. Change in Status Alert for the ASTER SWIR detector. [https://lpdaac.usgs.gov/about/news\\_archive/wednesday\\_july\\_01\\_2009](https://lpdaac.usgs.gov/about/news_archive/wednesday_july_01_2009), 19.04.2012.
- LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center, 2011. MODIS Overview. [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_overview](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_overview), 12.08.2013.
- LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center, 2013. ASTER DAR Tool. [https://lpdaac.usgs.gov/tools/aster\\_dar\\_tool](https://lpdaac.usgs.gov/tools/aster_dar_tool), 17.09.2013.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZIO, E., MORAN, E., 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 25 (12), 2365-2407.
- LUCAS, R., MEDCALF, K., BROWN, A., BUNTING, P., BREYER, J., CLEWLEY, D., KEYWORTH, S., BLACKMORE, P., 2011. Updating the Phase 1 habitat map of Wales, UK, using satellite sensor data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (1), 81-102.
- LUCAS, R., ROWLANDS, A., BROWN, A., KEYWORTH, S., BUNTING, P., 2007. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62 (3), 165-185.
- LUNETTA, R.S., CONGALTON, R.G., FENSTERMAKER, L.K., JENSEN, J.R., MCGWIRE, K.C., TINNEY, L.R., 1991. Remote Sensing and Geographic Information System Data Integration: Error Sources and Research Issues. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57 (6), 677-687.
- LUNETTA, R.S., EDIRIWICKREMA, J., IAMES, J., JOHNSON, D.M., LYON, J.G., MCKERROW, A., PILANT, A., 2003. A Quantitative Assessment of a Combined Spectral and GIS Rule-Based Land-Cover Classification in the Neuse River Basin of North Carolina. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69 (3), 299-310.
- LUSSEM, U., WALDHOFF, G., 2013. Enhanced land use classification of 2011 for the Rur catchment. CRC/TR32 Database (TR32DB), DOI: 10.5880/TR32DB.7.
- LWK NRW - Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2004. Ratgeber Luftbildkarte - Hinweise zur Flächenerfassung. Bonn, <http://www.lwk.nrw.de/foerderung/pdf/ratgeber-luftbildkarte.pdf>, 04.10.2012.
- LWK NRW - Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2005. Feldblöcke. <http://www.landwirtschaftskammer.de/foerderung/feldblock/index.htm>, 12.10.2013.
- LWK NRW - Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2008. Anbau von Kartoffeln - Ratgeber 2008. Bonn, <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/kartoffeln/anbau-pdf.pdf>, 22.01.2009.
- LWK NRW - Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2011. LZ Rheinland - Ratgeber Förderung 2011. Bonn, <http://www.landwirtschaftskammer.de/foerderung/pdf/ratgeber-foerderung-2011.pdf>, 12.01.2012.
- LWK NRW - Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2012. Fruchtfolge - Ratgeber 2012. Bonn, Münster, <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/fruchtfolge/tabellen-fruchtfolge-pdf.pdf>, 26.11.2013.
- LWK NRW - Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2014. Antrag auf Betriebsprämie. <http://www.landwirtschaftskammer.de/foerderung/betriebspraemien/verfahren/index.htm#aktivierung>, 04.03.2014.
- MACDONALD, R.B., HALL, F.G., 1980. Global Crop Forecasting. *Science* 208 (4445), 670-679.
- MANANDHAR, R., ODEH, I., ANCEV, T., 2009. Improving the Accuracy of Land Use and Land Cover Classification of Landsat Data Using Post-Classification Enhancement. *Remote Sensing* 1 (3), 330-344.
- MANSFELD, W., 2010. Satellitenortung und Navigation - Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- MARCEAU, D.J., GRATTON, D.J., FOURNIER, R.A., FORTIN, J.-P., 1994. Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 2. The Optimal Spatial Resolution. *Remote Sensing of Environment* 49 (2), 105-117.
- MARENBERG, G., 1994. Die Rur - Von der Quelle bis zur Mündung. Meyer & Meyer, Aachen.

- MATHER, P., KOCH, M., 2011. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. Wiley-Blackwell, West Sussex.
- MATTIKALLI, N.M., 1995. Integration of remotely-sensed raster data with a vector-based geographical information system for land-use change detection. *International Journal of Remote Sensing* 16 (15), 2813-2828.
- MAXWELL, S.K., SCHMIDT, G.L., STOREY, J.C., 2007. A multi-scale segmentation approach to filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *International Journal of Remote Sensing* 28 (23), 5339-5356.
- MCCLOY, K.R., KICKNER, S., 2006. Geographic Informations Systems. In: McCloy, K.R. (Hrsg.), *Resource Management Information Systems: Remote Sensing, GIS and Modelling*, Taylor & Francis, Boca Raton, 355-454.
- MEIER, U., 2001. *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen – BBCH Monografie*. Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft, [http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam\\_uploads/\\_veroeff/bbch/BBCH-Skala\\_deutsch.pdf](http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_veroeff/bbch/BBCH-Skala_deutsch.pdf), 10.01.2013.
- MEINEL, G., HENNERSDORF, J., 2002. Erhebungsmethoden, Programme und Nomenklaturen der Flächenbedeckung und Flächennutzung. *PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 2002 (4), 271-286.
- MELGANI, F., BRUZZONE, L., 2004. Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images With Support Vector Machines. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42 (8), 1778-1790.
- MENDOZA, G.A., MARTINS, H., 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management* 230 (1–3), 1-22.
- MERCHANT, J., NARUMALANI, S., 2009. Integrating Remote Sensing and Geographic Information Systems. In: Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M. (Hrsg.), *The SAGE handbook of remote sensing*, SAGE Publications Ltd., London, 257-269.
- MESEV, V., WALRATH, A., 2008. GIS and remote sensing integration: in serach of a definition. In: Mesev, V. (Hrsg.), *Integration of GIS and Remote Sensing*, John Wiley & Sons, West Sussex, 1-16.
- MEYER, W.B., TURNER, B.L., 1992. Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Ecology & Systematics* 23, 39-61.
- MEYNEN, E., SCHMITHÜSEN, J., 1953-1962. *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands / Band. 1+2 / Lieferung 1 - 9*. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Bad Godesberg.
- MIK NRW - Ministerium für Inneres und Kommunales des Landes Nordrhein-Westfalen, 2005. *Verordnung über Zuständigkeiten zur Durchführung der Agrarreform und für die Kontrollen anderweitiger Verpflichtungen (Agrarreform-Zuständigkeits-VO)*. [https://recht.nrw.de/lmi/owa/br\\_bes\\_text?anw\\_nr=2&gld\\_nr=7&ugl\\_nr=7820&bes\\_id=7645&aufgehoben=N&menu=0&sg=0](https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=2&gld_nr=7&ugl_nr=7820&bes_id=7645&aufgehoben=N&menu=0&sg=0), 12.10.2013.
- MINARI, M., 2009. Landsat Gapfill. ExelisVis, <http://www.ittvis.com/Default.aspx?tabid=1540&id=1277>, 28.07.2011.
- MONTZKA, C., 2007. Einsatz von multispektralen Satellitenbilddaten in der Wasserhaushalts- und Stoffstrommodellierung - dargestellt am Beispiel des Rureinzuggebietes. *Schriften des Forschungszentrums Jülich / Reihe Energie & Umwelt: Reihe Energie & Umwelt 1*, Forschungszentrum Jülich, Jülich.
- MOUNTRAKIS, G., IM, J., OGOLE, C., 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (3), 247-259.
- MUNZERT, M., 2006. *Pflanzliche Erzeugung - Die Landwirtschaft*. BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, München.
- MURTHY, C.S., RAJU, P.V., BADRINATH, K.V.S., 2003. Classification of wheat crop with multi-temporal images: performance of maximum likelihood and artificial neural networks. *International Journal of Remote Sensing* 24 (23), 4871-4890.
- NEBEL, B., WÖLFEL, S., 2013. Wissensrepräsentation und -verabreichung. In: Görz, G., Schneeberger, J., Schmid, U. (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 105-127.
- NEUMANN, K., HEROLD, M., HARTLEY, A., SCHMULLIUS, C., 2007. Comparative assessment of CORINE2000 and GLC2000: Spatial analysis of land cover data for Europe. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9 (4), 425-437.
- NIEDERSTUCKE, H., 1967. *Lößbodenbetriebe in Westdeutschland. Betriebs- und Arbeitswirtschaft in der Praxis* 12, Verlag Paul Parey, Hamburg Berlin.
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (Coastal Services Center), 2013. *NOAA Coastal Change Analysis Program (C-CAP) Regional Land Cover Database*. <http://www.csc.noaa.gov/landcover>, 13.01.2014.

- NRSA - National Remote Sensing Agency, 2003. RESOURCESAT - 1 (IRS - P6) Data User's Handbook. Hyderabad, Indien, [http://www.euromap.de/download/P6\\_data\\_user\\_handbook.pdf](http://www.euromap.de/download/P6_data_user_handbook.pdf), 02.10.2013.
- ODENWELLER, J.B., JOHNSON, K.I., 1984. Crop Identification Using Landsat Temporal-Spectral Profiles. *Remote Sensing of Environment* 14 (1-3), 39-54.
- OETTER, D.R., COHEN, W.B., BERTERRETICHE, M., MAIERSPERGER, T.K., KENNEDY, R.E., 2000. Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment* 76 (2), 139-155.
- ORTIZ, M.J., FORMAGGIO, A.R., EPIPHANIO, J.C.N., 1997. Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS, and historical database. *International Journal of Remote Sensing* 18 (1), 95-105.
- OSM-WIKI - OpenStreetMap Foundation, 2008. OpenStreetMap Wiki Hauptseite. <http://wiki.openstreetmap.org>, 14.10.2013.
- OTTE, U., 1989. Klima-Atlas von Nordrhein-Westfalen. Der Minister für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- OTUKEI, J.R., BLASCHKE, T., 2010. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, Supplement 1, S27-S31.
- PAPPEN, K., SCHÜTTLER, A., MÜLLER-MINY, H., 1963. Geographische Landesaufnahme 1:200.000 - Naturräumliche Gliederung - 108/109 Düsseldorf-Erkelenz. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Bonn-Bad Godesberg.
- PAL, M., MATHER, P.M., 2003. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. *Remote Sensing of Environment* 86 (4), 554-565.
- PAL, M., MATHER, P.M., 2005. Support vector machines for classification in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 26 (5), 1007-1011.
- PAX-LENNEY, M., WOODCOCK, C.E., 1997. Monitoring Agricultural Lands in Egypt with Multitemporal Landsat TM imagery: How Many Images Are Needed? *Remote Sensing of Environment* 59 (3), 522-529.
- PEARLMAN, J.S., BARRY, P.S., SEGAL, C.C., SHEPANSKI, J., BEISO, D., CARMAN, S.L., 2003. Hyperion, a Space-Based Imaging Spectrometer. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (6), 1160-1173.
- POHL, C., VAN GENDEREN, J.L., 1998. Review article - Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing* 19 (5), 823-854.
- RAPIDEYE, 2012. Satellite Imagery Product Specifications, Version 4.1 (September 2012). RapidEye, Brandenburg an der Havel, [http://www.rapideye.com/upload/RE\\_Product\\_Specifications\\_ENG.pdf](http://www.rapideye.com/upload/RE_Product_Specifications_ENG.pdf), 24.11.2012.
- REICHENAU, T.G., KORRES, W., 2013. Modelled LAI of Maize, Sugar Beet, Winter Wheat and Winter Barley for the northern part of the Rur catchment (2009). CRC/TR32 Database (TR32DB), DOI: 10.5880/TR32DB.5.
- RIBBERT, K.H., 2010. Geologie im Rheinischen Schiefergebirge - Teil 1 Nordeifel. Geologie im Rheinischen Schiefergebirge 1, Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld.
- RICCHETTI, E., 2000. Multispectral Satellite Image and Ancillary Data Integration for Geological Classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66 (4), 429-435.
- RICHARDS, J.A., 2012. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer, Berlin Heidelberg.
- RICHARDS, J.A., JIA, X., 2006. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer, Berlin Heidelberg.
- ROGAN, J., MILLER, J., STOW, D., FRANKLIN, J., LEVIEN, I., FISCHER, C., 2003. Land-Cover Change Monitoring with Classification Trees Using Landsat TM and Ancillary Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69 (7), 793-804.
- ROHIERSE, A., 2004. Regionale Darstellung der Umweltbelastungen durch klimarelevante Gase in der Agrarlandschaft Kraichgau - Das Boden-Landnutzungs-Informationssystem für Treibhausgasemissionen. Dissertation, Universität Hohenheim, Deutschland.
- ROHIERSE, A., BARETH, G., 2004. Integration einer multitemporalen Satellitenbildklassifikation in ATKIS zur weiteren Differenzierung der Objektart Ackerland. *GIS 2004* (3), 35-41.
- SAKUMA, F., ONO, A., TSUCHIDA, S., OHGI, N., INADA, H., AKAGI, S., ONO, H., 2005. Onboard calibration of the ASTER instrument. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (12), 2715-2724.
- SCHÖNHART, M., SCHMID, E., SCHNEIDER, U.A., 2011. CropRota - A crop rotation model to support integrated land use assessments. *European Journal of Agronomy* 34 (4), 263-277.
- SETIAWAN, Y., YOSHINO, K., 2012. Change detection in land-use and land-cover dynamics at a regional scale from MODIS time-series imagery. *ISPRS Annals Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 1-7, 243-248.

