

Beiträge höchstauflösender Satellitenfernerkundung zum
FFH-Monitoring

Entwicklung eines wissensbasierten Klassifikationsverfahrens und
Anwendung in Brandenburg

vorgelegt von
Dipl. Geoökologin
Annett Frick

Von der Fakultät VI
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Naturwissenschaften
- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Volkmar Hartje
Berichter: Prof. Dr. Hartmut Kenneweg
Berichter: Prof. Dr. Birgit Kleinschmidt

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27.07.2006

Berlin 2006
D 83

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungen	V
Tabellen	VIII
Karten	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
Zusammenfassung	XIII
Abstract	XIV
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	1
1.2 Einordnung und Stand der Forschung.....	2
1.3 Hintergrund der Arbeit.....	3
2 Grundlagen	4
2.1 Naturschutzorientierte Umweltbeobachtung	4
2.1.1 Monitoring.....	4
2.1.2 Indikatoren.....	5
2.1.3 Landschaftselemente.....	5
2.1.4 Bundes- und Landesprogramme	6
2.2 Natura 2000.....	7
2.2.1 Grundsätze und Geschichte.....	7
2.2.2 Berichtspflichten und Monitoring.....	8
2.2.3 Umsetzung der FFH-RL in Deutschland.....	9
2.2.3.1 Bewertung des Erhaltungszustandes.....	11
2.2.3.2 Monitoringkonzepte der Bundesländer.....	13
2.3 Synergetische europäische Richtlinien.....	15
2.3.1 Wasserrahmenrichtlinie.....	15
2.3.2 Vorgaben für die Landwirtschaft.....	15
2.4 Fernerkundung.....	16
2.4.1 Grundlagen der Fernerkundung	16
2.4.2 Aufnahmesysteme.....	18

2.4.2.1	Quickbird	20
2.4.3	Bildauswertungsverfahren.....	22
2.4.3.1	Visuelle Bildinterpretation.....	22
2.4.3.2	Klassische automatisierte Bildanalysemethoden.....	24
2.4.3.3	Moderne Verfahren	25
2.4.3.4	Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fernerkundungsdaten	26
2.4.4	Hoch- und höchstauflösende Satelliten im Einsatz für den Naturschutz	27
2.5	Geoinformationssysteme.....	28
2.6	Fazit	29
3	Grobkonzept und Modellanforderungen.....	31
3.1	Grobkonzept.....	31
3.2	Anforderungen an die Indikatoren	35
3.3	Anforderungen an das Objektmodell.....	36
3.3.1	Trennbarkeit der Objekte	36
3.4	Anforderungen an die wissensbasierte Ableitung von Trainingsgebieten.....	37
4	Testgebiete und Datenbasis	39
4.1	Natura 2000 in Brandenburg	39
4.2	Lage der Testgebiete und naturräumliche Ausstattung	40
4.2.1	Jüterbog	41
4.2.2	Lieberose	43
4.2.3	Potsdam.....	44
4.2.4	Schwedt	45
4.3	Quickbird-Satellitenbilder	46
4.3.1	Geometrische und radiometrische Korrektur.....	46
4.3.2	Bildqualität.....	47
4.4	Geobasisdaten.....	51
4.4.1	Terrestrische Aufnahmen.....	52
5	Feinkonzept und Methoden	54
5.1	Auswahl der Indikatoren	54

5.2	Objektmodell.....	64
	5.2.1 Trennbarkeit der Objekte.....	67
	5.2.1.1 Diskriminanzanalyse.....	67
	5.2.1.2 Spektralanalyse.....	72
5.3	Klassifikationsverfahren.....	77
	5.3.1 Vorstrukturierung der Bilddaten.....	82
	5.3.2 Aufbau der Wissensbasis für die automatische Ableitung von Trainingsgebieten.....	86
	5.3.3 Clusterbasierte Signaturextraktion.....	96
	5.3.4 Überwachte hierarchische Klassifikation und wissensbasierte Nachbearbeitung.....	97
5.4	GIS-basierte Aggregation der Biotopcodes.....	103
5.5	Visuelle Bildanalyse.....	105
5.6	GIS-basierte Verknüpfung der Indikatoren.....	107
6	Anwendung in den Testgebieten.....	108
6.1	Klassifikationsergebnisse in ausgewählten Referenzflächen.....	108
	6.1.1 Jüterbog.....	110
	6.1.2 Lieberose.....	115
	6.1.3 Potsdam.....	117
	6.1.4 Schwedt.....	118
6.2	Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse auf FFH- Gebietsebene.....	120
7	Auswertung.....	123
7.1	Genauigkeitsanalyse.....	123
7.2	Übertragbarkeit des Verfahrens.....	129
	7.2.1 Andere Grundlagendaten.....	130
	7.2.2 Andere Gebiete und Aufnahmezeitpunkte.....	134
	7.2.2.1 Hackenheide.....	134
	7.2.2.2 Döberitz.....	136
	7.2.2.3 Harras.....	137
	7.2.3 Andere Fragestellungen.....	139
	7.2.4 Andere Auflösungsstufen.....	142
	7.2.4.1 Skalenabhängigkeit.....	142

7.2.4.2	Simulation geringerer Auflösungsstufen	144
7.3	Fehleranalyse	146
8	Fazit	149
8.1	Weitere Anwendungsmöglichkeiten	152
8.2	Ausblick	152
LITERATUR		153
ANHANG		162
KARTEN		196
DANK		223
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG		226

ABBILDUNGEN

Abb. 2.1: Karte der biogeografischen Regionen der EU (Quelle: <http://www.natura2000-dvl.de/content01/03.html>, 23.07.2005)..... 8

Abb. 2.2: „Natura 2000“-Barometer der EU, Meldestand der Mitgliedsstaaten im Vergleich (Quelle: http://europa.eu.int/comm/environment/nature/nature_conservation/useful_info/barometer/barometer.htm, 12.01.2006)..... 10

Abb. 2.3: Schematische Darstellung der atmosphärischen Durchlässigkeit (aus KAPPAS, 1994)..... 17

Abb. 2.4: Schematische Darstellung atmosphärischer Einflüsse auf die Radianz (SCHOWENGERDT, 1997)..... 18

Abb. 2.5: Schematische Anordnung der detector chip arrays (DCA), (aus DIGITALGLOBE, 2004) 20

Abb. 2.6: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam 21

Abb. 2.7: Generalisierungsstufen bei Fernerkundungssystemen (aus SCHIEWE, 2003)..... 22

Abb. 2.8: Typische spektrale Reflexionskurve grüner Blattorgane (nach HILDEBRANDT, 1996, verändert) und Verteilung der Spektralkanäle von Quickbird..... 23

Abb. 2.9: Maximum Likelihood - Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion (aus LILLESAND et al., 2004)..... 25

Abb. 2.10: Wissensbasierte Bildanalyse (b) im Vergleich zu traditionellen Verfahren (a) (Quelle: RICHARDS, 1993) 26

Abb. 2.11: Datenmodell Vektor und Raster (nach ESRI, 2001) 28

Abb. 3.1: Beispiel für die wissensbasierte Verifizierung der Hypothese „Trainingsgebiet Gehölz“ 32

Abb. 3.2: Schematischer Verfahrensablauf..... 34

Abb. 3.3: Bewertungssystem und Beziehungen der einzelnen Komponenten 36

Abb. 4.1: Lage der gemeldeten FFH- und SPA-Gebiete in Brandenburg, Stand 07/2004 (Datenquelle: Landesumweltamt Brandenburg) 39

Abb. 4.2: Naturräumliche Gliederung Brandenburgs (nach SSYMANEK et al., 1998) 40

Abb. 4.3: Lage der Testgebiete und Gebietscharakter (topografischer Hintergrund: TK300)..... 41

Abb. 4.4: Detailaufnahme der Wanderdüne - Carex arenaria 42

Abb. 4.5: „Wüste“ in Lieberose 43

Abb. 4.6: Schloss Cecilienhof in Potsdam 44

Abb. 4.7: Polderfläche an der Oder 45

Abb. 4.8: Maßstabsgleiche Ausschnitte aus den Quickbird-Aufnahmen von Potsdam. 46

Abb. 4.9: Ausschnitt aus der Quickbird-Aufnahme von Schwedt..... 48

Abb. 4.10: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam. 48

Abb. 4.11: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam 49

Abb. 4.12: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam 49

Abb. 4.13: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Thüringen 50

Abb. 4.14: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Lieberose..... 50

Abb. 4.15: Beispiel für die Zusammensetzung des Alpha-Codes (mittlere Fläche)..... 51

Abb. 5.1: Beispiel für eine Fläche des LRT 4030 in sehr gutem Teilerhaltungszustand 57

Abb. 5.2: Beispiel für eine Fläche des LRT 4030 in mittlerem Teilerhaltungszustand..... 58

Abb. 5.3: Beispiel für eine Fläche des LRT 4030 in schlechtem Teilerhaltungszustand..... 58

Abb. 5.4: Beispiel für eine Fläche des LRT 2330 in sehr gutem Teilerhaltungszustand 60

Abb. 5.5: Beispiel für eine Fläche des LRT 2330 in schlechtem Teilerhaltungszustand 60

Abb. 5.6: Beispiel für eine Fläche des LRT 7140 in schlechtem Teilerhaltungszustand 61

Abb. 5.7: Beispiel für eine Fläche des LRT 3150 in sehr gutem Teilerhaltungszustand 63

Abb. 5.8: Beispiel für eine Fläche des LRT 6430 in schlechtem Teilerhaltungszustand 64

Abb. 5.9: Konfusionsmatrix der Diskriminanzwerte für Klassen mit Vegetation (Einbeziehung aller Gebiete) 70

Abb. 5.10: Box-Plot der Wertebereiche zweier Objektklassen im 4min3 72

Abb. 5.11: Charakteristische Signaturen für verschiedene versiegelte Oberflächen..... 73

Abb. 5.12: Charakteristische Signaturen für verschiedene offene Oberflächen ohne Vegetation 74

Abb. 5.13: Charakteristische Signaturen für verschiedene offene Oberflächen mit Vegetation (NDVI bis 0.3) 75

Abb. 5.14: Signaturplots ausgewählter wasserabhängiger Klassen im Feature Space der Kanäle R

und NIR.....	76
Abb. 5.15: Erster Teil des Verfahrensablaufes: wissensbasierte Ableitung von Trainingsgebieten und Signaturen	79
Abb. 5.16: Zweiter Teil des Verfahrensablaufes: überwachte Klassifikation und wissensbasierte Nachbearbeitung.....	80
Abb. 5.17: Dritter Teil des Verfahrensablaufes: Aggregierung von Biotoptypen, visuelle Kontrolle und GIS-basierte Teilzustandsbewertung.....	81
Abb. 5.18: Erzeugung einer Maske mit lokalen Minima	83
Abb. 5.19: Erzeugung des Texturbildes PAN.....	83
Abb. 5.20: Erzeugung des Texturbildes MS.....	84
Abb. 5.21: Beispiel für die Extraktion von Trainingsgebieten für die Gehölzmaske.....	87
Abb. 5.22: Beispiel für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die versiegelten Flächen	88
Abb. 5.23: Beispiel für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die offenen unversiegelten Flächen.....	90
Abb. 5.24: Beispiel für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die offenen Flächen mit geringer Vegetation	92
Abb. 5.25: Beispiel für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die offenen Flächen mit viel Vegetation	95
Abb. 5.26: Beispiel für die Umsetzung der Regeln für die Klasse „Arten der Wasserlinsen“ im Expert Classifier von Erdas Imagine.....	96
Abb. 5.27: Beispiel für die durch Clustering gewonnene Untergliederung von Hauptklassen.....	97
Abb. 5.28: Beispiel für die Bildung der Gehölzmaske	98
Abb. 5.29: Beispiel für die Ausmaskierung der gehölzbestandenen Bereiche	99
Abb. 5.30: Beispiel für die Klassifikation versiegelter Bereiche.....	100
Abb. 5.31: Feature Space Darstellung der Kanäle R und NIR.....	100
Abb. 5.32: Beispiel für die Nachbearbeitung fehlerhafter Klassifikationsergebnisse.....	101
Abb. 5.33: Beispiel für die Nachbearbeitung fehlerhafter Klassifikationsergebnisse.....	102
Abb. 5.34: Beispiel für die regelbasierte Aggregierung von Biotopcodes im GIS.....	104
Abb. 5.35: Bildschlüssel LRT 2330	106
Abb. 5.36: Bildschlüssel LRT 2330	106
Abb. 6.1: Testfläche 33 in Jüterbog (LRT 2310).	110
Abb. 6.2: Testflächen 9 bis 11 in Jüterbog (LRT 4030).....	110
Abb. 6.3: Testflächen 14, 15 und 31 in Jüterbog (LRT 2330).....	112
Abb. 6.4: Testfläche 19 in Jüterbog (LRT 3150).	113
Abb. 6.5: Testfläche 1 in Jüterbog (LRT 3150).....	114
Abb. 6.6: Testflächen 110 bis 114 in Lieberose (LRT 4030).....	115
Abb. 6.7: Testfläche 6 in Lieberose (LRT 7140).....	117
Abb. 6.8: Testfläche 10 in Potsdam (LRT 3140).....	118
Abb. 6.9: Testflächen 17, 25 und 26 in Schwedt (LRT 6240 und 6120)	119
Abb. 6.10: Beispiel für die Anwendung der Klassifikationsergebnisse in den FFH-Gebieten Lieberoser Endmoräne und Reicherskreuzer Heide.....	121
Abb. 6.11: Sukzessionsmonitoring am Beispiel der Flugsanddüne bei Jüterbog	122
Abb. 7.1: Beispiel für die Festlegung der Transekten und Messradien	124
Abb. 7.2: Veränderungen in der Hauptgruppe des Biotopcodes von 1992/93 zu 2003.....	127
Abb. 7.3: Box-Plot der mittleren euklidischen Distanz in Abhängigkeit von der Objektgröße.....	129
Abb. 7.4: Verschiedene Grundlagendaten in Jüterbog Teil 1	131
Abb. 7.5: Verschiedene Grundlagendaten in Jüterbog Teil 2	132
Abb. 7.6: Ausschnitt aus dem Testgebiet Hackenheide	135
Abb. 7.7: Ausschnitt aus dem Testgebiet Döberitz.....	136
Abb. 7.8: Ausschnitt aus dem Testgebiet Harras	139
Abb. 7.9: Übersetzungsschema Teil 1 (Quelle: RATH, 2006)	140
Abb. 7.10: Ausschnitt aus dem Testgebiet Stör	141
Abb. 7.11: Genauigkeitsanalyse anhand von Ground truth Daten (Quelle: RATH, 2006).....	141
Abb. 7.12: Auflösungsstufen von links nach rechts: 0,6, 0,8, 1,5 und 10,0 m	142

Abb. 7.13: Prozentanteile des Indikators „offener Boden“ in verschiedenen Auflösungsstufen.....	143
Abb. 7.14: Prozentanteile des Indikators „Gehölzbedeckung“ in verschiedenen Auflösungsstufen	144
Abb. 7.15: Simulierte Auflösungsstufen, von links nach rechts: 0.6 m, 0.8 m, 1.0 m, 1.5 m	145
Abb. 7.16: Prozentanteile des Indikators „Gehölzbedeckung“ in verschiedenen Auflösungsstufen	145
Abb. 7.17: Prozentanteile des Indikators „offener Boden“ in verschiedenen Auflösungsstufen.....	146
Abb. A.1: Bildschlüssel LRT 2310, 2330 und 4030	185
Abb. A.2: Bildschlüssel LRT 2310, 2330 und 4030	186
Abb. A.3: Bildschlüssel LRT 3130	187
Abb. A.4: Bildschlüssel LRT 3140	188
Abb. A.5: Bildschlüssel LRT 3150	189
Abb. A.6: Bildschlüssel LRT 3160	190
Abb. A.7: Bildschlüssel LRT 3270	191
Abb. A.8: Bildschlüssel LRT 6120	192
Abb. A.9: Bildschlüssel LRT 6430	193
Abb. A.10: Bildschlüssel LRT 7140	194
Abb. A.11: Legende für die Indikatorkarten.....	195

TABELLEN

Tab. 2.1:	Hierarchieebenen oben genannter Begriffe (verändert nach WIEGLEB, 2002).....	6
Tab. 2.2:	Allgemeines Bewertungsschema zum Erhaltungszustand der LRT und Arten nach Vorgaben der LANA 2001 (Quelle: http://www.bfn.de/03/030306_lana.pdf , 23.07.2005).....	11
Tab. 2.3:	Kennzeichnung des Erhaltungszustands der LRT in der Praxis (Quelle: NLÖ, Niedersachsen, ergänzt).....	12
Tab. 2.4:	Beispiel für ein Bewertungsschema für den LRT 4030 (Quelle: LUA Brandenburg)	13
Tab. 2.5:	Auflistung der befragten Bundesländer	14
Tab. 2.6:	Übersicht der wichtigsten operationellen und geplanten zivilen Satellitenmissionen mit mittlerer bis hoher geometrischer Auflösung.....	18
Tab. 2.7:	Übersicht der operationellen und geplanten höchstauflösenden Satellitenmissionen (aus BAUDOIN, 2004, SANDAU, 2004 und JACOBSEN, 2005, verändert und ergänzt).....	19
Tab. 2.8:	Ausgewählte digitale flugzeuggestützte Aufnahmesysteme (aus SCHIEWE & EHLERS, 2004, verändert)	20
Tab. 3.1:	Geowissenschaftliche Hierarchieniveaus (nach VOLK & STEINHARDT, 1999, verändert)	35
Tab. 4.1:	Übersicht über die Qualität der Satellitenbilder.....	41
Tab. 4.2:	Übersicht der terrestrisch kartierten LRT der Offenbereiche in Jüterbog	42
Tab. 4.3:	Übersicht der vorkommenden LRT der Offenbereiche in Lieberose (Quelle: Standard-Datenbogen LUA Brandenburg)	44
Tab. 4.4:	Übersicht der vorkommenden LRT der Offenbereiche in Potsdam (Quelle: Standard-Datenbogen LUA Brandenburg)	45
Tab. 4.5:	Übersicht der vorkommenden LRT der Offenbereiche in Schwedt (Quelle: Standard-Datenbogen LUA Brandenburg)	46
Tab. 4.6:	Überblick über die verwendeten Zusatzdaten	53
Tab. 5.1:	Auswahl und Einordnung der Indikatoren für offene LRT, die potentiell mit Fernerkundungsmethoden bestimmt werden können.....	56
Tab. 5.2:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 4030	59
Tab. 5.3:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 2330	61
Tab. 5.4:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 7040	62
Tab. 5.5:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 3150	63
Tab. 5.6:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 6430	64
Tab. 5.7:	Aufbau des hierarchischen Objektmodells für die Klassifizierung	66
Tab. 5.8:	Für die Diskriminanzanalyse verwendete Bildderivate.....	67
Tab. 5.9:	Diskriminanzwerte der Testflächen.....	68
Tab. 5.10:	Standardisierte Koeffizienten der 1. Diskriminanzfunktion (für alle Klassen und alle Gebiete).....	71
Tab. 5.11:	In der Wissensbasis verwendete Bildderivate.....	82
Tab. 5.12:	In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für versiegelte Flächen	88
Tab. 5.13:	In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für offene unversiegelte Flächen ohne Vegetation.....	89
Tab. 5.14:	In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für offene unversiegelte Flächen mit Vegetation (NDVI < 0.3)	91
Tab. 5.15:	In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für offene unversiegelte Flächen mit Vegetation (NDVI ≥ 0.3).....	94
Tab. 5.16:	Beispiel für die durch Clusterung gewonnene Untergliederung von Hauptklassen.....	96
Tab. 5.17:	Auszug aus der relationalen Indikatorendatenbank.....	107
Tab. 6.1:	Untersuchte LRT und Indikatoren.....	109
Tab. 6.2:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 4030 (Flächennummer 9, 10, 11 und 33)	111
Tab. 6.3:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 2330 (Flächennummer 14, 15, und 31)	113

Tab. 6.4:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 3150 (Flächennummer 1 und 19).....	114
Tab. 6.5:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 4030 (Flächennummer 110 bis 114)	116
Tab. 6.6:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 7140 (Nr. 6).....	117
Tab. 6.7:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 3150 (Flächennummer 10)	118
Tab. 6.8:	Indikatormatrix der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für die LRT 6420 und 6120 (Flächennummer 17, 25 und 26)	120
Tab. 7.1:	Konfusionsmatrix und Gesamtgenauigkeit, ermittelt aus einer Transsektkartierung in Jüterbog	125
Tab. 7.2:	Klassifikationsgenauigkeiten für die Testgebiete Jüterbog, Lieberose, Schwedt und Potsdam.....	126
Tab. 7.3:	Vergleich der Klassifikationsgenauigkeiten für die verschiedenen Eingangsdatensätze.....	133
Tab. 7.4:	Übersicht über Größe und Aufnahmezeitpunkt der ausgewerteten Satellitenbilder	134
Tab. 7.5:	Klassifikationsgenauigkeit für das Gebiet Hackenheide.....	135
Tab. 7.6:	Klassifikationsgenauigkeit für das Gebiet Döberitz	137
Tab. 7.7:	Klassifikationsgenauigkeit für das Gebiet Harras.....	138
Tab. 8.1:	Einsatzmöglichkeiten der Satellitenbilder für das Monitoring von FFH-LRT	150
Tab. A.1:	In Brandenburg vorkommende LRT (Quelle: LUA, 2002)	165
Tab. A.2:	Anzahl und Verteilung der Testflächen	166
Tab. A.3:	Konfusionsmatrix Testgebiet Potsdam.....	178
Tab. A.4:	Konfusionsmatrix Testgebiet Schwedt.....	178
Tab. A.5:	Konfusionsmatrix Testgebiet Lieberose	179
Tab. A.6:	Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit BTNTK 1992/93 abgeleitet).....	180
Tab. A.7:	Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit BTNTK 1998 abgeleitet)	180
Tab. A.8:	Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit CORINE 2000 abgeleitet).....	181
Tab. A.9:	Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit BTNTK 2003 abgeleitet)	182
Tab. A.10:	Konfusionsmatrix Testgebiet Döberitz	182
Tab. A.11:	Konfusionsmatrix Testgebiet Harras.....	183
Tab. A.12:	Bewertung terrestrisch kartierter LRT in Jüterbog.....	184

KARTEN

Karte A.1: Testgebiet Jüterbog – Biotoptypen und Landnutzung 1992/93	196
Karte A.2: Testgebiet Jüterbog – Satellitenbild.....	197
Karte A.3: Testgebiet Jüterbog – Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis.....	198
Karte A.4: Testgebiet Lieberose – Biotoptypen und Landnutzung 1992/93	199
Karte A.5: Testgebiet Lieberose – Satellitenbild.....	200
Karte A.6: Testgebiet Lieberose – Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis.....	201
Karte A.7: Testgebiet Potsdam – Biotoptypen und Landnutzung 1992/93	202
Karte A.8: Testgebiet Potsdam – Satellitenbild.....	203
Karte A.9: Testgebiet Potsdam – Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis	204
Karte A.10: Testgebiet Schwedt – Biotoptypen und Landnutzung 1992/93	205
Karte A.11: Testgebiet Schwedt – Satellitenbild.....	206
Karte A.12: Testgebiet Schwedt – Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis.....	207
Karte A.13: Testgebiet Jüterbog – LRT-Kartierung und Testflächen	208
Karte A.14: Testgebiet Jüterbog – Lage der Transekten.....	209
Karte A.15: Testgebiet Lieberose – LRT-Kartierung und Testflächen.....	210
Karte A.16: Testgebiet Hackenheide – Biotoptypen und Landnutzung 1992/93.....	211
Karte A.17: Testgebiet Hackenheide – Satellitenbild	212
Karte A.18: Testgebiet Hackenheide – Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis.....	213
Karte A.19: Testgebiet Döberitz – Biotoptypen und Landnutzung 1992/93	214
Karte A.20: Testgebiet Döberitz – Satellitenbild.....	215
Karte A.21: Testgebiet Döberitz – Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis	216
Karte A.22: Testgebiet Harras – Offenland Biotopkartierung 1998/99.....	217
Karte A.23: Testgebiet Harras – Satellitenbild.....	218
Karte A.24: Testgebiet Harras – Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis.....	219
Karte A.25: Testgebiet Stör – CORINE 2000.....	220
Karte A.26: Testgebiet Stör – Satellitenbild	221
Karte A.27: Testgebiet Stör –Klassifikationsergebnis/Rauhigkeitsklassen	222

ADS	Airborne Digital Sensor
AML	Arc-Macro-Language
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
B	Blau
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
Bit	Binary Digit
BL-AG	Bund-Länder-Arbeitsgruppe
BTNTK	Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung
CCD	Charge Coupled Devices
CIR	Color-Infrarot
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DCA	Detector Chip Array
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DMC	Digital Mapping Camera
DN	Digital Number
EML	ERDAS-Macro-Language
ERDAS	Earth Resources Data Analysis System
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.
ETRS89	European Terrestrial Reference System 89
EON2000+	Earth Observation for NATURA 2000+
EU	Europäische Union
EUNIS	European nature information system
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FFH-RL	Fauna-Flora-Habitat - Richtlinie
G	Grün
GIS	Geographisches Informationssystem
GLCM	Grey Level Co-occurrence Matrix
GPS	Global Positioning System
HRSC-AX	High Resolution Stereo Camera - Airborne Extended
ID	Identifikationsnummer
IHS	Intensity Hue Saturation
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis
LANA	Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LRT	Lebensraumtyp

LUA	Landesumweltamt
LPI	Largest Patch Index
MaxLike	Maximum-Likelihood Classification
MS	Multispectral
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot
NLÖ	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie
NSG	Naturschutzgebiet
OFULSA	Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung im Land Sachsen-Anhalt
PAN	Panchromatisch
PAT	Point (Polygon) Attribute Table
R	Rot
RADAR	Radio Detection and Ranging
RGB	Red Green Blue
RL	Richtlinie
RMSE	Root Mean Square Error
SAC	Special Areas for Conservation
SARA'04	Anwendungsorientiertes Raummonitoring mit höchstauflösenden Satellitendaten
SCI	Site of Community Importance
SNR	Signal to Noise Ratio
SPA	Special Protected Area
SPIN	Spatial Indicators for European Nature Conservation
SPOT	Systeme Probatoire d'Observation de la Terre
TIN	Triangulated Irregular Network
TK	Topografische Karte
TM	Thematic Mapper (Landsat)
TU	Technische Universität
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNEP	United Nations Environment Program
VBA	Visual Basic for Application
VIS	Sichtbarer Bereich der elektromagnetischen Strahlung
WGT	Westgruppe der Truppen der ehemaligen sowjetischen Streitkräfte
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Zusammenfassung

Mit der Verabschiedung der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) im Jahr 1992 wurde ein Meilenstein für den Naturschutz auf europäischer Ebene gesetzt. Alle EU-Mitgliedsstaaten sind demnach verpflichtet, ein europaweit zusammenhängendes Netz von Schutzgebieten (nach FFH-RL und nach Vogelschutz-Richtlinie) unter dem Namen „Natura 2000“ zu schaffen. In der FFH-RL wird ausdrücklich die Überwachung von Lebensraumtypen und Arten gefordert. Es sind umfassende Daten zu ihrem Vorkommen, zur Verbreitung und zu ihrem Erhaltungszustand zu sammeln. Alle sechs Jahre ist ein ausführlicher Bericht darüber abzulegen, so dass mit der FFH-Richtlinie die erste gesetzlich verankerte Pflicht zum flächenhaften Monitoring in der EU eingeführt wurde. Die Erfassung von aktuellen Daten zur Erfüllung dieser Monitoringaufgaben ist mit einem beträchtlichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Es besteht die Notwendigkeit, geeignete Konzepte und Methoden für die Datenerhebung zu entwickeln. Im Hinblick auf den hohen und wiederkehrenden Informationsbedarf für die Erfüllung der FFH-Berichtspflichten ist der Einsatz der Fernerkundung unbedingt notwendig. Die traditionell verwendeten analogen Luftbilder sind in ihrer Herstellung und Auswertung für die finanziell schlecht ausgestatteten Verwaltungen nicht mehr zu bezahlen. Die neue Generation höchstauflösender Satelliten (v.a. Quickbird) bietet die Möglichkeit, kleine und weit verstreute Gebiete kostengünstig zu überwachen. Es fehlen jedoch geeignete automatisierte Methoden für die Auswertung der Satellitenbilder, die im Sinne der FFH-Richtlinie einsetzbare Ergebnisse liefern könnten.

Die wiederholte Bewertung des Erhaltungszustandes von Lebensraumtypen kann nur auf der Grundlage von Indikatoren objektiv und übertragbar erfolgen. Biotopelemente (z.B. der Gehölzanteil) sind sehr wichtige Indikatoren für die Bewertung der Habitatstruktur und von eventuell vorhandenen Beeinträchtigungen.

Vor diesem Hintergrund war das Ziel dieser Arbeit, ein Verfahren zu entwickeln, das höchstauflösende Satellitendaten für die Erfassung von Indikatoren für das Monitoring ausgewählter FFH-Lebensraumtypen der Offenbereiche einsetzt und das dabei eine möglichst weitgehende Automatisierung erreicht. Es wurde nach Prüfung von Alternativen ein wissenschaftlicher Ansatz gewählt, der mit Hilfe allgemeingültiger Regeln und unter Einbeziehung von a-priori Information (z.B. Biotoptypen- und Landnutzungskartierung) eine vollautomatische Klassifikation von Biotopelementen ermöglicht. Das Verfahren arbeitet auf Pixelbasis und stellt ein hybrides hierarchisches Klassifikationssystem dar. Die Flächengrenzen der Lebensraumtypen und die Genauigkeit der Klassifikation müssen im Anschluss visuell überprüft werden, so dass es sich insgesamt um eine semi-automatische Vorgehensweise handelt. Das Verfahren wurde anhand vier ausgewählter Untersuchungsgebiete in Brandenburg für zwölf unterschiedliche Lebensraumtypen der Offenbereiche entwickelt und validiert. Die Übertragbarkeit auf andere Gebiete, andere Grundlagendaten und andere Auflösungsstufen wurde ausführlich in vier weiteren Untersuchungsgebieten (in Brandenburg, Thüringen und Schleswig-Holstein) getestet.

Für die Ermittlung der Indikatoren für Heidehabitats, für Dünen mit offenen Sandtrockenrasen und für Süßwasserlebensräume ist das Verfahren an sehr vielen Flächen erfolgreich getestet worden und kann operationell eingesetzt werden. Für die untersuchten Lebensraumtypen der Halbtrockenrasen und Moore gab es aufgrund der Ausstattung der Testgebiete nur sehr wenige Vorkommen und terrestrisch verifizierte Grundlagendaten, diese sollten weiter untersucht werden.

Der Einsatz der höchstauflösenden Satellitenbilder und des Klassifikationsverfahrens kann das Monitoring von FFH-Lebensraumtypen insgesamt erheblich erleichtern. Es ist möglich, für die untersuchten Lebensraumtypen Strukturindikatoren und Beeinträchtigungen abzuleiten sowie die Flächengrenzen zu überprüfen. Dazu kommt die Erstellung aktueller Biotoptypen- und Landnutzungsdaten und die Verfügbarkeit aktueller digitaler Orthofotos für die terrestrische Kartierung. Große Flächen können schnell bearbeitet werden, und die Trefferquote und Konstanz der visuellen Interpretation kann mit der automatischen Klassifikation wesentlich erhöht werden. Die Flächenanteile wichtiger Indikatoren sind sehr genau berechenbar und eine gute Grundlage nicht nur für das Monitoring, sondern auch für die detaillierte Maßnahmenplanung.

Abstract

The adoption of the EC Habitats Directive (FFH-RL) in 1992 was an important milestone for nature conservation on the European level. The provisions of the Directive require of every Member State to establish a coherent net of Special Areas of Conservation (SAC) embraced with the Special Areas of Protection (SPA) from the EC Birds Directive under the name 'Natura 2000'. Furthermore the EC Habitats Directive claims the introduction of a range of different measures like the surveillance of habitats and species, a report on species conservation and a report on the implementation of the Directive. An extensive amount of data on occurrence, geographical range, representativity and conservation status of habitats and species is required. Every six years a report on the implementation of the Directive is due, which incorporates the first statutory obligation on area-wide surveillance within the European Union.

The collection of up-to-date information with regard to these obligations is associated with considerable amounts of time and expenses. Thus suitable concepts and methods for data acquisition have to be developed. Facing the high and repeated information demand the employment of remote sensing is necessary. Traditionally analogue air photos were used for vegetation monitoring, but their acquisition and interpretation are no longer affordable for the Nature Conservation Administration in Germany. The new generation of digital very high resolution satellites (particularly Quickbird) offers the opportunity for a cost-efficient survey even of small and widespread areas. But suitable automated methods for the analysis of those satellite data in terms of the EC Habitats Directive are missing.

The repeated and impartial assessment of the conservation status of habitat types can only be based on indicators. Elements of biotopes (e.g. percentage of shrubs in open habitats) are very useful indicators for the assessment of habitat structure and impairments.

The aim of this study was to develop a method for the analysis of very high resolution satellite data that can be used for the acquisition of indicators to support the monitoring of a selected subset of non-forested habitats and that operates to a large extent in an automated mode. With a knowledge-based procedure, implementing universal rules and integrating a-priori information (e.g. biotope type and land use maps), a fully-automated way was found to classify biotope elements. The procedure is pixelbased and works with a hybrid and hierarchical classification scheme. Subsequent to the classification the habitat borders and the classification accuracy have to be evaluated visually.

The method was developed and validated for 12 different non-forested habitat types on the basis of four test sites in Brandenburg. The transferability on other sites, other a-priori information and different geometric resolutions was tested in detail with the help of four additional test sites (in Brandenburg, Thuringia and Schleswig-Holstein).

For the investigated habitat types that represent dry heaths and inland dunes and for freshwater habitat types the procedure has been successfully validated on the basis of many areas and can be used operationally. For the investigated habitat types that represent bogs and dry grasslands only few habitat areas were available due to the character of the test sites, they should be examined further.

The use of very high resolution satellite data and the developed classification procedure can substantially support the monitoring of habitat types. It was possible to automatically derive indicators assessing the structure and the existing impairments of the investigated habitat types. The habitat borders have to be verified visually. Additional results of the procedure are actual biotope type and land use maps and digital ortho photos as an important support for the terrestrial mapping. Large areas can be processed in short time and also the accuracy and stability of the visual interpretation can be increased by the automated classification. Percentages of important indicators can be calculated on a high level of detail. They represent a very good basis not only for the monitoring but also for the explicit planning of conservation measures.

1. Einleitung

"Unkraut nennt man die Pflanzen, deren Vorzüge noch nicht erkannt worden sind."

(R. W. Emerson)

Der weltweite Artenschwund, der drohende Klimawandel und der fortschreitende Verlust natürlicher Lebensräume führten seit Anfang der 90er Jahre zu einem Umdenken auf politischer Ebene. Dies fand unter anderem Ausdruck in der richtungsweisenden UNCED-Konferenz 1992 in Rio de Janeiro. Natur- und Umweltschutz sind zum großen Teil staatliche Aufgaben, da es gilt konkurrierende Interessen abzuwägen und sensible Schutzgüter mit Gesetzeskraft zu verteidigen. Verschiedene EU-Gesetzgebungen haben diesen Aufgaben eine ganz neue Richtung gegeben. Die ebenfalls 1992 ins Leben gerufene Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) ist ein zentrales Instrument der EU, den Verlust der Biodiversität und natürlicher Lebensräume zu überwachen und ihm Einhalt zu gebieten. Alle EU-Mitgliedsstaaten sind zu ihrer Einhaltung per Gesetz verpflichtet. Dessen ungeachtet ist Naturschutz zumindest in Deutschland in vielen Bundesländern das ungeliebte Stiefkind geblieben, eine stetig geringer werdende personelle und finanzielle Ausstattung belegen dies. Dabei müssen immer umfangreichere Aufgaben bewältigt werden, allein die Umsetzung der FFH-Richtlinie bedeutet einen immensen zusätzlichen Arbeitsaufwand. Es sind nicht nur umfassende Daten zu Vorkommen, Verbreitung und Erhaltungszustand von Lebensräumen und Arten zu sammeln, sondern auch geeignete Maßnahmen für ihre Verbesserung bzw. Erhaltung einzuleiten und deren Erfolg zu überwachen. Alle sechs Jahre ist ein ausführlicher Bericht darüber zu erstellen, so dass mit der FFH-Richtlinie die erste gesetzlich verankerte Pflicht zum flächenhaften Monitoring in der EU eingeführt wurde. Mit welchen Mitteln diese Informationen erhoben werden sollen, ist trotz der seit der Existenz der FFH-RL bereits vergangenen 14 Jahre noch weitgehend unklar.

Obwohl die Fernerkundung ein wertvoller Informationslieferant für den Naturschutz sein kann und es traditionell in Form von Luftbildern auch ist, wird gerade der Einsatz von Satellitenbildern in den Umweltverwaltungen, bis auf wenige Ausnahmen, immer noch skeptisch gesehen. Ebenso umstritten ist der Einsatz von modernen Auswertungsmethoden, die sich nicht nur auf die rein visuelle Interpretation stützen. Bisher wurde dieser Umstand der zu geringen räumlichen Auflösung der Daten zugewiesen, die den Luftbildern zu fern lag. Seit der Verfügbarkeit der neuen höchstauflösenden Satellitengeneration ist dieses Manko behoben, es eröffnen sich ganz neue Einsatzmöglichkeiten, nicht nur für die Satellitenbilder selbst, sondern auch für die digitale Bildverarbeitung.

Mit den neuen Sensoren gehen neue Entwicklungen und auch neue Probleme bei den Klassifikationsverfahren einher. Die Forschung befasst sich seit geraumer Zeit mit verschiedensten Ansätzen zur möglichst vollautomatischen Auswertung von höchstauflösenden Fernerkundungsdaten. Die Methoden reichen von objektorientierten über fuzzy logic Verfahren bis hin zu neuronalen Netzen und wissensbasierten Ansätzen. Keine dieser Methoden ist allein die Lösung aller Probleme, es hat sich vielmehr gezeigt, dass die intelligente Kombination mehrerer Verfahren erfolgreicher ist.

Im Hinblick auf den großen und wiederkehrenden Informationsbedarf für die Erfüllung der FFH-Berichtspflichten ist der Einsatz der Fernerkundung unbedingt notwendig. Die traditionell verwendeten analogen Luftbilder sind in ihrer Herstellung und Auswertung für die finanziell schlecht ausgestatteten Verwaltungen nicht mehr zu bezahlen. Es fehlen jedoch geeignete automatisierte Verfahren für die Auswertung der Satellitenbilder, die im Sinne der FFH-Richtlinie einsetzbare Ergebnisse liefern könnten. Die bisher im Monitoring oft eingesetzte Methode des einfachen Vergleiches von Flächengrößen und Biotoptypen in bestimmten Zeitabständen kann für genaue Aussagen zum Erhaltungszustand und zur Entwicklung von Lebensräumen nur eingeschränkte Informationen liefern. Der Detailreichtum von höchstauflösenden Fernerkundungsdaten könnte hier sehr gewinnbringend eingesetzt werden, indem die wiederholte Klassifikation von wichtigen Strukturelementen einen tiefergehenden Vergleich erlaubt.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das höchstauflösende Satellitendaten für das Monitoring ausgewählter FFH-Lebensraumtypen der Offenbereiche einsetzt und das dabei eine möglichst weitgehende Automatisierung erreicht.

Da es um die Verwendung von Fernerkundungsmethoden geht, ist der Einsatzbereich vor allem für die Flächenüberwachung interessant. Es wird demnach nicht das Monitoring einzelner Arten, sondern von Lebensraumtypen, also Flächen betrachtet. Weil eine Art jedoch an ihren Lebensraum gebunden ist, sind somit auch rückwirkend Aussagen in Form einer Habitatbewertung in Bezug auf einzelne Arten möglich. So soll z.B. bei der Habitaterfassung von Arten auch die Ausstattung von Nachbarflächen bzw. Kontaktbiotopen ermittelt werden, um so etwaige Gefährdungen abzuschätzen (FARTMANN et al., 2001).

Brandenburg bietet sich als Untersuchungsraum besonders an, weil es große zusammenhängende Flächen mit unterschiedlichsten Lebensraumtypen des Offenlandes vorzuweisen hat. Auf den zahlreichen ehemaligen Truppenübungsplätzen finden sich z.B. ausgedehnte trockene Sandheiden und Dünen mit Sandtrockenrasen. Das terrestrische Monitoring dieser Bereiche gestaltet sich nicht nur wegen der Flächendimensionen problematisch, sondern auch wegen der fortdauernden Munitionsbelastung. Des Weiteren finden sich viele Typen der Süßwasserlebensräume und Feuchtgebiete in Brandenburg.

Aufgrund der großen Unterschiede in der Struktur, Größe und Ausstattung der einzelnen FFH-Lebensraumtypen variieren die Einsatzpotentiale der Satellitendaten stark, so dass es keine allgemeingültige Vorgehensweise geben kann, sondern eine lebensraumspezifische Betrachtung notwendig ist. Es ist eine besondere Herausforderung für diese Arbeit, die Potenziale und Vorzüge von Fernerkundungsmethoden für möglichst viele in Brandenburg vorkommende LRT der Offenbereiche in technischer und methodischer Hinsicht zu erschließen, sie aber dabei möglichst auch über die Schwelle der ökonomischen Nutzbarkeit zu entwickeln.

An mehreren naturräumlich unterschiedlich ausgestatteten Testgebieten in Brandenburg wird die Methode entwickelt und validiert, die Übertragbarkeit auf andere Gebiete und andere Fragestellungen soll ebenfalls ausführlich getestet werden. Die Arbeit orientiert sich dabei nicht ausschließlich am rein naturwissenschaftlichen Aspekt, sondern berücksichtigt auch die ökonomischen und inhaltlichen Bedürfnisse der Umweltverwaltung.

Da Quickbird die momentan höchste geometrische Auflösung bietet, wird dieser Satellit für die Methodenentwicklung verwendet. Trotzdem soll das Verfahren auf andere Sensoren mit ähnlichen spektralen Eigenschaften (auch flugzeuggetragene) übertragbar bleiben, um die Kontinuität des Monitorings auch zu einem späteren Zeitpunkt zu gewährleisten.

Folgende Kernfragen stellen sich:

- Für welche Lebensraumtypen der Offenbereiche sind höchstauflösende Satellitendaten im Sinne des FFH-Monitorings einsetzbar?
- Welche Indikatoren sind für die Bewertung geeignet?
- Kann ein weitgehend automatisiertes Klassifikations- und Bewertungsverfahren entwickelt werden? Welche Themenbereiche müssen nach wie vor visuell oder terrestrisch bearbeitet werden?
- Ist das Verfahren auf andere Gebiete, andere Daten und andere Fragestellungen übertragbar?

1.2 Einordnung und Stand der Forschung

An der Entwicklung automatisierter Methoden für die Analyse höchstauflösender Fernerkundungsdaten wird seit geraumer Zeit geforscht (vgl. Abschnitt 2.4.3.3). Ein Fokus liegt dabei auf objektorientierten Verfahren. So favorisieren z.B. BURNETT & BLASCHKE (2003) eine hierarchische multiskalige Segmentierung basierend auf BAATZ & SCHÄPE (2000). Trotz aller Vorteile objektorientierter Verfahren gibt es immer noch vielfältige Probleme. Die wohl gravierendsten sind die oft unzureichende

Reproduzierbarkeit der Segmentierungsergebnisse und der hohe Aufwand, der mit der Anwendung dieser Methoden verbunden ist. Insgesamt muss festgestellt werden, dass es momentan noch keine zuverlässigen und übertragbaren Segmentierungslösungen gibt (SCHIEWE, 2003). Viel versprechend stellt sich die Verwendung wissensbasierter Methoden dar (vgl. u.a. PEDDLE, 1995; FRIEDL & BRODLEY, 1997). Für Fragestellungen aus so verschiedenen Themenbereichen wie z.B. die Klassifikation von Landwirtschaftsflächen (COHEN & SHOSHANY, 2002), die Erkennung urbaner Objekte (GERKE, 2002) oder die automatische Klassifikation von Torfabbauflächen (PAKZAD, 2001) wurden wissensbasierte Klassifikationsverfahren gewinnbringend eingesetzt. Dabei kann Wissen auch aus anderen bereits vorhandenen Daten entnommen werden. Die Einbeziehung von a-priori Informationen in Form von Geodaten wird bereits seit geraumer Zeit für unterschiedlichste Fragestellungen und unterschiedliche Arten der Klassifikation erfolgreich angewendet (u.a. HUTCHINSON, 1982; MASELLI et al., 1995; MCIVER & FRIEDL, 2002; EIUMNOH & SHRESTA, 2000). Es hat sich in zahlreichen Beiträgen gezeigt, dass die Beschränkung auf nur eine Datenquelle bei der Klassifikation oft nicht ausreicht, um eine zufriedenstellende Genauigkeit zu erreichen (HAHN & BALSAVIAS, 1998).

Für das Monitoring von Lebensräumen im Allgemeinen und für das FFH-Monitoring im Speziellen gibt es ebenfalls bereits einige vielversprechende Untersuchungen (siehe Abschnitt 2.4.4). So wurden im Rahmen eines EU-Projektes (BOCK et al., 2004) verschiedene Klassifikationsansätze und Indikatoren untersucht, die für die Bewertung des Erhaltungszustandes von Lebensraumtypen eingesetzt werden könnten. Dies bezog sich jedoch vorrangig auf eine übergeordnete Ebene, ohne den notwendigen Detaillierungsgrad zu erreichen. Wissensbasierte Klassifikationsverfahren wurden dabei positiv bewertet.

Es gibt trotz vieler methodisch interessanter Einzelbeispiele noch keine operationell für die Unterstützung im Sinne des FFH-Monitorings einsetzbaren Verfahren. Die Objektivität, Übertragbarkeit und Wiederholbarkeit der Klassifikationsverfahren stellt nach wie vor ein großes Problem dar, das gelöst werden muss. Aufgrund der notwendigen Genauigkeit für die Ableitung der Indikatoren sind generalisierende Methoden wie z.B. die Segmentierung nach BAATZ & SCHÄPE (2000) nicht einsetzbar. Die hohe geometrische Auflösung der Satellitendaten verlangt neue geeignete Verfahren für die Bildung spektraler Signaturen, die für eine überwachte Klassifikation notwendig sind.

1.3 Hintergrund der Arbeit

Diese Arbeit ist im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes SARA'04 (Anwendungsorientiertes Raummonitoring mit höchstauflösenden Satellitendaten) entstanden. SARA'04 hatte insbesondere die Entwicklung von Verfahren und Methoden zur Gewinnung von Geoinformationen aus höchstauflösenden Satellitendaten für verschiedene Fragestellungen des Umwelt- und Raummonitorings sowie deren Einbindung in bestehende Verfahrensabläufe und Verwaltungsvorgänge zum Gegenstand. Die Praxisnähe wurde gewährleistet, indem eine Steuerungsgruppe aus potenziellen Nutzern der regionalen und lokalen Umweltverwaltung das Projekt begleitete.

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit zwischen der Luftbild und Planung GmbH Potsdam und dem Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung der Technischen Universität Berlin entwickelt und hatte eine Laufzeit von Mitte 2003 bis Mitte 2005.

SARA'04 wurde vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung kofinanziert und mit Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft des Landes Brandenburg gefördert.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die Verfahrensentwicklung vorgestellt. Abschnitt 2.1 widmet sich den allgemeinen Anforderungen der Umweltbeobachtung und des Monitorings im Naturschutz und stellt im Überblick die Situation in Deutschland dar. In Abschnitt 2.2 werden die EU-Richtlinien vorgestellt, die das Schutzgebietssystem „Natura 2000“ umfassen. Besonders ausführlich wird zur Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie Stellung genommen, da ihre Umsetzung im Fokus der Arbeit steht. In der FFH-RL ist die Forderung verankert, ein Monitoringsystem zu etablieren. Es müssen Konzepte erstellt werden, um diese Aufgaben zu erfüllen. In Abschnitt 2.2.3 wird vorgestellt, welche Konzepte in Deutschland bereits existieren und wie die FFH-RL umgesetzt wird. Die Wasserrahmenrichtlinie und die EU-Vorgaben für die Landwirtschaft (Cross-Compliance) werden kurz erläutert, da es stellenweise Überschneidungen und Synergien in den Überwachungsgebieten gibt (Abschnitt 2.3).

In Abschnitt 2.4 und 2.5 wird erörtert, welchen Beitrag die Fernerkundung und der Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) für das Monitoring im Naturschutz leisten kann. Es werden interessante Beispiele aus der anwendungsorientierten Forschung vorgestellt (Abschnitt 2.4.4). Zum Schluss sind in einem Fazit alle wesentlichen Grundsätze für die Verfahrensentwicklung zusammengefasst (Abschnitt 2.6).

2.1 Naturschutzorientierte Umweltbeobachtung

In den letzten Jahrzehnten hat die Beobachtung der Umwelt und in ihr stattfindender Veränderungen stark an Bedeutung gewonnen. Seit der UNCED-Konferenz 1992 wird auf nationaler und internationaler Ebene verstärkt nach Indikatorsystemen geforscht, die den Zustand der Umwelt unter Berücksichtigung der sozio-ökonomischen Umstände belegen können. Gerade in Hinblick auf eine mögliche Veränderung des Klimas und auf den fortschreitenden Artenschwund muss in möglichst vielen Bereichen nach Zeigern gesucht werden, die eine Prognose und Bewertung des Geschehens möglich machen.

Auf EU-Ebene ist das Monitoring von ausgewählten Teilkomponenten der Umwelt in mehreren Richtlinien, wie z.B. der FFH-RL und der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), verankert. Dabei geht es nicht nur um die Feststellung des Zustandes von Umwelt und Natur, sondern auch um die Kontrolle von durchgeführten (bzw. unterlassenen) Maßnahmen.

Da die in diesem Zusammenhang wichtigen Begriffe teilweise mit unterschiedlichen Bedeutungen belegt sind, werden sie nachfolgend kurz erläutert.

2.1.1 Monitoring

Das Monitoring von Arten und Lebensräumen ist ein sehr wichtiges Instrument des Naturschutzes, denn es ist bei weitem nicht ausreichend, Flächen oder Arten unter Schutz zu stellen und dann allein die Einhaltung des Schutzstatus zu kontrollieren. Ob sich Arten und ihre Habitate, dem Schutzziel entsprechend, günstig entwickeln oder aber aufgrund biotischer (z.B. invasive Arten) bzw. abiotischer Faktoren (z.B. Klima) verdrängt oder beeinträchtigt werden, kann nur mit geeigneten Überwachungsprogrammen bewertet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Monitoring in der Definition von HELLAWELL (1991) verwendet:

„Monitoring ist die periodische Überwachung zur Überprüfung der Übereinstimmung mit einem vordefinierten Standard oder der Abweichung von einer erwarteten Norm.“ (in MAAS, 1999)

DRÖSCHMEISTER (1996) präzisiert weiterhin, dass ein Monitoring für Naturschutz folgendes beinhaltet:

- die wiederholte Erfassung des Zustandes von Natur und Landschaft oder deren Bestandteile sowie darauf einwirkender menschlicher Aktivitäten
- das Wahrnehmen von Veränderungen

- die Ausrichtung auf feste Zielsetzungen (z.B. als Grenzwert) oder Fragestellungen, die einen Anwendungsbezug haben (in BÜRGER & DRÖSCHMEISTER, 2001)

Mehrere europäische Rahmengesetzgebungen, darunter v.a. die FFH-Richtlinie, haben die Diskussion um das flächenbezogene Monitoring angefacht und teilweise den Handlungsbedarf auch außerhalb der Schutzgebiete forciert. Ein flächen- und damit lebensraumbezogenes Monitoring ist jedoch weitaus schwieriger umzusetzen als artbezogene Überwachungsprogramme, denn es müssen geeignete Parameter gefunden werden, die den Zustand von Habitaten belegen können. Besonders wichtig sind in diesem Zusammenhang Indikatoren.

2.1.2 Indikatoren

Die wissenschaftlich richtige und jederzeit nachvollziehbare Überprüfung der naturschutzfachlichen Zielsetzungen und damit die Bewertung eines Habitats ist am besten mit dem Prinzip der Indikation zu unterstützen, wobei Indikatoren verwendet werden müssen, die auf die Veränderung von Einflussgrößen besonders empfindlich bzw. signifikant reagieren (PLACHTER, 1991). Indikatoren sind Parameter, die gemessen oder abgeleitet werden können und die zur Erfassung und Bewertung komplexer Phänomene dienen, die sich nicht direkt erschließen oder beschreiben lassen (LESER et al., 1998).

Indikatoren können Organismen, abgeleitete Werte (z.B. Artendiversität), funktionale Gesichtspunkte (z.B. Raumbezüge) oder abiotische Parameter (z.B. Standorteigenschaften) sein. Je nach Schutz- bzw. Beobachtungsobjekt muss ein ausgewogenes Verhältnis von Untersuchungsintensität und Abstraktionsgrad gefunden werden (PLACHTER, 1991).

Ein Indikator ist also ein Merkmal, das als Anzeichen oder Hinweis auf das Erreichen oder Verlassen eines bestimmten Zustandes dient.

2.1.3 Landschaftselemente

Als fernerkundlich sehr gut feststellbare Indikatoren können verschiedene Landschaftselemente für das flächenhafte Monitoring herangezogen werden. So ist z.B. der Biototyp ein wertvoller Komplexindikator, der u.a. Aussagen zu Nutzungsintensität, Schutzwürdigkeit oder Empfindlichkeit von Habitaten ermöglicht. Biotopenelemente wie z.B. der Anteil von Gehölzen in einer Fläche sind dagegen wichtige Indikatoren für die tiefergehende Strukturbewertung einzelner Habitate.

Nachfolgende Definitionen orientieren sich an WIEGLEB (2002).

Biotop: „Unter einem Biotop wird der Lebensraum einer spezifischen Lebensgemeinschaft verstanden, der im Regelfall durch eine bestimmte Mindestgröße und Abgrenzbarkeit von benachbarten Biotopen gekennzeichnet ist.“

Biototyp: „Ein Biototyp ist ein abstrahierter Typus aus der Gesamtheit gleichartiger Biotope. Er bietet mit seinen ökologischen Bedingungen weitgehend einheitliche Voraussetzungen für Lebensgemeinschaften oder Teile von Lebensgemeinschaften. Die Typisierung umfasst verschiedene abiotische und biotische Merkmale sowie die anthropogene Nutzungsform (nach SSYMANK et al., 1993).“

Biotopkomplex: „Biotopkomplexe stellen z.T. charakteristische, häufig wiederkehrende Kombinationen von Biotopen in einem festen räumlichen Gefüge dar. Sie beinhalten mehrere aneinander angrenzende Biotope, die durch gemeinsame Entwicklung oder stofflichen bzw. Organismen-Austausch verbunden sind (nach SSYMANK et al., 1993).“

Biotopenelement: „Biotopenelemente sind in der Regel kleinräumig abgrenzbare, abiotische oder biotische Strukturelemente eines Biotops. Sie stellen Teilelemente mit typischen Biotopqualitäten dar, können jedoch auch in verschiedenen Biototypen enthalten sein.“

Abiotische Hierarchie	Räumliche Hierarchie	Biotische Hierarchie
Choriotop	Biotopelement	Schicht oder Patch, Nische
Geotop	Biotop	Lokale Populationen, Biozönosen, Lokales Ökosystem
Physiotop	Landschaft	Population bzw. Metapopulation

Tab. 2.1: Hierarchieebenen oben genannter Begriffe (verändert nach WIEGLEB, 2002)

In der FFH-RL wird der Begriff Lebensraum folgendermaßen definiert:

Natürlicher Lebensraum: „durch geografische, abiotische und biotische Merkmale gekennzeichnetes völlig natürliches oder naturnahes terrestrisches oder aquatisches Gebiet“.

SSYMANK et al. (1998) beschreiben die FFH-Lebensraumtypen als Biotoptypen oder Biotopkomplexe, die nach Anhang I der FFH-RL im Schutzgebietssystem „Natura 2000“ geschützt werden müssen.

In dieser Arbeit werden FFH-Lebensraumtypen (LRT) als Biotoptypen verstanden, der Begriff LRT wird immer dann verwendet, wenn es sich um die im Anhang I der FFH-RL aufgeführten Lebensraumtypen handelt, ansonsten wird von Biotoptypen gesprochen.

2.1.4 Bundes- und Landesprogramme

Das Problem des Monitorings im Naturschutz wird seit geraumer Zeit in Deutschland kontrovers diskutiert. Es gibt für viele einzelne Tier- und Pflanzenarten bereits gut funktionierende bundesweite Überwachungsprogramme (z.B. für ausgewählte Wasservogelarten). Das Monitoring von Flächen bzw. ganzen Landschaften steckt dagegen noch in den Anfängen. Auf eine ausführliche Darstellung aller Positionen wird an dieser Stelle verzichtet, es sei z.B. auf BISCHOFF & DRÖSCHMEISTER (2000) oder PLACHTER et al. (2002) verwiesen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es sowohl an Programmen als auch an praktikablen Methoden für ein Monitoring naturschutzfachlich bedeutsamer Flächen mangelt und dass die Entwicklung weitgehend standardisierbarer und übertragbarer Konzepte gefordert wird. Es gilt der allgemeine Grundsatz: Es soll mit geringen finanziellen Mitteln ein möglichst weitreichendes Monitoring realisiert werden (FARTMANN et al., 2001). Es gibt noch große Datenlücken zu Fragestellungen des Naturschutzes, und ein politischer Konsens für die Einrichtung von Indikatorsystemen und abgestimmten Monitoringprogrammen besteht momentan noch nicht (BÜRGER & DRÖSCHMEISTER, 2001).

In einem vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) entwickelten Gesamtrahmen soll unterschieden werden zwischen dem Monitoring naturschutzfachlich wertvoller Flächen und dem Monitoring der „Normallandschaft“. Für ein bundesweites Monitoring der „Normallandschaft“ ist das Konzept der Ökologischen Flächenstichprobe entwickelt worden (vgl. DRÖSCHMEISTER, 2001 und HOFFMANN-KROLL et al., 2000), wobei auf fest eingerichteten Stichprobenflächen in einem bestimmten Turnus verschiedenste Indikatoren aufgenommen werden. Teilweise könnte sie damit auch für die Erfüllung der EU-Berichtspflichten außerhalb der Schutzgebiete eingesetzt werden (BÜRGER & DRÖSCHMEISTER, 2001). Eine bundesweite Umsetzung dieses Konzeptes ist bisher jedoch nicht absehbar.

Eine traditionell verbreitete Form der Datenerhebung für ein flächenhaftes Monitoring sind Biotoptypen- und Landnutzungskartierungen bzw. Biotopkataster. Aufgrund der föderalen Struktur Deutschlands sind in den einzelnen Bundesländern ganz unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Erhebung naturschutzbezogener Flächendaten verbreitet, so dass ein Zusammenführen einzelner Datenbestände oft sehr schwierig oder sogar unmöglich scheint. Es gibt in einigen Bundesländern eine strikte Trennung von Zuständigkeiten bei Wald- und Offenflächen (z.B. in Bayern und Thüringen), es werden verschiedenste Kartierschlüssel bei der selektiven terrestrischen Biotopkartierung eingesetzt, und auch die Aktualisierungszeiträume sind höchst unterschiedlich.

In den neuen Bundesländern wurde Anfang der 90er Jahre eine flächendeckende Biototypen- und Landnutzungskartierung auf Basis von Color-Infrarot-Luftbildern durchgeführt. Dieser Datensatz ist eine wertvolle Grundlage für viele Fragestellungen des Naturschutzes und der Landschaftsplanung, seine längst überfällige Aktualisierung ist jedoch in vielen neuen Bundesländern ungeklärt und wahrscheinlich auch mit traditionellen Methoden finanziell nicht mehr zu leisten¹. In den meisten alten Bundesländern ist eine solche flächendeckende und einheitliche Datenbasis nicht vorhanden.

Für die Erfüllung der Anforderungen des Monitorings im Sinne der EU-Vorgaben und besonders der FFH-RL kann also kaum auf bereits bestehende Programme zurückgegriffen werden und bundesweit einheitliche Datengrundlagen fehlen.

2.2 Natura 2000

In den nachfolgenden Abschnitten zu „Natura 2000“ wird etwas ausführlicher zu den Hintergründen und Anforderungen der FFH-Richtlinie sowie zur Geschichte ihrer Umsetzung in Deutschland Stellung genommen, um den dringenden Handlungsbedarf zu verdeutlichen, der sich in Folge einer jahrelangen Verzögerungstaktik angestaut hat. Die Gebiete der Vogelschutzrichtlinie gehören zwar ebenfalls zum Schutzgebietssystem „Natura 2000“, sie wird jedoch nur der Vollständigkeit halber erwähnt, denn das Thema der vorliegenden Arbeit konzentriert sich ausschließlich auf die Anforderungen der FFH-Richtlinie.

2.2.1 Grundsätze und Geschichte

Mit der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (92/43/EWG vom 21. Mai 1992) zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen wurde das erste umfassende europäische Rahmengesetz zum Lebensraum- und Artenschutz ins Leben gerufen. Alle EU-Mitgliedsstaaten sind demnach verpflichtet, ein europaweit zusammenhängendes Netz von besonderen Schutzgebieten unter dem Namen „Natura 2000“ zu schaffen. Diese Schutzgebiete sollen in repräsentativer Weise die aus gemeinschaftlicher Sicht besonders schutzwürdigen Lebensräume und Arten erhalten und entwickeln und damit die biologische Artenvielfalt in Europa nachhaltig sichern. Dazu gehören auch die Schutzgebiete, die nach der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG vom 2. April 1979) ausgewiesen wurden. Diese sogenannten „Special Protected Areas“ (SPA) bilden mit den „Special Areas for Conservation“ (SAC, von hier an als FFH-Gebiete bezeichnet) der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie das Schutzgebietssystem „Natura 2000“. Durch die Bildung eines Biotopverbundes soll den ökologischen Anforderungen der zu schützenden Arten Rechnung getragen werden, deshalb liegt ein wesentlicher Schwerpunkt der FFH-RL auf dem Schutz der natürlichen Lebensräume (SSYMANK, 2000). Ein weiterer wichtiger Punkt in der Präambel der FFH-RL ist die Aussage, die „Pflege von Landschaftselementen, die von ausschlaggebender Bedeutung für wildlebende Tiere und Pflanzen sind, zu fördern“. Damit wird der Forderung, ein kohärentes Netz, d.h. ein Biotopverbundsystem, zu schaffen, erneut Nachdruck verliehen. Weitere grundlegende Ziele sind der konkrete Artenschutz, die Überwachung der Schutzobjekte, Maßnahmenkontrollen sowie die Information der Öffentlichkeit.

Die zu schützenden Lebensräume und Arten werden in den Anhängen I und II der FFH-RL benannt, Kriterien zur Auswahl der Gebiete sind im Anhang III verzeichnet. Lebensräume und Arten, die in erhöhtem Maße gefährdet sind, werden zusätzlich als prioritär eingestuft und erfordern somit besondere Aufmerksamkeit.

Die Auswahl und Bewertung der Gebiete erfolgt unter Berücksichtigung der Kriterien im Anhang III der FFH-RL, dazu gehören u.a. die Repräsentativität des Vorkommens eines LRT oder einer Art in Bezug auf das Gesamtvorkommen in bestimmten geografischen Bezugseinheiten, die relative Flächen- oder Populationsgröße, der Erhaltungszustand bzw. die Wiederherstellbarkeit des LRT. Die Basis für die Bewertung der Repräsentativität bildet eine Gliederung Europas in sieben biogeografische Regionen (Abb. 2.1), zusätzlich dazu wird in Deutschland die naturräumliche Gliederung betrachtet.

¹ Sachsen-Anhalt und Sachsen befinden sich mit einer landesweiten digitalen Luftbildbefliegung im Jahr 2005 in einer Vorreiterrolle in Bezug auf die Aktualisierung der Biototypen- und Landnutzungskartierung.

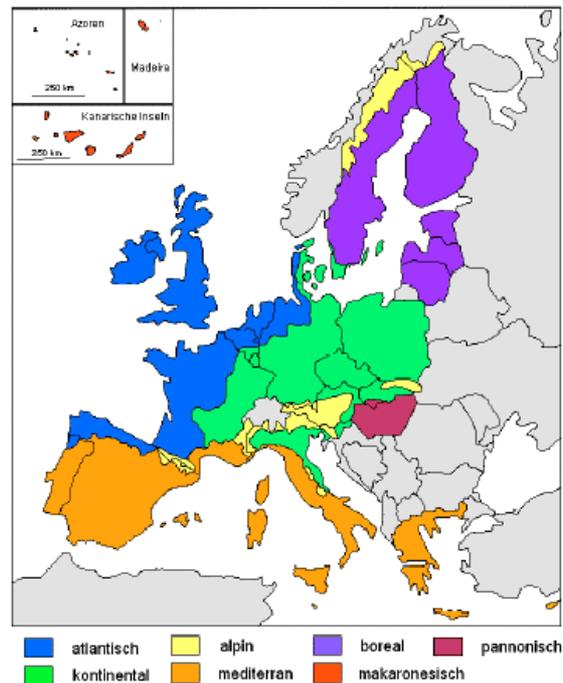


Abb. 2.1: Karte der biogeografischen Regionen der EU (Quelle: <http://www.natura2000-dvl.de/content01/03.html>, 23.07.2005)

Nach der FFH-RL müssen FFH-Gebiete als besondere Schutzgebiete deklariert werden. Die Art der Unterschutzstellung der Gebiete obliegt dem Ermessen der EU-Mitgliedsstaaten, jedoch sind die Schutzbestimmungen sehr eng an das zu schützende Objekt gebunden. Projekte und Pläne, die ein FFH-Gebiet direkt oder indirekt betreffen, müssen deshalb einer Verträglichkeitsprüfung unterzogen werden. Diese kann somit auch bei Eingriffen außerhalb des Schutzobjektes notwendig werden, wenn eine Beeinträchtigung nicht auszuschließen ist (BALZER, 2000).

Während die SPA-Gebiete sofort nach ihrer Meldung an die Kommission dem „Natura 2000“-Netz angehören, war für die FFH-Gebiete folgender Zeitplan in drei Phasen vorgesehen: nach der Verabschiedung der FFH-RL 1992 gab es eine Frist von 2 Jahren für ihre Umsetzung in nationales Recht. Die vollständigen Listen mit Gebietsvorschlägen² sollten in einer ersten Phase bis 1995 vorliegen. Phase zwei mit der gemeinschaftlichen Bewertung und Auswahl der Gebiete auf EU-Ebene sollte bis 1998 abgeschlossen sein. Die letzte Phase umfasste die Ausweisung als besondere Schutzgebiete durch die Mitgliedsstaaten innerhalb einer 6-Jahresfrist. Demnach sollte 2004 das „Natura 2000“-Netz weitgehend entwickelt sein (zur Umsetzung dieses Zeitplans in Deutschland siehe Kapitel 2.2.3). Mit dem Beitritt der zehn neuen Mitgliedsstaaten im Mai 2004 ist das „Natura 2000“-Netz um wertvolle Lebensräume und Arten gewachsen. Inhaltlich müssen die neuen Mitglieder alle Vorgaben der FFH-RL erfüllen. Jedoch zählen die zeitlichen Rahmenbedingungen erst ab dem Beitrittstermin, so dass in den ersten drei Jahren die Meldungen erfolgen und nach neun Jahren die Schutzgebiete ausgewiesen sein müssen.

2.2.2 Berichtspflichten und Monitoring

Jeder Mitgliedsstaat der EU ist nach erfolgter Anerkennung seiner „Natura 2000“-Gebiete zur regelmäßigen Kontrolle ihres Zustandes und der Ergebnisse von Schutz- oder Entwicklungsmaßnahmen verpflichtet. Somit ist zum ersten Mal in Europa eine gesetzliche Regelung geschaffen worden, die eine Erfolgskontrolle im Naturschutz fordert (RÜCKRIEM & ROSCHER 1999). Um zuverlässige Aussagen dazu treffen zu können, bedarf es umfangreicher und flächendeckender Informationen zu den einzelnen

² In dieser Phase wird von „Sites of Community Importance“ (SCI) gesprochen, erst nach der endgültigen Anerkennung und Unterschutzstellung der Gebiete sind es „Special Areas for Conservation“ (SAC)

Lebensräumen und Arten, zu ihrem Entwicklungsstand und möglichen Gefährdungen und Beeinträchtigungen.

In der FFH-RL werden ausdrücklich die Überwachung (Monitoring) der LRT und Arten, Berichtspflichten zum Artenschutz (alle zwei Jahre) und öffentliche Durchführungsberichte mit Kontrollen des Erhaltungszustandes der FFH-Gebiete und der Ergebnisse von Maßnahmen (alle sechs Jahre) gefordert. Der Begriff Erhaltungszustand eines Lebensraumtyps umfasst laut Artikel 1 der FFH-RL alle Faktoren, die „sich langfristig auf seine natürliche Verbreitung, seine Struktur und seine Funktionen sowie das Überleben seiner charakteristischen Arten“ auswirken können. Das Monitoring bezieht sich jedoch nicht nur auf die LRT und Arten in den FFH-Gebieten selbst, sondern muss auch außerhalb der Schutzgebiete gewährleistet sein. In den FFH-Gebieten müssen laut Artikel 6 die notwendigen Pflege- und Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, gegebenenfalls bedeutet dies die Aufstellung von Pflege- und Entwicklungsplänen. Unter allen Umständen ist die Verschlechterung des Erhaltungszustandes eines LRT oder des Habitats einer Art zu verhindern. Erhaltung umfasst im Sinne der FFH-RL sowohl die Maßnahmen des konservierenden Schutzes und der Wiederherstellung als auch Maßnahmen der Entwicklung und Renaturierung bzw. Wiederansiedlung (SSYMANK et al., 1998).

Die Verpflichtung zur Überwachung sowie zur regelmäßigen Berichterstattung ist in der FFH-RL an drei Stellen explizit festgelegt:

Artikel 11: Laufende Überwachung des Erhaltungszustandes der LRT und Arten

Artikel 16: Protokoll über Ausnahmeregelungen zum Schutz der Arten alle zwei Jahre

Artikel 17: Bericht alle sechs Jahre

- über Ergebnisse der allgemeinen Überwachung gemäß Artikel 11
- über Durchführung von Maßnahmen im Sinne der RL
- über Bewertung der Auswirkungen dieser Maßnahmen auf den Erhaltungszustand der Arten und LRT

„Es sind Vorkehrungen zu treffen, durch die sich eine Überwachung des Erhaltungszustandes der in dieser Richtlinie genannten natürlichen Lebensräume und Arten sicherstellen lässt.“ (FFH-RL, Präambel)

„Der Erhaltungszustand eines natürlichen Lebensraums wird als günstig erachtet, wenn sein natürliches Verbreitungsgebiet sowie die Flächen, die er in diesem Gebiet einnimmt, beständig sind oder sich ausdehnen und die für seinen langfristigen Fortbestand notwendige Struktur und spezifischen Funktionen bestehen und in absehbarer Zukunft wahrscheinlich weiterbestehen werden und der Erhaltungszustand der für ihn charakteristischen Arten [...] günstig ist.“ (FFH-RL, Artikel 1).

Diese wenig konkreten Aussagen verdeutlichen, dass geeignete Monitoringprogramme sowohl für die Lebensräume als auch für die Arten aufgestellt werden müssen. In welcher Form dies geschieht, kann jeder Mitgliedsstaat selbst gestalten.

2.2.3 Umsetzung der FFH-RL in Deutschland

Die Umsetzung der FFH-RL kommt in Deutschland nur sehr langsam voran, die Einbindung in nationales Recht erfolgte erst 1998 mit einer Novelle des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG). Weitergehende Regelungen ergaben sich 2002 mit dem Neuregelungsgesetz BNatSchG 2002, dabei wurde erstmals ausdrücklich die Schaffung eines länderübergreifenden Biotopverbundsystems mit einem Anteil von mind. 10% der Landesfläche gefordert (§3 BNatSchG 2002) und die Erhaltung und Vermehrung von verbindenden Landschaftselementen betont (§5 BNatSchG 2002).

Diese zögerliche Handhabung erklärt auch den erheblichen Verzug bei der Meldung geeigneter Gebiete und bei deren Inventarisierung. Da aufgrund der föderalen Struktur Deutschlands die Zuständigkeit für Naturschutzaufgaben weitgehend bei den Bundesländern liegt, sind diese auch verantwortlich für die Aufstellung von Gebietslisten. Die von der EU gesetzte Meldefrist vom Juni 1995 verging, ohne dass ein

einziges Gebiet aus Deutschland gemeldet wurde, weswegen es 2001 aufgrund unzureichender Meldung von FFH-Gebieten bereits zu einer Klage und Verurteilung vor dem Europäischen Gerichtshof kam (BFN, 2005). Ähnliche Probleme ergeben sich bei der Umsetzung der Vogelschutzrichtlinie. Zum Januar 2005 hat Deutschland 4596 FFH-Gebiete (9,3 % der terrestrischen Landesfläche) und 539 (8,4 %) SPA-Gebiete an Brüssel gemeldet. Im Vergleich mit den anderen Mitgliedern der EU rangiert Deutschland damit auf den hinteren Plätzen (siehe Abb. 2.2). Momentan sind die Zwangsgeldverfahren suspendiert, da sich Deutschland bei der Nachmeldung von Gebieten kooperativ gezeigt hat (BFN, 2005). Weitere Klagen in Bezug auf die Vogelschutzrichtlinie sind jedoch in Vorbereitung, da auch hier die bisher gemeldeten Gebiete nicht ausreichen.

SITES OF COMMUNITY IMPORTANCE

Update of 20 June 2005

MS	MS Area (km ²)	Total Number	Total Area (ha)	Total Area (km ²)	Terrestrial Area (ha)	Terrestrial Area (km ²)	% Terrestrial I (1)	No. of sites in which a marine part is noted	Marine Area (ha)	Marine Area (km ²)	MS
AT	83 859	164	888393	8 884	888 393	8 884	10,6			-	AT
BE	30 528	278	322088	3 221	303 968	3 040	10,0	1	18 120	181	BE
CY	9250	26	50952	510	45 919	459	5,0	5	5 033	50	CY
CZ	78866	864	724413	7 244	724 413	7 244	9,2			-	CZ
DE	357 031	4596	5312334	53 123	3 508 961	35 090	9,8	46	1 803 372	18 034	DE
DK	43 093	254	1113595	11 136	317 696	3 177	7,4	118	795 899	7 959	DK
EE	45226	509	1059108	10 591	717 223	7 172	15,9	34	341 885	3 419	EE
ES	504 782	1382	11912184	119 122	11 393 065	113 931	22,6	88	519 119	5 191	ES
FI	338 145	1660	4793224	47 932	4 279 054	42 791	12,7	94	514 170	5 142	FI
FR	549 192	1222	4267544	42 675	3 767 510	37 675	6,9	88	500 034	5 000	FR
GR	131 940	239	2764097	27 641	2 164 296	21 643	16,4	102	599 801	5 998	GR
HU	93030	467	1302497	13 025	1 302 497	13 025	14,0			-	HU
IE	70 280	413	1056074	10 561	717 450	7 175	10,2	92	338 624	3 386	IE
IT	301 333	2255	4397733	43 977	4 175 028	41 750	13,9	162	222 707	2 227	IT
LT	65200	276	140886	1 409	138 862	1 389	2,1	1	2 024	20	LT
LU	2 597	47	38311	383	38 311	383	14,8			-	LU
LV	64589	331	765091	7 651	709 461	7 095	11,0	6	55 631	556	LV
MT	316	23	3935	39	3 935	39	12,5			0	MT
NL	41 526	141	750837	7 508	395 497	3 955	9,5	24	355340	3 553	NL
PL	312685	192	1312386	13 124	1 312 386	13 124	4,2			0	PL
PT	91 990	94	1650294	16 503	1 601 278	16 013	17,4	23	49015	490	PT
SE	414 864	3903	6235623	62 356	5 652 319	56 523	13,6	320	583304	5 833	SE
SI	20273	259	635962	6 360	635 944	6 359	31,4	3	18	0,2	SI
SK	48845	382	573936	5 739	573 936	5 739	11,8			-	SK
UK	244 820	610	2510046	25 100	1 599 146	15 991	6,5	42	910900	9 109	UK
EU	3 944 260	20 587	54 581 542	545 815	46 966 547	469 665,47	11,9	1 249	7 614 995	76 150	EU

(1) % of SCI terrestrial area compared to MS terrestrial area

Abb. 2.2: „Natura 2000“-Barometer der EU, Meldestand der Mitgliedsstaaten im Vergleich (Quelle: http://europa.eu.int/comm/environment/nature/nature_conservation/useful_info/barometer/barometer.htm, 12.01.2006)

Grundvoraussetzung für die Auswahl eines Gebietes ist die genaue Kenntnis über die Verbreitung, Ausbildung und Qualität der einzelnen Lebensraumtypen und Artenvorkommen. Da es in Deutschland anfangs keine spezifisch auf die FFH-RL ausgerichtete Kartierung gab (wie z.B. in Spanien), mussten diese Daten aus anderen, oft nicht flächendeckend vorliegenden, naturschutzfachlichen Informationen gewonnen werden (z. B. aus Biotoptypenkartierungen, Schutzgebietsgutachten, selektiver Biotopkartierung usw.), so dass aus naturschutzfachlicher Sicht anfangs noch nicht genügend Gebiete gemeldet waren (BALZER, 2000). Viele Bundesländer gingen den Weg des geringsten Widerstandes und meldeten bereits unter Schutz gestellte Flächen (vor allem Naturschutzgebiete, Nationalparks und SPA-Gebiete), demzufolge die geforderte Kohärenz des „Natura 2000“-Netzes eher zufällig entstehen muss und viele Lebensräume, die in Mitteleuropa ihre Hauptverbreitung haben, unterrepräsentiert sind. So kommen alle Buchenwaldgesellschaften des Anhangs I in Deutschland vor, die jedoch bisher noch keinem gesetzlichen Schutzstatus unterlagen (BALZER, 2000). Nach wie vor sind die Waldlebensraumtypen in den Gebietsmeldungen deshalb unterrepräsentiert, wie in einem bilateralen Gespräch der EU-Kommission mit Deutschland bemängelt wurde (BFN, 2005).

Mit dem geforderten Gebietsmanagement und der Erstellung regelmäßiger Berichte kommen weitere umfangreiche Aufgaben auf die Bundesländer zu. Nach dem ursprünglichen Zeitplan der FFH-RL wären erste detaillierte Berichte im Jahr 2000 fällig gewesen. Aufgrund der erheblichen Verzögerungen bei der Gebietsmeldung wurde jedoch mit der EU vereinbart, dass der erste ausführliche Bericht gemäß Art. 17 FFH-RL erst 2006/2007 abzugeben ist (KEHREIN, 2002), dann soll die Erstinventur aller Gebiete einschließlich der Zustandsbewertung beendet sein und ein Status-Quo-Bericht abgegeben werden. Der erste Bericht, der ein voll etabliertes Monitoringsystem verlangt, ist 2013 fällig.

2.2.3.1 Bewertung des Erhaltungszustandes

Grobe Richtlinien zur Bewertung des Erhaltungszustandes sind in Ergänzungsdokumenten der EU-Kommission vorgegeben. Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben hat die Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz (LANA) Mindestanforderungen für die Erfassung und Bewertung von Lebensräumen und Arten und deren Überwachung beschlossen. Der Erhaltungszustand wird in drei Kategorien von A bis C eingestuft (siehe Tab. 2.2), wobei C in der Praxis nicht weiter in C1 und C2 unterteilt wird (siehe Tab. 2.3), sondern C2 als Z bezeichnet wird. Diese Kategorien werden vergeben in den drei Parametern:

1. Vollständigkeit der lebensraumtypischen Habitatstrukturen
2. Vollständigkeit des lebensraumtypischen Arteninventars
3. Beeinträchtigungen

Außerdem wird in den Mindestanforderungen festgehalten, dass das Monitoring von LRT und Arten nicht auf die „Natura 2000“-Schutzgebiete beschränkt ist, sondern auch außerhalb der Gebiete gewährleistet sein muss.