- SINGH, A., 1989. Review Article - Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 10 (6), 989-1003.
- SKIDMORE, A.K., TURNER, B.J., BRINKHOF, W., KNOWLES, E., 1997. Performance of a Neural Network: Mapping Forests Using GIS and Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63 (5), 501-514.
- SMITH, G.M., FULLER, R.M., 2001. An integrated approach to land cover classification: An example in the Island of Jersey. *International Journal of Remote Sensing* 22 (16), 3123-3142.
- SOLBERG, A.H.S., JAIN, A.K., TAXT, T., 1994. Multisource classification of remotely-sensed data - fusion of landsat TM and SAR images. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32 (4), 768-778.
- SONG, C., WOODCOCK, C.E., SETO, K.C., LENNEY, M.P., MACOMBER, S.A., 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment* 75 (2), 230-244.
- SRINIVASAN, A., RICHARDS, J.A., 1993. Analysis of GIS spatial data using knowledge-based methods. *International Journal of Geographical Information Systems* 7 (6), 479-500.
- STADT-ALSDORF - Stadt Alsdorf, 2014. Halden. [http://alsdorf.de/web/cms/front\\_content.php?idart=703](http://alsdorf.de/web/cms/front_content.php?idart=703), 27.03.2014.
- STAR, J.L., ESTES, J.E., DAVIS, F., 1991. Improved Integration of Remote-Sensing and Geographic Informationsystems - A Background to NCGIA Initiative 12. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57 (6), 643-645.
- STEFANOV, W.L., RAMSEY, M.S., CHRISTENSEN, P.R., 2001. Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment* 77 (2), 173-185.
- STEHMAN, S.V., CZAPLEWSKI, R.L., 1998. Design and Analysis for Thematic Map Accuracy Assessment: Fundamental Principles. *Remote Sensing of Environment* 64 (3), 331-344.
- STEHMAN, S.V., FOODY, G.M., 2009. Accuracy Assessment. In: Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M. (Hrsg.), *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, Sage Publications Ltd, London, 297-309.
- STOREY, J., SCARAMUZZA, P., SCHMIDT, G., BARSÌ, J., Landsat-7 scan line corrector-off gap-filled product development. *Proceedings of Pecora 16 Global Priorities in Land Remote Sensing*, October 23-27 2005, Sioux Falls, South Dakota.
- STORY, M., CONGALTON, R.G., 1986. Accuracy Assessment: A User's Perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52 (3), 397-399.
- STOW, D.A., ESTES, J.E., 1981. Landsat and Digital Terrain Data for County-Level Resource-Management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 47 (2), 215-222.
- STRAHLER, A.H., T.L., L., BRYANT, N.A., 1978. Improving forest cover classification accuracy from Landsat by incorporating topographic information. *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 927-942.
- STRAHLER, A.H., WOODCOCK, C.E., SMITH, J.A., 1986. On the Nature of Models in Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment* 20 (2), 121-139.
- STRUBE, G., FERSTL, E., KONIECZNY, L., RAGNI, M., 2013. Kognition. In: Görz, G., Schneeberger, J., Schmid, U. (Hrsg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 43-74.
- STUCKENS, J., COPPIN, P.R., BAUER, M.E., 2000. Integrating Contextual Information with per-Pixel Classification for Improved Land Cover Classification. *Remote Sensing of Environment* 71 (3), 282-296.
- SWAIN, P.H., VARDEMAN, S.B., TILTON, J.C., 1981. Contextual classification of multispectral image data. *Pattern Recognition* 13 (6), 429-441.
- THUNNISSEN, H.A.M., JAARSMAN, M.N., SCHOUMANS, O.F., 1992. Land cover inventory in the Netherlands using remote sensing; application in a soil and groundwater vulnerability assessment system. *International Journal of Remote Sensing* 13 (9), 1693-1708.
- TORRES, R., SNOEIJ, P., DAVIDSON, M., BIBBY, D., LOKAS, S., IEEE, 2012. The Sentinel-1 mission and its application capabilities. 2012 *Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Ieee, New York, 1703-1706.
- TOWNSEND, F.E., 1986. The Enhancement of Computer Classifications by Logical Smoothing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52 (2), 213-221.
- TOWNSHEND, J.R.G., HUANG, C., KALLURI, S.N.V., DEFRIES, R.S., LIANG, S., YANG, K., 2000. Beware of per-pixel characterization of land cover. *International Journal of Remote Sensing* 21 (4), 839-843.
- TOWNSHEND, J.R.G., JUSTICE, C.O., GURNEY, C., MCMANUS, J., 1992. The Impact of Misregistration on Change Detection. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30 (5), 1054-1060.

- TR32 - Transregional Collaborative Research Centre 32, 2006. Proposal for the Establishment and Funding of Transregional Collaborative Research Centre 32: Patterns in Soil-Vegetation-Atmosphere Systems: monitoring, modelling and data assimilation (2007 – 2008 – 2009 – 2010). Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- TR32 - Transregional Collaborative Research Centre 32, 2010. Application for the 2nd Funding Period of the Transregional Collaborative Research Centre 32: Patterns in Soil-Vegetation-Atmosphere Systems: monitoring, modelling and data assimilation (2011 – 2012 – 2013 – 2014). Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- TRIMBLE - Trimble Germany GmbH, 2012. eCognition Developer 8.7.2 User Guide. München.
- TUCKER, C.J., GRANT, D.M., DYKSTRA, J.D., 2004. NASA's Global Orthorectified Landsat Data Set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (3), 313-322.
- TUCKER, C.J., TOWNSHEND, J.R.G., GOFF, T.E., 1985. African Land-Cover Classification Using Satellite Data. *Science* 227 (4685), 369-375.
- TURKER, M., ARIKAN, M., 2005. Sequential masking classification of multi-temporal Landsat7 ETM+ images for field-based crop mapping in Karacabey, Turkey. *International Journal of Remote Sensing* 26 (17), 3813-3830.
- USGS - U.S. Geological Survey, 2010. SLC-off Products: Background. [http://landsat.usgs.gov/products\\_slcwoffbackground.php](http://landsat.usgs.gov/products_slcwoffbackground.php), 11.01.2012.
- USGS - U.S. Geological Survey, 2013a. Landsat 5 History. [http://landsat.usgs.gov/about\\_landsat5.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php), 12.08.2013.
- USGS - U.S. Geological Survey, 2013b. Landsat 8 (LDCM) History. [http://landsat.usgs.gov/about\\_ldcm.php](http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php), 09.08.2013.
- USGS - U.S. Geological Survey, 2013c. Landsat Processing Details. [http://landsat.usgs.gov/Landsat\\_Processing\\_Details.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php), 01.11.2013.
- USGS - U.S. Geological Survey, 2013d. Landsat Project Description. [http://landsat.usgs.gov/about\\_project\\_descriptions.php](http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php), 01.11.2013.
- VAN LEEUWEN, W.J.D., 2009. Visible, Near-IR, and Shortwave IR Spectral Characteristics of Terrestrial Surfaces. In: Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M. (Hrsg.), *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, Sage Publications Ltd, London, 33-50.
- VAN NIEL, T.G., MCVICAR, T.R., 2004. Determining temporal windows for crop discrimination with remote sensing: a case study in south-eastern Australia. *Computers and Electronics in Agriculture* 45 (1-3), 91-108.
- VAPNIK, V.N., 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, New York.
- VOGELMANN, J.E., HOWARD, S.M., YANG, L.M., LARSON, C.R., WYLIE, B.K., VAN DRIEL, N., 2001. Completion of the 1990s National Land Cover Data Set for the Conterminous United States from Landsat Thematic Mapper Data and Ancillary Data Sources. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67 (6), 650-662.
- VOGELMANN, J.E., SOHL, T., HOWARD, S.M., 1998a. Regional Characterization of Land Cover Using Multiple Sources of Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 64 (1), 45-57.
- VOGELMANN, J.E., SOHL, T.L., CAMPBELL, P.V., SHAW, D.M., 1998b. Regional Land Cover Characterization Using Landsat Thematic Mapper Data and Ancillary Data Sources. *Environmental Monitoring and Assessment* 51 (1-2), 415-428.
- WALTER, R., 2010a. Aachen und nördliche Umgebung: Mechernicher Voreifel, Aachen-Südlimburger Hügelland und westliche Niederrheinische Bucht. *Sammlung Geologischer Führer 100*, Gebr. Borntraeger, Stuttgart.
- WALTER, R., 2010b. Aachen und südliche Umgebung: Nordeifel und Nordost-Ardennen. *Sammlung Geologischer Führer 100*, Gebr. Borntraeger, Stuttgart.
- WANG, Z.J., ZIOU, D., ARMENAKIS, C., LI, D., LI, Q.Q., 2005. A comparative Analysis of Image Fusion Methods. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (6), 1391-1402.
- WARNER, T.A., ALMUTAIRI, A., LEE, J.Y., 2009a. Remote Sensing of Land Cover Change. *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, SAGE Publications Ltd, London, 459-472.
- WARNER, T.A., NELLIS, M.D., FOODY, G.M., 2009b. Remote Sensing Scale and Data Selection Issues. In: Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M. (Hrsg.), *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, SAGE Publications Ltd, London, 3-17.
- WARNER, T.A., NELLIS, M.D., FOODY, G.M., 2009c. *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. SAGE Publications Ltd, London.

- WASKE, B., BENEDIKTSSON, J.A., 2007. Fusion of Support Vector Machines for Classification of Multisensor Data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (12), 3858-3866.
- WECHSUNG, F., KRYSANOVA, V., FLECHSIG, M., SCHAPHOFF, S., 2000. May land use change reduce the water deficiency problem caused by reduced brown coal mining in the state of Brandenburg? *Landscape and Urban Planning* 51 (2-4), 177-189.
- WEICHEL, H., ROSSO, P., MARX, A., REIGBER, S., DOUGLASS, K., HEYNEN, M., 2012. The RapidEye Red Edge Band (White Paper). RapidEye, Brandenburg an der Havel, [http://www.rapideye.com/upload/Red\\_Edge\\_White\\_Paper.pdf](http://www.rapideye.com/upload/Red_Edge_White_Paper.pdf), 24.11.2012.
- WEISCHET, W., ENDLICHER, W., 2000. Regionale Klimatologie Teil 2: Die Alte Welt: Europa - Afrika - Asien. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- WHITE, J.D., KROH, G.C., PINDER, J.E., 1995. Forest Mapping at Lassen Volcanic National Park, California, Using Landsat TM Data and a Geographical Information System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61 (3), 299-305.
- WILKINSON, G.G., 1996. A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. *International Journal of Geographical Information Systems* 10 (1), 85-101.
- WILKINSON, G.G., MÉGIER, J., 1990. Evidential reasoning in a pixel classification hierarchy - a potential method for integrating image classifiers and expert system rules based on geographic context. *International Journal of Remote Sensing* 11 (10), 1963-1968.
- WILSON, H.M., AL-KAISI, M.M., 2008. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO<sub>2</sub> emissions in central Iowa. *Applied Soil Ecology* 39 (3), 264-270.
- WOODCOCK, C.E., STRAHLER, A.H., 1987. The Factor of Scale in Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment* 21 (3), 311-332.
- WU, T.F., LIN, C.J., WENG, R.C., 2004. Probability Estimates for Multi-class Classification by Pairwise Coupling. *Journal of Machine Learning Research* 5, 975-1005.
- WULDER, M.A., WHITE, J.C., GOWARD, S.N., MASEK, J.G., IRONS, J.R., HEROLD, M., COHEN, W.B., LOVELAND, T.R., WOODCOCK, C.E., 2008. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment* 112 (3), 955-969.
- XU, B., GONG, P., 2007. Land-use/Land-cover Classification with Multispectral and Hyperspectral EO-1 Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73 (8), 955-965.
- YAMAGUCHI, Y., KAHLE, A.B., TSU, H., KAWAKAMI, T., PNIEL, M., 1998. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36 (4), 1062-1071.
- YUAN, F., SAWAYA, K.E., LOEFFELHOLZ, B.C., BAUER, M.E., 2005. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 98 (2-3), 317-328.



# A Fehlermatrizen

Tabelle A.1: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)											Total	CE (%)	UA (%)		
	WG	WW	WR1	WR2	B	GL1	VF	NW	LW1	GW	LW2				GL3	GL2
WG	2769	30	0	0	0	30	0	0	0	0	0	2	0	2831	2,19	97,81
WW	456	5408	0	0	0	0	0	14	0	0	0	58	0	5936	8,89	91,11
WR1	49	0	1404	235	0	28	0	0	0	0	0	0	6	1722	18,47	81,53
WR2	0	0	7	1377	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1384	0,51	99,49
B	0	0	0	0	9063	0	0	0	0	0	0	0	0	9063	0,00	100,00
GL1	1293	0	0	0	1022	0	0	0	0	0	0	0	0	2315	55,85	44,15
VF	0	0	7	0	63	0	300	91	6	172	0	0	0	639	53,05	46,95
NW	0	0	0	0	0	0	3096	0	0	0	0	0	0	3096	0,00	100,00
LW1	0	0	0	0	0	0	318	3983	0	0	0	0	0	4301	7,39	92,61
GW	0	0	0	0	0	0	0	0	4993	0	0	0	0	4993	0,00	100,00
LW2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	389	0	0	0	390	0,26	99,74
GL3	52	430	19	0	0	12	0	28	0	0	558	15	1114	49,91	50,09	
GL2	1	0	0	0	0	1	0	73	0	0	2	369	446	17,26	82,74	
<b>Total</b>	<b>4620</b>	<b>5868</b>	<b>1437</b>	<b>1612</b>	<b>9127</b>	<b>1093</b>	<b>300</b>	<b>3505</b>	<b>4098</b>	<b>4999</b>	<b>561</b>	<b>620</b>	<b>390</b>	<b>38230</b>	-	-
<b>OE (%)</b>	<b>40,06</b>	<b>7,84</b>	<b>2,30</b>	<b>14,58</b>	<b>0,70</b>	<b>6,50</b>	<b>0,00</b>	<b>11,67</b>	<b>2,81</b>	<b>0,12</b>	<b>30,66</b>	<b>10,00</b>	<b>5,38</b>	-	<b>OA(%)</b>	<b>90,85</b>
<b>PA (%)</b>	<b>59,94</b>	<b>92,16</b>	<b>97,70</b>	<b>85,42</b>	<b>99,30</b>	<b>93,50</b>	<b>100,00</b>	<b>88,33</b>	<b>97,19</b>	<b>99,88</b>	<b>69,34</b>	<b>90,00</b>	<b>94,62</b>	-	<b>Kappa</b>	<b>0,90</b>

Tabelle A.2: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klassifikation (Pixel)	Referenzdaten (Pixel)													Total	CE (%)	UA (%)
	GL2	GL3	LW2	GW	LW1	NW	VF	GL1	B	WR1	WR2	WG	WW			
GL2	355	2	0	0	8	0	0	1	0	35	0	1	0	402	11,69	88,31
GL3	33	483	0	0	53	0	0	0	0	0	0	18	147	734	34,20	65,80
LW2	0	0	372	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	377	1,33	98,67
GW	0	0	0	4999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4999	0,00	100,00
LW1	0	0	0	0	3952	253	0	0	0	0	0	0	0	4205	6,02	93,98
NW	0	0	0	0	1	3247	0	0	0	0	0	0	0	3248	0,03	99,97
VF	0	0	189	0	0	0	300	0	42	0	0	0	0	531	43,50	56,50
GL1	0	0	0	0	0	0	1061	0	0	0	0	1322	0	2383	55,48	44,52
B	0	0	0	0	0	0	0	9085	4	0	0	0	0	9089	0,04	99,96
WR1	2	0	0	0	0	0	13	0	1304	17	11	0	0	1347	3,19	96,81
WR2	0	0	0	0	0	0	0	0	90	1595	0	0	0	1685	5,34	94,66
WG	0	2	0	0	3	0	0	18	0	0	2758	45	0	2826	2,41	97,59
WW	0	133	0	0	81	0	0	0	4	0	510	5676	6404	11,37	88,63	
Total	390	620	561	4999	4098	3505	300	1093	9127	1437	1612	4620	5868	38230	-	-
OE (%)	8,97	22,10	33,69	0,00	3,56	7,36	0,00	2,93	0,46	9,26	1,05	40,30	3,27	-	OA(%)	92,04
PA (%)	91,03	77,90	66,31	100,00	96,44	92,64	100,00	97,07	99,54	90,74	98,95	59,70	96,73	-	Kappa	0,91

Tabelle A.3: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)					Total	CE (%)	UA (%)
		WG	WW	WR1	WR2	B			
Klassifikation (Pixel)	Klasse	WG	WW	WR1	WR2	B	Total	CE (%)	UA (%)
	WG	4144	35	50	0	0	4229	2,01	97,99
	WW	476	5833	56	0	0	6365	8,36	91,64
	WR1	0	0	214	97	0	311	31,19	68,81
	WR2	0	0	0	1317	0	1317	0,00	100,00
	B	0	0	2	0	8148	8150	0,02	99,98
	<b>Total</b>	4620	5868	322	1414	8148	20372	-	-
	<b>OE (%)</b>	10,30	0,60	33,54	6,86	0,00	-	<b>OA(%)</b>	<b>96,49</b>
	<b>PA (%)</b>	89,70	99,40	66,46	93,14	100,00	-	<b>Kappa</b>	<b>0,95</b>

Tabelle A.4: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 05.05.2008 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)					Total	CE (%)	UA (%)
		WG	WW	WR1	WR2	B			
Klassifikation (Pixel)	Klasse	WG	WW	WR1	WR2	B	Total	CE (%)	UA (%)
	WG	4180	156	233	0	0	4569	8,51	91,49
	WW	440	5712	12	0	0	6164	7,33	92,67
	WR1	0	0	77	10	0	87	11,49	88,51
	WR2	0	0	0	1404	0	1404	0,00	100,00
	B	0	0	0	0	8148	8148	0,00	100,00
	<b>Total</b>	4620	5868	322	1414	8148	20372	-	-
	<b>OE (%)</b>	9,52	2,66	76,09	0,71	0,00	-	<b>OA(%)</b>	<b>95,82</b>
	<b>PA (%)</b>	90,48	97,34	23,91	99,29	100,00	-	<b>Kappa</b>	<b>0,94</b>

Tabelle A.5: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)													Total	CE (%)	UA (%)	
	BW2	BW1	ZR	GL2	GW	NW	LW	GL1	VF	WW	WR	WG	B				
BW2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,00	100,00
BW1	0	8724	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8724	0,00	100,00
ZR	0	0	4605	0	0	0	0	0	2	58	39	325	5029	8,43	91,57		
GL2	2	0	0	443	0	3	0	3	0	71	0	232	0	754	41,25	58,75	
GW	124	0	0	0	7985	0	0	0	0	0	0	0	0	8109	1,53	98,47	
NW	96	0	0	0	0	2681	0	0	0	0	0	0	0	2777	3,46	96,54	
LW	12	0	0	0	0	0	3252	9	0	0	0	0	0	3273	0,64	99,36	
GL1	0	0	0	0	0	0	8	1075	0	0	0	0	0	1083	0,74	99,26	
VF	9	0	6	0	3	0	0	0	325	0	0	0	0	4	347	6,34	93,66
WW	0	0	0	0	0	0	0	0	5412	0	1316	0	6728	19,56	80,44		
WR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1533	0	0	1533	0,00	100,00		
WG	0	0	0	0	0	0	0	0	23	27	2967	0	3017	1,66	98,34		
B	0	0	64	0	0	0	0	0	7	0	0	999	1070	6,64	93,36		
<b>Total</b>	<b>247</b>	<b>8724</b>	<b>4675</b>	<b>443</b>	<b>7988</b>	<b>2684</b>	<b>3260</b>	<b>1087</b>	<b>332</b>	<b>5508</b>	<b>1618</b>	<b>4554</b>	<b>1328</b>	<b>42448</b>	-	-	
<b>OE (%)</b>	<b>98,38</b>	<b>0,00</b>	<b>1,50</b>	<b>0,00</b>	<b>0,04</b>	<b>0,11</b>	<b>0,25</b>	<b>1,10</b>	<b>1,74</b>	<b>5,25</b>	<b>34,85</b>	<b>24,77</b>	-	<b>OA(%)</b>	<b>94,24</b>		
<b>PA (%)</b>	<b>1,62</b>	<b>100,00</b>	<b>98,50</b>	<b>100,00</b>	<b>99,96</b>	<b>99,89</b>	<b>99,75</b>	<b>98,90</b>	<b>97,89</b>	<b>98,26</b>	<b>94,75</b>	<b>65,15</b>	<b>75,23</b>	-	<b>Kappa</b>	<b>0,93</b>	

Tabelle A.6: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)											Total	CE (%)	UA (%)			
	BW2	BW1	ZR	GL2	GW	LW	NW	VF	GL1	WG	WW				WR	B	
BW2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,00	100,00
BW1	0	8724	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8724	0,00	100,00
ZR	0	0	4458	0	0	0	0	6	0	453	4	3	95	0	5019	11,18	88,82
GL2	0	0	3	438	0	0	0	0	0	5	4	0	0	0	450	2,67	97,33
GW	225	0	0	0	7988	0	101	12	0	0	0	0	0	0	8326	4,06	95,94
LW	0	0	0	0	0	3213	0	0	5	0	0	0	0	0	3218	0,16	99,84
NW	18	0	0	0	0	9	2583	3	0	0	0	0	0	0	2613	1,15	98,85
VF	0	0	0	0	0	0	0	229	0	0	0	0	0	0	229	0,00	100,00
GL1	0	0	0	1	0	38	0	0	1082	31	0	0	0	0	1152	6,08	93,92
WG	0	0	18	0	0	0	0	0	0	2629	22	35	0	0	2704	2,77	97,23
WW	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1436	5478	0	0	0	6918	20,82	79,18
WR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1580	0	0	1580	0,00	100,00
B	0	0	196	0	0	0	0	82	0	0	0	0	1233	0	1511	18,40	81,60
<b>Total</b>	<b>247</b>	<b>8724</b>	<b>4675</b>	<b>443</b>	<b>7988</b>	<b>3260</b>	<b>2684</b>	<b>332</b>	<b>1087</b>	<b>4554</b>	<b>5508</b>	<b>1618</b>	<b>1328</b>	<b>42448</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>OE (%)</b>	<b>98,38</b>	<b>0,00</b>	<b>4,64</b>	<b>1,13</b>	<b>0,00</b>	<b>1,44</b>	<b>3,76</b>	<b>31,02</b>	<b>0,46</b>	<b>42,27</b>	<b>0,54</b>	<b>2,35</b>	<b>7,15</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>OA(%)</b>	<b>93,38</b>
<b>PA (%)</b>	<b>1,62</b>	<b>100,00</b>	<b>95,36</b>	<b>98,87</b>	<b>100,00</b>	<b>98,56</b>	<b>96,24</b>	<b>68,98</b>	<b>99,54</b>	<b>57,73</b>	<b>99,46</b>	<b>97,65</b>	<b>92,85</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>Kappa</b>	<b>0,92</b>

Tabelle A.7: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klassifikation (Pixel)		Referenzdaten (Pixel)								Total	CE (%)	UA (%)
		WG	WW	WR2	B	KT	BW2	BW1	ZR			
Klassifikation (Pixel)	WG	3120	48	34	0	6	4	0	161	3373	7,50	92,50
	WW	1329	5445	0	0	0	0	0	0	6774	19,62	80,38
	WR2	0	0	1583	0	0	0	0	0	1583	0,00	100,00
	B	3	3	0	1326	0	0	0	1990	3322	60,08	39,92
	KT	13	7	0	0	285	0	0	0	305	6,56	93,44
	BW2	0	0	0	0	0	57	149	0	206	72,33	27,67
	BW1	0	0	0	0	9	67	660	158	894	26,17	73,83
	ZR	91	2	0	1	145	97	59	2368	2763	14,30	85,70
	Total	4556	5505	1617	1327	445	225	868	4677	19220	-	-
	OE (%)	31,52	1,09	2,10	0,08	35,96	74,67	23,96	49,37	-	OA(%)	77,23
PA (%)	68,48	98,91	97,90	99,92	64,04	25,33	76,04	50,63	-	Kappa	0,72	

Tabelle A.8: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der IRS-P6-Szene vom 10.06.2008 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klassifikation (Pixel)		Referenzdaten (Pixel)							Total	CE (%)	UA (%)	
		WG	WW	WR2	B	ZR	BW1	BW2				KT
Klassifikation (Pixel)	WG	2937	25	39	0	415	15	0	6	3437	14,55	85,45
	WW	1496	5475	0	0	0	0	0	0	6971	21,46	78,54
	WR2	0	0	1578	0	0	0	0	0	1578	0,00	100,00
	B	0	0	0	1327	1101	0	0	0	2428	45,35	54,65
	ZR	20	5	0	0	3115	0	0	32	3172	1,80	98,20
	BW1	0	0	0	0	46	660	0	0	706	6,52	93,48
	BW2	0	0	0	0	0	193	225	0	418	46,17	53,83
	KT	103	0	0	0	0	0	0	407	510	20,20	79,80
	Total	4556	5505	1617	1327	4677	868	225	4677	19220	-	-
	OE (%)	35,54	0,54	2,41	0,00	33,40	23,96	0,00	8,54	-	OA(%)	81,81
PA (%)	64,46	99,46	97,59	100,00	66,60	76,04	100,00	91,46	-	Kappa	0,77	

Tabelle A.9: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-7-Szene vom 15.07.2008 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)									Total	CE (%)	UA (%)
	ZR	M	GT4	KT	SG	GT3	GT1	GT2				
ZR	4213	63	0	153	31	0	0	0	0	4460	5,54	94,46
M	0	493	0	0	23	0	0	0	0	516	4,46	95,54
GT4	4	13	1421	0	0	193	99	0	0	1730	17,86	82,14
KT	8	0	0	868	0	0	0	0	0	876	0,91	99,09
SG	18	38	0	0	736	0	0	0	0	792	7,07	92,93
GT3	20	0	590	0	18	653	0	0	0	1281	49,02	50,98
GT1	0	0	410	0	0	0	1144	0	0	1554	26,38	73,62
GT2	0	0	2	0	0	0	0	2010	0	2012	0,10	99,90
<b>Total</b>	4263	607	2423	1021	808	846	1243	2010	0	13221	-	-
<b>OE (%)</b>	1,17	18,78	41,35	14,99	8,91	22,81	7,96	0,00	-	-	<b>OA(%)</b>	<b>87,27</b>
<b>PA (%)</b>	98,83	81,22	58,65	85,01	91,09	77,19	92,04	100,00	-	-	<b>Kappa</b>	<b>0,84</b>

Tabelle A.10: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-7-Szene vom 15.07.2008 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)									Total	CE (%)	UA (%)
	ZR	M	GT4	KT	SG	GT3	GT1	GT2				
ZR	4232	124	2	20	65	0	0	0	0	4443	4,75	95,25
M	0	479	0	0	48	0	0	0	0	527	9,11	90,89
GT4	0	0	1465	0	0	105	19	4	0	1593	8,04	91,96
KT	23	0	0	1001	0	0	0	0	0	1024	2,25	97,75
SG	4	4	0	0	659	0	0	0	0	667	1,20	98,80
GT3	4	0	441	0	36	741	0	0	0	1222	39,36	60,64
GT1	0	0	511	0	0	0	1224	0	0	1735	29,45	70,55
GT2	0	0	4	0	0	0	0	2006	0	2010	0,20	99,80
<b>Total</b>	4263	607	2423	1021	808	846	1243	2010	0	13221	-	-
<b>OE (%)</b>	0,73	21,09	39,54	1,96	18,44	12,41	1,53	0,20	-	-	<b>OA(%)</b>	<b>89,31</b>
<b>PA (%)</b>	99,27	78,91	60,46	98,04	81,56	87,59	98,47	99,80	-	-	<b>Kappa</b>	<b>0,87</b>