Allgemeines Bewertungsschema zum Erhaltungszustand der LRT				
Vollständigkeit der lebensraumtypischen Habitatstrukturen	A hervorragende Ausprägung	B gute Ausprägung	C1 mäßige bis durchschnittliche Ausprägung	C2 irreversibel gestört; nicht regenerierbar
Vollständigkeit des lebensraumtypischen Arteninventars	A lebensraumtypisches Arteninventar vorhanden	B lebensraumtypisches Arteninventar weitgehend vorhanden	C1 lebensraumtypisches Arteninventar nur in Teilen vorhanden	
Beeinträchtigung	A gering	B mittel	C1 stark	
Allgemeines Bewertungsschema zum Erhaltungszustand der Arten				
Habitatqualität (artspezifische Strukturen)	A hervorragende Ausprägung	B gute Ausprägung	C1 mäßige bis durchschnittliche Ausprägung	C2 irreversibel gestört; nicht regenerierbar
Zustand der Population (Populationsdynamik und -struktur)	A gut	B mittel	C1 schlecht	
Beeinträchtigung	A gering	B mittel	C1 stark	

Tab. 2.2: Allgemeines Bewertungsschema zum Erhaltungszustand der LRT und Arten nach Vorgaben der LANA 2001 (Quelle: http://www.bfn.de/03/030306_lana.pdf, 23.07.2005)

Erhaltungszustand	Definition nach Standarddatenbogen	Erläuterungen gemäß EU-Dokument (vereinfacht)
A	sehr gut, unabhängig von der Wiederherstellungsmöglichkeit	hervorragende Struktur, bzw. gut erhaltene Struktur und hervorragende Aussichten für den Erhaltungsgrad der Funktionen
B	gut, Wiederherstellung in kurzen bis mittleren Zeiträumen möglich	gut erhaltene Strukturen und gute Aussichten für den Erhaltungsgrad der Funktionen, bzw. Struktur <u>oder</u> Aussichten ungünstiger und Wiederherstellung einfach oder mit durchschnittlichem Aufwand möglich
C	mittel bis schlecht, Wiederherstellung schwierig oder unmöglich	Struktur <u>und</u> Aussichten für den Erhaltungsgrad der Funktionen durchschnittlich oder schlecht, bzw. Struktur oder Aussichten gut, Wiederherstellung aber schwierig oder unmöglich
Z	zerstört	irreversibel gestört, nicht regenerierbar

Tab. 2.3: Kennzeichnung des Erhaltungszustands der LRT in der Praxis (Quelle: NLÖ, Niedersachsen, ergänzt)

Die Zuständigkeit für die Datenerhebung und die Überwachung des Erhaltungszustandes liegt bis auf wenige Ausnahmen³ bei den Bundesländern, auf die damit ein erheblicher Arbeitsaufwand zukommt. Die Daten müssen vom BfN gebündelt und ausgewertet und als nationaler Bericht an die EU weitergegeben werden. Seitens der EU sind erst im April 2005 mit einem verbindlichen Dokument (DocHab-04-03/03 rev.3) detailliertere Vorgaben zur Überwachung der LRT und Arten gemacht worden, was dazu führte, dass einige in Deutschland bereits etablierte Ansätze nicht mit den EU-Vorgaben übereinstimmen. Auf EU-Ebene sind andere Bewertungsstufen vorgesehen (drei Stufen: günstig, ungünstig-mangelhaft, ungünstig-schlecht). Die Koordination der Länderinitiativen zur Übersetzung des deutschen Systems und damit zur Erfüllung dieser neuen Vorgaben obliegt ebenfalls dem Bundesamt für Naturschutz.

Im Rahmen einer Studie vom BfN (RÜCKRIEM & ROSCHER, 1999) wurden Empfehlungen zur Umsetzung der Berichtspflicht nach Art. 17 FFH-RL erarbeitet. Die Autoren schlagen vor, eine grundsätzliche Aufteilung der Überwachung in ein Grund- und ein Zusatzprogramm vorzunehmen. Das Grundprogramm soll dabei als Frühwarnsystem fungieren und den Erhaltungszustand anhand von Qualitätsparametern eher grob abschätzen. Dies soll vorwiegend mit standardisierten Erfassungsmethoden und Bewertungskriterien realisiert werden. Erst wenn durch das Grundprogramm ein kritischer Zustand festgestellt wird, soll das Zusatzprogramm zum Einsatz kommen, in dem die Ursachen der Verschlechterung oder der Abweichung vom gewünschten Zustand aufgedeckt werden. Unter das Zusatzprogramm fällt auch die Kontrolle von Entwicklungsmaßnahmen, da diese nicht mit dem „schnellen“ Grundprogramm bewertet werden können. Die Bewertung erfolgt durch den Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit vorgegebenen Schwellenwerten bzw. Toleranzbereichen.

Da es gilt, vergleichbare Daten zu erheben, wurden mehrere Bund-Länder-Arbeitskreise eingerichtet, in denen Experten für alle LRT (unterteilt in fünf Hauptgruppen) und Arten Empfehlungen zur Bewertung des Erhaltungszustandes und zum Monitoring erarbeiten. Auch die Gefährdungsursachen und die Erhaltungs- und Entwicklungsmaßnahmen werden von den Arbeitskreisen in einheitlichen Referenzlisten festgehalten.

Es sollen wissenschaftlich fundierte Aussagen zum Erhaltungszustand und zur Bestandesentwicklung mit möglichst geringem Erhebungsaufwand erreicht werden. Wie das im Einzelnen praktisch realisiert werden soll, ist in vielen Bundesländern noch weitgehend unklar.

In Tab. 2.4 ist beispielhaft ein Bewertungsschema für trockene europäische Heiden (LRT 4030) dargestellt. In den einzelnen Kategorien sind je nach LRT prozentgenaue bzw. manchmal eher allgemeine Vorgaben zu Indikatoren und Schwellenwerten aufgelistet. Diese Schemata sind von der

³ Für die Ausschließliche Wirtschaftszone und einige große Liegenschaften des Bundes (z.B. Truppenübungsplätze der Bundeswehr) ist der Bund zuständig.

länderübergreifenden LANA entwickelt worden und sollten demnach in allen Bundesländern eingesetzt werden. Leichte Modifikationen aufgrund regionaler Besonderheiten können dabei auftreten.

4030 Trockene europäische Heiden					
Vollständigkeit der lebensraum-typischen Habitat-strukturen	A - hervorragend			B - gut	C - mittel bis schlecht
	<p><i>Biototypen:</i> 06100 Zwergstrauchheiden (HZ) pp, 06102 trockene Sandheiden (HZS) pp, 0610201 weitgehend ohne Gehölzbewuchs (Deckungsgrad der Gehölze < 10 %) (HZSO) pp, 0610202 mit Gehölzbewuchs (Deckungsgrad der Gehölze 10-30 %) (HZSG) pp, 08280 Vorwälder (WV) pp, 08281 Vorwälder trockener Standorte (WVT) pp, 082811 Eichen-Vorwald (WVTQ) pp, 082816 Birken-Vorwald (WVTW) pp, 082817 Espen-Vorwald (WVTZ) pp, 082819 Kiefern-Vorwald (WVTK) pp</p> <p><i>Charakteristische Vegetationstypen:</i> Genistion pilosae v, Genisto pilosae-Callunetum v, Euphorbio-Callunetum v</p>				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Strukturvielfalt mit Pionier-, Aufbau-, Reife- und Degenerationsphase ▪ Regelmäßige Nutzung oder Pflege (Beweidung, Mahd, Brennen, Plaggen) ▪ geringe Vergrasung durch heideabbauende Arten (Deckung von Gräsern wie Draht-Schmiele <30%) ▪ Deckung von Gehölzen auf größeren Teilflächen < 10%, ggf. Einzelbäume oder Baumgruppen ▪ offene Bodenstellen zahlreich vorhanden (Flächenanteil ca. 5-10 %) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mittlere Strukturvielfalt (nicht alle Altersphasen vorhanden) ▪ unregelmäßige Nutzung bzw. Pflegedefizite ▪ deutliche Vergrasung durch heideabbauende Arten (Deckung von Gräsern wie Draht-Schmiele 30-50%) ▪ Deckung von Gehölzen im überwiegenden Teil der Heide 10-35 % ▪ offene Bodenstellen in geringen Flächenanteilen vorhanden (Flächenanteil <5 %) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ geringe Strukturvielfalt (überwiegend Degenerationsphase) ▪ keine Nutzung oder Pflege ▪ starke Vergrasung durch heideabbauende Arten (Deckung von Gräsern wie Draht-Schmiele > 50-90%) ▪ Deckung von Gehölzen im überwiegenden Teil der Heide >35-75 %; ▪ offene Bodenstellen fehlend 		
Vollständigkeit des lebensraum-typischen Arteninventar	A - vorhanden			B - weitgehend vorhanden	C - in Teilen vorhanden
	<p><i>Charakteristische Pflanzenarten:</i> Agrostis capillaris, Anthoxanthum odoratum, Arctostaphylos uva-ursi, <u>Calluna vulgaris</u>, Carex arenaria, Carex ericetorum, Carex pilulifera, Danthonia decumbens, Deschampsia flexuosa, Euphorbia cyparissias, Festuca psammophila, Festuca trachyphylla, <u>Genista anglica</u>, <u>Genista germanica</u>, <u>Genista pilosa</u>, Hieracium pilosella, Hypericum perforatum, Hypochaeris radicata, Luzula campestris, Potentilla erecta, Rumex acetosella, <u>Vaccinium myrtillus</u></p> <p><i>Charakteristische Moosarten:</i> Hypnum jutlandicum, Polytrichum juniperinum, Polytrichum piliferum, Dicranum scoparium, Pleurozium schreberi u. a.</p> <p><i>Charakteristische Flechtenarten der Gattungen</i> Cladonia, Cetraria u.a.</p>				
	naturraumtypisches Arteninventar annähernd vollständig vorhanden (z.B. > 5 typische Arten von Farn- und Blütenpflanzen)		typische Arten zahlreich vorhanden (z.B. 3-5 typische Arten von Farn- und Blütenpflanzen)		nur noch einzelne Kennarten vorhanden (z.B. 1-2 typische Arten von Farn- und Blütenpflanzen)
	Vorkommen bestimmter Tierarten (stark gefährdet, von besonderer arealgeographischer Bedeutung, mit Indikatorfunktion für besondere Standortqualität) sind wertsteigernd.				
Beeinträchtigungen	A - gering			B - mittel	C - stark
	<p>Natürliche Sukzession durch Nutzungsauflassung (Wiederbewaldung), Zerstörung der Vegetation durch mechanische Belastung (z.B. durch Freizeitnutzung, Sandabbau), Zerschneidungseffekte, Ablagerung von Abfällen, Ausbreitung von Neophyten, Nährstoffeinträge (als Folge Ausbreitung von Nitrophyten), Aufforstung u.a.</p>				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine bzw. geringe Beeinträchtigungen erkennbar ▪ Neophyten/Nitrophyten fehlen weitgehend 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ geringe bzw. kleinflächige Beeinträchtigung ▪ Neophyten/Nitrophyten in geringen Flächenanteilen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ starke bzw. großflächige Beeinträchtigung ▪ Neophyten/Störzeiger in größeren Flächenanteilen 		

Tab. 2.4: Beispiel für ein Bewertungsschema für den LRT 4030 (Quelle: LUA Brandenburg)

2.2.3.2 Monitoringkonzepte der Bundesländer

Auch die konzeptionelle Umsetzung des FFH-Monitorings wird zum großen Teil auf Länderebene durchgeführt. Es gibt daher unterschiedlichste Ideen und Bearbeitungsstände bei der Erstellung von Programmen, wie diese Aufgabe zu erfüllen sei. Im April 2004 wurde von der Autorin eine Nutzerbefragung der zuständigen Stellen ausgewählter Bundesländer durchgeführt, um einen Überblick

über Stand und Perspektiven zu bekommen. Der verwendete Fragebogen (siehe Anhang) teilt sich in vier Hauptbereiche mit Fragen zu:

1. Arbeitsablauf/Bearbeitungsintensität/Methoden
2. Bearbeiter/Personal
3. Datengrundlagen
4. Kostenrahmen

Bei noch nicht abschließend geklärten Themenbereichen sollten richtungsweisende Einschätzungen abgegeben werden. Von insgesamt 10 befragten Ländern haben auch nach mehrmaligem Nachfragen nur 7 geantwortet und nur 5 den Fragebogen ausgefüllt (siehe Tab. 2.5).

Bundesland	Antwort	Fragebogen ausgefüllt	wollen Fernerkundung einsetzen
Baden-Württemberg	ja	nein	
Bayern	nein		
Hessen	ja	ja	ja
Mecklenburg-Vorpommern	nein		
Niedersachsen	ja	ja	ja
Nordrhein-Westfalen	ja	ja	nein
Rheinland-Pfalz	ja	ja	ja
Sachsen	nein		
Sachsen-Anhalt	ja	ja	ja
Schleswig-Holstein	ja	nein	

Tab. 2.5: Auflistung der befragten Bundesländer

Die Auswertung der beantworteten Fragebögen ergab, dass die Länder momentan vollauf mit der Ersterfassung der LRT beschäftigt sind und ein detailliertes Monitoringkonzept noch gänzlich fehlt. Angedacht sind in mehreren Ländern Stichprobenuntersuchungen, die mit Luftbilddauswertungen kombiniert werden sollen. Es wird außerdem noch darauf gewartet, dass die EU, das BfN und die LANA konkrete Vorgaben herausgeben, die dann in jedem Falle unter Berücksichtigung landesspezifischer Eigenheiten eingearbeitet werden sollen. Die LRT außerhalb von FFH-Gebieten sollen u.a. mit Hilfe der selektiven Biotopkartierung bzw. anderen Landesprogrammen (z.B. ökologische Flächenstichprobe, siehe Abschnitt 2.1.4) überwacht werden. Auch die Einbeziehung anderer Programme mit Überwachungsgebieten wie z.B. der Wasserrahmenrichtlinie wird diskutiert. Die Daten werden überall digital verwaltet und mit Geoinformationssystemen (GIS) und externen Datenbanken ausgewertet. Als Grundlage für die terrestrische Ersterhebung dienen dabei v.a. vorhandene Biotopkartierungen, topografische Karten, Forsteinrichtungsdaten und CIR-Luftbilder. Die Frage nach einer ersten Kostenschätzung für das LRT-Monitoring wurde nur von einem Bundesland beantwortet, wobei diese Antwort bereits als überholt und nicht mehr gültig eingestuft wurde, d.h. es ist überhaupt noch nicht absehbar, welche Kosten ein Monitoring im Sinne der FFH-RL umfassen wird.

In Brandenburg wird unter der Federführung des Landesumweltamtes an einem Monitoringkonzept unter Berücksichtigung der Vorgaben von LANA und BfN gearbeitet. Laut SCHOKNECHT (mündl., Tagung Lebus am 06.05.2003) sollen repräsentative Stichprobenflächen für jede naturräumliche Haupteinheit ausgewählt werden. Bereits bestehende Monitoringprogramme (z.B. die ökosystemare Umweltbeobachtung in den Biosphärenreservaten vgl. SCHÖNTHALER et al., 2003) sollen einbezogen werden, und die Frequenz der Überprüfung wird unterschiedlich sein. Eine Einteilung in Grund- und Zusatzprogramm ist vorgesehen. Es ist geplant und wird teilweise bereits umgesetzt, in allen Gebieten mit Hilfe der Naturwacht und ehrenamtlicher Gebietsbetreuer den allgemeinen Gebietszustand zu

beobachten. Dieses brandenburgische Konzept ist laut Auswertung der Befragung bisher einzigartig. In ausgewählten Gebieten sollen qualitative Veränderungen der LRT und Arten von Spezialisten und Wissenschaftlern beobachtet werden. Die Veränderung der Flächenausdehnung und die Wiederbewaldung von Offenland-LRT soll in einigen Gebieten mit Fernerkundungsdaten beobachtet werden.

2.3 Synergetische europäische Richtlinien

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, ist es wünschenswert, verschiedene Aufgaben des Monitorings aus unterschiedlichen Bereichen sinnvoll miteinander zu kombinieren, um Mehraufwand zu vermeiden und Kosten zu sparen. Nachfolgend sollen deshalb zwei EU-Richtlinien kurz vorgestellt werden, die ebenfalls eine flächenbezogene Überwachung fordern und die teilweise zur Erfüllung der Berichtspflichten der FFH-RL eingesetzt werden bzw. auch ihrerseits Daten der FFH-RL nutzen könnten.

2.3.1 Wasserrahmenrichtlinie

Mit der Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG vom 23.10.2000) zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik trat am 22.12.2000 ein umfangreiches Regelwerk in Kraft, das moderne Ansätze des Gewässerschutzes europaweit durchsetzen will. Das primäre Ziel der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ist ein zumindest "guter Zustand" aller EU-Gewässer. Auf der Basis einer umfassenden Bestandsaufnahme der Gewässerbelastungen soll mit Hilfe von Maßnahmenprogrammen und Bewirtschaftungsplänen der "gute Zustand" der Gewässer bis 2015 erreicht werden.

Von der WRRL betroffen sind alle Oberflächen- und Grundwasserkörper. Dazu gehört auch der Schutz von wasserabhängigen Lebensräumen (Verbindung zur FFH-RL), die nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen und v.a. die Einstellung des Eintrags gefährlicher Schadstoffe.

Ein sehr wichtiger Ansatz der WRRL ist, die Bewirtschaftung des Gewässers in seinem gesamten Einzugsgebiet zu beobachten. Da auch die Landnutzung eine große Rolle beim Stoffeintrag in die Gewässer spielt, muss diese in die Betrachtung einbezogen werden. Zuerst findet eine Bestandsaufnahme der Situation statt, die zur Bewertung des Gewässerzustands dient und aus der eventuell notwendige Maßnahmen abgeleitet werden, die zu einer Verbesserung führen sollen. Sie ist auch die Basis für die Gestaltung der zukünftigen Bewirtschaftungspläne und Überwachungsprogramme. Weiterhin müssen zur Überwachung der Wasserbeschaffenheit Messnetze eingerichtet bzw. erweitert werden. Zu den zu überwachenden Parametern gehören u.a. Schadstoffe, Phytoplankton, Makrophyten und Fische (Verbindung zur FFH-RL).

Zur Zeit wird in Deutschland unter der Leitung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) an der Umsetzung der WRRL gearbeitet. Als Datengrundlage für die Bewertung der Landnutzung in den Einzugsgebieten dienen bisher CORINE Land Cover⁴ und ATKIS⁵ (LAWA, 2003). Diese sehr grobe und stellenweise veraltete Datenbasis wurde gewählt, um eine überall einheitliche Basis zu verwenden, obwohl es in vielen Bundesländern genauere Daten zu Biotoptypen und Landnutzung gibt. Für eine zukünftige Überwachung und für die Planung von Bewirtschaftungsmaßnahmen wird das sicher an vielen Stellen nicht ausreichen, so dass auch hier ein Einsatzpotential für die Fernerkundung und für eine Verknüpfung mit der FFH-RL zu sehen ist.

2.3.2 Vorgaben für die Landwirtschaft

Mit der Einführung der EG-Verordnung Nr. 1782/2003 vom 29. September 2003 wird ab 2005 die Gewährung von Direktzahlungen u.a. an die Einhaltung von Vorschriften in den Bereichen Umwelt, Futtermittel- und Lebensmittelsicherheit sowie Tiergesundheit und Tierschutz geknüpft. Diese Vorschrift zur Beachtung anderweitig geltender Vorschriften (Cross Compliance) beinhaltet Regelungen zur

⁴ siehe Kapitel 4.4

⁵ siehe Kapitel 4.4

Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in gutem landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand, zur Erhaltung von Dauergrünland und zu 19 Einzelvorschriften einschlägiger, schon bestehender EU-Regelungen (vgl. BL-AG, 2005).

Vor allem die Überwachung des guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustandes und der Erhaltung von Dauergrünland kann mit den Monitoringgeboten der FFH-RL und der WRRL verbunden werden, da auch hier regelmäßig flächenbezogene Daten erhoben werden müssen.

Ein guter landwirtschaftlicher und ökologischer Zustand bedeutet u.a.: Erhaltung der organischen Bodensubstanz, Erosionsvermeidung, Instandhaltung von Brachflächen (Mahd) und die Erhaltung von Landschaftselementen. Die drei letztgenannten Vorgaben sind sehr gut mit Fernerkundungsmethoden zu überwachen, und gerade die Erfassung von Landschaftselementen außerhalb der „Natura 2000“-Gebiete könnte eine wertvolle Zusatzinformation für die Berichtspflichten nach FFH-RL sein.

2.4 Fernerkundung

Sowohl flugzeug- als auch satellitengestützte Fernerkundung ist seit langer Zeit ein unentbehrlicher Informationslieferant im Naturschutz. So ist die flächendeckende visuelle Kartierung von Biotoptypen und Landnutzung aus Color-Infrarot-Luftbildern (CIR) ein wichtiges Instrument des Naturschutzes und der naturschutzfachlichen Planung, da Biotoptypen als Komplexindikatoren für die Gesamtstandortbedingungen angesehen werden können (WIEGLEB, 2002) und als Grundlage für viele Bewertungsverfahren dienen.

Auf regionaler und globaler Ebene sind Satellitenbilder seit Jahrzehnten für naturschutzfachliche Fragestellungen operationell im Einsatz, so z.B. für forstliche Inventuren, das Monitoring von Desertifikation und im Katastrophenschutz (Waldbrände, Überschwemmungen etc.). Erst seit der Verfügbarkeit der modernen Sensorgeneration mit räumlichen Auflösungen unter 1 m sind Satellitenbilder auch in den Fokus für großmaßstäbige Anwendungen gerückt.

Nachfolgend werden die Grundlagen der Fernerkundung mit optischen multispektralen Systemen vorgestellt. Andere Systeme wie Radar- oder Mikrowellensensoren werden hier nicht betrachtet. Ebenso werden Hyperspektralsensoren außer Acht gelassen, da sie für diese Arbeit nicht von Interesse sind.

2.4.1 Grundlagen der Fernerkundung

Fernerkundung basiert auf der Tatsache, dass die Erdoberfläche und jedes auf ihr befindliche Objekt elektromagnetische Strahlung in charakteristischer Art und Weise reflektiert, absorbiert, transmittiert und emittiert. Flugzeug- oder satellitengetragene Sensoren messen ausgewählte Teile dieser Strahlung und wandeln sie in Grauwerte um, die dann einer Auswertung zur Verfügung stehen. Es wird unterschieden in passive Sensoren, die ausschließlich die natürlichen Strahlenquellen (Sonne) nutzen und aktive Sensoren, die selbst Strahlung aussenden und deren Reflexion auf der Erdoberfläche messen (z.B. Radar). Das Spektrum passiv gemessener Strahlungswerte beschränkt sich nicht nur auf den Bereich des sichtbaren Lichts, sondern enthält je nach Sensor auch Infrarot- und Wärmestrahlung. Die Reflexion bzw. Emission von elektromagnetischer Strahlung unterliegt mehreren Störeinflüssen, die bei einer Auswertung in Betracht gezogen werden müssen. Dazu zählen temporale (z.B. Wachstumsperioden), räumliche (z.B. Relief) und atmosphärische Effekte (ALBERTZ, 2001). Aufgrund von Streuung und Absorption der Sonnenstrahlung an Molekülen (v.a. H₂O und CO₂) in der Atmosphäre ergeben sich je nach Wellenlänge unterschiedliche Anteile an transmittierter Strahlung (ALBERTZ, 2001). Abb. 2.3 zeigt schematisch die atmosphärischen Fenster, die für die Fernerkundung genutzt werden können. Besonders wichtig ist der Bereich des sichtbaren Lichtes (VIS) und der Infrarotbereich (IR).

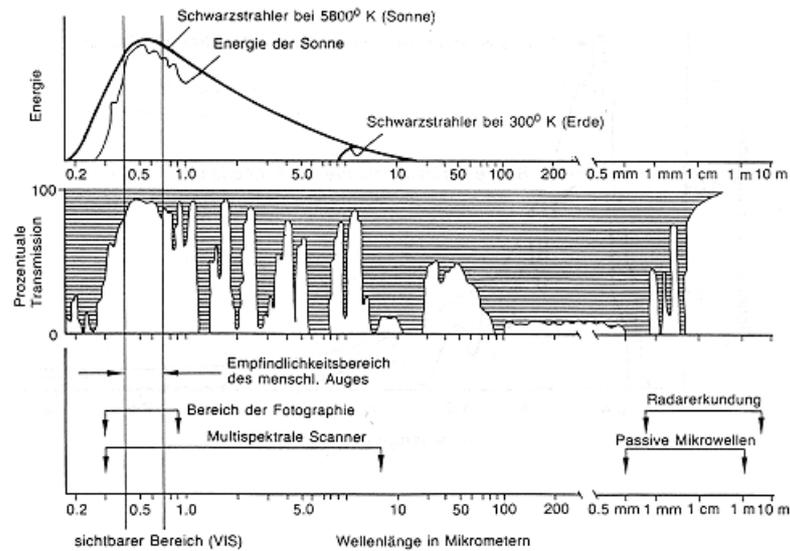


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der atmosphärischen Durchlässigkeit (aus KAPPAS, 1994)

Die vom Sensor letztendlich gemessene Strahlung (at-sensor-radiance) ist die spektrale Strahlendichte L , auch als Radianz bezeichnet, die die von einem Körper ausgesandte Strahlungsleistung pro Flächeneinheit und Raumwinkel umfasst [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$]. Diese ergibt sich aus der solaren Radianz und den verschiedensten Einflüssen wie Streuung und Absorption in der Atmosphäre sowie den Oberflächen- und Materialeigenschaften des bestrahlten Körpers (SCHOWENGERDT, 1997).

In Abb. 2.4 sind die wichtigsten atmosphärischen Faktoren dargestellt, die die am Sensor gemessene Radianz bestimmen. Dazu kommen noch Effekte, die durch Streuung von benachbarten Objekten verursacht werden. Vor allem sehr helle Oberflächen können in benachbarte dunkle Bereiche hineinstreuen und erscheinen deshalb größer (SCHOWENGERDT, 1997), dieser Effekt kann jedoch bei sehr geringen Pixelgrößen vernachlässigt werden.

Fernerkundungssensoren werden im Wesentlichen durch ihre räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung charakterisiert. Das räumliche Auflösungsvermögen beschreibt das kleinste Maß der Trennbarkeit von Objekten, d.h. den kleinsten Abstand zwischen zwei Punkten, die noch getrennt dargestellt werden können. Damit wird gleichzeitig der Maßstabsbereich der Anwendungen limitiert, so sind für hochauflösende Fernerkundungsdaten (≤ 5 m) Maßstabsbereiche bis zu 1 : 15 000, für multispektrale Bilder (≥ 20 m) ab 1 : 50 000 vertretbar. Das spektrale Auflösungsvermögen beschreibt die Fähigkeit des Sensors, Wellenlängenbereiche der elektromagnetischen Strahlung in einzelne Bildkanäle zu trennen. Die radiometrische Auflösung wird durch die Anzahl der Grauwerte bestimmt, die ein Sensor maximal aufnehmen kann.

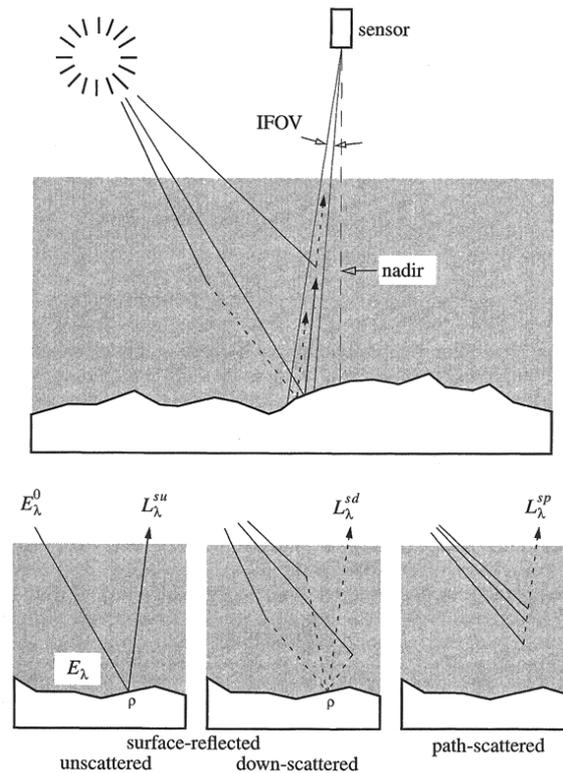


Abb. 2.4: Schematische Darstellung atmosphärischer Einflüsse auf die Radianz (SCHOWENGERDT, 1997)

2.4.2 Aufnahmesysteme

Grundsätzlich unterscheiden sich die Aufnahmesysteme in ihrer Trägerplattform. Werden Flugzeuge, Ballons oder Drachen genutzt, spricht man von Luftbildern oder luftgestützter Fernerkundung. Sind die Aufnahmesysteme auf Satelliten montiert oder werden die Bilder von einer Raumstation gemacht, handelt es sich um raumgestützte Fernerkundung.

Seit Beginn der Satellitenfernerkundung sind mehr als 40 verschiedene Satelliten mit optischen Sensoren in Umlauf gebracht worden, die für die unterschiedlichsten Themenbereiche konzipiert wurden (vgl. KAPPAS, 1994). LANDSAT (USA), SPOT (Frankreich) und IRS (Indien) sind nur drei Beispiele für seit langem operationell erfolgreich arbeitende Satellitensysteme (Tab. 2.6). Weitere Systeme sind geplant.

Name	verfügbar seit	spektrale Parameter	max. Auflösung PAN in Bodenmetern	Wiederholrate in Tagen
Bereits operationelle Satelliten				
Landsat TM + ETM 7 (USA)	04/99	7 Kanäle MS + 1 Pan	15	16
IRS-1D LISS-III (Indien)	09/97	4 Kanäle MS + 1 Pan	5.8	25
SPOT 5 (Frankreich)	05/02	5 Kanäle MS + 1 Pan	2,5	26
Geplante Missionen				
EKOSAT-IR (Deutschland, Israel)	geplant	Pan	5	?
Rapid Eye (Deutschland)	geplant	5 Kanäle MS + 1 Pan	6.5	1

Tab. 2.6: Übersicht der wichtigsten operationellen und geplanten zivilen Satellitenmissionen mit mittlerer bis hoher geometrischer Auflösung

In den letzten fünf Jahren gab es einen erheblichen Sprung in der geometrischen Auflösung. Vorher war es vor allem aufgrund militärischer Einschränkungen nicht möglich, Daten mit einer sehr hohen geometrischen Auflösung zivilen Anwendern unbeschränkt zur Verfügung zu stellen. Die Satelliten Ikonos und Quickbird stellen in dieser Hinsicht eine Revolution dar, da sie überwiegend kommerziellen Betreibergesellschaften gehören. Quickbird sollte ursprünglich nur eine Auflösung von 1 m haben, die Genehmigung für einen tieferen Orbit und eine damit höhere geometrische Auflösung von bis zu 0.61 m erfolgte erst im letzten Moment.

Die in Tab. 2.7 aufgeführten bereits operationellen und noch geplanten höchstauflösenden Satellitensysteme verdeutlichen das große Interesse an diesen Daten, die nicht nur für vegetationskundliche Fragestellungen eingesetzt werden, sondern auch für topografische Aufnahmen, für Schadensbilanzen nach Naturkatastrophen und immer noch zum größten Teil für militärische Anwendungen.

	Betreiberland	max. Auflösung PAN/MS in Bodenmetern	Startdatum
Bereits operationelle Satelliten			
OrbView 3	USA	1 / 4	gestartet 2003
Ikonos-2	USA	1 / 4	gestartet 1999
Quickbird	USA	0.61 / 2.44	gestartet 2001
EROS A1	Israel	1.8	gestartet 2000
Geplante Missionen			
DST	Deutschland	1	geplant
WorldView I	USA	0.5	geplant für 2007
WorldView II	USA	0.46/1.84	geplant für 2008
Pleiades	Frankreich	0.7 / 2.8	geplant für 2008
EROS-B	Israel	0.82	geplant für 2006
EROS-C	Israel	0.7 / 2.8	geplant für 2009
OrbView 5 Orblmage	USA	0.41 / 1.64	geplant für 2007

Tab. 2.7: Übersicht der operationellen und geplanten höchstauflösenden Satellitenmissionen (aus BAUDOIN, 2004, SANDAU, 2004 und JACOBSEN, 2005, verändert und ergänzt)

Traditionell sind im großmaßstäbigen Bereich flugzeuggetragene Aufnahmesysteme sehr verbreitet und liefern Daten für unterschiedlichste Anwendungen (z.B. für Photogrammetrie, Geologie und Naturschutz). Dabei wurden bisher konventionelle fotografische Kameras und Filme verwendet. Seit kurzer Zeit werden auch zunehmend flugzeuggetragene Systeme mit digitaler Aufnahmetechnik entwickelt (siehe Tab. 2.8). Die dadurch verbesserte radiometrische Auflösung und der direkte digitale Daten- und Verarbeitungsfluss sind viel versprechend, ebenso wie die gleichzeitig mögliche Erstellung digitaler stereoskopischer Daten (SCHIEWE & EHLERS, 2004) bzw. die Kombination mit anderen digitalen Sensoren (z.B. LIDAR). Die Auswahl und Breite der verwendeten multispektralen Kanäle orientiert sich mehr oder weniger an den höchstauflösenden Satellitensystemen wie Quickbird und Ikonos, so dass das Potenzial vorhanden ist, bereits an den Satelliten erprobte digitale Auswertungsverfahren (z.B. Vegetationsindizes) auf die Luftbilder anzuwenden. Die Systeme befinden sich jedoch momentan eher noch in der Phase der Erprobung. Geeignete Testdaten, die ausreichend große Gebiete abdecken, waren für diese Arbeit nicht verfügbar.

Sensor	HRSC-AX	ADS 40	UltraCam-D	DMC
Sensortyp	Zeilen-CCD	Zeilen-CCD	Flächen-CCD	Flächen-CCD
Einführung	2000	2000	2003	2002
Radiometrische Auflösung	12 bit	12 bit	>12 bit	12 bit
Spektrale Auflösung (nm)	520 – 760 (pan)	465 – 680 (pan)	390 – 690 (pan)	400 – 580 (pan)
	450 – 510 (blau)	428 – 492 (blau)	390 – 530 (blau)	400 – 580 (blau)
	530 – 576 (grün)	533 – 587 (grün)	470 – 660 (grün)	500 – 650 (grün)
	642 – 682 (rot)	608 – 662 (rot)	570 – 690 (rot)	590 – 675 (rot)
	770 – 814 (NIR)	703 – 757 (NIR) oder 833 – 887 (NIR)	670 – 940 (NIR)	675 – 850 (NIR)

Tab. 2.8: Ausgewählte digitale flugzeuggestützte Aufnahmesysteme (aus SCHIEWE & EHLERS, 2004, verändert)

2.4.2.1 Quickbird

Da Quickbird die zur Zeit höchste Bodenauflösung aller kommerziell verfügbaren Satelliten bietet und seine spektralen Eigenschaften einen Einsatz für vegetationsbezogene Fragestellungen erlauben, bezieht sich die vorliegende Arbeit auf diesen Satelliten.

Quickbird ist nicht nur aufgrund seiner hohen Bodenauflösung für viele Anwendungen der Naturschutzverwaltung eine interessante Alternative zu Luftbildern. Die vom Betreiber eingeräumte Möglichkeit, Daten für ganz unregelmäßig geformte Flächen zu erwerben, eröffnet auch finanzielle Spielräume, die in Zeiten knapper Kassen wichtig sein können.

Der Satellit wird von der US-amerikanischen Firma DigitalGlobe betrieben und vermarktet und ist nach einem Fehlversuch im Herbst 2000 seit dem 18. Oktober 2001 im Orbit. Die folgenden technischen Daten sind den Produktblättern von DigitalGlobe entnommen (DIGITALGLOBE, 2003). Er ist für eine Lebenszeit von fünf Jahren ausgelegt (hat aber Treibstoff für sieben Jahre), weitere Satelliten sind geplant (Worldview I und Worldview II, siehe Tab. 2.7). Quickbird gehört zu den opto-elektronischen Abtastsystemen und trägt insgesamt zwölf linear angeordnete Arrays (DCA) aus CCDs⁶: je sechs multispektrale und sechs panchromatische, die auf einem pushbroom-Scanner montiert sind (siehe Abb. 2.5).

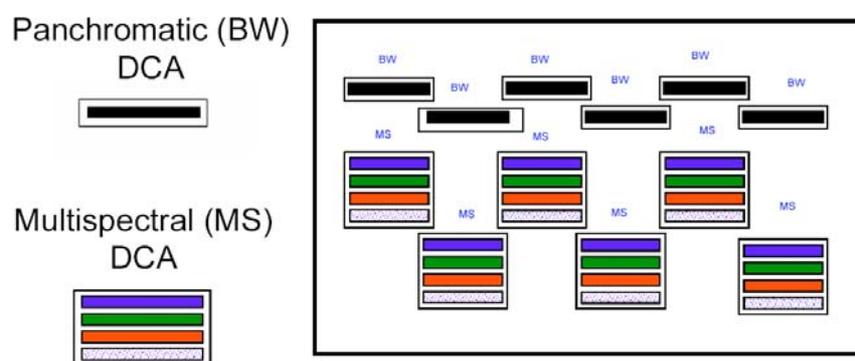


Abb. 2.5: Schematische Anordnung der detector chip arrays (DCA), (aus DIGITALGLOBE, 2004)

⁶ CCD: charged coupled device, Matrix von Kristallen, die auf Lichteinstrahlung mit Veränderung ihrer elektrischen Ladung reagieren, diese Ladung wird ausgelesen und je nach Intensität in Grauwerte umgewandelt

Beide Sensoren nehmen fast gleichzeitig den gleichen Ausschnitt auf und sind bis zu 25° off-Nadir schwenkbar. Der kurze Zeitversatz von ca. 0.2 s (entspricht ca. 1.5 km im Orbit) ist in Abb. 2.6 schön zu erkennen.

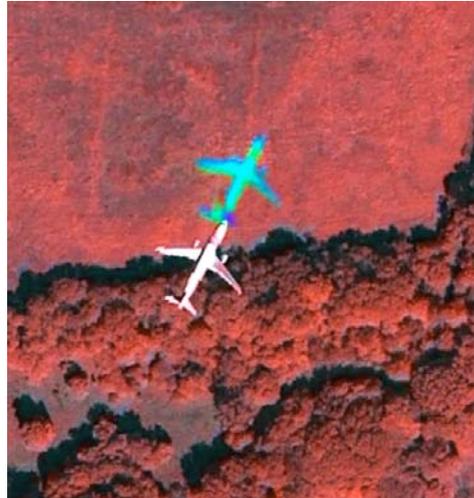


Abb. 2.6: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam, pan-sharpened Darstellung (RGB: 4,3,2). Zeitversatz in der Aufnahme der multispektralen und panchromatischen Daten.

Quickbird fliegt in 450 km Höhe in einer sonnensynchronen⁷ Umlaufbahn und braucht 93.5 Minuten für eine Erdumrundung. Die Bodenauflösung beträgt 0.72 m bis max. 0.61 m im panchromatischen und 2.88 m bis max. 2.44 m im multispektralen Bereich. Die wirkliche Bodenauflösung hängt vom Aufnahmewinkel ab, im Nadir werden die höchsten Auflösungen erzielt, außerdem schwankt die geometrische Auflösung etwas innerhalb einer Szene, da die Bereiche nahe dem Nadir höher aufgelöst werden, als die am Rand befindlichen. Die Streifenbreite ist mit 16.5 km größer als bei allen anderen bisher verfügbaren höchstauflösenden Satelliten, die Streifenlänge kann bis zu 165 km in einer Aufnahme betragen. Die radiometrische Auflösung ist mit 11 Bit (2048 Graustufen) sehr hoch. Die spektrale Auflösung des Multispektralsensors ähnelt den ersten vier Bändern von Landsat TM:

Blau (B)	0.45 – 0.52 μm
Grün (G)	0.52 – 0.60 μm
Rot (R)	0.63 – 0.69 μm
Nahes Infrarot (NIR)	0.76 – 0.90 μm
Spektrale Auflösung PAN:	0.45 – 0.90 μm

Stereoaufnahmen sind prinzipiell verfügbar, jedoch momentan noch unverhältnismäßig teuer. Die Wiederholrate wird je nach Aufnahmewinkel und Breitengrad mit 1 bis 3.5 Tagen angegeben. In Mitteleuropa beträgt der Abstand zwischen zwei Flugstreifen an einem Tag 24° und von einem Tag zum nächsten 8°, d.h. dass der Satellit bei einem kleinen Aufnahmewinkel ca. aller drei Tage den gleichen Bereich überfliegt.

⁷ sonnensynchron bedeutet, dass von der Sonne aus gesehen, der Satellit das ganze Jahr über immer die gleiche Kreisbahn über die Erde zieht und jeden Punkt auf der sonnenzugewandten Seite der Erde immer um etwa die gleiche Ortszeit überfliegt

2.4.3 Bildauswertungsverfahren

Fernerkundungsdaten sind nicht mit Informationen gleichzusetzen. Informationen müssen durch Interpretation gewonnen werden. Interpretation bedeutet an einer bestimmten Fragestellung orientierter Erkenntnisgewinn, d.h. es werden auf der Grundlage des Erkannten Rückschlüsse gezogen auf nicht direkt Erkennbares (ALBERTZ, 2001). Die Interpretation digitaler bzw. analoger Bilddaten kann visuell oder rechnergestützt erfolgen. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei der Fernerkundung selbst und bei der anschließenden Datenverarbeitung um eine modellhafte Abbildung der Realität handelt, die immer mit Generalisierungen verbunden ist (siehe Abb. 2.7)

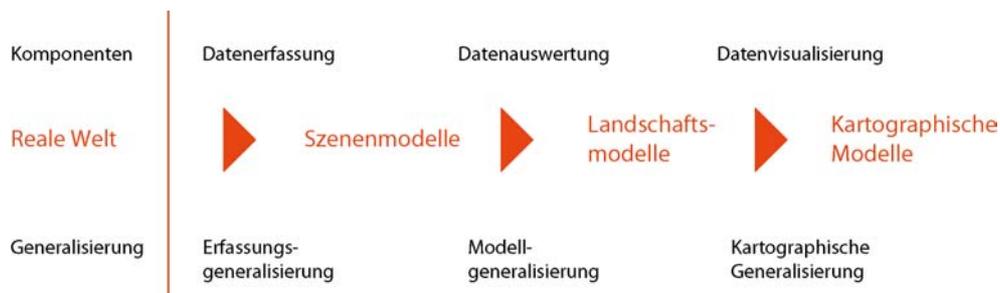


Abb. 2.7: Generalisierungsstufen bei Fernerkundungssystemen (aus SCHIEWE, 2003)

Der gesamte Informationsgehalt eines Luft- bzw. Satellitenbildes kann nur mit Hilfe eines Interpretationsschlüssels objektiv und nachvollziehbar erschlossen werden, der eine systematische Aufstellung der vorkommenden charakteristischen Objektmerkmale enthält (BfN, 2002). Ein Interpretationsschlüssel ist nicht für alle Fragestellungen, Zeiträume und Maßstäbe gleichermaßen einsetzbar, da er von verschiedenen Parametern abhängig ist:

- Art des Bildmaterials
- Aufnahmezeitpunkt
- Standörtliche Gegebenheiten
- Bildmaßstab
- Verfügbarkeit von Zusatzinformationen

So muss bei jedem neuen visuellen oder automatisierten Interpretations- bzw. Klassifikationsvorgang überprüft werden, ob der verwendete Schlüssel anwendbar ist oder ob Anpassungen vorgenommen werden müssen bzw. sogar ein neuer Schlüssel zu erstellen ist (BfN, 2002).

2.4.3.1 Visuelle Bildinterpretation

Die visuelle Interpretation von Luft- oder Satellitenbildern wird seit vielen Jahrzehnten für unterschiedlichste Fragestellungen praktiziert. Der komplexe Vorgang der visuellen Bildinterpretation kann in zwei Stufen getrennt werden: das *Erkennen* von Objekten (z.B. Wasser, Wald usw.) und das daran anschließende *Interpretieren* (z.B. Bruchwald). Die Stufe des Erkennens bezieht sich vor allem auf die visuellen Erfahrungen des Bearbeiters, während bei der Interpretation aufgrund der erkannten Objekte mit Hilfe von Fachwissen und spezifischen Vorkenntnissen Schlussfolgerungen gezogen werden (HILDEBRANDT, 1996).

Das visuelle Erkennen von Objekten basiert auf der menschlichen Fähigkeit, komplexe Strukturen, Formen und Farben sowie ihre Zusammenhänge zu erfassen und somit Objekte voneinander abzugrenzen. Verschiedene Faktoren spielen für die visuelle Abgrenzung eine Rolle: Farbton, Helligkeit, Größe und Form des Objektes, Schattenwurf, Textur, die relative Lage des Objektes sowie insbesondere die individuelle Erfahrung des Interpreten und sein Fachwissen bezogen auf die Fragestellung (HILDEBRANDT, 1996). Die Erkennungsparameter können folgendermaßen beschrieben werden: verschiedene Grauwerte (oder Farbtöne) innerhalb einer Fläche/eines Objektes vereinigen sich zu dem visuellen Eindruck eines mittleren Grauwertes/Farbtönen. Charakteristische Texturen entstehen aus Grauwertunterschieden. Objektgrenzen

werden bei dem signifikanten Wechsel von Textur und mittlerem Grauwert erkannt. Form und Größe des abgegrenzten Objektes sind weitere wichtige Merkmale für die Identifizierung. Diese Erkennungsparameter können bereits bei einer zweidimensionalen, monoskopischen Bildinterpretation verwendet werden. Aussagekräftige Unterscheidungsmerkmale wie räumliche Gestalt, Höhe und Höhenunterschiede können nur mit der dreidimensionalen, stereoskopischen Bildinterpretation gewonnen werden.

Die Wahl der Interpretationsmethodik muss sich an der Fragestellung orientieren und die Eigenarten der zu interpretierenden Objekte in Betracht ziehen, dabei ist immer ein ausgewogenes Verhältnis von Bestimmtheit (Interpretationstiefe) und Sicherheit anzustreben (HILDEBRANDT, 1996). Insgesamt ist eine stereoskopische Auswertung mit wesentlich höherem Informationsgewinn verbunden, Objekte können mit größerer Sicherheit interpretiert werden als bei einer rein monoskopischen Bildauswertung (HILDEBRANDT, 1996).

Ein traditionelles Anwendungsgebiet der visuellen Interpretation von Fernerkundungsdaten ist die Kartierung von Biootypen und Landnutzungseinheiten auf der Basis von meist stereoskopischen Color-Infrarot-Luftbildern (CIR). Aufgrund des komplexen Reflexionsverhaltens lebender Pflanzen (vgl. hierzu HILDEBRANDT, 1996 und ALBERTZ, 2001) in den Spektralbereichen des sichtbaren Lichts und vor allem des Infrarots, können aus CIR-Luftbildern (abhängig vom Bildmaßstab) sehr detaillierte Aussagen über Art, Zusammensetzung, Vitalität und Alter von Pflanzenbeständen gewonnen werden. Im nahen Infrarot von 0.7 bis 1.3 μm ist ein breites Reflexionsmaximum gesunder grüner Blattorgane zu verzeichnen (siehe Abb. 2.8), so dass gerade in diesem Bereich vielfältige Unterschiede gut zu erkennen sind. Verursacht wird dies hauptsächlich durch Mehrfachreflexion innerhalb des Mesophylls, während das Absorptionsmaximum im sichtbaren Licht (v.a. im roten Bereich) durch die Blattpigmente hervorgerufen wird.

Die Kartierung von Biootypen und Landnutzungseinheiten betrachtet größere Flächen mit unterschiedlicher Zusammensetzung von Pflanzenarten, Wuchsformen, Bodenbedeckung u.v.m. – es handelt sich also um eine Aggregation über dieser Fläche (HILDEBRANDT, 1996). Einflüsse des Bodens und von Schattenbereichen müssen in die Interpretation mit einbezogen werden.

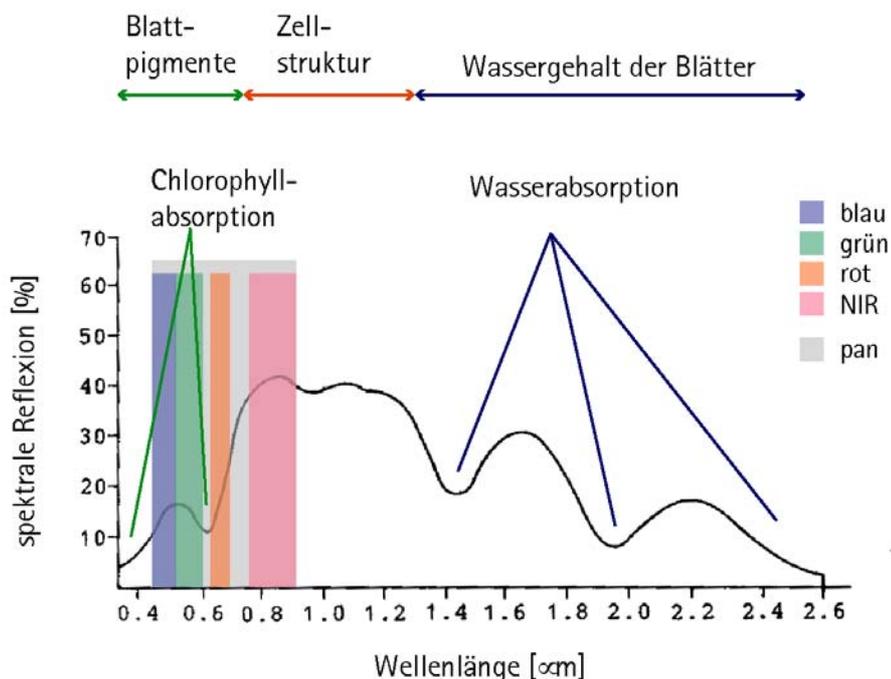


Abb. 2.8: Typische spektrale Reflexionskurve grüner Blattorgane (nach HILDEBRANDT, 1996, verändert) und Verteilung der Spektralkanäle von Quickbird

2.4.3.2 Klassische automatisierte Bildanalysemethoden

Die automatische, digitale Auswertung von Fernerkundungsdaten erfolgt mit Hilfe mathematischer Transformationsfunktionen. Rechnergestützte Bildverarbeitung unterteilt sich in vier Hauptbereiche: Bildkorrektur, Bildverbesserung, Bildklassifikation und Transformation. Eine radiometrische Bildkorrektur ist notwendig, um eventuelle atmosphärische Störungen oder Fehler des Aufnahmesystems zu korrigieren. Geometrische Entzerrungen sind unerlässlich, um die Bilddaten durch ein geometrisches Bezugssystem mit anderen Daten kombinieren zu können und aufnahmebedingte Verzerrungen zu beheben. Mit Bildverbesserungsmaßnahmen wird eine optimale Ausnutzung der radiometrischen Information angestrebt, indem die Bildqualität und der Bildkontrast verstärkt werden. So können spezielle Filtertechniken Grauwertunterschiede hervorheben bzw. unterdrücken.

Die eigentliche Gewinnung von Information aus digitalen Bilddaten durch Bildklassifikation wird angewendet, um die einzelnen Bildpunkte in thematisch zusammengehörige Gruppen zu unterteilen. Dabei wird die Tatsache genutzt, dass die digitalen Bilddaten in mehrdimensionalen (durch die Kanäle vorgegebenen) Datenmatrizen vorliegen, welche mit Hilfe verschiedener parametrischer oder nicht-parametrischer Verfahren je nach Ähnlichkeit und Nähe in Klassen eingeteilt werden können. Die Grauwerte der verschiedenen Kanäle (n Kanäle) können in einem n -dimensionalen Merkmalsraum abgebildet werden, jedes Objekt wird darin durch einen Merkmalsvektor repräsentiert. Es wird davon ausgegangen, dass die Merkmalsvektoren einander ähnlicher Objekte (die also wahrscheinlich derselben Klasse angehören) nah beieinander liegen und so genannte Cluster bilden.

Transformation bedeutet das Erzeugen neuer Daten aus den Bildern mit Hilfe mathematischer Funktionen. Dazu zählen z.B. Farbraumtransformationen, die Berechnung von Indizes oder die weit verbreitete Hauptkomponententransformation, die v.a. für die Datenreduzierung oder für Änderungsanalysen eingesetzt wird.

Die unterschiedlichen Strategien, die für die Bearbeitungsmethodik von Relevanz sind, sollen nachfolgend kurz erläutert werden.

Bildklassifikationsmethoden gliedern sich in überwachte und unüberwachte Verfahren. Die Bearbeitungsmethodik stützt sich mit einer so genannten hierarchischen Klassifikation auf beide Verfahren. Unüberwachte Klassifikationen beruhen auf einer rein statistischen Unterteilung der spektralen Information in Klassen, die erst im Nachhinein einer thematischen Bedeutung (z.B. Landnutzungsklasse) zugeordnet werden. Im vorliegenden Fall wird der ISODATA-Clustering Ansatz verwendet (TOU & GONZALEZ, 1974): Der Bearbeiter bestimmt die Anzahl der gewünschten Klassen (Punktwolken oder Cluster), dann legt der Algorithmus diese Anzahl an Clustermittelpunkten im mehrdimensionalen Merkmalsraum fest und ordnet jedes Bildpixel dem Mittelpunkt zu, dem es am nächsten ist. Danach werden iterativ die Clustermittelpunkte gemittelt und alle Pixel erneut zugeordnet bis keine signifikante Änderung der Pixelzuordnungen mehr erfolgt.

Im Gegensatz dazu benutzen überwachte Klassifikationsmethoden Trainingsgebiete, deren spektrale Merkmale zur Klassenbildung verwendet werden. Es müssen mit Hilfe von Referenzinformationen Bereiche innerhalb des Bildes definiert werden, die die vorkommenden Klassen gut repräsentieren und die spektral möglichst homogen sind. Die spektrale Information der Trainingsgebiete wird als Signatur (statistische Charakteristik jeder einzelnen Klasse) gespeichert und jedes Pixel mit einem statistischen Verfahren der jeweils ähnlichsten Klasse zugeordnet.

Für die Bearbeitungsmethodik ist das Maximum-Likelihood-Verfahren von Interesse. Das Maximum-Likelihood-Verfahren arbeitet im Gegensatz zu anderen Verfahren nicht nur mit den gemittelten Reflexionswerten, sondern auch mit Kovarianzwerten (es wird davon ausgegangen, dass die Reflexionswerte einer Trainingsklasse annäherungsweise der Gauß'schen Normalverteilung entsprechen). Mit diesen Werten kann für jedes Pixel die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse berechnet werden. Es entstehen ellipsenförmige Linien gleicher Wahrscheinlichkeit bzw. glockenförmige Räume in der Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion (siehe Abb. 2.9), denen die Pixel zugeordnet werden können. Bei Vorhandensein von a-priori Wissen kann zusätzlich noch ein Parameter zur a-posteriori Wahrscheinlichkeit (Bayesian Decision Rule) einbezogen werden.

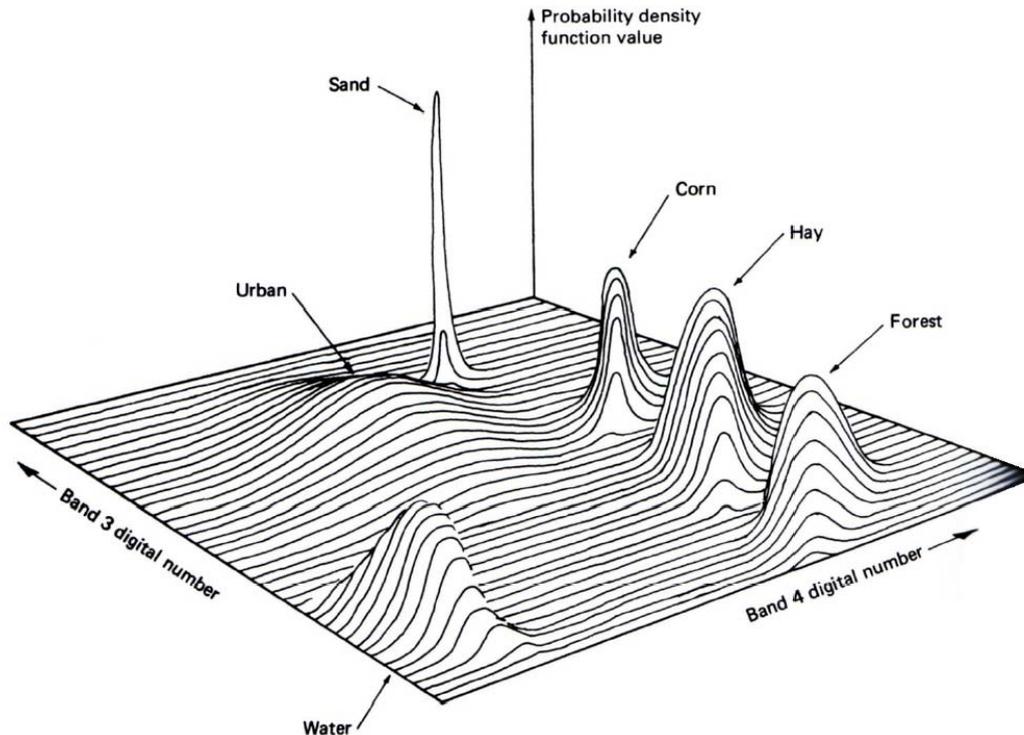


Abb. 2.9: Maximum Likelihood – Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion (aus LILLESAND et al., 2004)

2.4.3.3 Moderne Verfahren

Klassische Bildanalyseverfahren arbeiten auf Pixelbasis und werten die Grauwerte der einzelnen Pixel mit statistischen Methoden (z.B. den oben genannten) aus. Sie sind aufgrund der sehr hohen radiometrischen Varianz innerhalb einer Landnutzungseinheit bei kleinen Pixelgrößen nur eingeschränkt einsetzbar (HOFFMANN et al., 2000). Moderne Bildanalyseverfahren versuchen, den neuen Bildeigenschaften auf unterschiedlichste Weise sinnvolle Information abzugewinnen. Oft wird dabei angestrebt, die visuelle Fähigkeit des Menschen, komplexe Objekte zu erkennen und richtig einzuordnen, nachzuahmen. Objektorientierte Methoden benutzen daher nicht nur die spektralen Eigenschaften der Pixel sondern zusätzlich Textur-, Kontext- und Formparameter, um ein Bild in inhaltlich bedeutsame Bereiche zu segmentieren (vgl. BAATZ & SCHÄPE, 2000 oder MEYER, 2001), bevor es klassifiziert wird.

Leider gibt es trotz aller Vorteile vielfältige Probleme, die bei der Anwendung objektorientierter Verfahren auftreten. Die wohl gravierendsten sind die oft unzureichende Reproduzierbarkeit der Segmentierungsergebnisse und der hohe Aufwand, der mit der Anwendung dieser Methoden verbunden ist. Es wird daran gearbeitet, diese Defizite zu beseitigen. In diesem Zusammenhang sind z.B. die Arbeiten von LANG (2002) und KOK et al. (2002) sehr interessant, da sie sich mit verschiedenen Strategien auseinandersetzen, um die Nachvollziehbarkeit der Bildsegmentierung zu erhöhen. Mit der Segmentierung geht auch eine Generalisierung von Bildobjekten einher (KOCH et al., 2003), die für viele Anwendungen sinnvoll sein kann, jedoch nicht für die Ableitung quantitativer Parameter. Insgesamt muss festgestellt werden, dass es momentan noch keine zuverlässigen und übertragbaren Segmentierungslösungen gibt (SCHIEWE, 2003).

Für die Bildklassifikation sind nicht mehr nur die klassischen statistischen Methoden verfügbar, sondern auch fuzzy-logic-Verfahren (vgl. STOLZ, 1998), bei denen mittels Zugehörigkeitsfunktionen Klassen abgegrenzt werden. Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit ist die Per-parcel-Methode (HOFFMANN et al., 2000), die Vektordaten in die Klassifikation einbezieht, wodurch die Bildkomponenten vor der Klassifikation in thematisch zusammengehörige Bereiche aggregiert werden können. Voraussetzung ist hierbei jedoch eine möglichst lagegenaue und aktuelle Datengrundlage.

Die automatische Erfassung von Veränderungsflächen (change-detection), bei der Daten aus unterschiedlichen Jahren miteinander verglichen werden, kann für Monitoring-Aufgaben besonders

aufschlussreich sein (vgl. JANOTH et al., 2002 und KRESSLER & STEINNOCHER, 1995), ebenso texturbasierte Auswerteverfahren, die für die Klassifikation zusätzliche wertvolle Informationen liefern können (vgl. STEINNOCHER, 1997 und WEZYK et al., 2004). Ein integratives Arbeiten und das Verknüpfen mehrerer Auswertekomponenten und Sensoren kann die Qualität der Auswertung erheblich erhöhen (SCHIEWE, 2003).

Von besonderem Interesse für die vorliegende Arbeit sind wissensbasierte Ansätze, die mit Hilfe von Sekundärinformation und komplexen Regelwerken zur Klassifikation von Flächen dienen können (vgl. u.a. PEDDLE, 1995; FRIEDL & BRODLEY, 1997; STOLZ, 1998; SINDHUBER, 1998; BAUER & STEINNOCHER, 2000). Die Verwendung von Wissensbasen und die Integration von Zusatzdaten hat gezeigt, dass die Zahl und Genauigkeit der Klassen wesentlich erhöht werden und vor allem die Übertragbarkeit des Klassifikationsverfahrens ermöglicht werden kann (u.a. HUTCHINSON, 1982; MASELLI et al., 1995; MCIVER & FRIEDL, 2002; EIUMNOH & SHRESTA, 2000).

Das Wissen kann aus verschiedenen Quellen stammen, z.B. von Luftbildinterpreten, aus Geodaten oder aus statistischen Testreihen. Grundlage für die Verwendung dieses Wissens in computergesteuerten Algorithmen ist die geeignete Formalisierung. Eine häufig verwendete Art der Formalisierung ist die Verwendung von Regeln nach folgendem Muster, wobei auch logische Verknüpfungen möglich sind:

IF Bedingung THEN Schlussfolgerung

Die Regeln werden durch eine Inferenz-Maschine auf die Bilddaten angewendet (Abb. 2.10).

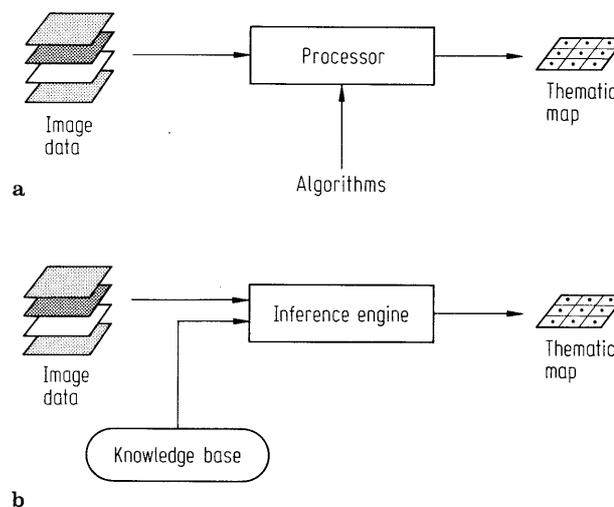


Abb. 2.10: Wissensbasierte Bildanalyse (b) im Vergleich zu traditionellen Verfahren (a) (Quelle: RICHARDS, 1993)

2.4.3.4 Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fernerkundungsdaten

Ein immer wiederkehrendes Problem der Fernerkundung ist die Übertragbarkeit von Auswertungsverfahren und in diesem Zusammenhang die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Satellitendaten, seien dies Daten verschiedener Aufnahmezeitpunkte oder verschiedener Sensoren. Einen Weg, damit umzugehen, stellt der Bezug auf physikalisch messbare Werte dar, d.h. nicht die originalen Grauwerte der Satellitenbilder, sondern die Reflektionseigenschaften der bestrahlten Objekte werden verglichen. Dazu werden die Grauwerte der Satellitendaten in Reflektanzwerte umgerechnet. Dies setzt eine genaue Kenntnis und modellhafte Umsetzung der vorherrschenden atmosphärischen Einflüsse und Gegebenheiten voraus. Ein solches Verfahren ist in mehreren Korrekturalgorithmen umgesetzt worden, ist jedoch immer noch sehr zeitintensiv und fehleranfällig.

Ein alternativer Weg, die Vergleichbarkeit herzustellen, ist die Verwendung abgeleiteter Werte, d.h. dass nicht die originalen Grauwerte zur Analyse dienen, sondern mittels Transformationsfunktionen

berechnete Werte. Ein weit verbreitetes Beispiel ist die Ableitung von Texturwerten, die innerhalb von Filterfenstern oder anderweitig festgelegten Zonen die Variabilität der Grauwerte belegen. Eine andere Möglichkeit stellt die Berechnung von Indizes durch Ratiobildung dar, wodurch die Unterschiede der Grauwerte in den einzelnen Spektralkanälen betont werden (z.B. der Normalized Difference Vegetation Index NDVI). Dennoch kann gerade für die Berechnung von Indizes nicht mit beliebigen Eingangsdaten gerechnet werden, es ist immer noch notwendig, eine grundlegende Vergleichbarkeit herzustellen. So können z.B. Daten unterschiedlicher radiometrischer Auflösung, d.h. mit erheblichen Unterschieden in der Anzahl möglicher Grauwerte nicht ohne weiteres verwendet werden.

Dazu kommt, dass einige Sensoren aufgrund ihrer technischen Komponenten ungewöhnliche spektrale Kurvenverläufe aufweisen. So ist z.B. in den originalen Grauwerten von Quickbird bei versiegelten Oberflächen immer ein Anstieg vom roten Kanal zum nahen Infrarot zu verzeichnen. Dies würde bei der Berechnung des Vegetationsindex NDVI, der auf diesen beiden Kanälen beruht, einen positiven Wert erzeugen und dadurch fälschlicherweise auf Vegetation hinweisen.

Es ist deshalb von Vorteil, einen Mittelweg aus beiden Ansätzen zu wählen, d.h. abgeleitete Werte zu verwenden, diese jedoch aus physikalisch messbaren Daten zu berechnen. Dazu bietet sich eine Alternative zu den kompliziert zu ermittelnden Reflektanzwerten, indem mit Hilfe von sensorspezifischen Kalibrierungsparametern die Radianz (vgl. Kapitel 2.4.1) berechnet wird, die der Sensor misst. Diese Radianzwerte sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da der atmosphärische Einfluss immer noch vorhanden ist, eine Ableitung von vergleichbaren Indizes ist damit jedoch möglich.

2.4.4 Hoch- und höchstauflösende Satelliten im Einsatz für den Naturschutz

Es gibt bereits einige viel versprechende Ansätze zur Überwachung geschützter Flächen und zu Biotoptypenkartierungen mittels höchstauflösender Fernerkundungsdaten. So die Arbeiten von LESER (2002), die den Einsatz von HRSC-Daten und segmentbasierten Klassifikationsverfahren für die Aktualisierung von Biotopkartierungen untersucht hat, GÄHLER et al. (2002), die mittels Bildung von Masken aus verschiedenen Vegetationsindizes sowie unüberwachter und überwachter Klassifikation HRSC-Daten für automatisierte Biotoptypenklassifizierung eingesetzt haben, ANDRESEN et al. (2002), die das Monitoring von Uferzonen mit objektorientiert analysierten IKONOS-Daten erforscht haben u.v.a. Alle kamen dabei zu guten Ergebnissen, jedoch sind die bereits genannten Probleme mit der Segmentierung bei LESER und ANDRESEN et al. ebenfalls aufgetreten. LESER kommt zu dem Schluss, dass die Einbeziehung von Vektordaten (z.B. Biotopkartierung) in den Segmentierungsprozess die Klassifikationsergebnisse erheblich verbessert, außerdem erhöht sich so die Reproduzierbarkeit der Segmentierung.

Die Detektion invasiver Pflanzen mit Hilfe von höchstauflösenden Fernerkundungsdaten und Zusatzinformationen untersuchten TSAI & CHEN (2004). Von großem Vorteil kann die Kombination von automatischen und visuellen Bildauswerteverfahren sein, unter anderem können so detaillierte Veränderungsanalysen z.B. durch den Vergleich von CIR-Luftbildern und Satellitenbildern realisiert werden (KENNEWEG et al., 2000).

Die Anwendung von verschiedenen Indikatoren, wie z.B. Landschaftsstrukturmaße oder EU-Indikatoren (ETC biodiversity indicators) und der Einsatz unterschiedlich aufgelöster FE-Daten zur Bewertung von „Natura 2000“-Flächen, wurde unter anderem von EU-Forschungsprojekten wie SPIN⁸ (2004) oder EON2000+⁹ (2004) untersucht. Diese Großforschungsprojekte betrachteten aufgrund ihrer überregionalen Ausrichtung auf Europa nur eine kleine Auswahl an Habitaten. Es gab bei beiden Projekten jeweils nur ein einziges Testgebiet in Deutschland. Interessant sind die Ergebnisse des SPIN-Projektes, das auch verschiedene Klassifikationsansätze einbezog: es wurden Klassifikationsgenauigkeiten zwischen 70 und 90% erreicht, jedoch nicht immer in der gewünschten thematischen Tiefe, der verwendete europaweit gültige EUNIS-Klassifikationsschlüssel war für lokale Bedürfnisse zu ungenau. In jedem Falle kam den verwendeten Zusatzdaten (z.B. Boden- oder Reliefinformationen) eine große Bedeutung zu.

⁸ SPIN: Spatial Indicators for European Nature Conservation

⁹ Earth observation for NATURA 2000+

Das Projekt Bioassess untersuchte u.a. die Möglichkeiten des Einsatzes von Fernerkundungsdaten zur Bewertung der Biodiversität. Viel versprechende Ergebnisse wurden hier mit höchstauflösenden Daten und Texturparametern erzielt (IVITS-WASSER, 2004).

In einer Reihe von Untersuchungen wie OFULSA (COENRADIE & KENNEWEG, 2002) oder MOMSIS (KENNEWEG et al., 2000), konnte nachgewiesen werden, dass sogar mit geringer auflösenden Satellitendaten vom Typ IRS oder TM bereits wesentliche Aktualisierungsschritte für Biotoptypendaten erreichbar sind.

Es besteht trotz vieler einzelner positiver Beispiele immer noch die Notwendigkeit, Standardverfahren zu entwickeln, um die potentiell hochwertigen FE-Daten in eine operationelle Anwendung zu bringen, wobei eine höchstmögliche Übertragbarkeit und Transparenz aller Arbeitsprozesse gegeben sein muss (KENNEWEG, 2001 und EHLERS, 2002). Das Potenzial der neuen Sensorgeneration als wertvolle Informationsquelle für die Ökologie wird insgesamt als sehr hoch eingeschätzt, gleichzeitig muss aber auch festgestellt werden, dass die eigentlich auf der Hand liegende Zusammenarbeit von Ökologie und Fernerkundung immer noch in den Kinderschuhen steckt und von Missverständnissen geprägt ist (vgl. APLIN, 2004). Technische Methodenentwicklungen und inhaltliche Erwartungen müssen sich stärker einander annähern und gegebenenfalls kompromissbereit zeigen.

2.5 Geoinformationssysteme

Nicht nur für die Verarbeitung von Fernerkundungsdaten sind Geoinformationssysteme (GIS) ein unersetzbares Werkzeug. GIS werden allgemein zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation von raumbezogenen Daten verwendet. Die für diese Arbeit wesentlichen Aspekte eines GIS sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Die Ausführungen beruhen auf BILL & FRITSCH (1991).

Zwei Datenformate sind für die Speicherung und Verarbeitung räumlicher Daten wichtig¹⁰: das Rasterformat und das Vektorformat (siehe Abb. 2.11). Rasterdaten sind in einer Matrix in Zeilen und Spalten organisiert, so dass jede Raster- oder Pixelzelle über die Zeilen- und Spaltennummer eindeutig anzusprechen ist. Attributinformationen wie z.B. der Grauwert eines Pixels können angehängt werden. Topologische Informationen sind nur indirekt über die Lage des einzelnen Pixels in der Matrix gegeben.

Vektordaten sind durch Koordinatenpaare definiert, die entweder als Punkt dargestellt werden können oder zu Linien oder Flächen verbunden werden. In zugeordneten relationalen Attributtabelle werden die thematischen Informationen abgelegt. In vielen GIS-Programmen ist zusätzlich die Topologie der Objekte explizit gespeichert.

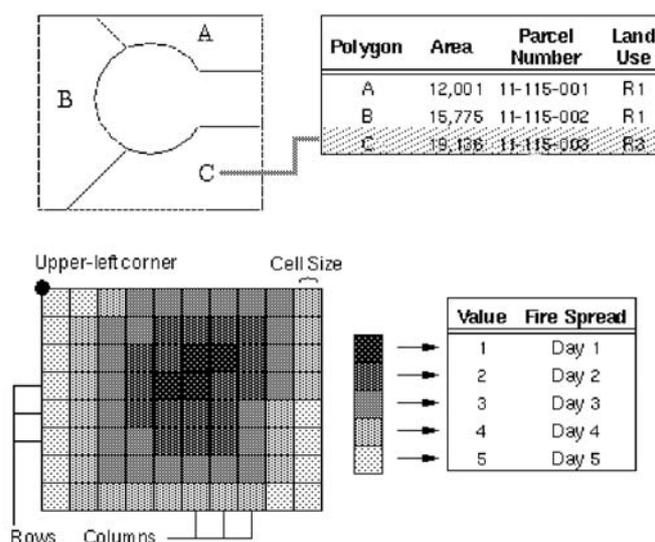


Abb. 2.11: Datenmodell Vektor (oben) und Raster (unten) (nach ESRI, 2001)

¹⁰ Das TIN-Format wird hier nicht betrachtet, da es für das Verfahren irrelevant ist.

In der vorliegenden Arbeit wird ein hybrider Ansatz verfolgt, d.h. beide Datenformate werden eingesetzt, um ihre Vorteile bestmöglich auszunutzen. Es wird dabei mit der Software ArcInfo 9.1 und ArcView 9.1 (ESRI) sowie ERDAS Imagine 8.7 (Leica Geosystems) gearbeitet. Alle drei besitzen eigene Programmiersprachen (AML, VBA und EML bzw. SML), die für Modellierungen und die Automatisierung von Prozessabläufen verwendet werden können.

Für das entwickelte Verfahren kommen vor allem Funktionen zur Verarbeitung von Rasterdaten zum Einsatz. Sehr wichtig sind dabei lokale Funktionen (Berechnungen einzelner Rasterzellen) und topologische Funktionen (z.B. fokale Filter oder zonale Berechnungen). Die für das Verfahren eingesetzten GIS-bezogenen Algorithmen werden ausführlich in Kapitel 5 erläutert.

GIS sind seit langer Zeit für verschiedenste Anwendungen im Naturschutz unentbehrlich. Sie werden nicht nur zur Verwaltung raumbezogener Informationen eingesetzt, sondern vor allem auch wegen ihrer komplexen Analysefunktionalitäten. So sind Modellierungen (z.B. zu Erosion, Lärmausbreitung, Habitateignung u.v.m.) oder die Verschneidung verschiedener Themen wichtige Grundlagen für die Arbeit in der Umweltverwaltung. In letzter Zeit rücken verstärkt Landschaftsstrukturmaße (vgl. FORMAN & GODRON, 1986) als Werkzeuge für die landschaftsökologische Bewertung in den Mittelpunkt. Nicht nur im o.g. SPIN-Projekt wurde ein Fokus darauf gelegt, auch bei LAUSCH (2000) oder BERGER & WALZ (2004) kamen diese erfolgreich zum Einsatz, um die Entwicklung großräumiger Landschaften, die von einer hohen Dynamik geprägt sind (z.B. Bergbaufolgeflächen), zu untersuchen.

2.6 Fazit

Aus den vorangestellten Erfahrungen aus Wissenschaft und Praxis lassen sich für die Fragestellung dieser Arbeit folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Die naturschutzfachliche Bewertung und das Monitoring von LRT muss indikatorbasiert erfolgen, um die Objektivität und Nachvollziehbarkeit der Bewertung zu gewährleisten. Da die einzelnen LRT in Struktur und Ausstattung sehr unterschiedlich sind, müssen sie einzeln betrachtet werden. Das heißt, dass für jeden LRT eine Indikatormatrix aufgestellt werden muss, die sich eng an den Vorgaben der Bund-Länder-Arbeitskreise orientieren sollte. Dazu gehören vor allem einzelne Biotopelemente als Indikatoren, die auch für andere EU-Richtlinien wichtig sein können (siehe Abschnitt 2.3).

Für ein effektives Monitoring im Sinne der FFH-RL ist die Fernerkundung zwingend notwendig, da die Beobachtungsintensität im Zeitabstand weniger Jahre nicht flächendeckend terrestrisch geleistet werden kann. Außerdem sind die Vorteile der Fernerkundung in Ergänzung zu terrestrischen Aufnahmen des Arteninventars darin zu sehen, dass die einzelnen Flächen genau abgegrenzt werden können und dass benachbarte Biotoptypen und Landnutzungen und gegebenenfalls Beeinträchtigungen besser im Überblick behalten werden können.

Die rein analoge und visuelle Auswertung von Fernerkundungsdaten wird dem heutigen Stand der Technik nicht mehr gerecht und ist ebenfalls mit großem finanziellen Aufwand verbunden. Außerdem erfüllt eine rein visuelle Auswertung nicht die Forderungen nach größtmöglicher Objektivität, Transparenz und Wiederholbarkeit des Monitorings. Die Erfassung einzelner Biotop- und Strukturelemente, die für die Bewertung des Erhaltungszustandes sehr wichtig sind, kann nicht manuell geleistet werden (nicht jeder Baum kann einzeln abgegrenzt werden). Daraus folgt, dass ein digitaler Sensor verwendet werden muss und der gesamte Auswertungsprozess weitgehend automatisiert ablaufen sollte, wobei die Abgrenzungen der LRT und die Genauigkeit der Klassifikation visuell nachinterpretiert und kontrolliert werden müssen, da es hierfür noch keine zuverlässigen automatischen Methoden gibt.

Herkömmliche statistische Verfahren reichen für die Klassifikation der neuen Satellitenbilder nicht mehr aus, die modernen Segmentierungsverfahren sind jedoch ebenfalls noch nicht operationell einsetzbar und v.a. nicht in jedem Falle übertragbar und nachvollziehbar. Um die hohe Komplexität der Bilder dennoch mit statistischen Methoden auswerten zu können, bietet sich eine hierarchische Auswertung an. Die Bilder müssen mit Hilfe von Texturmaßen und Vegetationsindizes vorstrukturiert und dann mit Hilfe einer wissensbasierten Klassifikation ausgewertet werden. Wissensbasierte Verfahren haben den Vorteil, dass

sie übertragbar und objektiv sind und auch jederzeit für neue Fragestellungen und bei neuem Wissen erweitert werden können. Die Klassifikation soll dabei auf die einzelnen Pixel bezogen bleiben und nicht auf Segmente, da eine Generalisierung bei der Ableitung quantitativer Indikatoren nicht zulässig ist.

Die Erzeugung von Trainingsgebieten und Signaturen, die für eine überwachte Klassifikation notwendig sind, kann nicht manuell geleistet werden, da die geringe Pixelgröße die Abgrenzung spektral reiner Klassen fast unmöglich macht. Ein neues Verfahren muss entwickelt werden, dass die notwendigen Signaturen mit Hilfe einer Wissensbasis aus den vorhandenen Geobasisdaten und den Satellitenbildern extrahiert.

Die Verwendung von absoluten spektralen Reflektanzwerten ist dabei nicht praktikabel, da die dafür notwendigen radiometrischen Korrekturverfahren zu aufwendig und zu fehleranfällig sind. Daraus folgt, dass das Verfahren auf relativen Werten bzw. abgeleiteten Informationen wie z.B. Indizes aufbauen muss, um die Übertragbarkeit auf andere Bilder zu ermöglichen. Erst bei der tatsächlichen Anwendung auf das jeweilige Bild sollen die absoluten Schwellenwerte automatisch ermittelt werden.

Alle Daten müssen in einem Geoinformationssystem (GIS) verwaltet werden, um die Integration von Raster- und Vektordaten und ein problemloses Arbeiten zu gewährleisten. Als geometrische Basis des GIS wird das Amtliche-Topographisch-Kartographische Informationssystem ATKIS¹¹ verwendet, um die Passfähigkeit aller Ergebnisse in andere Systeme zu gewährleisten.

Da kleine und weit verstreute Gebiete zu überwachen sind, fällt die Wahl auf einen Satellitensensor, weil bei der Möglichkeit des flächenscharfen Kaufs von Satellitenbildern der finanzielle Aufwand geringer ist als bei flugzeuggetragenen Systemen. Bei letzteren muss immer der Anflugweg und die Flugplanung mit bezahlt werden. Trotzdem soll das Verfahren auf andere Sensoren mit ähnlichen spektralen Eigenschaften (auch flugzeuggetragene) übertragbar bleiben, um die Kontinuität des Monitorings auch zu einem späteren Zeitpunkt zu gewährleisten. Da Quickbird die momentan höchste geometrische Auflösung bietet, wird dieser Satellit für die Methodenentwicklung verwendet.

¹¹ siehe Kapitel 4.4

3. Grobkonzept und Modellanforderungen

Aus dem vorangestellten Fazit der Erfahrungen aus Wissenschaft und Praxis ergeben sich bedeutsame Eckpunkte für das zu entwickelnde Verfahren. Dieses Kapitel widmet sich dem daraus entstandenen Grobkonzept und den grundlegenden Modellanforderungen für die Verfahrensentwicklung. In Abschnitt 3.1 wird im Überblick dargestellt, welche Schritte notwendig sind, das Klassifikationsverfahren zu realisieren, und wie dieses aufgebaut sein soll. Für die Bewertung von LRT innerhalb des FFH-Monitorings sind Indikatoren notwendig. Abschnitt 3.2 widmet sich den allgemeinen Anforderungen, die an die Indikatoren gestellt werden müssen. Abschnitt 3.3 skizziert die Anforderungen an das Objektmodell, in das die Indikatoren zu integrieren sind. In Abschnitt 3.4 wird beispielhaft erläutert, welche Regeln für die Wissensbasis verwendet werden sollen.

3.1 Grobkonzept

Das Hauptziel ist die möglichst weitgehende Bewertung des Erhaltungszustandes verschiedener LRT der Offenlandbereiche mit Hilfe der Fernerkundung und moderner Analyseverfahren. Ein übertragbares und mit unterschiedlichen Eingangsdaten anwendbares Verfahren soll entwickelt werden. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass es sich bei der Verfahrensentwicklung nicht um die Bewertung des Gesamterhaltungszustandes von LRT handeln kann, da mit Methoden der Fernerkundung der Parameter Arteninventar nicht im Sinne der FFH-RL untersucht werden kann. Nur die Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen können bewertet werden. Um Missverständnissen vorzubeugen, wird deshalb in dieser Arbeit von „Teilerhaltungszustand“ gesprochen, wenn die Bewertung mit Hilfe der beiden Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen gemeint ist. Ansonsten wird von „Gesamterhaltungszustand“ gesprochen.