Tabelle A.11: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)													Total	CE (%)	UA (%)		
	ZR	M	GL1	VF	NW	LW	GW	GL2	GT1	GT2	GT3	GT4	GT4					
ZR	4442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4442	0,00	100,00	
M	1	728	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	729	0,14	99,86	
GL1	0	3	961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	964	0,31	99,69	
VF	0	0	0	207	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	216	4,17	95,83	
NW	0	0	0	0	2610	5	0	0	0	0	0	0	0	0	2615	0,19	99,81	
LW	0	10	0	0	3	4157	0	0	0	0	0	0	0	0	4170	0,31	99,69	
GW	0	0	0	0	0	0	9325	0	0	0	0	0	0	0	9325	0,00	100,00	
GL2	1	15	2	0	0	0	0	1132	0	0	0	8	82	1240	8,71	91,29		
GT1	0	0	0	3	0	0	0	0	1529	65	36	0	0	1633	6,37	93,63		
GT2	0	0	0	0	0	0	0	0	205	2492	4	0	0	2701	7,74	92,26		
GT3	0	0	0	2	0	0	0	0	413	25	742	3	3	1185	37,38	62,62		
GT4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1113	1122	1122	0,80	99,20		
Total	4448	757	963	212	2613	4162	9334	1132	2147	2582	794	1198	30342	-	-	-		
OE (%)	0,13	3,83	0,21	2,36	0,11	0,12	0,10	0,00	28,78	3,49	6,55	7,10	-	-	-	OA(%)	97,02	
PA (%)	99,87	96,17	99,79	97,64	99,89	99,88	99,90	100,00	71,22	96,51	93,45	92,90	-	-	-	-	Kappa	0,97



Tabelle A.12: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)													Total	CE (%)	UA (%)
	ZR	M	GL1	VF	NW	LW	GW	GL2	GT1	GT2	GT3	GT4				
ZR	4439	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4441	0,05	99,95
M	0	715	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	0,69	99,31
GL1	0	1	956	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	957	0,10	99,90
VF	0	0	0	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159	0,00	100,00
NW	0	0	0	0	2612	32	1	0	0	0	0	0	0	2645	1,25	98,75
LW	0	19	0	0	1	4130	0	0	0	0	0	0	0	4150	0,48	99,52
GW	0	0	0	0	0	0	9333	0	0	0	0	0	0	9333	0,00	100,00
GL2	0	21	2	0	0	0	0	1123	0	0	12	0	0	1158	3,02	96,98
GT1	0	0	0	10	0	0	0	0	1818	52	220	0	0	2100	13,43	86,57
GT2	0	0	0	41	0	0	0	0	129	2530	0	0	0	2700	6,30	93,70
GT3	0	0	0	2	0	0	0	2	200	0	688	1	893	893	22,96	77,04
GT4	11	0	0	0	0	0	0	7	0	0	8	1197	1223	1223	2,13	97,87
<b>Total</b>	<b>4450</b>	<b>758</b>	<b>963</b>	<b>212</b>	<b>2613</b>	<b>4162</b>	<b>9334</b>	<b>1132</b>	<b>2147</b>	<b>2582</b>	<b>928</b>	<b>1198</b>	<b>30479</b>	-	-	-
<b>OE (%)</b>	<b>0,25</b>	<b>5,67</b>	<b>0,73</b>	<b>25,00</b>	<b>0,04</b>	<b>0,77</b>	<b>0,01</b>	<b>0,80</b>	<b>15,32</b>	<b>2,01</b>	<b>25,86</b>	<b>0,08</b>	-	-	<b>OA(%)</b>	<b>97,44</b>
<b>PA (%)</b>	<b>99,75</b>	<b>94,33</b>	<b>99,27</b>	<b>75,00</b>	<b>99,96</b>	<b>99,23</b>	<b>99,99</b>	<b>99,20</b>	<b>84,68</b>	<b>97,99</b>	<b>74,14</b>	<b>99,92</b>	-	-	<b>Kappa</b>	<b>0,97</b>

Tabelle A.13: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)						Total	CE (%)	UA (%)	
		ZR	M	GT1	GT2	GT4	GT3				
Klassifikation (Pixel)	Klasse	ZR	4442	10	0	0	0	0	4452	0,22	99,78
	M	1	744	0	0	0	0	745	0,13	99,87	
	GT1	0	0	1529	65	0	36	1630	6,20	93,80	
	GT2	0	0	205	2492	0	4	2701	7,74	92,26	
	GT4	7	4	0	0	1195	49	1255	4,78	95,22	
	GT3	0	0	413	25	3	839	1280	34,45	65,55	
	<b>Total</b>	4450	758	2147	2582	1198	928	12063	-	-	
<b>OE (%)</b>	0,18	1,85	28,78	3,49	0,25	9,59	-	<b>OA(%)</b>	<b>93,19</b>		
<b>PA (%)</b>	99,82	98,15	71,22	96,51	99,75	90,41	-	<b>Kappa</b>	<b>0,91</b>		

Tabelle A.14: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 09.09.2008 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)						Total	CE (%)	UA (%)	
		GT4	GT3	GT2	GT1	M	ZR				
Klassifikation (Pixel)	Klasse	GT4	1180	0	0	0	3	11	1194	1,17	98,83
	GT3	1	696	0	217	0	0	914	23,85	76,15	
	GT2	0	0	2530	129	0	0	2659	4,85	95,15	
	GT1	0	220	52	1801	0	0	2073	13,12	86,88	
	M	0	0	0	0	752	0	752	0,00	100,00	
	ZR	17	12	0	0	3	4439	4471	0,72	99,28	
	<b>Total</b>	1198	928	2582	2147	758	4450	12063	-	-	
<b>OE (%)</b>	1,50	25,00	2,01	16,12	0,79	0,25	-	<b>OA(%)</b>	<b>94,49</b>		
<b>PA (%)</b>	98,50	75,00	97,99	83,88	99,21	99,75	-	<b>Kappa</b>	<b>0,93</b>		

Tabelle A.15: Error Matrix des ALL1-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)																Total	CE (%)	UA (%)			
	GT1	GT2	BSF	GT3	GT4	GL1	MO	WR2	GL2	VF	GL3	GW	LW	NW	GL4	WR1				GL5	GL6	
GT1	742	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	748	0,80	99,20
GT2	61	1064	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1128	5,67	94,33
BSF	0	0	4790	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4794	0,08	99,92
GT3	0	60	0	286	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	354	19,21	80,79
GT4	0	1	0	5	2675	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	2698	0,85	99,15
GL1	0	0	0	0	0	757	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	760	0,39	99,61
MO	0	0	15	0	0	0	1010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1026	1,56	98,44
WR2	5	0	0	0	0	0	0	1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2001	0,25	99,75
GL2	0	0	0	0	0	0	0	16	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	16,33	83,67
VF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	286	0	7	0	0	0	0	0	0	0	293	2,39	97,61
GL3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	222	0	0	0	0	0	0	47	0	269	17,47	82,53
GW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5581	0	0	0	0	0	0	0	5581	0,00	100,00
LW	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	1604	1	0	0	32	0	0	1671	4,01	95,99
NW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2568	0	0	0	0	0	2569	0,04	99,96
GL4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	53	0	85	0	33	0	0	172	50,58	49,42
WR1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	508	0	0	0	509	0,20	99,80
GL5	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	10	0	10	0	448	0	0	476	5,88	94,12
GL6	0	0	0	0	0	0	5	0	1	0	171	0	0	0	0	0	0	656	0	833	21,25	78,75
<b>Total</b>	<b>808</b>	<b>1131</b>	<b>4805</b>	<b>294</b>	<b>2683</b>	<b>801</b>	<b>1018</b>	<b>2012</b>	<b>83</b>	<b>286</b>	<b>393</b>	<b>5589</b>	<b>1687</b>	<b>2569</b>	<b>96</b>	<b>508</b>	<b>513</b>	<b>704</b>	<b>25980</b>	-	-	-
<b>OE (%)</b>	<b>8,17</b>	<b>5,92</b>	<b>0,31</b>	<b>2,72</b>	<b>0,30</b>	<b>5,49</b>	<b>0,79</b>	<b>0,80</b>	<b>1,20</b>	<b>0,00</b>	<b>43,51</b>	<b>0,14</b>	<b>4,92</b>	<b>0,04</b>	<b>11,46</b>	<b>0,00</b>	<b>12,67</b>	<b>6,82</b>	-	-	<b>OA(%)</b>	<b>97,61</b>
<b>PA (%)</b>	<b>91,83</b>	<b>94,08</b>	<b>99,69</b>	<b>97,28</b>	<b>99,70</b>	<b>94,51</b>	<b>99,21</b>	<b>99,20</b>	<b>98,80</b>	<b>100,00</b>	<b>56,49</b>	<b>99,86</b>	<b>95,08</b>	<b>99,96</b>	<b>88,54</b>	<b>100,00</b>	<b>87,33</b>	<b>93,18</b>	-	-	<b>Kappa</b>	<b>0,97</b>

Tabelle A.16: Error Matrix des ALL2-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)													Total	CE (%)	UA (%)	
	WR	GT1	GT2	KT	HF	GL	VF1	VF2	LW	NW	GW	GT3					
WR	1358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1358	0,00	100,00
GT1	0	2229	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	262	2494	10,63	89,37	
GT2	0	8	3497	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	3510	0,37	99,63	
KT	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0,00	100,00	
HF	0	0	0	245	2418	0	0	0	0	0	0	0	0	2663	9,20	90,80	
GL	0	0	1	0	0	271	0	0	1	0	0	0	0	273	0,73	99,27	
VF1	0	0	0	0	0	170	11	0	0	0	0	0	0	181	6,08	93,92	
VF2	0	0	0	0	0	3	47	0	0	0	0	0	0	50	6,00	94,00	
LW	0	31	34	0	0	25	0	986	4	0	0	0	0	1080	8,70	91,30	
NW	0	0	0	0	0	0	0	0	229	0	0	0	0	229	0,00	100,00	
GW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74	0	0	0	74	0,00	100,00	
GT3	0	0	0	0	0	110	0	0	0	0	0	230	0	340	32,35	67,65	
Total	1358	2268	3535	276	2418	406	173	58	992	233	74	492	12283	-	-	-	
OE (%)	0,00	1,72	1,07	88,77	0,00	33,25	1,73	18,97	0,60	1,72	0,00	53,25	-	OA(%)	93,95	-	
PA (%)	100,00	98,28	98,93	11,23	100,00	66,75	98,27	81,03	99,40	98,28	100,00	46,75	-	Kappa	0,93	-	

Tabelle A.17: Error Matrix des FB1-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)							Total	CE (%)	UA (%)	
		WG	HF	WW1	WW2	SG	WR2	WR1				
Klassifikation (Pixel)	Klasse	WG	3328	0	53	364	0	0	0	3745	11,13	88,87
	HF	0	8569	0	0	2	1	3	8575	0,07	99,93	
	WW1	41	0	113	358	0	0	0	512	77,93	22,07	
	WW2	23	0	102	5518	0	0	0	5643	2,22	97,78	
	SG	5	0	24	14	1409	0	0	1452	2,96	97,04	
	WR2	0	0	0	0	31	3023	1	3055	1,05	98,95	
	WR1	0	0	0	0	0	0	210	210	0,00	100,00	
	Total	3397	8569	292	6254	1442	3024	214	23192	-	-	
	OE (%)	2,03	0,00	61,30	11,77	2,29	0,03	1,87	-	OA(%)	95,59	
	PA (%)	97,97	100,00	38,70	88,23	97,71	99,97	98,13	-	Kappa	0,94	

Tabelle A.18: Error Matrix des FB2-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)						Total	CE (%)	UA (%)	
		WG	HF	WW1	WW2	WR2	WR1				
Klassifikation (Pixel)	Klasse	WG	3332	0	55	364	0	0	3751	11,17	88,83
	HF	0	8569	0	0	1	3	8573	0,05	99,95	
	WW1	41	0	113	358	0	0	512	77,93	22,07	
	WW2	24	0	124	5532	0	0	5680	2,61	97,39	
	SG	0	0	0	0	3023	1	3024	0,03	99,97	
	WR2	0	0	0	0	0	210	210	0,00	100,00	
	Total	3397	8569	292	6254	3024	214	21750	-	-	
	OE (%)	1,91	0,00	61,30	11,54	0,03	1,87	-	OA(%)	95,54	
	PA (%)	98,09	100,00	38,70	88,46	99,97	98,13	-	Kappa	0,94	

Tabelle A.19: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene von 2009 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)							Total	CE (%)	UA (%)		
		M	KT1	ZR	KT2	BW	WG	WW				WR	
Klassifikation (Pixel)	Klasse	MO	2394	1	566	0	173	0	0	0	3134	23,61	76,39
	KT1	0	1324	241	3	3	0	0	0	1571	15,72	84,28	
	ZR	7	146	3093	1	4	0	0	1	3252	4,89	95,11	
	KT2	0	106	40	227	0	1	1	37	412	44,90	55,10	
	BW	0	0	0	0	769	0	0	0	769	0,00	100,00	
	WG	0	3	0	28	0	1591	38	6	1666	4,50	95,50	
	WW	0	0	0	0	2	774	6092	0	6868	11,30	88,70	
	WR	0	0	0	50	0	0	0	1228	1278	3,91	96,09	
	Total	2401	1580	3940	309	951	2366	6131	1272	18950	-	-	
	OE (%)	0,29	16,20	21,50	26,54	19,14	32,76	0,64	3,46	-	OA(%)	88,22	
PA (%)	99,71	83,80	78,50	73,46	80,86	67,24	99,36	96,54	-	Kappa	0,85		

Tabelle A.20: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 27.07.2009 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)											Total	CE (%)	UA (%)	
	GL1	GL2	GL3	GL4	GW	NW	VF	LW	ZR	M	WW				WG
GL1	1474	0	0	0	0	0	0	0	120	15	0	0	1609	8,39	91,61
GL2	0	647	0	6	0	7	0	0	11	6	0	0	677	4,43	95,57
GL3	0	0	362	10	0	0	0	0	0	0	0	0	372	2,69	97,31
GL4	0	32	12	1047	0	0	3	22	200	0	0	0	1316	20,44	79,56
GW	0	0	0	0	3655	0	0	0	0	0	0	0	3655	0,00	100,00
NW	0	0	0	0	0	2289	0	0	0	0	0	0	2289	0,00	100,00
VF	0	0	0	0	59	0	238	0	0	0	5	0	302	21,19	78,81
LW	0	0	0	0	0	0	0	1053	0	0	0	0	1053	0,00	100,00
ZR	76	0	10	0	0	0	0	0	4363	45	0	0	4494	2,91	97,09
M	0	0	0	1	0	0	105	0	2138	0	0	0	2244	4,72	95,28
WW	0	0	0	0	0	0	5	0	0	6049	0	0	6054	0,08	99,92
WG	0	0	0	0	0	0	5	0	0	3	0	2870	2878	0,28	99,72
Total	1550	679	384	1064	3714	2296	248	1161	4516	2407	6054	2870	26943	-	-
OE (%)	4,90	4,71	5,73	1,60	1,59	0,30	4,03	9,30	3,39	11,18	0,08	0,00	-	OA(%)	97,19
PA (%)	95,10	95,29	94,27	98,40	98,41	99,70	95,97	90,70	96,61	88,82	99,92	100,00	-	Kappa	0,97

Tabelle A.21: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der ASTER-Szene vom 27.09.2009 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)					Total	CE (%)	UA (%)
		WW	WG	ZR	M1	M2			
Klassifikation (Pixel)	WW	6054	41	0	10	0	6105	0,84	99,16
	WG	69	2888	0	5	0	2962	2,50	97,50
	ZR	0	0	4516	29	90	4635	2,57	97,43
	M1	0	0	0	427	178	605	29,42	70,58
	M2	0	0	0	3	2166	2169	0,14	99,86
	Total	6123	2929	4516	474	2434	16476	-	-
OE (%)		1,13	1,40	0,00	9,92	11,01	-	OA(%)	97,42
PA (%)		98,87	98,60	100,00	90,08	88,99	-	Kappa	0,96

Tabelle A.22: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 15.08.2009 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)																Total	CE (%)	UA (%)	
	MO3	MO2	MO1	LW2	VF2	VF1	GL3	GL2	GL1	GW	LW	NW	WW	WG	ZR	M				
MO3	5181	0	6	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5218	0,71	99,29	
MO2	0	379	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	380	0,26	99,74	
MO1	54	0	417	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	473	11,84	88,16	
LW2	34	0	2	1712	0	0	0	0	0	401	0	0	0	0	0	0	2149	20,34	79,66	
VF2	0	0	0	0	238	4	0	0	2506	0	0	0	0	0	0	0	2748	91,34	8,66	
VF1	0	3	0	0	11	211	0	0	50	6	2	2	0	0	0	0	285	25,96	74,04	
GL3	8	51	16	6	1	0	800	0	1	389	1	0	0	0	1531	3	2807	71,50	28,50	
GL2	0	0	0	0	0	0	38	906	140	0	0	0	0	0	0	0	1084	16,42	83,58	
GL1	0	0	0	2	0	0	2	202	377	13	0	0	0	0	38	0	634	40,54	59,46	
GW	0	0	0	0	0	2	0	0	5491	0	0	0	0	0	0	0	5493	0,04	99,96	
LW	0	0	7	151	0	0	0	1	0	3798	18	0	0	0	0	0	3975	4,45	95,55	
NW	0	0	0	6	0	0	0	0	0	157	4428	0	0	0	0	0	4591	3,55	96,45	
WW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3841	0	266	0	0	4107	6,48	93,52	
WG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	334	1617	9	0	0	1976	18,17	81,83	
ZR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	4383	124	4512	2,86	97,14		
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3201	3201	0,00	100,00		
<b>Total</b>	<b>5277</b>	<b>433</b>	<b>448</b>	<b>1908</b>	<b>250</b>	<b>217</b>	<b>840</b>	<b>1108</b>	<b>518</b>	<b>8048</b>	<b>4452</b>	<b>4177</b>	<b>1883</b>	<b>5961</b>	<b>3328</b>	<b>43633</b>	-	-		
<b>OE (%)</b>	<b>1,08</b>	<b>12,47</b>	<b>6,92</b>	<b>10,27</b>	<b>4,80</b>	<b>2,76</b>	<b>4,76</b>	<b>18,23</b>	<b>27,22</b>	<b>31,77</b>	<b>20,63</b>	<b>8,04</b>	<b>14,13</b>	<b>26,47</b>	<b>3,82</b>	-	-	<b>OA(%)</b>	<b>84,75</b>	
<b>PA (%)</b>	<b>98,18</b>	<b>87,53</b>	<b>93,08</b>	<b>89,73</b>	<b>95,20</b>	<b>97,24</b>	<b>95,24</b>	<b>81,77</b>	<b>72,78</b>	<b>68,23</b>	<b>79,37</b>	<b>99,46</b>	<b>91,96</b>	<b>85,87</b>	<b>73,53</b>	<b>96,18</b>	-	-	<b>Kappa</b>	<b>0,83</b>



Tabelle A.23: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 15.08.2009 (ZS4). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)					Total	CE (%)	UA (%)
		WW	WG	KT	ZR	M			
Klassifikation (Pixel)	WW	3899	150	0	0	0	4049	3,70	96,30
	WG	290	1729	135	0	0	2154	19,73	80,27
	KT	0	4	1032	1873	4	2913	64,57	35,43
	ZR	0	0	0	3992	1	3993	0,03	99,97
	M	0	0	0	0	3324	3324	0,00	100,00
	Total	4189	1883	1167	5865	3329	16433	-	-
OE (%)		6,92	8,18	11,57	31,94	0,15	-	OA(%)	85,05
PA (%)		93,08	91,82	88,43	68,06	99,85	-	Kappa	0,81

Tabelle A.24: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 31.08. 2009 (ZS5). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)					Total	CE (%)	UA (%)
		M	ZR	GT	SG1	SG2			
Klassifikation (Pixel)	M	2424	165	0	0	0	2589	6,37	93,63
	ZR	236	5062	0	6	0	5304	4,56	95,44
	GT	7	0	5566	0	74	5647	1,43	98,57
	SG1	0	0	0	85	0	85	0,00	100,00
	SG2	41	0	59	0	643	743	13,46	86,54
	Total	2708	5227	5625	91	717	14368	-	-
OE (%)		10,49	3,16	1,05	6,59	10,32	-	OA(%)	95,91
PA (%)		89,51	96,84	98,95	93,41	89,68	-	Kappa	0,94

Tabelle A.25: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 08.09.2009 (ZS6).  
Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)											Total	CE (%)	UA (%)	
	VF	GW	NW	GT1	LW	HF	M	GL1	GL2	GT2	GT3				
VF	302	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	317	4,73	95,27
GW	0	3134	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3134	0,00	100,00
NW	0	0	2172	0	98	0	0	0	0	0	0	0	2270	4,32	95,68
GT1	0	0	0	697	0	0	0	0	0	0	0	0	697	0,00	100,00
LW	0	0	116	0	1344	0	0	0	0	0	0	0	1460	7,95	92,05
HF	0	0	0	0	0	755	0	0	0	0	0	0	755	0,00	100,00
M	0	0	0	0	0	0	917	0	0	0	0	0	917	0,00	100,00
GL1	0	0	0	0	0	0	1	41	6	0	0	0	48	14,58	85,42
GL2	0	0	0	35	0	31	0	24	169	41	0	0	300	43,67	56,33
GT2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	191	58	252	24,21	75,79	
GT3	0	0	0	0	0	0	0	0	6	240	246	2,44	97,56		
<b>Total</b>	<b>302</b>	<b>3149</b>	<b>2288</b>	<b>735</b>	<b>1442</b>	<b>786</b>	<b>918</b>	<b>65</b>	<b>175</b>	<b>238</b>	<b>298</b>	<b>10396</b>	-	-	
<b>OE (%)</b>	<b>0,00</b>	<b>0,48</b>	<b>5,07</b>	<b>5,17</b>	<b>6,80</b>	<b>3,94</b>	<b>0,11</b>	<b>36,92</b>	<b>3,43</b>	<b>19,75</b>	<b>19,46</b>	-	<b>OA(%)</b>	<b>95,83</b>	
<b>PA (%)</b>	<b>100,00</b>	<b>99,52</b>	<b>94,93</b>	<b>94,83</b>	<b>93,20</b>	<b>96,06</b>	<b>99,89</b>	<b>63,08</b>	<b>96,57</b>	<b>80,25</b>	<b>80,54</b>	-	<b>Kappa</b>	<b>0,95</b>	

Tabelle A.26: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der RapidEye-Szene vom 08.09.2009 (ZS6). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)				Total	CE (%)	UA (%)
	GT1	HF	M	GT2			
GT1	717	0	0	17	734	2,32	97,68
HF	0	784	0	0	784	0,00	100,00
M	0	0	918	0	918	0,00	100,00
GT2	18	0	0	221	239	7,53	92,47
Total	735	784	918	238	2675	-	-
OE (%)	2,45	0,00	0,00	7,14	-	OA(%)	98,69
PA (%)	97,55	100,00	100,00	92,86	-	Kappa	0,98

Tabelle A.27: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der OST-Szene vom 23.05.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)																Total	CE (%)	JA (%)	UA (%)
	B	WW	WG	WR	GL1	NW	GW	LW1	LW2	GL2	GL3	GH	MO	LW3	VF1	VF2				
B	8782	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	278	0	34	39	9133	3,84	96,16	
WW	0	6056	1221	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7282	16,84	83,16	
WG	0	1910	4283	0	41	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6240	31,36	68,64	
WR	0	0	0	4667	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4671	0,09	99,91	
GL1	0	0	147	0	3998	0	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4220	5,26	94,74	
NW	0	0	0	0	0	4999	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	5021	0,44	99,56	
GW	0	0	0	0	0	1	7323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7324	0,01	99,99	
LW1	0	8	84	0	14	0	4466	34	0	2	0	0	0	93	0	0	4701	5,00	95,00	
LW2	0	0	0	0	0	0	4	398	0	0	0	0	0	4	0	0	406	1,97	98,03	
GL2	0	1	0	0	0	0	0	0	342	3	0	2	68	0	0	0	416	17,79	82,21	
GL3	0	19	264	0	31	0	25	2	59	2461	0	0	7	0	0	0	2868	14,19	85,81	
GH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	557	22	2	0	0	0	581	4,13	95,87	
MO	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	160	0	0	0	0	162	1,23	98,77	
LW3	0	2	0	0	0	0	2	3	52	0	4	1	898	0	0	0	962	6,65	93,35	
VF1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	610	0	0	611	0,16	99,84	
VF2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	89	0,00	100,00	
Total	8784	7996	5999	4667	4088	5000	7323	4583	437	453	2466	562	463	1094	644	128	54687	-	-	
OE (%)	0,02	24,26	28,60	0,00	2,20	0,02	0,00	2,55	8,92	24,50	0,20	0,89	65,44	17,92	5,28	30,47	-	OA(%)	91,59	
PA (%)	99,98	75,74	71,40	100,00	97,80	99,98	100,00	97,45	91,08	75,50	99,80	99,11	34,56	82,08	94,72	69,53	-	Kappa	0,91	

Tabelle A.28: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der OST-Szene vom 23.05.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)				Total	CE (%)	UA (%)
	B	WW	WG	WR			
B	6903	11	1	1	6916	0,19	99,81
WW	0	8023	1133	0	9156	12,37	87,63
WG	0	1276	3518	0	4794	26,62	73,38
WR	0	0	0	6406	6406	0,00	100,00
Total	6903	9310	4652	6407	27272	-	-
OE (%)	0,00	13,82	24,38	0,02	-	OA(%)	91,12
PA (%)	100,00	86,18	75,62	99,98	-	Kappa	0,88

Tabelle A.29: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der WEST-Szene vom 20.05.2010 (ZSI). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)														Total	CE (%)	UA (%)	
	B	WW	WG	WR	GL1	NW	LW1	GW	GL2	GL3	GH	MO	LW2	VF1				VF2
B	2930	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	188	0	29	6	3153	7,07	92,93
WW	0	1535	51	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1590	3,46	96,54
WG	0	273	826	0	219	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1319	37,38	62,62
WR	0	0	0	3273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3273	0,00	100,00
GL1	0	0	7	0	2822	0	130	0	0	0	0	0	0	0	0	2959	4,63	95,37
NW	0	0	0	0	0	3598	6	0	0	0	0	1	87	0	0	3692	2,55	97,45
LW1	0	1	0	0	3	0	3098	0	8	0	0	0	55	0	0	3165	2,12	97,88
GW	0	0	0	0	0	0	0	3449	0	0	0	0	0	2	0	3451	0,06	99,94
GL2	0	0	0	0	0	1	0	0	407	0	1	14	34	3	0	460	11,52	88,48
GL3	1	0	8	1	0	0	2	0	34	1031	0	0	1	0	0	1078	4,36	95,64
GH	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	545	6	22	1	0	576	5,38	94,62
MO	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	247	1	1	2	261	5,36	94,64
LW2	0	0	0	0	0	4	1	0	235	0	16	6	894	0	0	1156	22,66	77,34
VF1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	288	1	291	1,03	98,97
VF2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	121	121	0,00	100,00
Total	2941	1809	892	3274	3045	3605	3241	3450	684	1031	562	463	1094	324	130	26545	-	-
OE (%)	0,37	15,15	7,40	0,03	7,32	0,19	4,41	0,03	40,50	0,00	3,02	46,65	18,28	11,11	6,92	-	OA(%)	94,42
PA (%)	99,63	84,85	92,60	99,97	92,68	99,81	95,59	99,97	59,50	100,00	96,98	53,35	81,72	88,89	93,08	-	Kappa	0,94