Den Wert eines Habitats bestimmen überwiegend qualitative Eigenschaften, die standardisiert erhoben und quantifiziert werden müssen (PLACHTER, 1991). Die naturschutzfachliche und objektive Bewertung beruht daher zumeist auf dem Prinzip der Indikation. sind Indikatoren wie z.B. Biotopelemente unerlässlich (siehe Kapitel 2.1.2 und 2.1.3).

Der erste Schritt, der die Basis für den gesamten Verfahrensablauf bildet, ist die Auswahl geeigneter Indikatoren. Diese müssen in ein Objektmodell integriert werden, das Klassen oder Objekte enthält, die mit Hilfe der Fernerkundung eindeutig detektierbar sind. Die Trennbarkeit dieser Objekte muss ausführlich mit verschiedenen Methoden untersucht werden, so dass für jedes Objekt eine ausreichende Anzahl geeigneter Testflächen aufzunehmen ist. Da sich die Arbeit auf wenige Testgebiete in Brandenburg beschränken muss, ist das Modell keinesfalls vollständig, weil nur Objekte aufgenommen werden können, die in den Testgebieten auch vorkommen. Deshalb wird ein hierarchischer Ansatz gewählt, der bei Bedarf jederzeit erweitert werden kann.

Nachdem das Objektmodell feststeht, kann mit dem Aufbau des Klassifikationsverfahrens begonnen werden. Die Grundidee für das Verfahren stellt ein mehrstufiges hierarchisches System dar, das zum großen Teil wissensbasiert und unter Einbeziehung von a-priori Informationen vollautomatisch arbeitet. Es wird pixelbasiert klassifiziert und nicht segmentiert. Um die sehr hohe spektrale Variabilität in den Bilddaten mit klassischen statistischen Algorithmen auswerten zu können, beruht das Klassifikationsverfahren auf einem hybriden System aus unüberwachten und überwachten Modulen. Als a-priori Information werden vorhandene Geodaten, wie z.B. die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung, eingesetzt.

Die Wissensbasis muss mit allgemeingültigen und übertragbaren Regeln arbeiten, die sich nicht auf direkte Grauwerte der Satellitenbilder beziehen, sondern auf abgeleitete Werte (siehe Kapitel 2.4.3.4) bzw. auf grauwertunabhängige Parameter (z.B. Nachbarschaftsregeln). Sie dient nicht zur vollständigen Klassifikation der Bilddaten, sondern zur Ableitung von Trainingsgebieten und zur Nachbearbeitung von Klassifikationsfehlern. Dies hat seine Ursache darin, dass die a-priori Information essentiell für die meisten Regeln ist, diese Information jedoch oft nur in eingeschränkter Qualität und nicht flächendeckend verfügbar ist.

Drei unterschiedliche Arten von Wissen werden einbezogen:

- A) die formalisierte Erfahrung von Luftbildinterpreten
- B) spektrale Eigenschaften, die aus einer großen Anzahl von Testflächen bestimmt werden
- C) a-priori Wissen in Form von Geobasisdaten (z.B. Biotop- und Nutzungstypenkartierungen BTNTK)

Bei der überwachten Klassifikation werden mit Hilfe von Trainingsgebieten Hypothesen aufgestellt, nach der ein Pixel einer bestimmten Objektklasse angehört. Es müssen also für eine automatische und wissensbasierte Abgrenzung von Trainingsgebieten Parameter gefunden werden, die die Objektklassen im Merkmalsraum möglichst eindeutig definieren helfen. Im gewählten Ansatz wird überprüft, inwiefern bestimmte Regeln erfüllt werden, um eine Hypothese zu bestätigen oder zu verwerfen, wobei auch die jeweilige Methode zur Bestimmung der einzelnen Schwellenwerte (z.B. für die Textur) angegeben wird (siehe Abb. 3.1). Sehr wichtig für die Übertragbarkeit des Verfahrens ist die bildabhängige Generierung von Schwellenwerten, so wird z.B. nicht von vornherein festgelegt, was eine „hohe Textur“ bedeutet. Erst innerhalb des Bildverarbeitungsprozesses kommt es zu einer Fixierung dieses Wertes durch eine unüberwachte Clusterung.

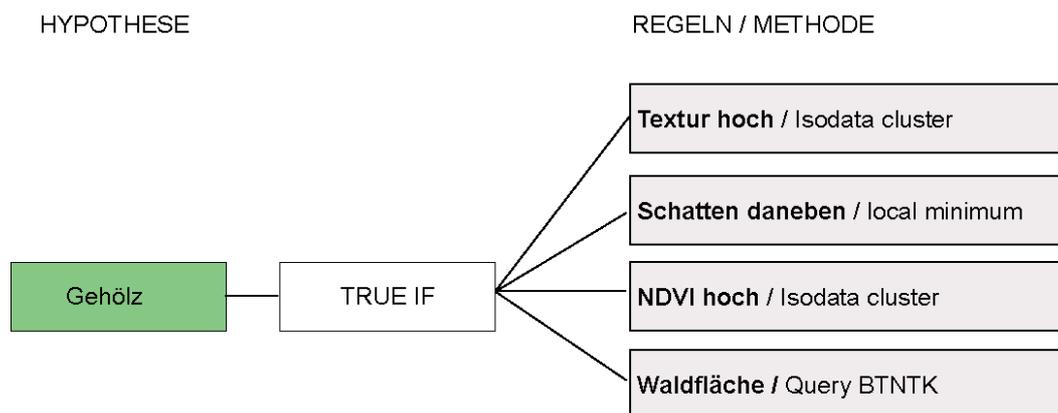


Abb. 3.1: Beispiel für die wissensbasierte Verifizierung der Hypothese „Trainingsgebiet Gehölz“

Nach der erfolgten automatischen Klassifikation und der automatischen wissensbasierten Nachbearbeitung müssen sowohl die Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse als auch die Flächengrenzen der LRT visuell überprüft und gegebenenfalls angepasst werden, da es hierfür noch keine zuverlässigen automatischen Methoden gibt. Ist diese Kontrolle erfolgt, können die im Rasterformat vorliegenden Klassifikationsergebnisse mit den Vektoren der LRT bzw. Biototypen über GIS-Algorithmen verknüpft werden. So wird die Berechnung der Flächenanteile von Indikatoren für die Bewertung ermöglicht.

In den folgenden Stichpunkten sind die wichtigsten notwendigen Schritte der Verfahrensentwicklung noch einmal im Überblick dargestellt:

- Auswahl geeigneter Indikatoren
- Aufbau eines Objektmodells und Integration der Indikatoren
- Festlegung von Testflächen für alle Objekte
- Überprüfung der Trennbarkeit der Objekte und Anpassung des Objektmodells

- Aufbau eines Klassifikationsverfahrens

Das Klassifikationsverfahren lässt sich wiederum in folgende Stufen einteilen:

- Vorstrukturierung der Bilddaten, Ableitung relativer Werte für die Wissensbasis
- wissensbasierte Erzeugung von Trainingsgebieten und Ableitung von Signaturen
- hierarchische überwachte Klassifikation
- wissensbasierte Nachbearbeitung

Daran schließen sich an:

- die visuelle Überprüfung der Flächengrenzen und Klassifikationsergebnisse
- die GIS-basierte Ableitung der flächenbezogenen Indikatoren

In Abb. 3.2 ist der Ablauf des gesamten Verfahrens mit seinen einzelnen Komponenten schematisch dargestellt. Da das Verfahren nicht ausschließlich modellgetrieben arbeitet, d.h. eine vorgegebene Objekthypothese überprüft, sondern auch gleichzeitig von den Sensordaten selbst ausgeht, handelt es sich nicht um einen reinen bottom-up oder top-down Ablauf, sondern um einen hybriden Ansatz (SCHIEWE, 2003).

Im gesamten Klassifikationsprozess bis zu Ergebnis 1 wird auf Pixelbasis gearbeitet, um jegliche Generalisierung zu vermeiden. Alle Algorithmen und Verfahrensschritte der Datenverarbeitung und Modellierung werden in SML-Skripten (Spatial Modeler Language) programmiert und in einem EML-Skript (Erdas Macro Language) eingebettet, welches über eine grafische Oberfläche bedient werden kann, so dass der gesamte Prozess (außer der Georeferenzierung) bis zum Ergebnis 1 vollständig rechnergesteuert abläuft.

Eine ausführliche Erläuterung aller Komponenten wird im Kapitel 5 (Feinkonzept und Methoden) gegeben.

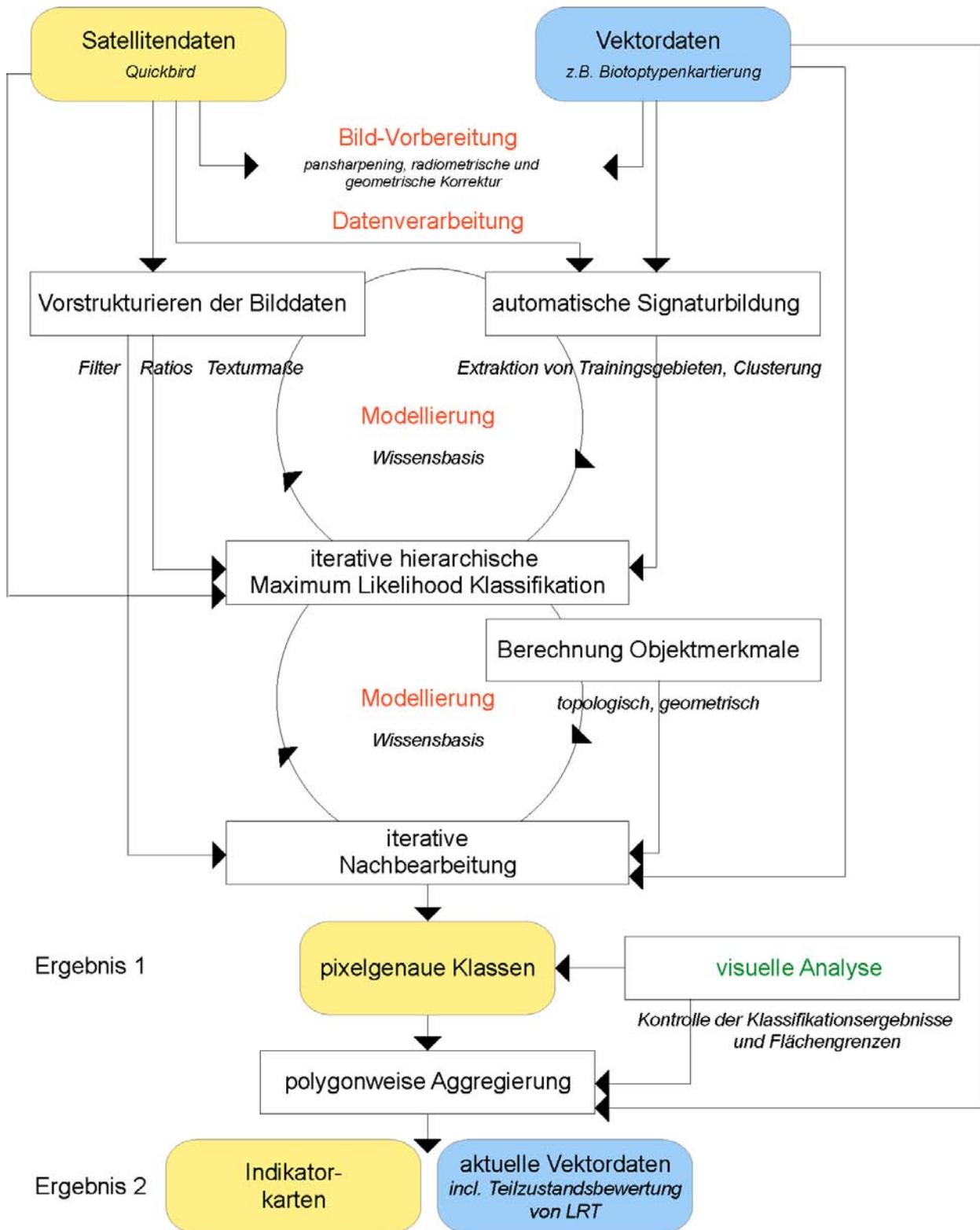


Abb. 3.2: Schematischer Verfahrensablauf, (Ergebnis 1 repräsentiert pixelgenaue Landbedeckungsklassen; Ergebnis 2 repräsentiert aktualisierte Biotoptypen- und Landnutzungsdaten nach der Aggregierung sowie Indikatorkarten für die Bewertung des Teilerhaltungszustandes); gelb: Daten im Rasterformat, blau: Daten im Vektorformat

3.2 Anforderungen an die Indikatoren

Die naturschutzfachliche Bewertung und das Monitoring von LRT muss mit Hilfe von biotischen und abiotischen Indikatoren erfolgen, um die Objektivität und Nachvollziehbarkeit der Bewertung zu gewährleisten. An diese Indikatoren müssen u. a. folgende Ansprüche gestellt werden: Die räumliche und zeitliche Vergleichbarkeit muss gegeben sein, sie müssen reproduzierbar und interpretierbar sein (vgl. MÜLLER, 1999), und formale Eigenschaften wie leichte Erfassbarkeit und Normierbarkeit müssen erfüllt sein (vgl. WEGEHENKEL et al., 2006).

Da die einzelnen LRT in Struktur und Ausstattung sehr unterschiedlich sind, ist eine individuelle Betrachtung notwendig. Das heißt, dass für jeden LRT eine eigene Indikatorenliste aufgestellt werden muss.

Aussagekräftige Indikatoren für die Bewertung des Teilerhaltungszustandes von LRT sind in den von den Bund-Länder-Arbeitskreisen aufgestellten Bewertungsschemata bereits weitestgehend vorgegeben. Für jeden einzelnen LRT gibt es eine Matrix in drei Kategorien und Wertstufen (siehe auch Kapitel 2.2.3.1). Die Auswahl von zu untersuchenden Indikatoren soll sich eng an diese Schemata anlehnen, um die praktische Einsetzbarkeit zu gewährleisten, es werden jedoch auch weitere geeignete Indikatoren vorgeschlagen.

Je nach Betrachtungsebene sind verschiedene Indikatorensysteme notwendig, so müssen auf der FFH-Gebietsebene oder gar auf der Ebene der biogeografischen Regionen ganz andere Indikatoren eingesetzt werden als auf Ebene der Habitats selbst. Eine dimensionsspezifische Herangehensweise ist unerlässlich (VOLK & STEINHARDT, 1999). Diese Arbeit bezieht sich ausschließlich auf das Monitoring konkreter Habitatflächen, bewegt sich also auf der Ebene der Mikroskala mit einigen Überschneidungen zur Mesoskala (siehe Tab. 3.1). Das Pixel ist kleinste Bezugsgröße und wichtiger Faktor für die Bewertung (Mikroskala).

Maßstabniveaus landschaftsökologischer Forschung (nach Neef 1967, Barsch 1978, Leser 1995)		Skalenbereiche in der Hydrologie (nach Becker 1992)		
<i>Dimension</i>		charakteristische		Skalen- bereich
		Längen	Flächen	
<i>geosphärisch</i>	Geosphäre	≥ 100 km	≥ 10 ⁴ km ²	Makroskale
	Zone	30 – 100 km	10 ³ – 10 ⁴ km ²	
<i>regionisch</i>	Makroregion			Mesoskale
	Mikroregion			
<i>chorisch</i>	Makrochore	10 – 30 km	10 ² – 10 ³ km ²	
	Mesochochore	1 – 10 km	1 – 10 ² km ²	
	Mikrochore	0.1 – 1 km	0.1 – 1 km ²	
	Nanochochore (Standortgefüge)			
<i>topisch</i>	Geoökotop (Standort)	30 – 100 m	0.001 – 0.1 km ²	Mikroskale
	Physiotop	≥ 30 m	≥ 0.001 km ²	

Tab. 3.1: Geowissenschaftliche Hierarchieniveaus (nach VOLK & STEINHARDT, 1999, verändert)

Die Modellierung und Analyse von Zusammenhängen des Teilerhaltungszustandes von LRT und den verwendeten Indikatoren kann in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Es wird als gegeben hingenommen, dass die in den Schemata der LANA beschriebenen Indikatoren eine hinreichende Beziehung zu den ökosystemaren Eigenschaften von LRT haben und ihren Teilerhaltungszustand bewerten können (siehe Abb. 3.3). Der Fokus der Arbeit liegt auf den Indikatoren und

Erfassungsmethoden. Zur ausführlichen Diskussion von Landschafts- bzw. Habitatbewertung und Indikation siehe u.a. BASTIAN (1997), BASTIAN & SCHREIBER (1999) und MARKS et al. (1992).

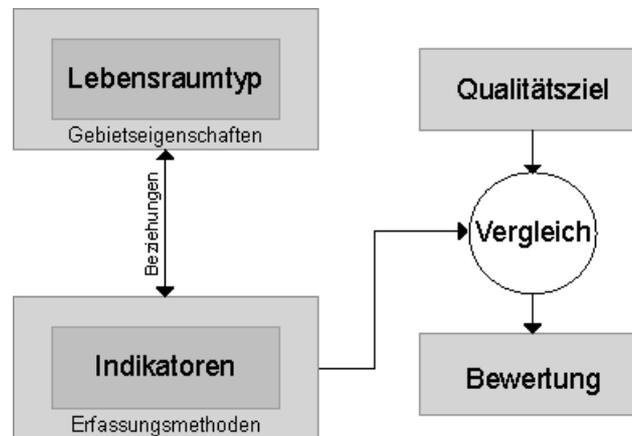


Abb. 3.3: Bewertungssystem und Beziehungen der einzelnen Komponenten

3.3 Anforderungen an das Objektmodell

Das Objektmodell, in das die Indikatoren integriert werden, ist essentiell für das gesamte Klassifikationsverfahren. Es müssen Objekte definiert werden, die die einzelnen Landbedeckungsklassen in Bezug auf die Fragestellung ausreichend charakterisieren und die über geeignete Unterscheidungsmerkmale eindeutig zugeordnet werden können. Da für diese Arbeit nur eine beschränkte Auswahl an Testgebieten zur Verfügung stand, sind nicht alle möglichen Landbedeckungsklassen abgedeckt. Die gewählte heuristische Vorgehensweise bedingt, dass nur Klassen aufgenommen werden können, die in den Testgebieten vorkommen. Um einerseits der Komplexität der Daten Herr zu werden und andererseits eine problemlose Erweiterung des Objektmodells und der darauf aufbauenden Wissensbasis zu ermöglichen, wird ein hierarchisch gegliedertes Modell gewählt. Dieses Vorgehen kam bereits in vielen Projekten erfolgreich zum Einsatz (vgl. COENRADIE & KENNEWEG, 2002 oder GÄHLER et al., 2002).

Das Objektmodell bezieht sich auf mit optischen Satelliten (mit mittlerer spektraler Auflösung) erkennbare Objekte. Es wurde also bereits eine Vorauswahl getroffen, da es wenig sinnvoll scheint, z.B. Unterwasservegetation oder die Krautschicht im Wald aufzunehmen.

Die Fragestellung der Zustandsbewertung von FFH-LRT steht bei der Bildung des Objektmodells im Vordergrund, d.h. das Modell ist nur begrenzt auf andere Fragestellungen anwendbar (siehe auch Kapitel 7.2.3). Die Auswahl der Objekte und die Repräsentation des Wissens über ihre Merkmale und Relationen erfolgt pragmatisch und dieser Fragestellung angepasst. Standardisierte Vorgehensweisen existieren dafür noch nicht (vgl. SCHIEWE, 2003).

Nicht nur die Indikatoren, die für die Bewertung der LRT von Interesse sind, sind Bestandteil des Objektmodells. Auch Landbedeckungsklassen müssen identifiziert werden, die in diesem Zusammenhang nicht von Interesse sind (so sind z.B. verschiedene Dacharten irrelevant für die FFH-Fragestellung, sie müssen dennoch klassifiziert werden, um den Indikator „versiegelt“ genau bestimmen zu können).

3.3.1 Trennbarkeit der Objekte

Die Trennbarkeit der einzelnen Objekte kann mit unterschiedlichen Methoden untersucht und bewertet werden. Ein häufig in der Fernerkundung verwendetes Verfahren für verschiedenste Fragestellungen ist die Diskriminanzanalyse (vgl. u.a. IVITS & KOCH, 2003 oder SAIDANI, 2004).

Die lineare Diskriminanzanalyse ist ein Werkzeug der multivariaten Datenanalyse, das dazu dient, zu klären, inwiefern sich Gruppen signifikant unterscheiden, in welchen Merkmalen sie besonders unterschiedlich sind und ob sich unbekannte Objekte einer Gruppe richtig zuordnen lassen (vgl. ERB, 1990). Die Diskriminanzanalyse ist also eigentlich ein Klassifikationsverfahren, sie kann aber auch sehr gut genutzt werden, um aus einer großen Anzahl an Merkmalen die für die Klassenzuordnung wichtigsten herauszufiltern. Der Vorteil der Diskriminanzanalyse liegt darin, dass bereits vorgegebene Gruppen bzw. Klassen untersucht werden können (im Gegensatz zur Clusteranalyse). Dafür werden, wie auch schon in Kapitel 2.4.3 (Bildauswertungsverfahren) erläutert, die Daten im n-dimensionalen Merkmalsraum abgebildet. In diese werden neue Achsen konstruiert (Diskriminanzachsen), mit denen sich eine optimale Trennung der einzelnen Gruppen erreichen lässt. Es kann also sehr viele Diskriminanzachsen und daraus folgend Diskriminanzfunktionen (Y) geben (Gruppenanzahl - 1).

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_nX_n \quad (3.1)$$

Ein wichtiger Parameter ist der Diskriminanzkoeffizient (b_i). Wird dieser standardisiert, um den Einfluss der Maßeinheiten und der Streuung der Eingangsvariablen (X_i) zu eliminieren, erhält man ein Maß für den Einfluss der Variablen auf die Trennbarkeit.

Für die Verfahrensentwicklung wird die Diskriminanzanalyse vor allem benutzt, um das Objektmodell vor der Erstellung des Klassifikationsverfahrens zu verifizieren und nicht nachträglich aufwendige Anpassungen und Umstrukturierungen vornehmen zu müssen.

Die Spektralanalyse dient ebenfalls zur Analyse der Trennbarkeit von Klassen und zur Verifizierung des Objektmodells. Dafür werden aus den für alle Objekte gebildeten Testflächen typische Signaturen erzeugt. Diese Signaturen können auf verschiedene statistische Merkmale wie z.B. Normalverteilung oder Streuung untersucht und so hinsichtlich ihrer Homogenität und ihrer Abgrenzbarkeit zu anderen Objektsignaturen beurteilt werden.

3.4 Anforderungen an die wissensbasierte Ableitung von Trainingsgebieten

Überwachte Klassifikationsmethoden wie der Maximum Likelihood Algorithmus verlangen sorgfältig definierte Trainingsgebiete und homogene, normalverteilte Signaturen, um zu zufriedenstellenden Ergebnissen zu kommen. Die sehr hohe geometrische und radiometrische Auflösung von Quickbird erschwert eine manuelle Abgrenzung spektral reiner Trainingsgebiete, denn ein Objekt kann unter Umständen aus mehreren Signaturen zusammengesetzt sein (z.B. beleuchtete und beschattete Baumkrone). Weiterhin ist eine große Anzahl von Trainingspixeln von großem Vorteil für den Klassifizierungsalgorithmus, um möglichst normalverteilte Signaturen zu erhalten, dies kann durch manuelles Digitalisieren nicht mit vertretbarem Zeitaufwand gewährleistet werden.

Daraus folgt, dass ein vollständig automatisiertes Verfahren für die Signaturbildung entwickelt werden muss, das einen möglichst großen Teil der Bildinformation einbezieht. In dieser Arbeit wird ein wissensbasierter Ansatz verfolgt, der aufgrund der Formulierung allgemeingültiger Regeln und der Verwendung relativer spektraler Informationen übertragbar bleiben soll.

Verschiedene Arten von Wissen über geometrische, radiometrische und topologische Objektmerkmale müssen in Form von Regeln integriert werden. Zuerst ist dies die formalisierte Erfahrung von Luftbildinterpreten, z.B.:

- Bäume haben Schatten
- Röhrichtflächen sind stärker texturiert als Wiesen

Diese Regeln sind sowohl ein wichtiges Instrument für die Lokalisierung von Trainingsgebieten als auch für die Nachbearbeitung fehlerhafter Klassifikationsergebnisse.

Des Weiteren finden spektrale Eigenschaften, die aus einer großen Anzahl von Testflächen bestimmt wurden, Eingang in die Wissensbasis, z.B.:

- klares, tiefes Wasser hat immer einen NDVI < 0

Für Objektklassen, die sich stark ähneln bzw. die phänologisch oder witterungsbedingt starken Schwankungen in ihrem spektralen Abbildungsverhalten unterliegen, werden anhand des Testflächenpools Schwellenwerte festgelegt, z.B.:

- Trainingsgebiete für Wasserlinsen müssen im Differenzbild aus G und B in einem Wertebereich von -10 bis +10 liegen

Die Integration vorhandener a-priori Informationen wie z.B. von Biotoptypenkartierungen dient der Reduktion des Suchraums, da bestimmte Objekte in bestimmten Flächen mit viel größerer Wahrscheinlichkeit vorkommen als in anderen, z.B.:

- Trainingsgebiete für Schwimmblattvegetation werden in Flächen gesucht, die in der Biotoptypenkartierung als Gewässer ausgewiesen sind

Die Wissensbasis wird nicht nur für die Ableitung von Trainingsgebieten verwendet, sondern auch für die Nachbearbeitung fehlerhafter Klassifikationsergebnisse und für die Aggregation von Biotoptypen-Codes (vgl. Abschnitt 5.3.4 und 5.4).

4. Testgebiete und Datenbasis

Im Folgenden werden die verwendeten Testgebiete und Datengrundlagen vorgestellt. Abschnitt 4.1 gibt einen kurzen Überblick über das „Natura 2000“-Schutzgebietssystem in Brandenburg. Die Testgebiete Jüterbog, Lieberose, Potsdam und Schwedt und ihre naturräumliche Ausstattung werden in Abschnitt 4.2 beschrieben. Abschnitt 4.3 geht auf die Qualität der Quickbird-Satellitenbilder und die vorgenommenen radiometrischen und geometrischen Korrekturen ein. Die Geobasisdaten, die in das Verfahren einfließen, und die terrestrischen Aufnahmen für die Genauigkeitsanalyse und die Wissensbasis sind unter 4.4 beschrieben.

4.1 Natura 2000 in Brandenburg

Brandenburg gehört mit seiner Lage im nordostdeutschen Tiefland vollständig zur kontinentalen Region (siehe auch Abb. 2.1 zu den biogeografischen Regionen der EU). Das Land Brandenburg hat bis März 2005 bereits 620 FFH-Gebiete gemeldet und steht im Vergleich zu den anderen Bundesländern mit einem Anteil von 11,3% an seiner Landesfläche damit an einer führenden Stelle. Die 27 gemeldeten SPA-Gebiete ergeben zusammen einen Anteil von 22,0% der Landesfläche. Die folgende Abb. 4.1 zeigt die Lage der gemeldeten FFH- und SPA-Gebiete in Brandenburg.

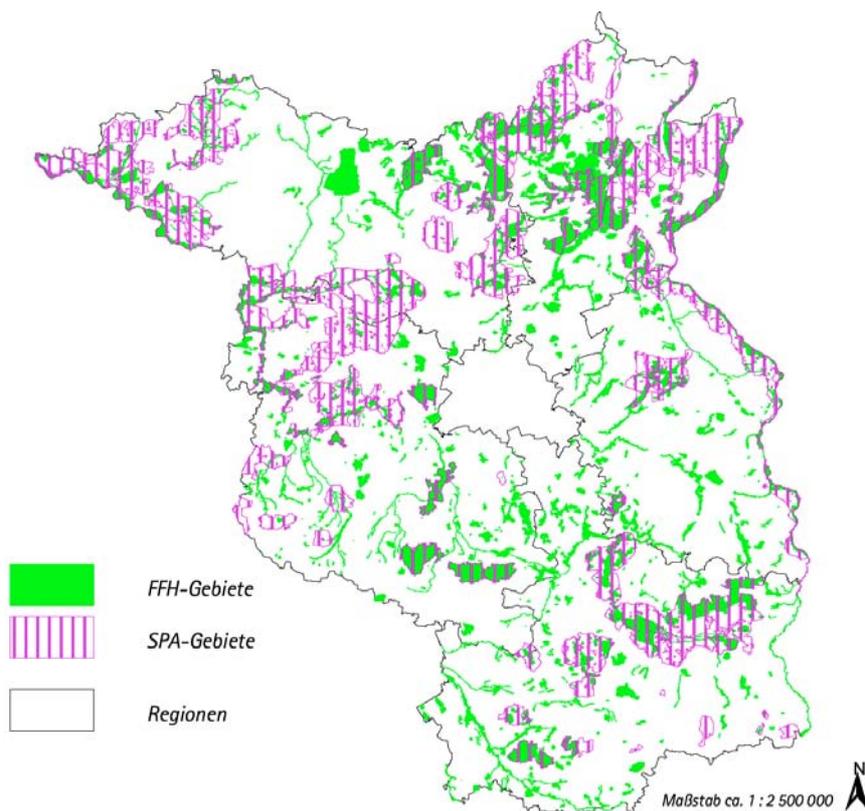


Abb. 4.1: Lage der gemeldeten FFH- und SPA-Gebiete in Brandenburg, Stand 07/2004 (Quelle: Landesumweltamt Brandenburg)

Brandenburg ist aufgrund seiner einzigartigen eiszeitlich geprägten Landschaft und seiner ausgedehnten unzerschnittenen Naturlandschaften reich an schützenswerten Lebensräumen und Arten. Die ehemaligen Truppenübungsplätze beherbergen große Flächen bestimmter LRT der Trockenrasen und Heiden, so dass Brandenburg eine überragende europäische Bedeutung bei ihrer Erhaltung zukommt (ZIMMERMANN, 2000). Bei einem Großteil der FFH-Gebiete handelt es sich um bereits festgesetzte oder im Verfahren

befindliche Natur- und Landschaftsschutzgebiete. Insgesamt bringt Brandenburg aufgrund von teilweisen Überschneidungen von FFH- und SPA-Gebieten ca. 26 % seiner Fläche in das „Natura 2000“-System ein.

Von den ca. 218 europaweit zu schützenden Lebensraumtypen gibt es 91 in Deutschland, 38 davon kommen in Brandenburg vor, darunter 13 prioritäre. Alle in Anhang I aufgeführten Seentypen sind in Brandenburg vorhanden. Von den ca. 1082 Arten des Anhang II sind 134 in Deutschland und 44 in Brandenburg nachgewiesen, davon 2 prioritäre (LUA, 2002). Die einzelnen LRT und Arten sind im Anhang der Arbeit in Tab. A.1 aufgelistet. Als Bezugssystem für die Auswahl und Bewertung der Gebiete dient die naturräumliche Gliederung Brandenburgs (Abb. 4.2).



Abb. 4.2: Naturräumliche Gliederung Brandenburgs (nach SSYMANK et al., 1998)

4.2 Lage der Testgebiete und naturräumliche Ausstattung

Vier verschiedene Testgebiete in drei unterschiedlichen Naturräumen wurden ausgewählt, um eine möglichst breite Vielfalt an Lebensraumtypen zu untersuchen und um die Übertragbarkeit der Klassifikationsalgorithmen zu validieren. Jüterbog, Lieberose, und Potsdam liegen vollständig in Brandenburg. Das Testgebiet Schwedt, das nach der Stadt Schwedt benannt wurde, obwohl der größte Teil des Gebietes die umliegenden Überschwemmungsflächen der Oder umfasst, reicht nach Polen hinein (Abb. 4.3). Jüterbog und Lieberose sind ehemalige Truppenübungsplätze mit großflächigen Beständen an Heide, Sandtrockenrasen und offenen Sandflächen. Das Testgebiet Potsdam ist urban geprägt und mit einem reichen Mosaik an Siedlung, Wald, Landwirtschaft und Wasserlebensräumen ausgestattet. Das Testgebiet Schwedt repräsentiert ausgedehnte Feuchtgebiete, die v.a. in Polen durch großflächig extensive Landwirtschaft charakterisiert sind.

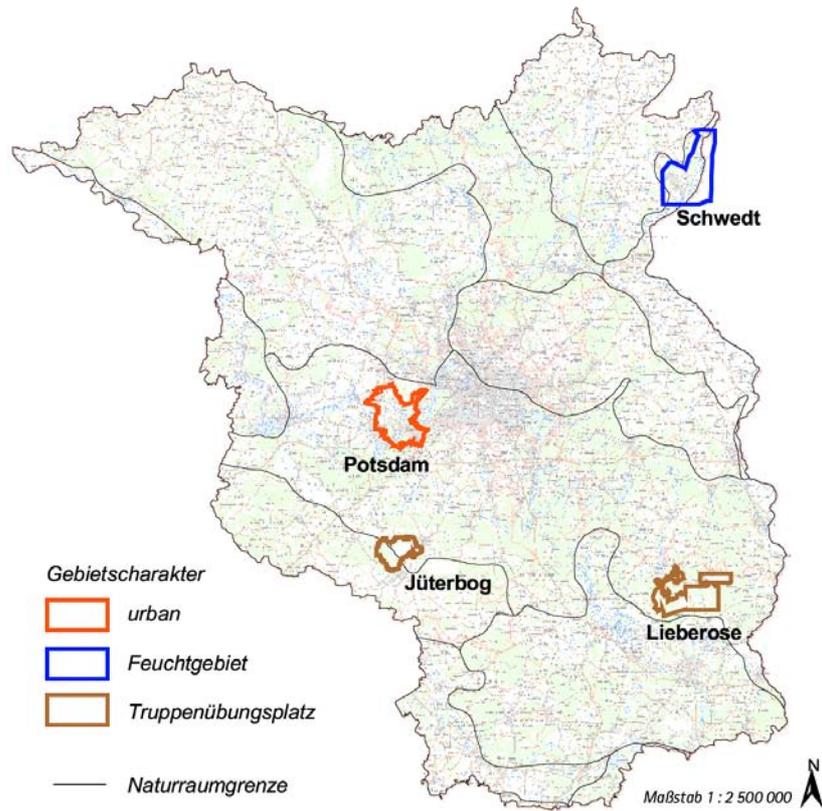


Abb. 4.3: Lage der Testgebiete und Gebietscharakter (topografischer Hintergrund: TK300)

Für alle Gebiete wurden Quickbird-Daten aufgenommen (Sommer 2003 und 2004) und mit allen weiteren Daten (ATKIS, CIR-Biototypen- und Landnutzungskartierung 1992 und teilweise 1998, teilweise CIR-Luftbilder 1998) in ein GIS integriert (siehe Abschnitt 4.4). Auf ausgewählten Testflächen wurde eine selektive terrestrische FFH-Lebensraumtypkartierung nach dem aktuellen brandenburgischen Kartierungsschlüssel (LUA, 2004) sowie Vegetationsaufnahmen durchgeführt.

Testgebiet	Fläche in km ²	Aufnahmedatum	Wolken	Qualität	Off Nadir View angle	Charakter
Jüterbog	82	04.08.2003	0 %	excellent	14.6°	TÜP
Schwedt	240	14.09.2003	0 %	excellent	8.9°	Feuchtgebiet
Potsdam	200	29.07.2004	1 %	excellent	5.6°	Urban
Lieberose	163	06.09.2004	0 %	fair	20.5°	TÜP

Tab. 4.1: Übersicht über die Qualität der Satellitenbilder

4.2.1 Jüterbog

Das FFH-Gebiet Forst Zinna/Keilberg (gleichzeitig zu großen Teilen festgesetztes NSG) liegt im südlichen Teil des Naturparks „Nuthe-Nieplitz“ und umfasst fast vollständig den ehemaligen WGT¹²-Truppenübungsplatz Jüterbog West. Der Formenschatz der ca. 70 km² großen Fläche ist stark eiszeitlich geprägt und wird von Altmoränen der Saale-Eiszeit und Jungmoränen der Weichsel-Eiszeit gebildet. Eine der letzten aktiven Flugsanddünen im deutschen Binnenland befindet sich hier (Abb. 4.4) (BEUTLER, 1993), ebenso wie viele Binnendünen. Naturräumlich ist der östliche Teil des Gebietes dem Südrand der

¹² Westgruppe der Truppen der ehemaligen sowjetischen Streitkräfte

Mittelbrandenburgischen Platten und Niederungen (Baruther Tal) zuzuordnen, der westliche Teil liegt im Fläming (Nördliches Fläming-Waldhügelland) (SCHOLZ, 1962).

Aufgrund der jahrzehntelangen militärischen Nutzung konnten sich vor allem nährstoffarme Biotoptypen entwickeln, da im gesamten TUP keine intensive Landnutzung möglich war. Die wiederholte mechanische Zerstörung von Boden und Vegetation durch Panzer und Sprengstoff sowie Flächenbrände trugen dazu bei, große Flächen offenzuhalten, so dass sich nährstoffarme Sandflächen, Magerrasen und Heiden entwickeln konnten, die u.a. einer reichhaltigen Insektenfauna Lebensraum bietet (vgl. GRUBE & BEIER, 1998). Der Artenreichtum des FFH-Gebietes ist sehr groß, viele seltene und gefährdete Tier- und Pflanzenarten leben im Gebiet. 1994 wurden 635 höhere Pflanzenarten bestimmt, davon 86 gefährdete, 18 stark gefährdete und 2 vom Aussterben bedrohte (NATUR & TEXT, 1994).



Abb. 4.4: Detailaufnahme der Wanderdüne – *Carex arenaria*

Seit der militärischen Nutzungsaufgabe stellt sich ein großflächiger Sukzessionsablauf von Pionier- und Ruderalfluren über Trockenrasen zu Heideflächen und Vorwäldern ein, die sich anschließend zu Eichen-Birken- bzw. Kiefern-Traubeneichen-Mischwäldern entwickeln. Durch die großflächige Munitionsbelastung des ehemaligen TUP sind viele Bereiche für den öffentlichen Zugang gesperrt und der vollkommen natürlichen Weiterentwicklung überlassen.

Tab. 4.2 listet die im Testgebiet vorkommenden LRT der Offenbereiche auf, die 2003 terrestrisch kartiert wurden.

LRT	Name
2310	Trockene Sandheiden mit <i>Calluna</i> und <i>Genista</i> [Dünen im Binnenland]
2330	Dünen mit offenen Grasflächen mit <i>Corynephorus</i> und <i>Agrostis</i> [Dünen im Binnenland]
3130	Oligo- bis mesotrophe stehende Gewässer mit Vegetation der <i>Littorelletea uniflorae</i> und/oder der <i>Isoeto-Nanojuncetea</i>
3150	Natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation des <i>Magnopotamions</i> oder <i>Hydrocharitions</i>
3260	Flüsse der planaren bis montanen Stufe mit Vegetation des <i>Ranunculion fluitantis</i> und des <i>Callitricho-Batrachion</i>
4030	Trockene europäische Heiden
6120*	Trockene, kalkreiche Sandrasen
7140	Übergangs- und Schwingrasenmoore

Tab. 4.2: Übersicht der terrestrisch kartierten LRT der Offenbereiche in Jüterbog, mit * gekennzeichnete LRT sind prioritär

In Karte A.1 (siehe Anhang) ist die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus dem Jahr 1992/93 dargestellt. Karte A.2 (siehe Anhang) zeigt das Satellitenbild.

4.2.2 Lieberose

Das Testgebiet Lieberose umfasst zu großen Teilen den ehemaligen WGT-Truppenübungsplatz Lieberoser Heide. Der westliche und mittlere Teil ist sowohl festgesetztes NSG („Reicherskreuzer Heide“ und „Lieberoser Endmoräne“) als auch FFH-Gebiet („Reicherskreuzer Heide“ und „Lieberoser Endmoräne und Staakower Läuche“). Der nordwestliche Teil erstreckt sich auf die FFH-Gebiete „Dobberburger Mühlenfließ“, „Dammer Moor“ und „Stockshof-Behlower Wiesen“. Die letzten beiden Gebiete sind auch festgesetzte NSG.



Abb. 4.5: „Wüste“ in Lieberose, aufgenommen 1997, mit frdl. Genehmigung von Frank Plücken (LUA Brandenburg)

Naturräumlich gehört die gesamte Fläche zur Jungmoränenlandschaft des Ostbrandenburgischen Heide- und Seengebietes (SCHOLZ, 1962). Die Reicherskreuzer Heide liegt auf einem ausgedehnten Sanderschlauch, der sich zwischen zwei Gletscherzungen herausgebildet hat. Vor allem im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind zahlreiche kleine Kesselmoore, Verlandungsmoore und Seen eingestreut. Die nördlich anschließenden größeren Seen bildeten sich in ehemaligen Schmelzwasserrinnen heraus. Im Bereich des ehemaligen TÜP befinden sich ausgedehnte Kiefernforste, große Heideflächen und eine mehr als 500 ha große Offenfläche, die auch als „Wüste“ bezeichnet wird (Abb. 4.5).

Seit der militärischen Nutzungsaufgabe stellt sich auch hier ein großflächiger Sukzessionsablauf von Pionier- und Ruderalfluren über Trockenrasen zu Heideflächen und Vorwäldern ein, die sich anschließend zu Eichen-Birken- bzw. Kiefern-Traubeneichen-Mischwäldern entwickeln und aufgrund der großflächigen Munitionsbelastung weitgehend ungenutzt bleiben werden. Auf einem Teilbereich der Reicherskreuzer Heide wird mit Schafbeweidung versucht, die Heide zu erhalten. Lieberose gehört zu den wichtigen Brutgebieten des Ziegenmelkers und des Brachpiepers in Brandenburg und ist deshalb ebenfalls als SPA-Gebiet gemeldet. Auch der Artenreichtum der Insektenfauna ist sehr groß, so wurden auf Testflächen in der Reicherskreuzer Heide allein 19 Heuschreckenarten mit den unterschiedlichsten Habitatansprüchen kartiert, darunter mehrere gefährdete und vom Aussterben bedrohte Arten (BROSE, 1999). Besonders wertvoll sind die nährstoffarmen Heideseen und -moore (BEUTLER & BEUTLER, 1992), die zahlreichen gefährdeten Arten Lebensraum bieten.

Die nordwestlich anschließenden kleineren FFH-Gebiete sind vor allem durch ihre Gewässer geprägt. Schützenswert sind hier besonders Feuchtwiesen und feuchte Hochstaudenfluren.

Tab. 4.3 listet die im Testgebiet in den unterschiedlichen FFH-Gebieten vorkommenden LRT der Offenbereiche auf, die in den Gebietsmeldungen beschrieben werden.

LRT	Name
2310	Trockene Sandheiden mit <i>Calluna</i> und <i>Genista</i> [Dünen im Binnenland]
2330	Dünen mit offenen Grasflächen mit <i>Corynephorus</i> und <i>Agrostis</i> [Dünen im Binnenland]
3150	Natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation des Magnopotamions oder Hydrocharitions
3160	Dystrophe Seen und Teiche
3260	Flüsse der planaren bis montanen Stufe mit Vegetation des <i>Ranunculion fluitantis</i> und des <i>Callitricho-Batrachion</i>
4030	Trockene europäische Heiden
6120*	Trockene, kalkreiche Sandrasen
6410	Pfeifengraswiesen auf kalkreichem Boden, torfigen und tonig-schluffigen Böden (<i>Molinion caeruleae</i>)
6430	Feuchte Hochstaudenfluren der planaren und montanen bis alpinen Stufe
7140	Übergangs- und Schwingrasenmoore
7150	Torfmoor-Schlenken (<i>Rhynchosporion</i>)
7230	Kalkreiche Niedermoore

Tab. 4.3: Übersicht der vorkommenden LRT der Offenbereiche in Lieberose (Quelle: Standard-Datenbogen LUA Brandenburg), mit * gekennzeichnete LRT sind prioritär

In Karte A.4 (siehe Anhang) ist die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus dem Jahr 1992/93 dargestellt. Karte A.5 (siehe Anhang) zeigt das Satellitenbild.

4.2.3 Potsdam

Das Testgebiet Potsdam ist ein hauptsächlich urban geprägtes Gebiet, das eine alte Kulturlandschaft im engeren Verflechtungsraum von Berlin verkörpert. Es beherbergt mehrere kleine FFH-Gebiete, die zum großen Teil von intensiver Landnutzung umgeben sind. Das Gebiet „Sacrower See und Königswald“ ist mit alten Eichen- und Buchenwäldern ausgestattet. In den Feuchtgebieten entlang von Havel und Nuthe kommen LRT der Feuchtwiesen und feuchten Hochstaudenfluren vor („Ferbitzer Bruch“, „Mittlere Havel“, „Nuthe, Hammerfließ und Eiserbach“, „Obere Wublitz“). Der Moorwald „Giebelfenn“, die „Heldbockeichen“ und die „Streuwiesen bei Werder“ sind nur wenige Hektar groß.

Naturräumlich ist Potsdam den Mittelbrandenburgischen Platten und Niederungen zuzuordnen (SCHOLZ, 1962). Es ist mit seinem Reichtum an Flüssen und Seen ein von Grundmoräneninseln durchsetztes Niederungsgebiet, dessen natürliche Waldgesellschaften von Traubeneichen- bzw. Stieleichen-Hainbuchenwald oder Kiefern-Traubeneichenmischwald gebildet werden, die stellenweise in den FFH-Gebieten noch vorkommen.



Abb. 4.6: Schloss Cecilienhof in Potsdam Quickbird-Satellitenbild (RGB: 4,3,2)

Tab. 4.4 listet die im Testgebiet in den unterschiedlichen FFH-Gebieten vorkommenden LRT der Offenbereiche auf, die in den Gebietsmeldungen beschrieben werden.

LRT	Name
2330	Dünen mit offenen Grasflächen mit <i>Corynephorus</i> und <i>Agrostis</i> [Dünen im Binnenland]
3140	Oligo- bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer
3150	Natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation des Magnopotamions oder Hydrocharitions
4030	Trockene europäische Heiden
6120*	Trockene, kalkreiche Sandrasen
6410	Pfeifengraswiesen auf kalkreichem Boden, torfigen und tonig-schluffigen Böden (<i>Molinion caeruleae</i>)
6430	Feuchte Hochstaudenfluren der planaren und montanen bis alpinen Stufe
7140	Übergangs- und Schwinggrasmoore

Tab. 4.4: Übersicht der vorkommenden LRT der Offenbereiche in Potsdam (Quelle: Standard-Datenbogen LUA Brandenburg), mit * gekennzeichnete LRT sind prioritär

In Karte A.7 (siehe Anhang) ist die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus dem Jahr 1992/93 dargestellt. Karte A.8 (siehe Anhang) zeigt das Satellitenbild.

4.2.4 Schwedt

Das Testgebiet Schwedt umfasst einen großen Teil der Oderaue und liegt im Nationalpark „Unteres Odertal“, der gleichzeitig FFH und SPA-Gebiet ist. Weitere kleinere geschützte Flächen im Testgebiet sind die FFH-Gebiete „Silberberge“, „Müllerberge“ und die „Welsetalhänge bei Kunow“, die kleine Vorkommen von Trocken- und Halbtrockenrasen beherbergen. Naturräumlich gehört die gesamte Fläche zum Odertal (SCHOLZ, 1962). Das Klima des Odertals ist bereits stark kontinental geprägt und damit relativ niederschlagsarm und größeren Temperaturschwankungen unterworfen.



Abb. 4.7: Polderfläche an der Oder, aufgenommen 2004, mit frdl. Genehmigung von Franziska Tanneberger (Universität Greifswald)

Die Oder ist im Bereich des Nationalparks noch relativ naturnah und kann stellenweise große Flächen ungestört überfluten, so dass sich auch aufgrund ihrer Funktion als Grenzfluss eine hohe Biodiversität erhalten hat. Im gesamten Nationalpark wurden 1061 Pflanzenarten nachgewiesen, darunter 303 auf der Roten Liste Brandenburgs befindliche. Bei Schwedt besteht der Nationalpark aus zwei Nasspoldern, die im Winter geflutet werden. Der nördliche Teil des Untersuchungsgebietes, der bereits in Polen liegt, wurde bis 1945 ebenfalls als Nasspolder landwirtschaftlich genutzt. In den letzten 50 Jahren hat sich aufgrund der Nutzungsaufgabe eine ursprüngliche Flußauenvegetation mit ausgedehnten Röhrichten,

Seggenrieden und Gehölzsäumen entwickelt (DITBERNER & KÖHLER, 1998).

Das Gebiet ist wichtiger Lebensraum für viele seltene Vogelarten wie z.B. den Seggenrohrsänger und den Wachtelkönig sowie Rastplatz für zehntausende Zugvögel. Fischotter und Biber und zahlreiche gefährdete Fisch- und Amphibienarten kommen hier vor.

Tab. 4.5 listet die im Testgebiet in den unterschiedlichen FFH-Gebieten vorkommenden LRT der Offenbereiche auf, die in den Gebietsmeldungen beschrieben werden.

LRT	Name
3130	Oligo- bis mesotrophe stehende Gewässer mit Vegetation der Littorelletea uniflorae und/oder der Isoeto-Nanojuncetea
3150	Natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation des Magnopotamions oder Hydrocharitions
3260	Flüsse der planaren bis montanen Stufe mit Vegetation des Ranunculion fluitantis und des Callitricho-Batrachion
3270	Flüsse mit Schlammbänken mit Vegetation des Chenopodion rubri p.p. und des Bidention p.p.
6120*	Trockene, kalkreiche Sandrasen
6210*	Naturnahe Kalk-Trockenrasen und deren Verbuschungsstadien (Festuco-Brometalia) (* besondere Bestände mit bemerkenswerten Orchideen)
6240*	Subpannonische Steppen-Trockenrasen [Festucetalia vallesiacae]
6410	Pfeifengraswiesen auf kalkreichem Boden, torfigen und tonig-schluffigen Böden (Molinion caeruleae)
6430	Feuchte Hochstaudenfluren der planaren und montanen bis alpinen Stufe
6440	Brenndolden-Auenwiesen (Cnidion dubii)
6510	Magere Flachland-Mähwiesen (Alopecurus pratensis, Sanguisorba officinalis)

Tab. 4.5: Übersicht der vorkommenden LRT der Offenbereiche in Schwedt (Quelle: Standard-Datenbogen LUA Brandenburg), mit * gekennzeichnete LRT sind prioritär

In Karte A.10 (siehe Anhang) ist die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus dem Jahr 1992/93 dargestellt. Karte A.11 (siehe Anhang) zeigt das Satellitenbild.

4.3 Quickbird-Satellitenbilder

In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften des Sensors und die Bildqualität besonders eingehend auf ihre Eignung für die Umweltbehörden untersucht sowie die vorgenommenen Bildkorrekturen erläutert.

4.3.1 Geometrische und radiometrische Korrektur

Die verwendeten Satellitenbilder gehören alle zur Produktebene „Standard Imagery“, d.h. sie werden vom Satellitenbetreiber sensor-korrigiert, und auch eine radiometrische Grundkorrektur (dark objects subtraction) wird vorgenommen. Die Bilder werden georeferenziert mit einer Lageabweichung von bis zu 14 m geliefert. Diese Vorkorrekturen reichen nicht aus, die Daten müssen noch weiter radiometrisch und geometrisch korrigiert werden, um sie mit Daten anderer Sensoren vergleichen zu können (vgl. Kapitel 2.4.3.4). Es wurde mit Parametern von DigitalGlobe eine Umrechnung der Bilder auf Top-of-the-Atmosphäre Radianzwerte vorgenommen (Formel 4.1 und 4.2).

$$L_{\text{Pixel, Band}} = \text{absCalFactor}_{\text{Band}} \times q_{\text{Pixel, Band}} \quad (4.1)$$

$L_{\text{Pixel, Band}}$ bezeichnet die über den einzelnen Kanal integrierte Radianz pro Bildpixel [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$], der Faktor $\text{absCalFactor}_{\text{Band}}$ bezeichnet den absoluten Kalibrierungsfaktor des einzelnen Kanals [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{count}^{-1}$] und wird vom Satellitenbetreiber in den Metadaten des Bildes mitgeliefert. $q_{\text{Pixel, Band}}$ sind die

radiometrisch vorkorrigierten Bildpixel [counts]. Die so berechnete über den Kanal integrierte Radianz muss nun noch mit der effektiven Bandweite $\Delta\lambda_{\text{Band}}$ [μm] dividiert werden, um zu spektralen Top-of-the-Atmosphere Radianzwerten $L_{\lambda_{\text{Pixel,Band}}}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$] zu kommen (Formel 4.2).

$$L_{\lambda_{\text{Pixel,Band}}} = \frac{L_{\text{Pixel,Band}}}{\Delta\lambda_{\text{Band}}} \quad (4.2)$$

Eine weitere Atmosphärenkorrektur und Umrechnung auf Reflektanzwerte wird nicht vorgenommen, da diese Korrekturverfahren extrem aufwendig und fehleranfällig sind. Die Radianz ist im Gegensatz zur Reflektanz nicht nur eine Eigenschaft des bestrahlten Materials, sondern hängt auch von Einstrahlung und Aufnahmewinkel ab. Da das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren jedoch nicht auf direkten Grauwerten beruht, sondern auf abgeleiteten Ratios und relativen Unterschieden und nur Daten aus der Hauptvegetationsperiode verwendet werden, kann dieser Nachteil vernachlässigt werden.

Mithilfe von ATKIS-Daten¹³ des DLM25/2 wurden alle Bilder einer Passpunktentzerrung mit einem Polynom 2. Ordnung und der Resampling-Methode Nearest Neighbor unterworfen (durchschnittlicher RMSE von 0.6 m). Aufgrund der geringen Reliefenergie in allen Testgebieten wurde auf eine Höhenkorrektur der Daten verzichtet.

Die hohe radiometrische Auflösung des multispektralen Sensors muss mit der hohen geometrischen Auflösung des panchromatischen Sensors fusioniert werden, weil gerade für die visuelle Interpretation eine sehr gute Erkennbarkeit von Details wichtig ist. Da die traditionell eingesetzten Verfahren wie IHS-Transformation oder Hauptkomponententransformation für die neue Sensorgeneration nur eingeschränkt nutzbar sind, weil der Unterschied von MS zu PAN nicht mehr das Doppelte (z.B. bei Landsat), sondern das Vierfache beträgt und außerdem der panchromatische Kanal bei Quickbird auch das NIR abdeckt, wurde ein speziell für höchstauflösende Satellitendaten entwickelter Algorithmus verwendet (ZHANG, 2002; ZHANG & GONG, 2005). Dieses Verfahren beruht auf Wavelet- und IHS-Transformationen und erzeugt sehr scharfe Objektgrenzen unter gleichzeitig optimaler Erhaltung der Grauwerte des multispektralen Bildes.

4.3.2 Bildqualität

Die geometrische Auflösung ist vom Aufnahmewinkel abhängig, und Bilder, die nahe Nadir aufgenommen werden, haben eine exzellente geometrische Qualität (unter der Voraussetzung, dass atmosphärisch gute Bedingungen herrschen). Sobald der Aufnahmewinkel die 15° überschreitet, verringert sich die geometrische Auflösung und stärkere Verkippungseffekte treten auf, damit wird auch die digitale Auswertbarkeit der Daten eingeschränkt. In Abb. 4.8 sind zum Vergleich zwei maßstabsgleiche Ausschnitte mit Winkeln von 5.6° und 20.5° off-Nadir dargestellt.



Abb. 4.8: Maßstabsgleiche Ausschnitte aus den Quickbird-Aufnahmen von Potsdam (links) mit 5.6° off-Nadir und Lieberose (rechts) mit 20.5° off-Nadir, pan-sharpened Darstellung (RGB: 4,3,2).

¹³ vgl. Kapitel 4.4

Großflächige Überstrahlungen treten aufgrund der hohen radiometrischen Auflösung nicht auf, jedoch gibt es kleine Bereiche sehr hoher Reflexion, die beim Überfliegen in den CCDs eine Überladung verursachen. In Abb. 4.9 ist dies dargestellt.

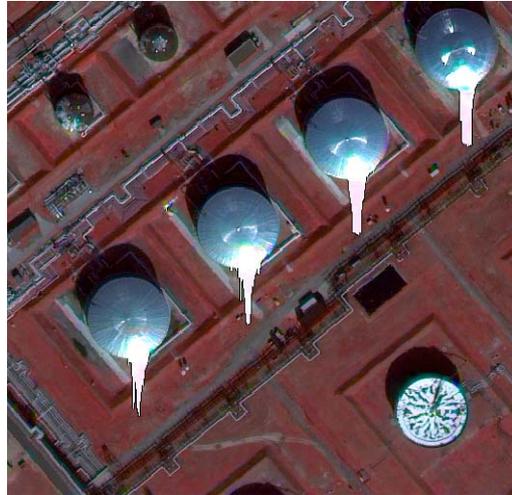


Abb. 4.9: Ausschnitt aus der Quickbird-Aufnahme von Schwedt, pan-sharpened Darstellung (RGB: 4,3,2). Die weißen "Nasen" werden durch stark reflektierende Oberflächen verursacht.

Durch die hohe radiometrische Auflösung können auch einige Details in beschatteten Bereichen unterschieden werden. In Abb. 4.10 ist zu erkennen, dass bei geeigneter Histogrammstreckung die Schattenbereiche noch weiter auszuwerten sind.



Abb. 4.10: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam, pan-sharpened Darstellung (RGB: 4,3,2). Durch geeignete Histogrammstreckung werden Details in den beschatteten Bereichen sichtbar, hier z.B. Bäume.

Negativ zu bewerten ist das Auftreten von so genannten „Farbexplosionen“ an Objektgrenzen mit hohem Kontrast (Abb. 4.11), die dadurch entstehen, dass jeder Multispektralkanal einzeln aufgenommen wird, was eine leichte Verschiebung der einzelnen Pixel zueinander bewirken kann. An scharfen Kanten mit hohem Kontrast kann dies zu Stellen mit „Farbexplosionen“ führen, da bei dem anschließenden Resampling der Daten alle Pixel mit dem Nearest Neighbor Verfahren neu berechnet werden.¹⁴

¹⁴ Quelle: internes technisches Memo von EURIMAGE

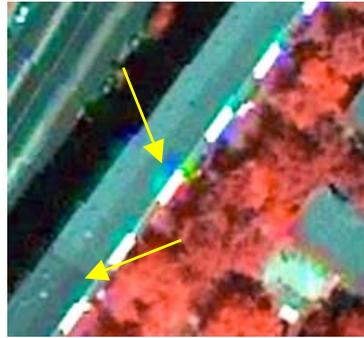


Abb. 4.11: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam, pan-sharpened Darstellung (RGB: 4,3,2). Regenbogenfarbige Pixelgruppen an Hauskanten.

Ebenfalls negativ ist das Auftreten von „Schachbrettmustern“ in Bereichen geringer Reflexion, die eigentlich homogen sein müssten. Abb. 4.12 zeigt den histogrammgestreckten Ausschnitt einer Wasserfläche. Laut Satellitenbetreiber ist dies ein Problem, das bei der Komprimierung und Übertragung der Daten vom Satelliten an die Bodenstation auftritt und woran momentan noch gearbeitet wird.¹⁵

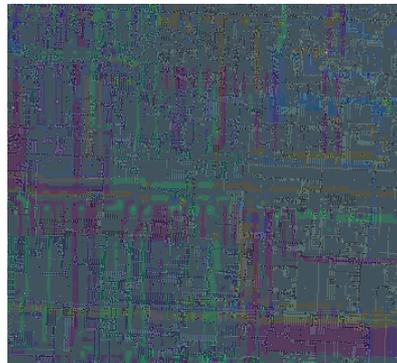


Abb. 4.12: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Potsdam, pan-sharpened Darstellung (RGB: 4,3,2). Musterbildung in Bereichen niedriger Reflexion (hier eine Wasserfläche).

Ein unter Umständen schwerwiegendes Manko stellen die Bedingungen des Satellitenbetreibers dar: Es müssen 20% Wolkenbedeckung in Kauf genommen werden. Das kann bedeuten, dass eine Aufnahme unbrauchbar ist, weil sich die Wolke (und ihr Schatten) direkt über der interessantesten Fläche befindet (Abb. 4.13). Trotzdem muss man diese Daten bezahlen (es besteht jedoch immer ein gewisser Verhandlungsspielraum).

¹⁵ Quelle: internes technisches Memo von EURIMAGE

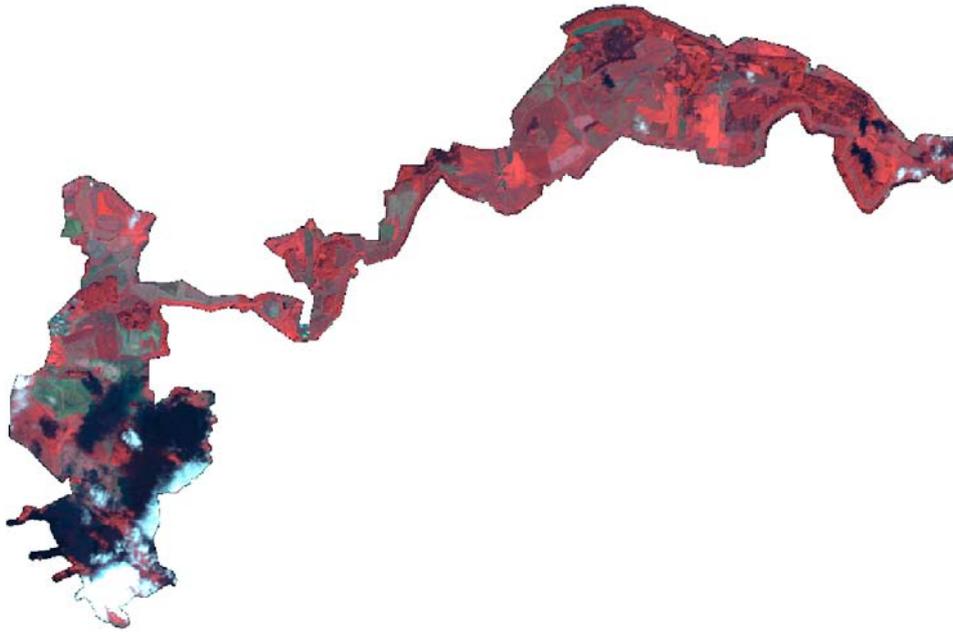


Abb. 4.13: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Thüringen mit großflächigen Wolken im Südwesten, pan-sharpened Darstellung (RGB: 4,3,2)

Da das Datenaufbereitungsverfahren des Satellitenbetreibers offensichtlich einer ständigen Weiterentwicklung unterliegt, können durchaus erhebliche Unterschiede bei der Datenlieferung auftreten. Als Beispiel ist in Abb. 4.14 links ein unbearbeiteter Originalausschnitt des multispektralen Bildes aus einer früheren Lieferung und rechts aus einer Nachbestellung dargestellt. Obwohl die Daten aus der gleichen Szene stammen und beide als Standard-Produkt mit Nearest Neighbor Resampling aufbereitet wurden, sind nicht nur eindeutige Unterschiede bei der Lage der Pixel, sondern auch bei der Größe des Schattenbereiches und der Größe des Baumes zu erkennen. Die gelben Polygone umfassen Pixel, die in beiden Bildausschnitten den gleichen Wert innehaben. Bei einer Pixelgröße des multispektralen Bildes von $2.44 \text{ m} \times 2.44 \text{ m}$ bedeutet eine Abweichung um 1 Pixel bereits einen Flächenunterschied von 5.96 m^2 . Dies ist laut DigitalGlobe auf veränderte Resampling-Kernel bzw. auf einen anderen Ausgangspunkt des Resamplings zurückzuführen.

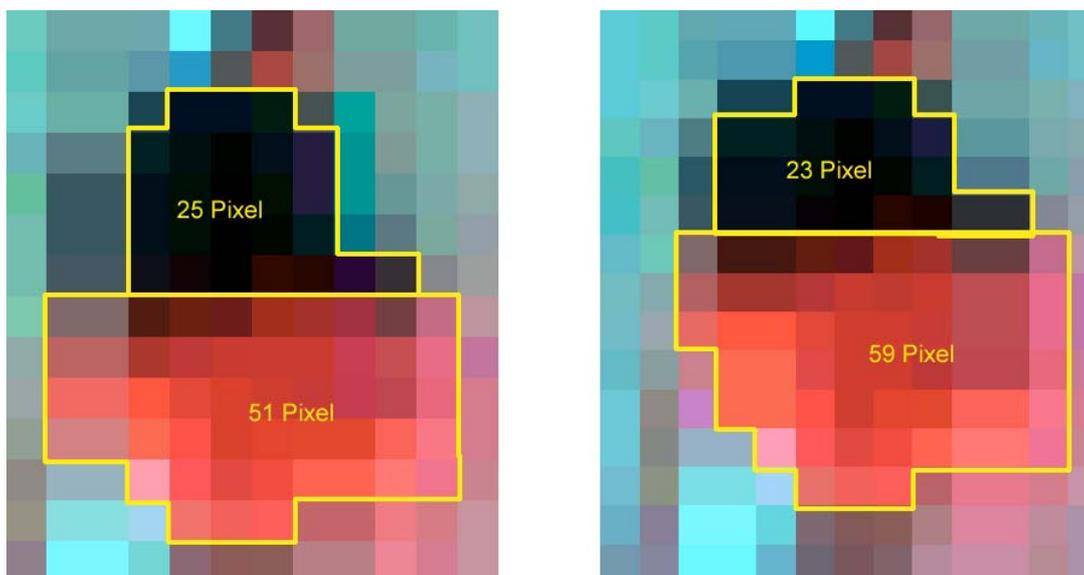


Abb. 4.14: Ausschnitt aus einer Quickbird-Aufnahme von Lieberose vom 06.09.2004, links Datenlieferung 2004, rechts Datenlieferung 2005, multispektrales Bild (RGB: 4,3,2)

4.4 Geobasisdaten

Als Basis für die Georeferenzierung wurden Daten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) der Ausbaustufe DLM25/2 verwendet. Das einheitlich verwendete Bezugssystem ist das für Brandenburg gültige ETRS89.

Für die automatische wissensbasierte Ableitung von Trainingsgebieten kamen vier verschiedene Landnutzungsdatensätze als a-priori Information zum Einsatz, um die Übertragbarkeit und Genauigkeit der Methoden beim Einsatz unterschiedlicher Basisdaten zu testen und weil in Polen (Teil des Testgebietes Schwedt) nur die CORINE Landcover 2000-Daten flächendeckend verfügbar sind.

Zum einen wurde die in Brandenburg (und in allen neuen Bundesländern) landesweit vorliegende Biotoptypen- und Landnutzungskartierung (BTNTK) von 1992/93 verwendet, die aus stereoskopischen CIR-Luftbildern mit einem Befliegungsmaßstab von 1 : 10 000 auf Grundlage des Brandenburger CIR-Schlüssels (siehe Anhang) erstellt wurde. Der Schlüssel unterscheidet zwölf Haupteinheiten mit einer teilweise sehr fein untergliederten Aufteilung in Untergruppen, Bestand, Ausprägung, Nutzung und weiteren Sekundärinformationen. Ursprünglich lag der Code in einer String-Version vor, auch als Alpha-Code bezeichnet, dabei wurden Zahlen und Text miteinander kombiniert. Für eine numerische Auswertung ist dies nicht vorteilhaft, so dass der Alpha-Code in einen rein numerischen CIR-Code umgesetzt wurde. Der Aufbau des Schlüssels sei an einem Bildbeispiel (Abb. 4.15) mit dem Alpha-Code erläutert:

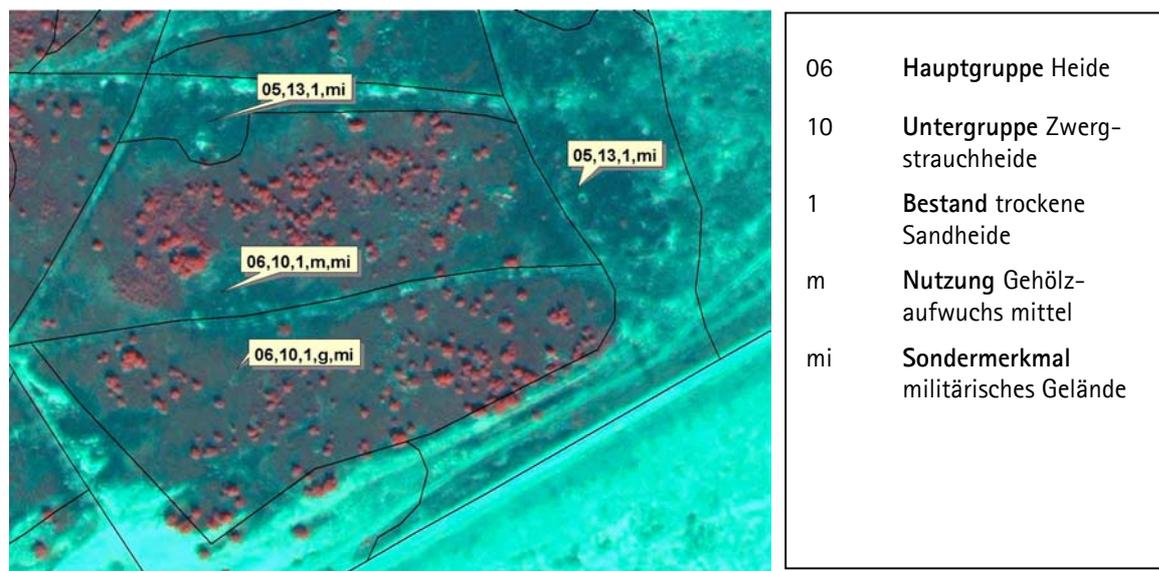


Abb. 4.15: Beispiel für die Zusammensetzung des Alpha-Codes (mittlere Fläche)

Die analog auf Folien erfassten Abgrenzungen und Codierungen wurden mit Hilfe topografischer Karten hochgezeichnet, gescannt, georeferenziert und digitalisiert. Aufgrund der langwierigen Verarbeitungskette sind Lageungenauigkeiten nicht zu vermeiden, so dass nicht nur durch echte Veränderungen in der Landschaft Flächenabgrenzungen fehlerhaft sind, sondern insgesamt die Lagegenauigkeit sehr eingeschränkt ist.

Weiterhin gibt es für die Testgebiete Jüterbog und einen Teil der Stadt Potsdam eine Biotoptypen- und Landnutzungskartierung von 1998, beruhend auf stereoskopischen CIR-Luftbildern mit einem Befliegungsmaßstab von 1 : 10 000 und den vollen Diasatz der CIR-Luftbilder. Da die BTNTK von 1998 bereits auf der Grundlage des ATKIS DLM25/1 digitalisiert wurde, ist die allgemeine Lagegenauigkeit wesentlich höher. Für die Kartierung 1998 wurde ein veränderter CIR-Schlüssel verwendet, der gerade im städtischen Bereich mehr Klassen unterscheidet als der Brandenburger CIR-Schlüssel, ansonsten aber ähnlich aufgebaut ist.

Für das gesamte Testgebiet Potsdam wurde auf Basis der Quickbird-Daten 2004 eine visuelle monoskopische Biotypen- und Landnutzungskartierung nach dem CIR-Schlüssel von 1998 vorgenommen. Die Digitalisierung erfolgte on-screen auf Grundlage des ATKIS DLM25/2.

Für das gesamte Testgebiet Jüterbog wurde auf Basis der Quickbird-Daten 2003 eine visuelle monoskopische Biotypen- und Landnutzungskartierung nach dem neuen Brandenburger CIR-Schlüssel (angepasst an die FFH-RL) vorgenommen (LUA, 2004). Die Digitalisierung erfolgte on-screen auf Grundlage des ATKIS DLM25/2.

Testweise wurde auch in Brandenburg der CORINE Landcover 2000 Datensatz¹⁶ verwendet, da er europaweit flächendeckend vorliegt und auf einer einheitlichen Erfassungsmethodik beruht. Die Kartierung basiert auf der überwiegend visuellen Interpretation von Satellitendaten (zumeist Landsat) und wurde im Maßstab 1 : 100 000 durchgeführt. Mit einer Flächenfalle von 25 ha und nur 37 Bodenbedeckungsklassen, die in Deutschland vorkommen, sind diese Daten im Gegensatz zu den BTNTK sehr verallgemeinernd, jedoch für viele Bereiche in Europa meist die einzige erhältliche flächendeckende Datengrundlage zur Landbedeckung.

4.4.1 Terrestrische Aufnahmen

Im Testgebiet Jüterbog wurde im November 2003 (drei Monate nach der Satellitenbilddaufnahme) aufgrund der fehlenden LRT-Kartierung eine eigene selektive terrestrische LRT-Kartierung durchgeführt (siehe Karte A.13 im Anhang). Die Zeitverzögerung ergab sich aus Gründen der verspäteten und unklaren Mittelgenehmigung für das Forschungsprojekt. Die Kartierung der untersuchten LRT war dennoch ohne weiteres möglich, da alle wichtigen Arten und Vegetationsstrukturen noch vorhanden und erkennbar waren. Eine Auflistung der kartierten Flächen und die Zustandsbewertung befinden sich im Anhang in Tab. A.12.

Da verschiedene Methoden des Accuracy Assessment angewendet werden sollten, wurde zusätzlich im Testgebiet Jüterbog im August 2004 eine terrestrische Aufnahme von Kontrollpunkten entlang von Transekten durchgeführt. Die Transekte wurden zwischen zwei visuell markanten Punkten (z.B. Bäume) gelegt und mit Hilfe eines Maßbandes vermessen, alle 30 m wurde die dominierende Vegetation im Radius von 2 m aufgenommen (siehe Karte A.13 im Anhang).

Für einige Teilbereiche in Lieberose und Potsdam gibt es selektive terrestrische LRT-Kartierungen oder selektive terrestrische Biotopkartierungen, die vom Landesumweltamt Brandenburg zur Verfügung gestellt wurden. Zusätzlich wurden im Herbst 2004 eigene selektive terrestrische LRT-Kartierungen ausgewählter Stichprobenflächen in beiden Gebieten durchgeführt (siehe Karten A.14 und A.15 im Anhang).

Für das Gebiet Schwedt konnten zusätzlich zu einer kleinflächigen selektiven terrestrischen LRT-Kartierung des Landesumweltamtes GPS-gestützte Vegetationserhebungen aus dem Jahr 2004 einbezogen werden, die freundlicherweise von Franziska Tanneberger von der Universität Greifswald¹⁷ zur Verfügung gestellt wurden.

¹⁶ CORINE Land Cover; Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004

¹⁷ im Rahmen des Projektes „Schlüsselfaktoren und Entwicklungspotential von Lebensräumen des Seggenrohrsängers (*Acrocephalus paludicola*) im Unteren Odertal und Empfehlungen für die dauerhafte Wiederherstellung von intakten Brutgebieten dieser weltweit gefährdeten Art“ erhoben

Datenquelle	Stand	Anwendung
Topografische Daten (ATKIS)	2004	Georeferenzierung
Biotoptypen/Landnutzungskartierung	1992/1993	Wissensbasis
Biotoptypen/Landnutzungskartierung (Potsdam, Jüterbog)	1998	Wissensbasis
Biotoptypen/Landnutzungskartierung (Potsdam, Jüterbog)	2003/2004	Wissensbasis
CORINE Landcover 2000	2000	Wissensbasis
LRT-Kartierungen (Schwedt, Potsdam, Lieberose)	2002/2003/2004/2005	Accuracy assessment
§32er-Kartierung (Potsdam)	2001 - 2005	Accuracy assessment
Eigene terrestrische Erhebungen (Jüterbog, Lieberose, Potsdam)	2003/2004	Accuracy assessment/ Diskriminanzanalyse
GPS Vegetationserhebungen im 5 x 5 m Raster (Schwedt)	2004	Accuracy assessment/ Diskriminanzanalyse
Stereoskopische CIR-Luftbilder (Potsdam, Jüterbog)	1998	Accuracy assessment

Tab. 4.6: Überblick über die verwendeten Zusatzdaten

Aufgrund der Besonderheit des SARA'04 Projektes, in dessen Rahmen diese Arbeit entstand, sollen an dieser Stelle einige Erläuterungen zur Auswahl der Testgebiete und zu den verwendeten Ground truth Daten gegeben werden, da die Auswahl der Methoden und der Aufbau des Modells sich daran orientieren mussten. Für das SARA'04 Projekt, das im August 2003 begann, standen anfangs nur neu aufgenommene Daten von Jüterbog zur Verfügung, erst Ende des Jahres 2004 kamen Lieberose und Potsdam als neu aufgenommene Testgebiete dazu. In diesen drei Gebieten sind jedoch vor allem trockene offene LRT bzw. Wald-LRT verbreitet und nur wenige kleinflächige wasserabhängige LRT.

Das Testgebiet Schwedt wurde Ende 2004 für andere Zwecke des Projektes aus Archivdaten (Aufnahme September 2003) beschafft, so dass keine eigenen zeitnahen terrestrischen Aufnahmen gemacht werden konnten. Da es jedoch die GPS-gestützten Vegetationsaufnahmen gibt, wurde es ebenfalls in die Auswertung und Modellbildung einbezogen, da im Testgebiet an der Oder großflächige wasserabhängige LRT vorkommen. Trotzdem sind diese Ground truth Daten mit Vorsicht zu bewerten, da sie aus dem Sommer 2004 stammen – unter der Annahme, dass sich innerhalb eines Jahres die Vegetationszusammensetzung nicht grundlegend verändert, flossen sie dennoch in die Verfahrensentwicklung ein.

5. Feinkonzept und Methoden

Nachdem in Kapitel 3 das Grobkonzept für das Klassifikationsverfahren vorgestellt wurde, folgt in diesem Kapitel die detaillierte Erläuterung des Feinkonzeptes und der verwendeten Methoden. In Abschnitt 5.1 werden für die Bewertung geeignete Indikatoren ausgewählt, deren praktische Verwendung anhand einiger Beispiele gezeigt wird. Die Indikatoren werden nachfolgend in ein umfassendes Objektmodell integriert, das in Abschnitt 5.2 behandelt wird. Die einzelnen Komponenten des Klassifikationsverfahrens, das sich in die Vorstrukturierung der Bilddaten, die Ableitung der Trainingsgebiete, die clusterbasierte Signaturextraktion und die Klassifikation sowie die wissensbasierte Nachbearbeitung aufteilt, sind in Abschnitt 5.3 dargestellt. Die mit dem Verfahren erzeugten Klassifikationsergebnisse werden im GIS zu Biotoptypen aggregiert (5.4) und können nach der visuellen Analyse der Flächengrenzen und der Genauigkeit der Klassifikation (5.5) als Indikatoren für jedes einzelne Habitat zur Bewertung herangezogen werden (5.6).

5.1 Auswahl der Indikatoren

Wie bereits in den Anforderungen unter Abschnitt 3.2 dargelegt, sollen sich die Indikatoren eng an die Bewertungsschemata der LANA anlehnen. Es gibt dabei Indikatoren, die für fast alle LRT zutreffen, aber auch ganz spezifische, die nur auf wenige LRT bezogen werden können. Die verschiedenen Indikatoren können in inhaltliche Kategorien bzw. Obergruppen eingeordnet werden, wobei erschwerend wirkt, dass sie ganz unterschiedlichen semantischen Einheiten angehören, so sind einige als Biotopelemente bzw. Landbedeckungsklassen einzuordnen, während andere eher zu den Biotoptypen bzw. Landnutzungsklassen gehören oder nur strukturelle Eigenschaften beschreiben. Außerdem sind sie je nach Lebensraumtyp teilweise in mehrere Zeigerkategorien einzuteilen, z.B. kann Röhricht sowohl ein Feuchtigkeits- als auch ein Eutrophierungszeiger sein. Sinnvoll erscheint deswegen eine Unterteilung nach pragmatischen Gesichtspunkten, es werden drei Oberkategorien gebildet: Biotopelement, Biotoptyp und allgemeine Struktur. Die Oberkategorie Biotopelement wird noch weiter unterteilt in wasserabhängige offene LRT, trockene offene LRT und Wald-LRT. Nur einige wenige Indikatoren repräsentieren einzelne Artengruppen, die meisten stellen Mischungen aus ganz verschiedenen Pflanzenarten bzw. Mischungen aus Arten und Bodensubstrat dar. Pflanzenarten, die sehr konkurrenzstark wachsen und fast reine Bestände mit hohen Deckungsgraden bilden, können mit fernerkundlichen Methoden sehr gut detektiert werden, so z.B. Arten der Zwergstrauchheide oder Arten der Wasserlinsen. Dies gilt jedoch nur, solange diese Arten einen hohen Deckungsgrad haben und eine ausreichend große Fläche einnehmen. Bei anderen Indikatoren wie z.B. bei Arten des Sandtrockenrasens ist eher das Bodensignal eine wichtige Einflussgröße (siehe Abschnitt 5.2.1.2).