Tabelle A.30: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der WEST-Szene vom 20.05.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)				Total	CE (%)	UA (%)
	B	WW	WG	WR			
<b>B</b>	6262	0	0	0	6262	0,00	100,00
<b>WW</b>	1	1544	9	0	1554	0,64	99,36
<b>WG</b>	0	164	765	1	930	17,74	82,26
<b>WR</b>	0	0	0	3199	3199	0,00	100,00
<b>Total</b>	6263	1708	774	3200	11945	-	-
<b>OE (%)</b>	0,02	9,60	1,16	0,03	-	<b>OA(%)</b>	<b>98,54</b>
<b>PA (%)</b>	99,98	90,40	98,84	99,97	-	<b>Kappa</b>	<b>0,98</b>

Tabelle A.31: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der HAUPT-Szene vom 07.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)																Total	CE (%)	UA (%)					
	WG	WR	GL1	BG	NW	GW	LW1	LW2	GL2	GL3	GH	MO1	LW3	VF1	VF2	ZR				WW	MO1	KT	MO2	
WG	2219	92	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	8	16	0	2	0	0	0	2349	5,53	94,47
WR	74	3651	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	16	2	0	3	0	53	0	0	3833	4,75	95,25
GL1	0	1	2346	70	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2430	3,46	96,54
BG	0	0	140	574	0	0	57	1	0	0	0	131	8	0	0	0	7	0	0	0	0	918	37,47	62,53
NW	0	0	0	0	5807	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	5815	0,14	99,86
GW	0	0	0	0	0	7883	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7883	0,00	100,00
LW1	0	0	0	71	41	0	4476	298	0	0	2	81	0	0	0	0	11	0	0	0	0	4980	10,12	89,88
LW2	0	0	0	0	0	0	225	46	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	287	83,97	16,03
GL2	0	0	0	63	1	0	0	0	589	0	161	59	8	0	0	0	0	0	0	0	27	908	35,13	64,87
GL3	187	11	0	84	0	0	0	0	1356	0	0	0	0	0	1	0	627	2	8	0	2276	40,42	59,58	
GH	0	0	0	0	24	0	0	0	2	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	121	34,71	65,29
MO1	0	0	0	169	0	0	4	0	0	0	2	433	24	0	0	0	0	0	0	0	0	635	31,81	68,19
LW3	0	0	3	30	1	0	106	1	0	1	2	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1041	13,54	86,64
VF1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	832	2	0	0	0	0	0	0	834	0,24	99,76
VF2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	156	0	0	0	0	0	0	156	0,00	100,00
ZR	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	48	7522	65	0	429	0	8141	7,60	92,40	
WW	51	0	0	77	0	0	10	0	28	4	0	3	0	1	0	0	7081	356	0	3	7614	7,00	93,00	
MO1	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	443	1791	0	0	2238	19,97	80,03	
KT	0	0	51	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	167	1	1591	0	1868	14,83	85,17	
MO2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	227	259	12,36	87,64	
Total	2601	3755	2540	1142	5874	7883	4892	346	619	1406	275	630	1045	864	225	7579	8406	2150	2081	273	54586	-	-	
OE (%)	14,69	2,77	7,64	49,74	1,14	0,00	8,50	86,71	4,85	3,56	71,27	31,27	13,88	3,70	30,67	0,75	15,76	16,70	23,55	16,85	-	OA(%)	90,79	
PA (%)	85,31	97,23	92,36	50,26	98,86	100,00	91,50	13,29	95,15	96,44	28,73	68,73	86,12	96,30	69,33	99,25	84,24	83,30	76,45	83,15	-	Kappa	0,90	

Klassifikation (Pixel)



Tabelle A.32: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der HAUPT-RapidEye-Szene vom 07.07.2010 (ZS1). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)							Total	CE (%)	UA (%)
		WG	WR	BG	ZR	WW	KT	M			
Klassifikation (Pixel)	Klasse	WG	WR	BG	ZR	WW	KT	M	3786	16,43	83,57
	WG	3164	102	0	0	513	0	7	3786	16,43	83,57
	WR	45	4728	24	0	64	68	0	4929	4,08	95,92
	BG	0	1	1079	0	17	0	0	1097	1,64	98,36
	ZR	13	0	0	9779	74	707	0	10573	7,51	92,49
	WW	653	3	129	0	8951	0	688	10424	14,13	85,87
	KT	0	1	6	155	84	1975	1	2222	11,12	88,88
	M	0	0	0	0	31	0	1401	1432	2,16	97,84
	Total	3875	4835	1238	9934	9734	2750	2097	34463	-	-
	OE (%)	18,35	2,21	12,84	1,56	8,04	28,18	33,19	-	OA(%)	90,18
PA (%)	81,65	97,79	87,16	98,44	91,96	71,82	66,81	-	Kappa	0,88	

Tabelle A.33: Error Matrix des ALL1-Klassifikationsergebnisses der NW-RapidEye-Szene vom 08.-10.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)													Total	CE (%)	UA (%)			
	NW	GW	LW1	GL1	GL2	MO	LW2	VF1	VF2	WG	WR	WW	ZR				KT	GL3	M
NW	2760	0	2	0	0	28	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2802	1,50	98,50
GW	0	4395	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4395	0,00	100,00
LW1	15	0	2451	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2522	2,82	97,18
GL1	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	73	16,44	83,56
GL2	0	0	0	16	677	0	0	0	1	128	36	260	0	0	0	0	1118	39,45	60,55
MO	0	0	0	2	0	121	0	0	0	0	0	124	0	0	0	0	247	51,01	48,99
LW2	7	0	4	0	0	0	28	0	0	0	0	25	0	0	0	0	64	56,25	43,75
VF1	0	0	0	0	0	0	0	256	2	0	0	0	0	0	0	0	258	0,78	99,22
VF2	0	0	0	0	0	0	0	0	116	0	0	0	0	0	0	0	116	0,00	100,00
WG	0	0	0	0	5	0	0	0	2	1458	284	190	0	0	0	0	1939	24,81	75,19
WR	0	0	0	0	9	0	0	0	1	1351	0	141	0	0	0	0	1503	10,11	89,89
WW	0	0	2	9	16	0	5	0	0	0	0	1940	0	0	1	1107	3080	37,01	62,99
ZR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2736	0	0	0	2736	0,00	100,00
KT	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	2062	2	40	2112	2,37	97,63
GL3	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	968	1	1043	7,19	92,81
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	0,00	100,00
<b>Total</b>	<b>2782</b>	<b>4395</b>	<b>2520</b>	<b>88</b>	<b>707</b>	<b>149</b>	<b>99</b>	<b>256</b>	<b>122</b>	<b>1587</b>	<b>1671</b>	<b>2551</b>	<b>2883</b>	<b>2077</b>	<b>972</b>	<b>1153</b>	<b>24012</b>	-	-
<b>OE (%)</b>	<b>0,79</b>	<b>0,00</b>	<b>2,74</b>	<b>30,68</b>	<b>4,24</b>	<b>18,79</b>	<b>71,72</b>	<b>0,00</b>	<b>4,92</b>	<b>8,13</b>	<b>19,15</b>	<b>23,95</b>	<b>5,10</b>	<b>0,72</b>	<b>0,41</b>	<b>99,65</b>	-	<b>OA(%)</b>	<b>89,06</b>
<b>PA (%)</b>	<b>99,21</b>	<b>100,00</b>	<b>92,62</b>	<b>69,32</b>	<b>95,76</b>	<b>81,21</b>	<b>28,28</b>	<b>100,00</b>	<b>95,08</b>	<b>91,87</b>	<b>80,85</b>	<b>76,05</b>	<b>94,90</b>	<b>99,28</b>	<b>99,59</b>	<b>0,35</b>	-	<b>Kappa</b>	<b>0,88</b>

Tabelle A.34: Error Matrix des ALL2-Klassifikationsergebnisses der NW-RapidEye-Szene vom 08.-10.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde MLC verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)																Total	CE (%)	UA (%)
	GL3	WR	WG	NW	GW	LW1	GL1	GL2	MO	LW2	VF1	VF2	ZR	KT	M	WW			
GL3	971	26	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1028	5,54	94,46
WR	0	1434	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	4	0	1436	0,14	99,86
WG	0	106	1283	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	73	1465	12,42	87,58
NW	0	0	0	2462	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2462	0,00	100,00
GW	0	0	0	0	4431	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4431	0,00	100,00
LW1	0	0	0	2	0	2091	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	2099	0,38	99,62
GL1	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	62	1,61	98,39
GL2	0	105	301	1	0	26	703	0	0	0	0	0	0	0	0	345	1481	52,53	47,47
MO	0	0	0	38	0	0	0	148	1	1	0	0	0	0	0	0	284	47,89	52,11
LW2	0	0	0	279	0	401	0	0	90	0	0	0	0	0	1	56	827	89,12	10,88
VF1	0	0	0	0	3	0	0	1	0	253	2	0	0	0	0	0	259	2,32	97,68
VF2	0	0	0	0	670	0	0	0	0	2	119	0	0	0	0	0	791	84,96	15,04
ZR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2725	0	0	0	0	2725	0,00	100,00
KT	0	0	0	0	0	5	0	0	2	0	0	0	1	2073	24	22	2127	2,54	97,46
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157	0	910	12	1079	15,66	84,34
WW	1	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	214	1946	2165	10,12	89,88
Total	972	1671	1587	2782	5104	2520	88	707	149	99	256	122	2883	2077	1153	2551	24721	-	-
OE (%)	0,10	14,18	19,16	11,50	13,19	17,02	30,68	0,57	0,67	9,09	1,17	2,46	5,48	0,19	21,08	23,72	-	OA(%)	87,78
PA (%)	99,90	85,82	80,84	88,50	86,81	82,98	69,32	99,43	99,33	90,91	98,83	97,54	94,52	99,81	78,92	76,28	-	Kappa	0,86

Tabelle A.35: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der NW-RapidEye-Szene vom 08.-10.07.2010 (ZS2). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

		Referenzdaten (Pixel)						Total	CE (%)	UA (%)
		WW	M	KT	ZR	WR	WG			
Klassifikation (Pixel)	WW	2139	196	0	0	0	0	2335	8,39	91,61
	M	74	944	1	0	0	0	1019	7,36	92,64
	KT	0	2	1974	0	0	0	1976	0,10	99,90
	ZR	0	0	102	2971	0	0	3073	3,32	96,68
	WR	129	0	0	429	1415	92	2065	31,48	68,52
	WG	209	0	0	0	202	1495	1906	21,56	78,44
	Total	2551	1142	2077	3400	1617	1587	12374	-	-
	OE (%)	16,15	17,34	4,96	12,62	12,49	5,80	-	OA(%)	88,40
PA (%)	83,85	82,66	95,04	87,38	87,51	94,20	-	Kappa	0,86	

Tabelle A.36: Error Matrix des ALL-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 14.08.2010 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)													Total	CE (%)	UA (%)
	NW	GW	LW	GL1	GL2	GT	M1	KT1	ZR1	VF1	VF2	Total				
NW	5460	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5503	0,78	99,22	
GW	0	7902	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	7904	0,03	99,97	
LW	56	0	7660	0	0	0	45	0	0	0	0	0	7761	1,30	98,70	
GL1	0	0	13	606	2	0	12	1	0	0	0	0	634	4,42	95,58	
GL2	0	0	0	261	2358	0	21	395	0	0	0	0	3035	22,31	77,69	
GT	0	0	0	71	0	14420	26	48	117	43	1	14726	2,08	97,92		
M1	0	0	2562	0	28	0	5060	4	476	0	0	8130	37,76	62,24		
KT1	0	0	0	0	0	0	0	4177	1	0	0	4178	0,02	99,98		
ZR1	0	0	0	0	6	0	0	509	7417	0	0	7932	6,49	93,51		
VF1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	372	12	384	3,13	96,88		
VF2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106	106	0,00	100,00		
<b>Total</b>	<b>5516</b>	<b>7902</b>	<b>10278</b>	<b>938</b>	<b>2394</b>	<b>14420</b>	<b>5164</b>	<b>5134</b>	<b>8011</b>	<b>417</b>	<b>119</b>	<b>60293</b>	-	-		
<b>OE (%)</b>	<b>1,02</b>	<b>0,00</b>	<b>25,47</b>	<b>35,39</b>	<b>1,50</b>	<b>0,00</b>	<b>2,01</b>	<b>18,64</b>	<b>7,41</b>	<b>10,79</b>	<b>10,92</b>	-	<b>OA(%)</b>	<b>92,11</b>		
<b>PA (%)</b>	<b>98,98</b>	<b>100,00</b>	<b>74,53</b>	<b>64,61</b>	<b>98,50</b>	<b>100,00</b>	<b>97,99</b>	<b>81,36</b>	<b>92,59</b>	<b>89,21</b>	<b>89,08</b>	-	<b>Kappa</b>	<b>0,91</b>		

Klassifikation (Pixel)

Tabelle A.37: Error Matrix des FB-Klassifikationsergebnisses der Landsat-5-Szene vom 14.08.2010 (ZS3). Als Klassifikationsverfahren wurde SVM verwendet.