Für einige LTR ist die Bewertung der Größe von Objekten mit Landschaftstrukturmaßen geeignet, um indirekt Rückschlüsse auf die Habitatstruktur ziehen zu können. Hierfür wird das Maß Largest Patch Index (LPI) verwendet (McGARIGAL & MARKS, 1994), wobei als Bezugsfläche für die Berechnung keine Filtergröße sondern die Habitatfläche verwendet wird.

$$LPI = \frac{\max_{j=1}^a(a_{ij})}{A} (100) \quad (5.1)$$

Mit A wird die Habitatfläche des LRT (in m^2) bezeichnet, während a_{ij} die Fläche des größten Patches (in m^2) erfasst. Das Maß LPI beinhaltet also den Prozentanteil der Habitatfläche, den das größte Objekt einnimmt. Der Einsatz des LPI sei am Beispiel der trockenen europäischen Heide (LRT 4030) erläutert: Heideflächen können mit zunehmendem Alter sehr große zusammenhängende Flächen einnehmen. Dies bedeutet, dass die natürliche Regeneration nicht mehr gegeben ist, die Habitatstruktur wird schlechter. Mit Hilfe des LPI kann bewertet werden, ob die Heideflächen bereits weitestgehend geschlossen sind. Allerdings ist dieser Indikator nur sinnvoll bei Flächen einzusetzen, die nicht abgebrannt oder anderweitig gepflegt wurden, da z.B. bei Brandflächen die Heide ebenfalls geschlossen neu aufwächst.

In Tab. 5.1 sind alle Indikatoren für die in den Testgebieten vorkommenden Offenland-LRT aufgeführt, die potentiell mit höchstauflösenden optischen Satellitendaten zu erkennen sind. Wald-LRT werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, da jedoch aus der Berechnung der Gehölzbedeckung der Indikator Kronenschlußgrad direkt abgeleitet werden kann, ist er in der Tabelle mit aufgeführt.

Indikator	Kategorie	Skale	Bestimmung	LRT
Struktur				
Flächengröße in m ²	Habitatstruktur	Mikro-/ Mesoskale	visuell	alle
Zerschneidung	Beeinträchtigungen	Mikro-/ Mesoskale	teilautomati- siert / visuell	alle
Largest Patch Index (LPI)	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	2310, 4030
Biotoptyp/Nutzungsintensität				
Biotoptyp/Landnutzungstyp	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikro-/ Mesoskale	teilautomati- siert / visuell	alle
Pufferzonen/umgebende Landnutzung	Beeinträchtigungen	Mikro-/ Mesoskale	teilautomati- siert / visuell	alle
Versiegelung in %	Beeinträchtigungen	Mikro-/ Mesoskale	automatisiert	alle
Entwässerung	Beeinträchtigungen	Mikro-/ Mesoskale	teilautomati- siert / visuell	alle wasserabhängigen
Besondere Nutzungen	Beeinträchtigungen	Mikroskale	visuell	alle
Biotopelemente in % Flächenanteil				
Gehölzbedeckung	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle
Trockene offene LRT				
offener Boden	Habitatstruktur	Mikroskale	automatisiert	2330, 2310, 4030
Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens	Habitatstruktur	Mikroskale	automatisiert	2330, 2310, 4030
Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens	Habitatstruktur	Mikroskale	automatisiert	2330, 2310, 4030
Arten der Zwergstrauchheide	Habitatstruktur Arteninventar	Mikroskale	automatisiert	2310, 4030
Arten der Besenginsterheide	Habitatstruktur Arteninventar	Mikroskale	automatisiert	2310, 4030
Arten der Gras- und Staudenfluren	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle
Indikator				
wasserabhängige offene LRT				
offene Wasserfläche	Habitatstruktur	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
Arten der Wasserlinsendecken	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen

Tab. 5.1: Fortsetzung nächste Seite

Indikator	Kategorie	Skale	Bestimmung	LRT
Arten der Schwimmblattvegetation	Habitatstruktur	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
Arten der Großseggenröhrichte	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
Arten des Landröhricht	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
Arten des Röhricht an Gewässern	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
Arten der feuchten Hochstauden	Habitatstruktur	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore	Habitatstruktur	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
Arten der Schlammbänke	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle wasserabhängigen
	Wald-LRT			
Kronenschlußgrad	Habitatstruktur Beeinträchtigungen	Mikroskale	automatisiert	alle Wald-LRT

Tab. 5.1: Auswahl und Einordnung der Indikatoren für offene LRT, die potentiell mit Fernerkundungsmethoden bestimmt werden können

Als problematisch erweist sich, dass mit Fernerkundungsmethoden nicht verschiedene, sich überlagernde Schichten ausgewertet werden können. Für die Bewertung im Gelände zählen zur Ermittlung der in den Schemata vorgegebenen Schwellenwerte auch die unter Gehölz- oder Strauchschicht verborgenen Indikatoren, so dass sich die Gesamtzahlen der Deckung oft auf weit über 100 % addieren. Als Beispiel sei hier der Anteil an Gras- und Staudenfluren in einer Heidefläche genannt: Wenn eine Fläche fast vollständig von Gehölz bedeckt ist, kann der Anteil der von oben gesehenen Gras- und Staudenflur an der Gesamtfläche nur noch sehr gering sein, obwohl unter den Bäumen ebenfalls Gras wachsen kann. Unter Umständen bekommt der Indikator „Arten der Gras- und Staudenfluren“ deshalb einen sehr niedrigen und damit guten Wert, dies entspräche jedoch nicht der Realität und wertete eine Fläche fälschlicherweise auf. Ein Weg muss also gefunden werden, die Flächenanteile der Indikatoren in Beziehung zum überdeckenden Gehölzbewuchs zu bewerten. Entweder bekommt der Indikator „Gehölzbedeckung“ eine stärkere Gewichtung in der Gesamtbewertung, oder die Anteile der „Nicht-Gehölz“-Indikatoren werden nur für die Fläche berechnet, die nach Abzug der gehölzbestandenen Bereiche übrig bleibt. Letztere Methode erscheint objektiver, kann jedoch ebenfalls zu Fehlern führen, da so direkt von den sichtbaren auf die verdeckten Bereichen geschlossen wird, eine offene Sandgrube auf einer Lichtung führt damit zur unwahrscheinlichen Annahme, dass der Flächenanteil an offenem Sand auch unter den Bäumen sehr hoch ist. Es wird daher diese Art der Berechnung nur auf Indikatoren angewendet, die auch tatsächlich verbreitet im Wald vorkommen können (z.B. Gras- und Staudenfluren oder Zwergstrauchheide). Ein Vergleich dieser Berechnungsmethode mit den vor Ort ermittelten Werten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Nachfolgend soll an einigen Beispielen gezeigt werden, wie unterschiedlich die Indikatorenlisten für jeden LRT in den Parametern Habitatstruktur und Beeinträchtigungen aussehen können und welche Schwellenwerte für die Bewertung herangezogen werden. Die konkrete Umsetzung wird in Kapitel 6 an Anwendungsbeispielen erläutert. Es soll an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass eine Bewertung des Arteninventars mit fernerkundlichen Methoden im Sinne der FFH-RL nicht möglich ist, dass also nur die Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen betrachtet werden.

Wenn im Folgenden von Teilerhaltungszustand gesprochen wird, dann ist dies immer OHNE die Bewertung des Arteninventars gemeint und bedeutet also nicht den Gesamterhaltungszustand.

Da sich die Indikatoren für die Bewertung der Habitatstruktur und für die Bewertung von Beeinträchtigungen oft überschneiden, sind sie hier vereinfachend zusammengefasst. Zum Beispiel wird für den LRT 4030 in den Schemata der LANA für die Habitatstruktur ein Schwellenwert für Gehölzbedeckung und Vergrasung angegeben, während bei Beeinträchtigungen die fortschreitende Sukzession, Wiederbewaldung und das Vorhandensein von Nitrophyten angeführt sind. Dies ist jedoch in den genannten Schwellenwerten der Habitatstruktur bereits enthalten.

Beispiel: LRT 4030 – Trockene europäische Heiden

In Abb. 5.1 bis Abb. 5.3 sind drei Flächen der trockenen Sandheide in verschiedenen Teilerhaltungszuständen dargestellt. Die Heide in Abb. 5.1 wird in den Parametern Habitatstruktur und Beeinträchtigungen mit **A** (in sehr gutem Teilerhaltungszustand) bewertet, da es sich um ein reichhaltiges Mosaik aus offenen Sandflächen, Sandtrockenrasen und Heidebüschen handelt. Der Gehölzaufwuchs ist nur gering und die Heide nicht überaltert.



Abb. 5.1: Beispiel für eine Fläche des LRT 4030 in sehr gutem Teilerhaltungszustand

Die Heide in Abb. 5.2 im Bildvordergrund wird mit **B** (in mittlerem Teilerhaltungszustand) bewertet, da es sich um eine geschlossene Heidedecke handelt, die stellenweise bereits stark überaltert ist. Es sind zwar kaum Eutrophierungszeiger und keine Gehölze vorhanden, aber das Fehlen von offenen Bereichen wie Sandflächen oder Sandtrockenrasen ist ein Indiz für die fehlende Regeneration (die natürlich durch Brände oder künstlich durch Beweidung entstehen kann).



Abb. 5.2: Beispiel für eine Fläche des LRT 4030 in mittlerem Teilerhaltungszustand

Die Heide in Abb. 5.3 wird in den Parametern Habitatstruktur und Beeinträchtigungen mit C (in schlechtem Teilerhaltungszustand) bewertet, da es sich hier aufgrund des dichten Gehölzaufwuchses bereits um einen Birken-Vorwald handelt.



Abb. 5.3: Beispiel für eine Fläche des LRT 4030 in schlechtem Teilerhaltungszustand

Folgende Liste in Tab. 5.2 kann für die Bewertung der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen aufgestellt werden. Dabei gilt: Wenn auch nur ein Indikator unter einen sehr schlechten Schwellenwert fällt, dann kann die Bewertung nicht mehr sehr gut sein. Ansonsten gilt, dass aus der Vergabe von 1 x A, 1 x B und 1 x C ein B wird. Bei Mehrfachnennungen entscheidet die größere Anzahl über die Bewertung des Teilerhaltungszustandes.

Der Indikator LPI wird nur für den aggregierten Indikator Heide berechnet (darunter werden Zwergstrauchheide und Besenginsterheide zusammengefasst) und nur für Flächen, auf denen keine Brände oder sonstige Pflegemaßnahmen stattgefunden haben. Damit kann lt. Aussage terrestrischer

Biopkartierer indirekt die Überalterung bewertet werden, da große zusammenhängende Heideflächen v.a. auf ehemaligen Truppenübungsplätzen ein Anzeichen für die fehlende Regeneration sind. Der LPI wird nur für Flächen in die Bewertung einbezogen, die insgesamt einen Heideanteil von mehr als 25 % aufweisen, da sonst auch Flächen, die bereits fast vollständig von anderer Vegetation bedeckt sind, in diesem Indikator als sehr gut bewertet werden.

Die Indikatoren „offener Boden“ und „Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens“ werden für die Bewertung zusammengefasst, da Sandtrockenrasen sehr lückig auf Sandboden wächst und Pixel, die als „Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens“ klassifiziert wurden, einen hohen Anteil offenen Bodens enthalten.

Indikator	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen
Gehölzbedeckung Arten der Gras- und Staudenfluren offener Boden (incl. Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens) Flächengröße LPI Heide (Zwergstrauchheide und Besenginsterheide)	< 10 % < 30 % 5 – 10 % gleichbleibend oder gewachsen < 30 %	A (sehr gut)
Gehölzbedeckung Arten der Gras- und Staudenfluren offener Boden (incl. Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens) Flächengröße LPI Heide (Zwergstrauchheide und Besenginsterheide)	10 – 35 % 30 – 50 % < 5 % gleichbleibend oder gewachsen 30 – 50 %	B (mittel)
Gehölzbedeckung Arten der Gras- und Staudenfluren offener Boden (incl. Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens) Flächengröße LPI Heide (Zwergstrauchheide und Besenginsterheide)	35 – 75 % 50 – 90 % 0 % abnehmend > 50 %	C (schlecht)

Tab. 5.2: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 4030

Beispiel: LRT 2330 – Dünen mit offenen Grasflächen mit *Corynephorus* und *Agrostis* [Dünen im Binnenland]

Abbildung Abb. 5.4 zeigt ein Flugsanddünenfeld mit einer sehr lückigen Silbergrasflur. Die offenen sandigen und kiesig-sandigen Bereiche überwiegen bei weitem die vegetationsbedeckten Bereiche. Moose sind nur stellenweise als kleine Polster ausgebildet. In den Parametern Habitatstruktur und Beeinträchtigungen wird dies mit A (in sehr gutem Teilerhaltungszustand) bewertet.



Abb. 5.4: Beispiel für eine Fläche des LRT 2330 in sehr gutem Teilerhaltungszustand

In Abb. 5.5 ist eine Düne dargestellt, die bereits vollständig mit einer geschlossenen Moosnarbe bewachsen ist. Die Habitatstruktur wird deshalb mit C bewertet.



Abb. 5.5: Beispiel für eine Fläche des LRT 2330 in schlechtem Teilerhaltungszustand

Für den Indikator „Moos auf trockenen Standorten“ werden nur Flächen eingerechnet, die von sehr altem oder vertrocknetem Moos bedeckt sind (siehe Objektklasse „Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 2“ in Abschnitt 5.2), diese Flächen erscheinen fast schwarz in der CIR-Darstellung. Bilden sich großflächige geschlossene Moosnarben, ist dies ein Zeichen für eine sehr schlechte Habitatstruktur, da andere Arten völlig verdrängt werden.

Die Indikatoren „offener Boden“ und „Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens“ werden auch an dieser Stelle für die Bewertung zusammengefasst.

Indikator	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen
Gehölzbedeckung und Arten der Gras- und Staudenfluren offener Boden (incl. Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens) Flächengröße Moos auf trockenen Standorten (Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 2)	< 10 % > 10 % gleichbleibend oder gewachsen < 25 %	A (sehr gut)
Gehölzbedeckung und Arten der Gras- und Staudenfluren offener Boden (incl. Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens) Flächengröße Moos auf trockenen Standorten (Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 2)	10 – 50 % < 10 % gleichbleibend oder gewachsen 25 – 45 %	B (mittel)
Gehölzbedeckung und Arten der Gras- und Staudenfluren offener Boden (incl. Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens) Flächengröße Moos auf trockenen Standorten (Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 2)	50 – 70 % 0 % abnehmend > 45 %	C (schlecht)

Tab. 5.3: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 2330

Beispiel: LRT 7140 – Übergangs- und Schwingrasenmoore

In Abb. 5.6 ist ein Übergangs- und Schwingrasenmoor zu sehen, das aufgrund von Entwässerung bereits stark beeinträchtigt ist. Der Teilerhaltungszustand in den Parametern Habitatstruktur und Beeinträchtigungen wird mit C bewertet (im Bild dargestellte Entwässerungs- bzw. Eutrophierungszeiger: Pfeifengras, Schilfröhricht und Kiefernaufwuchs).



Abb. 5.6: Beispiel für eine Fläche des LRT 7140 in schlechtem Teilerhaltungszustand

Für die Indikatoren „Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore“ und „Entwässerungs-/ Eutrophierungszeiger“ gibt es keine numerischen Angaben in den Bewertungsschemata, jedoch kann durch einen einfachen Vergleich der Prozentangaben des Monitorings mit den Prozentangaben in den Ersterfassungsbögen eine Aussage zu Zunahme oder Abnahme bestimmter Anteile getroffen werden. Die Indikatoren „Arten des Landröhricht“ und „Arten der Gras- und Staudenfluren“ werden als Entwässerungs-/ Eutrophierungszeiger zusammengefasst, obwohl beachtet werden muss, dass Röhricht im Randsumpf der Moore natürlicherweise vorkommen kann.

Indikator	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen
Gehölzbedeckung Offene Wasserfläche (Schlenken) Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore Fläche Entwässerungs-/ Eutrophierungszeiger (Landröhricht, Gras- und Staudenfluren)	< 10 % ganzjährig vorhanden auf gesamter Fläche gleichbleibend oder gewachsen keine	A (sehr gut)
Gehölzbedeckung Offene Wasserfläche (Schlenken) Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore Fläche Entwässerungs-/ Eutrophierungszeiger (Landröhricht, Gras- und Staudenfluren)	10 – 25 % sporadisch vorhanden auf überwiegender Fläche gleichbleibend oder gewachsen vorhanden	B (mittel)
Gehölzbedeckung Offene Wasserfläche (Schlenken) Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore Fläche Entwässerungs-/ Eutrophierungszeiger (Landröhricht, Gras- und Staudenfluren)	25 – 75 % nicht vorhanden nur sporadisch abnehmend großflächig	C (schlecht)

Tab. 5.4: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 7040

Beispiel: LRT 3150 – Natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation des Magnopotamions oder Hydrocharitions

Für LRT der Seen ist die Unterwasservegetation eine entscheidende Größe zur Bestimmung des Gesamterhaltungszustandes. Dennoch kann mit Methoden der Fernerkundung festgestellt werden, ob Flächen beeinträchtigt sind oder nicht. Ein wichtiger Indikator zur Bestimmung der Habitatstruktur von natürlich eutrophen Seen ist das Vorhandensein eines natürlichen Verlandungssaumes und die möglichst geringe anthropogene Nutzung (z.B. durch Uferverbau oder Badestellen). In Abb. 5.7 ist ein Beispiel des LRT 3150 in sehr gutem Teilerhaltungszustand abgebildet. Der Verlandungssaum ist auf der gesamten Uferlänge ausgeprägt und geht von Röhricht über ein Großseggenried in Erlen-Bruchwald über.



Abb. 5.7: Beispiel für eine Fläche des LRT 3150 in sehr gutem Teilerhaltungszustand

Indikator	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen
typisch ausgebildete Verlandungsvegetationsstrukturen (Röhricht, Großseggenried, Weidengebüsch, Erlen-Bruchwald) Beeinträchtigungen (Freizeitnutzung u. ä.) naturnaher Verlandungssaum	mind. 3 weitgehend ohne > 90 % der Uferlänge	A (sehr gut)
typisch ausgebildete Verlandungsvegetationsstrukturen (Röhricht, Großseggenried, Weidengebüsch, Erlen-Bruchwald) Beeinträchtigungen (Freizeitnutzung u. ä.) naturnaher Verlandungssaum	mind. 2 mäßig > 50 % der Uferlänge	B (mittel)
typisch ausgebildete Verlandungsvegetationsstrukturen (Röhricht, Großseggenried, Weidengebüsch, Erlen-Bruchwald) Beeinträchtigungen (Freizeitnutzung u. ä.) naturnaher Verlandungssaum	< 2 stark < 50 % der Uferlänge	C (schlecht)

Tab. 5.5: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 3150

Beispiel: LRT 6430 – feuchte Hochstaudenfluren der planaren und montanen bis alpinen Stufe

Auch für den LRT 6430 gilt, dass das Arteninventar eine ganz entscheidende Rolle für die Gesamtbewertung spielt, außerdem kommen diese LRT meist nur sehr kleinflächig vor, so dass der Einsatz der Fernerkundung von vornherein nur teilweise sinnvoll ist, dennoch können einige strukturelle Parameter und Beeinträchtigungen erfasst werden. Gefährdungsfaktoren sind v.a. ein Austrocknen des Standortes, eine angrenzende intensive landwirtschaftliche Nutzung und die fortschreitende Verbuschung.

In Abb. 5.8 ist eine Fläche des LRT 6430 dargestellt, die bereits stark beeinträchtigt ist durch Verbuschung und die außerdem einen hohen Anteil an Arten wie *Urtica dioica*, *Phalaris arundinacea* und *Phragmites australis* aufweist. Im mittleren Bereich sind noch vereinzelt die weißen Blütenstände von *Filipendula ulmaria* zu erkennen.



Abb. 5.8: Beispiel für eine Fläche des LRT 6430 in schlechtem Teilerhaltungszustand

Indikator	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen
Beeinträchtigungen (Verbuschung, Zerstörung der Vegetation, Austrocknung) Anteil Arten der Röhrichte und Arten der Gras- und Staudenfluren	gering < 20 %	A (sehr gut)
Beeinträchtigungen (Verbuschung, Zerstörung der Vegetation, Austrocknung) Anteil Arten der Röhrichte und Arten der Gras- und Staudenfluren	mittel 20 – 50 %	B (mittel)
Beeinträchtigungen (Verbuschung, Zerstörung der Vegetation, Austrocknung) Anteil Arten der Röhrichte und Arten der Gras- und Staudenfluren	stark 50 – 75 %	C (schlecht)

Tab. 5.6: Indikatorliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 6430

5.2 Objektmodell

Für die Erstellung des Objektmodells war ein iteratives Vorgehen notwendig, zuerst wurden Landbedeckungsklassen anhand des aktuellen brandenburgischen CIR-Interpretationsschlüssels eingeteilt, dann wurden, wenn notwendig, die relevanten Indikatoren ergänzt. Dieses erste Modell musste nach ausführlichen Spektralanalysen aller Testflächen (siehe Abschnitt 5.2.1.2) und unter Berücksichtigung der Diskriminanzanalyse (siehe Abschnitt 5.2.1.1) noch an einigen Stellen verfeinert bzw. wieder aggregiert werden.

Auf der obersten Hierarchieebene werden zwei Hauptgruppen unterschieden: gehölzbedeckte Bereiche und offene Bereiche. Die zweite Hierarchieebene in der offenen Hauptgruppe unterteilt sich weiter in versiegelte und unversiegelte Bereiche. Die unversiegelten Bereiche teilen sich in Hierarchieebene 3 in vegetationslose sowie mit Vegetation ausgestattete Flächen. In der vierten Hierarchieebene sind Objekte aufgelistet, die in den Testgebieten vorkommen und die mit Hilfe der Satellitenbilder abgegrenzt werden können. In Ebene 5 können bzw. müssen bei einigen Objekten noch weitere Unterteilungen getroffen

werden, da sich in den Analysen signifikante spektrale Unterschiede ergaben. Die Hierarchieebene 6 stellt keine eigentlichen Objekte mehr dar, sondern verkörpert die variable Anzahl an verschiedenen Teilobjekten (bzw. Signaturen), aus der die höhere Ebene zusammengesetzt ist. So kann zum Beispiel das Objekt „Schwimblatt“ aus vielen verschiedenen Teilobjekten bestehen: In der Bestandesmitte befindet sich kaum Wasser zwischen den Blättern, die Pixel beinhalten einen geringeren Anteil des Wassersignals und einen hohen Anteil des Signals der Schwimblattpflanzen, am Rand hingegen stehen die Pflanzen lockerer, und der Anteil des Wassers innerhalb eines Pixels erhöht sich. Es werden also mehrere Signaturen für die Klasse Schwimblatt benötigt. Diese werden mittels Clusterung erzeugt (vgl. Abschnitt 5.3.3).

Alle Objektklassen werden in Abschnitt 5.2.1.2 ausführlich erläutert, die Einführung von Zahlen in Ebene 5 (z.B. Röhrich 1) ist notwendig, weil nicht mit Sicherheit festzustellen ist, welche Haupteinflüsse das spektrale Verhalten bestimmen. Nicht nur die dominierende Pflanzenart, sondern auch die Dichte des Vegetationsbestandes, die Jahreszeit, die Art des Bodens und die Vitalität der Pflanzen spielen eine bedeutende Rolle. So bezeichnet z.B. „Röhrich 1“ von Röhrich bestandene Flächen, die sich sehr dunkel abzeichnen. Dies gilt für vor allem für Röhrich mit einer Dominanz von Arten wie Rohrkolben (z.B. *Typha latifolia*), aber auch für lockere Bestände anderer Arten mit einer hohen Bodenfeuchte bzw. offenen Wasserflächen dazwischen. Aus Gründen der einfacheren Wiedererkennung sind Beispiellarten in Klammern angegeben.

Hierarchieebene 1	Hierarchieebene 2	Hierarchieebene 3	Hierarchieebene 4	Hierarchieebene 5	Hierarchieebene 6	
offen	versiegelt		Metall- / Glasdach		Cluster 1 x	
			Ziegeldach / Tartan	besont	Cluster 1 x	
				beschattet	Cluster 1 x	
			bordeauxrote oder bemooste rote Dachziegel		Cluster 1 x	
			Beton		Cluster 1 x	
			graue Dachpappe / heller Asphalt		Cluster 1 x	
			dunkler Asphalt / Teerdach		Cluster 1 x	
		unversiegelt	mit Vegetation	Arten des Röhricht	Röhricht 1 (Typha)	Cluster 1 x
	Röhricht 2 (Glyceria)				Cluster 1 x	
	Röhricht 3 (Phragmites Wasser)				Cluster 1 x	
	Röhricht 4 (Phalaris)				Cluster 1 x	
	Röhricht 5 (Phragmites Land)				Cluster 1 x	
	Röhricht 6 (Carex nass)				Cluster 1 x	
	Röhricht 7 (Carex Streuwiese)				Cluster 1 x	
	Arten der Schwimmblattvegetation				Cluster 1 x	
	Arten der Wasserlinsen				Cluster 1 x	
	Arten des Sandtrockenrasens			kryptogamenarm 1	Cluster 1 x	
				kryptogamenarm 2	Cluster 1 x	
				kryptogamenreich 1	Cluster 1 x	
				kryptogamenreich 2	Cluster 1 x	
	Arten der Heide			trockene Zwergstrauchheide	Cluster 1 x	
				trockene Besenginsterheide	Cluster 1 x	
	Arten der Gras- und Staudenfluren			Gras- und Staudenfluren 1	Cluster 1 x	
				Gras- und Staudenfluren 2	Cluster 1 x	
				Gras- und Staudenfluren 3	Cluster 1 x	
	Acker			Mais	Cluster 1 x	
				Senf	Cluster 1 x	
Getreide				Cluster 1 x		
Arten der Ackerbrache				Cluster 1 x		
Getreide reif				Cluster 1 x		
Grünland	Grünland intensiv			Cluster 1 x		
	Arten der Frischwiesen (mesoph. Grünland)			Cluster 1 x		
	Grünland gemäht			Cluster 1 x		
Arten der feuchten Hochstauden				Cluster 1 x		
Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore		Cluster 1 x				
Arten der Feuchtwiesen		Cluster 1 x				
Arten der Flutrasen		Cluster 1 x				
Arten der Schlammfluren		Cluster 1 x				
	ohne Vegetation	Boden	Wasser	trüb	Cluster 1 x	
			klar	Cluster 1 x		
			Sand	Cluster 1 x		
			kiesiger Sand	Cluster 1 x		
			Ackerboden (humoser Sand)	Cluster 1 x		
			Ackerboden nass	Cluster 1 x		
		Acker Stoppel	Cluster 1 x			
Gehölz						

Tab. 5.7: Aufbau des hierarchischen Objektmodells für die Klassifizierung

5.2.1 Trennbarkeit der Objekte

Das Objektmodell wurde mit Hilfe von Diskriminanz- und Spektralanalysen verifiziert. Dadurch konnten aufwendige Anpassungen des Objektmodells während der Entwicklung des Klassifikationsverfahrens verhindert werden. Um festzustellen, ob sich einzelne Vegetationsklassen und Landbedeckungen überhaupt voneinander signifikant trennen lassen, wurden in allen Gebieten Testflächen mit möglichst reinen Vorkommen der jeweiligen Landbedeckung kartiert und mit den Bilddaten in Beziehung gesetzt. Leider stammen alle Satellitenbilder für die Testgebiete aus dem Hoch- oder Spätsommer, es standen keine Frühsommaraufnahmen zur Verfügung, so dass die Daten nur die Vegetationsperiode von Juli bis September widerspiegeln. Des Weiteren kamen einige Objekte nur in wenigen oder gar nur in einem Testgebiet vor (z.B. Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore), so dass keine repräsentative Auswahl dafür getroffen werden konnte. Trotzdem wurden diese Objekte mit aufgenommen, um ihre Abgrenzbarkeit von anderen Objekten in ihrem Testgebiet zu untersuchen. Insgesamt wurden 1263 Testflächen aufgenommen, die 45 verschiedene Objektklassen der offenen Bereiche repräsentieren. In Tab. A.2 im Anhang sind die einzelnen Objekte und die Anzahl ihrer Testflächen in den Testgebieten dargestellt. Grau unterlegt sind Objekte, für die nur in einem Gebiet Testflächen aufgenommen werden konnten, so dass keine weiteren Aussagen zur zeitlichen und räumlichen Variabilität möglich sind.

5.2.1.1 Diskriminanzanalyse

Für jede Testfläche wurden jeweils die Mittelwerte der in Tab. 5.8 aufgeführten Bildderivate berechnet und diese einer linearen Diskriminanzanalyse unterzogen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Es wurden keine a-priori Wahrscheinlichkeiten einbezogen, d.h. alle Klassen hatten die gleiche Gewichtung.

Bildderivat	Kommentar
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
R41	Ratio NIR/B
R31	Ratio R/B
R32	Ratio R/G
R42	Ratio NIR/G
3min1	Differenzbild R - B
2min1	Differenzbild G - B
4min3	Differenzbild NIR - R
3min2	Differenzbild R - G
4min2	Differenzbild NIR - G
4min1	Differenzbild NIR - B
STDEV11	Standardabweichung von R (11 x 11 Pixel)

Tab. 5.8: Für die Diskriminanzanalyse verwendete Bildderivate

Werden alle Testflächen aus allen Gebieten einer linearen Diskriminanzanalyse unterzogen, ergibt sich eine Diskriminanz von ca. 54 % (siehe Tab. 5.9). Betrachtet man nur die Objektklassen ohne Vegetation erhöht sich die Diskriminanz auf über 75 %, dies hat seine Ursache in der geringen spektralen Variabilität, die unbewachsene Oberflächen aufweisen. Werden die Gebiete einzeln berechnet, so ergibt sich eine durchschnittliche Diskriminanz von 87 %. Das bedeutet, dass ca. 12 % der Unterschiede in den Diskriminanzwerten auf atmosphärische Einflüsse zurückzuführen sind.

Ganz anders stellt sich die Situation bei Vegetationsklassen dar, hier beträgt die Diskriminanz bei allen Gebieten zusammen nur ca. 50%. Bei einzelner Berechnung ergeben sich etwas höhere Werte zwischen 69 und 79 % - die phänologisch bedingte Variabilität in den Hoch- und Spätsommermonaten trägt also zu ca. 12 % der Unterschiede bei, bei Einbeziehung von Frühsommaraufnahmen würde sich dies noch

wesentlich erhöhen. Die Unterteilung der Testgebiete nach Monaten (Juli, August, September) erbringt keinerlei Verbesserung der Klassenzuweisung, da die Witterungsbedingungen in den einzelnen Jahren sehr unterschiedlich sein können (2003 war ein sehr trockenes Jahr, während 2004 ungewöhnlich regenreich war).

Testgebiet	Diskriminanz in %		
	alle Objekte	alle Objekte ohne Vegetation	alle Objekte mit Vegetation
alle zusammen	54.1	75.3	50.1
Jüterbog	79.0	87.8	79.0
Lieberose	77.4	88.5	76.6
Potsdam	64.9	88.3	69.1
Schwedt	72.4	84.2	75.0

Tab. 5.9: Diskriminanzwerte der Testflächen

Die Diskriminanzanalyse legt nahe, dass sich vor allem die Objekte der offenen Bereiche ohne Vegetation problemlos allein mit Hilfe der spektralen Merkmale trennen lassen. Bei den offenen Bereichen mit Vegetation ist dies nur teilweise der Fall. Es ist nicht anzunehmen, dass eine Hinzunahme von weiteren abgeleiteten spektralen Merkmalen zu einer wesentlichen Verbesserung der Trennbarkeit führt, da der Satellit mit nur vier Spektralkanälen eingeschränkte Möglichkeiten der spektralen Unterscheidung bietet. Statt dessen ist die Einbeziehung von a-priori Wissen eine viel versprechende Lösung. Je ähnlicher sich die Signaturen werden, desto wichtiger sind Zusatzdaten sowie die topologischen und geometrischen Merkmale der Objekte. So gibt es z.B. einige Überschneidungen bei den Objekten „trockene Zwergstrauchheide“ und den Röhrichten, die sich sehr dunkel abbilden, die jedoch aufgrund ihrer unterschiedlichen naturräumlichen Ansprüche mit wissensbasierten Regeln ohne weiteres ausgeräumt werden können.

In Abb. 5.8 sind die Zuordnungsergebnisse der Diskriminanzanalyse aller Flächen mit Vegetation aus allen Testgebieten in einer Kreuztabelle als Konfusionsmatrix dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich einige Klassen allein aufgrund spektraler Merkmale sehr gut bestimmen lassen (z.B. Arten der Schwimmblattvegetation), es jedoch bei den meisten Klassen sehr viele Fehlzuordnungen gibt. Diese minimieren sich, betrachtet man alle Testgebiete einzeln – dennoch sind es immer dieselben Klassen, die sich überschneiden.

Die Klassen sind deshalb zusätzlich nach Charakter gruppiert, es gibt Klassen, die nur in eher feuchten Bereichen vorkommen, Klassen der Landwirtschaft, Klassen, die eine Nähe zu offenem Wasser brauchen, Klassen eher trockener Standorte und Klassen, die überall vorkommen können. Diese Darstellung soll verdeutlichen, dass es nur bei Überschneidungen innerhalb einer Gruppe oder mit überall vorkommenden Klassen zu Problemen mit der Klassifikation kommen kann. Alle anderen Überschneidungen können mit Hilfe des a-priori Wissens in Form der Zusatzdaten ausgeräumt werden.

In dunkelrot und lila sind Kästchen markiert, deren Klassen innerhalb gleicher Gruppen liegen und die sich überschneiden bzw. die mit den überall vorkommenden Klassen verwechselt werden können. Die Farbe violett bedeutet, dass diese Fehlzuweisungen mit geometrischen oder anderen Objektmerkmalen wissensbasiert ausgeräumt werden können. Die dunkelroten Kästchen markieren also die Klassen, deren Zuordnung weder mit spektralen noch mit wissensbasierten Merkmalen eindeutig möglich ist.

Bei einigen Klassen hat dies keine weiteren Auswirkungen auf die Bestimmung von FFH-relevanten Indikatoren, da z.B. die verschiedenen Röhrichtklassen am Ende wieder zu einer Klasse zusammengefasst werden. Als relevant stellen sich jedoch folgende Konflikte dar:

- Grünland, intensiv <-> Acker/Getreide
- Arten der feuchten Hochstauden <-> Röhricht 5 (Phragmites Land)
- Arten der Feuchtwiesen <-> Röhricht 4 (Phalaris)
- Arten der Halbtrockenrasen <-> Arten der Gras- und Staudenfluren 2
- Arten der Frischwiesen <-> Grünland, intensiv

Die Klasse „Arten der Halbtrockenrasen“ ist sehr problematisch, da in allen Testgebieten aus dem Spätsommer die Flächen bereits so stark vertrocknet waren, dass sie von anderen Arten der Gras- und Staudenfluren nicht mehr zu unterscheiden sind. In der Hochsommeraufnahme von Potsdam war zum Aufnahmezeitpunkt ein Großteil der Wiesen mit Halbtrockenrasenvorkommen bereits gemäht. Die Klasse musste deshalb aus dem Objektmodell entfernt werden (zusammengefasst unter Gras- und Staudenfluren) und sollte in besser geeigneten Bildaufnahmen untersucht werden.

Eine Erhöhung der Diskriminanz der verbleibenden Problemklassen könnte eventuell durch weitere Texturparameter erreicht werden. In mehreren Studien hat sich der Einsatz von Texturen allgemein und besonders von Texturen 2. Ordnung als hilfreich herausgestellt (u.a. IVITS-WASSER, 2004 und WEZYK et al., 2004). Es wurden deshalb die Focal Density (occurrence eines Grauwertes), die Focal Diversity (Anzahl verschiedener Grauwerte) und der co-occurrence Wert Homogeneity in je 3x3, 5x5 und 7x7 großen Filterfenstern für R und NIR berechnet. Eine Hinzunahme dieser Parameter führte nicht zur wesentlichen Erhöhung der Diskriminanzwerte. Auf eine Untersuchung weiterer spektraler und textueller Merkmale wurde deshalb verzichtet.

Stattdessen wird ein spezieller Klassifikationsansatz zur Lösung dieses Problems gewählt, dieser wird in Abschnitt 4.5.4 diskutiert.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Charakter						
Arten der feuchten Hochstauden	1	23	8	0	1	0	2	1	4	1	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	eher feucht					
Arten der Feuchtwiesen	2	39	1	1	1	0	7	1	0	4	0	4	0	3	1	0	0	13	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	eher feucht					
Arten der Flutrasen	3	13	0	0	11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher feucht					
Röhricht 1 (Typha)	4	6	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	eher feucht					
Röhricht 2 (Glyceria)	5	6	0	0	0	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher feucht				
Röhricht 4 (Phalaris)	6	12	1	0	1	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	eher feucht				
Röhricht 5 (Phragmites Land)	7	44	8	0	0	3	0	16	2	0	1	2	4	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	3	0	0	0	0	eher feucht				
Röhricht 6 (Carex feucht)	8	8	0	0	0	2	0	0	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	eher feucht			
Röhricht 7 (Streuwiesen Carex)	9	29	1	0	0	0	3	1	0	8	0	1	2	1	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	eher feucht			
Arten der Schlammbodenfluren	10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher feucht			
Arten der torfmoosd. Zwischenmoore	11	13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher feucht			
Acker/Getreide	12	22	0	0	0	1	0	0	1	0	3	0	0	0	2	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Landwirtschaft		
Acker/Mais	13	6	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Landwirtschaft		
Acker/Senf	14	6	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	Landwirtschaft		
Arten der Ackerbrache	15	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	Landwirtschaft		
Arten der Frischwiesen/-weiden	16	31	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	1	0	4	2	4	0	9	0	0	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	Landwirtschaft		
Getreide reif	17	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	5	1	4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Landwirtschaft	
Arten des Intensivgrünlandes	18	31	0	0	2	0	0	5	1	1	0	0	8	1	0	0	3	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Landwirtschaft	
Arten der Besenginsterheide	19	19	0	0	0	2	1	0	0	1	0	7	0	3	0	0	0	0	2	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher trocken	
Sandtrockenrasen kryptogamenarm 1	20	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher trocken	
Sandtrockenrasen kryptogamenarm 2	21	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher trocken	
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	22	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	7	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher trocken	
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	23	40	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher trocken
Arten der trock. Zwergstrauchheide	24	42	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher trocken
Arten des Halbtrockenrasens	25	30	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	11	5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	eher trocken	
Gras- u. Staudenflur 1 NDVI < 0.3	26	47	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	9	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	überall	
Gras- u. Staudenflur 2 NDVI > 0.3	27	35	0	1	0	1	0	0	1	2	2	0	1	0	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	überall	
Gras- u. Staudenflur 3 NDVI > 0.3	28	28	1	0	0	0	3	0	1	3	0	0	0	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	überall		
Röhricht 3 (Phragmites Wasser)	29	45	0	1	0	8	0	0	3	5	0	3	0	1	1	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Wasser	
Arten der Schwimmblattvegetation	30	32	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	26	0	0	0	0	0	Wasser		
Arten der Wasserlinsendecken	31	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	Wasser

Abb. 5.9: Konfusionsmatrix der Diskriminanzwerte für Klassen mit Vegetation (Einbeziehung aller Gebiete)

Aus der Diskriminanzanalyse wird auch ersichtlich, dass die Aufnahmen, die im Spätsommer gemacht wurden, eine höhere Trennbarkeit zeigen als die Hochsommeraufnahme. Dies hat seine Ursache darin, dass sich im Hochsommer die Vegetation auf dem Höhepunkt ihrer Vitalität befindet und aufgrund der starken Photosyntheseaktivität Unterschiede in den spektralen Merkmalen zwischen den Vegetationsklassen verwischen. Im Spätsommer erhöhen sich die Unterschiede wieder wegen der unterschiedlichen Stadien der Altersphase. Es ist wahrscheinlich, dass sich im Frühsommer die Diskriminanz im Vergleich zum Hochsommer ebenfalls erhöht aufgrund der unterschiedlichen Stadien des Austriebs.

In Tab. 5.10 sind die standardisierten Koeffizienten der 1. Diskriminanzfunktion für die verwendeten Bildderivate in der Reihenfolge ihres Einflusses aufgelistet. Sie spiegeln auch die Reihenfolge in allen weiteren Diskriminanzfunktionen wider. Es wird deutlich, dass vor allem die Differenzbilder wichtige Merkmale für die Klassifikation sind und darunter vor allem Derivate, die das NIR enthalten. Interessant ist aber auch, dass der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) nur eine untergeordnete Rolle für die Trennung der Klassen spielt. Selbst nach Entfernung aller Differenzbilder aus der Diskriminanzberechnung ergibt sich nur ein geringer Wert für den NDVI. Eine Erklärung für dieses Phänomen kann sein, dass sich die Klassen mit hohem NDVI stärker in der Reflexion im NIR als in der Absorption im R unterscheiden, so dass eine Normalisierung mit R eher zur Nivellierung als zur Betonung der Unterschiede führt.

Obwohl die wichtigsten Merkmale feststehen, werden dennoch alle in die Wissensbasis eingefügt, da die unwichtigeren bei der Trennung einiger Klassen doch eine große Rolle spielen, die mit einer allgemeinen Diskriminanzanalyse so nicht bewertet werden kann. Außerdem sind sie eventuell bei einer späteren Erweiterung wichtig für die Abgrenzung von Klassen, die jetzt noch nicht beschrieben sind.

Bildderivat	Standardisierte Koeffizienten der 1. Funktion
4min2	4,9591967
4min3	-3,39048786
3min1	-2,54892478
2min1	2,2146178
4min1	-1,92866786
3min2	1,20745644
R41	-0,0127163
NDVI	0,01092163
R42	0,0068931
R32	-0,00389392
R31	0,00351243
STEDV11	-0,00063664

Tab. 5.10: Standardisierte Koeffizienten der 1. Diskriminanzfunktion (für alle Klassen und alle Gebiete)

In Abb. 5.10 sind beispielhaft die Wertebereiche von „Arten der feuchten Hochstauden“ und „Röhricht 5 (Phragmites Land)“ im Differenzbild aus NIR und R (4min3) gezeigt. In die Wissensbasis für die Ableitung der Trainingsgebiete werden die 5. und 95. Perzentilen als Ober- und Untergrenze integriert.

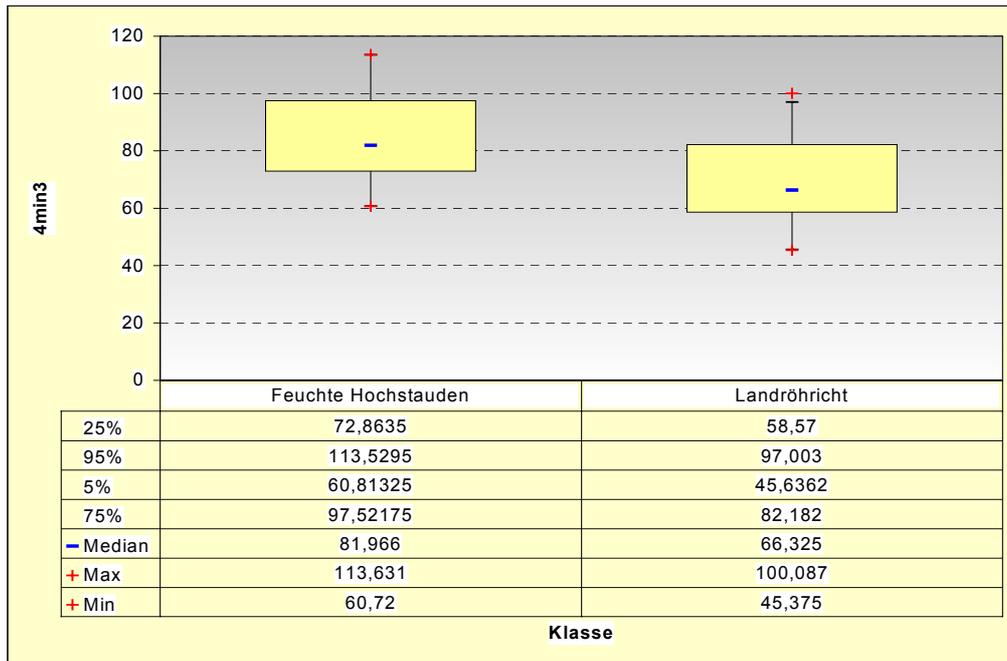


Abb. 5.10: Box-Plot der Wertebereiche zweier Objektklassen im Differenzbild 4min3

5.2.1.2 Spektralanalyse

Die Spektralanalyse dient nicht nur zur Analyse der Trennbarkeit von Klassen, sondern ebenfalls zur Auswahl geeigneter Regeln für die Wissensbasis. Dafür wurden aus den Trainingsflächen typische Signaturen der einzelnen Landbedeckungselemente erzeugt. Die in den Abbildungen Abb. 5.11 bis Abb. 5.14 gezeigten Kurven repräsentieren die Mittelwerte verschiedener Signaturen aller Testflächen. Für alle Objektklassen gilt, dass es sich bei den Grauwerten einzelner Pixel trotz der sehr hohen geometrischen Auflösung des Sensors um eine Mischung aus verschiedenen Einflüssen handelt. Bei Vegetationsklassen spielt nicht nur die Artenzusammensetzung der Vegetation an sich eine Rolle, auch die Dichte des Bestandes, die Phänologie, die Alterszusammensetzung, die vertikale Gliederung und die Vitalität beeinflussen das Abbildungsverhalten (vgl. HILDEBRANDT, 1996). Die Landnutzungsintensität und der Zeitpunkt der Ernte-, Mahd- oder sonstiger Pflegemaßnahmen sind ebenfalls wichtige Faktoren für die spektrale Signatur einer Objektklasse. Sobald der Boden sichtbar wird, beeinflusst er je nach Humus- und Wassergehalt ganz wesentlich die Reflexion.

Der Einstrahlungswinkel und eventuell vorhandenes Relief bzw. Objekte, die Schatten werfen, führen zu mehr oder weniger großflächigen Beleuchtungsunterschieden. Die Verwendung von Differenz- oder Ratiobildern nivelliert solche Unterschiede, kann sie jedoch nicht ganz ausräumen. Große Schattenbereiche werden deshalb, soweit es geht, identifiziert und gesondert behandelt. Kleinere Beleuchtungsunterschiede (z.B. in Baumkronen oder Röhrichtflächen) werden mit Hilfe der Clusterung (siehe Kapitel 5.3.3) als eigenständige Signaturen erfasst und nach der Klassifikation ihrer übergeordneten Hierarchiestufe zugeordnet.

Für eine bessere Übersicht werden die Signaturen der offenen vegetationsbedeckten Flächen noch weiter unterteilt in zwei Gruppen: Klassen mit geringem NDVI und Klassen mit hohem NDVI.

Da in dieser Arbeit Radianzwerte und keine Reflektanzwerte verwendet werden, stellen sich die Kurven anders dar als die typischen Kurven der Reflektanz (wie z.B. in Abb. 2.9). Die Verteilung der einzelnen Spektralkanäle und die verwendeten Abkürzungen B, G, R und NIR wurden bereits unter Kapitel 2.4.2.1 erläutert.

Offene versiegelte Flächen

Die spektralen Signaturen versiegelter Flächen sind sehr charakteristisch und verlaufen meist von B nach NIR stetig abfallend. Dunkle Flächen wie Teer oder dunkler Asphalt reflektieren kaum, auch in beschatteten Dachbereichen ist die Radianz sehr gering. Je heller die Oberflächen werden (z.B. graue Dachpappe oder Beton), desto höher wird die Radianz, der Kurvenverlauf selbst ändert sich nicht. Eine Ausnahme bilden besonnte Ziegeldächer/Tartanflächen, die aufgrund ihrer Farbe einen charakteristischen Anstieg von G nach R aufweisen, sowie Dächer mit dunkelroten Keramikziegeln oder einem Aufwuchs von Moos oder Algen. Letztere verursachen einen leichten Anstieg der Radianz von R nach NIR.

Metall- oder Glasflächen reflektieren sehr stark und fallen im Gegensatz zu Sand von B nach R leicht ab.

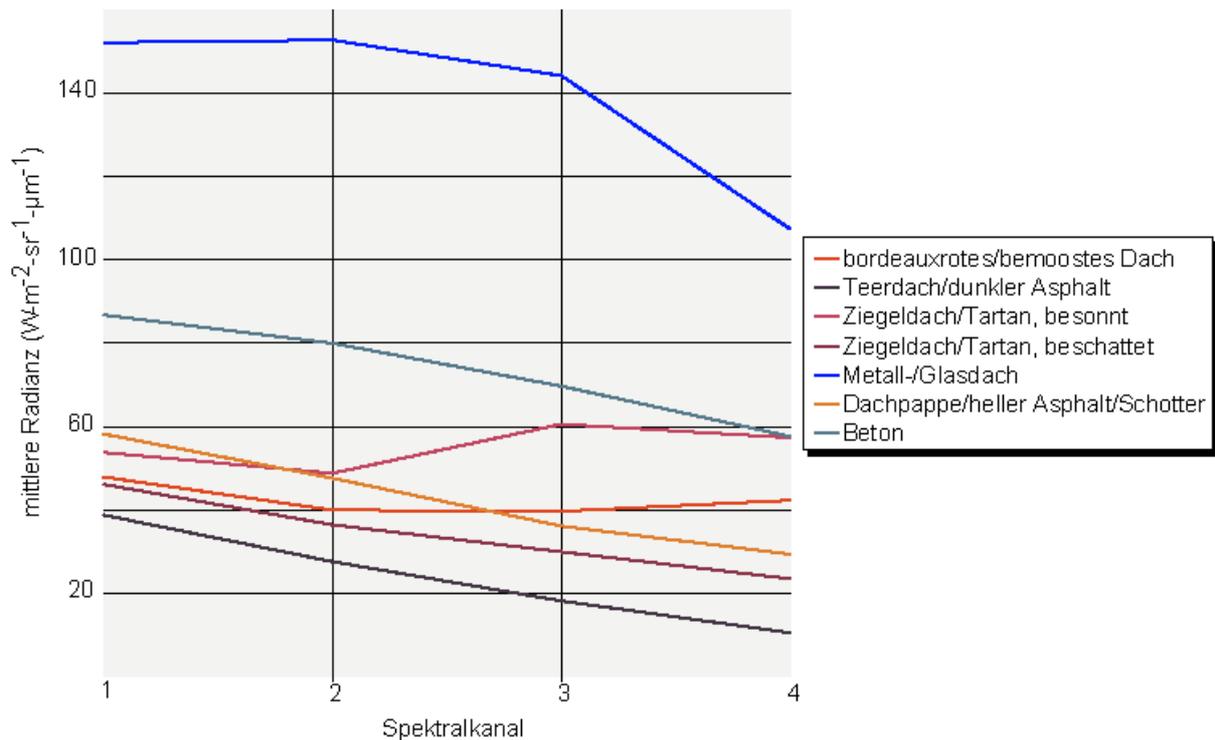


Abb. 5.11: Charakteristische Signaturen für verschiedene versiegelte Oberflächen

Offene unversiegelte Flächen ohne Vegetation

Die spektrale Signatur von Wasser wird vor allem von der Tiefe und von der Schwebstofffracht bedingt, in flachen Uferbereichen scheint das Bodensignal durch bzw. submerse Wasserpflanzen tragen zur Reflexion bei.

Sand- und kiesige Sandflächen reflektieren sehr stark, während Ackerböden aufgrund des höheren Humusanteils eine geringere Radianz haben. Diese ist auch abhängig vom Bodenwassergehalt, je feuchter der Boden ist, desto geringer ist die Radianz.

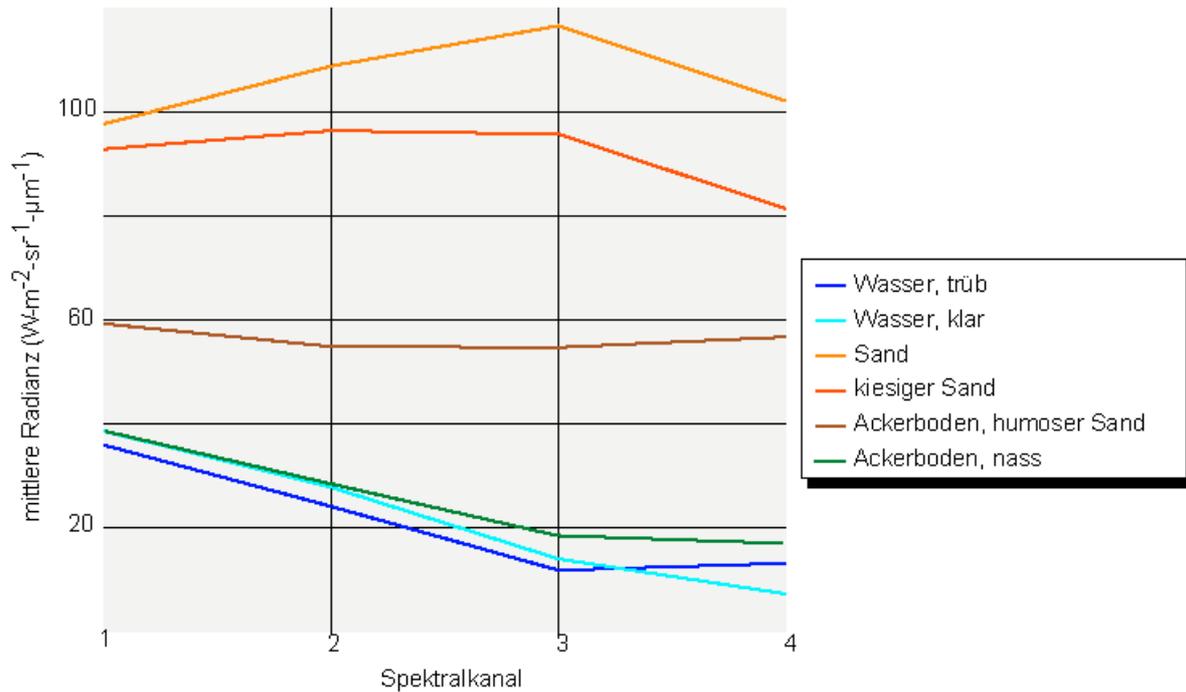


Abb. 5.12: Charakteristische Signaturen für verschiedene offene Oberflächen ohne Vegetation

Offene unversiegelte Flächen mit Vegetation (geringer NDVI)

Das typische Reflexionsverhalten grüner Pflanzen wurde bereits in Kapitel 2.4.3.1 erläutert.

Für die Klasse „Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens“ sind zwei Signaturen notwendig, da es Flächen gibt, die von Silbergras (*Corynephorus canescens*) oder stark vertrockneten Trockenrasenarten dominiert werden. Diese Bereiche haben aufgrund ihres geringen Gehalts an Blattpigmenten und aufgrund des großen Anteils am Bodensignal eine hohe Radianz im R und durch die kleinen Blattoorgane eine sehr geringe Radianz im NIR. Es können jedoch auch Flächen vorkommen mit einer Dominanz von Sandsegge (*Carex arenaria*) oder anderen chlorophyllreicheren Gräsern und Kräutern der Sandtrockenrasen (z.B. *Helichrysum arenarium*), die eine etwas stärkere Absorption im R und eine höhere Radianz im NIR aufweisen. In beiden Fällen hat das Bodensignal einen starken Anteil an der Signatur, da die Vegetation sehr locker wächst.

Für die Klasse „Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens“ müssen ebenfalls zwei Signaturen gebildet werden, da es stellenweise sehr alte vertrocknete moosdominierte Bereiche gibt, die sehr dunkel (fast schwarz) sind und kaum reflektieren („Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 2“). Ist dagegen grünes jüngeres Moos vorhanden, erhöht sich die Radianz entsprechend („Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 1“). Der Einfluss des Bodensignals nimmt bei diesen Klassen stark ab, da die Moose oder Flechten relativ dicht wachsen und den Boden ganz bedecken können.

Die „Arten der Zwergstrauchheide“ (z.B. *Calluna vulgaris*) haben dunkelgrüne schmale Blattoorgane und absorbieren relativ stark rotes Licht. Da sie jedoch trotzdem vergleichsweise größere und wasserreichere Blattoorgane besitzen, ist die Radianz im NIR etwas höher als z.B. bei trockenen Arten der Gras- und Staudenfluren. Die „Arten der Besenginsterheide“ (z.B. *Genista pilosa*) unterscheiden sich von Zwergstrauchheide vor allem im Ratio R durch B (R31), denn im R absorbieren diese Arten noch stärker. Das Bodensignal spielt hier keine Rolle.

Für „Arten der Gras- und Staudenfluren“ sind mehrere Signaturen notwendig, da es einerseits von ruderalen Gräsern wie z.B. Landreitgras (*Calamagrostis epigeios*) dominierte trockene Flächen bzw. stark vertrocknete Arten der Gras- und Staudenfluren geben kann, die aufgrund des geringen Chlorophyllanteiles im R nur schwach absorbieren und wegen der teilweise zerstörten Zellstruktur im NIR nur schwach reflektieren („Arten der Gras- und Staudenfluren 1“). Andererseits können von Stauden

dominierte Bereiche bzw. an frischeren Standorten vorzufindende grüne Gräser vorkommen, die eine höhere Absorption im R und eine höhere Radianz im NIR aufweisen (siehe nächster Abschnitt).

Reifes Getreide hat wenig Wasser und kaum noch Chlorophyll in den Blattorganen und reflektiert nur gering im NIR, jedoch stärker im R als grüne Pflanzen. Gemähtes Grünland hat im Gegensatz zu reifem Getreide eine etwas höhere Radianz im NIR und R, da sowohl der Boden durchscheint als auch die kurzen Blattorgane immer noch etwas grün sind.

Schatten mit geringer Vegetation ist insgesamt durch eine geringe Radianz in allen Kanälen gekennzeichnet, der Anstieg von R nach NIR ist gegenüber Schatten mit viel Vegetation flacher.

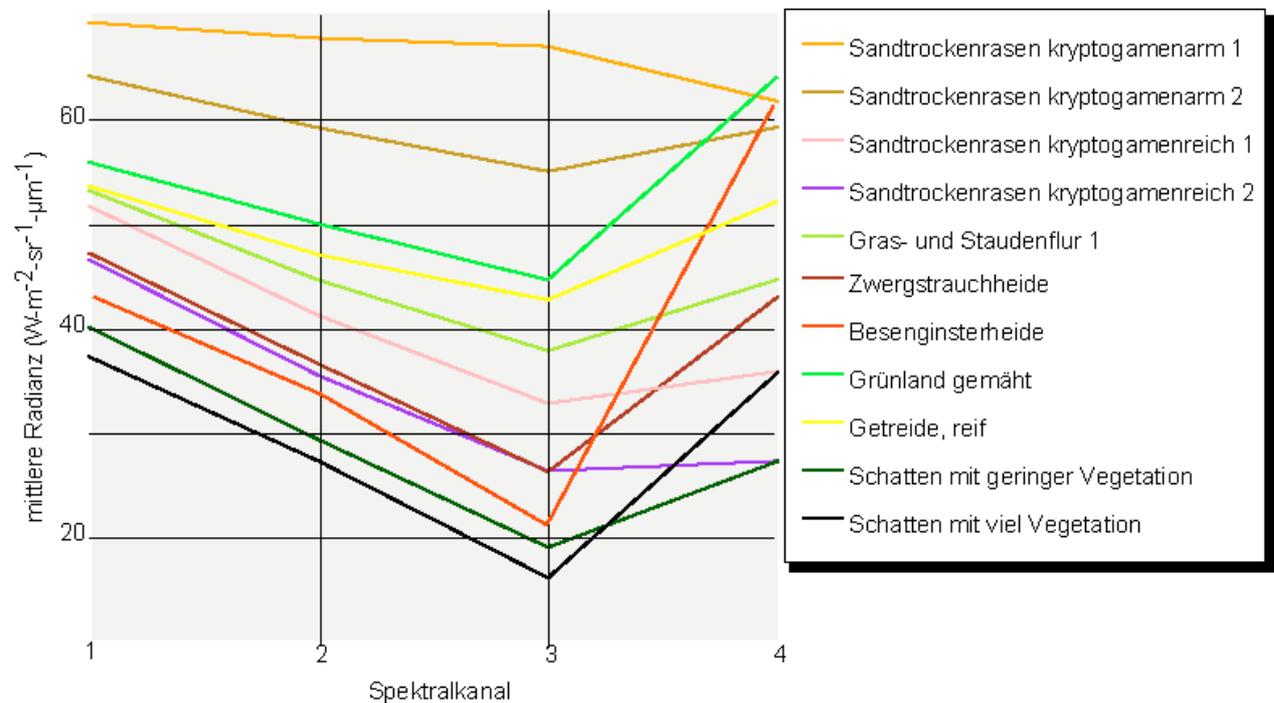


Abb. 5.13: Charakteristische Signaturen für verschiedene offene Oberflächen mit Vegetation (NDVI bis 0.3)

Offene unversiegelte Flächen mit Vegetation (hoher NDVI)

Die Signaturen von Objektklassen, die von Vegetation mit einem hohen Chlorophyllgehalt gebildet werden, unterscheiden sich auf den ersten Blick nur geringfügig. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse, dass eine Separierung teilweise allein aufgrund spektraler Merkmale möglich ist. Eine Darstellung aller Signaturen in der bisher gewählten Form ist jedoch wenig sinnvoll, da so kaum Unterschiede auszumachen sind. Deshalb werden die Signaturen beispielhaft für einige wasserabhängige Klassen im Feature Space dargestellt. Es wurde der Feature Space gewählt, der die maximale Separierung bietet.

Für Röhricht sind mehrere Signaturen notwendig, da sowohl die dominierende Pflanzenart als auch die Dichte des Vegetationsbestandes und die Bodenfeuchte eine bedeutende Rolle spielen. Für Röhricht (Röhricht 1) mit einer Dominanz von Arten wie Rohrkolben (z.B. *Typha latifolia*) oder für lockere Bestände mit einer hohen Bodenfeuchte bzw. offenen Wasserflächen dazwischen ergibt sich eine flachere Kurve als z.B. für dichtes Wasserschwadenröhricht (*Glyceria maxima*). Das bedeutet, dass im R eine höhere Absorption zu verzeichnen ist, während die Radianz im NIR geringer ausfällt. Röhricht (Röhricht 2), das von Arten wie Schilf (*Phragmites australis*) dominiert wird und lückig im Wasser bzw. auf feuchtem Boden steht, hat im Gegensatz zu Rohrkolbenröhricht eine noch geringere Radianz im NIR und eine höhere Radianz im R, da sich viele abgestorbene Pflanzenteile im Bestand befinden. Röhrichte (Röhricht 3) mit dominierenden Arten wie z.B. Wasserschwaden (*Glyceria maxima*) reflektieren im NIR stärker, es sind oft sehr dichte Bestände mit wenig sichtbaren Bodenanteilen. Flächen (Röhricht 4) mit einer

Dominanz von Arten wie Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) ähneln in ihrer spektralen Signatur eher Wiesen, da sie eine geringere Wuchshöhe und schmalere Blätter haben. Der hohe Chlorophyllanteil und das meist dichte Wachstum erzeugen eine sehr starke Absorption im R und eine hohe Radianz im NIR.

Von Großseggen (z.B. *Carex paniculata*) beherrschte Röhrichtbestände sind vorwiegend an zwei unterschiedlichen Standorten zu finden. Einmal sind dies stark wasserbeeinflusste Standorte (Röhricht 6), die sich durch einen hohen Anteil des Bodens bzw. des Wassers in der Signatur auszeichnen. Diese Bereiche sind sehr leicht mit anderen Röhrichtarten (Röhricht 2) zu verwechseln. Des Weiteren gibt es Großseggenbestände in Streuwiesen (Röhricht 7), die eine geringere Bodenfeuchte haben und oft sehr viel dichter mit Vegetation bestanden sind. Diese Flächen sind in ihrer spektralen Signatur den Feuchtwiesen sehr ähnlich.

Landröhricht (Röhricht 5), wie es auf Niedermoorstandorten vorkommt, wächst oft sehr dicht und zeichnet sich durch eine sehr hohe Radianz im NIR aus. Da der Boden und abgestorbene Bestandteile kaum sichtbar sind, ist auch die Absorption im R sehr hoch. Die Kurve von G nach R verläuft deshalb steiler.

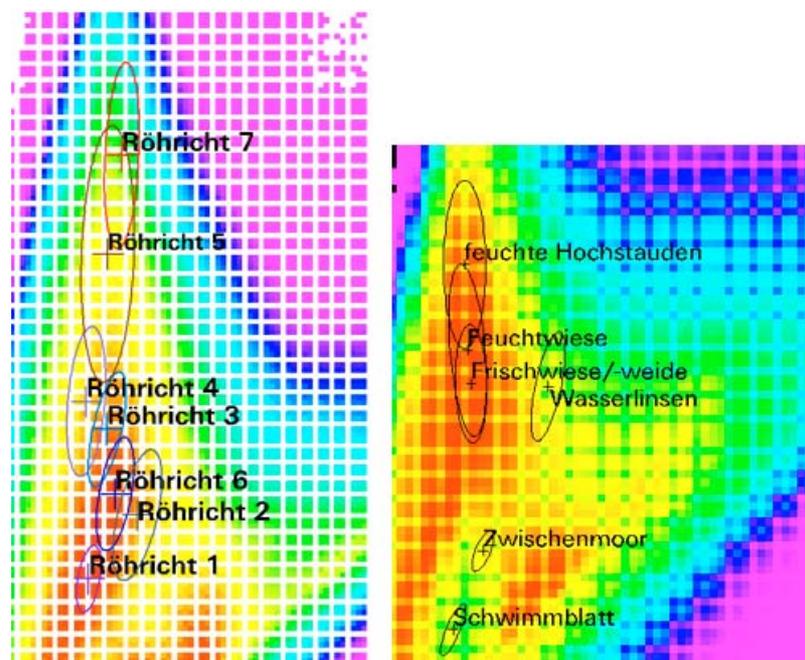


Abb. 5.14: Signaturplots ausgewählter wasserabhängiger Klassen im Feature Space der Kanäle R und NIR

Da die charakteristischen Pflanzenarten der feuchten Hochstauden im Vergleich zu Gräsern große Blätter haben und immer ausreichend Wasser zur Verfügung steht, ist die Radianz im NIR im Vergleich zu allen anderen Feuchtbiooptypen am höchsten. Im Gegensatz zu Intensivgrünland, das ebenfalls im NIR stark reflektiert, ist die Textur in diesen Bereichen viel höher.

Schwimmblattbestände haben eine sehr charakteristische Signatur, die großen dunklen Blätter sind meist von einem Wasserfilm bedeckt, und zwischen den Blättern befinden sich offene Wasserstellen. Die Kurve verläuft deshalb sehr flach, und die Radianz ist in allen Kanälen vergleichsweise gering.

Wasserlinsendecken reflektieren stark im NIR und haben im Gegensatz zu allen anderen Vegetationsklassen (außer Intensivacker/Senf) von B nach G eine sehr flache Kurve bzw. sogar einen leichten Anstieg.

Feuchtwiesen, Frischwiesen und intensiver genutztes Grünland unterscheiden sich nur geringfügig in den spektralen Signaturen. Frischwiesen haben einen geringeren NDVI als Intensivgrünland und Feuchtwiesen. Intensivgrünland reflektiert stärker im G und schwächer im R als Feuch- oder Frischwiesen.

In Abb. 5.14 ist eine starke Überlappung von Feuchtwiesen, Grünland, Röhricht und Hochstauden zu erkennen, die jedoch teilweise durch die wissensbasierte Nachbearbeitung mit topologischen, textuellen und geometrischen Merkmalen sowie mit a-priori Wissen in Form der alten Geobasisdaten ausgeräumt werden kann.

Torfmoosdominierte Zwischenmoore sind oft sehr kleinflächig und können aus einem Mosaik von Schwinggrasabschnitten und offenen Wasserstellen bestehen. Die Signaturkurve für die torfmoosdominierten Schwinggrasabschnitte verläuft eher flach, die Radianz ist sowohl im R als auch im NIR relativ gering.

Schlammfluren bilden sich auf zeitweilig trocken gefallen Gewässerböden, der Untergrund hat einen starken Einfluss auf die Signatur. Die Pflanzenarten wie z.B. Zweizahn (*Bidens tripartita*) haben einen hohen Chlorophyllanteil, sind jedoch relativ klein, die Flächen erscheinen deshalb in CIR-Darstellung leicht rosa mit einem dunklen Unterton und sind kaum texturiert. Auf seltener überfluteten Bereichen bildet sich Flutrasen heraus, der aus verschiedenen Gräsern und Kräutern zusammengesetzt ist und eine dichtere Vegetationsdecke mit einer höheren Radianz im NIR bildet.

Mais hat sehr große und dunkle Blätter, die im R stark absorbieren und im NIR geringer reflektieren als Getreidearten. Acker mit unreifen Getreidearten zeichnet sich durch einen sehr steilen Anstieg von R nach NIR aus, während die Radianz in G und R relativ gering ist. Senf oder ähnliche Ackerfrüchte, die oftmals zur Aufwertung des Ackerbodens untergepflügt werden (Stickstoffdüngung), haben eine charakteristische Signatur mit einer hohen Radianz in G und R und einem sehr flachen Kurvenverlauf von B nach G, der sogar leicht ansteigen kann.

Ackerbrachen zeichnen sich oft durch eine Vielzahl an Gräsern und Kräutern aus, die eine marmorierte Struktur in der CIR-Darstellung ergeben. Die Pflanzen stehen sehr locker und der meist trockene Boden scheint an vielen Stellen hindurch. Deshalb ist die Radianz im R höher als bei anderen Acker- oder Wiesenflächen (außer Senf). Für Arten der Gras- und Staudenfluren sind noch zwei weitere Signaturen notwendig, da es von grünen Gräsern dominierte Flächen geben kann, die eine geringere Textur aufweisen als Arten der Gras- und Staudenfluren, die von Stauden dominiert werden.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass es bei vielen Objektklassen mit hohem NDVI eine sehr starke Überlappung gibt (beispielhaft in Abb. 5.14 dargestellt). Eine Ursache dafür findet sich in der natürlichen Variabilität der Vegetation, die von so unterschiedlichen Einflussgrößen wie Klima, Phänologie und Standorteigenschaften bedingt wird. Des Weiteren ist die Begrenzung des Satelliten auf nur vier Spektralkanäle, die jeweils über einen relativ breiten Wellenlängenbereich integrieren, für eine Unterscheidung vieler Objektklassen nicht ausreichend. Gerade bei photosynthetisch sehr aktiven Pflanzen mit starker Absorption im R und hoher Radianz im NIR ist eine Klassifikation allein auf Basis spektraler Merkmale nicht erfolgreich. Die Einbeziehung von topologischen, textuellen und geometrischen Merkmalen sowie von a-priori Wissen ist daher notwendig.

5.3 Klassifikationsverfahren

Nachdem das Klassifikationsverfahren in Kapitel 3 (Grobkonzept) bereits schematisch im Überblick dargestellt wurde (vgl. Abb. 3.2), soll es in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter und anhand von Beispielen erläutert werden.

Das Klassifikationsverfahren teilt sich in drei Hauptkomponenten:

1. die wissensbasierte Ableitung von Trainingsgebieten und die nachfolgende Clusterung von Signaturen
2. die hierarchische Maximum Likelihood Klassifikation und die wissensbasierte Nachbearbeitung von Fehlklassifikationen
3. die Aggregation von Biotoptypen, die nachfolgende visuelle Kontrolle der Flächengrenzen und der Klassifikationsergebnisse sowie die GIS-basierte Teilzustandsbewertung der LRT

Diese Komponenten laufen hierarchisch ab, d.h. zuerst werden die Objekte der Ebene 1 (offen oder Gehölz) erzeugt (vgl. Objektmodell in Tab. 5.7), dann folgen die Objekte der Ebene 2 (versiegelt oder unversiegelt) usw.

In Abb. 5.15 ist der erste Teil des Verfahrens schematisch dargestellt. Für Komponente 1 müssen zuallererst die Satellitenbilder vorstrukturiert werden, d.h. Bildderivate wie z.B. der NDVI oder Texturmaße werden abgeleitet. Diese gehen zusammen mit den a-priori Informationen direkt in Regeln der Wissensbasis ein, denn die automatische Ableitung der Trainingsgebiete basiert u.a. auf der Annahme, dass es sich bei den Fragestellungen des Monitorings nie um eine Neukartierung handeln wird, sondern um die Überwachung von bereits mehr oder weniger bekannten Objekten. Das heißt, dass es a-priori Wissen in Form von Geobasisdaten (z.B. BTNTK bzw. sonstige Zusatzdaten) gibt und dass ein Teil dieser Flächen unverändert geblieben ist. Das bedeutet, dass man in Flächen mit einer bestimmten Landnutzung mit viel größerer Wahrscheinlichkeit nach bestimmten Objekten suchen kann als in anderen (so ist es z.B. sehr wahrscheinlich, dass man innerhalb eines Polygons, das als See kartiert wurde, das Objekt Wasser findet). Die Integration dieser Zusatzdaten dient damit der Reduktion des Suchraums und der Steigerung der Zuverlässigkeit (vgl. SCHIEWE, 2003).

Mit dieser Annahme können Trainingsgebiete und spektrale Signaturen mit geeigneten statistischen Verfahren aus den alten Daten automatisch extrahiert werden. Dazu bedarf es jedoch einer Wissensbasis, die mit Hilfe allgemeingültiger Regeln fehlerhafte und veränderte Flächen ausschließt und die notwendige Anzahl verschiedener Signaturen bildet, da Biotoptypen aus vielen verschiedenen einzelnen Vegetationstypen zusammengesetzt sein können. So kann zum Beispiel im Biotoptyp „trockene Zwergstrauchheide“ nicht nur Heide vorkommen, sondern auch Trockenrasen, offene Sandflächen, Gehölze und nitrophile Grasfluren. In der Wissensbasis sind allgemeine Regeln definiert, die eine Unterteilung der Flächen in diese einzelnen Bestandteile erlauben und die sowohl zur automatischen Ableitung von Trainingsgebieten als auch zur Nachbearbeitung fehlerhafter Klassifikationsergebnisse dienen (vgl. 5.3.2).

Nach der wissensbasierten Generierung von Trainingsgebieten werden durch Clusterung normalverteilte und homogene Signaturen für die Maximum Likelihood Klassifikation erzeugt (vgl. Kapitel 5.3.3).

Teil 2 des Verfahrens ist in Abb. 5.16 dargestellt. Nach der Erzeugung der Signaturen wird das Satellitenbild mit dem Maximum Likelihood Algorithmus überwacht klassifiziert. Nach der Klassifikation werden die einzelnen Clusterklassen zu Objekten aggregiert, um Objektmerkmale berechnen zu können (z.B. Größe des Objektes, nordwestlicher Nachbar usw.). Diese Objektmerkmale sind wichtig für die wissensbasierte Nachbearbeitung von Fehlklassifikationen, die bei spektral sehr ähnlichen Objektklassen vorkommen können (vgl. 5.3.4). In die Regeln für diese Nachbearbeitung gehen wiederum die Bildderivate aus der Vorstrukturierung (v.a. Texturmaße) und die a-priori Informationen (BTNTK) ein.

Teil 3 des Verfahrens ist in Abb. 5.17 dargestellt. Nachdem das fehlerbereinigte Klassifikationsergebnis feststeht, können die einzelnen Objektklassen zu Indikatoren zusammengefasst werden (z.B. alle Röhrichtklassen zu einer Röhrichtklasse). Die Flächengrenzen der alten Biotoptypenkartierung bzw. der Ersterfassung der LRT werden mit den Indikatoren verknüpft, um mit Hilfe einer Wissensbasis vorläufige Biotoptypen zu aggregieren (vgl. 5.4).

Die Flächengrenzen und die aggregierten Biotoptypencodes müssen danach auf Grundlage des Satellitenbildes und der Klassifikationsergebnisse visuell überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Dabei müssen gleichzeitig die Klassifikationsergebnisse auf ihre Genauigkeit bzw. auf Anomalien oder Besonderheiten geprüft werden. Auch einige Beeinträchtigungen für die Teilzustandsbewertung können nur visuell erfasst werden (z.B. Badestellen).

Nach der Kontrolle können die Flächen im GIS mit den Indikatoren verknüpft werden, und die endgültige Teilzustandsbewertung erfolgt auf Basis eines Regelwerkes automatisch.

Als Ergebnis liegen aktualisierte flächenhafte Biotoptypenkarten vor, in denen jeder Offenland-LRT eine Teilzustandsbewertung besitzt. Zusätzlich ist eine Indikatorkarte im Rasterformat verfügbar.

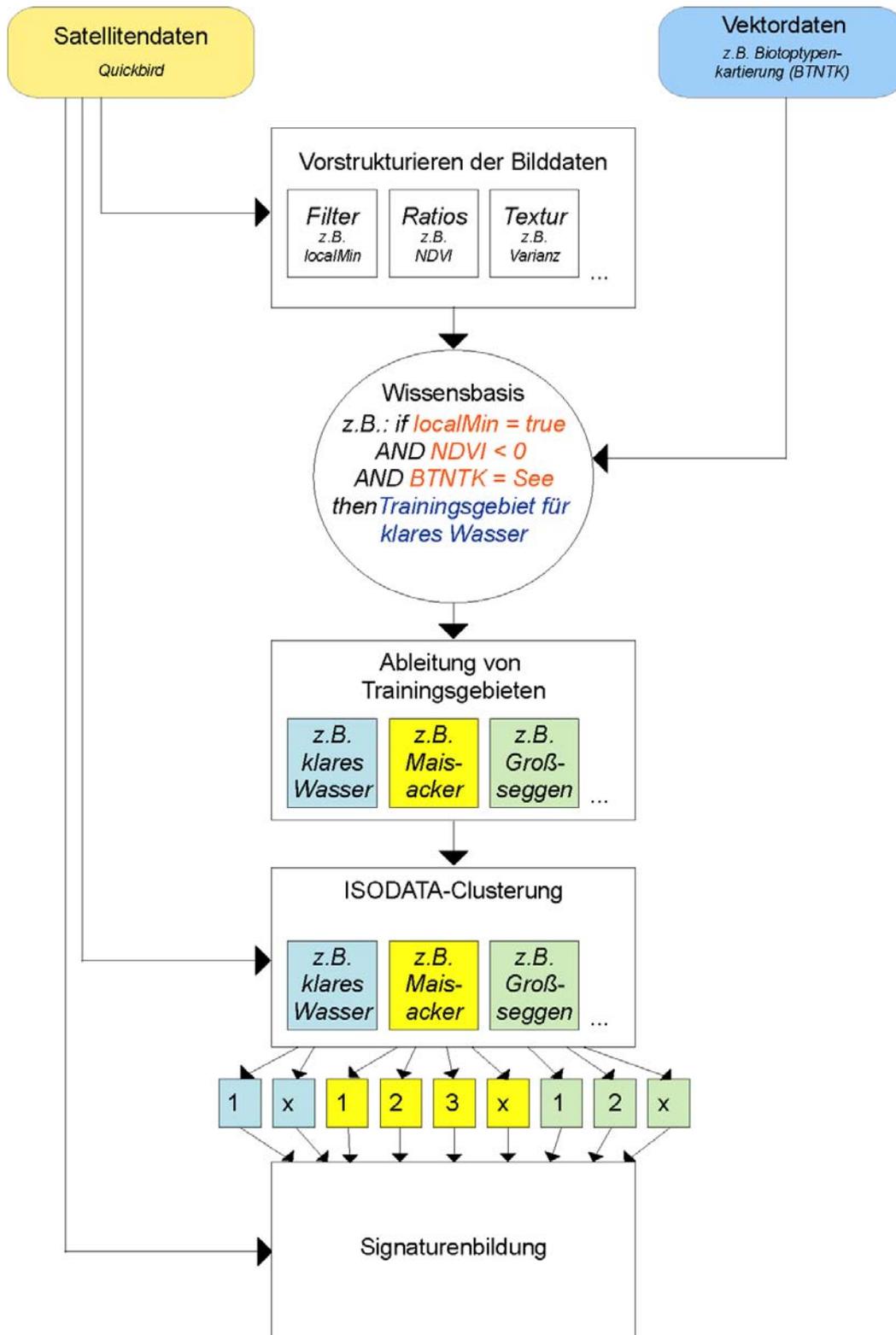


Abb. 5.15: Erster Teil des Verfahrensablaufes: wissensbasierte Ableitung von Trainingsgebieten und Signaturen

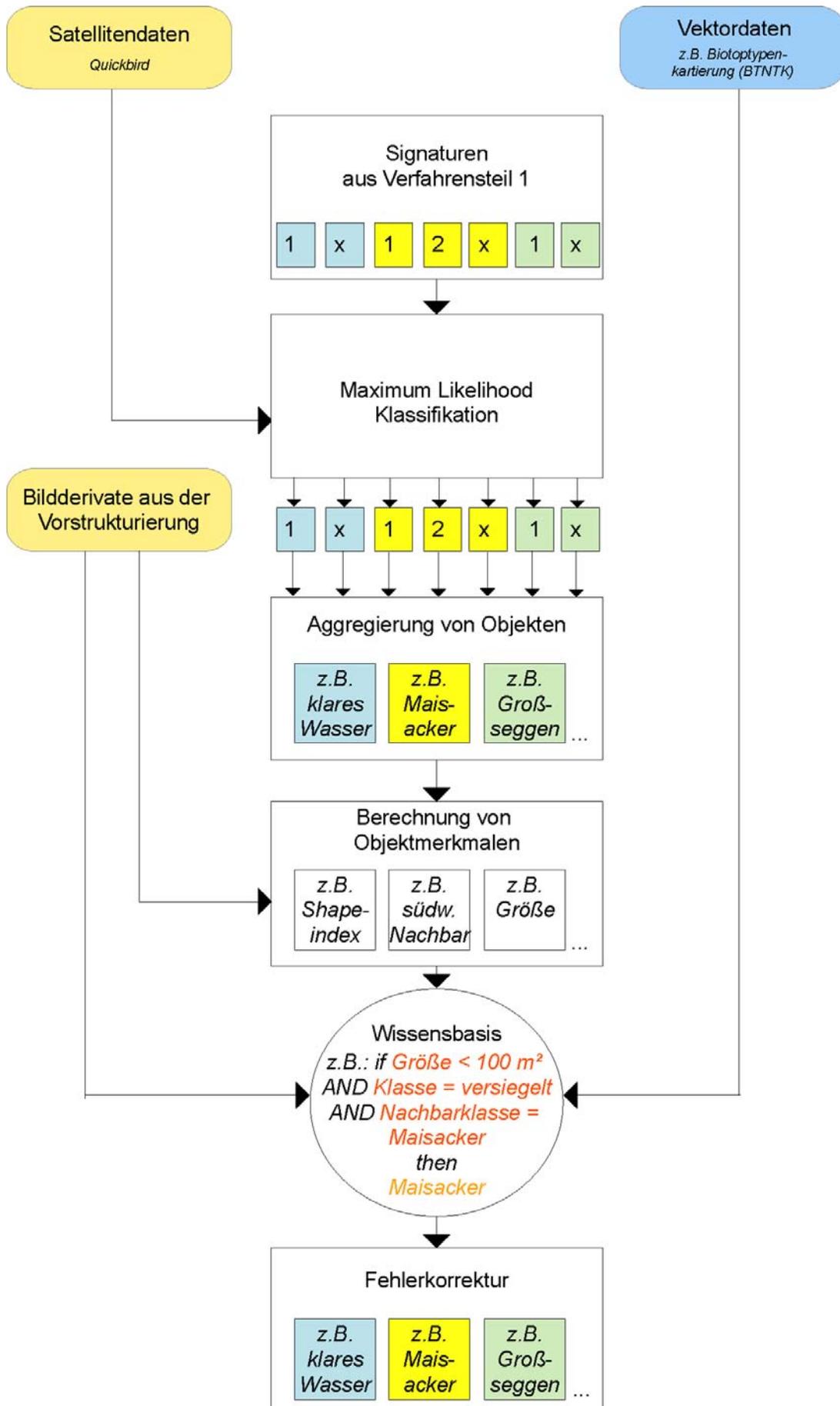


Abb. 5.16: Zweiter Teil des Verfahrensablaufes: überwachte Klassifikation und wissensbasierte Nachbearbeitung

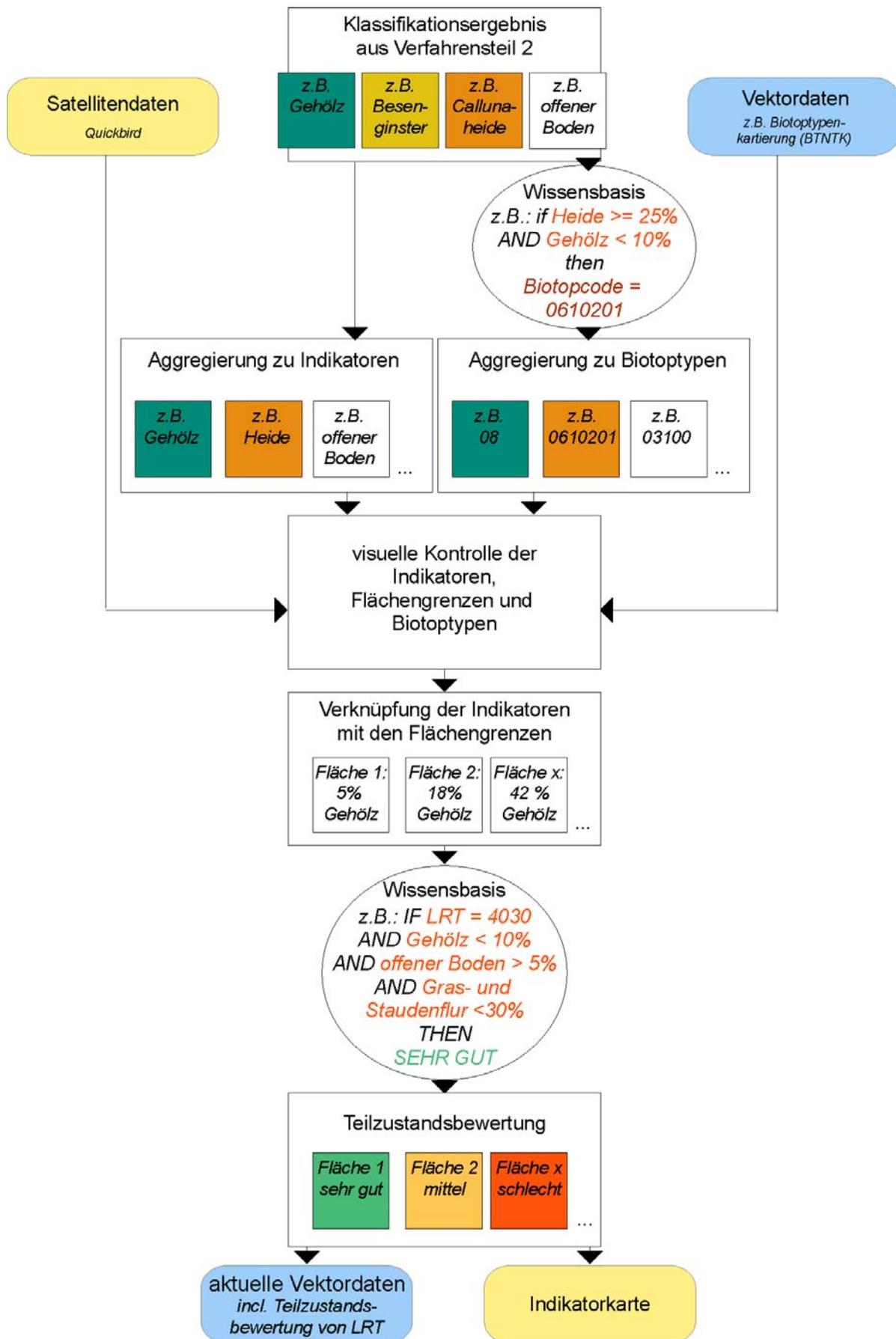


Abb. 5.17: Dritter Teil des Verfahrensablaufes: Aggregation von Biotypen, visuelle Kontrolle und GIS-basierte Teilzustandsbewertung

5.3.1 Vorstrukturierung der Bilddaten

Als wichtigen Input für die Wissensbasis müssen Bildderivate erzeugt werden, welche die Satellitenbilder in thematisch sinnvolle Bereiche gruppieren. Folgende Bildderivate gehen als Parameter in die Wissensbasis ein:

Bildderivat	Kommentar
LokMin	Lokales Minimum des panchromatischen Bildes
TextPAN	Textur des panchromatischen Bildes
TextMS	Textur des multispektralen Bildes (Kanäle B, G und R)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
R41	Ratio NIR/B
R31	Ratio R/B
R32	Ratio R/G
R42	Ratio NIR/G
R21	Ratio G/B
SNR	Morphologiefilter
3min1	Differenzbild R - B
2min1	Differenzbild G - B
4min3	Differenzbild NIR - R
3min2	Differenzbild R - G
4min2	Differenzbild NIR - G
4min1	Differenzbild NIR - B
MaxR	Helle Flächen im R
STDEV11	Standardabweichung von R

Tab. 5.11: In der Wissensbasis verwendete Bildderivate

Lokale Minima (LokMin)

Die extrem dunklen Bereiche des panchromatischen Bildes sind entweder Schatten, Wasser, Moos oder Asphalt. Um diese Flächen lokalisieren und abgrenzen zu können, wird das panchromatische Bild mit Hilfe einer nicht normalisierten L5L5-Matrix (LAWS, 1980) gefiltert (siehe Formel 5.2), so dass lokale Minima hervorgehoben werden.

$$L5 = [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1] \quad (5.2)$$

Das Filterergebnis ist jedoch aufgrund des 5 x 5 Pixel großen Filterfensters leicht versetzt, da jedes Pixel in Abhängigkeit von seinen Nachbarn neu berechnet wird. Das bedeutet, dass helle am Rand von Schattenbereichen gelegene Pixel dunkler werden und umgekehrt. Um dies auszugleichen und ein pixelgenaues Bild der lokalen Minima zu erhalten, wird das gefilterte Bild unüberwacht mit dem ISODATA-Algorithmus in 3 Klassen getrennt. Die „dunkelste“ Klasse wird mit dem panchromatischen Bild verknüpft, um den globalen Mittelwert und die globale Standardabweichung darunter zu berechnen. Davon ausgehend wird alles dem Wert „Schatten“ (S_{pan}) zugeordnet, was unterhalb des globalen Mittelwertes addiert mit der zweifachen Standardabweichung liegt. Mit dieser Methode werden die „hellen“ nicht dem eigentlichen lokalen Minima zugehörigen Ränder, die durch den leichten Filterversatz entstehen, abgeschnitten.

$$S_{pan} = DN_{pan1} \leq \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DN_{pan1_i} + 2 \times \sqrt{V(DN_{pan1})} \right) \quad (5.3)$$

V bezeichnet die Varianz und DN_{pan1} den Grauwert des panchromatischen Pixels unter der untersten unüberwacht klassifizierten Klasse des L5L5-Bildes.



Abb. 5.18: Erzeugung einer Maske mit lokalen Minima (links: panchromatisches Satellitenbild, mitte: L5L5-gefiltertes Bild, rechts: extrahierte lokale Minima in rot, überlagert auf das panchromatische Bild)

Textur (TextPAN)

Texturmaße sind wichtige Parameter für die Klassifikation von Wald- und Siedlungsklassen. Für die Extraktion des Texturbildes (1. Ordnung) aus dem panchromatischen Satellitenbild wird eine mehrstufige Methode angewendet. Zuerst wird ein 3×3 Minimumfilter (Low Pass) und dann ein 7×7 Minimumfilter (Low Pass) berechnet. Beide Zwischenergebnisse werden vom panchromatischen Bild abgezogen. Die Differenzbilder werden jeweils unüberwacht mit dem ISODATA-Algorithmus in zwei Klassen getrennt. Am Ende werden beide Klassifikationsergebnisse in einem Bild zusammengeführt (siehe Abb. 5.19).

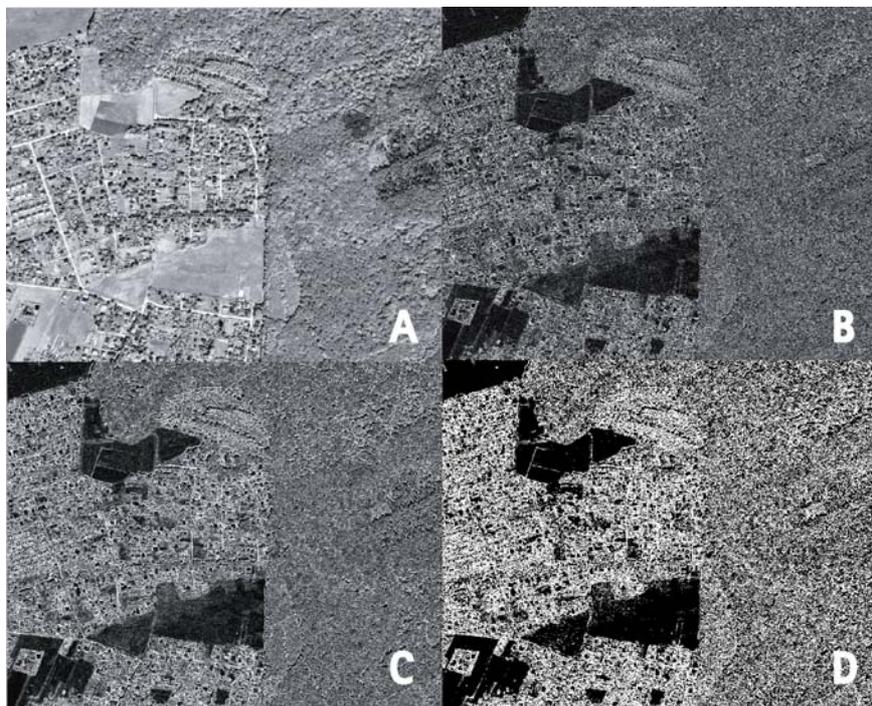


Abb. 5.19: Erzeugung des Texturbildes PAN (A: panchromatisches Satellitenbild, B: Differenz aus A und einem 3×3 Minimumfilter, C: Differenz aus A und einem 7×7 Minimumfilter, D: Endergebnis, weiße Flächen haben eine hohe Textur, schwarze Flächen haben keine Textur)

Textur (TextMS)

Für die Trennung verschiedener Siedlungsklassen (z.B. Kleingärten oder Blockbebauung) und Waldflächen sowie für die Trennung versiegelter Flächen von abgeernteten Ackerflächen ist die Texturinformation der ersten drei Kanäle des multispektralen Bildes von Vorteil, da die Varianz innerhalb vegetationsbestandener Flächen und innerhalb offener unversiegelter Flächen hier im Gegensatz zum panchromatischen Bild, das auch das NIR mit einbezieht, sehr gering ist. Dabei wird zuerst jeweils ein 3×3 Varianzfilter der Kanäle B, G und R berechnet, diese werden dann zusammengefasst und unüberwacht mit dem ISODATA-Algorithmus in drei Klassen getrennt (Bereiche mit geringer, mittlerer und hoher Textur). Letzteres Ergebnis wird dann noch einmal mit einem 5×5 Maximumfilter bearbeitet, um die Siedlungsgrenzen stärker hervorzuheben (siehe Abb. 5.20).

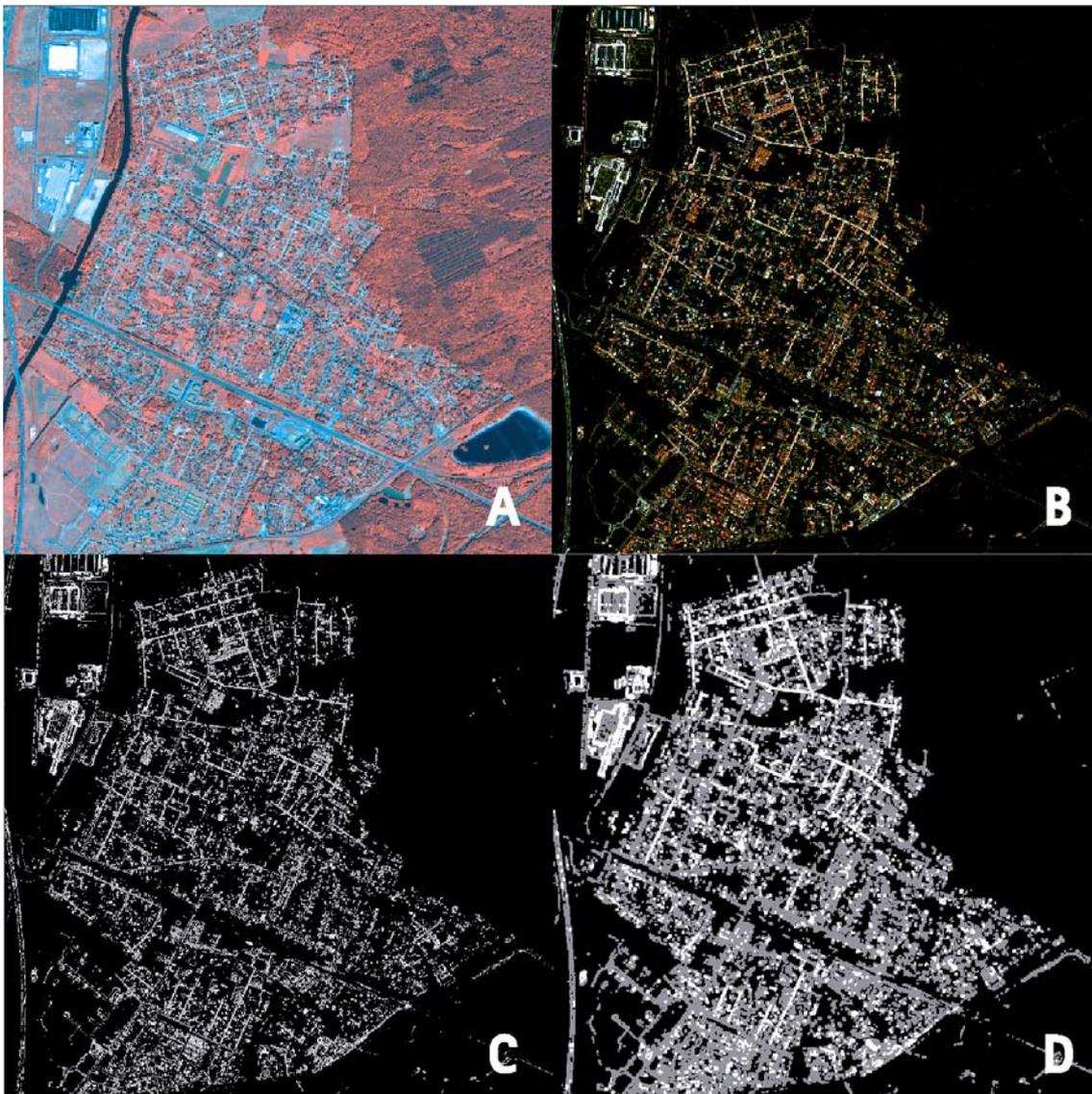


Abb. 5.20: Erzeugung des Texturbildes MS (A: multispektrales Satellitenbild, B: 3×3 Varianzfilter der Kanäle B, G und R; C: Ergebnis der unüberwachten Clustering in 3 Klassen, D: Ergebnis des 5×5 Maximumfilters, weiße Flächen haben eine sehr hohe Textur, graue Flächen eine mittlere Textur, schwarze Flächen haben keine Textur)

Vegetationsindizes

Für die Abtrennung von vegetationslosen Flächen und für die Unterscheidung verschiedener Vegetationsklassen ist der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) von großer Bedeutung.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5.4)$$

Weiterhin werden für die teilweise schwierige Trennung von Laubbäumen und vitalen Wiesenflächen zwei Indizes aus dem roten bzw. grünen Kanal mit dem blauen Kanal verwendet, da Laubbäume in diesen Spektralbereichen etwas geringer reflektieren als Wiesen.

$$R31 = \frac{R}{B} \quad (5.5)$$

$$R21 = \frac{G}{B} \quad (5.6)$$

Für die Unterscheidung verschiedener sehr vitaler Vegetationsklassen sind Indizes aus nahem Infrarot und grünem, roten oder blauem Kanal von Vorteil.

$$R41 = \frac{NIR}{B} \quad (5.7)$$

$$R42 = \frac{NIR}{G} \quad (5.8)$$

$$R32 = \frac{R}{G} \quad (5.9)$$

Morphologiefilter (SNR)

Für die Separierung von Laubbäumen und vitalen Wiesenbereichen kann es aufgrund der hohen Auflösung stellenweise schwierig sein, allein mit den spektralen Werten zu klassifizieren. Einzelne stark beleuchtete Pixel innerhalb der Baumkrone sind spektral nicht von vitalen Wiesenpixeln zu unterscheiden. Hier kann ein Morphologiefilter hilfreich sein, der die bei Laubbäumen vorhandene hohe Varianz innerhalb der Baumkrone unterdrückt.

Das grundlegende Prinzip bei der morphologischen Filterung ist die Verwendung eines strukturierenden Elements als Filterfenster, es kann sich hierbei um jede denkbare Form handeln (Kreis, Quadrat, Trapez usw.), die über das Bild hinweg bewegt wird (vgl. HABERÄCKER, 1995 und SCHOWENGERDT, 1997).

Für die Filterung von Bäumen bietet sich ein Filter mit abgerundeten Ecken an:

$$\begin{array}{cccc} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

Da der rote Kanal den signifikantesten Unterschied zwischen vitalen Wiesen und Laubbäumen birgt, wird dieser für die Filterung ausgewählt. Innerhalb des Filterfensters wird der Mittelwert (DN_R) durch die Standardabweichung dividiert (auch als Signal to Noise Ratio bei Hyperspektraldaten verwendet).

$$SNR = \frac{\overline{DN}_R}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (DN_{Ri} - \overline{DN}_R)^2}} \quad (5.10)$$

Differenzbilder

Für die Signaturbildung mit Hilfe der Wissensbasis kommen verschiedene Differenzbilder zum Einsatz, da das Verfahren übertragbar sein soll und deshalb keine absoluten Grauwerte in die Wissensbasis einfließen dürfen (Grauwerte können von Bild zu Bild extrem schwanken), sondern nur Differenzen der einzelnen Kanäle untereinander.

$$4min1 = NIR - B \quad (5.11)$$

$$4min2 = NIR - G \quad (5.12)$$

$$4min3 = NIR - R \quad (5.13)$$

$$3min1 = R - B \quad (5.14)$$

$$3min2 = R - G \quad (5.15)$$

$$2min1 = G - B \quad (5.16)$$

Maximum im R (MaxR)

Sehr helle Flächen wie z.B. Blechdächer oder Sand reflektieren u.a. stark im sichtbaren roten Licht (siehe Abschnitt 4.4). Als zusätzliche Information für die Wissensbasis wird deshalb der rote Kanal des pansharpened Satellitenbildes mit dem ISODATA-Algorithmus in drei Klassen getrennt (dunkle, mittlere und helle Bereiche).

STDEV11

Die Standardabweichung des roten Kanals ist eine wichtige Information für die Bewertung der Heterogenität von Vegetationsklassen in der Fläche. Besonders für die Unterscheidung von spektral oft sehr ähnlichen Klassen wie z.B. Röhricht und Wiesen ist dies ein gutes Hilfsmittel zur Separierung. Sie wird in einem 11 x 11 Pixel großen Filterfenster berechnet, weil sich diese Fenstergröße in mehreren Anwendungstests als optimal erwies. Da Textur ein multiskaliges Phänomen ist, ist die Filterfenstergröße von großer Bedeutung. Mehrere Studien zeigen, dass die Wahl der Fenstergröße einen großen Einfluss auf das Klassifikationsergebnis hat sowie erheblich von den gewünschten Klassen abhängt und nicht ohne Testreihen festgelegt werden kann (MOSKAL, 2002 und MOSKAL & FRANKLIN, 2001).

$$STDEV11 = \sqrt{V(DN_R)} \quad (5.17)$$

V bezeichnet die Varianz und DN_R den Grauwert des roten Kanals.

5.3.2 Aufbau der Wissensbasis für die automatische Ableitung von Trainingsgebieten

Ursprünglich war geplant, die Wissensbasis auf Grundlage der sehr genauen terrestrisch erhobenen Ersterfassungsdaten aufzubauen, da es sich um die Entwicklung eines Verfahrens für das Monitoring und nicht für die Ersterhebung handelt. Aufgrund der zögerlichen Umsetzung der FFH-Richtlinie (vgl. Kapitel 2.1.3.1) standen jedoch weder am Anfang des Projektes noch im Verlauf ausreichend Daten der Ersterfassung zur Verfügung, so dass eine Alternative gesucht werden musste. Die einzige flächendeckend verfügbare Datengrundlage ist in den neuen Bundesländern die BTNTK vom Anfang der 90er Jahre, ansonsten steht bundesweit der CORINE-Datensatz zur Verfügung. Die

Verfahrensentwicklung stützt sich auf die BTNTK, damit müssen allerdings auch einige Einschränkungen in der erreichbaren Klassentiefe und Genauigkeit hingenommen werden, da die BTNTK sehr alt ist und wesentlich ungenauer und weniger genau differenziert als die terrestrisch erhobenen Ersterfassungsdaten.

Nachfolgend sollen die Regeln, die mit Hilfe der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Grundlagen gebildet wurden, nach Hauptgruppen getrennt ausführlich erläutert werden.

Gehölzbedeckte Bereiche/Gehölzmaske

Abb. 5.21 zeigt an einem Ausschnitt die Bildung von Trainingsgebieten für die Extraktion der Gehölzmaske. Da die Trennung von Gehölzen und offenen Bereichen mit Hilfe einer überwachten Klassifikation (siehe Kapitel 5.3.4) ausschließlich auf Derivaten der Kanäle R und NIR beruht, sind nur vier verschiedene Signaturen notwendig. Die alten Biotoptypendaten (Mitte) werden nach dem CIR-Code zu Oberklassen aggregiert (Wald, offen, Siedlung) und in die Wissensbasis integriert. Es werden Trainingsgebiete für Wald und für offene Bereiche nach folgenden Regeln gebildet:

Wald 1: mittlerer NDVI und hohe Textur und BTNTK Wald

Wald 2: hoher NDVI und hohe Textur und BTNTK Wald

offen 1: geringer NDVI und geringe Textur und BTNTK offen

offen 2: mittlerer/hocher NDVI und geringe Textur und BTNTK offen

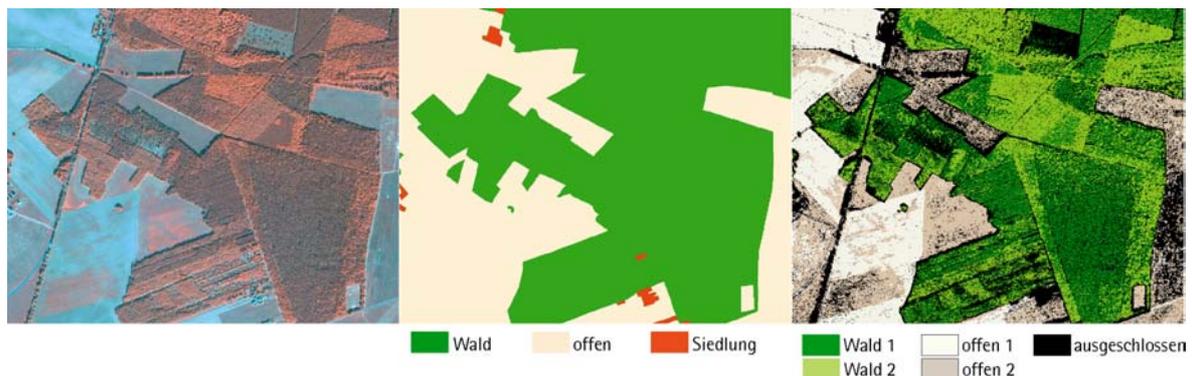


Abb. 5.21: Beispiel für die Extraktion von Trainingsgebieten für die Gehölzmaske (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpened, RGB=4,3,2; mitte: BTNTK von 1992/93; rechts: extrahierte Trainingsgebiete)

Offene versiegelte Flächen

Die Bildung von Trainingsgebieten für offene versiegelte Flächen ist wesentlich komplexer, da es eine größere Anzahl an verschiedenen Oberflächen und dazugehörigen Signaturen gibt. Die Regeln zur Unterscheidung der einzelnen Klassen beruhen vor allem auf den Differenz- und Ratiobildern. Es wird dabei versucht, die charakteristischen Kurvenverläufe der spektralen Signaturen nachzubilden sowie die in der Diskriminanzanalyse als bedeutsam ermittelten Bildderivate mit ihren jeweiligen Schwellenwerten für die einzelnen Objektmerkmale zu verwenden.

An dieser Stelle muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es weit mehr Klassen geben kann, als hier beschrieben, da nur die Oberflächen aufgenommen werden konnten, die auch in den Testgebieten vorkommen.

Für die meisten betrachteten Dachmaterialien ist es nicht notwendig, in beschattete und besonnte Bereiche zu unterscheiden. Nur bei Ziegeldächern sind die spektralen Unterschiede so groß, dass zwei Signaturen gebildet werden müssen. Der besseren Übersicht halber werden die einzelnen Klassen und die zugehörigen Regeln in Tabellenform dargestellt (Tab. 5.12).

Aufgrund der großen Unterschiede in den spektralen Signaturen genügen einige wenige Regeln, um die Klassen hinreichend zu beschreiben. So trifft die Hypothese „Metall-/Glasdach“ zu, wenn folgende Regeln erfüllt sind: In der alten Kartierung wurde eine Siedlungsfläche ermittelt; es sind sehr helle Pixel, deshalb ergibt die Clusterung des roten Kanals ein Maximum; die charakteristische Signatur (siehe Abb. 5.11) lässt sich dadurch beschreiben, dass die Kurve von B nach R und von G nach R sehr flach, von B nach NIR und R nach NIR jedoch sehr steil abfällt.

Die Hypothese, wonach zu kleine Trainingsgebiete sich wahrscheinlich als falsch erweisen (GANGKOFNER, 1996), dient ebenfalls dazu, fehlerhafte Bereiche auszuschließen. Dazu wird eine Aggregation der Trainingspixel mit vier Nachbarn durchgeführt, und zu kleine Gebiete werden (in Abhängigkeit von der natürlicherweise vorkommenden Ausdehnung ihrer Klasse) gelöscht. So beträgt z.B. die Mindestgröße von Trainingsgebieten für Dachmaterialien 50 Pixel (d.h. 18 m²), um unsichere Kleinstflächen auszuschließen.

Hypothese	Regeln
Metall-/Glasdach	BTNTK Siedlung, MaxR hoch, $3min2 < 0$, $3min1 < 5$, $4min1 < -25$, $4min3 < -25$, $R31 > 0.9$, $0.6 \leq R41 \leq 0.8$, Fläche > 50
Ziegeldach/Tartan besontt	BTNTK Siedlung, kein lokales Minimum, $3min2 > 0$, $2min1 < -1$, $-10 < 4min3 < 0$, $R31 > 0.9$, Fläche > 50
Ziegeldach/Tartan beschattet	BTNTK Siedlung, kein lokales Minimum, $3min2 > -8$, $-10 < 4min3 < 0$, $-20 < 3min1 \leq -10$, $0.6 \leq R31 < 0.7$, $0.4 \leq R41 \leq 0.6$, Fläche > 50
dunkler Asphalt, Teerdach	BTNTK Siedlung oder Verkehr, lokales Minimum, $NDVI \leq 0$, kein Baumschatten, $shapeindex < 2.5$, Fläche > 50 m ² , Fläche > 50
Beton	BTNTK Siedlung oder Verkehr, MaxR hoch, $4min3 < 0$, $4min1 \leq -15$, $3min1 \leq -5$, $3min2 \leq -5$, $2min1 \leq -3$, $0.7 \leq R31 < 0.9$, $0.5 \leq R41 < 0.8$, Fläche > 50
bordeauxrote bzw. bemooste rote Dachziegel	BTNTK Siedlung, kein lokales Minimum oder Maximum, $0 \leq 4min3 \leq 5$, $3min1 < 0$, $2min1 \leq -5$, $2 \leq 3min2 \leq 2$, $0.7 \leq R31 < 0.9$, Fläche > 50
graue Dachpappe, heller Asphalt	BTNTK Siedlung oder Verkehr, kein lokales Minimum oder Maximum, $-15 < 4min3 < 0$, $3min1 < -15$, $3min2 < -7$, $R31 < 0.7$, $0.3 \leq R41 < 0.6$, Fläche > 50

Tab. 5.12: In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für versiegelte Flächen

In Abb. 5.22 ist an einem Ausschnitt der Stadt Schwedt die aus der Wissensbasis resultierende Abgrenzung der Trainingsgebiete dargestellt.



Abb. 5.22: Beispiel für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die versiegelten Flächen (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpned, RGB=4,3,2, mitte: BTNTK von 1992/93, rechts: extrahierte Trainingsgebiete)

Offene unversiegelte Flächen ohne Vegetation

Es wird auch hier versucht, die charakteristischen Kurvenverläufe der spektralen Signaturen zu beschreiben und signifikante Schwellenwerte einzubeziehen.

Hypothese	Regeln
Wasser trüb	BTNTK Wasser, lokales Minimum, $0 < 4min3 < 10$, $R31 > 0.4$, Fläche > 1000
Wasser klar	BTNTK Wasser, lokales Minimum, $4min3 < 0$, Fläche > 1000
Sand	BTNTK offen, lokales Maximum, $3min1 > 5$, $3min2 < 15$, $-20 < 4min3 < 0$, $2min1 > 0$, Fläche > 1000
Kiesiger Sand	BTNTK offen, lokales Maximum, $NDVI < 0$, $0 > 3min1 < 10$, $3min2 > 0$, $2min1 > 0$, $0.9 < R41 < 1.2$, $50 < \text{Fläche} < 5000$
Ackerboden (humoser Sand)	BTNTK Landwirtschaft, lokales Maximum, TextMS gering, $3min1 < 5$, $-10 < 4min3 < 15$, $-10 < 2min1 < 0$, $-10 < 3min2 < 10$, $-15 < 4min1 < 15$, $-10 < 4min2 < 10$, $0.7 < R31 < 1.1$, $0.7 < R41 < 1.2$, Fläche > 300
Ackerboden nass	BTNTK Landwirtschaft, lokales Minimum, Fläche > 300

Tab. 5.13: In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für offene unversiegelte Flächen ohne Vegetation

Wasser wird in Bereichen gesucht, in denen die BTNTK Wasserflächen ausweist und in denen der lokale Minimumfilter eine dunkle Fläche ausgemacht hat. Um zu vermeiden, dass bei Lagefehlern der BTNTK Baumschatten mit in die Trainingsflächen aufgenommen werden, wird eine Mindestgröße von 1000 Pixeln (360 m²) festgelegt. Des Weiteren muss über das Differenzbild 4min3 eine Unterteilung in Wasserflächen mit Schwebfracht (oder mit durchscheinender Wasservegetation) und in klare tiefe Wasserbereiche getroffen werden.

Trainingsgebiete für Sand werden in allen offenen BTNTK-Flächen gesucht, in denen ein lokales Maximum des R vorhanden ist. Die Signaturkurve verläuft stetig steigend von B über G nach R und fällt dann steiler ab ins NIR.

Die Kurve für kiesige Sandflächen hat eine geringere bzw. gar keine Steigung von G nach R. Kiesiger Sand kommt außerdem nicht so großflächig vor, deshalb sind die Flächengrößen für die Trainingsgebiete kleiner gewählt.

Abgeernteter und gepflügter Ackerboden reflektiert in allen Kanälen stark, die Signaturkurve ist sehr flach. Trainingspixel werden nach diesem charakteristischen Kurvenverlauf in landwirtschaftlichen Flächen (BTNTK) und mit einer Mindestgröße von 300 Pixeln gesucht. Je feuchter der Boden wird, desto geringer ist die Reflexion. Trainingsflächen für nassen Ackerboden werden nach den bereits genannten Kriterien festgelegt, wenn es sich um ein lokales Minimum handelt.

In Abb. 5.23 ist an Ausschnitten von Schwedt (a) und Jüterbog (b) die aus der Wissensbasis resultierende Abgrenzung der Trainingsgebiete dargestellt.

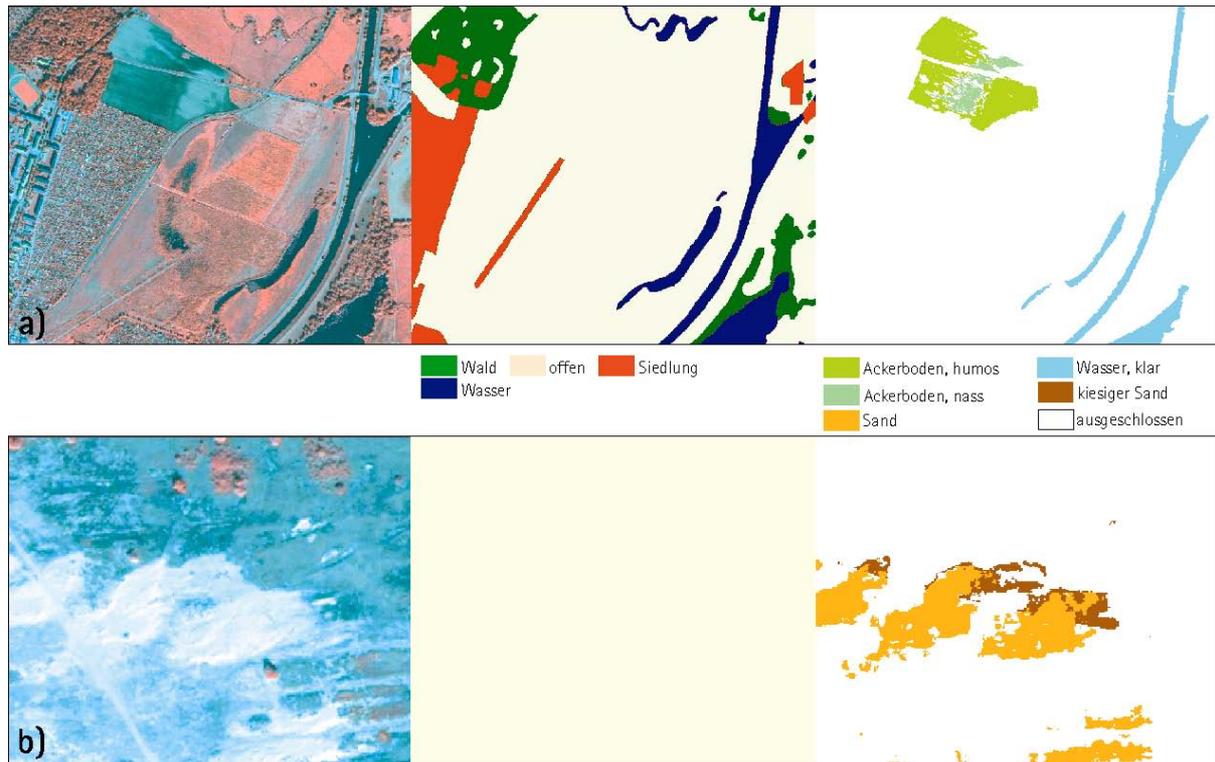


Abb. 5.23: Beispiele für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die offenen unversiegelten Flächen (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpenerd, RGB=4,3,2, mitte: BTNTK von 1992/93, rechts: extrahierte Trainingsgebiete)

Offene unversiegelte Flächen mit Vegetation (geringer NDVI)

Für die Festlegung von Trainingsgebieten für Flächen mit geringer bzw. chlorophyllarmer Vegetation reichen die charakteristischen Kurvenverläufe der spektralen Signaturen nicht mehr aus. Die signifikanten Schwellenwerte aller Bildderivate müssen einbezogen werden und die Differenzierung der BTNTK bzw. anderer Zusatzdaten muss tiefergehend genutzt werden. Des Weiteren wird formalisiertes Wissen einbezogen, wie z.B.:

- reifes Getreide erscheint gering texturiert

Hypothese	Regeln
Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens 1	BTNTK offen und trocken, NDVI < 0, $-10 < 3min1 < 10$, Schatten = 0, R31 > 0.7, Fläche > 200
Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens 2	BTNTK offen und trocken, NDVI > 0, $-25 < 3min1 < 0$, Schatten = 0, R31 > 0.7, Fläche > 200
Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 1	BTNTK offen und trocken, Baumschatten = FALSE, NDVI gering, $3min1 < -16$, $-5 < 4min3 < 5$, $0.5 < R31 < 0.7$, $0.6 < R41 < 0.8$, Fläche > 200
Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens 2	BTNTK offen und trocken, lokales Minimum, Baumschatten = FALSE, NDVI gering, $4min3 > -10$, R41 > 0.5, $100 < \text{Fläche} < 10000$
Arten der trockenen Zwergstrauchheide	BTNTK Heide, Gehölzmaske = 0, Schatten = 0, $10 < 4min3 < 70$, $3min1 < -15$, NDVI mittel, $0.45 < R31 < 0.6$, $2min1 < -5$, Fläche > 500
Arten der Besenginsterheide	BTNTK Heide, Gehölzmaske = 0, Schatten = 0, $25 < 4min3 < 70$, NDVI mittel, $0.4 < R31 < 0.45$, Fläche > 500
Arten der Gras- und Staudenfluren 1	BTNTK offen und trocken, $5 < 4min3 < 20$, NDVI gering, MsText gering/mittel, Gehölzmaske = 0, $-15 < 3min1 < -10$, Schatten = 0, $0.6 < R31 < 0.85$, Fläche > 300
Getreide reif	BTNTK Landwirtschaft, NDVI gering, Schatten = 0, MsText gering/mittel, $-15 < 3min1 < -5$, $-10 < 4min3 < 30$, $3min2 > -10$, $-15 < 4min1 < 20$, $-10 < 4min2 < 25$, $0.65 < R31 < 0.9$, $0.75 < R41 < 1.3$, Fläche > 5000
Grünland gemäht	BTNTK Landwirtschaft, NDVI gering/mittel, Schatten = 0, MsText gering/mittel, $-20 < 3min1 < -5$, $10 < 4min3 < 45$, $3min2 > -15$, $-5 < 4min1 < 30$, $4min2 < 35$, $0.6 < R31 < 0.9$, $0.75 < R41 < 1.5$, Fläche > 5000
Schatten mit geringer/ohne Vegetation	BTNTK nicht Siedlung oder Verkehr, nicht in der Nähe von Wasser, Baumschatten = TRUE, NDVI gering, shapeindex > 1.5, $20 < \text{Fläche} < 1000$
Schatten mit viel Vegetation	nicht in der Nähe von Wasser, NDVI mittel/hoch, $20 < \text{Fläche} < 1000$

Tab. 5.14: In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für offene unversiegelte Flächen mit Vegetation (NDVI < 0.3)

Die Mindestgröße für die Trainingsflächen von Sandtrockenrasen ist mit 200 Pixeln sehr klein gewählt, da Sandtrockenrasen oft eng verzahnt mit anderen Pflanzengesellschaften vorkommen und relativ kleinflächig sein können. Die sehr dunklen moosdominierten Flächen können leicht mit Baumschatten, Asphalt oder Wasser verwechselt werden, deshalb gibt es die einschränkenden Regeln in der Wissensbasis, dass es kein Baumschatten sein darf (da die Objektklasse Gehölz in einer höheren Hierarchieebene erzeugt wird, kann sie für diese Regeln bereits verwendet werden) und im Gegensatz zu Asphalt oder klarem Wasser immer noch eine leichte Erhöhung im NIR zu verzeichnen ist. Sehr große Flächen mit Moosdominanz kommen selten vor, deshalb gibt es eine Einschränkung in der Maximalgröße.

Für Zwergstrauchheide und Besenginsterheide werden Trainingspixel in Heideflächen der BTNTK mit mittlerem NDVI nach den charakteristischen Schwellenwerten gesucht, es dürfen keine Gehölze und keine Schattenflächen sein. Die Arten der Besenginsterheide (z.B. *Genista pilosa*) unterscheiden sich von Zwergstrauchheide vor allem im Ratio R31.

Trainingspixel für die Klasse „Arten der Gras- und Staudenfluren 1“ werden in offenen und trockenen Biotoptypen an Stellen gesucht, die einen geringen NDVI, einen mittleren bis hohen Wert im R31 und einen steilen Abfall von B nach R aufweisen.

Nach reifem Getreide und gemähtem Grünland wird nur in landwirtschaftlichen Flächen (BTNTK) mit wenig Textur gesucht. Die Trainingsflächen müssen ein ausreichend großes Gebiet einnehmen.

Schatten mit geringer bzw. ohne Vegetation sind leicht zu verwechseln mit Asphalt, Teerdächern oder Wasserflächen. Um eine Signaturverfälschung zu verhindern, wird nach Trainingsgebieten für Schattenflächen nur außerhalb von Siedlungsbereichen und nicht in der Nähe von Wasser gesucht. Die

Schatten werden ausschließlich von Bäumen (Baumschatten = TRUE) erzeugt und haben deshalb eine unregelmäßige (großer shapeindex) und eher kleine Fläche mit geringem NDVI.

Schatten mit viel Vegetation (z.B. Bäume im Unterstand) kann überall vorkommen, sollte jedoch nicht in der Nähe von Wasser gesucht werden, da die spektral ähnlichen untergetauchten Ränder von Schwimmblattbeständen die Signatur verfälschen können.

In Abb. 5.24 ist an einem Ausschnitt von Jüterbog die aus der Wissensbasis resultierende Abgrenzung der Trainingsgebiete dargestellt.

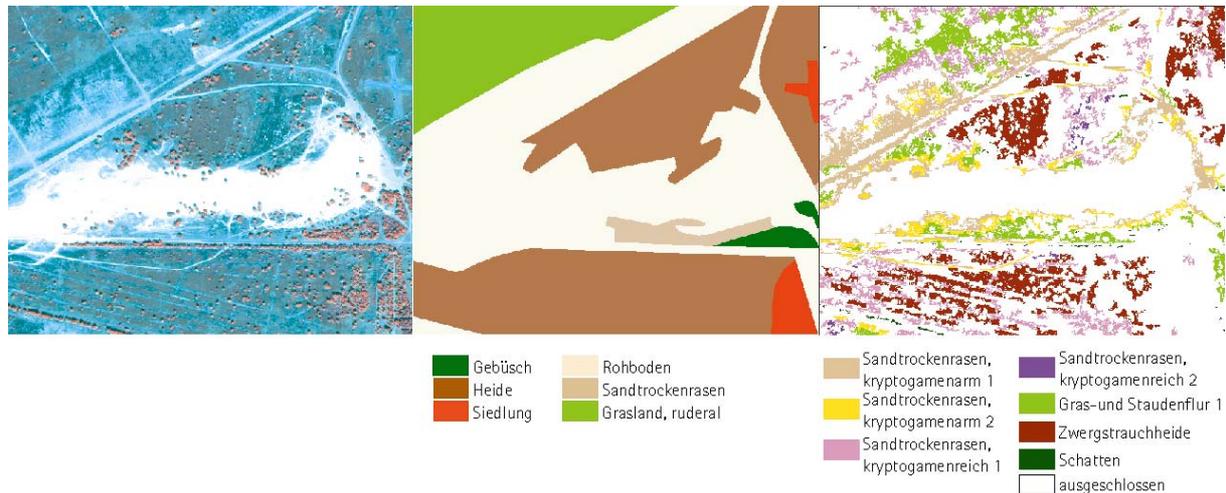


Abb. 5.24: Beispiel für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die offenen Flächen mit geringer Vegetation (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpener, RGB=4,3,2, mitte: BTNTK von 1992/93, rechts: extrahierte Trainingsgebiete)

Offene unversiegelte Flächen mit Vegetation (hoher NDVI)

Die Extraktion von Trainingsgebieten für vegetationsbestandene Bereiche mit einem hohem NDVI gestaltet sich ungleich schwieriger, da sich die Signaturen nur geringfügig unterscheiden und viel größeren Schwankungen innerhalb der Vegetationsperiode unterworfen sind als vegetationlose oder vegetationsarme Flächen. Auch die Witterungsbedingungen sind sehr einflussreich. Die einfache Beschreibung des Kurvenverlaufs reicht also in keinem Fall aus, um die notwendigen Trainingsgebiete zu determinieren.

Die signifikanten Schwellenwerte aller Bildderivate müssen in jedem Fall einbezogen und die Differenzierung der BTNTK bzw. anderer Zusatzdaten muss noch tiefergehend genutzt werden als bei Vegetation mit geringem NDVI. Soweit möglich wird auch hier formalisiertes Wissen einbezogen.

Hypothese	Regeln
Acker/Mais	BTNTK Acker, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, STDEV11 > 2.5, $0.45 < R31 < 0.6$, $35 < 4min1 < 45$, $40 < 4min2 < 60$, $-20 < 3min2 < -10$, $-10 < 2min1 < -5$, $50 < 4min3 < 70$, $1.5 < R41 < 2.5$, $0.5 < NDVI < 0.6$, $-25 < 3min1 < -20$, nicht in der Nähe von Wasser, Fläche > 500
Acker/Senf	BTNTK Acker, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, STDEV11 < 3.0, $0.7 < R31 < 0.85$, $25 < 4min1 < 50$, $25 < 4min2 < 45$, $-20 < 3min2 < -10$, $-5 < 2min1 < 5$, $35 < 4min3 < 65$, $1.5 < R41 < 2.0$, $0.3 < NDVI < 0.45$, $-15 < 3min1 < -10$, nicht in der Nähe von Wasser, Fläche > 500

Tab. 5.15: Fortsetzung nächste Seite

Hypothese	Regeln
Acker/Getreide	BTNTK Acker, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, STDEV11 < 2.5, 0.4 < R31 < 0.55, 30 < 4min1 < 100, 40 < 4min2 < 120, -20 < 3min2 < -10, -10 < 2min1 < 0, 4min3 > 50, R41 > 1.5, NDVI > 0.5, 3min1 < -20, nicht in der Nähe von Wasser, Fläche > 5000
Arten der Ackerbrache	BTNTK Landwirtschaft, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, STDEV11 > 1.5, 0.55 < R31 < 0.75, 0 < 4min1 < 30, 10 < 4min2 < 40, -15 < 3min2 < -5, -10 < 2min1 < -5, 20 < 4min3 < 50, 1.0 < R41 < 2.0, NDVI > 0.2, 3min1 < -20, nicht in der Nähe von Wasser, Fläche > 300
Arten des Intensivgrünlandes	BTNTK Grünland, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, 1.0 < STDEV11 > 2.5, 0.45 < R31 < 0.6, 40 < 4min1 < 90, 50 < 4min2 < 80, 3min2 < -15, -10 < 2min1 < -5, 60 < 4min3 < 110, 1.5 < R41 < 3.0, 0.55 < NDVI < 0.7, 3min1 < -20, nicht in der Nähe von Wasser, Fläche > 500
Röhricht 1 (Typha)	in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, 1.0 < STDEV11 < 2.5, 0.45 < R31 < 0.5, 0 < 4min1 < 15, 10 < 4min2 < 25, -15 < 3min2 < -10, -15 < 2min1 < -5, 25 < 4min3 < 35, 1.0 < R41 < 1.4, 0.35 < NDVI < 0.5, -25 < 3min1 < -20, Fläche > 50
Röhricht 2 (Phragmites Wasser)	BTNTK feucht oder in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, 1.0 < STDEV11 < 4, 0.5 < R31 < 0.6, 4min1 < 20, 0 < 4min2 < 30, -15 < 3min2 < -5, -15 < 2min1 < -5, 10 < 4min3 < 40, 0.8 < R41 < 1.5, 0.2 < NDVI < 0.5, -25 < 3min1 < -15, Fläche > 50
Röhricht 3 (Glyceria)	BTNTK feucht oder in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, 1.5 < STDEV11 < 2.5, 0.45 < R31 < 0.58, 15 < 4min1 < 40, 20 < 4min2 < 45, -15 < 3min2 < -10, -10 < 2min1 < -5, 35 < 4min3 < 55, 1.5 < R41 < 2.0, 0.45 < NDVI < 0.55, -20 < 3min1 < -15, Fläche > 50
Röhricht 4 (Phalaris)	BTNTK feucht oder in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, STDEV11 < 2.5, 0.45 < R31 < 0.55, 20 < 4min1 < 80, 20 < 4min2 < 85, -15 < 3min2 < -5, -10 < 2min1 < -5, 30 < 4min3 < 100, 1.5 < R41 < 3.0, 0.4 < NDVI < 0.75, -20 < 3min1 < -15, Fläche > 50
Röhricht 5 (Phragmites Land)	BTNTK feucht, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, 1.5 < STDEV11 < 4, 0.45 < R31 < 0.55, 20 < 4min1 < 75, 30 < 4min2 < 80, -20 < 3min2 < -10, -10 < 2min1 < -5, 45 < 4min3 < 100, 1.5 < R41 < 2.6, 0.5 < NDVI < 0.7, -25 < 3min1 < -15, Fläche > 50
Röhricht 6 (Großseggen feucht)	BTNTK feucht, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, 1.0 < STDEV11 < 3, 0.45 < R31 < 0.65, -5 < 4min1 < 25, 5 < 4min2 < 30, -15 < 3min2 < -5, 0 < 2min1 < -10, 15 < 4min3 < 25, 1.0 < R41 < 1.6, 0.2 < NDVI < 0.5, 3min1 < -15, Fläche > 50
Röhricht 7 (Streuwiesen)	BTNTK feucht, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, 1.0 < STDEV11 < 2, 0.5 < R31 < 0.55, 40 < 4min1 < 75, 50 < 4min2 < 80, -20 < 3min2 < -10, -10 < 2min1 < -5, 60 < 4min3 < 100, 1.5 < R41 < 3.0, 0.5 < NDVI < 0.7, 3min1 < -15, Fläche > 50
Arten der feuchten Hochstauden	BTNTK feuchte Hochstauden oder in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, STDEV11 > 1, 0.45 < R31 < 0.6, 4min1 > 35, 4min2 > 45, -20 < 3min2 < -10, -10 < 2min1 < 0, 4min3 > 60, 1.7 < R41 < 3.0, NDVI > 0.5, 3min1 < -15, Fläche > 50
Arten der Schwimmblattvegetation	BTNTK Wasser, Schatten = 0, STDEV11 > 1.8, 0.45 < R31 < 0.55, -5 < 4min1 < 25, 0 < 4min2 < 20, -20 < 3min2 < -10, -10 < 2min1 < 0, 15 < 4min3 > 45, 0.8 < R41 < 1.5, 0.25 < NDVI < 0.45, -25 < 3min1 < -20, Fläche > 50
Arten der Wasserlinsendecken	BTNTK Wasser, NDVI mittel/hoch, -10 < 2min1 < 10, 3min2 < -10, R31 > 0.7, Fläche > 50

Tab. 5.15: Fortsetzung nächste Seite

Hypothese	Regeln
Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore	BTNTK Moor, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, $0.5 < STDEV11 < 2.0$, $0.55 < R31 < 0.6$, $0 < 4min1 < 10$, $5 < 4min2 < 20$, $-15 < 3min2 < -5$, $-10 < 2min1 < -5$, $15 < 4min3 < 30$, $0.9 < R41 < 1.3$, $0.25 < NDVI < 0.35$, $-20 < 3min1 < -10$, Fläche > 50
Arten der Feuchtwiesen	BTNTK feucht, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, $1.0 < STDEV11 < 3.0$, $0.45 < R31 < 0.6$, $20 < 4min1 < 75$, $30 < 4min2 < 80$, $-20 < 3min2 < -10$, $-10 < 2min1 < 0$, $40 < 4min3 < 100$, $1.5 < R41 < 3.0$, $0.45 < NDVI < 0.7$, $-25 < 3min1 < -15$, Fläche > 100
Arten der Flutrasen	BTNTK feucht und in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, $1.0 < STDEV11 < 3.0$, $0.45 < R31 < 0.6$, $20 < 4min1 < 75$, $30 < 4min2 < 80$, $-20 < 3min2 < -10$, $-10 < 2min1 < 0$, $40 < 4min3 < 100$, $1.5 < R41 < 3.0$, $0.45 < NDVI < 0.7$, $-25 < 3min1 < -15$, Fläche > 50
Arten der Schlammfluren	BTNTK Wasser oder in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, $1.0 < STDEV11 < 2.0$, $0.5 < R31 < 0.55$, $5 < 4min1 < 60$, $15 < 4min2 < 60$, $-20 < 3min2 < -10$, $-15 < 2min1 < -10$, $25 < 4min3 < 75$, $1.0 < R41 < 2.5$, $0.35 < NDVI < 0.65$, $-20 < 3min1 < -15$, Fläche > 50
Arten der Frischwiesen/-weiden (mesophiles Grünland)	BTNTK Grünland, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, $1.0 < STDEV11 < 3.5$, $0.45 < R31 < 0.6$, $20 < 4min1 < 75$, $30 < 4min2 < 80$, $-20 < 3min2 < -10$, $-10 < 2min1 < 0$, $40 < 4min3 < 100$, $1.5 < R41 < 3.0$, $0.45 < NDVI < 0.7$, $-25 < 3min1 < -15$, Fläche > 500
Arten der Gras- und Staudenfluren 2 (Gras)	BTNTK offen, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, $STDEV11 > 1.5$, $0.55 < R31 < 0.65$, $10 < 4min1 < 70$, $20 < 4min2 < 70$, $-25 < 3min2 < -10$, $-10 < 2min1 < 0$, $30 < 4min3 < 90$, $1.0 < R41 < 2.5$, $0.35 < NDVI < 0.65$, $-20 < 3min1 < -10$, Fläche > 500
Arten der Gras- und Staudenfluren 3 (Stauden)	BTNTK offen, nicht in der Nähe von Wasser, Schatten = 0, Gehölzmaske = 0, $STDEV11 > 1.5$, $0.45 < R31 < 0.65$, $5 < 4min1 < 70$, $15 < 4min2 < 75$, $-20 < 3min2 < -10$, $-10 < 2min1 < 0$, $20 < 4min3 < 100$, $1.2 < R41 < 2.5$, $0.35 < NDVI < 0.65$, $-25 < 3min1 < -15$, Fläche > 200

Tab. 5.15: In der Wissensbasis verwendete Regeln für die Abgrenzung der Trainingsgebiete für offene unversiegelte Flächen mit Vegetation ($NDVI \geq 0.3$)

Für alle Ackerfrüchte und Ackerbrachen gilt, dass Trainingsgebiete in Ackerflächen der BTNTK gesucht werden. Klassen des Grünlandes werden in Grünlandflächen der BTNTK gesucht.

Maisacker ist aufgrund der breiten Reihenabstände stärker texturiert als z.B. Getreideacker. Da es Verwechslungen mit Röhricht geben kann, werden Trainingspixel nicht in der Nähe von Wasser gesucht. Die Mindestflächengröße ist kleiner als bei Getreideacker, da aufgrund der unregelmäßigeren Struktur nur selten sehr große zusammenhängende Flächen gebildet werden können.

Senf oder ähnliche Ackerfrüchte haben eine charakteristische Signatur mit einem sehr flachen, manchmal sogar steigenden Kurvenverlauf von B nach G. Aufgrund der breiten Pflanzstreifen ist die Textur der Flächen hoch. Um eine Verwechslung mit der sehr ähnlichen Signatur von Wasserlinsen zu vermeiden, wird nicht in der Nähe von Wasser gesucht.

Acker mit unreifen Getreidearten hat wenig texturierte und große zusammenhängende Oberflächen sowie einen sehr hohen NDVI.

Auf Ackerbrachen stehen die Pflanzen sehr locker und der meist trockene Boden scheint an vielen Stellen hindurch. Die Mindestflächengröße ist deshalb klein gewählt.

Trainingspixel für Röhricht werden allgemein nur in Flächen gesucht, die laut BTNTK als feuchte Biotoptypen ausgewiesen sind und die eine erhöhte Textur aufweisen, oder aber in der Nähe von Wasser.

Röhricht, das vorrangig nur an Gewässerrändern vorkommt, wie z.B. Rohrkolbenröhricht, wird in der Nähe zu Wasser gesucht ohne Berücksichtigung der BTNTK, da diese Röhrichtbestände oft sehr klein sind und nicht extra abgegrenzt werden. Auch die Mindestgrößen sind deshalb entsprechend niedrig gewählt.

Trainingspixel für feuchte Hochstauden werden in Flächen der BTNTK gesucht, die als feuchte Hochstauden kartiert wurden oder in der unmittelbaren Nähe zu Wasser.

Schwimmblattbestände haben eine sehr charakteristische Signatur. Trainingsflächen werden nach diesem Kurvenverlauf in Gewässerbiotoptypen gesucht.

Wasserlinsendecken haben im Gegensatz zu allen anderen Vegetationsklassen (außer Intensivacker/Senf) von B nach G eine sehr flache Kurve bzw. sogar einen leichten Anstieg. Einige wenige Regeln sind deshalb ausreichend. Die Trainingsflächen werden in Gewässerbiotoptypen gesucht.

Trainingspixel für die Klasse Feuchtwiesen werden nur in Feuchtbioptypen gesucht, während Frischwiesen und Intensivgrünland nur in landwirtschaftlichen Flächen und unter Berücksichtigung einer größeren Mindestgröße ausgewiesen werden.

Trainingsflächen für Schlammlfuren werden in Gewässerbiotoptypen gesucht. Trainingsflächen für Flutrassen werden in Feuchtbioptypen in der Nähe von Gewässern gesucht.

Trainingspixel für Zwischenmoor, die eine Mischung aus Torfmoosen und anderen Arten der Zwischenmoore darstellen, werden nur in Moorbiotoptypen der BTNTK gesucht.

Trainingspixel für Arten der Gras- und Staudenfluren werden in allen offenen Biotopen gesucht. Von Stauden dominierte Arten der Gras- und Staudenfluren werden nicht in der Nähe von Wasser gesucht, da sie sich sonst mit feuchten Hochstauden überlappen könnten.

In Abb. 5.25 ist an einem Ausschnitt von Potsdam die aus der Wissensbasis resultierende Abgrenzung der Trainingsgebiete dargestellt.

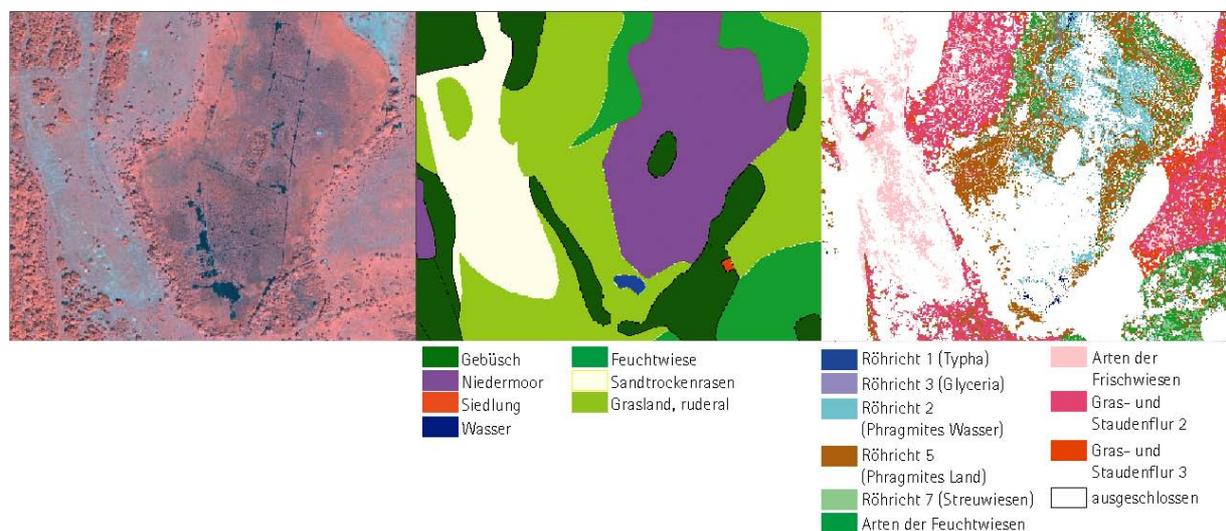


Abb. 5.25: Beispiel für die automatische Extraktion von Trainingsgebieten für die offenen Flächen mit viel Vegetation (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpned, RGB=4,3,2, mitte: BTNTK von 1992/93, rechts: extrahierte Trainingsgebiete)

Mit Hilfe der beschriebenen Regeln erfolgt die Abgrenzung von Trainingsgebieten im Expert Classifier von Erdas Imagine (siehe Abb. 5.26). Dabei gilt, dass nur bei der Erfüllung aller Regeln ein Trainingspixel gebildet wird, trifft für ein Pixel keine Hypothese vollständig zu, wird es ausgeschlossen.

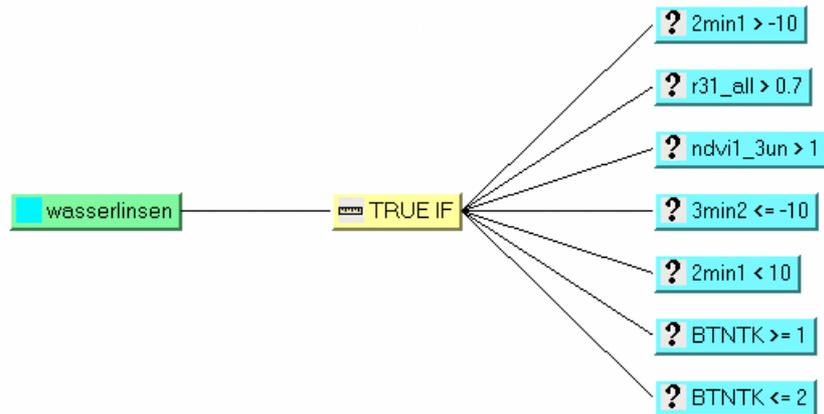


Abb. 5.26: Beispiel für die Umsetzung der Regeln für die Klasse „Arten der Wasserlinsen“ im Expert Classifier von Erdas Imagine

5.3.3 Clusterbasierte Signaturextraktion

Die nach dem oben erläuterten Verfahren erzeugten Trainingsgebiete können noch nicht zur Signaturbildung herangezogen werden, da sie unter Umständen immer noch fehlerhafte Pixel enthalten, die eine Verfälschung der Signatur zur Folge hätten bzw. da sie eventuell immer noch zu heterogen sind, um eine annähernd normalverteilte Signatur zu ergeben. Es steht jedoch kein besseres a-priori Wissen zur Verfügung, das die Trainingsgebiete weiter verfeinern könnte. Hier wird nun zu einem statistischen Hilfsmittel gegriffen, indem die bereits erzeugten Trainingsgebiete mit Hilfe einer unüberwachten ISODATA-Clustering in statistisch homogenere Bereiche eingeteilt werden. Dadurch können Subklassen erkannt werden, deren Einbindung in den Klassifikationsprozess die Genauigkeit wesentlich erhöhen kann, wie u.a. KEUCHEL et al. (2003) zeigen. Dafür wird das Satellitenbild mit den Trainingsgebieten maskiert und unüberwacht in die Anzahl der durch die Wissensbasis gefundenen Klassen geclustert. Die Trainingsgebiete werden mit dem Clusterbild in eine Matrix überführt, so dass für jede wissensbasiert erzeugte Hauptklasse ermittelt werden kann, ob mehrere spektrale Unterklassen gebildet werden müssen, bzw. ob es kleine Fehlflächen gibt, die nicht einbezogen werden sollten. In folgender Tab. 5.16 ist dies exemplarisch dargestellt.

Hauptklasse Wissensbasis	Unterklass Clusterung	Prozentanteil	
Zwergstrauchheide	Nr. 5	2%	100%
Zwergstrauchheide	Nr. 10	54%	
Zwergstrauchheide	Nr. 12	40%	
Zwergstrauchheide	Nr. 20	4%	
Wasserlinsen	Nr. 1	95%	100%
Wasserlinsen	Nr. 3	5%	
.....			

Tab. 5.16: Beispiel für die durch Clustering gewonnene Untergliederung von Hauptklassen

Für die Klasse Zwergstrauchheide wurden also 4 Unterklassen gebildet. Jedoch sind nur zwei davon wirklich relevant, Unterklassen mit einem Prozentanteil unter 10 werden als nicht signifikant bzw. fehlerhaft betrachtet. Es ist wahrscheinlicher, dass sie einer anderen Hauptklasse angehören und fälschlicherweise in die Trainingsgebiete einbezogen wurden. In Abb. 5.27 ist links die aus der

Wissensbasis generierte Hauptklasse dargestellt, in den weiß umrandeten Problemzonen sind fehlerhaft einbezogene Pixel am Rand von Bäumen zu erkennen. Rechts sind die Unterklassen bunt eingefärbt, die dunkelbraunen und dunkelgrünen Pixel sind die zwei relevanten Hauptklassen, alle anderen werden ausgeschlossen, darunter auch die jetzt gelben Fehlpixel an den Baumrändern.



Abb. 5.27: Beispiel für die durch Clustering gewonnene Untergliederung von Hauptklassen

Aus den solcherart geclusterten und bereinigten Trainingsgebieten werden Signaturen abgeleitet. Diese Vorgehensweise erzeugt sehr homogene Signaturen, die größtenteils einer Gauß'schen Normalverteilung nahe kommen und die für die Klassifikation mit dem Maximum Likelihood Algorithmus geeignet sind. Es kann jedoch auch objektbedingt Signaturen geben, die nicht normal verteilt sind. Die Clustering bringt für diese Objekte dennoch Vorteile, da fehlerhafte Pixel ausgeschlossen werden können (siehe Abb. 5.27).

5.3.4 Überwachte hierarchische Klassifikation und wissensbasierte Nachbearbeitung

Für die überwachte Klassifikation wird in allen Hierarchiestufen der Maximum Likelihood Algorithmus eingesetzt. Bis auf die Erstellung der Gehölzmaske sind alle anderen Klassifikationen auf der originalen Kanalkombination des pansharpened oder des multispektralen Bildes ausgeführt. Nach ausführlichen Anwendungstests mit verschiedenen Kombinationen der Bildderivate und Texturparameter sowie daraus abgeleiteten Hauptkomponenten stellte sich heraus, dass zwar insgesamt die euklidischen Distanzen der Signaturmittelpunkte im Merkmalsraum erhöht werden können, dies jedoch auf das Klassifikationsergebnis nur marginale Auswirkungen hat. Zu Gunsten der Rechenzeit wurde deshalb auf eine Verwendung anderer Bildderivate für die Klassifikation verzichtet.

Die Klassifikation wird mit einem fuzzy Operator mit zwei Klassen durchgeführt, d.h. jedes Pixel bekommt eine beste und eine zweitbeste Klasse zugeordnet. Gerade bei überlappenden Signaturen ist dieses Verfahren geeignet, Fehlklassifikationen zu verringern. Mit Hilfe eines Distanzbildes, in dem die euklidischen Distanzen jedes Pixels zu seinen Klassenmittelpunkten gespeichert sind, kann dann eine fuzzy convolution Filterung durchgeführt werden (Filtergröße 3x3). Dadurch werden einzelne Pixel, die eine extrem hohe euklidische Distanz aufweisen und daher wahrscheinlich fehlklassifiziert sind, mit den zweitbesten und den benachbarten Klassen in Beziehung gesetzt und eventuell einer besseren Klasse zugewiesen (siehe Formel 5.18). Dies hat auch eine Verringerung des „salt-and-pepper“-Effekts zur Folge, der mit dieser Methode objektiver geglättet werden kann als mit einem einfachen Medianfilter.

$$T[k] = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^s \sum_{l=0}^s \frac{w_{ij}}{D_{ijl}[k]} \quad (5.18)$$

Dabei ist s die Größe des Filterfensters, l die Anzahl an fuzzy Klassen, W verkörpert die Gewichtungstabelle für das Filterfenster, da nahe am Zentrum liegende Pixel ein höheres Gewicht bekommen als am Rand befindliche, k ist der Wert der Klasse und $D[k]$ bezeichnet die euklidische Distanz für diese Klasse.

Für die wissensbasierte Nachbearbeitung und Bereinigung von Fehlklassifikationen sind topologische und geometrische Objektmerkmale notwendig. Dafür werden die Klassifikationsergebnisse aggregiert (unter Einbeziehung aller acht Nachbarn) und verschiedenen Berechnungen unterzogen. Eine wichtige Kenngröße für die Identifikation von Gebäudedächern und Schattenbereichen ist der Shapeindex (McGARIGAL & MARKS, 1994).

$$SHAPEINDEX = \frac{0.25p}{\sqrt{a}} \quad (5.19)$$

Dabei bezeichnet p den Umfang des Objektes in m und a die Fläche in m².

Des Weiteren wird mit Hilfe eines Richtungsfilters nach Nordwesten und Südosten die benachbarte Klasse jedes Objekts bestimmt. Auch die Entfernung zu bestimmten Objekten ist für einige Klassen wichtig, so z.B. für Röhricht die Entfernung zu Wasser – mit Hilfe einer klassenabhängigen Bufferfunktion werden Abstände zwischen Objekten gemessen.

Gehölzmaske

Als beste Kombination für die Klassifikation und Extraktion einer Gehölzmaske hat sich nach ausführlichen Anwendungstests der NDVI und der morphologisch gefilterte rote Kanal (SNR) erwiesen. Da es zu kleinen Fehlklassifikationen in vitalen Wiesenbereichen und zu Überschneidungen bei Schwimmblattbeständen kommt, ist eine wissensbasierte Nachbearbeitung notwendig. Alle als Gehölz klassifizierten Pixel werden zusammengefasst (aggregiert) und auf das Vorhandensein eines Schattens in nordwestlicher Richtung untersucht. Da sich der Satellit in einer sonnensynchronen Umlaufbahn befindet, werden die Daten immer morgens gegen 10 Uhr aufgenommen, so dass der Schatten immer in nordwestliche Richtung fällt. In Abb. 5.28 ist rechts ein Ausschnitt von der Wublitz im Nordwesten Potsdams dargestellt. Es kommen Baumreihen, Einzelbäume, Sträucher und am Ufer der Wublitz niedrigwüchsiger Bruchwald vor. In der Mitte ist das Klassifikationsergebnis dargestellt, problematische Bereiche sind rot umrandet. Nach der wissensbasierten Bereinigung ist rechts das Endergebnis dargestellt, das als Gehölzmaske in den weiteren Bearbeitungsprozess eingeht.

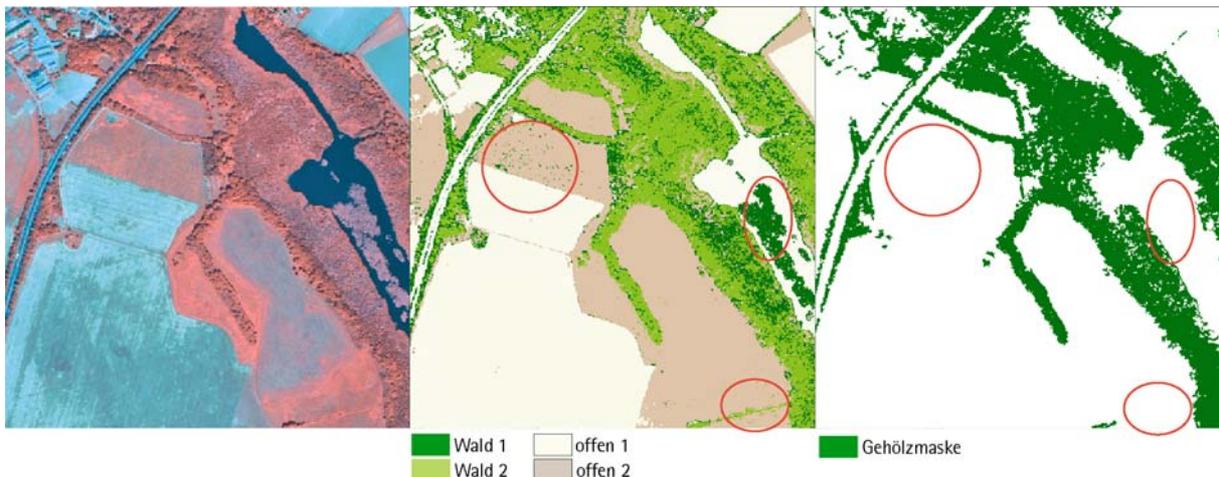


Abb. 5.28: Beispiel für die Bildung der Gehölzmaske (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpener, RGB=4,3,2, mitte: Ergebnis der MaxLike Klassifikation mit rot eingekreisten Problemzonen, rechts: Ergebnis der wissensbasierten Nachbearbeitung)

Die so erzeugte Gehölzmaske wird nun verwendet, um das Satellitenbild zu maskieren (siehe Abb. 5.29) und in der nächsten Hierarchiestufe nur noch die offenen Bereiche weiter auszuwerten.



Abb. 5.29: Beispiel für die Ausmaskierung der gehölzbestandenen Bereiche (Quickbird Satellitenbild, pansharpened, RGB=4,3,2)

Offene versiegelte Flächen/offene unversiegelte Flächen ohne Vegetation

Aus den geclusterten Trainingsgebieten werden Signaturen abgeleitet, die für die Maximum Likelihood Klassifikation des pansharpened Satellitenbildes verwendet werden (Gehölz ist bereits ausmaskiert). Eine wissensbasierte Nachbearbeitung ist auch hier notwendig, da es vereinzelt zu Fehlern bei spektral sehr ähnlichen Objekten kommen kann. Dies betrifft vor allem sehr dunkle (Wasser, Schatten und Teerdächer/Asphalt) und sehr helle Bereiche (offener Boden, Beton). In Abb. 5.30 sind anhand eines Beispiels aus der Potsdamer Innenstadt die Klassifikationsergebnisse für offene versiegelte Bereiche dargestellt. Die Klassen Gehölz und krautige Vegetation wurden in anderen Hierarchieebenen erzeugt, sind aber zur besseren Übersicht mit dargestellt.

Gerade in Schattenbereichen kommt es z.B. oft zur Verwechslung mit Wasser. Diese Fehlflächen werden mit folgenden Regeln korrigiert: Wenn es sich um eine kleinere Fläche handelt und sich in südöstlicher Richtung ein versiegeltes Objekt befindet, dann ist es ein Hausschatten. Befindet sich südöstlich ein Gehölz, dann wird ein Baumschatten identifiziert (über den NDVI kann noch die Unterteilung getroffen werden in Schatten mit Vegetation und Schatten ohne Vegetation).

Bei sehr hellen Flächen kommt es unter Umständen zu Verwechslungen zwischen offenem Boden (z.B. Sand) und Metall- oder Glasflächen. Es wird die Annahme getroffen, dass Metall- oder Glasflächen nie direkt auf dem Boden vorkommen, sondern immer Bestandteil eines Hausdaches sind. Das bedeutet, dass diese Objekte ab einer bestimmten Größe ($> 50 \text{ m}^2$) einen eigenen Schatten haben müssen. Fallen sie unter die Größenschwelle, muss die Textur (TextMS) hoch sein, damit sie als Bestandteil eines Hausdaches beibehalten werden. Umgekehrt gilt für Objekte, die als Sand klassifiziert wurden, dass sie bei sehr regelmäßiger Form (diese wird über den shapeindex bestimmt), hoher Textur und einem eigenen Schatten als Metaldach umklassifiziert werden.



Abb. 5.30: Beispiel für die Klassifikation versiegelter Bereiche (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpened, RGB=4,3,2, mitte: Ergebnis der MaxLike Klassifikation mit weiß eingekreisten Problemzonen, rechts: Ergebnis der wissensbasierten Nachbearbeitung)

Die Klassifikationsergebnisse von großflächigeren vegetationslosen Flächen zeigen, dass viele sehr kleine Pixelgruppen vorkommen, die fehlerhaft einer versiegelten Klasse zugeordnet wurden. Die Ursache dafür liegt teilweise im Pansharpening. Das Pansharpening führt zu Artefakten an Objektgrenzen, wie im Vergleich der Feature Space Darstellung der Kanäle R und NIR sehr gut zu erkennen ist (siehe Abb. 5.31).

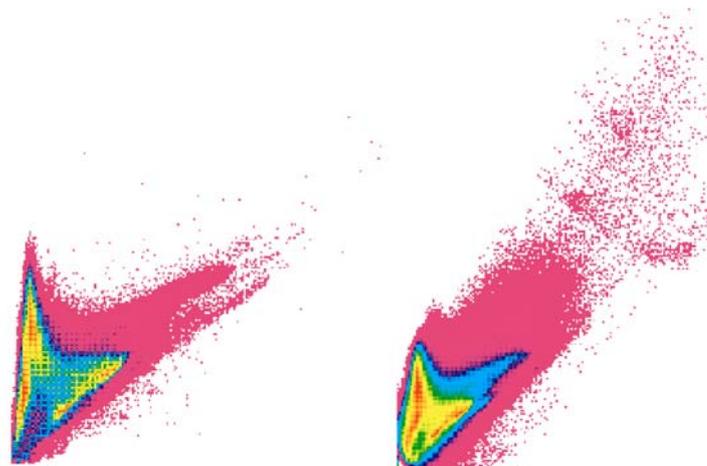


Abb. 5.31: Feature Space Darstellung der Kanäle R und NIR (links: multispektrales Bild, rechts: pansharpened Bild)

Da die Klassifikation dennoch auf Grundlage des geschärften Bildes durchgeführt werden soll, um die hohe geometrische Genauigkeit zu nutzen, muss eine Form der Nachbearbeitung gefunden werden, die diese fehlerhaften Bereiche bereinigt. Da die Fehlklassifikationen ausschließlich Versiegelungsklassen betreffen, wird folgender Nachbearbeitungsschritt eingeführt:

1. Bildung von Signaturen für das ungeschärfte multispektrale Bild aus den geclusterten Trainingspixeln
2. Maximum Likelihood Klassifikation des ungeschärften multispektralen Bildes
3. Recodierung aller Versiegelungsklassen auf 1
4. Aggregation des Klassifikationsergebnisses des geschärften Bildes

5. Berechnung der Majority Klasse pro zusammengefasster Einheit
6. Nur Einheiten der Versiegelungsklassen mit Majority gleich 1 werden als versiegelte Bereiche behalten, alle anderen bekommen die Klasse aus der Maximum Likelihood Klassifikation des ungeschärften multispektralen Bildes zugewiesen

Zur Illustration des Verfahrens siehe Abb. 5.32, in dem eine abgeerntete Ackerfläche dargestellt ist.