Klasse	Referenzdaten (Pixel)					CE (%)	UA (%)
	M1	GT	ZR1	KT1	Total		
M1	5138	0	467	15	5620	8,58	91,42
GT	26	9840	115	49	10030	1,89	98,11
ZR1	0	0	7428	501	7929	6,32	93,68
KT1	0	0	1	4569	4570	0,02	99,98
Total	5164	9840	8011	5134	28149	-	-
OE (%)	0,50	0,00	7,28	11,01	-	OA(%)	95,83
PA (%)	99,50	100,00	92,72	88,99	-	Kappa	0,94

## **B Ergebniskarten**

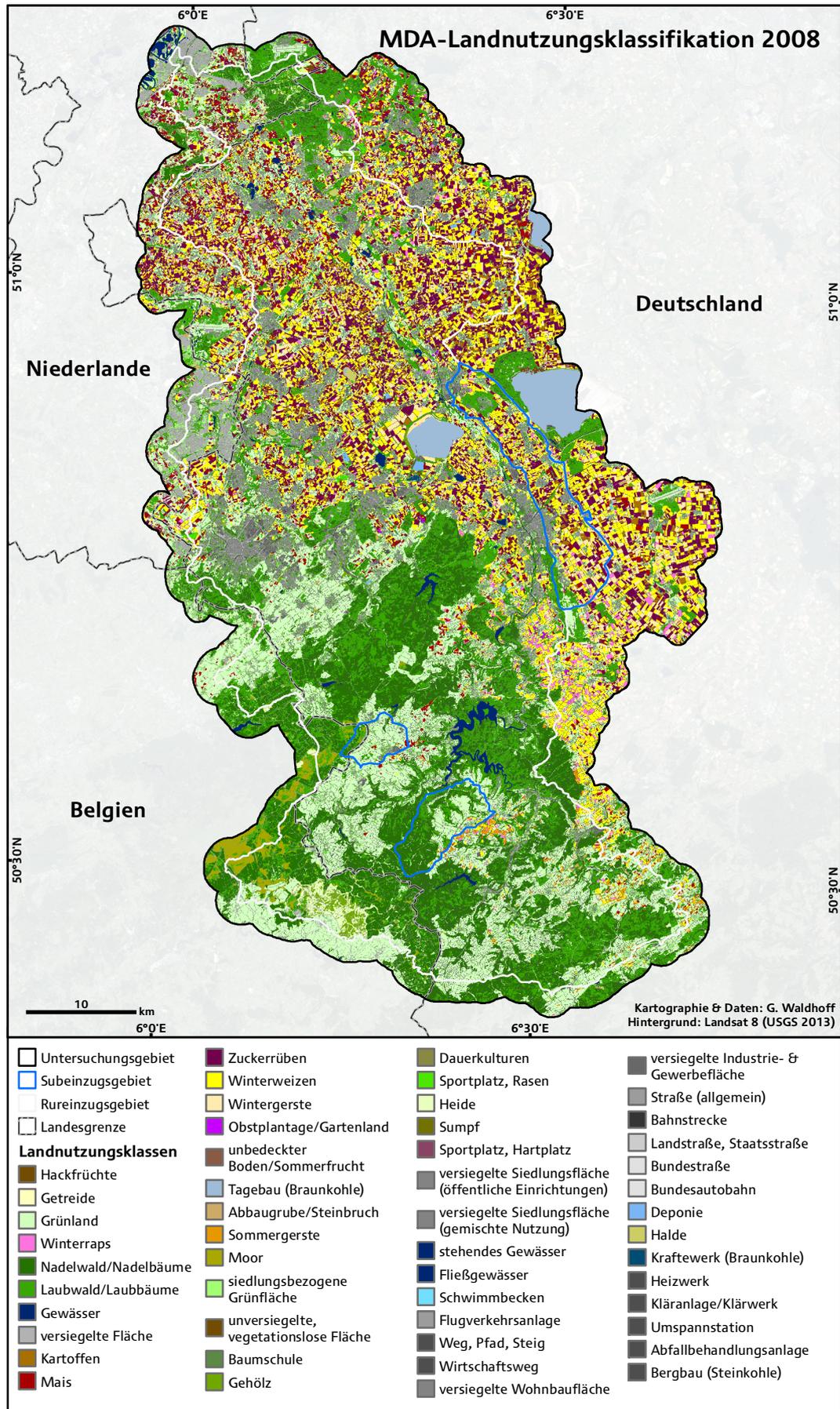


Abbildung B.1: MDA-Landnutzungsclassifikation 2008.



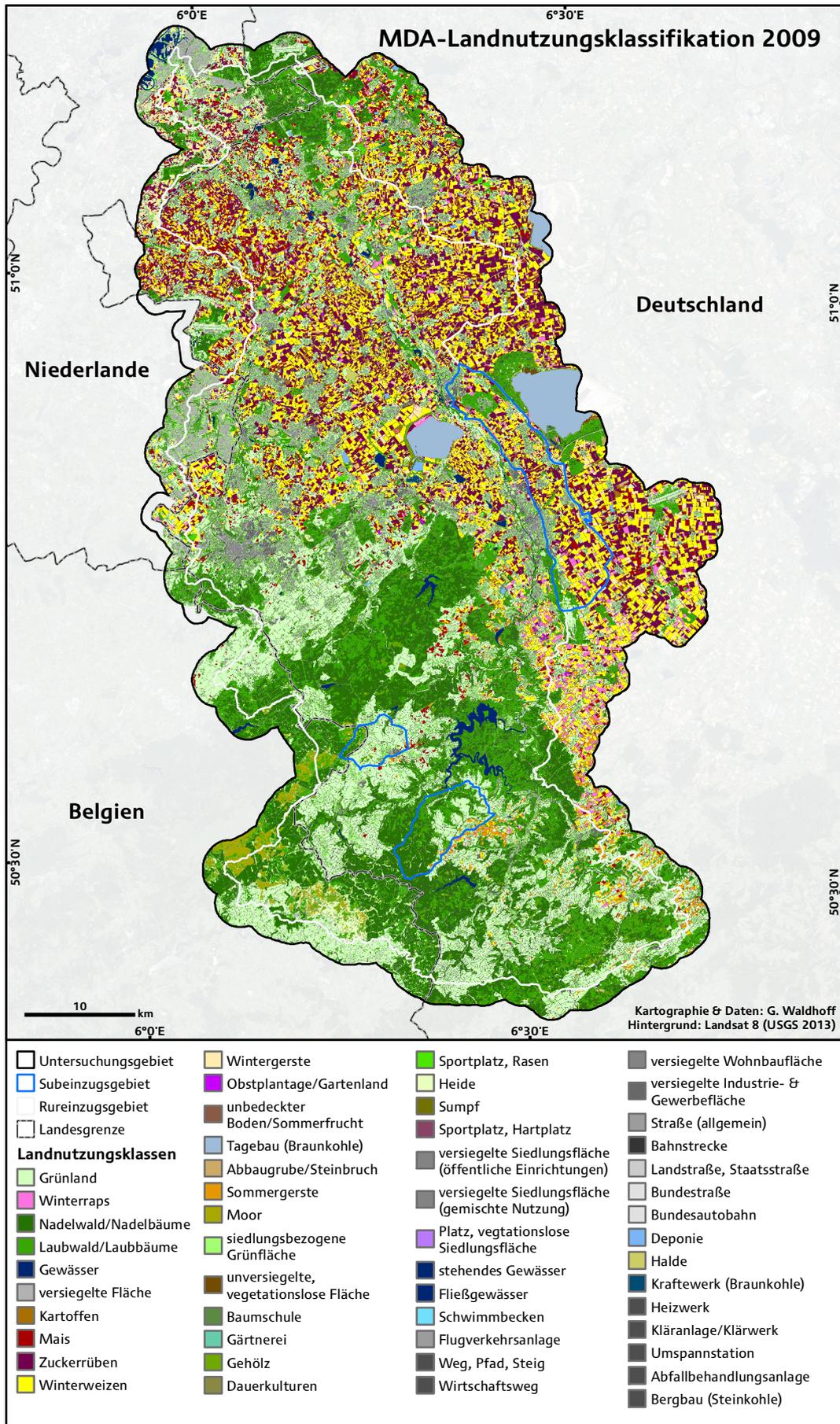


Abbildung B.2: MDA-Landnutzungsclassifikation 2009.

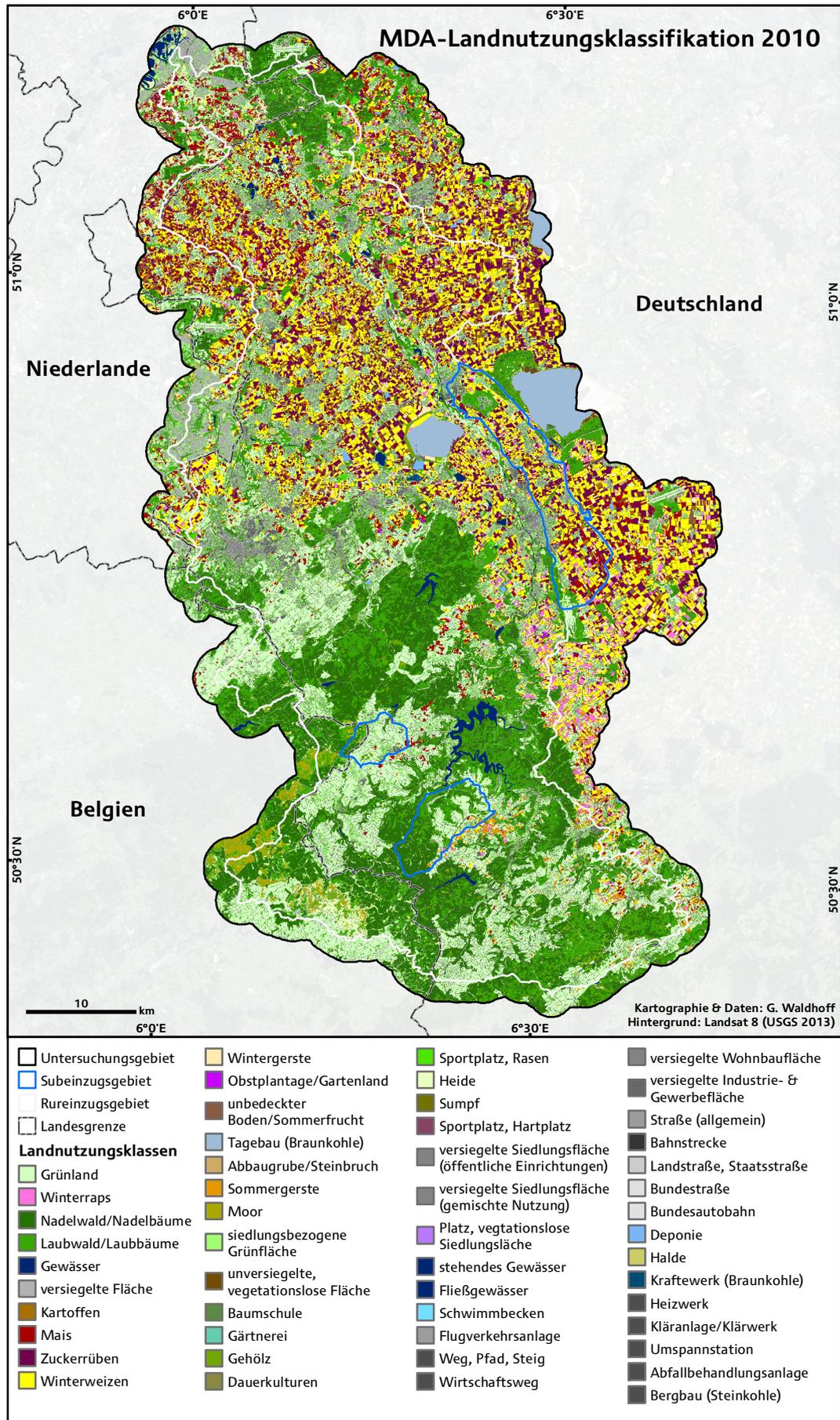


Abbildung B.3: MDA-Landnutzungsklassifikation 2010.

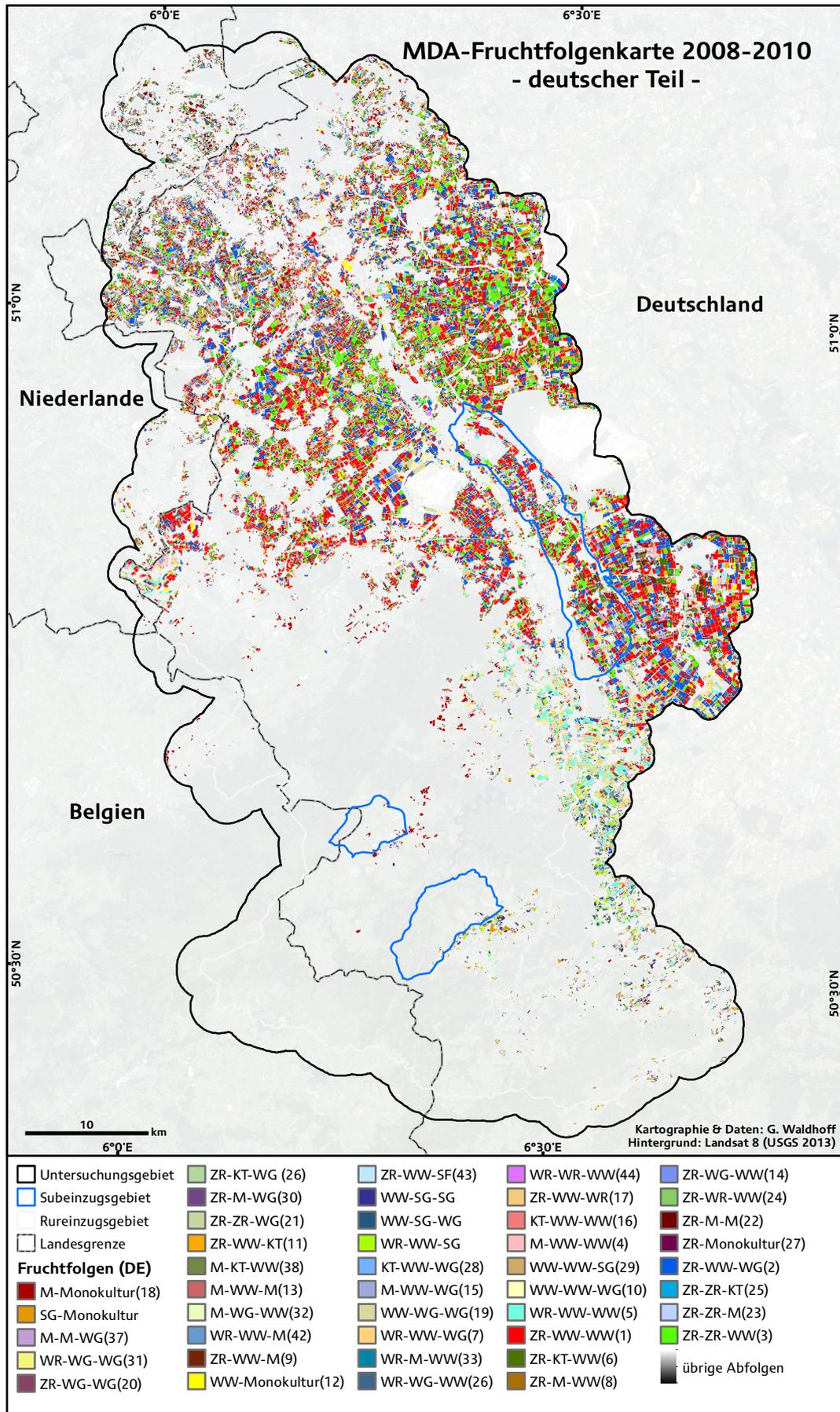


Abbildung B.4: MDA-Fruchtfolgenkarte 2008-2010 mit der Legende des deutschen Teils.