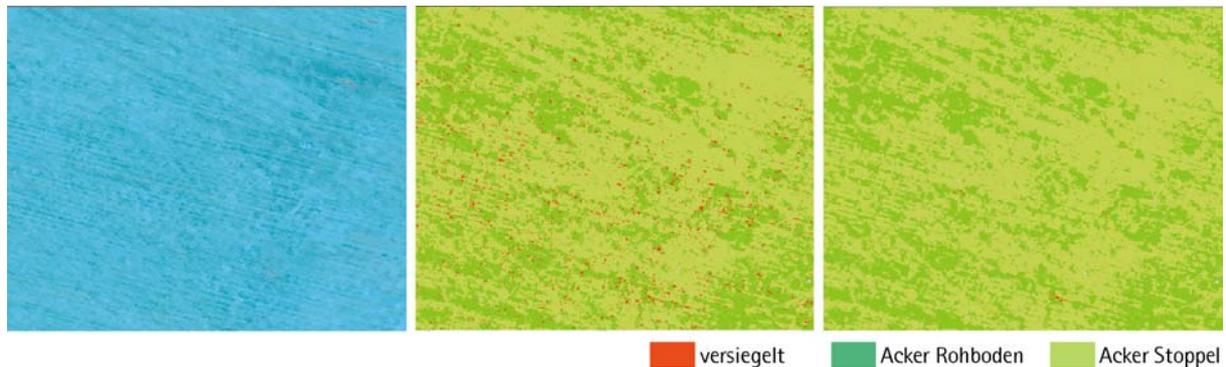


Abb. 5.32: Beispiel für die Nachbearbeitung fehlerhafter Klassifikationsergebnisse (links: Quickbird-Ausschnitt eines abgeernteten Ackers, mitte: Ergebnis der MaxLike-Klassifikation, rechts: Ergebnis der wissensbasierten Nachbearbeitung)

Offene Flächen mit Vegetation

Aus den automatisch erzeugten Trainingsgebieten werden Signaturen abgeleitet, die für eine Maximum Likelihood Klassifikation des pansharpned Satellitenbildes verwendet werden (Gehölz und Bereiche ohne Vegetation sind bereits ausmaskiert). Aufgrund der spektralen Ähnlichkeit einiger Klassen kommt es zu größeren Fehlklassifikationen. Dabei müssen zwei Problembereiche unterschieden werden:

1. Spektral ähnliche Klassen mit unterschiedlichen naturräumlichen Ansprüchen
2. Spektral ähnliche Klassen mit ähnlichen naturräumlichen Ansprüchen

Fehlklassifikationen, die zum ersten Bereich gehören, können mit einer wissensbasierten Nachbearbeitung durch einfache Regeln richtig zugewiesen werden. Ein wichtiger Input ist dabei die Aussage, ob es sich um trockene, frische oder feuchte Bereiche handelt – diese Information kann aus dem a-priori Wissen in Form der alten Biotoptypendaten entnommen werden. Des Weiteren werden Objektmerkmale wie Größe und Nachbarschaft einbezogen. Als Beispiel seien Fehler bei der Klassifikation von dunklen Röhrichtklassen und Zwergstrauchheide genannt – da sich diese Klassen in den Signaturen sehr ähneln, werden unter Umständen in Heideflächen kleine Röhrichtinseln klassifiziert und am Gewässerrand kleine Heideflächen.

Mit den einfachen Regeln:

- WENN: BTNTK trocken UND Klasse = Röhricht (1, 3 oder 6)
DANN: Klasse = trockene Zwergstrauchheide
- Zwergstrauchheide
DANN: Klasse = Röhricht

können diese Fehler bereinigt werden (siehe Abb. 5.33).

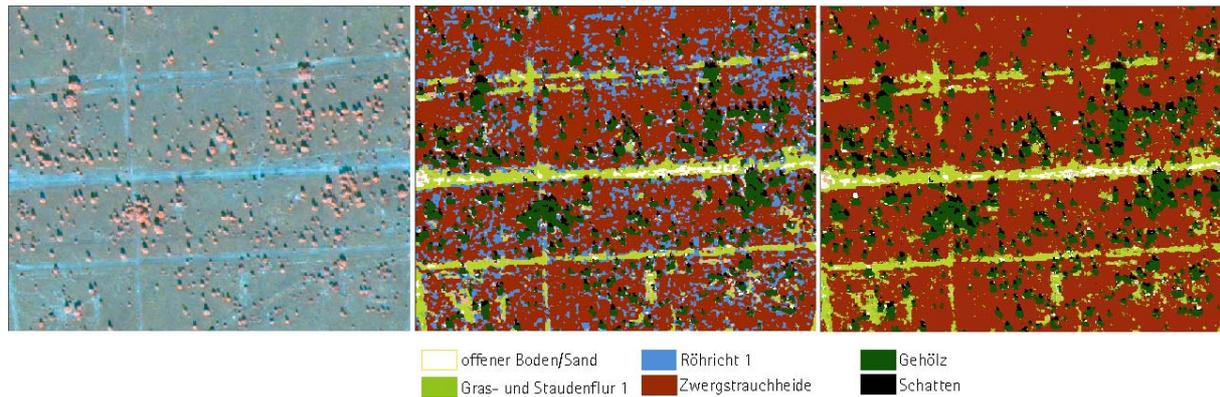


Abb. 5.33: Beispiel für die Nachbearbeitung fehlerhafter Klassifikationsergebnisse (links: Quickbird-Ausschnitt einer Heidefläche, mitte: Ergebnis der MaxLike-Klassifikation, rechts: Ergebnis der wissensbasierten Nachbearbeitung)

Für Fehlklassifikationen, die die zweite Gruppe betreffen und die nicht mit einfachen Regeln berichtigt werden können, wird eine besondere Form der Klassifikation eingesetzt, indem der Maximum Likelihood Algorithmus zusätzlich a-posteriori Wahrscheinlichkeiten (Bayesian Decision Rule) einbezieht. Das bedeutet, dass Klassen, die eine höhere Anzahl an Trainingspixeln aufweisen, mit höherer Wahrscheinlichkeit belegt werden.

Es muss jedoch eine objektive und nachvollziehbare Methode gefunden werden, den Wahrscheinlichkeitswert zu berechnen. Dies kann man lösen, indem für alle Signaturen der Anteil ihrer Trainingspixel an der Summe aller Trainingspixeln berechnet und dieser direkt in einen Wahrscheinlichkeitswert überführt wird.

Für folgende Klassen wird dieser zweite Klassifikationsschritt durchgeführt:

- | | | |
|----------------------------------|-----|------------------------------|
| - Grünland, intensiv | <-> | Acker/Getreide |
| - Arten der Frischwiesen | <-> | Grünland, intensiv |
| - Arten der feuchten Hochstauden | <-> | Röhricht 5 (Phragmites Land) |
| - Arten der Feuchtwiesen | <-> | Röhricht 4 (Phalaris) |

Diese Form der Klassifikation funktioniert jedoch nur, sobald die beiden konkurrierenden Klassen tatsächlich in unterschiedlicher Verteilung vorkommen. Wenn z.B. in einem Gebiet der Anteil an Intensivgrünland und Acker in etwa gleich groß ist, kann die Klassifikation mit dieser Methode nicht verbessert werden. Unter Umständen ist in diesen Fällen die visuelle Nachkontrolle hilfreicher, da der Interpret im Kontext mit der umgebenden Landnutzung, unter Berücksichtigung von Bearbeitungsspuren und mit regionalem Wissen wesentlich exakter bestimmen kann, um welchen Biototyp es sich handelt.

5.4 GIS-basierte Aggregation der Biotopcodes

Die Flächenvektoren der alten Lebensraum- bzw. Biotopgrenzen werden mit einer eindeutigen ID versehen und dann im GIS mit den rasterbasierten Klassifikationsergebnissen verknüpft (Tabulate Areas), so dass für jede Fläche der Prozentanteil darin liegender Klassen ermittelt werden kann. Diese können über die ID mit dem Flächenthema verknüpft bzw. in einer externen Datenbank verwaltet werden. Da die Klassen als Raster vorliegen und es vorkommen kann, dass ein Pixel von einer Flächengrenze geschnitten wird, jedoch das ganze Pixel gezählt wird, ist es möglich, dass leichte Unter- bzw. Überberechnungen vorkommen (zwischen 99,5 und 100,5 %). Diese sind jedoch so gering, dass sie zu vernachlässigen sind. Eine Vektorisierung der Rasterdaten würde diesen Umstand beheben, nähme jedoch unverhältnismäßig viel Rechenzeit in Anspruch.

Eine Aggregation der Klassifikationsergebnisse zu flächenhaften Biotop- und Landnutzungstypen kann die visuelle Nachinterpretation beschleunigen und Fehler minimieren. Jedes Polygon bekommt regelbasiert einen neuen Biotopcode zugewiesen, so dass die Flächen nur noch auf eventuelle Grenzänderungen und auf die Genauigkeit der Klassifikation und Aggregation überprüft werden müssen. Es kommen dabei zwar aufgrund der natürlichen Heterogenität viele Fehlzusweisungen vor, jedoch wird für einen großen Teil der Flächen der Biotopcode richtig zugeordnet und muss nicht noch einmal angefasst werden.

An einem sehr einfachen Beispiel soll dies illustriert werden. Für die Zuweisung des Biotopcodes für trockene Sandheide gelten folgende Regeln:

- WENN: Gehölzbedeckung in der Fläche $\leq 10\%$ UND Heideanteil $\geq 25\%$
DANN: Biotopcode **0610201** (trockene Sandheiden weitgehend ohne Gehölzbewuchs)
- WENN: Gehölzbedeckung in der Fläche $\geq 10\%$ UND $\leq 30\%$ UND Heideanteil $\geq 15\%$
DANN: Biotopcode **0610202** (trockene Sandheiden mit Gehölzbewuchs)

In Abb. 5.34 ist an einem Bildausschnitt dargestellt, dass ein Großteil der Heideflächen damit bereits richtig codiert werden kann. Im unteren Bildteil sind in Schwarz die automatisch zugeordneten Biotopcodes dargestellt, in Blau sind die Codierungen dargestellt, die nachträglich verändert werden mussten.

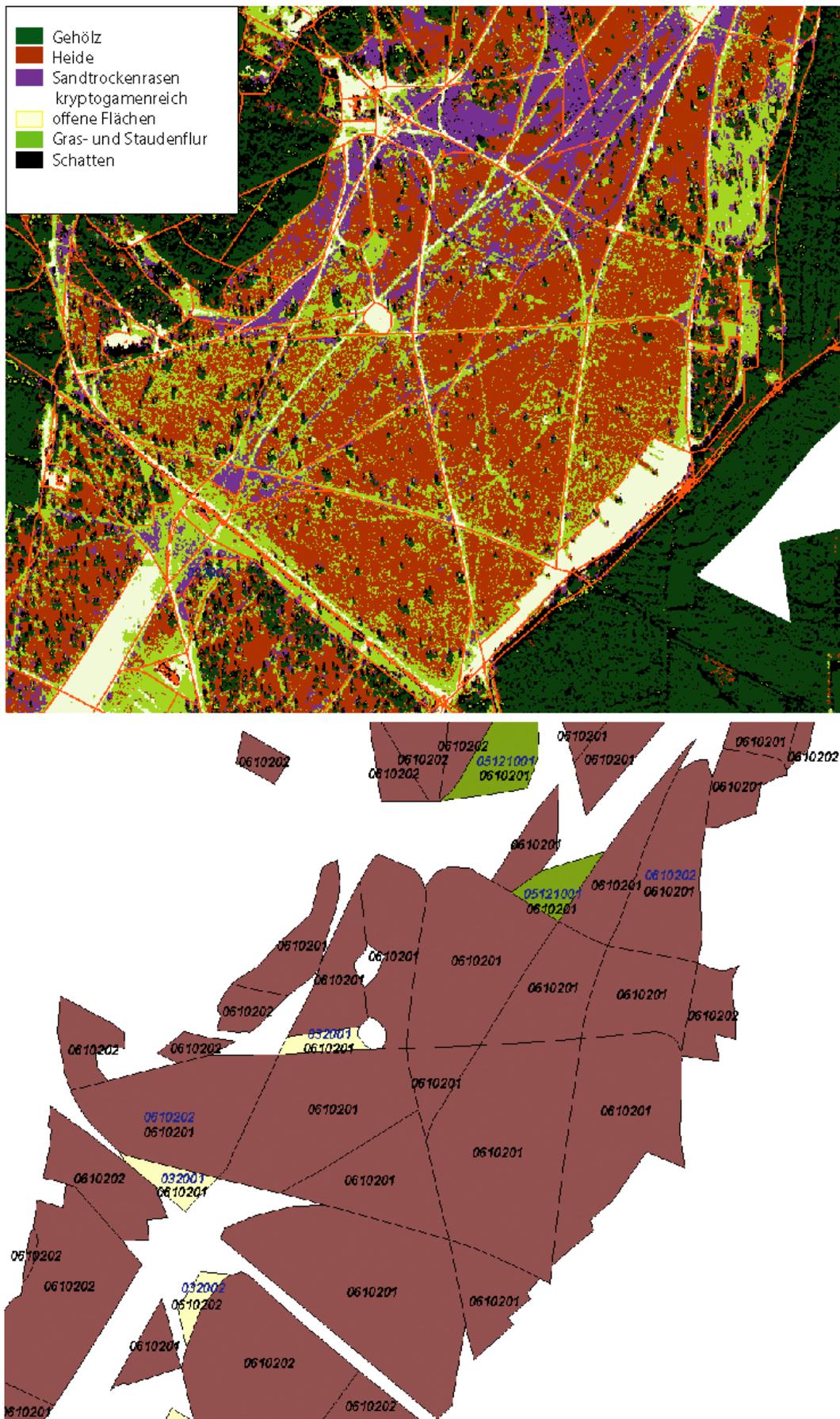


Abb. 5.34: Beispiel für die regelbasierte Aggregation von Biotopcodes im GIS (in Blau: nachträglich veränderte Codierungen)

Bei vielen Biotoptypen funktioniert dieses einfache Verfahren nicht, da bei der Interpretation noch Zusatzinformationen herangezogen werden (u.a. regionales Wissen oder topografische Karten), so z.B. bei der Kartierung von Binnendünen.

Dieses Problem könnte dadurch gelöst werden, dass die alten Biotopcodes in die Regeln mit einbezogen werden, so dass man z.B. annimmt:

- wenn vor 6 Jahren eine Binnendüne kartiert wurde, dann ist sie jetzt immer noch vorhanden, die Frage ist nur, ob sie immer noch offen oder bereits bewaldet ist

Für die Verfahrensentwicklung wurde jedoch darauf verzichtet, da bei dieser Vorgehensweise die Gefahr besteht, alte Fehler weiterzuführen. Statt dessen werden Flächen, deren Code sich im Vergleich zur alten Codierung geändert hat, markiert und noch einmal einer genaueren visuellen Überprüfung unterzogen.

5.5 Visuelle Bildanalyse

Nachdem die vollautomatische Klassifikation des Bildes und die Aggregation der neuen Biotopcodes beendet ist, müssen die Flächengrenzen der LRT bzw. Biotoptypen visuell überprüft werden, da es hierfür noch keine zuverlässigen automatischen Verfahren gibt (siehe Kapitel 2.4.3). Außerdem muss visuell überprüft werden, ob Anomalien oder großflächige Fehlklassifikationen aufgetreten sind (z.B. bei Brand- oder Überschwemmungsflächen) oder die Aggregation einen fehlerhaften Biotopcode ergeben hat.

Die gesamte Überprüfung kann mit herkömmlicher GIS-Software wie z.B. ArcMap on-screen erfolgen, wobei unbedingt beachtet werden muss, dass die Farbdarstellung der Satellitenbilder vom Bildschirm und von der verwendeten Grafikkarte abhängt.

Die jeweils gültigen Interpretationsschlüssel für die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung mit CIR-Luftbildern können bei geeigneter Kanalkombination auf die Quickbird-Satellitenbilder angewendet werden, wenn auch stellenweise nicht in derselben Interpretationsstiefe, da die stereoskopische Höheninformation fehlt.

Im Anhang in Abb. A.1 bis Abb. A.10 sind die im Rahmen der Arbeit behandelten Lebensraumtypen in einem Interpretationsschlüssel mit Bildbeispiel und Interpretationshilfen aufgeführt. Exemplarisch sei dies am Beispiel des LRT 2330 gezeigt:

LRT 2330: Dünen mit offenen Grasflächen mit *Corynephorus* und *Agrostis* (Dünen im Binnenland)

Beschreibung: Standort vegetationslos oder mit lückigen Grasfluren,
natürlich offene oder offengehaltene Sandflächen
siehe LUA, 2002

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: oft sind offene mit vegetationsbestandenen Flächen mosaikartig verzahnt,
fließende Übergänge, unregelmäßige Struktur, geringe Textur

Farbmerkmale: offene Sandflächen haben meist gleichmäßige Farbverteilung, weiß oder sehr
helles beige-grau bis bläulich weiß,
vegetationsbestandene Flächen sind bei Dominanz von Silbergras oder
Sandsegge hell-grünlich oder bläulich, wenige Rotanteile
bei Dominanz von Moosen und Flechten schwärzlich bis dunkelgrün-grün
bei Dominanz von ruderalen hochwüchsigen Gräsern gelblich bis rötlich

Abbildungsverhalten:

2003/2004: Bildbeispiel zeigt LRT 2330

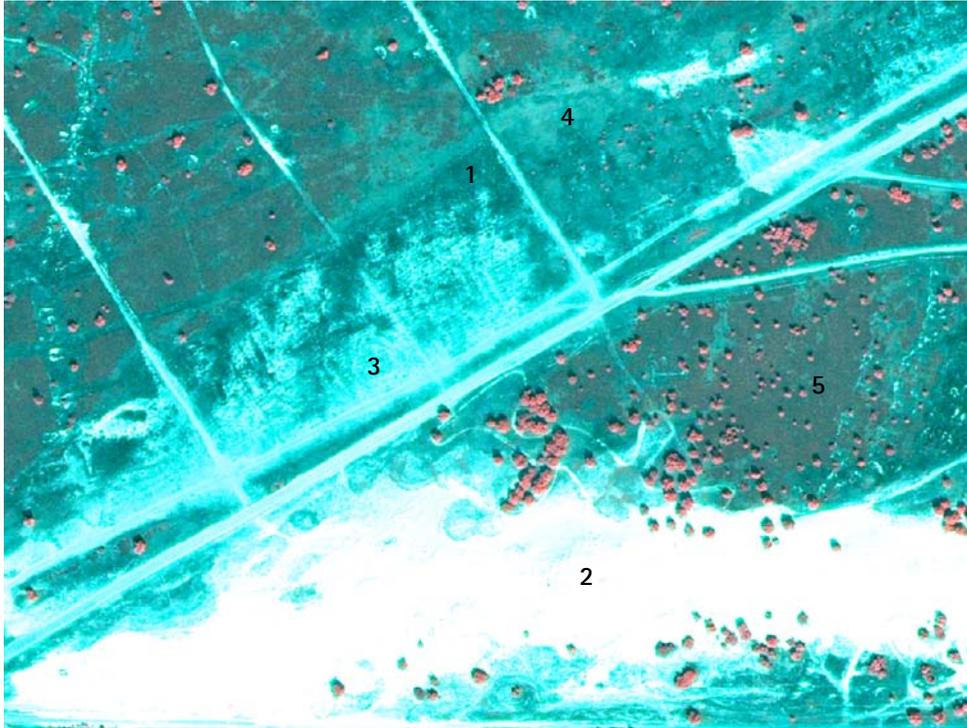


Abb. 5.35: Bildschlüssel LRT 2330; 1 moos- und flechtenreiche Silbergrasflur, 2 offene Sandflächen, 3 Silbergrasflur kryptogamenarm, 4 grasreiche Flächen (Landreitgras und Straußgras), 5 Heide (Maßstab ca. 1 : 3.000, Aufnahmedatum 06.08.2003)

Nach einer Histogrammstreckung sind die einzelnen Bestandteile besser unterscheidbar:

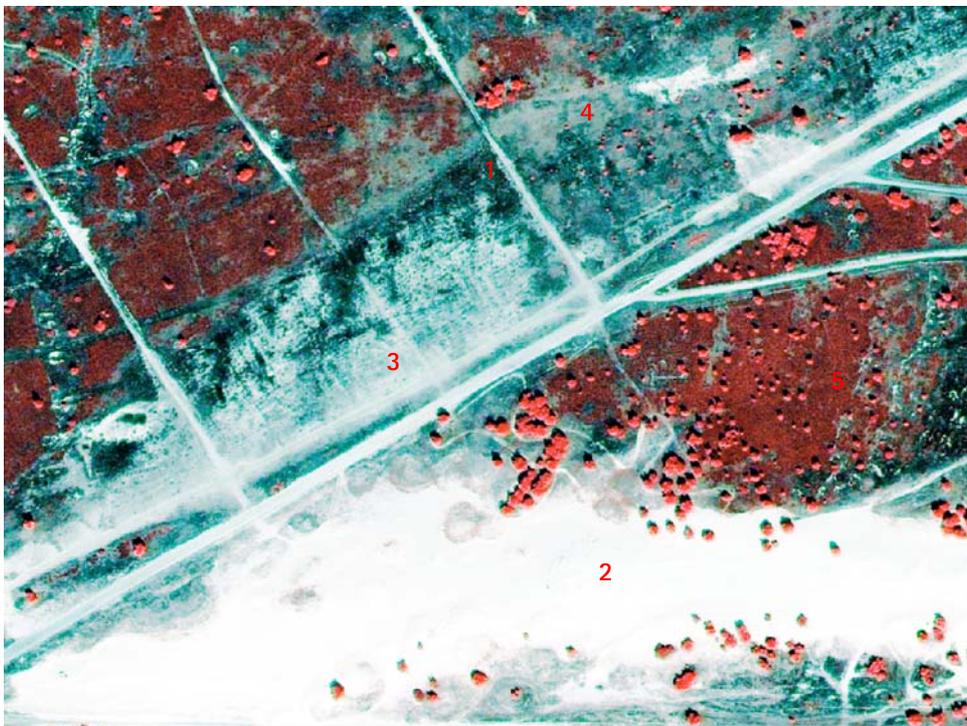


Abb. 5.36: Bildschlüssel LRT 2330; 1 moos- und flechtenreiche Silbergrasflur, 2 offene Sandflächen, 3 Silbergrasflur kryptogamenarm, 4 grasreiche Flächen (Landreitgras und Straußgras), 5 Heide (Maßstab ca. 1 : 3.000, Aufnahmedatum 06.08.2003)

5.6 GIS-basierte Verknüpfung der Indikatoren

Die Polygone der visuell überprüften und korrigierten Lebensraum- bzw. Biotopgrenzen werden mit einer eindeutigen Objekt-ID versehen und im GIS erneut mit den rasterbasierten Klassifikationsergebnissen verknüpft (Tabulate Areas), so dass für jede Fläche der genaue Prozentanteil darin liegender Klassen ermittelt wird.

Die einzelnen Klassifikationsergebnisse werden dabei scriptgesteuert je nach LRT in die interessierenden Indikatoren zusammengefasst. Diese können dann über die ID mit dem Flächenthema verlinkt bzw. in einer externen Datenbank verwaltet werden. Auch hier gilt wieder, dass es aufgrund der verschiedenen Datenformate leichte Unter- bzw. Überberechnungen geben kann (zwischen 99.5 und 100.5 %).

In Tab. 5.17 ist beispielhaft ein Auszug aus der externen relationalen Indikatordatenbank für eine Fläche des LRT 4030 dargestellt.

Indikator	Wert	Objekt-ID
Gehölzbedeckung	32.5 %	10
Arten der Gras- und Staudenfluren (aggregiert aus Arten der Gras- und Staudenfluren 1 – 4)	10.2 %	10
Heide (aggregiert aus Zwergstrauchheide und Besenginsterheide)	57.3 %	10
LPI Heide	30.2 %	10

Tab. 5.17: Auszug aus der relationalen Indikatorendatenbank

Die Klasse Schatten wird keiner „echten“ Klasse zugewiesen, weil es zu unsicher ist, die Fläche einfach dem längsten Nachbarn zuzuordnen, und weitere Aussagen zu den darin liegenden Klassen über die spektralen Informationen sehr schwierig sind. Da die Aufnahme der Satellitenbilder immer ca. um die gleiche Tageszeit in der Vegetationsperiode erfolgt, dürfte sich der Schattenanteil innerhalb der Bezugsflächen auch nicht wesentlich ändern, sondern bleibt von Jahr zu Jahr in etwa gleich. Sollten jedoch sehr spät oder sehr früh im Jahr Aufnahmen gemacht werden, so dass sich der Schattenanteil wesentlich verringert bzw. vergrößert, muss ein statistischer Weg gefunden werden, diesen Anteil den Nachbarklassen zuzuordnen.

6. Anwendung in den Testgebieten

In diesem Kapitel werden einige ausgewählte Anwendungsbeispiele aus den einzelnen Testgebieten vorgestellt. Abschnitt 6.1 ist detaillierten Einzelbeispielen gewidmet, während in Abschnitt 6.2 aufgezeigt wird, welche weiteren Anwendungsmöglichkeiten sich für die Klassifikationsergebnisse auf FFH-Gebietsebene ergeben. So ist nicht nur die Bewertung des Teilerhaltungszustandes konkreter Flächen möglich, sondern auch die Verfolgung des Sukzessionsgeschehens oder die großräumige Planung von Pflegemaßnahmen.

6.1 Klassifikationsergebnisse in ausgewählten Referenzflächen

Das in Kapitel 5 erläuterte Verfahren wurde auf alle Testgebiete gleichermaßen und ohne individuelle Anpassung angewendet. Nach der vollautomatisch durchgeführten Klassifikation und Aggregation standen die pixelgenauen Klassifikationsergebnisse außerdem als Hilfestellung für die visuelle Interpretation zur Verfügung. Soweit vorhanden, beziehen sich die ausgewählten Beispielflächen auf bereits terrestrisch kartierte und bewertete LRT. Die Abgrenzungen wurden aus der terrestrischen Kartierung ohne Grenzanpassung übernommen. Der Indikator Flächengröße wird deshalb für die Beispielflächen nicht bewertet, da die terrestrische Kartierung zeitnah zu den Satellitenbilddaufnahmen erfolgte, so dass eine Veränderung der Flächengröße auszuschließen ist.

Alle Indikatoren, die auf die in Abschnitt 5.1. erläuterte Weise in die Gesamtfläche interpoliert werden, also quasi „gehölzbereinigt“ sind, werden in den Abbildungen mit einem (G) gekennzeichnet.

In Tab. 6.1 sind alle LRT und Indikatoren, die untersucht wurden, in einer Kreuztabelle dargestellt. Die oberen fünf Indikatoren müssen visuell bestimmt werden (unter Einbeziehung der Klassifikation), während die unteren Indikatoren aus der automatischen Klassifikation hervorgehen. Obwohl die automatische Klassifikation zuerst stattfindet, stehen die visuell auszuwertenden Indikatoren an oberster Stelle in der Tabelle. Dies hat seine Ursache darin, dass die Abgrenzungen der LRT und die Genauigkeit der Klassifikation visuell nachinterpretiert und kontrolliert werden müssen, da es hierfür noch keine zuverlässigen automatischen Methoden gibt. Erst wenn die Flächengrenzen verifiziert sind, kann die Berechnung der Prozentanteile der automatisiert ermittelten Indikatoren erfolgen. Der Zerschneidungsgrad und eventuell vorhandene Entwässerungsgräben müssen ebenfalls visuell bestimmt werden, da das Verfahren ausschließlich flächenbezogen arbeitet und keine linienhaften Biotoptypen- bzw. Landnutzungen generiert.

Unter die visuell zu bestimmenden besonderen Nutzungen fallen auch viele Beeinträchtigungen wie z.B. Badestellen, Uferverbau, Deponien, Bautätigkeiten etc. – eine sehr umfangreiche Referenzliste aller möglichen Gefährdungsursachen wurde von der LANA aufgestellt (2006), auf eine detaillierte Darstellung wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

		LRT	2310	2330	3130	3140	3150	3160	3270	4030	6120	6210	6430	7140
Indikator														
Visuelle Auswertung	Flächengröße in m ²	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Zerschneidung	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Pufferzonen/umgebende Landnutzung	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Entwässerung			x	x	x	x						x	x
	Besondere Nutzungen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Automatisierte Auswertung	Versiegelung in %	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	LPI (Heide)	x								x				
	Gehölzbedeckung	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Arten der Gras- und Staudenfluren	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	offener Boden	x	x							x	x	x		
	Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens	x	x							x	x	x		
	Arten des kryptogamenreichen Sandtrockenrasens		x								x	x		
	Arten der Zwergstrauchheide	x								x				
	Arten der Besenginsterheide	x								x				
	offene Wasserfläche			x	x	x	x	x						x
	Arten der Wasserlinsendecken			x	x	x	x	x						
	Arten der Schwimmblattvegetation			x	x	x	x	x						
	Arten der Großseggenröhrichte			x	x	x	x	x					x	x
	Arten des Landröhricht			x	x	x	x	x					x	x
	Arten des Röhricht an Gewässern			x	x	x	x	x					x	x
	Arten der feuchten Hochstauden			x	x	x	x	x					x	x
	Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore													x
	Arten der Schlammبانke								x					

Tab. 6.1: Untersuchte LRT und Indikatoren

Die Klassifikationsergebnisse für die gesamten Testgebiete sind im Anhang dargestellt. Nachfolgend werden einzelne Beispiele daraus detailliert gezeigt.

6.1.1 Jüterbog

In Abb. 6.1 und Abb. 6.2 sind mehrere Flächen des LRT 4030 (trockene europäische Heiden) und des LRT 2310 (trockene Heide auf Dünen) und die aggregierten Indikatoren aus der Klassifikation dargestellt. Die Klassifikationsergebnisse für das gesamte Testgebiet sind im Anhang in Karte A.3 dargestellt.

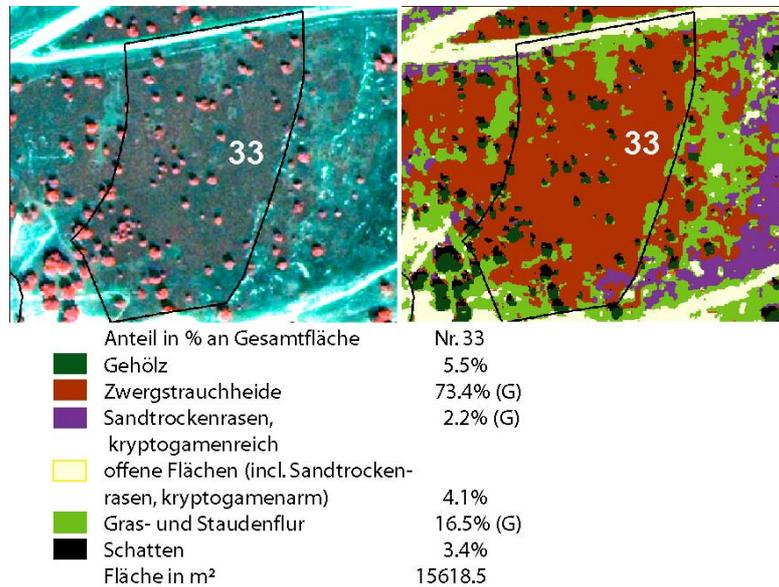


Abb. 6.1: Testfläche 33 in Jüterbog (LRT 2310, Heide auf Dünen) - (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis). Die Flächenabgrenzung wurde aus der terrestrischen Kartierung übernommen.

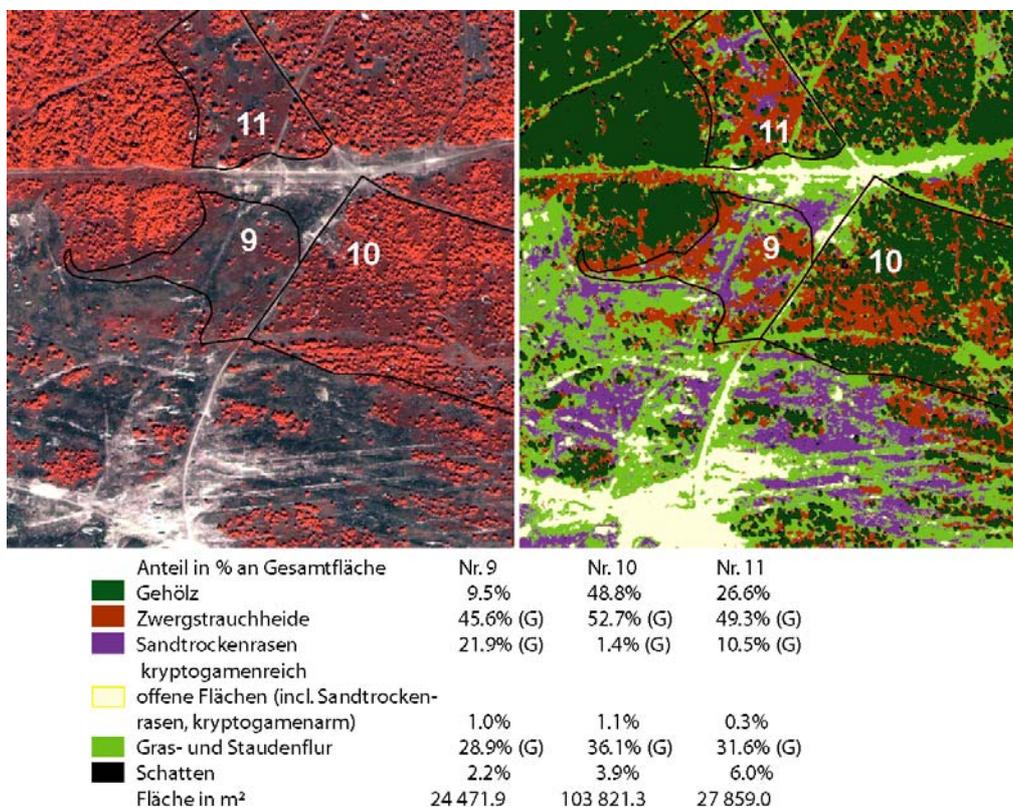


Abb. 6.2: Testflächen 9 bis 11 in Jüterbog (LRT 4030, Heide) - (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis, Quelle: FRICK, 2005, verändert). Die Flächenabgrenzung wurde aus der terrestrischen Kartierung übernommen.

Die Heide in Fläche 33 ist bereits stark überaltert und weist kein kleinräumiges Mosaik unterschiedlicher Vegetationsklassen mehr auf. Fläche 10 stellt bereits einen Vorwald dar, ist also durch Gehölzaufwuchs sehr beeinträchtigt. Einzig Fläche 9 befindet sich in sehr gutem Teilerhaltungszustand, da die Ausdehnung von Gras- und Staudenfluren und die Gehölzbedeckung noch gering sind und ein abwechslungsreiches Nebeneinander verschiedener Biotopelemente herrscht. In Tab. 6.2 ist die Bewertung für die Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen anhand der Klassifikation aufgelistet.

Indikator	gemessener Wert	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen	Nr.
Gehölzbedeckung	5.5 %	< 10 % (A)	A (sehr gut)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	16.5 %	< 30 % (A)	A (sehr gut)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	4.1 %	5 – 10 % (A) 0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
LPI Heide	68.0 %	> 50 % (C)	C (schlecht)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	33
Gehölzbedeckung	9.5 %	< 10 % (A)	A (sehr gut)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	28.9 %	30 – 50 % (B)	A (sehr gut)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	1.0 %	5 – 10 % (A) 0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
LPI Heide	27.2 %	< 30 % (A)	A (sehr gut)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			A (sehr gut)	9
Gehölzbedeckung	48.8 %	< 10 % (A) 10 – 35 % (B)	C (schlecht)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	36.1 %	30 – 50 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	1.1 %	5 – 10 % (A) 0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)		10
Gehölzbedeckung	26.6 %	< 10 % (A) 10 – 35 % (B)	B (mittel)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	31.6 %	30 – 50 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	0.3 %	5 – 10 % (A) 0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
LPI Heide (Zwergstrauchheide und Besenginsterheide)	30.1 %	< 30 % (A) 30 – 50 % (B)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	11

Tab. 6.2: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 4030 (Flächennummer 9, 10, 11 und 33)

In Abb. 6.3 und Tab. 6.3 sind mehrere Flächen des LRT 2330 (Dünen mit offenen Grasflächen) und ihre Bewertung für die Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen anhand der Klassifikation dargestellt.

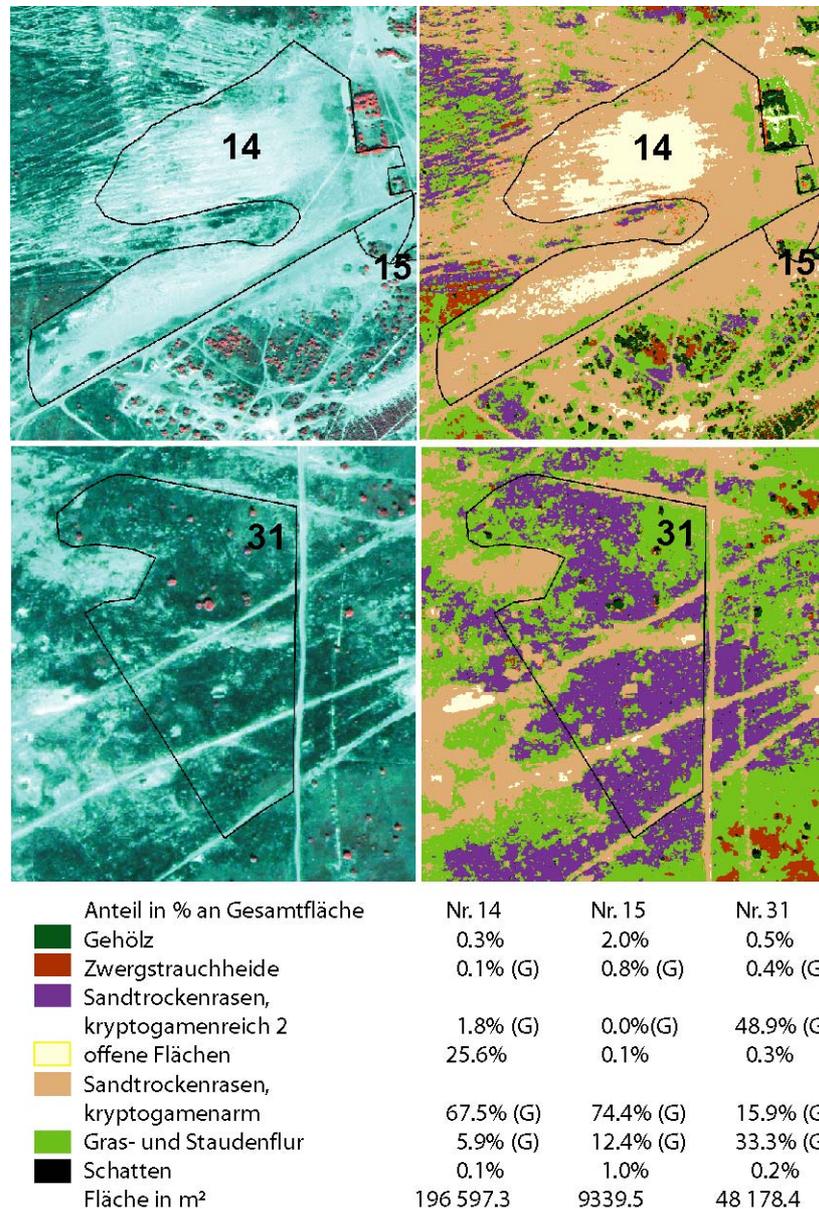


Abb. 6.3: Testflächen 14, 15 und 31 in Jüterbog (LRT 2330, Dünen) - (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis). Die Flächenabgrenzung wurde aus der terrestrischen Kartierung übernommen.

Die Flächen 14 und 15 liegen auf einem Flugsanddünenfeld und waren Bestandteil der Schießbahn des Truppenübungsplatzes. Die Flächen sind zum großen Teil noch offen bzw. nur mit einer lockeren Silbergrasflur bestanden. Die Habitatstruktur ist damit hervorragend, es sind keine Beeinträchtigungen vorhanden. Ganz anders stellt sich die Situation in Fläche 31 dar, es hat sich eine dichte geschlossene Moosnarbe entwickelt, die bereits sehr alt ist, und randlich wachsen ruderele Grasbestände ein. Die Bewertung kann demnach nicht mehr sehr gut sein (Tab. 6.3).

Indikator	gemessener Wert	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen	Nr.
Gehölzbedeckung und Arten der Gras- und Staudenfluren	33.8 %	10 – 50 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	16.2 %	> 10 % (A)	A (sehr gut)	
Moos auf trockenen Standorten (Sandtrockenrasen, kryptogamenreich 2)	48.9 %	> 45 % (C)	C (schlecht)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	31
Gehölzbedeckung und Arten der Gras- und Staudenfluren	6.2 %	< 10 (A)	A (sehr gut)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	93.1 %	> 10 % (A)	A (sehr gut)	
Moos auf trockenen Standorten (Sandtrockenrasen, kryptogamenreich 2)	1.8 %	< 25 % (A)	A (sehr gut)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			A (sehr gut)	14
Gehölzbedeckung und Arten der Gras- und Staudenfluren	14.4 %	10 – 50 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	74.5 %	> 10 % (A)	A (sehr gut)	
Moos auf trockenen Standorten (Sandtrockenrasen, kryptogamenreich 2)	0.0 %	< 25 % (A)	A (sehr gut)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			A (sehr gut)	15

Tab. 6.3: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 2330 (Flächennummer 14, 15, und 31)

In Abb. 6.4 und Abb. 6.5 sind zwei Habitatflächen der natürlich eutrophen Seen dargestellt (LRT 3150). Eine Anteilsberechnung der Indikatoren ist hier im Sinne der Bewertungsschemata nicht ausreichend. Es muss vor allem visuell überprüft werden, ob Beeinträchtigungen vorliegen (z.B. Uferverbau oder Badestellen) und ob die natürlichen Verlandungszonen vorhanden sind.

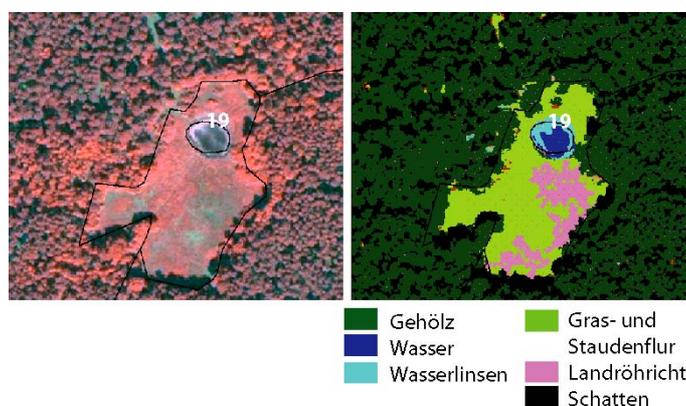


Abb. 6.4: Testfläche 19 in Jüterbog (LRT 3150, natürlich eutrophe Seen) – (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis). Die Flächenabgrenzung wurde aus der terrestrischen Kartierung übernommen.

Diese Interpretation kann jedoch wesentlich durch die Klassifikationsergebnisse unterstützt werden, da z.B. dadurch die Röhrichtbestände bereits identifiziert werden. Bei einem nachfolgenden Monitoring kann so die Zunahme bzw. Abnahme von Röhrichtflächen sehr genau bestimmt werden. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Habitatstruktur von Süßwasserlebensräumen mit Fernerkundungsmethoden nicht abschließend bewertet werden kann, da aquatische Vegetationsstrukturen wie Grundrasen und Tauchfluren eine große Rolle spielen.

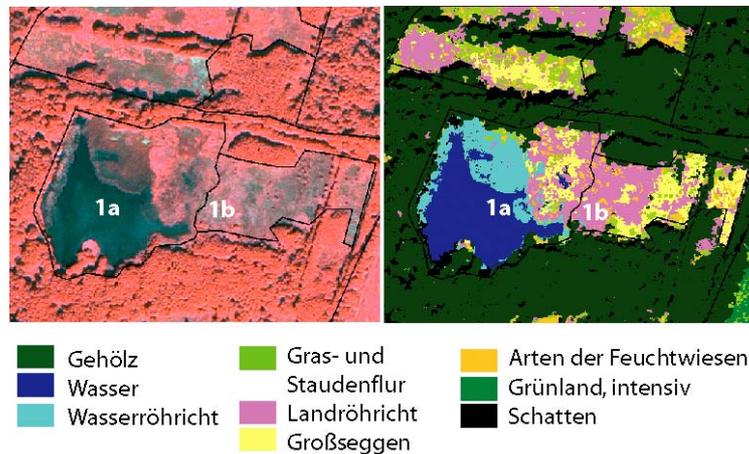


Abb. 6.5: Testfläche 1 in Jüterbog (LRT 3150, natürlich eutrophe Seen) – (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis). Die Flächenabgrenzung wurde aus der terrestrischen Kartierung übernommen.

Fläche 19 ist in sehr schlechtem Teilerhaltungszustand. Eine typische Verlandungszone fehlt völlig, und es hat sich eine großflächige Wasserlinsendecke gebildet. Fläche 1 hingegen weist eine sehr gute Habitatstruktur auf und ist nicht durch Uferverbau oder Freizeitnutzung beeinträchtigt (siehe Tab. 6.4).

Indikator	gemessener Wert	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen	Nr.
typisch ausgebildete Verlandungsvegetationsstrukturen (Röhricht, Großseggenried, Weidengebüsch, Erlen-Bruchwald)	3	mind. 3 (A)	A (sehr gut)	
Beeinträchtigungen	keine	weitgehend ohne (A)	A (sehr gut)	
naturnaher Verlandungssaum	> 90 %	> 90 % der Uferlänge (A)	A (sehr gut)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			A (sehr gut)	1
typisch ausgebildete Verlandungsvegetationsstrukturen (Röhricht, Großseggenried, Weidengebüsch, Erlen-Bruchwald)	0	< 2 (C)	C (schlecht)	
Beeinträchtigungen	stark	stark (C)	C (schlecht)	
naturnaher Verlandungssaum	0 %	< 50 % der Uferlänge (C)	C (schlecht)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			C (schlecht)	19

Tab. 6.4: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 3150 (Flächennummer 1 und 19)

6.1.2 Lieberose

In Abb. 6.6 sind mehrere Flächen des LRT 4030 (trockene europäische Heide) und die aggregierten Indikatoren aus der Klassifikation dargestellt. Die Klassifikationsergebnisse für das gesamte Testgebiet sind im Anhang in Karte A.6 dargestellt.

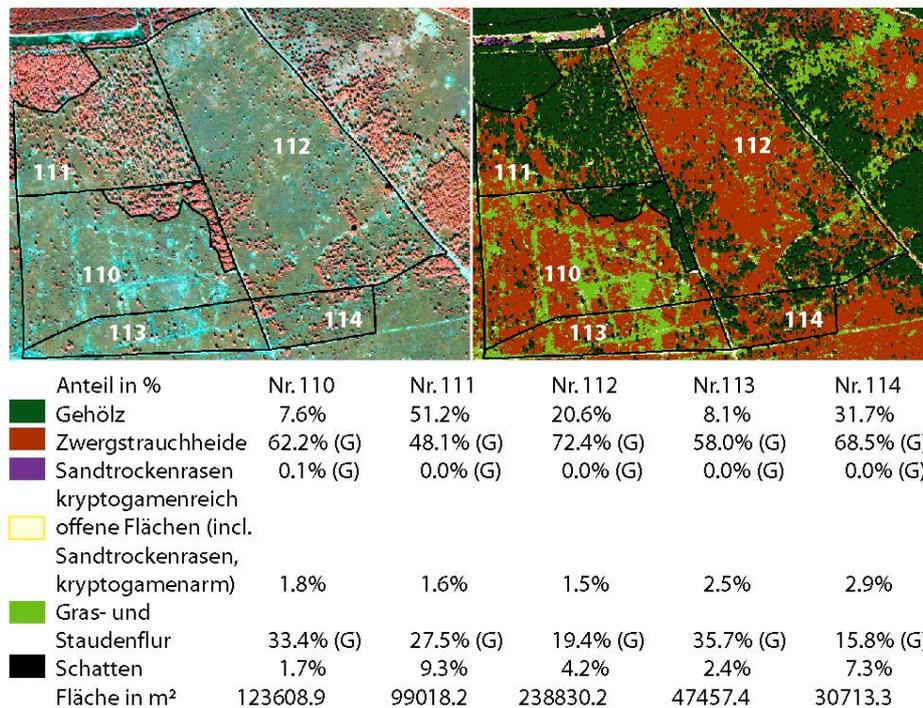


Abb. 6.6: Testflächen 110 bis 114 in Lieberose (LRT 4030, Heide) - (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis).

Die Heideflächen im Testgebiet Lieberose sind insgesamt in schlechterem Zustand als in Jüterbog. Fast alle Flächen haben entweder unter starker Vergrasung oder unter großflächigem Gehölzaufwuchs zu leiden. Der Indikator LPI kann hier nicht sinnvoll eingesetzt werden, da die Flächen mit Schafen beweidet werden. Die Heide kann deshalb geschlossen wachsen, muss aber nicht überaltert sein.

Indikator	gemessener Wert	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen	Nr.
Gehölzbedeckung	7.6 %	< 10 % (A)	A (sehr gut)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	33.4 %	10 – 35 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	1.8 %	0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	110
Gehölzbedeckung	51.2 %	> 35 % (C)	C (schlecht)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	27.5 %	< 30 % (A)	A (sehr gut)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	1.6 %	0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	111
Gehölzbedeckung	20.6 %	10 – 35 % (B)	B (mittel)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	19.4 %	< 30 % (A)	A (sehr gut)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	1.5 %	5 – 10 % (A)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	112
Gehölzbedeckung	8.1 %	< 10 % (A)	A (sehr gut)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	35.7 %	10 – 35 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	2.5 %	0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	113
Gehölzbedeckung	31.7 %	10 – 35 % (B)	B (mittel)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	15.8 %	10 – 35 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	2.9 %	0 < x < 5 % (B)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	114

Tab. 6.5: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 4030 (Flächennummer 110 bis 114)

In Abb. 6.7 ist ein Übergangsmoor abgebildet (LRT 7140). Beeinträchtigungen wie Entwässerungsgräben müssen visuell bestimmt werden. Ob offene Wasserflächen in einer Moorfläche ständig oder nur sporadisch vorhanden sind, kann ebenfalls nur visuell und im Hinblick auf den Aufnahmezeitpunkt der Satellitenbilder und die vorherrschenden Witterungsbedingungen eingeschätzt werden. Sind keine offenen Wasserflächen vorhanden, jedoch dunkle Stellen wie in Abb. 6.7, kann davon ausgegangen werden, dass diese Stellen zeitweise Wasser führen.

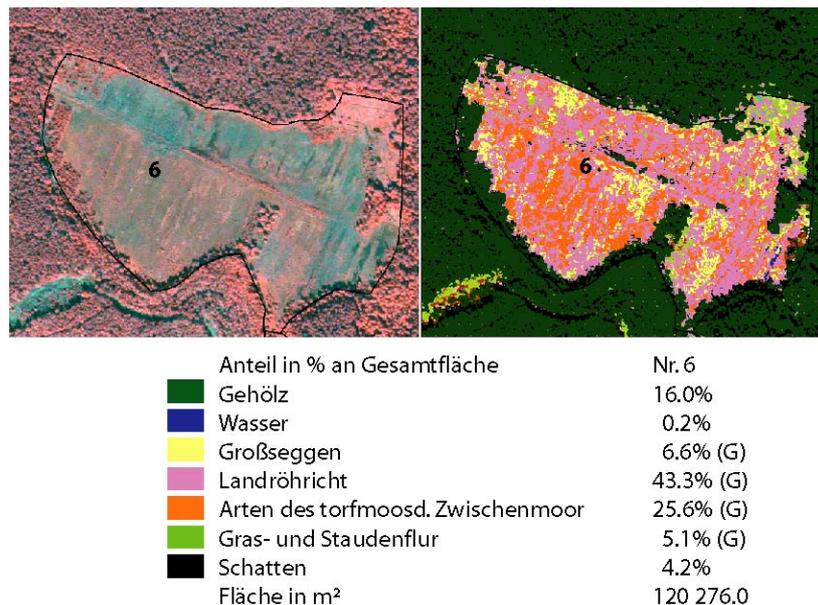


Abb. 6.7: Testfläche 6 in Lieberose (LRT 7140, Übergangsmoor) - (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis).

Fläche 6 ist aufgrund der Entwässerung bereits stark eutrophiert, was sich durch großflächigen Bewuchs mit Röhricht manifestiert.

Indikator	gemessener Wert	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen	Nr.
Gehölzbedeckung	16,0 %	10 – 25 % (B)	B (mittel)	
Offene Wasserfläche (Schlenken)	0,2 %	sporadisch vorhanden (B)	B (mittel)	
Arten des torfmoosd. Zwischenmoor	25,6 %	nur sporadisch (C)	C (schlecht)	
Eutrophierungszeiger (Landröhricht, Arten der Gras- und Staudenfluren, Großseggen)	55,0 %	großflächig (C)	C (schlecht)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			C (schlecht)	6

Tab. 6.6: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 7140 (Nr. 6)

6.1.3 Potsdam

Die Klassifikationsergebnisse für das gesamte Testgebiet sind im Anhang in Karte A.9 dargestellt.

In Abb. 6.8 ist ein Teil des Sacrower Sees dargestellt, der eine Besonderheit unter den Potsdamer Seen ist, da er als mesotrophes kalkhaltiges Gewässer zum LRT 3140 zählt. Auch für diesen Gewässertyp ist die Unterwasservegetation von entscheidender Bedeutung, dennoch können mit Hilfe der Satellitenbilder und der Klassifikation Aussagen zur Habitatstruktur und zu Beeinträchtigungen getroffen werden. Der tatsächliche Grad der Eutrophierung kann jedoch nur mit Hilfe von Messungen vor Ort belegt werden.

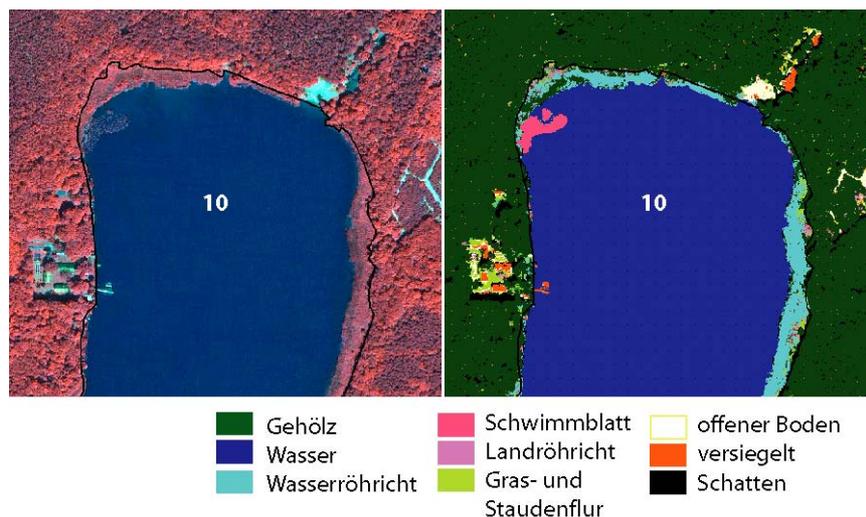


Abb. 6.8: Testfläche 10 in Potsdam (LRT 3140, oligo- bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer) – (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis).

Insgesamt kann mit Hilfe des Satellitenbildes festgestellt werden, dass der naturnahe Verlandungssaum nur auf ca. einem Drittel der Uferlänge ausgeprägt ist (in Abb. 6.8 ist nur der nördliche Teil des Sees dargestellt) und dass das Ufer stellenweise anthropogen überformt ist (Siedlungsbereiche, Steganlagen etc.). Zwei Badestellen belegen die Freizeitnutzung des Sees.

Indikator	gemessener Wert	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen	Nr.
typisch ausgebildete Verlandungsvegetationsstrukturen (Erlen-Bruchwald, Weiden-Gebüsch, Wasserried, Wasserröhricht mit Grundrasen)	2	2 - 3 (B)	B (mittel)	
Beeinträchtigungen (anthropogene Nutzung)	mäßig	mäßig (B)	B (mittel)	
naturnaher Verlandungssaum	32 %	10 - 50 % der Uferlänge (B)	B (mittel)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			B (mittel)	10

Tab. 6.7: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für den LRT 3150 (Flächennummer 10)

6.1.4 Schwedt

Die Klassifikationsergebnisse für das vollständige Testgebiet sind im Anhang in Karte A.12 dargestellt.

Die Klassifikation für das Testgebiet Schwedt musste aufgrund der schlechten Grundlagendaten wiederholt werden. Das gesamte Überschwemmungsgebiet der Oder ist in der BTNTK von 1992/93 als Intensivgrünland ausgewiesen (siehe Karte A.10 im Anhang), obwohl z.B. im nördlichen Teil seit Jahrzehnten keine Nutzung betrieben wird. Die Anzahl von gefundenen Trainingsgebieten für wasserabhängige Klassen war deshalb viel zu gering, da diese Flächen gar nicht einbezogen wurden. Die Regel, dass wasserabhängige Klassen nicht in Intensivgrünland gesucht werden, musste deshalb ausgeschaltet werden.

In Abb. 6.9 sind zwei Flächen (25 und 26) mit subpannonischem Steppen-Trockenrasen dargestellt (LRT 6240), an der die Grenzen des Verfahrens und der Satellitendaten aufgezeigt werden. Da es nicht möglich ist, Halbtrockenrasen im Spätsommer von anderen trockenen Gras- und Staudenfluren spektral zu unterscheiden und auch das a-priori Wissen nicht ausreicht, zuverlässige Trennregeln zu erstellen, können die Habitatstruktur und die Beeinträchtigungen nur eingeschränkt beurteilt werden. Der Indikator Gehölzaufwuchs kann dennoch bestimmt werden – weitere Aussagen z.B. zur Eutrophierung sind jedoch nicht möglich. Des Weiteren wird an diesem Bildbeispiel deutlich, dass bei sehr kleinen Flächen Probleme mit der Bewertung auftreten, da die starke Gehölzüberdeckung und der daraus folgende Schattenwurf fast die ganze Fläche einnehmen. Es wird aber auch deutlich, wie wichtig aktuelle Fernerkundungsdaten als Grundlage für die terrestrische Erfassung sind. Die Flächengrenzen der terrestrischen Kartierung sind an vielen Stellen eher willkürlich bzw. falsch gezogen.

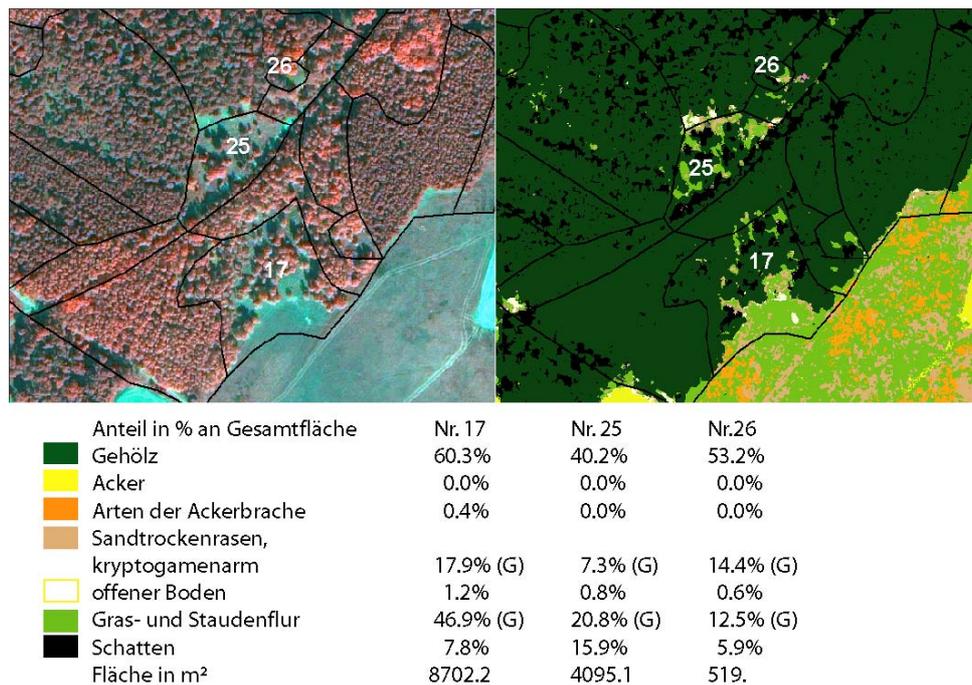


Abb. 6.9: Testflächen 17, 25 und 26 in Schwedt (LRT 6240, subpannonische Steppen-Trockenrasen und 6120, trockene, kalkreiche Sandrasen) – (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis). Die Flächenabgrenzung wurde aus der terrestrischen Kartierung übernommen.

Indikator	gemessener Wert	Schwellenwert	Habitatstruktur/ Beeinträchtigungen	Nr.
Gehölzbedeckung	60.3 %	> 15 % (C)	C (schlecht)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	46.9 %	> 15 % (C)	C (schlecht)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	17.9 %	vorhanden (A)	A (sehr gut)	
Sandtrockenrasen, kryptogamenreich	0.0 %	keine Moose oder Flechten vorhanden (C)	C (schlecht)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			C (schlecht)	17 (6120)
Gehölzbedeckung	40.2 %	> 15 % (C)	C (schlecht)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	20.8 %	> 15 % (C)	C (schlecht)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	7.3 %	vorhanden (A)	A (sehr gut)	
Sandtrockenrasen, kryptogamenreich	0.0 %	keine Moose oder Flechten vorhanden (C)	C (schlecht)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			C (schlecht)	25 (6420)
Gehölzbedeckung	53.2 %	> 15 % (C)	C (schlecht)	
Arten der Gras- und Staudenfluren	12.5 %	5 – 15 % (B)	B (mittel)	
offener Boden (incl. Sandtrockenrasen, kryptogamenarm)	14.4 %	vorhanden (A)	A (sehr gut)	
Sandtrockenrasen, kryptogamenreich	0.0 %	keine Moose oder Flechten vorhanden (C)	C (schlecht)	
Bewertung Habitatstruktur/Beeinträchtigungen:			C (schlecht)	26 (6420)

Tab. 6.8: Indikatorenliste der Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen für die LRT 6420 und 6120 (Flächennummer 17, 25 und 26)

Alle drei Flächen bekommen aufgrund des starken Gehölzaufwuchses eine sehr schlechte Bewertung, der Anteil der Gras- und Staudenfluren wird jedoch wesentlich überschätzt, sowohl Fläche 25 als auch Fläche 26 sind laut terrestrischer Kartierung nicht ruderalisiert, sondern mit subpannonischem Steppen-Trockenrasen bewachsen.

6.2 Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse auf FFH-Gebietsebene

Die Ergebnisse der Klassifikation mit anschließender Indikatorberechnung und Bewertung sind gerade in großen unzugänglichen Gebieten für Heideflächen und Dünen mit Sandtrockenrasen sehr wertvoll. Sie können nicht nur für die Berichtspflichten eingesetzt werden, sondern liefern zusätzlich detaillierte Hinweise für die Planung konkreter Erhaltungs- bzw. Wiederherstellungsmaßnahmen und können auch zur Erfolgskontrolle dienen. In Abb. 6.10 sind anhand des Testgebietes Lieberose zwei Beispiele dargestellt, im oberen Teil wird die Bewertung von Heideflächen (LRT 4030) im Indikator „Gras- und Staudenflur“ präsentiert. Die roten Flächen leiden unter einer starken Vergrasung und sollten durch geeignete Maßnahmen (z.B. kontrolliertes Abbrennen) gepflegt werden. Im unteren Teil ist der Indikator

„Gehölzbedeckung“ dargestellt. In den roten Flächen sollten Entbuschungsmaßnahmen vorgenommen werden, wenn das Entwicklungsziel die Erhaltung der Heideflächen ist.

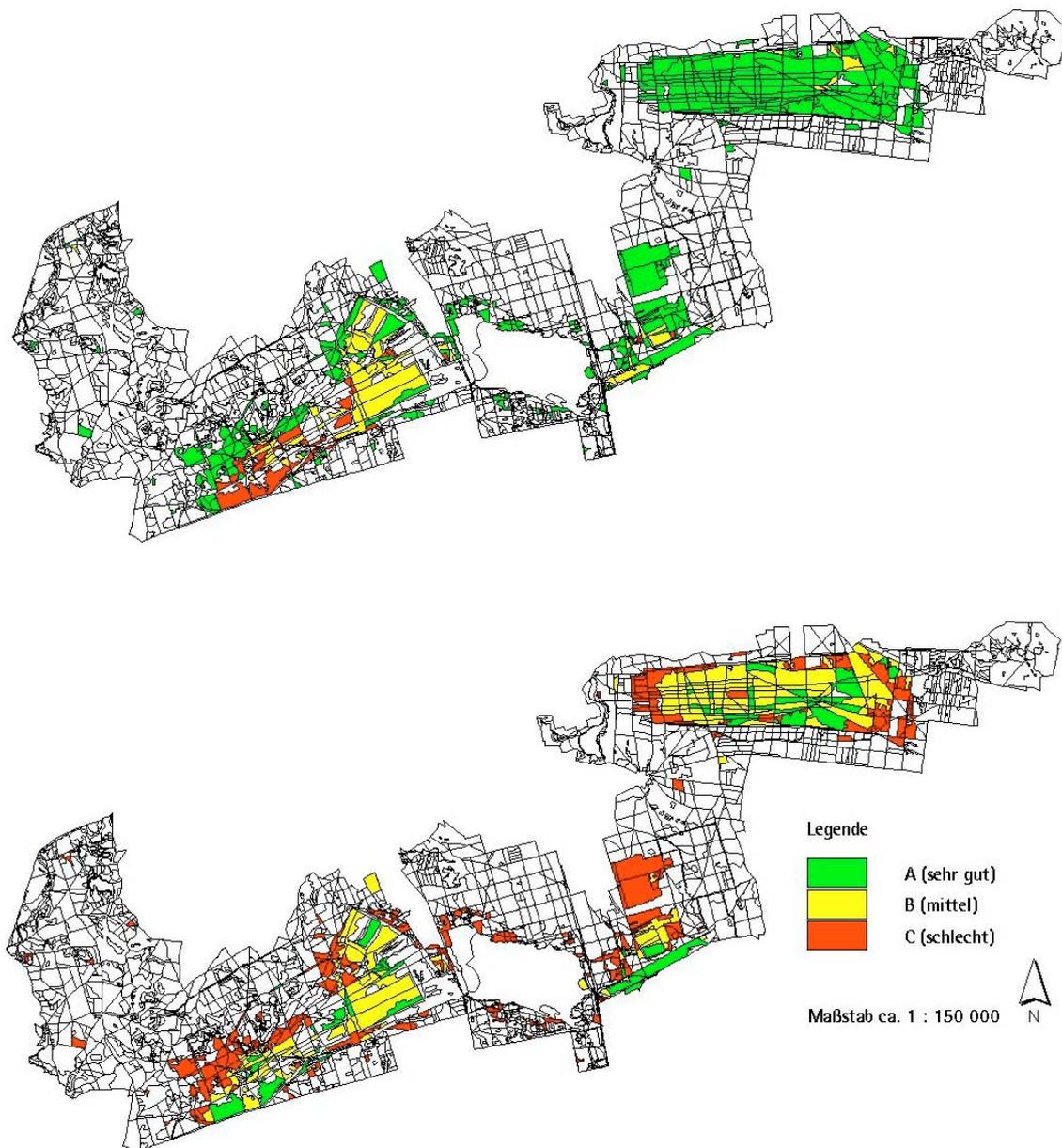


Abb. 6.10: Beispiel für die Anwendung der Klassifikationsergebnisse in den FFH-Gebieten Lieberoser Endmoräne und Reicherskreuzer Heide (oben: Bewertung für den Indikator Gras- und Staudenflur, unten: Bewertung für den Indikator Gehölzaufwuchs)

Da der CIR-Luftbildinterpretationsschlüssel (mit einigen Einschränkungen aufgrund der fehlenden Stereo-Informationen) auf die Quickbird-Satellitendaten angewendet werden kann, ist die Aufstellung von Zeitreihen möglich. Gerade für die Beobachtung von Sukzession ist die BTNTK eine wichtige Basisinformation.

In Abb. 6.11 ist die fortschreitende Sukzession an der Wanderdüne in Jüterbog dargestellt. Die Nutzungsauffassung nach Abzug der WGT-Streitkräfte hat eine Verringerung der offenen Sandflächen und eine schnelle Ausbreitung von Gras- und Staudenfluren zur Folge. Auch der Gehölzaufwuchs hat stark zugenommen.

In Zukunft kann durch die Verfügbarkeit der pixelgenauen Indikatoren ein wesentlich genaueres Änderungsbild erstellt werden.

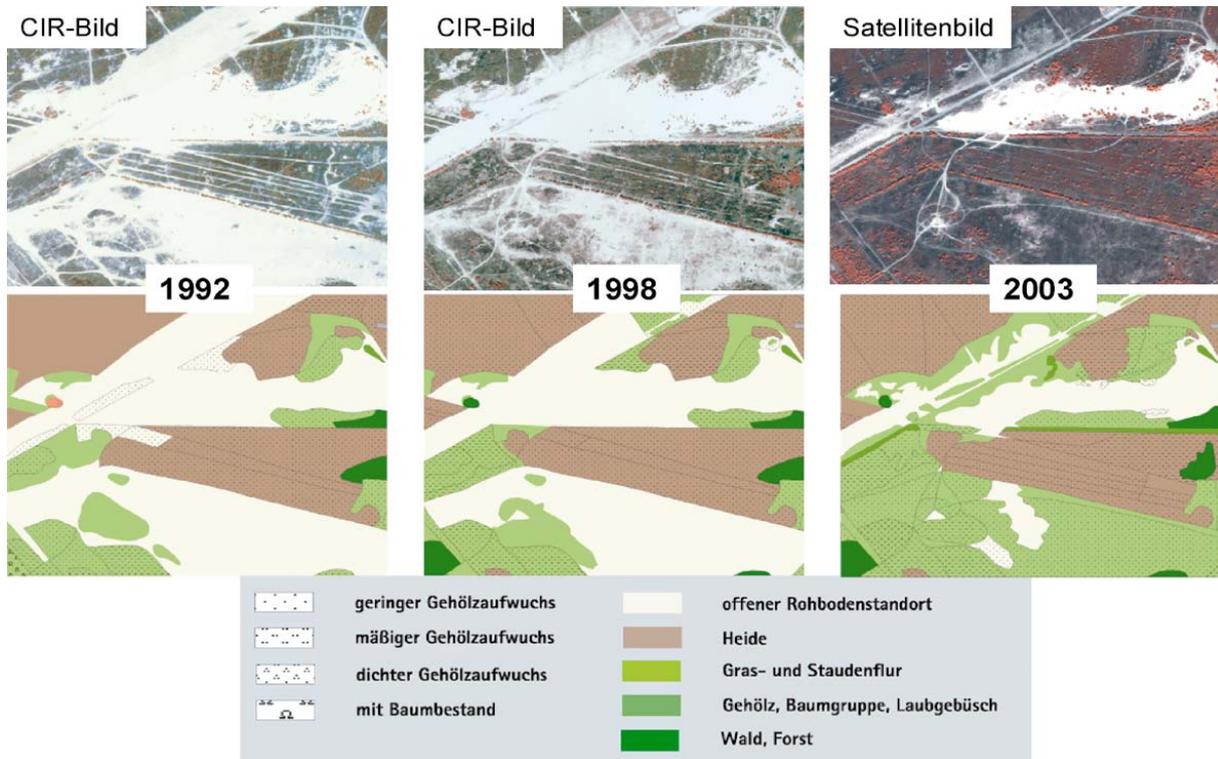


Abb. 6.11: Sukzessionsmonitoring am Beispiel der Flugsanddüne bei Jüterbog (von links nach rechts: CIR-Luftbild von 1992 und stereoskopische Bildinterpretation, CIR-Luftbild von 1998 und stereoskopische Bildinterpretation, Quickbird-Satellitenbild von 2003 und monoskopische Bildinterpretation)

7. Auswertung

Die in Kapitel 6 gezeigten Beispiele stellen nur einzelne Auszüge aus den gebietsweiten Klassifikationsergebnissen dar. Diese müssen mit Hilfe einer Genauigkeitsanalyse hinsichtlich ihrer Trefferquote bewertet werden, um die Übereinstimmung der Ergebnisse mit der Realität einschätzen zu können (Abschnitt 7.1). Um zu prüfen, ob das Verfahren für die Fragestellung des FFH-Monitorings geeignet und zuverlässig ist, müssen die erzielten Ergebnisse tiefer gehend validiert werden. Ein wichtiger und gerade für das Monitoring unerlässlicher Parameter ist die Reliabilität, d.h. die Zuverlässigkeit der Methoden. Diese kann getestet werden, indem das gleiche Verfahren unter den gleichen Bedingungen mehrmals wiederholt wird und die Ergebnisse auf Unterschiede analysiert werden. Im vorliegenden Fall ist die Reliabilität der verwendeten Rechenverfahren sehr hoch, da ausschließlich eindeutige Algorithmen und Relationen verwendet werden. Bei Wiederholung unter gleichen Ausgangsbedingungen wird immer das gleiche Ergebnis erzielt. Eine Unsicherheit im Verfahren stellen dagegen die a-priori Informationen dar – die Annahme, dass sie mehrheitlich die Realität abbilden, ist in manchen Fällen nicht gegeben (ausführlich dazu in Abschnitt 7.2 und 7.3). Des Weiteren stellt sich die Frage der Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Gebiete, Daten und Fragestellungen (Abschnitt 7.2). Anhand ausführlicher Anwendungstests soll dies belegt werden. Die Objektivität, d.h. die Unabhängigkeit des Verfahrens von einem Bearbeiter ist im Vergleich zu einer rein visuellen Auswertung hoch, da die Einbeziehung der automatisch erzeugten Klassifikationsergebnisse die Konstanz der visuellen Interpretation erhöht. Die Berechnung der Prozentanteile von Indikatoren pro Fläche stellt ein sehr objektives Mittel dar, Strukturen zu bewerten. Schätzungen am Bildschirm oder im Gelände sind wesentlich ungenauer und sehr subjektiv. Eine ausführliche Analyse aller möglichen Fehler des gesamten Verfahrens folgt in Abschnitt 7.3.

7.1 Genauigkeitsanalyse

Die Genauigkeit einer Klassifikation bezeichnet den Grad der Übereinstimmung der klassifizierten Objekte mit den real vorhandenen Objekten. Diese Bewertung ist notwendig, da nur so die Verlässlichkeit des Klassifikationsergebnisses objektiv bestimmt werden kann. Dazu eignet sich die in der Fernerkundung häufig verwendete Genauigkeitsanalyse in Form einer Konfusionsmatrix (vgl. STORY & CONGALTON, 1986). Dabei sind zwei Parameter von Interesse:

- die Producers Accuracy, welche Fehler des Ausschlusses und damit die Untererfassung von Objekten beschreibt (z.B. sind zehn Bäume real gezählt worden, aber nur acht wurden insg. klassifiziert)
- die Users Accuracy, welche Fehler des Einschlusses und damit die Übererfassung von Objekten beschreibt (z.B. sind insg. zwölf Bäume klassifiziert worden, aber nur zehn wurden real gezählt)

Da nicht das gesamte Klassifikationsergebnis mit den realen Gegebenheiten verglichen werden kann, muss eine geeignete Auswahl an Vergleichsobjekten getroffen werden. Zum Vergleich können sowohl terrestrisch erhobene Daten als auch aus Fernerkundungsdaten visuell kartierte (und eindeutig bestimmbare) Objekte herangezogen werden. Die Vergleichsobjekte können Punkte (Pixel), Linien oder Flächen darstellen. Gerade bei Fernerkundungsdaten mit einer sehr hohen geometrischen Auflösung stellt es sich sehr schwierig dar, ausgewählte einzelne Pixel vor Ort zu lokalisieren. Hier sind größere Flächen als Vergleichsobjekte wesentlich geeigneter.

Das Design der Genauigkeitsanalyse ist von großem Einfluss auf die Bewertung der Genauigkeit. Aufgrund der heterogenen Datenlage werden verschiedene Ansätze verfolgt, um eine bestmögliche Einschätzung der Trefferquote zu erhalten. Allgemein gilt, dass die Verwendung von Zufallspunkten (stratified random sample) die beste und unvoreingenommenste Methode der Genauigkeitsanalyse ist (CONGALTON & GREEN, 1999). Dabei wird für jede Klasse in Abhängigkeit ihres Vorkommens eine bestimmte Anzahl an Kontrollobjekten erzeugt, die Größe der Stichprobe sollte ausreichend sein und mit Hilfe des angestrebten Konfidenzintervalls in Abhängigkeit von der Anzahl der Klassen berechnet werden. Die Auswertung der Konfusionsmatrix sollte nicht nur mit der Berechnung der Gesamtgenauigkeit

erfolgen, sondern auch die Ermittlung von Kappa einbeziehen, um zufallskorrigierte Werte zu erhalten. Die Gesamtgenauigkeit ergibt sich aus der Summe der Hauptdiagonalen der Konfusionsmatrix dividiert durch die Gesamtzahl aller Vergleichsobjekte. Für Kappa werden dagegen alle Elemente der Konfusionsmatrix in die Berechnung einbezogen. Der Wert ergibt sich aus der Differenz zwischen tatsächlicher Übereinstimmung der Klassifikationsergebnisse mit den Vergleichsobjekten und zufälliger Übereinstimmung von zufällig verteilten Klassen mit den Vergleichsobjekten (vgl. CONGALTON & GREEN, 1999 und ROSENFELD & FITZPATRICK-LINS, 1986).

Die Vorgehensweise des stratified random sample wurde für alle Klassen gewählt, die anhand einer visuellen Überprüfung im Satellitenbild bewertet werden können (z.B. Wasser oder Gehölz). Die Klassen, die visuell nicht eindeutig zu identifizieren sind, wurden mit Hilfe eines cluster samples innerhalb terrestrisch kartierter Flächen bestimmt (z.B. Sandtrockenrasen). Dies kann eine Voreingenommenheit bei der Berechnung der Gesamtgenauigkeit bewirken, da die terrestrisch kartierten Flächen teilweise auch in die Entwicklung des Klassifikationsverfahrens eingeflossen sind. Da sie jedoch nicht direkt als Trainingsflächen verwendet werden (das gesamte Bild wird mit Hilfe der Wissenbasis auf Trainingsgebiete geprüft), können sie dennoch verwendet werden.

Zusätzlich kamen noch zwei andere Methoden der Referenzdatenerhebung zum Einsatz, um auszuschließen, dass das Ergebnis durch bereits verwendete Flächen beeinflusst wird. Zum einen wurde im Testgebiet Jüterbog eine Kartierung von 273 Flächen in 7 Klassen entlang von Transekten durchgeführt. Dabei wurden durch Peilung zwischen zwei markanten Punkten im Gelände (Bäume oder Hauskanten) und einer Messung mit dem Maßband aller 30 m Punkte gesetzt, die Aufnahme der dominierenden Vegetation erfolgte im Radius von 2 m um diese Punkte (siehe Abb. 7.1). Die Kreisflächen wurden mit dem Klassifikationsergebnis überlagert, um danach pro Kreis die Klasse mit dem größten Flächenanteil (Majority Class) zu berechnen.

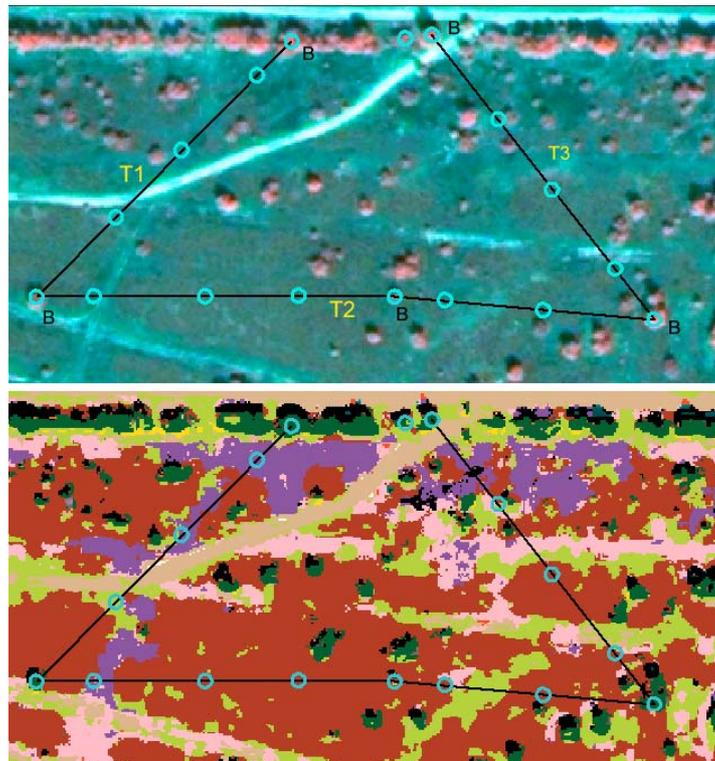


Abb. 7.1: Beispiel für die Festlegung der Transekten und Messradien – B bezeichnet markante Peilungspunkte (Bäume) (oben: Quickbird-Bild, pansharpened, unten: Klassifikationsergebnis)

In Tab. 7.1 sind die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für die Transektenkartierung in Jüterbog dargestellt. Der signifikante Kappa-Wert von 0.87 und die Gesamtgenauigkeit von 91 % bezeugen eine hohe Übereinstimmung.

	Klasse	1	2	3	4	5	6	7	Σ	Prod. Acc.	Users Acc.
1	Gehölz	134	7	0	8	1	0	0	150	1.00	0.89
2	Zwergstrauchheide	0	29	0	0	0	0	2	31	0.81	0.94
3	offen/Sand	0	0	5	0	2	0	0	7	1.00	0.71
4	Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	0	29	0	0	0	29	0.74	1.00
5	Sandtrockenrasen, kryptogamenarm	0	0	0	1	18	0	0	19	0.75	0.95
6	Sandtrockenrasen, kryptogamenreich 1	0	0	0	1	3	17	0	21	1.00	0.81
7	Sandtrockenrasen, kryptogamenreich 2	0	0	0	0	0	0	16	16	0.89	1.00
	Summe:	134	36	5	39	24	17	18	273		
Overall Accuracy:		0.91 (91 %)									
Kappa:		0.87									
P:		< 0.00001									

Tab. 7.1: Konfusionsmatrix und Gesamtgenauigkeit, ermittelt aus einer Transektenkartierung in Jüterbog

In Ermangelung eigener terrestrischer Aufnahmen für Schwedt (Archivaufnahme 2003) wurden DGPS- und GPS-gestützte Vegetationsaufnahmen der Universität Greifswald eingesetzt.¹⁸ Die Flächen wurden 2004 und 2005 im 5 x 5 m Raster eingemessen. Die Daten lagen im Krassowski-Koordinatensystem vor und mussten nach ETRS'89 transformiert werden, dabei wurden geringfügige Abweichungen festgestellt. Außerdem kann die Lageverschiebung der GPS-Messungen zwischen 2 und 6m betragen. Es musste also ein Weg gefunden werden, die Genauigkeitsanalyse trotz möglicher Verschiebungen durchzuführen. Die Daten beinhalten Deckungsgrade von Rohrglanzgras, Wasserschwadern und Großseggen, ein Vergleich der beiden Aufnahmejahre 2004 und 2005 ergab, dass die Deckungsgrade stark schwanken können, ein Rückschluss auf den Deckungsgrad 2003 kommt also nicht in Frage. Zur Lösung dieses Problems wurde ein 10 m Puffer um den Mittelpunkt der Flächen gezogen, und darin wurde jeweils nur die Anwesenheit oder Abwesenheit zweier Klassen bewertet (Röhricht und Großseggen). Alle anderen Klassen des Testgebietes Schwedt wurden mit Zufallspunkten visuell überprüft.

Die erreichten Genauigkeiten sind im Vergleich in Tab. 7.2 dargestellt, die einzelnen Konfusionsmatrizen sind im Anhang in Tab. A.3 bis Tab. A.6 aufgeführt.

Alle Bilder wurden mit Hilfe von Trainingsgebieten klassifiziert, die wissensbasiert aus der BTNTK 1992/93 abgeleitet wurden. Es wurden keine weiteren Zusatzdaten verwendet. Als Eingangsklassen wurden immer die aggregierten Klassen verwendet, um die Anzahl an Punkten zu reduzieren. Ausserdem erscheint es im Zusammenhang mit dem FFH-Monitoring nicht sinnvoll, z.B. die verschiedenen Dacharten zu bewerten (stattdessen wird die Klasse „versiegelt“ bewertet).

¹⁸ Zur Verfügung gestellt von Frau Tanneberger

Klasse	Jüterbog		Potsdam		Schwedt		Lieberose	
	Prod. Acc.	Users Acc.						
Wasser	0.88	1.0	1.00	1.00	1.00	0.96	1.00	1.00
Arten der Wasserlinsen	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.83
Arten der Schwimmblattvegetation	-	-	1.00	0.81	0.67	0.92	0.57	1.00
Röhricht an Gewässern	1.0	1.0	0.86	1.00	0.76	0.80	0.83	0.95
offener Boden	1.0	0.88	0.83	0.83	0.95	0.86	1.00	0.95
Arten der Gras- und Staudenfluren	0.93	0.83	0.82	0.85	0.89	0.72	1.00	0.77
Arten des torfmoosdominierten Zwischenmoores	-	-	-	-	-	-	0.50	0.77
Landröhricht	0.91	0.79	0.77	0.77	0.95	0.79	0.72	0.82
Großseggenröhricht	0.90	1.0	0.90	0.90	0.64	1.00	0.95	0.83
Arten der Feuchtwiesen	1.0	0.83	0.81	0.94	-	-	0.81	0.76
Arten der feuchten Hochstauden	-	-	0.89	0.81	-	-	0.68	1.00
Arten der Flutrasen	-	-	-	-	0.83	1.00	-	-
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0.85	0.90	0.67	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	0.89	0.89	-	-	-	-	0.83	0.95
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	0.88	0.83	-	-	-	-	0.80	0.80
Grünland, intensiv	0.73	0.94	0.54	0.54	-	-	0.76	0.76
Arten der Frischwiesen/-weiden	0.96	0.96	0.88	0.85	-	-	0.77	0.77
Grünland, gemäht	-	-	0.73	0.89	0.87	0.74	0.91	0.91
Trockene Sandheide	0.95	0.95	-	-	-	-	1.00	0.92
Besenginsterheide	-	-	-	-	-	-	-	-
Gehölz	0.92	1.0	0.96	0.93	0.89	0.95	1.00	0.91
Acker	1.0	1.0	0.90	0.79	1.00	0.92	0.88	0.91
Arten der Ackerbrache			0.70	0.88	0.57	0.86	0.88	0.85
versiegelt	0.78	0.82	1.00	0.91	0.82	0.95	0.95	0.95
Overall Accuracy	0.91		0.88		0.85		0.88	
Kappa	0.90		0.86		0.84		0.87	
P	< 0.00001		< 0.00001		< 0.00001		< 0.00001	

Tab. 7.2: Klassifikationsgenauigkeiten für die Testgebiete Jüterbog, Lieberose, Schwedt und Potsdam

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Bewertung der Ergebnisse ein komplexes Vorgehen erfordert. Jüterbog hat im Vergleich mit den anderen Testgebieten am besten abgeschnitten. Dies hat mehrere

Ursachen. In Jüterbog kommen nur wenige Klassen vor, die aufgrund ihrer ähnlichen spektralen Eigenschaften problematisch sind, und die Genauigkeit der BTNTK 1992/93 ist vergleichsweise gut. Das Satellitenbild von Potsdam ist eine Hochsommeraufnahme, die bereits in der Diskriminanzanalyse schlechtere Ergebnisse zeigte als die anderen Gebiete. Dazu kommt noch das verbreitete Auftreten von Problemklassen wie Grünland und Acker und die unzureichende Genauigkeit der BTNTK. Die Treffsicherheit könnte noch wesentlich erhöht werden, wenn man auf die Annahme vertrauen könnte, dass sich ein Großteil der Flächen in seinem Hauptcharakter nicht geändert hat. Das ist jedoch in manchen Gebieten überhaupt nicht der Fall, wie am Beispiel von Potsdam gezeigt werden soll. In Abb. 7.2 ist der Unterschied der BTNTK 1992/93 zur BTNTK 2003 dargestellt (die unterschiedlichen CIR-Schlüssel wurden ineinander übersetzt, sind also eindeutig vergleichbar), die roten Flächen stellen allein den Wechsel des Biotopcodes in der Hauptgruppe dar, d.h. also z.B. von Grünland zu Acker oder von Niedermoor zu Grünland etc. Praktisch hat sich der größte Teil des Offenbereiches in den letzten zehn Jahren grundlegend verändert, da sich die Flächen ohne Änderung in der Hauptgruppe zudem überwiegend in der Nutzungsintensität verändert haben. Die wissensbasierte Extraktion von Trainingsgebieten mit diesen Basisdaten kann also nicht optimal sein, da für die Klassen mit sehr ähnlichen Signaturen keine ausreichenden oder fehlerhafte Trainingsgebiete gefunden werden.

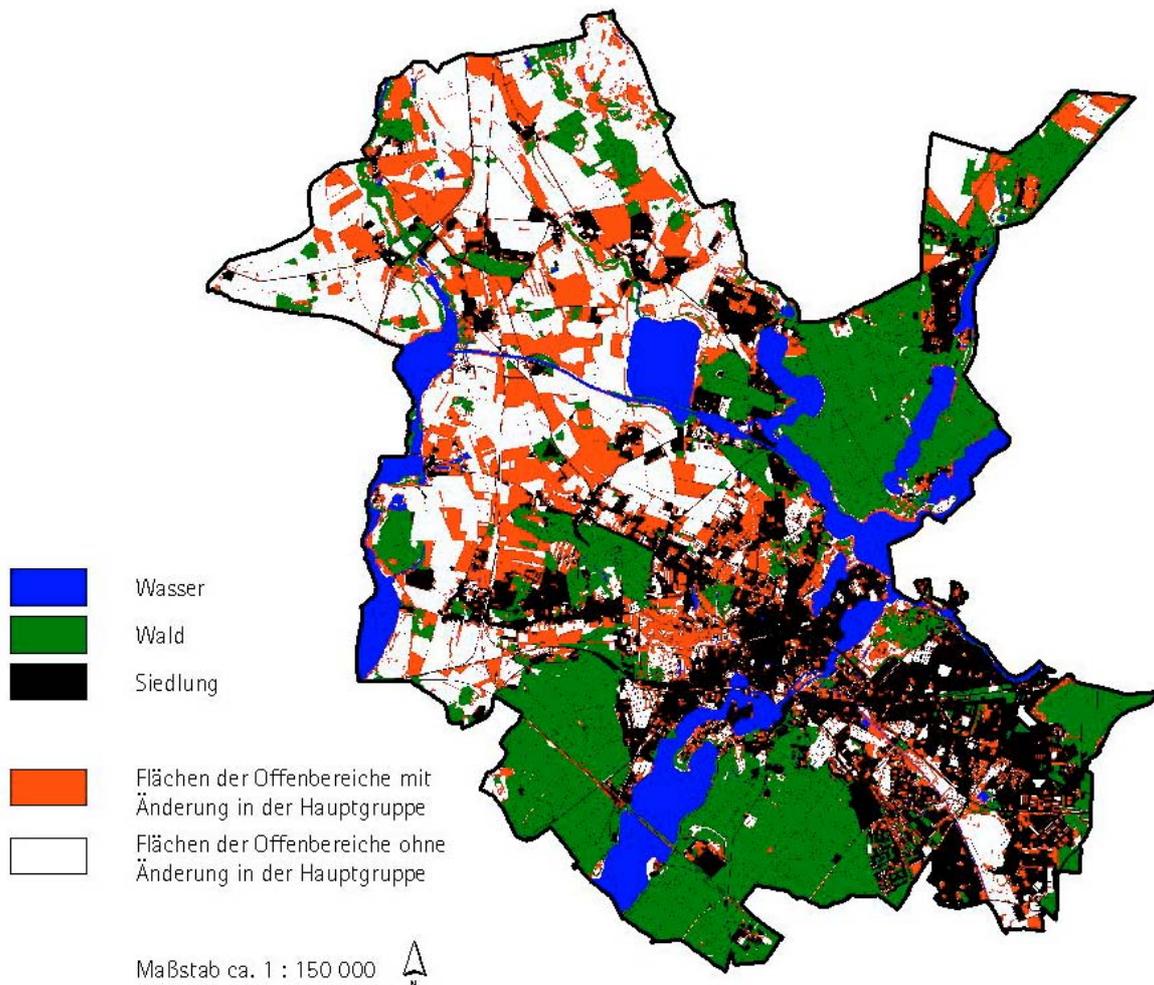


Abb. 7.2: Veränderungen in der Hauptgruppe des Biotopcodes in Potsdam von 1992/93 zu 2003

Die Datenlage für Schwedt ist ähnlich schlecht, so dass einige Regeln der Wissensbasis ausgeschaltet werden mussten. In Lieberose stellt sich die Lage anders dar, denn die BTNTK ist für dieses Gebiet

zufriedenstellend. Der hohe Aufnahmewinkel der Satellitenbilder in Lieberose führt jedoch zu einer schlechten Bildqualität, die sich auch auf das Klassifikationsergebnis auswirkt.

Dennoch ist die Genauigkeit der Klassifikation insgesamt sehr zufriedenstellend. Im Folgenden sollen einige Verwechslungen vertieft erläutert werden. Die problematischen Klassen sind dabei gerade diejenigen, die sich stark ähneln und für die die a-priori Information aus den Grundlagendaten sehr wichtig ist.

Es kommt häufig zur Verwechslung von Intensivgrünland und Acker sowie von Intensivgrünland und Arten der Frischwiesen, die jedoch manchmal mit einer visuellen Nachinterpretation ausgeräumt werden kann. Die Verwechslung feuchter Hochstauden mit Gehölz (junge Erlen) im Testgebiet Lieberose liegt an der schlechten Bildqualität, die sehr verwischten Flächen haben wenig Textur und werden deshalb nicht als Bäume erkannt. Die Überschneidung von Röhricht und feuchten Hochstauden sowie von Arten der Feuchtwiesen und Röhricht (*Phalaris*) bzw. Intensivgrünland und Röhricht (*Phalaris*) war bereits in der Diskriminanzanalyse abzulesen. Interessant ist jedoch, dass diese Verwechslungen stark mit der Güte der als a-priori Wissen verwendeten Grundlagendaten zusammenhängen, denn in einem zusätzlich untersuchten Gebiet in Thüringen (siehe Abschnitt 7.2.2.3), das mit aktuelleren Grundlagendaten klassifiziert wurde, ist die Genauigkeit dieser Klassen sehr viel höher. Es überschneidet sich außerdem Landröhricht mit Röhricht an Gewässern. Die Klasse „Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore“ ist insgesamt schwierig zu bewerten, da sie nur in Lieberose vorkommt und auch da nur sehr kleinflächig und in beeinträchtigter Form. Es kommt hier zu Verwechslungen mit Röhricht oder Schwimmblatt am Rand der Schlenken und mit Gras- und Staudenfluren (Pfeifengras). Die Klassifikation von Sandtrockenrasen auf Wegen wird einerseits durch wirklich vorhandenen Bewuchs in der Wegmitte verursacht oder aber durch Mischpixel, da die Wege oft sehr schmal sind und randlicher Bewuchs spektral in die Wegpixel einstreut. Besenginster kommt in den vier Testgebieten nur ganz kleinflächig vor. In diesen Bereichen ist in den Grundlagendaten keine Heide kartiert, so dass keine Trainingsgebiete dafür gefunden werden. Statt dessen werden sie als Zwergstrauchheide klassifiziert, für die FFH-Bewertung ist dies nicht von Relevanz, da der Indikator beide Heidearten zusammenfasst.

Die Klassifikationsgenauigkeit steht im Zusammenhang mit der Objektgröße (vgl. HEIDEN, 2004). Objekte, die größere Flächen einnehmen, sind oft mit höherer Genauigkeit zugeordnet als sehr kleine Flächen. Dieses Phänomen kann auch durch die mittlere euklidische Distanz, die die Objekte im Merkmalsraum zu den Mittelpunkten ihrer Signaturen einnehmen, belegt werden (Abb. 7.3).

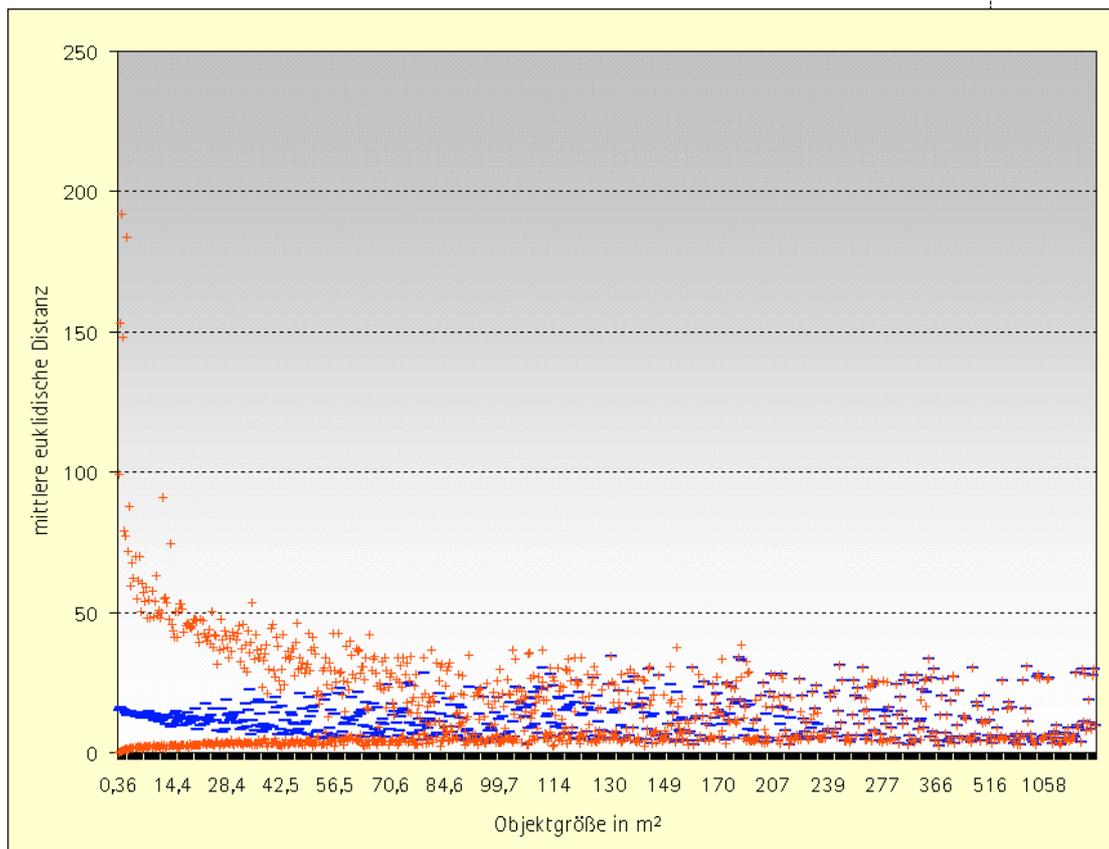


Abb. 7.3: Box-Plot der mittleren euklidischen Distanz in Abhängigkeit von der Objektgröße (blau: Median, rot: Minimum- und Maximum-Werte)

Insgesamt ist die Abhängigkeit zwar sehr gering, was an den blauen Medianstrichen im Box-Plot ersichtlich wird, jedoch zeugen die roten Maximalwerte von einer deutlichen Abnahme der Distanz zwischen $0,36 \text{ m}^2$ (1 Pixel) und 25 m^2 (70 Pixel).

7.2 Übertragbarkeit des Verfahrens

Innerhalb der Testgebiete, die für die Methodenentwicklung zur Verfügung standen, hat sich das Verfahren als übertragbar erwiesen. Dies muss jedoch quasi so sein, da die Testflächen und damit auch die gebietsspezifischen Eigenarten in die Modellbildung eingeflossen sind. Um nun zu prüfen, inwiefern das Verfahren tatsächlich übertragbar ist, wurden mehrere Anwendungsfälle definiert:

- andere Grundlagendaten/gleiche Fragestellung
- andere Aufnahmezeitpunkte und Gebiete/gleiche Fragestellung
- andere Grundlagendaten/andere Aufnahmezeitpunkte und Gebiete/andere Fragestellung
- andere Auflösungsstufen/gleiche Fragestellung

Grundlagendaten sind in diesem Falle die Vektordaten, die als a-priori Wissen in die Wissensbasis eingehen (z.B. BTNTK).

Diese Liste ließe sich noch erweitern auf andere Fernerkundungsdaten, da aber leider keine geeigneten Bilder anderer Sensoren im Projekt zur Verfügung standen, konnte dies nicht getestet werden. Anhand von Tests mit verschiedenen simulierten Auflösungsstufen kann dennoch bewertet werden, inwiefern das Verfahren bei nicht so hoch aufgelösten Sensoren noch sinnvoll einsetzbar ist.

7.2.1 Andere Grundlagendaten

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens auf andere Fragestellungen und andere Regionen ist, dass es möglich sein muss, ganz unterschiedliche Grundlagendaten zu verwenden. Außerdem ist von Interesse, wie sensibel das Verfahren auf unterschiedlich exaktes a-priori Wissen reagiert. Folgende Hypothese soll untersucht werden:

Die Aktualität, geometrische Genauigkeit und Klassentiefe der Zusatzdaten beeinflusst die Klassifikationsgenauigkeit insgesamt (steigende Genauigkeit = steigende Trefferquote). Dies geschieht jedoch in Abhängigkeit von der Klasse – Objekte mit sehr charakteristischen Signaturen werden weniger stark beeinflusst als z.B. Vegetationsklassen mit hohem NDVI.

Diese Hypothese soll anhand des gesamten FFH-Gebietes im Testgebiet Jüterbog untersucht werden, weil für diese Fläche die meisten Basisdatensätze zur Verfügung stehen (Abb. 7.4 und Abb. 7.5). Zum einen wurde die in Brandenburg landesweit vorliegende BTNTK von 1992/93 verwendet, die aus stereoskopischen CIR-Luftbildern mit einem Befliegungsmaßstab von 1 : 10 000 erstellt wurde. Die Lagegenauigkeit ist insgesamt aufgrund des damaligen Verarbeitungsverfahrens stark eingeschränkt (siehe Kapitel 4.4).

Weiterhin gibt es eine sehr fein differenzierte BTNTK von 1998, ebenfalls beruhend auf stereoskopischen CIR-Luftbildern mit einem Befliegungsmaßstab von 1 : 10 000. Da die BTNTK von 1998 bereits auf der Grundlage des ATKIS DLM25/1 digitalisiert wurde, ist die allgemeine Lagegenauigkeit wesentlich höher.

Für das gesamte Testgebiet Jüterbog wurde auf Basis der Quickbird-Daten 2003 eine visuelle monoskopische Biotypen- und Landnutzungskartierung nach dem neuen Brandenburger CIR-Schlüssel vorgenommen. Die Digitalisierung erfolgte on-screen auf Grundlage des ATKIS DLM25/2. Diese Kartierung ist aufgrund der Vorgaben im neuen CIR-Schlüssel sehr viel weniger differenziert und grenzt relativ großzügig ab, ist aber sehr lagegenau.

Testweise wurde auch der CORINE Landcover 2000 Datensatz verwendet. Diese Kartierung basiert auf der überwiegend visuellen Interpretation von Satellitendaten (zumeist Landsat) aus dem Jahr 2000 und wurde im Maßstab 1 : 100 000 mit einer Flächenfalle von 25 ha durchgeführt.

Die vier verschiedenen Eingangsdatensätze wurden gleichermaßen in das Klassifikationsverfahren eingesetzt. Die Landcover-Klassen des CORINE-Datensatzes wurden dafür in die Hauptklassen der BTNTK übersetzt.

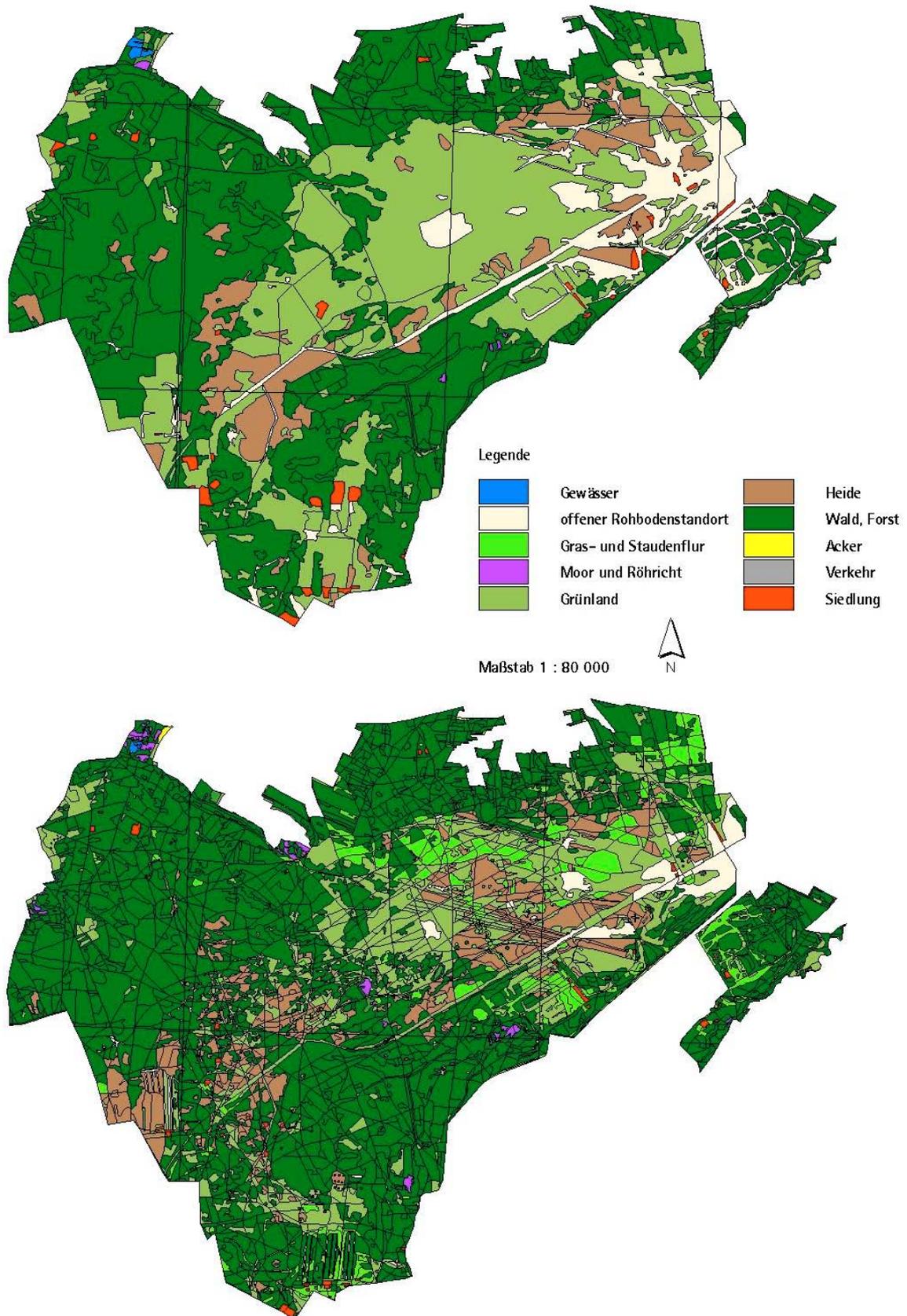


Abb. 7.4: Verschiedene Grundlagendaten in Jüterbog Teil 1 (oben: BTNTK von 1992/93, unten: BTNTK von 1998)

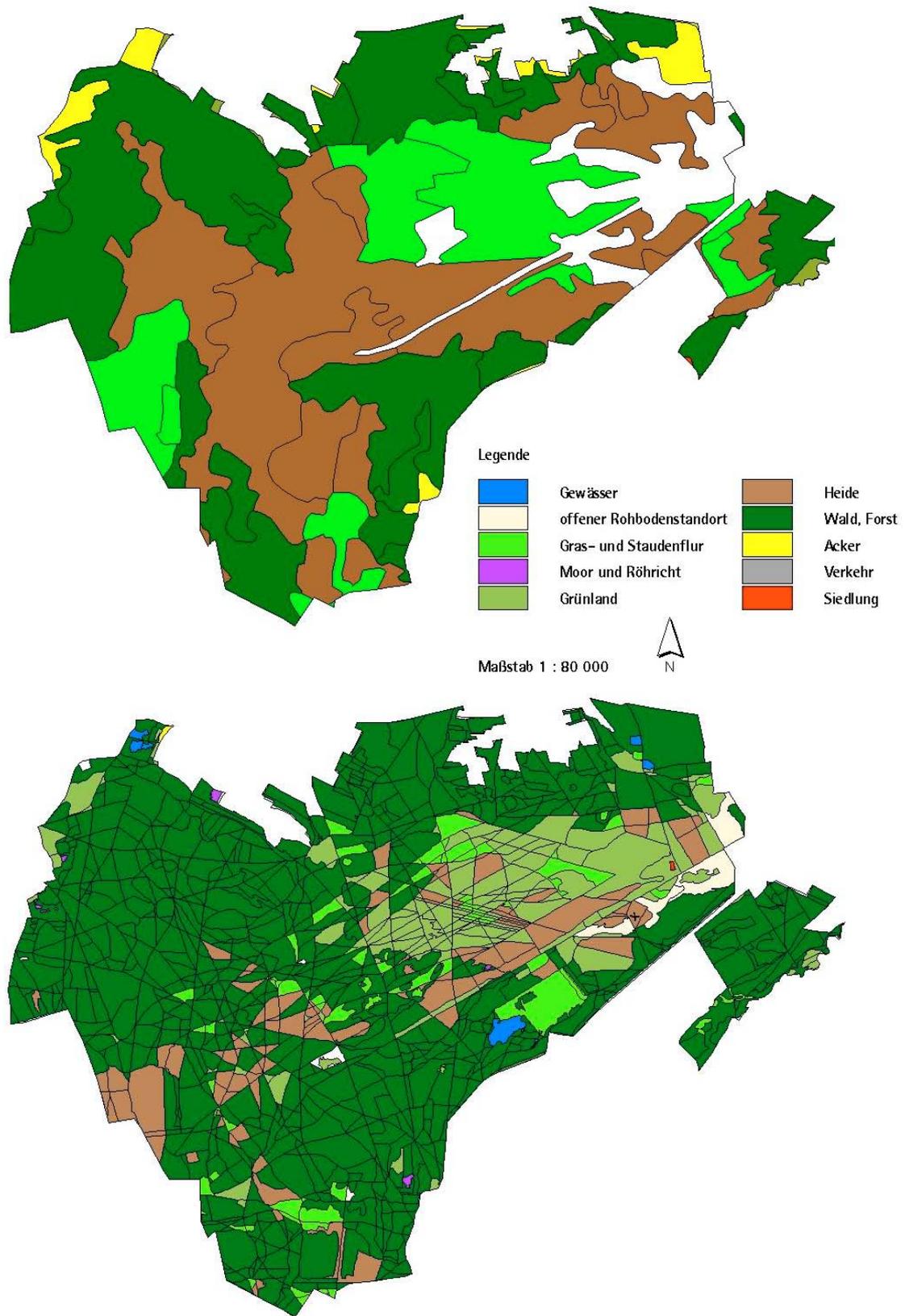


Abb. 7.5: Verschiedene Grundlagendaten in Jüterbog Teil 2 (oben: CORINE von 2000, unten: BTNTK von 2003)

Der Vergleich der vier Klassifikationsergebnisse wurde unter Einbeziehung der terrestrisch kartierten Flächen anhand einer visuellen Überprüfung der gleichen zufällig erzeugten Punkte für das bereits unter Kapitel 7.1 beschriebene Ergebnis vorgenommen (Tab. 7.3). Die einzelnen Konfusionsmatrizen sind im Anhang in Tab. A.6 bis Tab. A.9 aufgeführt.

Grundlagendaten	CIR – 1992/93		CIR – 1998		CORINE 2000		Quickbird 2003	
	Prod. Acc.	Users Acc.	Prod. Acc.	Users Acc.	Prod. Acc.	Users Acc.	Prod. Acc.	Users Acc.
Wasser	0.88	1.0	0.88	1.0	-	-	1.0	1.0
Röhricht an Gewässern	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-	1.0	0.89
offener Boden	1.0	0.88	1.0	0.91	1.0	0.95	1.0	1.0
Arten der Gras- und Staudenfluren	0.93	0.83	0.82	0.79	0.82	0.47	0.78	0.88
Landröhricht	0.91	0.79	0.91	0.76	-	-	0.95	0.83
Großseggenröhricht	0.90	1.0	0.8	1.0	-	-	1.0	1.0
Arten der Feuchtwiesen	1.0	0.83	0.8	0.73	-	-	0.9	0.82
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0.85	0.90	0.95	0.95	0.70	0.74	1.0	0.87
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	0.89	0.89	1.0	0.93	0.96	0.96	0.96	0.96
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	0.88	0.83	0.94	1.0	0.94	0.84	1.0	0.77
Grünland, intensiv	0.73	0.94	0.77	0.95	0.96	0.81	0.82	1.0
Arten der Frischwiesen/-weiden	0.96	0.96	0.91	0.91	0.41	0.36	1.0	0.92
Trockene Sandheide	0.95	0.95	0.91	0.91	0.86	0.78	0.95	1.0
Gehölz	0.92	1.0	0.92	1.0	0.92	0.85	0.92	1.0
Acker	1.0	1.0	1.0	0.92	0.95	0.80	1.0	0.96
versiegelt	0.78	0.82	0.87	0.91	0.70	0.64	0.70	1.0
Overall Accuracy	0.91		0.91		0.66		0.93	
Kappa	0.90		0.90		0.63		0.92	
P	< 0.00001		< 0.00001		< 0.00001		< 0.00001	

Tab. 7.3: Vergleich der Klassifikationsgenauigkeiten für die verschiedenen Eingangsdatensätze

Es kann festgestellt werden, dass die Verwendung der drei Datensätze der BTNTK in der Wissensbasis kaum Unterschiede in der Klassifikation ergeben, der Datensatz von 2003 ist der aktuellste und weist die höchste Gesamtgenauigkeit auf. Der CORINE-Datensatz beinhaltet keine Wasser- oder Feuchtflächen, da diese im Testgebiet unter der 25 ha-Flächenfalle liegen. Deshalb werden auch keine Trainingsgebiete für wasserabhängige Klassen gebildet und es entstehen leere Flächen. Dennoch ist es interessant zu sehen, dass die Klassen, für die Trainingsgebiete in den CORINE-Daten gefunden wurden, eine gute Klassifikationsgenauigkeit aufweisen. Entfernt man die wasserabhängigen Klassen aus der Berechnung, ergibt sich eine Gesamtgenauigkeit für CORINE von Kappa = 0.85.

Der erste Teil der Hypothese kann also bestätigt werden, die Klassifikationsgenauigkeit steigt mit zunehmender Klassentiefe – die geometrische Lagegenauigkeit hat jedoch offenbar keinen wesentlichen Einfluss. Die BTNTK von 2003 ist erheblich lagegenauer als die BTNTK von 1992/93 und hat eine vergleichbare Klassentiefe, trotzdem erhöht sich die Genauigkeit nur um 0.02 – auch die Aktualität der Daten hat in diesem Fall keinen wesentlichen Einfluss. Erwartungsgemäß weist das Ergebnis der BTNTK von 2003 die höchste Genauigkeit auf, der Unterschied in der Genauigkeit ist jedoch im Vergleich zum zehn Jahre älteren Datensatz der BTNTK 1992/93 nur geringfügig.

Der zweite Teil der Hypothese kann nicht abschließend bewertet werden, da im Testgebiet Jüterbog fast ausschließlich Klassen mit geringem NDVI vorkommen, die sehr charakteristische Signaturen haben und sich nur wenig überschneiden. Als Indiz für die klassenabhängige Zunahme der Genauigkeit mit zunehmender Klassentiefe kann jedoch gesehen werden, dass die Ergebnisse der CORINE-Klassifikation für die Klasse „Frischwiesen/-weiden“ im Vergleich zu den anderen Klassen sehr schlecht sind. Bei Einzelbetrachtung der Fehlermatrix zeigt sich, dass diese Klasse oft mit Gras- und Staudenfluren verwechselt wird – bei Verwendung der BTNTK kommt diese Verwechslung nicht so oft vor.

Insgesamt können diesen Aussagen nicht verallgemeinert werden, da die Datenlage in Jüterbog in allen drei Zeitschnitten der BTNTK vergleichsweise gut und genau war und es nur einige wenige landwirtschaftliche Flächen und nur wenige kleine Feuchtgebiete innerhalb des Gebietes gibt. In den anderen Testgebieten ist dem nicht so, die Daten weisen großflächige Fehler auf, bzw. es gab großflächige Änderungen in der Landnutzung. Es ist also eher zu erwarten, dass mit aktuelleren Daten eine wesentliche Erhöhung der Genauigkeit erfolgt.

7.2.2 Andere Gebiete und Aufnahmezeitpunkte

Die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Gebiete und Aufnahmezeitpunkte wurde anhand von vier zusätzlichen Testgebieten evaluiert (siehe Tab. 7.4). Alle Daten stammen wiederum aus dem Hoch- oder Spätsommer.

Testgebiet	Bundesland	Bildfläche in km ²	Aufnahmedatum	Wolken	Off Nadir View angle
Harras	Thüringen	36	11.07.2005	12 %	11°
Döberitz	Brandenburg	44	29.07.2004	1 %	5.6°
Hackenheide	Brandenburg	38	09.10.2005	0 %	24.5°
Stör	Schleswig-Holstein	64	21.09.2005	0 %	7°

Tab. 7.4: Übersicht über Größe und Aufnahmezeitpunkt der ausgewerteten Satellitenbilder

7.2.2.1 Hackenheide

Das FFH-Gebiet Hackenheide liegt südlich von Lehnin in Brandenburg und ist ein ehemaliger Truppenübungsplatz. Großflächige Heidevorkommen wechseln sich mit Kiefernwäldern und Sandtrockenrasen ab. Die Klassifikation wurde wie in den anderen Gebieten Brandenburgs auf Grundlage der BTNTK 1992/93 durchgeführt (siehe Karten A.16 bis A.18 im Anhang).

Als problematisch stellte sich der späte Aufnahmezeitpunkt (Oktober) der Satellitenbilder und der hohe Aufnahmewinkel (> 20°) heraus, die Laubbäume waren z. T. bereits verfärbt bzw. entlaubt und werden in diesem Zustand vom Klassifikationsalgorithmus als Landröhricht bzw. andere Vegetation erkannt. Ein weiterer Nachteil der Oktoberaufnahme sind die sehr langen Schatten, die große Bereiche überdecken.

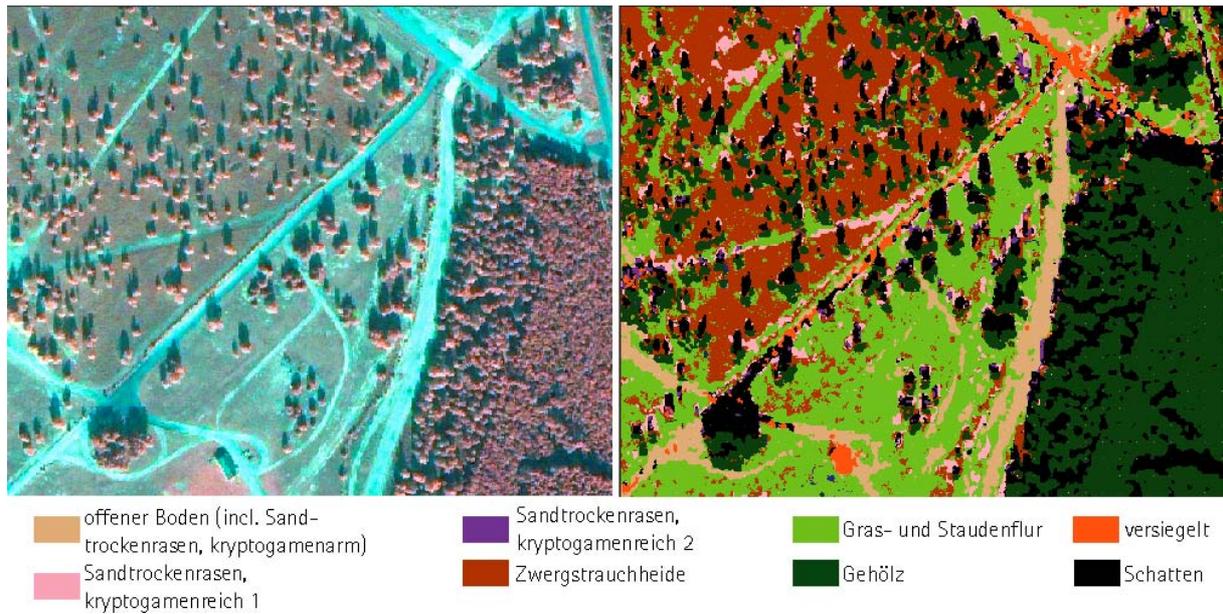


Abb. 7.6: Ausschnitt aus dem Testgebiet Hackenheide (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis)

In Tab. 7.5 sind die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse mit insgesamt 180 Punkten dargestellt, für jede Klasse wurden 20 Zufallspunkte generiert, die visuell im Satellitenbild überprüft wurden.

Die Klassifikationsgenauigkeit beträgt insgesamt 80.6 % - fehlerhafte Pixel entstehen durch Verwechslungen von Moos mit Schattenflächen und durch die bereits verfärbten Laubbaumkronen (diese werden teilweise als Landröhricht klassifiziert). Da für dieses Problem in der wissenschaftsbasierten Nachbearbeitung keine neuen Regeln eingefügt wurden, bleiben die Fehler so erhalten.

Klasse	Prod. Acc.	Users Acc.	Anzahl Punkte
offener Boden	0.95	1.0	20
Moos	1.0	0.40	20
Arten der Gras- und Staudenfluren	0.90	1.0	20
Landröhricht	1.0	0.25	20
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	1.0	1.0	20
Sandtrockenrasen kryptogamenreich	1.0	0.95	20
Trockene Sandheide	1.0	0.80	20
Gehölz	0.54	1.0	20
versiegelt	1.0	0.65	20
Summe			180
Overall Accuracy: 0.80 (80%)			
Kappa: 0.79			
P: < 0.00001			

Tab. 7.5: Klassifikationsgenauigkeit für das Gebiet Hackenheide

Die Gesamtgenauigkeit ist zwar immer noch gut, das Gebiet ist aber auch sehr einfach strukturiert, denn es kommen nur neun Klassen vor. Als Fazit gilt, dass keine Daten aus dem Oktober für ein FFH-Monitoring verwendet werden sollten, da die Schattenanteile innerhalb der Flächen dadurch extrem hoch werden.

7.2.2.2 Döberitz

Das Testgebiet Döberitz liegt nördlich von Potsdam in Brandenburg und ist ebenfalls ein ehemaliger Truppenübungsplatz und als FFH-Gebiet gemeldet (Döberitzer Heide). Döberitz ist geprägt von ausgedehnten Besenginsterheiden und Eichenwäldern, außerdem sind kleinere Niedermoore zu finden. Als a-priori Daten für die Klassifikation diente die BTNTK 1992/93 (siehe Karten A.19 bis A.20 im Anhang). In Abb. 7.7 ist ein Ausschnitt des Gebietes mit einer großen Besenginsterheide dargestellt.

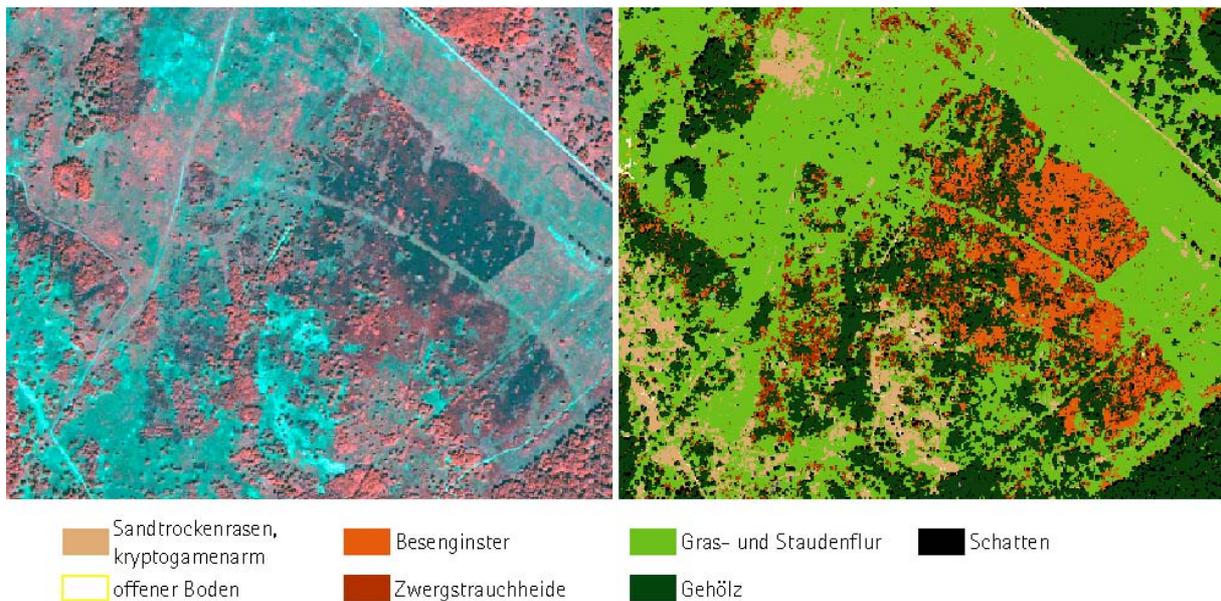


Abb. 7.7: Ausschnitt aus dem Testgebiet Döberitz (links: Quickbird-Satellitenbild, rechts: Klassifikationsergebnis)

Die Genauigkeitsanalyse erfolgte mit Hilfe einer Kombination aus insgesamt 258 visuell und terrestrisch aufgenommenen Kontrollpunkten (Tab. 7.6). Für die Klassen Großseggenröhricht und Arten der Feuchtwiesen konnten terrestrisch keine Punkte erhoben werden, so dass diese aus der Genauigkeitsanalyse herausfallen. Für eine Aufstellung der Konfusionsmatrix siehe Tab. A.10 im Anhang.

Es kommt zu häufigen Verwechslungen der Klassen Besenginster und trockene Sandheide, dies ist jedoch für die Bewertung der FFH-LRT nicht von Belang, da beide Klassen in der Oberklasse Heide zusammengefasst werden.

	Producers Accuracy	Users Accuracy	Anzahl Punkte
Wasser	0.95	1.00	19
Arten der Wasserlinsendecken	1.00	0.95	21
Röhricht an Gewässern	1.00	0.75	4
offener Boden	1.00	0.95	21
Arten der Gras- und Staudenfluren	0.95	1.00	19
Landröhricht	0.90	1.00	18
Arten der feuchten Hochstauden	1.00	0.91	11
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0.95	1.00	19
Frischwiese/-weide	0.94	1.00	15
Grünland, gemäht	0.58	1.00	7
Trockene Sandheide	0.50	1.00	10
Besenginster	1.00	0.65	31
Gehölz	1.00	1.00	20
Acker	1.00	0.83	36
versiegelt	1.00	1.00	7
Summe			258
Overall Accuracy: 0.92 (92 %)			
Kappa: 0.91			
P: < 0.00001			

Tab. 7.6: Klassifikationsgenauigkeit für das Gebiet Döberitz

7.2.2.3 Harras

Das Testgebiet Harras liegt im Bundesland Thüringen entlang des ehemaligen Grenzstreifens zu Bayern. Im abwechslungsreichen Relief lösen sich auf engstem Raum Frischwiesen und Halbtrockenrasen mit Feuchtlebensräumen ab. Als Grundlage für die Klassifikation wurde die terrestrische Offenland-Biotopkartierung Thüringens mit dem Stand 1998/99 verwendet (siehe Karten A.22 bis A.24 im Anhang). Die Lagegenauigkeit ist eingeschränkt, dafür ist die Klassentiefe und Untergliederung der Flächen sehr hoch, was sich auch in der sehr hohen Klassifikationsgenauigkeit ausdrückt. Die Genauigkeitsanalyse erfolgte mit Hilfe einer Kombination aus insgesamt 292 visuell und terrestrisch aufgenommenen Kontrollpunkten (Tab. 7.7). Für eine Aufstellung der Konfusionsmatrix siehe Tab. A.11 im Anhang.

	Producers Accuracy	Users Accuracy	Anzahl Punkte
Wasser	1.00	1.00	10
Röhricht an Gewässern	1.00	1.00	10
offener Boden	0.89	0.80	10
Arten der Gras- und Staudenfluren	0.89	0.96	26
Landröhricht	0.93	1.00	14
Großseggenröhricht	1.00	1.00	10
Arten der Feuchtwiesen	0.87	1.00	7
Arten der feuchten Hochstauden	1.00	1.00	15
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0.71	1.00	5
Grünland, intensiv	1.00	0.72	29
Arten der Frischwiesen/-weiden	0.84	1.00	21
Grünland, gemäht	1.00	0.87	15
Trockene Sandheide	0.80	1.00	4
Gehölz	1.00	0.96	53
Acker	0.91	0.95	43
Arten der Ackerbrache	0.88	0.88	8
versiegelt	1.00	0.92	13
Summe			292
Overall Accuracy:	0.94 (94 %)		
Kappa:	0.93		
P:	< 0.00001		

Tab. 7.7: Klassifikationsgenauigkeit für das Gebiet Harras

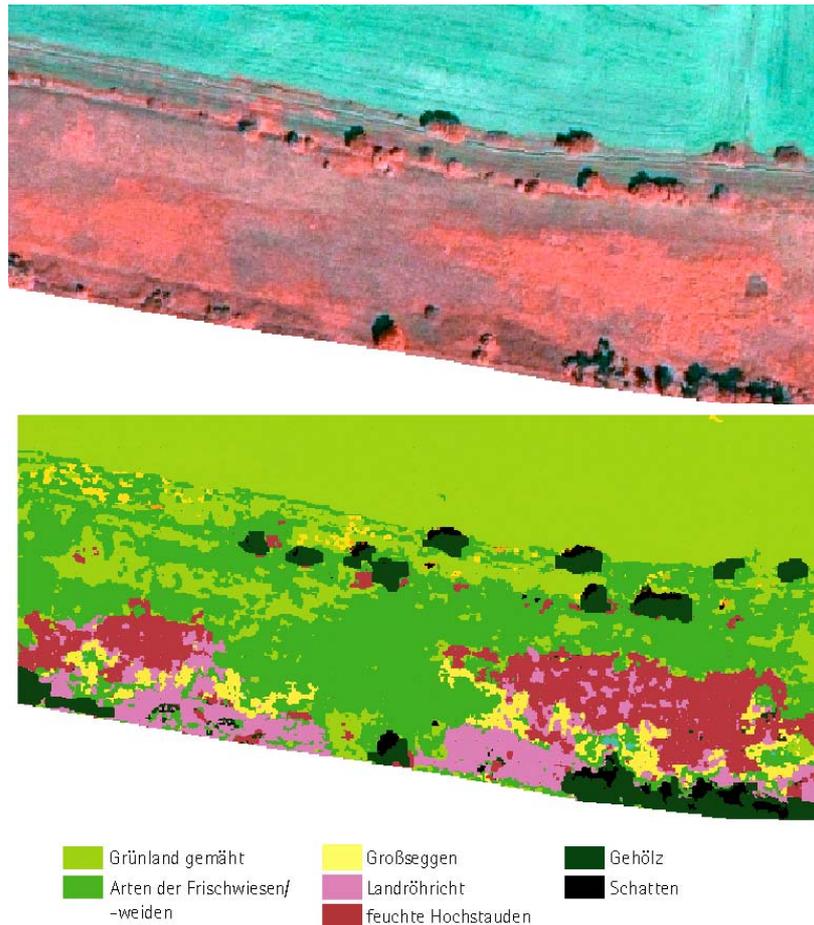


Abb. 7.8: Ausschnitt aus dem Testgebiet Harras (oben: Quickbird-Satellitenbild, unten: Klassifikationsergebnis)

7.2.3 Andere Fragestellungen

Die Einsatzfähigkeit des Verfahrens für andere Fragestellungen wurde an zwei verschiedenen Themen getestet:

1. Hochwassermodellierung
2. Siedlungsentwicklung

An einem Beispiel aus dem ersten Themenfeld soll dies näher illustriert werden. In Zusammenarbeit mit der TU Hamburg-Harburg (Arbeitsbereich Wasserbau) wurde ein Testgebiet am Fluss Stör in Schleswig-Holstein ausgewählt, für das bereits ein Hochwassermodell existiert. Die für das Modell notwendigen Oberflächenrauigkeiten wurden in einem Gitternetz nach größeren Landnutzungseinheiten grob geschätzt. Die Fragestellung war nun, inwiefern mit pixelgenauen Landbedeckungsklassen und daraus abgeleiteten Oberflächenrauigkeiten eine exaktere Modellierung möglich ist.

Für das 64 km² große Testgebiet, das am 21.09.2005 aufgenommen wurde, standen nur CORINE-Daten mit vier Landnutzungstypen und die Abgrenzung des Fluss-Schlauches zur Verfügung. Das Klassifikationsverfahren wurde ohne Anpassung angewendet, für die Suche nach Trainingsgebieten für Wasser wurde der Fluss-Schlauch verwendet, für alle anderen Klassen kamen die CORINE-Daten zum Einsatz (siehe Karten A.25 bis A.27 im Anhang).

Aufgrund der schlechten Qualität der CORINE-Daten (nur Siedlung, Acker, Grünland und Wald waren als Klassen enthalten) konnten nur wenige Trainingsgebiete für wasserabhängige Vegetationsklassen gefunden werden (ausschließlich in der Nähe des Flusses) und keine Trainingsgebiete für Klassen wie z.B. Trockenrasen. Die fehlenden Objekte werden deshalb anderen, spektral ähnlichen Klassen zugeordnet. So werden Arten des kryptogamenarmen Sandtrockenrasens je nach Dominanz von Boden bzw. Vegetation

dem offenen Boden oder der Klasse gemähtes Grünland zugewiesen. Für die Ableitung der Oberflächenrauigkeit ist dies im Gegensatz zum FFH-Monitoring jedoch kein schwerwiegender Fehler.

Da die erreichte Klassentiefe für die spezielle Fragestellung dennoch viel zu hoch war und auch eine gewisse Vergleichbarkeit mit den alten Rauigkeitsklassen ermöglicht werden sollte, mussten die Klassen entsprechend ihrer charakteristischen Oberflächenrauigkeiten nachträglich in neun Hauptklassen zusammengefasst (siehe Abb. 7.10) und mit hydrologischen Rauigkeitswerten belegt werden. Es wurde von RATH (2006) ein Schema entwickelt, das die pixelgenauen Landbedeckungsklassen aggregiert und zu Rauigkeitsklassen parametrisiert sowie die Qualität der Transformationen in einem diskreten Modellnetz bewertet (siehe Abb. 7.9). So werden z.B. alle Objektklassen, die versiegelte Oberflächen umfassen (Beton, Asphalt etc., in Abb. 7.9 auf der linken Seite von #1 bis #5 aufgelistet), zu einer Klasse „sealed“ zusammengefasst (in Abb. 7.9 auf der rechten Seite unter #1 aufgelistet), da ihre hydrologischen Rauigkeitswerte sehr ähnlich sind.

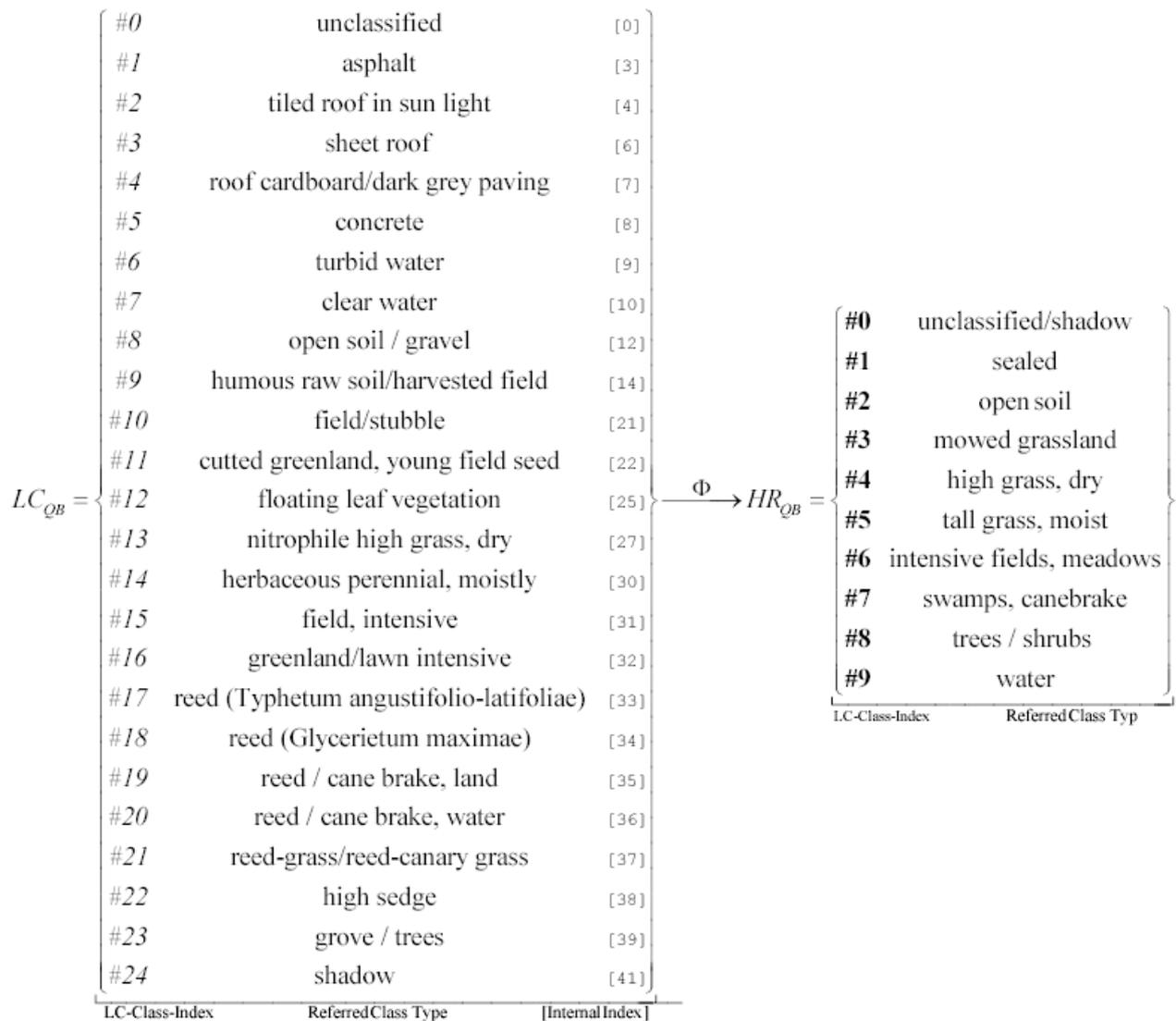


Abb. 7.9: Übersetzungsschema Teil 1 (Quelle: RATH, 2006, links: pixelgenaue Landbedeckungsklassen, rechts: zusammengefasste Klassen mit gleichen Rauigkeiten)

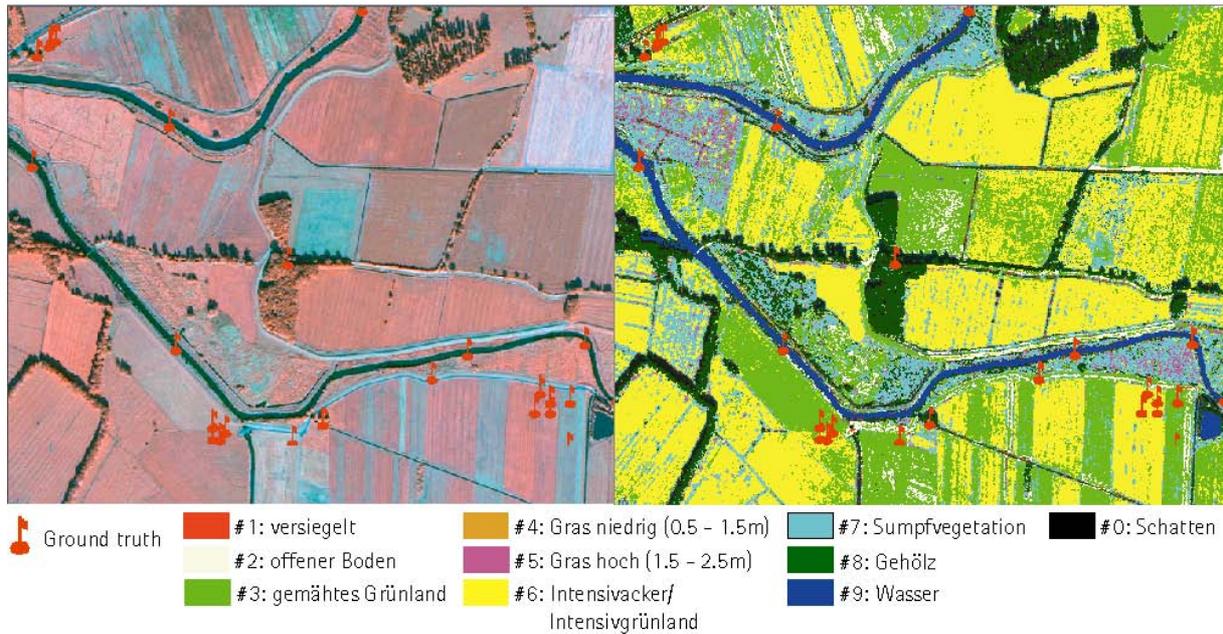


Abb. 7.10: Ausschnitt aus dem Testgebiet Stör (links: Quickbird Satellitenbild, pansharpener, RGB = 4, 3, 2, rechts: Ergebnis der aggregierten Klassifikation)

Für das zusammengefasste Klassifikationsergebnis wurden im November 2005 unabhängige Ground Truth Daten in insgesamt 190 Stichproben erhoben (RATH, 2006). Das Ergebnis ist in Abb. 7.11 dargestellt.

Error Matrix for Quickbird Land Cover Classification		Ground Truth									Users sum accuracy	
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	Σ	Acc.
Quickbird Classification	#1 sealed	45	2								47	0.96
	#2 open soil	7	8	1	1			1			18	0.44
	#3 mowed grassland	1		10				1			12	0.83
	#4 medium grass (0.5-1.5m)	1		1	6	1					9	0.67
	#5 medium grass (1.5-2.5m)				1	5			1		7	0.71
	#6 intensive fields, meadows						20				20	1.0
	#7 swamps + vegetation	1		1			3	12			17	0.71
	#8 trees/shrubs	4					1	3	31	1	40	0.78
	#9 water									21	21	1.00
Σ		59	10	13	8	6	24	17	32	22	190	
Producers' Accuracy		0.76	0.80	0.77	0.75	0.83	0.83	0.71	0.97	0.95		
Overall Accuracy		0.82										

Abb. 7.11: Genauigkeitsanalyse anhand von Ground Truth Daten (Quelle: RATH, 2006)

Für die Fragestellung der Erhebung von Oberflächenrauigkeiten für die Hochwassermodellierung ist das Verfahren mit anschließender Parametrisierung sehr gut geeignet (RATH, 2006). Selbst mit ungenauen Ausgangsdaten und späten Bildaufnahmen können ausreichend exakte Klassen ermittelt werden, obwohl Schattenbereiche problematisch sind für die Parametrisierung. Entscheidende Vorteile dieser Methode sind nicht nur die schneller und genauer verfügbaren Oberflächenrauigkeiten (aufwendige Feldbegehungen sind nicht notwendig), sondern auch eine wesentlich bessere und wirklichkeitsnähere

Parametrisierung des physikalischen Modells (RATH, 2006). Zu ähnlichen Ergebnissen, jedoch mit IKONOS-Satellitenbildern und einer segmentbasierten Klassifikation, kommen DE JONG et al. (2003).

7.2.4 Andere Auflösungsstufen

Die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Fernerkundungsdaten ist von großem Interesse, um die Kontinuität des Monitorings auch in Zukunft mit anderen Sensoren gewährleisten zu können. Leider standen keine geeigneten Satelliten- oder Luftbilder zur Verfügung, so dass mit Hilfe simulierter Daten eine Bewertung vorgenommen wurde. Zum einen wurde die Skalenabhängigkeit der Indikatoren getestet, d.h. ab welcher geometrischen Auflösung eine signifikante Änderung der Flächenanteile der Indikatoren auftritt. Mit dieser Aussage kann die theoretisch mögliche Auflösung der Fernerkundungsdaten festgestellt werden, die für das entwickelte Verfahren verwendbar ist. Es kann natürlich auch ganz andere Verfahren geben (z.B. Klassifikationen auf subpixel-Niveau), die damit auch andere Auflösungsstufen einsetzen können. Diese werden jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Ob das entwickelte Klassifikationsverfahren auf unterschiedliche Auflösungsstufen robust reagiert und die theoretisch mögliche Pixelgröße verarbeiten kann, wurde anschließend getestet (Abschnitt 7.2.4.2).

7.2.4.1 Skalenabhängigkeit

Um zu untersuchen, inwiefern auch weniger hoch aufgelöste Satellitendaten für die Ableitung der in dieser Arbeit verwendeten Indikatoren geeignet sind, wurde anhand eines Bildausschnittes von 1500 x 2500 m mit insg. 63 Polygonen und 12 Indikatoren ein Skalentest durchgeführt. Sechs verschiedene Auflösungsstufen kamen zum Einsatz: 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,5 und 10,0 m (Kantenlänge der Pixel). Die niedrigeren Stufen wurden aus dem originalen Klassifikationsergebnis durch Nearest Neighbor Resampling gewonnen (Abb. 7.12).

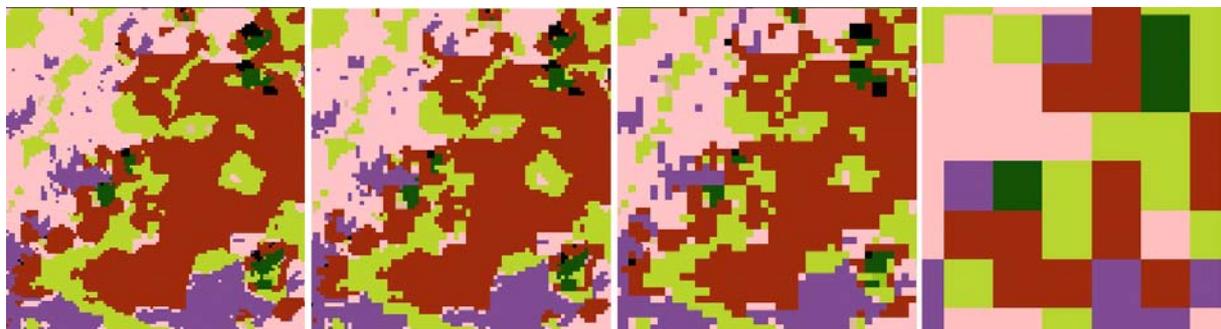


Abb. 7.12: Auflösungsstufen (von links nach rechts: 0,6, 0,8, 1,5 und 10,0 m)

Für alle Stufen wurden die Prozentanteile der einzelnen Indikatoren pro LRT-, bzw. Biotopfläche berechnet. Es zeigt sich, dass sich ganz unterschiedliche Werte ergeben, je nachdem, ob eine Klasse eher großflächig oder eher kleinflächig vorkommt. Die eher kleinflächigen Indikatoren reagieren sehr empfindlich auf eine Verringerung der Auflösung. In Abb. 7.13 ist exemplarisch das Verhalten des Indikators „offener Boden“ dargestellt. Die Prozentanteile der Klassifikation mit 0,6 m Pixelkantenlänge fungieren als Bezugsgröße. Ab einer Kantenlänge von 2,5 m kommt es vor allem in Flächen mit geringer Ausdehnung zu starken Abweichungen.

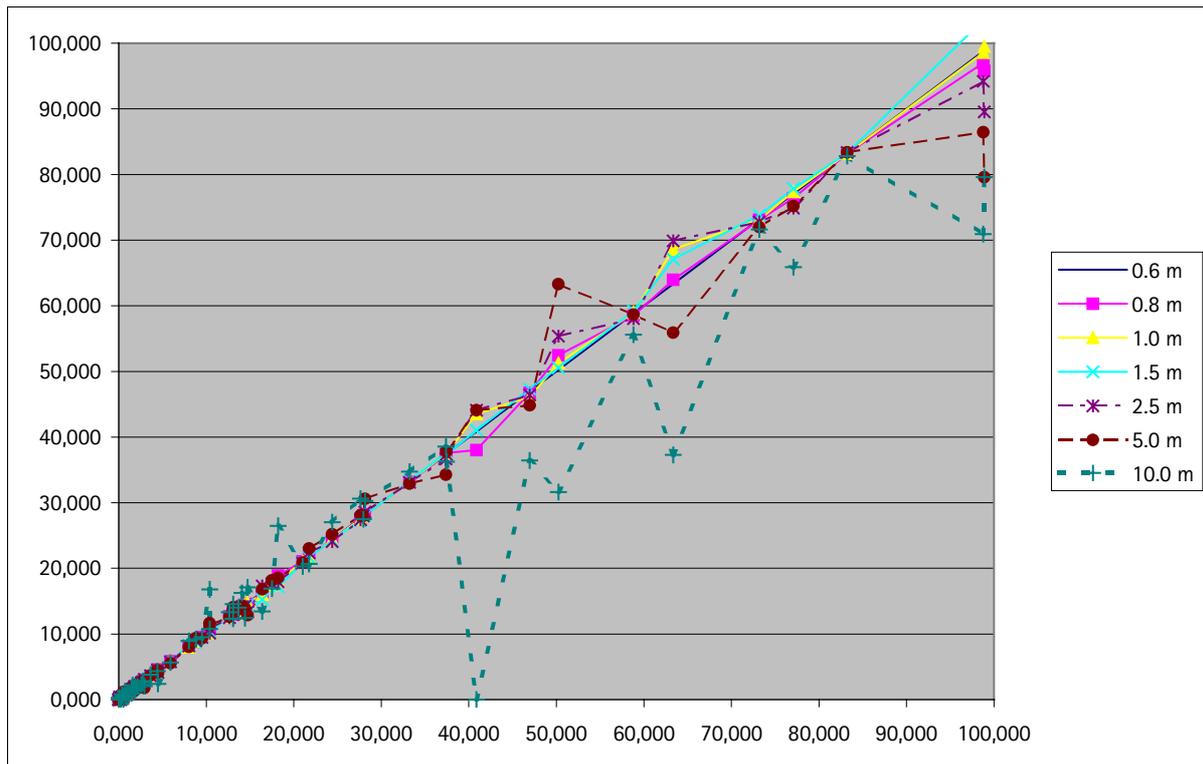


Abb. 7.13: Prozentanteile des Indikators „offener Boden“ in verschiedenen Auflösungsstufen

Die eher großflächigen Indikatoren reagieren etwas langsamer auf eine Veränderung der Auflösung. In Abb. 7.14 ist beispielhaft das Verhalten des Indikators „Gehölzbedeckung“ dargestellt. Erst ab einer Kantenlänge von 5.0 m kommt es zu größeren Abweichungen.

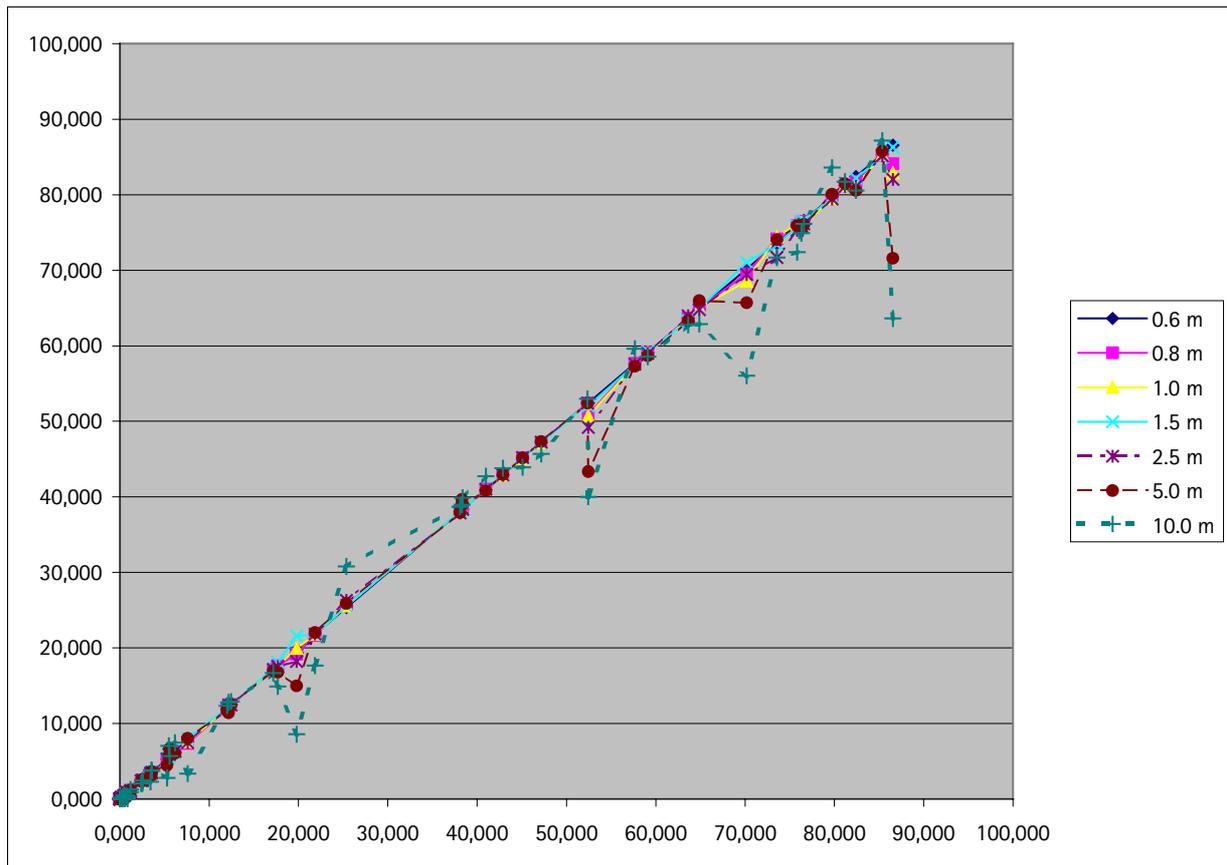


Abb. 7.14: Prozentanteile des Indikators „Gehölzbedeckung“ in verschiedenen Auflösungsstufen

Dennoch sind die empfindlichsten Indikatoren maßgebend, da sie in der Zustandsbewertung gleich gewichtet werden. Es kann also festgestellt werden, dass eine Verwendung von rasterbasierten Indikatoren mit einer geometrischen Auflösung von bis zu 1.5 m Pixelkantenlänge für die Ableitung der in dieser Arbeit betrachteten LRT ohne maßgebliche Genauigkeitsverluste möglich ist. Ob das entwickelte Klassifikationsverfahren auf Fernerkundungsdaten mit dieser Auflösung anwendbar ist, wird in Abschnitt 7.2.4.2 erläutert.

7.2.4.2 Simulation geringerer Auflösungsstufen

Die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Fernerkundungsdaten kann aufgrund fehlender Bilddaten im Rahmen dieser Arbeit nicht getestet werden. Jedoch kann mit der Simulation anderer geometrischer Auflösungen bereits dahingehend eine Aussage getroffen werden, ob die Methode auch bei größeren Pixelkantenlängen zuverlässig funktioniert. Da Texturparameter in der Wissensbasis eine Rolle spielen, ist anzunehmen, dass das Verfahren sensibel reagiert.

Drei verschiedene Auflösungsstufen mit 0.8 m, 1.0 m und 1.5 m Pixelkantenlänge wurden mittels Nearest Neighbor Resampling anhand des Ausschnittes, der bereits für den Test der Skalenabhängigkeit verwendet wurde, aus den pansharpened Quickbird-Daten generiert (Abb. 7.15).

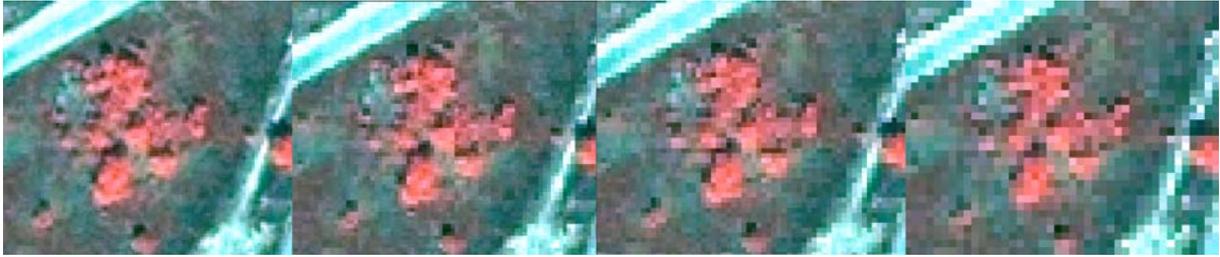


Abb. 7.15: Simulierte Auflösungsstufen (von links nach rechts: 0.6 m, 0.8 m, 1.0 m, 1.5 m)

Das Verfahren wurde auf die simulierten Daten angewendet. Für die Klassifikationsergebnisse aller Stufen wurden anschließend die Prozentanteile der einzelnen Indikatoren pro LRT- bzw. Biotopfläche berechnet. Die Prozentanteile der Klassifikation mit 0.6 m Pixelkantenlänge fungieren als Bezugsgröße. Insgesamt wurden zwölf Indikatoren untersucht.

Exemplarisch sind die Ergebnisse für zwei Indikatoren in Abb. 7.16 und Abb. 7.17 dargestellt.

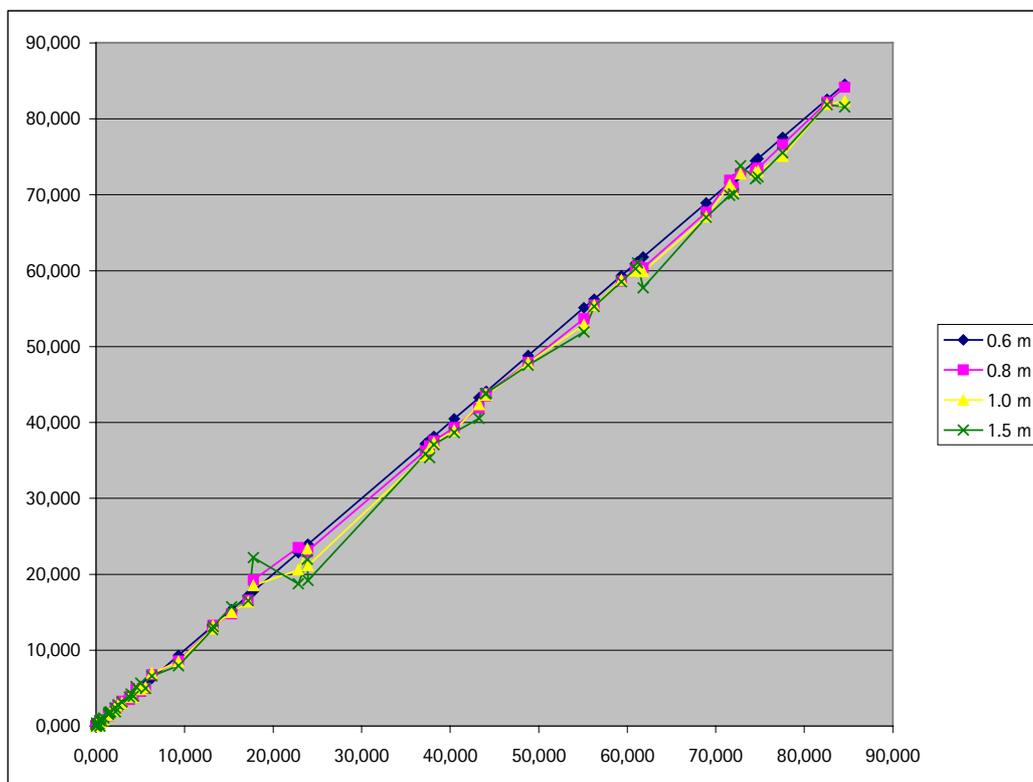


Abb. 7.16: Prozentanteile des Indikators „Gehölzbedeckung“ in verschiedenen Auflösungsstufen

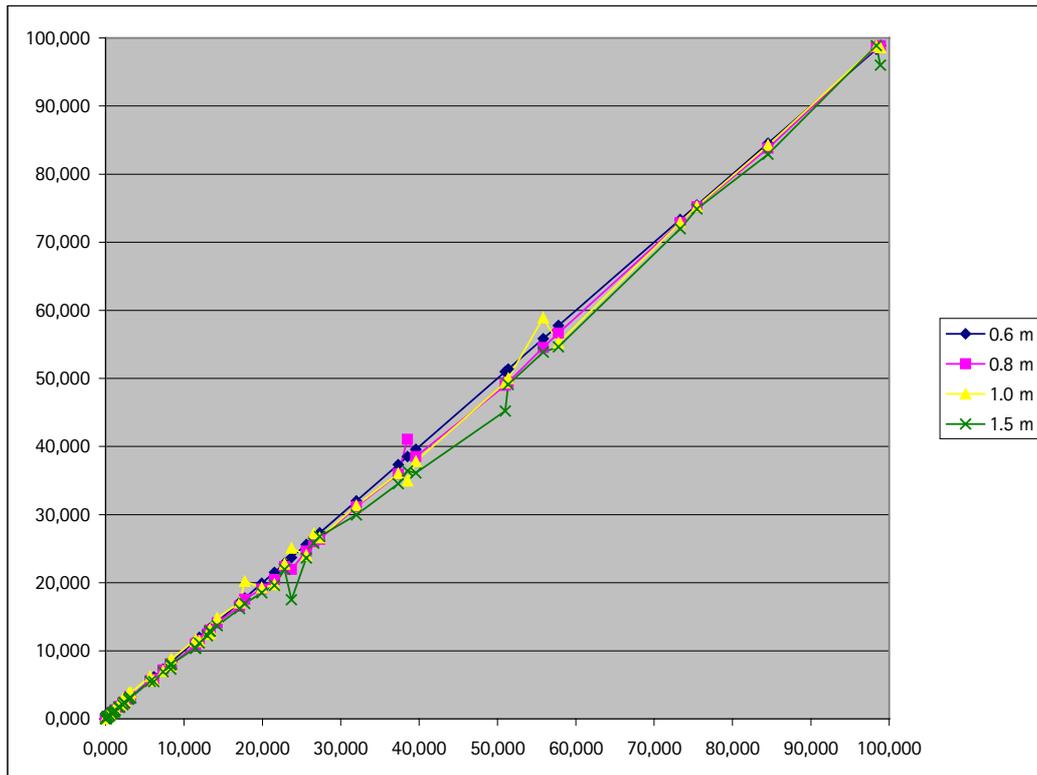


Abb. 7.17: Prozentanteile des Indikators „offener Boden“ in verschiedenen Auflösungsstufen

Es kann festgestellt werden, dass das Verfahren relativ empfindlich reagiert, bei einer Auflösungsstufe von 1.0 m kommt es stellenweise zu Abweichungen von über 5 %. Da nur zwölf Indikatoren getestet wurden, kann nicht mit abschließender Sicherheit gesagt werden, ob diese Ergebnisse für alle Indikatoren gelten. Es ist jedoch anzunehmen, dass das Verfahren ohne Anpassung für Auflösungen von 0.6 bis maximal 0.8 m angewendet werden kann, da im Test Indikatoren untersucht wurden, die sehr unterschiedlich sind (sowohl in ihren spektralen und textuellen Merkmalen als auch in den Regeln der Wissensbasis).