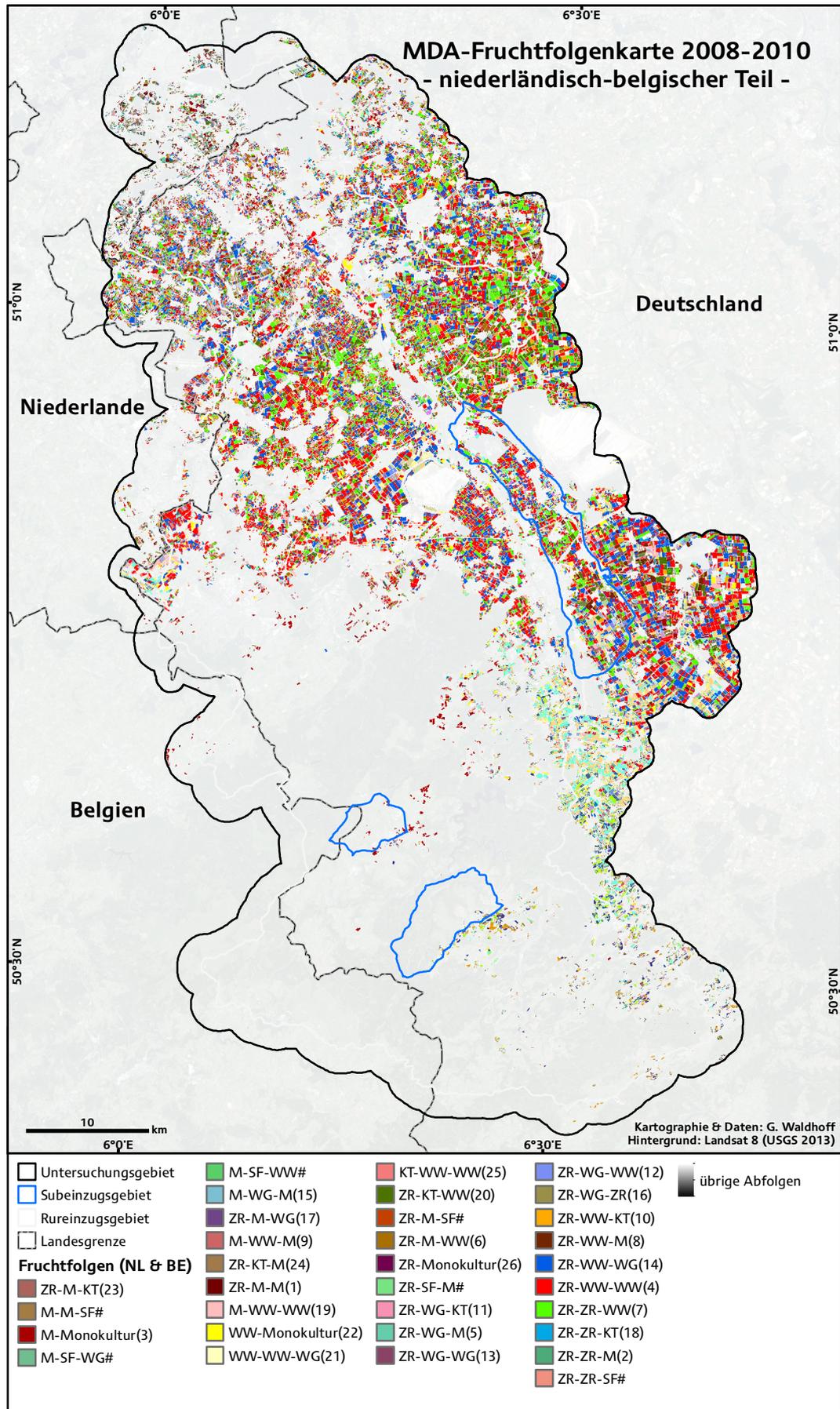


Abbildung B.5: MDA-Fruchtfolgenkarte 2008-2010 mit der Legende des niederländisch-belgischen Teils.

## C MDA-Landnutzungsklassifikation 2011

Tabelle C.1: Error Matrix der MDA-Landnutzungsklassifikation 2011 (LUSSEM &amp; WALDHOFF 2013).

Klasse		Referenzdaten (Pixel)									CE (%)	UA (%)	
		WR	KT	M	ZR	WW	WG	SG	NW	LW			Total
Klassifikation (Pixel)	WR	4166	10	0	75	11	533	126	0	0	4921	15,34	84,66
	KT	0	2471	39	183	0	0	0	0	0	2693	8,24	91,76
	M	0	408	2656	63	0	0	11	0	0	3138	15,36	84,64
	ZR	0	4067	180	13473	102	66	0	0	0	17888	24,68	75,32
	WW	63	164	0	294	27032	1772	19	0	0	29344	7,88	92,12
	WG	157	56	0	0	251	3709	2	0	0	4175	11,16	88,84
	SG	116	0	0	0	468	0	2303	0	0	2887	20,23	79,77
	NW	0	0	0	0	0	0	0	472	0	472	0,00	100,00
	LW	0	0	0	0	0	0	0	0	291	291	0,00	100,00
	Total	4502	7176	2875	14088	27864	6080	2461	472	291	65809		
OE (%)	7,46	65,75	7,62	4,37	2,99	39,00	6,42	0,00	0,00		OA(%)	85,97	
PA (%)	92,54	34,43	92,38	95,63	97,01	61,00	93,58	100,00	100,00		Kappa	0,81	

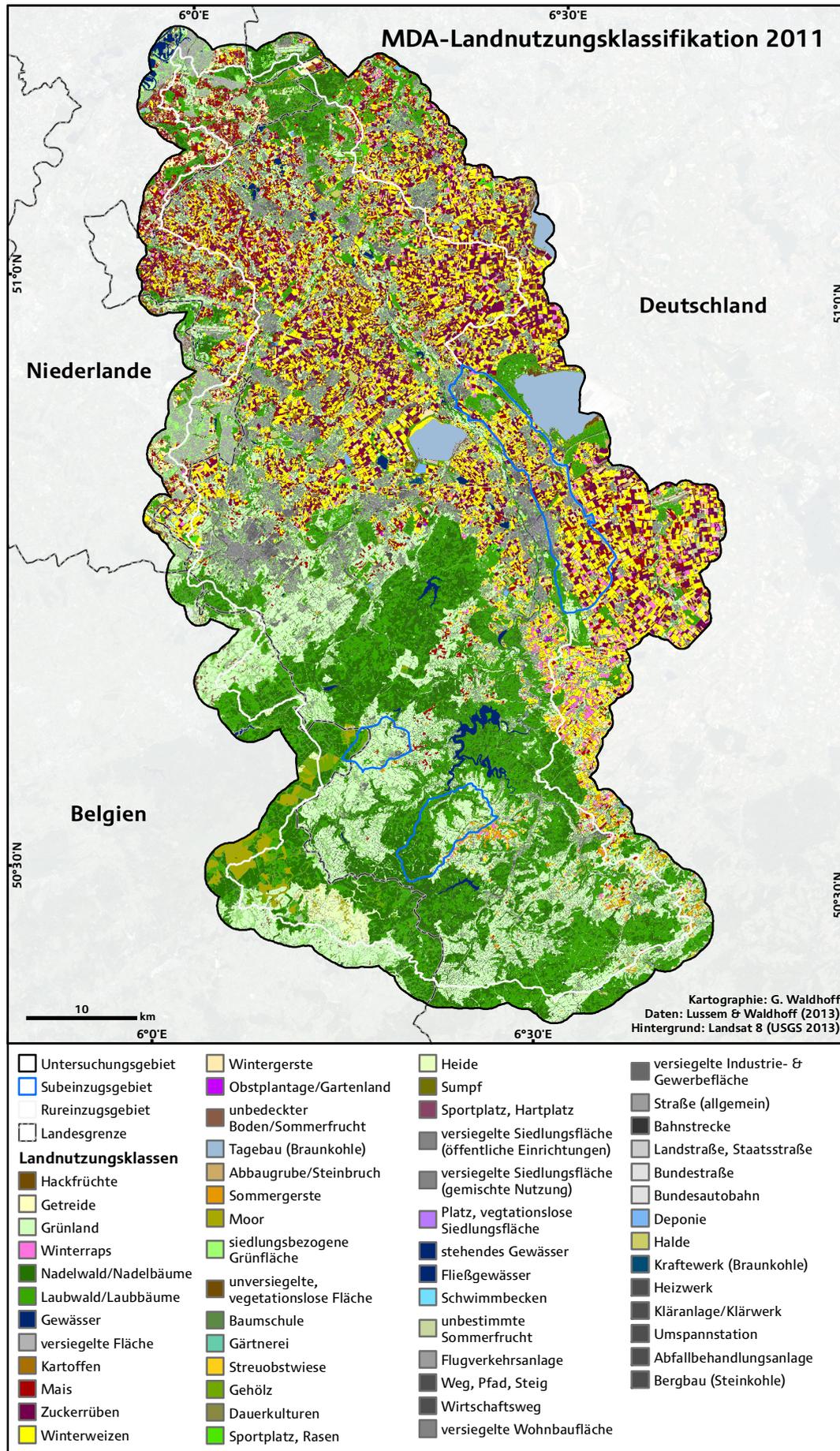


Abbildung C.1: MDA-Landnutzungs-klassifikation 2011 (LUSSEM & WALDHOFF 2013).

## Danksagung

Diese Dissertation wurde am Geographischen Institut der Universität zu Köln im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Transregio 32: ‚Patterns in Soil-Vegetation-Atmosphere-Systems: Monitoring, Modelling and Data Assimilation‘ angefertigt. Für die finanzielle Unterstützung sei daher der Deutschen Forschungsgemeinschaft gedankt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Georg Bareth, der mir die Promotion als wissenschaftlicher Mitarbeiter in seiner Arbeitsgruppe in einem spannenden und abwechslungsreichen Arbeitsgebiet ermöglicht hat. Für die fachliche Betreuung dieser Arbeit und für seine jahrelange Unterstützung bin ich ihm außerordentlich dankbar.

Bei Herrn Prof. Dr. Karl Schneider bedanke ich mich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Meinen Dank möchte ich auch an Herrn Prof. Dr. Hartmut Arndt für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und an Herrn Dr. Andreas Bolten für den Beisitz richten.

Bei Dr. Constanze Curdt und Dr. Dirk Hoffmeister möchte ich mich für die langjährige freundschaftliche Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken. Ihnen und auch allen anderen Helfern gilt darüber hinaus mein ausgesprochener Dank für ihren Einsatz bei den zahlreichen und zeitaufwändigen Geländekartierungen für diese Arbeit. Auch an die gesamte Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. Georg Bareth möchte ich meinen Dank für die harmonische Arbeitsatmosphäre und die gute Zusammenarbeit richten. Ebenso danke ich dem gesamten Transregio 32 für die gute Zusammenarbeit und die gewährte Unterstützung.

Bei Nicole Aigner und Ulrike Lussem möchte ich mich ganz herzlich für das Korrekturlesen des Manuskripts bedanken.

Danken möchte ich außerdem all denjenigen, die hier nicht genannt sind, aber dennoch auf unterschiedliche Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Auch meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für ihre Unterstützung besonders danken.

## Erklärung

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie – abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen – noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, dass ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde. Die Bestimmungen der Promotionsordnung sind mir bekannt. Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Prof. Dr. Georg Bareth betreut worden.

---

Guido Waldhoff

### Teilpublikationen:

BARETH, G. & WALDHOFF, G., 2012. Regionalization of agricultural management by using the multi-data approach (MDA), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B8, 225-230, DOI:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B8-225-2012.

WALDHOFF, G., CURDT, C., HOFFMEISTER, D., BARETH, G., 2012. Analysis of multitemporal and multisensor remote sensing data for crop rotation mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-7, 177-182, DOI: 10.5194/isprsannals-I-7-177-2012.

WALDHOFF, G., CURDT, C., HOFFMEISTER, D., BARETH, G., 2011. Spatio-temporal land use patterns for regional (agro-) ecosystem modelling. *Proceedings of the International Symposium on remote sensing and GIS methods for change detection and spatio-temporal modelling (CDSM)*, 15.-16.12.2011, Hong Kong, China.

WALDHOFF, G., CURDT, C., HOFFMEISTER, D., BARETH, G., 2009. Multi-Daten Ansatz für verbesserte Landnutzungsanalysen - Fallstudie Rur-Einzugsgebiet. In: Bill, R., Korduan, P., Theuvsen, L. and Morgenstern, M. (Hrsg.): *Anforderungen an die Agrarinformatik durch Globalisierung und Klimaveränderung: Referate der 29. GIL Jahrestagung*, 09.-10.03.2009, Rostock. *GI Edition Lecture Notes in Informatics*, 142, 181-184.

WALDHOFF, G., BARETH, G., 2008. GIS- and RS-based land use and land cover analysis: case study Rur-Watershed, Germany. *Proceedings of SPIE 7146, Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Advanced Spatial Data Models and Analyses*, 714626 (November 10, 2008); DOI: 10.1117/12.813171.