Für eine Anwendung auf Daten mit bis zu 1.5 m Pixelkantenlänge, die sich im Skalentest als theoretisch noch einsetzbar erwiesen (siehe Abschnitt 7.2.4.1), müsste das Verfahren also angepasst werden.

7.3 Fehleranalyse

Das Verfahren muss umfassend auf mögliche Fehlerquellen untersucht werden, um die Zuverlässigkeit und Einsetzbarkeit auch für zukünftige Anwendungen beurteilen zu können. Die möglichen Fehlerquellen unterteilen sich in mehrere Gruppen:

- Datenfehler
 - Fehler in den Bilddaten
 - Fehler in den Ausgangsdaten
- Erzeugung von Ungenauigkeiten während der Bildverarbeitung
 - Georeferenzierung
 - Filterung

- Datenkonvertierung

- Methodische Fehler
 - fehlende Klassen im Objektmodell
 - nicht ausreichende Anzahl an Testflächen für die Modellbildung
 - ungenügende Erkennbarkeit der Indikatoren

Fehler in den Bilddaten können dazu führen, dass die Ergebnisse ungenau bzw. verfälscht werden. Im Kapitel 4.3 wurden bereits ausführlich die möglichen (bzw. bekannten) Bildfehler erläutert. Vor der Verwendung der Satellitenbilder müssen diese individuell auf mögliche Fehler untersucht werden, dies kann nicht automatisch geschehen. Fehler wie Musterbildung in Wasserflächen oder Regenbogenpixel sind nicht relevant, da das Verfahren darauf robust reagiert – die automatische Signaturbildung erzeugt eine große Anzahl an Trainingspixeln, so dass diese Fehlpixel nicht ins Gewicht fallen bzw. wissensbasiert nachbearbeitet werden können.

Ein größeres Problem stellen Wolken und Wolkenschatten dar. In diesen Bereichen kann nicht mit sinnvollen Ergebnissen gerechnet werden, sie müssen daher von vornherein aus dem Arbeitsablauf ausgeschlossen werden. Fehler, die durch den tiefen Sonnenstand bei sehr späten Aufnahmen oder einen zu großen Aufnahmewinkel verursacht werden, sollten durch entsprechende Zeitfenster und eine Begrenzung des Aufnahmewinkels bei der Datenbestellung verhindert werden.

Die Phasen der Bildvorbereitung und die gesamte Datenverarbeitung bergen viele Fehlerquellen, allein eine ungenaue Bildkorrektur kann das gesamte Ergebnis verfälschen. Dem kann jedoch entgegengewirkt werden, indem als Grundlage für die Georeferenzierung ATKIS-Daten verwendet werden und der RMSE-Fehler so gering wie möglich gehalten wird.

Des Weiteren können durch die Verwendung von Filtern sowie durch die Konvertierung der Daten von Raster- zu Vektorformat und umgekehrt Ungenauigkeiten entstehen. Innerhalb des Verfahrens wurde versucht, diese Fehler möglichst klein zu halten, indem die Rasterung der Vektordaten mit sehr kleinen Zellgrößen (0.6 m Pixelkantenlänge) erfolgt und die Verwendung von Filtern entweder nur als Vorstufe dient (siehe Kapitel 5.3.1, z.B. lokaler Minimumfilter) oder aber die Filterergebnisse nicht direkt verwendet, sondern durch zonale Operatoren in Bildobjekte eingebunden werden (so werden z.B. die Texturwerte nicht direkt verwendet, sondern ihr Maximal- oder Mittelwert innerhalb eines Objektes).

Die bereits erwähnte Unter- bzw. Überberechnung der Indikator-Prozentanteile aufgrund der Überlagerung von Raster- und Vektorformat ist nur sehr gering und kann später auch völlig ausgeräumt werden, wenn leistungsfähigere Rechner zur Verfügung stehen, die die Umwandlung der rasterbasierten Indikatoren in Vektoren schneller bewältigen können, als dies momentan der Fall ist.

Ein der Methode innewohnendes Problem ist, dass in der Wissensbasis nicht vorhandene Klassen auch nicht klassifiziert werden können. Das Objektmodell ist bei weitem nicht vollständig, aufgrund der heuristischen Herangehensweise kann dies auch nicht anders sein. Dennoch ist eine Erweiterung problemlos möglich, da das Modell hierarchisch gegliedert und unter Berücksichtigung des CIR-Interpretationsschlüssels aufgebaut ist. Das bedeutet aber auch, dass bei einer Erweiterung neue Überschneidungen zwischen den Klassen auftreten können. Es wurde versucht, dem entgegenzuwirken, indem auch die Schwellenwerte in die Wissensbasis einbezogen wurden, die momentan nicht für eine Abgrenzung zu anderen Klassen notwendig sind. Dennoch müssen bei einer Erweiterung in jedem Falle neue Anwendungstests durchgeführt werden.

Das schwerwiegendere Problem liegt in der Abhängigkeit des Verfahrens von der Qualität des a-priori Wissens. Es hat sich gezeigt, dass den Basisdaten bei der Klassifikation spektral sehr ähnlicher Klassen eine große Bedeutung zukommt. Wenn also in einer alten BTNTK etwas fälschlicherweise als trocken kartiert wurde, was eigentlich eine feuchte Fläche ist, dann können z.B. fehlerhafte Zuordnungen der Klasse Gras- und Staudenfluren und der Klasse feuchte Hochstauden bei der Ableitung der Trainingsgebiete nicht ausgeschlossen werden, da sie sehr ähnliche texturale und spektrale Eigenschaften haben können. Solange diese Fehler kleinflächig sind, wirken sie sich nicht erheblich auf

die Genauigkeit aus, treten jedoch systematische Fehler auf, werden falsche Signaturen erzeugt. Am Beispiel von Potsdam konnte außerdem gezeigt werden, dass sich die Landnutzung in wenigen Jahren großflächig erheblich ändern kann. Aufgrund der Datenlage kann dieser Umstand momentan nicht geändert werden, in Zukunft kann dieses Manko jedoch wesentlich verringert werden, indem die viel genaueren Basisdaten der terrestrischen Ersterfassung verwendet werden oder aber andere Zusatzinformationen wie Stereodaten, Geländemodelle oder Bodendaten in die Wissensbasis mit einfließen.

Die stellenweise sehr geringe Anzahl an Testflächen für einige Objektklassen (z.B. für Arten der torfmoosdominierten Zwischenmoore) kann dazu führen, dass die mögliche Variabilität nicht ausreichend erfasst worden ist. Weitere Anwendungstests sind für diese Klassen notwendig, konnten aufgrund fehlender Testgebiete im Rahmen der Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden.

Eine visuelle Überprüfung des Klassifikationsergebnisses wird immer notwendig sein, da es keine Regeln für Ausnahmesituationen wie z.B. kranke Bäume oder Brandflächen gibt. Sie in die Wissensbasis zu integrieren, würde den Rechenaufwand unnötig vergrößern, da diese Phänomene nur selten und lokal begrenzt vorkommen.

Ein Sondergebiet bilden die Schattenflächen. Quickbird bietet zwar aufgrund seiner hohen radiometrischen Auflösung die Möglichkeit, Schattenflächen noch tiefergehend zu untersuchen, im Wesentlichen beschränkt sich die extrahierbare Information jedoch auf „Vegetation vorhanden“ oder „Vegetation nicht vorhanden“. Die Ausgrenzung der Schattenflächen ist deshalb notwendig. Ihr Anteil an den Habitatflächen sollte sich bei Verwendung ähnlicher Aufnahmezeiten nicht wesentlich verändern, ansonsten müssen diese Flächen über eine statistische Verteilung den Nachbarklassen zugeordnet werden.

Problematisch für die Bewertung des Teilerhaltungszustandes von LRT ist die Tatsache, dass sich die Indikatoren erst ab einer bestimmten Flächengröße und Bestandsdichte identifizieren lassen. So können Bäume erst erkannt werden, wenn sie einen sichtbaren Schatten werfen. Kiefernflug kann mit dieser Methode nicht detektiert werden, so dass z.B. Verbuschung oder Eutrophierung erst viel später erkannt werden als bei einer terrestrischen Erkundung. Aus eben diesen Gründen und wegen der möglichen Verdeckung bestimmter Indikatoren durch höhere Objekte kann es zu einer Unterschätzung der Flächenanteile kommen, so dass eventuell eine Anpassung der Indikatoren und Schwellenwerte für die Bewertung des Teilerhaltungszustandes notwendig ist.

8. Fazit

Die eingangs in Kapitel 1.1 aufgeworfenen Fragen sollen an dieser Stelle beantwortet werden.

- Für welche Lebensraumtypen der Offenbereiche sind höchstauflösende Satellitendaten im Sinne des FFH-Monitorings einsetzbar?

Diese Frage kann nicht einfach mit einer Liste der LRT beantwortet werden, denn prinzipiell sind die Satellitendaten für alle einsetzbar, da die Flächengrenzen (bis auf kleinflächige LRT wie Quellen oder Bäche im Wald) überprüft und mit einer Biotoptypen- und Landnutzungskartierung die umgebenden Kontaktbiotope erfasst werden können. Viele Gefährdungen und Beeinträchtigungen sind damit sehr gut zu überwachen (z.B. Krankheitsbefall, Brände, Kahlschlag, Freizeitnutzung, Wiederbewaldung von Offenland-LRT etc.). Der Einsatz von Satelliten- oder Luftbildern ist sogar unbedingt notwendig, da sonst bereits bei der Ersterfassung der Habitatflächen gravierende Fehler in der Abgrenzung entstehen können.

Für die konkrete Bewertung des Erhaltungszustandes sind die Satellitenbilder für die Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen geeignet. Es handelt sich also in jedem Falle um eine Teilbewertung, da der Parameter Arteninventar mit Methoden der Fernerkundung nicht im Sinne der FFH-RL bewertet werden kann. Wie weit diese Teilbewertungsmöglichkeit geht, ist LRT-abhängig (siehe Tab. 8.1). Da in dieser Arbeit nur eine Auswahl der vorkommenden Offenland-LRT betrachtet wurde, sind auch nur diese hier aufgeführt.

Für trockene Heiden (2310 und 4030) und für Dünen mit offenen Grasflächen (2330) können die Parameter Habitatstruktur und Beeinträchtigungen vollständig mit Hilfe der Satellitendaten bewertet werden.

Für Typen der Süßwasserlebensräume gilt, dass nur eine teilweise Bewertung möglich ist, weil für die Habitatstruktur submerse Vegetation eine entscheidende Rolle spielt und außerdem die Art der Bewirtschaftung von Seen unter dem Parameter Beeinträchtigung bewertet wird. Für Flüsse mit Schlammbänken ist die Bewertung der Habitatstruktur und damit die Gewässerstrukturgütekartierung mit den Satellitenbildern teilweise möglich, die Parameter Laufentwicklung, Uferstruktur und Gewässerumfeld sowie einige Beeinträchtigungen baulicher Art können sehr gut erkannt werden.

Die Bewertung von trockenen, kalkreichen Sandrasen kann an dieser Stelle nur eingeschränkt beurteilt werden, da für die Untersuchung nur wenige sehr kleine Flächen dieses LRT zur Verfügung standen, die bereits stark ruderalisiert waren. Das gleiche gilt für LRT der Steppen-Trockenrasen, die Bilddaten lassen im Spätsommer keine Trennung von Halbtrockenrasen und sonstigen Gras- und Staudenfluren zu.

Für feuchte Hochstaudenfluren können die beiden Parameter ebenfalls nur teilweise bewertet werden, da sich ruderale feuchte Hochstauden nicht von wertvollen Arten trennen lassen, jedoch können andere Indikatoren der Austrocknung und Beeinträchtigungen wie Verbuschung bestimmt werden.

Die Habitate der Übergangs- und Schwingrasenmoore könnten in den Parametern Habitatstruktur und Beeinträchtigungen prinzipiell vollständig mit Hilfe der Satellitendaten bewertet werden, leider stand aber in dieser Arbeit nur ein Testgebiet mit Vorkommen dieses LRT zur Verfügung, die kartierten Flächen waren alle beeinträchtigt und die Bilddaten zusätzlich von schlechter Qualität, so dass diese Aussage nicht mit ausführlichen Tests belegt werden kann.

LRT	Habitatstruktur	Beeinträchtigungen	Abhängigkeit der Klassifikationsgenauigkeit von den Eingangsdaten
2310	x	x	gering
2330	x	x	gering
3130	o	o	mittel
3140	o	o	mittel
3150	o	o	mittel
3160	o	o	mittel
3270	o	o	mittel
4030	x	x	gering
6120	o	o	hoch
6210	o	o	hoch
6430	o	o	hoch
7140	?	?	hoch
x = vollständig bewertbar o = teilweise bewertbar			

Tab. 8.1: Einsatzmöglichkeiten der Satellitenbilder für das Monitoring von FFH-LRT

- Welche Indikatoren sind für die Bewertung geeignet?

Prinzipiell wurde in dieser Arbeit versucht, die Indikatoren zu verwenden, die in den Bewertungsschemata vorgegeben sind, um möglichst praxisnah zu bleiben und die terrestrisch aufgenommene Bewertung der Ersterfassung später auch im Monitoring mit der fernerkundlich ermittelten Bewertung vergleichen zu können. Des Weiteren wurde ein neuer Indikator für Heideflächen eingeführt, auf denen weder eine Nutzung noch Brände erfolgt sind, der dazu dient, die Überalterung einzuschätzen. Als sehr wertvoller Komplexindikator sind Biotoptypen anzusehen, so dass die Kartierung angrenzender Biotoptypen und Landnutzungen unbedingt notwendig ist. Die Verwendung von Biotopelementen zur Teilzustandsbewertung erwies sich als ein objektives Mittel für die Strukturbewertung.

- Kann ein weitgehend automatisiertes Klassifikations- und Bewertungsverfahren entwickelt werden? Welche Themenbereiche müssen nach wie vor visuell oder terrestrisch bearbeitet werden?

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren führt eine automatische Trainingsgebietssuche und Klassifikation durch, die Flächengrenzen der Habitate müssen jedoch weiterhin visuell überprüft und manuell bearbeitet werden. Es hat sich gezeigt, dass die Trennbarkeit der Klassen mit Hilfe einer wissensbasierten Klassifikation wesentlich erhöht werden kann, dennoch verbleiben Problemklassen, die mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Basisdaten nicht immer zuverlässig getrennt werden können. Dies hat seine Ursache in den, für die Trainingsgebietssuche verwendeten, sehr alten und stark generalisierten Grundlagendaten. Bei Einbeziehung der terrestrischen Ersterhebung oder anderer Datenquellen kann die Trennbarkeit und daraus folgend die Genauigkeit noch wesentlich verbessert werden. Es gilt die Aussage, dass für LRT, deren Indikatoren charakteristische Signaturen bilden bzw. die mit generellen und allgemeingültigen Regeln in der Wissensbasis verifiziert werden können, ein Monitoring mit den unterschiedlichsten Eingangsdaten gewährleistet werden kann. Bei Indikatoren, die Vegetationsklassen

umfassen, welche sich nur geringfügig spektral unterscheiden und die ähnliche Ansprüche an die Naturraumausrüstung haben, sind die Eingangsdaten essentiell; je genauer diese sind, desto eher ist mit guten Klassifikationsergebnissen zu rechnen. Die heuristische Herangehensweise beim Aufbau der Wissensbasis bedingt, dass die Klassifikationsergebnisse visuell überprüft werden müssen und bei Anomalien oder fehlenden Klassen nachinterpretiert werden muss.

Die Genauigkeitsanalyse im Anschluss an die Klassifikation muss für jedes Gebiet und jeden Indikator einzeln durchgeführt werden. Für Indikatoren, die nicht eindeutig visuell im Satellitenbild identifiziert werden können, müssen terrestrisch Kontrollpunkte erhoben werden. Diese Vorgehensweise ist sehr wichtig, um einen statistisch gesicherten Wert für die Zuverlässigkeit der einzelnen Indikatoren zu erhalten.

Die Verwendung einer Wissensbasis und das Verfahren der automatischen Trainingsgebiets- und Signaturbildung erwiesen sich als geeignete Mittel, trotz der hohen spektralen Variabilität der Satellitenbilder pixelbasiert zu klassifizieren. Für die Klassen der Halbtrockenrasen und Moore gab es aufgrund der Ausstattung der Testgebiete nur sehr wenig Vorkommen und terrestrisch verifizierte Grundlagendaten, diese sollten weiter untersucht werden. Für die Ermittlung der Indikatoren für Heidehabitate, für Dünen mit offenen Sandtrockenrasen und für Süßwasserlebensräume ist das Verfahren an sehr vielen Flächen erfolgreich getestet worden und kann operationell eingesetzt werden.

Die terrestrische Arbeit kann durch die Fernerkundung prinzipiell nicht ersetzt werden. Sie kann jedoch wesentlich erleichtert und stellenweise sogar verbessert werden, indem aktuelle Fernerkundungsdaten und ihre Klassifikationsergebnisse von Anfang an einbezogen werden.

- Ist das Verfahren auf andere Gebiete, andere Daten und andere Fragestellungen übertragbar?

Die Klassifikationsmethode hat sich nach ausführlichen Anwendungstests auf andere Gebiete, andere Aufnahmezeitpunkte und andere Grundlagendaten als übertragbar erwiesen. Dennoch ist eine kritische individuelle Betrachtung der Datenlage in jedem Gebiet notwendig, wie die Beispiele zeigen. Je nach räumlicher Entwicklung kann die Verlässlichkeit alter Daten extrem unterschiedlich sein, so dass es unter Umständen notwendig wird, die Wissensbasis anzupassen bzw. einige Regeln auszuschalten.

Die Übertragbarkeit auf andere Fragestellungen ist davon abhängig, um welchen Themenkomplex es sich handelt. Die pixelgenauen Landbedeckungsklassen bieten für viele Anwendungen gute Grundlagen bzw. Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Verfahrens (siehe Abschnitt 8.2). So wurde die Ableitung von Rauheitsklassen für die Hochwassermodellierung exemplarisch untersucht. Das Verfahren erwies sich dafür in einem Anwendungstest als gut geeignet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz der höchstauflösenden Satellitenbilder und des Klassifikationsverfahrens das Monitoring von FFH-LRT erheblich erleichtern kann. Es ist möglich, für die untersuchten LRT Strukturindikatoren und Beeinträchtigungen abzuleiten sowie die Flächengrenzen zu überprüfen. Dazu kommt die Erstellung aktueller Biotoptypen- und Landnutzungsdaten und die Verfügbarkeit aktueller digitaler Orthofotos für die terrestrische Kartierung. Große Flächen können schnell bearbeitet werden, und die Trefferquote und Konstanz der visuellen Interpretation kann mit der automatischen Klassifikation wesentlich erhöht werden. Die Flächenanteile wichtiger Indikatoren sind sehr genau berechenbar und eine sehr gute Grundlage nicht nur für das Monitoring, sondern auch für die detaillierte Maßnahmenplanung. Die automatische Klassifikationsmethode ist objektiv und jederzeit wiederholbar. Die Satellitenbilder können relativ flächenscharf gekauft werden, was zur Kostenersparnis beiträgt. In Zukunft wird auch die Datenverfügbarkeit mit den geplanten neuen höchstauflösenden Satelliten steigen. Ein Nachteil der Satellitendaten ist die momentan noch fehlende Stereoinformation sowie die fernerkundlich bedingte Tatsache der Schatten- und Schrägsichteffekte. Als Empfehlung sollte deshalb der Hinweis dienen, die Aufnahme der Satellitenbilder nicht mehr nach Mitte September zuzulassen und den Aufnahmewinkel möglichst gering zu halten (nicht über 15°).

8.1 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Weitere Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens zur pixelbasierten Erfassung von Landbedeckungsklassen ergeben sich nicht nur im Vegetationsmonitoring und in der Hochwassermodellierung sondern auch im Siedlungsbereich. Die sehr genaue Klassifikation versiegelter Bereiche ermöglicht u.a. die schnelle Erfassung verschiedener Versiegelungsstufen. Mit einer geeigneten Anpassung und Weiterentwicklung der Wissensbasis können auch Aussagen zu planungsrelevanten Indizes wie z.B. zur Grundflächenzahl oder zu Schadpotenzialen im Hochwasserfall getroffen werden (FRICK, 2006). Das Potenzial der Anwendung von höchstauflösenden Fernerkundungsdaten für die städtische Biotoptypenkartierung und die Ableitung verschiedener urbaner Indikatoren wie z.B. den Versiegelungsgrad wird u.a. in KIM et al. (2005), LAKES et al. (2005) und LAKES (2006) gezeigt. Auch hier zeigt sich, dass eine vollständig automatische Analyse in naher Zukunft nicht zu erwarten ist, sondern dass vielmehr die Kombination von visuellen und automatisierten Methoden zum Ziel der Operationalisierung führen kann. LAKES (2006) präzisiert weiterhin, dass vorrangig nicht technische Probleme den Einsatz der digitalen Fernerkundungsdaten hemmen, sondern vielmehr organisatorische, personelle, rechtliche oder finanzielle Faktoren ein Hindernis bilden.

Potenzielle Einsatzmöglichkeiten für das in dieser Arbeit realisierte Verfahren ergeben sich ferner für Wald-LRT. Die Methoden und die Wissensbasis können weiterentwickelt werden, um wichtige Indikatoren wie z.B. die Baumartenzusammensetzung oder Altersstufen abzuleiten.

Darüber hinaus bieten die Vegetationsklassen mit ihrer fein differenzierten Aussage zur Habitatstruktur eine gute Grundlage für Habitatmodellierungen von verschiedenen Arten.

8.2 Ausblick

Ein interessanter Aspekt für die weitere Forschung ist die Einbeziehung zusätzlicher Informationen wie z.B. von Stereodaten und die Verwendung multitemporaler und/oder multisensoraler Ansätze. Die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Sensoren, v.a. auf digitale Luftbilder, sollte unbedingt untersucht werden. In Zukunft sind mit den Nachfolgesatelliten von Quickbird noch zusätzliche spektrale Kanäle geplant, so dass die Wissensbasis verfeinert werden könnte. Die Einbeziehung zukünftig verfügbarer flugzeug- oder satellitengestützter Hyperspektralsensoren bietet ebenfalls ein großes Potenzial zur Verbesserung der Klassifikation und zur Vertiefung des Objektmodells.

Die bisher wenig ausgenutzte Wissensfülle, die implizit in den als a-priori Information verwendeten Geodaten steckt, kann durch Methoden des spatial data minings sehr effektiv nutzbar gemacht werden, wie z.B. LI et al. (2000) eindrucksvoll zeigen. An einem sehr einfachen Beispiel soll dies nachfolgend illustriert werden. So können klassifizierte Wasserkörper weiter unterteilt werden in Teiche, Seen oder Flüsse, indem verschiedene Form- und Kontext-Parameter berechnet werden (z.B. Kompaktheit, Lage des Mittelpunktes, Größe, Länge etc.). Die alten Geodaten werden mit Hilfe eines data mining Algorithmus auf eben diese Parameter untersucht, was zu einer Extraktion von Regeln führt, nach denen die klassifizierten Wasserkörper weiter unterteilt werden können (z.B.: die Flüsse in den alten Geodaten sind nie breiter als 30 m und mindestens 500 m lang, klassifiziere alle Wasserkörper, die diesen Regeln entsprechen als Fluss).

Viel versprechend sind auch die Ergebnisse von IVITS-WASSER (2004), die Aussagen zur Artenabundanz in Habitaten anhand von Grauwerten trifft. Eine erfolgreiche Einbindung dieser Erkenntnisse in das FFH-Monitoring könnte den terrestrischen Aufwand noch wesentlich verringern.

LITERATUR

Albertz, J.: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Auflage. Darmstadt 2001.

Andresen, T., C. Mott, R. Schüpferling & R. Zimmermann: Objektorientierte Analyse von Fernerkundungsdaten zur Erfassung aquatisch/terrestrischer Parameter. In: T. Blaschke (Hrsg): Fernerkundung und GIS. Heidelberg 2002.

Aplin, P.: Remote sensing as a means of ecological investigation. In: Proc. of ISPRS XXth Congress July 14-23, IAPRS, Vol. XXXV Part B1, Istanbul 2004.

Baatz, M., A. Schäpe: Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: J. Strobl et al. (Hrsg): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000. Heidelberg 2000.

Balzer, S.: Internationale Schutzgebietssysteme, insbesondere Natura 2000 als Bestandteil eines bundesweiten Vorrangflächenkonzepts. In: Ssymank, A. (Hrsg.): Vorrangflächen, Schutzgebietssysteme und naturschutzfachliche Bewertung großer Räume in Deutschland. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. Heft 63. BfN. Bonn-Bad Godesberg 2000.

Bastian, O.: Gedanken zur Bewertung von Landschaftsfunktionen – unter besonderer Berücksichtigung der Habitatfunktion.- Berichte der Alfred Toepfer-Akademie für Naturschutz (NNA), Schneverdingen 1997.

Bastian, O. & K.-F. Schreiber (Hrsg.): Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. Spektrum Verlag. Heidelberg, Berlin 1999.

Baudoin, A.: Beyond SPOT 5: Pleiades, part of the french-italian Program ORFEO (ISPRS, 2004).

Bauer, T. & K. Steinnocher: Objektbasierte Auswertung von hochauflösenden Fernerkundungsdaten in urbanen Räumen. In: J. Strobl et al. (Hrsg): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000. Heidelberg 2000.

Berger, A. & U. Walz: Landschaftsmaße für eine Langzeituntersuchung von Flächennutzungsänderungen in Ostsachsen. IÖR-Schriften 43. Dresden 2004.

Beutler, H. & D. Beutler: Das Naturschutzgebiet „Lieberoser Heide“ auf dem Truppenübungsplatz Lieberose. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg. Heft 1. Potsdam 1992.

Beutler, H.: Die Wanderdüne auf dem Truppenübungsplatz Jüterbog. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg. Heft 2. Potsdam 1993.

BfN (Bundesamt für Naturschutz) (Hrsg.): Systematik der Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung (Kartieranleitung). Bonn 2002.

BfN (Bundesamt für Naturschutz): <http://www.bfn.de/03/030303.htm> (23.07.2005).

Bill, R. & Fritsch, D.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1. Wichmann Verlag.1991.

Bischoff, C. & R. Dröschmeister (Hrsg.): European Monitoring for Nature Conservation. Landschaftspflege und Naturschutz. Heft 62. BfN. Bonn 2000.

BL-AG(Bund-Länder-Arbeitsgruppe):

<http://www.landwirtschaftskammer.com/fachangebot/foerderung/pdf/cc-infobroschuere.pdf>
(23.07.2005).

Bock, M., M. Wissen, G. Rossner, T. Blaschke, S. Lang, T. Langanke, H. Klug, U. Mander, K. Remm, B. Vrscaj, J. Mitchley, P. Xofis, M. Gay, A. Jaquin, A. Kobler, A. Seliskar, I. Keramitsoglou, C. Haffner, N. Sifakis, E. Fitoka & A. Apostolakis, 2004: SPIN (Spatial Indicators for European Nature Conservation) Final Report. Project funded by the European Community under the FP5 EESD Programme (1998-2002). EVG1-CT-2000-00019.

Brose, U.: Die Heuschreckenfauna im NSG Reicherskreuzer Heide. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg. Heft 8. Potsdam 1999.

Bürger, K. & R. Dröschmeister: Naturschutzorientierte Umweltbeobachtung in Deutschland: Ein Überblick. Natur und Landschaft, Heft 2. Bonn 2001.

Burnett, C. & T. Blaschke: A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. In: Ecological Modelling 168. 2003.

Coenradie, B. & H. Kenneweg: OFULSA - Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung des Landes Sachsen-Anhalt - Teilvorhaben Wälder und Forsten. Endbericht zum Forschungsprojekt, BMBF-Förderkennzeichen 50EE9924, Berlin/Halle 2002.

Cohen, Y., & M. Shoshany: A national knowledgebased crop recognition in Mediterranean environment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4/2002.

Congalton, R.G. & K. Green: Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. Lewis Publishers. New York. 1999.

DigitalGlobe: <http://www.digitalglobe.com/products/> (16.06.2003).

DigitalGlobe: <http://www.digitalglobe.com/downloads/asprs/DG ASPRS Pan Sharpening User Group Pres.pdf> (01.10.2004)

Dittberner, W. & R. Köhler: Das Europäische Vogelschutzgebiet (SPA) Unteres Odertal. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg. Heft 7. Potsdam 1998.

Dröschmeister, R.: Bundesweites Naturschutzmonitoring in der „Normallandschaft“ mit der Ökologischen Flächenstichprobe. Natur und Landschaft, Heft 2. Bonn 2001.

Ehlers, M.: Fernerkundung für GIS-Anwender – Sensoren und Methoden zwischen Anspruch und Wirklichkeit. In: T. Blaschke (Hrsg): Fernerkundung und GIS. Heidelberg 2002.

Eiumnoh, A. & R.P. Shresta: Application of DEM Data to Landsat Image Classification: Evaluation in a Tropical Wet-Dry Landscape of Thailand. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66 (3). 2000.

EON2000+: <http://eon2000plus.org/project.htm> (01.04.2004)

Erb, W.-D.: Anwendungsmöglichkeiten der linearen Diskriminanzanalyse in Geographie und Regionalwissenschaft. Verlag Weltarchiv GmbH. Hamburg 1990.

ESRI: ArcINFO 8.1. Environmental System Research Institute, Inc. 2001.

Fartmann, T., H. Gunnemann, P. Salm & E. Schröder: Berichtspflichten in Natura-2000-Gebieten. Empfehlungen zur Erfassung der Arten des Anhangs II und Charakterisierung der Lebensraumtypen des Anhangs I der FFH-Richtlinie. Angewandte Landschaftsökologie. Heft 42. BfN. Bonn-Bad Godesberg 2001.

Frick, A.: Evaluation of Natura 2000 habitat types through very high resolution satellite imagery. In: Göttinger Geographische Abhandlungen, Heft 113, GGRS 2004, 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days. 2005.

Frick, A.: Urban Monitoring with Quickbird Imagery through a Knowledge-Based Extraction of Indices. In: Proceedings of Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days. Berlin 2006.

Friedl, M. A., & C.E. Brodley: Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 61/1997.

Forman, R. T. T. & M. Godron: Landscape Ecology. Wiley and Sons, New York 1986.

Gähler, M., R. Janowsky & U. Schröder: Automatisierte Biotoptypenklassifizierung auf Basis höchstauflösender Flugzeugscannerdaten. In: T. Blaschke (Hrsg): Fernerkundung und GIS. Heidelberg 2002.

Gangkofner, U.: Methodische Untersuchungen zur Vor- und Nachbereitung der Maximum Likelihood Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten. Münchener Geographische Abhandlungen Band B 24. Geobuch-Verlag. München 1996.

Gerke, M.: Scene Analysis in Urban Areas Using a Knowledge-Based Interpretation System. ISPRS Com. III Symposium, 9.-13. September, Graz, Austria. 2002.

Grube, R. & W. Beier: Die Laufkäferfauna von Sandoffenflächen und initialen Sukzessionsstadien auf ehemaligen Truppenübungsplätzen Brandenburgs. *Angewandte Carabidologie* 1. 1998.

Haberäcker, P.: Praxis der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Carl Hanser Verlag. München Wien 1995.

Hahn, M. & E.P. Baltsavias: Cooperative Algorithms and Techniques of Image Analysis and GIS. ISPRS Com. IV Symposium, 7.-10. September, Stuttgart, Germany. In IAPRS, Vol. 32, Part 4. 1998.

Heiden, U.: Analyse hyperspektraler Flugzeugscannerdaten zur ökologischen Charakterisierung städtischer Biotop. Dissertation. TU Berlin 2004.

Hildebrandt, G.: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann Verlag. Heidelberg 1996.

Hoffmann, A., G.M. Smith & F. Lehmann: Die Klassifizierung hochauflösender Daten – ein Per-Parcel-Ansatz mit Daten des digitalen Kamerasystems HRSC-A. In: J. Strobl et al. (Hrsg): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*. Heidelberg 2000.

Hoffmann-Kroll, R., A. Benzler, D. Schäfer & S. Seibel: Setting up National Biodiversity Monitoring for Nature Conservation in Germany – the Ecological Area Sampling (EAS). In: Bischoff, C. & R. Hutchinson, C.F.: *Techniques for Combining Landsat and Ancillary Data for Digital Classification Improvement. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 48 (1). 1982.

Dröschmeister (Hrsg.): *European Monitoring for Nature Conservation. Landschaftspflege und Naturschutz*. Heft 62. BfN. Bonn 2000.

Ivits-Wasser, E.: *Potential of Remote Sensing and GIS as Landscape Structure and Biodiversity Indicators*. PhD thesis, Department of Remote Sensing and Landscape Information Systems, <http://freidok.uni-freiburg.de/volltexte/1360/>. Universität Freiburg 2004.

Ivits, E. & B. Koch: Optimierung der Erfassung der Landschaftsdiversität auf der Basis von Satelliten- und Luftbildern: ein Europäisches Landschaftskonzept. In: *IÖR Schriften*. Band 40. Dresden 2003.

Jacobsen, K.: *High Resolution Satellite Imaging Systems – an Overview*. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*. Heft 6. Stuttgart 2005.

Janoth, J., M. Eisl, F. Klaushofer & W. Luckel: Segmentbasierte Verfahren zur Veränderungsanalyse und Waldklassifizierung mit hochauflösenden Satellitendaten. In: T. Blaschke (Hrsg): *Fernerkundung und GIS*. Heidelberg 2002.

de Jong, S.M., C.J. van der Sande & A.P.J. de Roo: A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4/2003.

Kappas, M.: Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler. Dümmler Verlag. Bonn 1994.

Kehrein, A.: Aktueller Stand und Perspektiven der Umsetzung von Natura 2000 in Deutschland. *Natur und Landschaft*. Heft 1. Bonn 2002.

Kenneweg, H., S. Lehnert, F. Michael & R. Schönfeld & C. Werner: MOMSIS – Biotopüberwachung mit Satellitenfernerkundung-. *Arbeitsmaterialien zur Landschaftsplanung*. Band 18. Berlin 2000.

Kenneweg, H.: Essentiell oder marginal? Mögliche Beiträge der Fernerkundung zu Inventuren, Planung, Modellierung und Monitoring im Naturschutz. In: BfN (ed.): *BfN-Skripten* 42, Naturschutz und Fernerkundung. Bonn 2001.

Keuchel, J., S. Naumann, M. Heiler & A. Siegmund: Automatic land cover analysis for Tenerife by supervised classification using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, Volume 86, Issue 4. 2003.

Kim, H.-O., T. Lakes, B. Kleinschmit, H. Kenneweg: Different approaches for urban habitat type mapping – the case study of Berlin and Seoul. In: Möller, W. & E. Wentz (Hrsg.): *Proceedings in URBAN 2005 and URS 2005. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVI, Part 8/W27. 2005.

Koch, B., M. Jochum, E. Ivits, & M. Dees: Pixelbasierte Klassifizierung im Vergleich und zur Ergänzung zum objektbasierten Verfahren. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 3/2003.

Kok, R. de, A. Buck, T. Schneider & U. Ammer: Modular project design in object oriented analysis. In: T. Blaschke (Hrsg): *Fernerkundung und GIS*. Heidelberg 2002.

Kressler F. & K. Steinnocher: Einsatz der Fernerkundung zur Überprüfung der Realnutzung im Raum Wien mittels Spectral Mixture Analysis. *AGIT Extended Abstract Reviewed Paper*. <http://www.agit.at/history/papers/1995/fkress.htm>. 1995.

Lang, S.: Zur Anwendung des Holarchiekonzeptes bei der Generierung regionalisierter Segmentierungsebenen in höchst-auflösenden Bilddaten. In: T. Blaschke (Hrsg): *Fernerkundung und GIS*. Heidelberg 2002.

Lakes, T.: Beitrag des Informationsmanagements für den Einsatz neuer Fernerkundungsdaten in der städtischen Planung am Beispiel der Stadtbiooptypenkartierung mit Flugzeugscannerdaten in Berlin. *Dissertation*. TU Berlin 2006.

Lakes, T., H.-O. Kim & H. Kenneweg: Mapping sealed surfaces in metropolitan areas – case studies in Berlin and Seoul. *International Congress on Environmental Planning and Management – Environmental Challenges of Urbanization*. Brasilia 2005.

Lausch, A.: Raum-zeitliches Monitoring von Landschaftsstrukturen in der Tagebauregion Südraum Leipzig mit Methoden der Fernerkundung und Geoinformation. – Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, UFZ-Bericht 12/2000.

LAWA: Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie.
http://www.lawa.de/lawaroot/pub/kostenlos/wrrl/Arbeitshilfe_30-04-2003.pdf (15.05.2004).

LANA: Referenzliste – Gefährdungsursachen-für FFH-Meldungen.
http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/030306_refgefaehrd.pdf (18.06.2006).

Laws, K.: Rapid texture identification. In: SPIE Vol. 238. Image Processing for Missile Guidance, 1980.

Leser, C.: Operationelle Biotoptypenkartierung mit HRSC-Daten – Probleme und Lösungsansätze. In: T. Blaschke (Hrsg.): Fernerkundung und GIS. Heidelberg 2002.

Leser, H. & H.-J Klink: Handbuch und Kartieranleitung, Geoökologische Karte 1:25.000. Zentralauschuß für deutsche Landeskunde. Trier 1988.

Li, D., K. Di & D. Li: Land Use Classification of Remote Sensing Image with GIS Data Based on Spatial Data Mining Techniques. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam 2000.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. & J.W. Chipman: Remote sensing and image interpretation. 5. Auflage. New York 2004.

LUA (Landesumweltamt Brandenburg) (Hrsg.): Biotopkartierung Brandenburg. Kartierungsanleitung. Landesumweltamt Brandenburg. Potsdam 2004.

LUA (Landesumweltamt Brandenburg) (Hrsg.): Lebensräume und Arten der FFH-Richtlinie in Brandenburg. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg. Heft 1 und 2. Landesumweltamt Brandenburg. Potsdam 2002.

Maas, D.: Umweltmonitoring – Biomonitoring: Begriffsdefinitionen. In: T. Blaschke (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung. Heidelberg 1999.

Marks, R., M. J. Müller, H. Leser & H.-J. Klink (Hrsg.): Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes. Forschungen zur deutschen Landeskunde. Band 229. Trier 1992.

Maselli, F., C. Conese, T. de Filippis & M. Romani: Integration of ancillary data into a maximum-likelihood classifier with nonparametric priors. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Volume 50. Issue 2. 1995.

McGarigal, K. & B. J. Marks: Fragstats. Version 2.0. Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis, OR. 1994.

Mclver D.K. & M.A. Friedl: Using prior probabilities in decision-tree classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, Volume 81, Issues 2-3. 2002.

Meyer, F.: Hierarchies of Partitions and Morphological Segmentation. In: *Scale-Space and Morphology in Computer Vision : Third International Conference, Scale-Space 2001, Proceedings*. Vancouver, Canada 2001.

Moskal, L. M.: Investigating Texture Inversion in High-Resolution Multispectral Imagery; Implications for Forest Classification. *Proceedings, ASPRS 2002 Annual Conference and FIG XXII Congress*. Washington D.C. 2002.

Moskal, L. M. & S. E. Franklin: Classifying multistory forest stands using high spatial resolution CASI image texture, *Proceedings, ASPRS Annual Meeting 2001*, St. Louis, MO. 2001.

Müller, F.: Ableitung von integrativen Indikatoren zur Bewertung von Ökosystem-Zuständen für die Umweltökonomische Gesamtrechnung – Diskussiongrundlage für eine Basis-Konzeption zur Indikation der Funktionalität von Ökosystemen. Projektstudie für das Statistische Bundesamt. Wiesbaden 1996.

Pakzad, K.: Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, Nr. 243. Hannover 2001.

Peddle, D.R.: Knowledge Formulation for Supervised Evidential Classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol 61. 1995.

Plachter, H.: *Naturschutz*. UTB Verlag. Stuttgart, Jena 1991.

Plachter, H., D. Bernotat, R. Müssner & U. Riecken: Entwicklung und Festlegung von Methodenstandards im Naturschutz. *Landschaftspflege und Naturschutz*. Heft 70. BfN. Bonn 2002.

Rath, S.: Model Discretisation in 2D Hydroinformatics based on High Resolution Remote Sensing Data and the Feasibility of Automated Model Parameterization. PhD-Thesis, *Hamburger Wasserbauschriften*. Hamburg University of Technology 2006.

Richards, J.A.: *Remote Sensing. Digital Image Analysis*. Springer Verlag. 1993.

Rückriem, C. & S. Roscher: Empfehlungen zur Umsetzung der Berichtspflicht gemäß Artikel 17 der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie. *Angewandte Landschaftsökologie*. Heft 22. BfN. Bonn-Bad Godesberg 1999.

Rosenfield, G. H. & K. Fitzpatrick-Lins: A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 52. 1986.

Saidani, N: Erkennung der Sturmschäden im Wald auf der Basis kleinmaßstäbiger Luftbilder und Entwicklung eines Modells zur Abschätzung der Sturmgefährdung der Wälder auf der Basis von

räumlichen Daten. Dissertation. <http://freidok.ub.uni-freiburg.de/volltexte/1366/>. Universität Freiburg 2004.

Sandau, R.: High resolution mapping with small Satellites. GIS 9/2004. Heidelberg 2004.

Schiewe, J.: Auswertung hoch auflösender und multi-sensoraler Fernerkundungsdaten. Materialien Umweltwissenschaften Vechta. Heft 18. Vechta 2003.

Schiewe, J. & M. Ehlers: Semantisches Potenzial digitaler flugzeuggetragener Fernerkundungs-Sensoren. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation. Heft 6. Stuttgart 2004.

Schönthaler K., U. Meyer, D. Pokorny, M. Reichenbach, D. Schuller & W. Windhorst: Ökosystemare Umweltbeobachtung - Vom Konzept zur Umsetzung. Erich Schmidt Verlag. Berlin 2003.

Scholz, E.: Die naturräumliche Gliederung Brandenburgs. Pädagogisches Bezirkskabinett (Hrsg.). Potsdam 1962.

Schowengerdt, R. A.: Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Second Edition. Elsevier 1997.

Sindhuber, A.: Ergänzung und Fortführung eines digitalen Landschaftsmodelles mit multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 48. Wien 1998.

SPIN: www.spin-project.org (10.05.2004).

Ssymank, A., U. Riecken & U. Ries: Das Problem des Bezugssystems für eine Rote Liste Biotop - Standard Biotoptypenverzeichnis, Betrachtungsebenen, Differenzierungsgrad und Berücksichtigung regionaler Gegebenheiten. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. Heft 38. BfN. Bonn-Bad Godesberg 1993.

Ssymank, A., U. Hauke, C. Rückriem & E. Schröder: Das europäische Schutzgebietssystem Natura 2000. BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (92/43/EWG) und der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG). Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. Heft 53. BfN. Bonn-Bad Godesberg 1998.

Ssymank, A.: Rahmenbedingungen für die naturschutzfachliche Bewertung großer Räume und fachliche Anforderungen an ein Bundesvorrangflächensystem für den Naturschutz. In: Ssymank, A. (Hrsg.): Vorrangflächen, Schutzgebietssysteme und naturschutzfachliche Bewertung großer Räume in Deutschland. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. Heft 63. BfN. Bonn-Bad Godesberg 2000.

Steinnocher, K.: Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösenden panchromatischen Satellitenbilddaten. In: AGIT IX - Salzburger Geogr. Materialien, Heft 26. Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Salzburg 1997.

Stolz, R.: Die Verwendung der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten. Münchner Geogr. Abhandlungen. Reihe B. Band B 26. 1998.

Story, M. & R. Congalton: Accuracy assessment: A user's perspective. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 52. 1986.

Tou, J. & R. Gonzalez: Pattern Recognition Principles. Addison-Wesley, Massachusetts 1974.

Tsai, F. & C. Chen: Detecting invasive plants using hyperspectral and high resolution satellite images. In: Proc. of ISPRS XXth Congress July 14-23, IAPRS, Vol. XXXV Part B7, 2004, Istanbul 2004.

Volk, M. & U. Steinhardt: Probleme bei der Ableitung dimensionsspezifischer Parameter und Indikatoren für mesoskalige Landschaftsbewertungen. In: Steinhardt, U. & M. Volk (Hrsg.): Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Stuttgart, Leipzig 1999.

Wegehenkel, M., C. Merz, M. Glemnitz, U. Stachow & G. Lutze: Indikatoren zur nachhaltigen Landschaftsentwicklung – Zustand, Entwicklung und Bewertung.
http://www.zalf.de/home_zalf/institute/lisa/lisa/ergebnisse/agstruk/indikatoren/indikatorenbericht.htm
(19.06.2006)

Wezyk, P., R. de Kok & G. Zajaczkowski: The role of statistical and structural texture analysis in VHR-image analysis for forest applications – A case study on Quickbird data in the Niepolomice Forest. In: Strobl, J., T. Blaschke & G. Griesebener (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2004 – Beiträge zum 16. AGIT-Symposium Salzburg, Wichmann Verlag, Heidelberg 2004.

Wiegand, G. et al.: Gelbdruck „Biotop und Biotoptypen“. In: Plachter et al.: Entwicklung und Festlegung von Methodenstandards im Naturschutz. Landschaftspflege und Naturschutz. Heft 70. BfN. Bonn 2002.

Zhang, Y.: A New Automatic Approach for effectively fusing Landsat 7 images and IKONOS images, IEEE/IGARSS'02, Toronto, Canada, Jun3 24-28, 2002.

Zhang, Y & G. Hong: An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images. Information Fusion, 6/3. 2005.

Zimmermann, F.: Probleme bei der fachlichen Auswahl und Abgrenzung von Gebieten für Arten des Anhangs II der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Brandenburg. In: Petersen et al.: Der Schutz von Tier- und Pflanzenarten bei der Umsetzung der FFH-Richtlinie. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. Heft 68. BfN. Bonn-Bad Godesberg 2000.

FRAGEBOGEN

1. Arbeitsablauf / Bearbeitungsintensität

Welche Monitoringkonzepte verfolgen Sie?

Arbeiten Sie gemäß den Vorgaben der Bund-Länder-Arbeitskreise der LANA?
(Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung)

- Verfolgen Sie eigene, landesspezifische Konzepte? Welche?

Nehmen Sie eine Unterteilung des Monitorings in „Grund- und Zusatzprogramm“ vor?

(Unterteilung laut Bundesamt für Naturschutz BfN in einfaches Grundprogramm bei Schutzobjekten mit dem Schutzziel „Erhalt“ und Zusatzprogramm bei Schutzobjekten mit dem Schutzziel „Entwicklung“ sowie bei Schutzobjekten mit „kritischem Erhaltungszustand“).

Wie überprüfen Sie Ihre FFH-Gebiete?

Werden alle FFH-Gebiete überprüft und innerhalb dieser alle Lebensraumtypen?

Gibt es festgelegte Stichprobenflächen?

- Gibt es zufällige Stichprobenflächen?

Wieüberwachen Sie die Lebensraumtypen und Arten außerhalb von FFH-Gebieten?

Werden alle Lebensraumtypen und Arten überwacht?

Gibt es festgelegte Stichprobenflächen?

- Gibt es zufällige Stichprobenflächen?

Wird bei Ihnen das FFH-Monitoring mit anderen Umweltüberwachungen kombiniert

(wenn ja, mit welchen?)

2. Bearbeiter / Personal

Setzen Sie in den FFH-Gebieten Gebietsbetreuer ein?

in allen FFH-Gebieten?

Bilden Sie die Gebietsbetreuer extra aus?

- Setzen Sie auch ehrenamtliche Naturschützer ein?

Wieverläuft bei Ihnen der Datenfluß von der Aufnahme vor Ort zur Umweltbehörde?

per Post / digital?

Wie werden bei Ihnen die erhobenen Daten eingearbeitet?

3. Datengrundlagen

Setzen Sie Fernerkundungsdaten ein (wenn ja, welche)?

Ist bei Ihnen eine flächendeckende Kartierung der Lebensraumtypen vorhanden?

In welchem Turnus wollen Sie diese wiederholen (terrestrisch oder fernerkundlich)?

3. Kostenrahmen

Mit wieviel Kosten pro Jahr rechnen Sie für das Monitoring Ihrer FFH-Gebiete (Kostenschätzung)?

EU-Code	Lebensraumtyp	Einstufung
1340	Salzwiesen im Binnenland	Prioritärer Lebensraum
2310	Trockene Sandheiden mit <i>Calluna</i> und <i>Genista</i> [Dünen im Binnenland]	
2330	Dünen mit offenen Grasflächen mit <i>Corynephorus</i> und <i>Agrostis</i> [Dünen im Binnenland]	
3130	Oligo- bis mesotrophe stehende Gewässer mit Vegetation der Littorelletea uniflorae und/oder der Isoeto-Nanojuncetea	
3140	Oligo- bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer mit benthischer Vegetation aus Armleuchteralgen	
3150	Natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation des Magnopotamions oder Hydrocharitions	
3160	Dystrophe Seen und Teiche	
3260	Flüsse der planaren bis montanen Stufe mit Vegetation des Ranunculion fluitantis und des Callitricho-Batrachion	
3270	Flüsse mit Schlammhängen mit Vegetation des Chenopodion rubri p.p. und des Bidention p.p.	
4010	Feuchte Heiden des nordatlantischen Raums mit <i>Erica tetralix</i>	
4030	Trockene europäische Heiden	
6120	Trockene, kalkreiche Sandrasen	Prioritärer Lebensraum
6210	Naturnahe Kalk-Trockenrasen und deren Verbuschungsstadien (Festuco-Brometalia)(* besondere Bestände mit bemerkenswerten Orchideen)	Prioritärer Lebensraum
6214	Sandtrockenrasen (* Bestände mit bemerkenswerten Orchideen)	
6230	Artenreiche montane Borstgrasrasen (und submontan auf dem europäischen Festland) auf Silikatböden	Prioritärer Lebensraum
6240	Subpannonische Steppen-Trockenrasen [Festucetalia vallesiacae]	Prioritärer Lebensraum
6410	Pfeifengraswiesen auf kalkreichem Boden, torfigen und tonig-schluffigen Böden (Molinion caeruleae)	
6430	Feuchte Hochstaudenfluren der planaren und montanen bis alpinen Stufe	
6440	Brenndolden-Auenwiesen (<i>Cnidion dubii</i>)	
6510	Magere Flachland-Mähwiesen (<i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i>)	
7140	Übergangs- und Schwinggrasmoore	
7150	Torfmoor-Schlenken (<i>Rhynchosporion</i>)	
7210	Kalkreiche Sümpfe mit <i>Cladium mariscus</i> und Arten des Caricion davallianae	Prioritärer Lebensraum
7220	Kalktuffquellen (<i>Cratoneurion</i>)	Prioritärer Lebensraum
7230	Kalkreiche Niedermoore	
9110	Hainsimsen-Buchenwald (<i>Luzulo-Fagetum</i>)	
9130	Waldmeister-Buchenwald (<i>Asperulo-Fagetum</i>)	
9150	Mitteuropäischer Orchideen-Kalk-Buchenwald (<i>Cephalanthero-Fagion</i>)	

Tab. A.1: Fortsetzung nächste Seite

9160	Subatlantischer oder mitteleuropäischer Stieleichenwald oder Hainbuchenwald (<i>Carpinion betuli</i>) [Stellario-Carpinetum]	
9170	Labkraut-Eichen-Hainbuchenwald <i>Galio-Carpinetum</i>	
9180	Schlucht- und Hangmischwälder <i>Tilio-Acerion</i>	Prioritärer Lebensraum
9190	Alte bodensaure Eichenwälder auf Sandebenen mit <i>Quercus robur</i>	
91D0	Moorwälder	Prioritärer Lebensraum
91D1	Birken-Moorwald	Prioritärer Lebensraum
91D2	Waldkiefern-Moorwald	Prioritärer Lebensraum
91E0	Auen-Wälder mit <i>Alnus glutinosa</i> und <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno-Padion</i> , <i>Alnion incanae</i> , <i>Salicion albae</i>)	Prioritärer Lebensraum
91F0	Hartholzauewälder mit <i>Quercus robur</i> , <i>Ulmus laevis</i> , <i>Ulmus minor</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> oder <i>Fraxinus angustifolia</i> (<i>Ulmenion minoris</i>)	
91G0	Pannonische Wälder mit <i>Quercus petraea</i> und <i>Carpinus betulus</i> [<i>Tilio-Carpinetum</i>]	Prioritärer Lebensraum
9410	Montane bis alpine bodensaure Fichtenwälder (<i>Vaccinio-Piceetea</i>)	

Tab. A.1: In Brandenburg vorkommende LRT (Quelle: LUA, 2002)

Objektklasse	Testgebiete	Anzahl Testflächen
Acker/Getreide	4	22
Acker/Mais	3	6
Acker/Senf	2	6
Arten der Ackerbrache	3	21
Arten der trockenen Besenginsterheide	3	19
Arten der feuchten Hochstauden	4	23
Arten der Feuchtwiesen	3	39
Arten der Flutrasen	1	13
Arten der Frischwiesen/-weiden	3	31
Getreide reif	2	29
Grünland intensiv	4	31
Arten der Halbtrockenrasen	3	30
Roehricht 1 (Typha)	2	6
Roehricht 2 (Glyceria)	1	6
Roehricht 3 (Phragmites Wasser)	4	45
Roehricht 4 (Phalaris)	3	12
Roehricht 5 (Phragmites Land)	4	44
Roehricht 6 (Carex feucht)	2	8
Roehricht 7 (Streuwiesen Carex)	2	29
Ruderalflur 1 NDVI < 0.3 (Gras)	4	47
Ruderalflur 2 NDVI > 0.3 (Gras)	4	35
Ruderalflur 3 NDVI > 0.3 (Stauden)	4	28
Sandtrockenrasen kryptogamenarm 1	3	29
Sandtrockenrasen kryptogamenarm 2	1	4
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	3	13
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	2	40
Arten der Schlamm Bodenfluren	2	3
Arten der Schwimmblattvegetation	3	32
Arten der Wasserlinsendecken	4	30
Arten der trockenen Zwergstrauchheiden	3	42
Arten der torfmoosd. Zwischenmoore	1	13
Ackerboden (humos)	4	43
Ackerboden (nass)	2	10
Grünland, gemäht	4	36
kiesiger Sand	2	7
Sand	4	29
Wasser klar	4	32
Wasser trüb	4	36
Asphalt/Dachpappe hell	4	77
Beton	4	62
Dach bemoost	4	25
Metall-/Glasdach	3	31
Teerdach/Asphalt	4	58
Ziegeldach/Tartan beschattet	4	26
Ziegeldach/Tartan besonnt	4	55
Summe:	4	1263

Tab. A.2: Anzahl und Verteilung der Testflächen

CIR-Erfassungseinheiten, Quelle: Luftbild und Planung GmbH

Erfassungseinheiten der CIR-Biotoptypen- und Landnutzungskartierung Brandenburg

(Stand 15.7.94)

01 Fließgewässer

- | | |
|--------|--|
| 11 | Bäche (durchschn.Breite ca. <5m) |
| 12 | Fluß (durchschn.Breite ca. >5m) |
| 13 | Gräben (durchschn.Breite ca. <3m) |
| 14 | Kanäle (durchschn.Breite ca. >3m) |
| 20 | Schwimmblattgesellschaft in Fließgewässern |
| 21 | Röhricht in und an Fließgewässern |
| | |
| 0 0 |keine Angabe |
| 0 1/sb |Schwimmblattgesellschaft |
| 0 2/ro |Röhricht (Schilf, Rohrkolben, Teichbinse) |
| 0 3/kl |Kleinröhricht (Seggen, Igelkolben) |
| 0 4/gs |Gehölzsaum |
| 0 5/ru |ruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden |
| 0 6/ra |Rasenböschung |
| 0 9/l |gestufte Verlandungsvegetation (Schwimmblatt / Röhricht / Gehölzsaum) |
| | |
| 0 |keine Angabe |
| 1/st |Steilufer, natürlich |
| 2/fl |Flachufer, natürlich |
| 3/kb |künstliche Befestigung, Uferverbauung |
| 4/ve |begradigte Ufer- / Fließstrecken mit Verbauung |
| 5/be |begradigte Ufer- / Fließstrecken ohne Verbauung |
| 6/sa |Sandstrand |
| 7/bu |Buhne |
| | |
| 0 |keine Angabe |
| 1/tr |trockengefallen |
| 3/vr |verrohrt |

02 Stillgewässer

- | | |
|------|--|
| 10 | Seen, Flachsee, Weiher, Flußsee |
| 112 |Altwasser (Altarm) |
| 12 | Kleingewässer (Sölle, Pfuhe, Kolke, temporäre Kleingewässer) |
| 14 | Staugewässer, Flachlandspeicher |
| 15 | Teiche |
| 16 | Grubengewässer und Abgrabungsseen |
| 1 |Torfstiche (ehem.) |
| 2 |Abbaugruben (ehem.) |
| 4 |Steinbrüche |
| 5 |Braunkohle-Tagebau |
| 17 | Moorgewässer, dystrophe Gewässer |
| 20 | Schwimmblattgesellschaft in Stillgewässern |
| 21 | Röhricht in und an Stillgewässern |
| | |
| 0 |keine Angabe |
| 1/sb |Schwimmblattgesellschaft |
| 2/ro |Röhricht (Schilf, Rohrkolben, Teichbinse) |

- 3/kl Kleinröhricht (Seggen, Igelkolben)
- 4/gs Gehölzsaum
- 5/ru ruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden
- 6/ra Rasenböschung
- 9/vl gestufte Verlandungsvegetation (Schwimblatt / Röhricht / Gehölzsaum)

- 0 keine Angabe
- 1/st Steilufer, natürlich
- 2/fl Flachufer, natürlich
- 3/kb künstliche Befestigung, Uferverbauung
- 4/ve begradigte Ufer- / Fließstrecken mit Verbauung
- 5/be begradigte Ufer- / Fließstrecken ohne Verbauung
- 6/sa Sandstrand
- 7/bu Buhne

- 0 keine Angaben
- 1/tr..... trocken gefallen

04 Moore und Sümpfe

- 10 Hochmoore, Zwischenmoor (offen, incl. Degenerationsstadien)
- 12 Großseggen- und Röhrichtmoor, Landröhricht
- 0 0 keine Angabe
- 0 4/gs mit Gehölzsaum
- 0 7/wa mit Baumbestand
- 0 8/ga mit Gehölzaufwuchs
- 0 0 keine Angabe
- 0 6/gr..... mit Gräben durchzogen
- 13 Moorgehölze (Strauchstadium, Jungbäume)
- 6 Birke / Erle
- 8 Kiefer
- 0 0 keine Angabe
- 0 6/gr..... mit Gräben durchzogen

05 Gras- und Staudenfluren

- 10 Feuchtwiesen und Feuchtweiden
- 0 keine Angaben
- 1 Großseggenwiese, Streuwiese
- 2 arme und reiche Feuchtwiesen, Feuchtweiden
- 4 wechselfeuchtes Auengrünland
- 0 keine Angabe
- 7/wa mit Baumbestand (Deckung bis 30%)
- 8/ga Gehölzaufwuchs (Deckung bis 30%)
- 0 0 keine Angabe
- 0 6/gr..... mit Gräben durchzogen
- 11 Frischwiesen, Frischweiden, mesophiles Grünland
- 0 0 keine Angabe
- 0 7/wa mit Baumbestand (Deckung bis 30%)
- 0 0 keine Angabe
- 0 6/gr..... mit Gräben durchzogen
- 12 Trockenrasen, Halbtrockenrasen
- 0 0 keine Angabe
- 0 7/wa mit Baumbestand (Deckung bis 30%)

- 0 8/ga Gehölzaufwuchs (Deckung bis 30%)
- 13 Ruderafluren / Schlagfluren (graslandartig)
 - 0 0 keine Angabe
 - 0 7/wa mit Baumbestand (Deckung bis 30%)
 - 0 8/ga Gehölzaufwuchs (Deckung bis 30%)
- 14 Staudenfluren und -säume feuchter bis nasser Standorte
 - 0 0 keine Angabe
 - 0 7/wa mit Baumbestand (Deckung bis 30%)
 - 0 8/ga Gehölzaufwuchs (Deckung bis 30%)
 - 0 0 keine Angabe
 - 0 6/gr..... mit Gräben durchzogen
- 15 Intensivgrasland, Saatgrasland
 - 0 0 keine Angaben
 - 0 5/ru ruderaler Staudensaum
 - 0 7/wa mit Baumbestand (Deckung bis 30%)
 - 0 0 keine Angabe
 - 0 6/gr..... mit Gräben durchzogen

06 Zwergstrauchheiden und Nadelgebüsche, Heideland

- 10 Zwergstrauchheide
 - 0 keine Angaben
 - 1 feuchte Ausprägung (Moorheide, Feuchtheide)
 - 2 trockene Ausprägung (Sandheide)
 - 0 keine Angabe
 - 8/ga Gehölzaufwuchs (fremde Arten)
- 11 Besenginster- und Wacholdergebüsche

07 Laubgebüsche, Feldgehölze, Alleen, Baumreihen

- 10 flächige Laubgebüsche
 - 0 sonstige flächige Laubgebüsche
 - 1 Weidengebüsche
- 11 Feldgehölz / streifenartiges Feldgehölz / Baumgruppe
 - 1 feuchte Ausprägung (Arten der Auenwälder)
- 13 Hecken / Windschutzstreifen, gestuft (ab 100 m)
 - 0 0 keine Angaben (ohne Überschirmung)
 - 0 5/ru ruderaler Staudensaum
 - 0 7/ü mit Überschirmung (durchgewachsen)
 - 0 keine Angaben
 - 8/b breiter 5 Meter
 - 9/l lückig
 - 0 keine Angabe
 - 4/d..... doppelte Hecke
- 14 Alleen und Baumreihen (ab 100 m)
 - 0 0 keine Angabe
 - 0 5/ru ruderaler Staudensaum
 - 0 keine Angabe
 - 9/l lückig
- 15 Einzelbäume, Solitäre
- 16 Kopfbäume, Kopfbaumreihen (ab 100 m)
 - 0 0 keine Angabe
 - 0 9/l lückig
- 17 Streuobstwiesen

18		Obstbaumallee, Obstbaumreihe (ab 100 m)
1		.....Obstbaumallee
2		.....Obstbaumreihe
0		.....keine Angabe
5/ru		.....ruderaler Staudensaum
0		.....keine Angabe
9/l		.....lückig
19		Baumreihe (ab 100 m)
0		.....keine Angabe (sonstige)
1/pa		.....Pappelreihe
0 0		.....keine Angabe
0 9/l		.....lückig
0		.....keine Angabe
4/d		.....doppelte Baumreihe
5/m		.....mehrreihige Baumreihe
20		Obstplantagen
0 0		.....keine Angabe
0 4/gs		.....Begleitgehölze / Gehölzsaum

08 Wälder und Forsten

10		Moor- und Bruchwälder
0		.....keine Angaben (sonstige)
6		.....Birken- / Erlenbruchwald
8		.....Kiefernbruchwald
0 0		.....keine Angabe
0 8/e		.....entwässert
0		.....keine Angabe
5/ru		.....ruderaler Saum
8/wm		.....Waldmantel (Altbäume)
11		Erlen-Eschenwälder
0 0 0 0		.....keine Angabe
0 0 0 5/ru		.....ruderaler Saum
0 0 0 8/wm		.....Waldmantel (Altbäume)
12		Pappel-Weiden-Weichholzauewälder
0 0 0 0		.....keine Angabe
0 0 0 5/ru		.....ruderaler Saum
0 0 0 8/wm		.....Waldmantel (Altbäume)
13		Stieleichen-Ulmen-Hartholzauewälder
0 0 0 0		.....keine Angabe
0 0 0 5/ru		.....ruderaler Saum
0 0 0 8/wm		.....Waldmantel (Altbäume)
26		Rodung, Wiederaufforstung
0		.....keine Angaben
1		.....Laubaufforstung
2		.....Nadelaufforstung
0 0 0		.....keine Angabe
0 0 5/ru		.....ruderaler Saum
0 0 8/wm		.....Waldmantel (Altbäume)
27		Waldsaum, gestuft
28		Vorwaldstadium
0 0 0 0		.....keine Angabe
0 0 0 5/ru		.....ruderaler Saum
0 0 0 8/wm		.....Waldmantel (Altbäume)

- 3**Laubbestände (Einfachcode "L")
-Hauptbaumart:
- 0nicht vorhanden
- 1Eiche
- 2Buche
- 3Esche
- 4Robinie
- 5Pappel
- 6Birke
- 7Erle
- 8
- 9Baumart nicht erkannt
-Nebenbaumart:
- 0nicht vorhanden
- 1Eiche
- 2Buche
- 3Esche
- 4Robinie
- 5Pappel
- 6Birke
- 7Erle
- 8
- 9Baumart nicht erkannt
- Mischung:
- 0nicht vorhanden
- 1Harthölzer
- 2Weichhölzer
- 3Laubmischung
- 4Nadelmischung
- 5Laub- Nadelmischung
- 6Laubmischung, feuchte Ausprägung (Arten der Auenwälder)
- 7
- 8
- 9 Mischung nicht erkannt
- natürliche Alterstufe:
- 1/I Jungwuchs, Stangenholz
- 2/II geringes-mittleres Baumholz
- 3/III starkes Baumholz, Altholz
- 4/X ungleichaltrig
- 5/V Aufforstung mit Überhältern
- 0 keine Angabe
- 5/ru..... ruderaler Saum / Staudensaum
- 8/wm Waldmantel (Altbäume)
- 4**Nadelbestand (Einfachcode "N" = "084")
-Hauptbaumart:
- 0nicht vorhanden
- 1
- 2
- 3
- 4

- 5
- 6Lärche
- 7Fichte, Sitkafichte, Douglasie, etc.
- 8Kiefer
- 9Baumart nicht erkannt

-Nebenbaumart:
- 0nicht vorhanden
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6Lärche
- 7Fichte, Sitkafichte, Douglasie etc.
- 8Kiefer
- 9Baumart nicht erkannt

- Mischung:
- 0nicht vorhanden
- 1Harthölzer
- 2Weichhölzer
- 3Laubmischung
- 4Nadelmischung
- 5Laub- Nadelmischung
- 6Laubmischung, feuchte Ausprägung (Arten der Auenwälder)
- 7
- 8
- 9 Mischung nicht erkannt

- natürliche Alterstufe:
- 1/I Jungwuchs, Stangenholz
- 2/II geringes-mittleres Baumholz
- 3/III starkes Baumholz, Altholz
- 4/X ungleichaltrig
- 5/V Aufforstung mit Überhältern

- 0 keine Angabe
- 5/ru ruderaler Saum / Staudensaum
- 8/wm Waldmantel (Altbäume)

- 5Laub - Nadel - Mischung (Einfachcode "LN" = "085")**
-Hauptbaumart:
- 0nicht vorhanden
- 1Eiche
- 2Buche
- 3Esche
- 4Robinie
- 5Pappel
- 6Birke
- 7Erle
- 8
- 9Baumart nicht erkannt

-Nebenbaumart:

- 0 nicht vorhanden
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6 Lärche
- 7 Fichte, Sitkafichte, Douglasie etc.
- 8 Kiefer
- 9 Baumart nicht erkannt

- Mischung:
- 0 nicht vorhanden
- 1 Harthölzer
- 2 Weichhölzer
- 3 Laubmischung
- 4 Nadelmischung
- 5 Laub- Nadelmischung
- 6 Laubmischung, feuchte Ausprägung (Arten der Auenwälder)
- 7
- 8
- 9 Mischung nicht erkannt

- natürliche Alterstufe:
- 1/I Jungwuchs, Stangenholz
- 2/II geringes-mittleres Baumholz
- 3/III starkes Baumholz, Altholz
- 4/X ungleichaltrig
- 5/V Aufforstung mit Überhältern

- 0 keine Angabe
- 5/ru ruderaler Saum / Staudensaum
- 8/wm Waldmantel (Altbäume)

6 Nadel - Laub - Mischung (Einfachcode "NL" = "086")

- Hauptbaumart:
- 0 nicht vorhanden
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6 Lärche
- 7 Fichte, Sitkafichte, Douglasie etc.
- 8 Kiefer
- 9 Baumart nicht erkannt

- Nebenbaumart:
- 0 nicht vorhanden
- 1 Eiche
- 2 Buche
- 3 Esche
- 4 Robinie
- 5 Pappel
- 6 Birke

- 7 Erle
- 8
- 9 Baumart nicht erkannt
- Mischung:
- 0 nicht vorhanden
- 1 Harthölzer
- 2 Weichhölzer
- 3 Laubmischung
- 4 Nadelmischung
- 5 Laub- Nadelmischung
- 6 Laubmischung, feuchte Ausprägung (Arten der Auenwälder)
- 7
- 8
- 9 Mischung nicht erkannt
- natürliche Alterstufe:
- 1/I Jungwuchs, Stangenholz
- 2/II geringes-mittleres Baumholz
- 3/III starkes Baumholz, Altholz
- 4/X ungleichaltrig
- 5/V Aufforstung mit Überhältern
- 0 keine Angabe
- 5/ru ruderaler Saum / Staudensaum
- 8/wm Waldmantel (Altbäume)

09 Äcker

- 13 Äcker, intensiv genutzt
- 0 keine Angaben
- 1 kleinschlägige Parzellierung
- 0 keine Angaben
- 5/ru ruderaler Staudensaum
- 14 Ackerbrachen (soweit nicht Grünlandstadium)
- 0 0 keine Angaben
- 0 5/ru ruderaler Staudensaum
- 15 Wildacker
- 0 0 keine Angaben
- 0 5/ru ruderaler Staudensaum

10 Grün- und Freiflächen in und außerhalb von Siedlungen

- 10 kleine Parkanlagen, Friedhöfe
- 1 kleine Parkanlagen
- 2 Friedhöfe
- 11 Gärten und Gartenbrachen; Grabeland (in Siedlungen >2ha)
- 15 Kleingärten (in Siedlungen >1ha, sonst ohne Begrenzung)
- 16 Freiflächen im Siedlungsbereich (>1ha)
- 17 Sportplätze und Freibäder (in Siedlungen >1ha, sonst ohne Begrenzung)
- 1 Sportplätze
- 2 Freibäder
- 18 Campingplätze (in Siedlungen >1ha, sonst ohne Begrenzung)
- 19 Abstandsgrün, gärtnerisch gestaltet (in Siedlungen >1ha)

- 20 Spielplätze (in Siedlungen >1ha, sonst ohne Begrenzung)
 21 Badeplätze (in Siedlungen >1ha, sonst ohne Begrenzung)
 22 Golfplatz (in Siedlungen >1ha, sonst ohne Begrenzung)
 23 Ferienlager /siedlung
 24 Dorfbauer (incl. Kirche, Backhaus)
- 0 0 keine Angabe
 0 7/wa mit Baumbestand (Deckung > 30%)(gilt für gesamte Gruppe 10)

11 Sonderbiotope

- 12 Binnendünen, offene Abschnitte
 0 0 keine Angaben
 0 5/ru mit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)
 0 8/ga mit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)
- 13 Hohlwege / Erosionstäler
 14 Erdfälle ohne Wasseransammlung
 0 0 keine Angaben
 0 5/ru mit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)
 0 8/ga mit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)
- 15 Block- oder Steinschutthalden
 16 größere Steinhaufen und Steinwälle
 0 0 keine Angaben
 0 5/ru mit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)
 0 8/ga mit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)
- 211Abraumhalden im Braunkohle-Tagebau
 0 keine Angaben
 5/ru mit staudenart. Ruderalveg. (Deckung planiert 30-60%,unplaniert -100%)
 8/ga mit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)
- 22 Spülflächen
 0 0 keine Angaben
 0 5/ru mit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)
 0 8/ga mit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)
- 23 offene Rieselfelder
 0 0 keine Angaben
 0 5/ru mit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)
 0 8/ga mit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)
 0 0 keine Angaben
 0 2/br..... brachgefallen
- 24 Weinberge
 0 0 0 0 keine Angaben
 0 0 0 2/br..... brachgefallen
- 25 Baumschulen, Erwerbsgartenbau
 0 0 0 0 keine Angaben
 0 0 0 2/br..... brachgefallen
- 26 Torfstich, genutzt
 27 offene Flächen
 0sonstige offene Flächen
 1offene Sandflächen
 2 offene Felsflächen
 0 0 0 0..... keine Angabe
 0 0 0 8/dm... auf Dämmen
- 28 Bühnen
 0 0 keine Angaben
 0 5/ru mit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)

- 0 8/gamit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)
- 29 Burgwälle / slavische Wälle
- 0 0keine Angaben
- 0 5/rumit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)
- 0 8/gamit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)

12 Siedlungen, Verkehrsanlagen

- 12 Siedlung und Gewerbe
- 0keine Angabe
- 1Kernbereich mit Wohn- und Gewerbenutzung,
.....Blockrandbebauung (Versiegelung ca. 80-100%)
- 2Zeilenbebauung, Punktbauung, Hochhäuser (Versiegelung ca. 40-80%)
- 3Einzel- oder Reihenhaussiedlung (Versiegelung ca. 30-60%)
- 4Kleinsiedlung, Einzelhäuser (Versiegelung ca. 20-40%)
- 5Industrieflächen (Versiegelung ca. 80-100%)
- 6Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsflächen (Versiegelung ca. 60-100%)
- 7Dorfgebiete, Dorfkerngebiete (Mischung aus Landwirtschaft/Gewerbe/Wohnen)
- 8landwirtschaftliche Betriebsstandorte
- 0 0keine Angabe
- 0 1industrielle Ausprägung (große Betriebshallen, hohe Versiegelung etc.)
- 9techn. Infrastruktur, Ver- und Entsorgung (Kläranlage, Umspannwerk etc.)
- 0keine Angabe
- 7/wamit Baumbestand (Deckung >30%)(gilt für ganze Gruppe 1212)

13 Verkehrsanlagen

- 1Straßen (nur Hauptstraßen, wenn nicht durch Nachbarflächen zu definieren)
- 0keine Angabe
- 4/vgBegleitgehölze / Verkehrsbegleitgrün
- 5/ruruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden
- 6/raRasenböschung
- 2Autobahnen
- 0keine Angabe
- 4/vgBegleitgehölze / Verkehrsbegleitgrün
- 5/ruruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden
- 6/raRasenböschung
- 3Parkplätze (nur größere Flächen erfassen)
- 0keine Angabe
- 4/vgBegleitgehölze / Verkehrsbegleitgrün
- 5/ruruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden
- 6/raRasenböschung
- 7/wamit Baumbestand (Deckung >30%)
- 4Gleisanlagen
- 0keine Angabe
- 4/vgBegleitgehölze / Verkehrsbegleitgrün
- 5/ruruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden
- 6/raRasenböschung
- 5Flugplätze
- 0keine Angabe
- 4/vgBegleitgehölze / Verkehrsbegleitgrün
- 5/ruruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden
- 6/raRasenböschung
- 6Hafenanlagen und Bootshäuser
- 0keine Angabe

- 4/vg Begleitgehölze / Verkehrsbegleitgrün
- 5/ru ruderaler Saum / Staudensaum / feuchte Hochstauden
- 6/ra Rasenböschung
- 7/wa mit Baumbestand (Deckung >30%)

- 14 anthropogen genutzte Sonderflächen
 - 0 keine Angabe (sonst. Flächen m. anthrop. Nutzung)
 - 1 Mülldeponien
 - 2 Abgrabungen / Gruben (Sand-/Kiesgruben)
 - 3 Aufschüttungen / Abraumhalden
 - 4 Bauflächen
 - 5 Lagerflächen
 - 6 Steinbrüche
 - 7 Braunkohle-Tagebau aktiv
 - 0 0 0 keine Angaben
 - 0 0 7/of..... offengelassen / zum Abbau vorbereitet
 - 8 Ablaßstelle, Güllebecken, Spülbecken

 - 0 keine Abgabe (gilt für gesamte Gruppe 1214)
 - 5/ru mit staudenartiger Ruderalvegetation (Deckung 30-60%)
 - 7/wa mit Baumbestand (Deckung 30-60%)
 - 8/ga mit Gehölzaufwuchs (Deckung 30-60%)

- 15 Sonderform der Bauflächen
 - 0 keine Angabe
 - 1 Burgen, Schlösser, Klöster
 - 2 Ruinen (nur außerhalb des Siedlungsverbandes)
 - 3 militärische Sonderbaufläche
 - 0 keine Angabe
 - 7/wa mit Baumbestand (Deckung > 30%)

- Sondercode: (gültig für alle Einheiten)
- 0..... keine Angabe
- 1/bd..... Binnendünen
- 2/dm..... auf Dämmen
- 3/ri..... ehemalige Rieselfelder mit vorhandener Struktur
- 4/aa..... Aufschüttung, Abgrabung (z.B. Bergbau)
- 5/dp..... Deponie
- 6/vf..... Verkehrsflächen / Flugplatz
- 7/gp..... Golfplatz
- 8/pa..... Landschaftspark / Großpark
- 9/mi..... militärisches Gelände

die Spalteneinteilung erfolgt nach:

- xx Hauptgruppe
- xx Untergruppe
- x Bestand
- x Ausprägung / begleitende Vegetation
- x Nutzung / Phaenologie
- x Sekundämnutzung / Besonderheiten
- x Sondercode

	1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	14	16	17	18	21	22	23	24	Σ
Wasser	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
Arten der Wasserlinsendecken	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Arten der Schwimmblattvegetation	0	0	13	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
Röhricht an Gewässern	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
offener Boden	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	23
Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	0	0	0	41	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3	0	48
Landröhricht	0	0	0	0	0	2	27	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	35
Großseggenröhricht	0	0	0	0	0	0	1	18	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	20
Arten der Feuchtwiesen	0	0	0	0	0	0	1	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
Arten der feuchten Hochstauden	0	0	0	0	0	0	3	0	0	17	0	0	0	0	1	0	0	0	21
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	8
Grünland, intensiv	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	1	0	1	4	0	0	13
Arten der Frischwiesen/-weiden	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	23	0	0	0	0	0	27
Grünland, gemäht	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	16	0	0	0	0	18
Gehölz	0	0	0	1	0	4	0	0	0	1	0	1	0	0	92	0	0	0	99
Acker	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0	5	0	38	0	0	48
Arten der Ackerbrache versiegelt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	8
Summe	31	10	13	21	23	50	35	20	21	19	12	13	26	22	96	42	10	30	494

Tab. A.3: Konfusionsmatrix Testgebiet Potsdam

	1	2	3	4	5	7	9	10	18	21	22	23	24	Σ
Wasser	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	26
Arten der Wasserlinsendecken	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
Arten der Schwimmblattvegetation	0	0	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
Röhricht an Gewässern	0	0	4	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
offener Boden	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	3	22
Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	2	1	0	23	0	0	1	1	0	4	0	32
Landröhricht	0	0	0	3	0	1	52	8	0	1	0	0	0	65
Großseggenröhricht	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	18
Grünland, gemäht	0	0	0	0	0	1	1	0	20	0	0	5	0	27
Gehölz	0	0	0	0	0	1	1	0	0	42	0	0	0	44
Acker	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	25	0	0	26
Arten der Ackerbrache versiegelt	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	12	0	14
Summe	25	19	18	21	20	26	54	26	23	45	25	21	22	345

Tab. A.4: Konfusionsmatrix Testgebiet Schwedt

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	Σ	
Wasser	1	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	
Arten der Wasserlinsen-decken	2	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
Arten der Schwimmblatt-vegetation	3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Röhricht an Gewässern	4	0	0	0	20	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
offener Boden	5	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	21
Sandtrockenrasen kryptogamen-reich 2	6	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
Arten der Gras- und Staudenfluren	7	0	0	0	0	0	0	34	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	44
Arten des torfmosssdom. Zwischenmoor	8	0	0	3	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
Landröhricht	9	0	0	0	3	0	0	0	1	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
Großseggen-röhricht	10	0	0	0	0	0	0	0	0	3	20	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	24
Arten der Feuchtwiesen	11	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	22	1	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	29
Arten der feuchten Hochstauden	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Sandtrockenrasen kryptogamen-arm	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
Sandtrockenrasen kryptogamen-reich 1	15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
Grünland, intensiv	16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	16	0	0	0	0	0	2	0	0	21
Arten der Frischwiesen/-weiden	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	2	17	0	0	0	0	0	0	0	22
Grünland, gemäht	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	2	0	23
Trockene Sandheide	19	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	26
Gehölz	21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0	0	82
Acker	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	21	0	0	23
Arten der Ackerbrache versiegelt	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	22	0	26
Summe	24	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	20
		21	5	7	24	20	20	34	20	25	21	27	22	21	24	21	22	23	24	75	24	25	20		525

Tab. A.5: Konfusionsmatrix Testgebiet Lieberose

	1	4	5	6	7	9	10	11	14	15	16	17	18	19	21	22	24	Σ
Wasser	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
Röhricht an Gewässern	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
offener Boden	0	0	21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	24
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	0	0	0	15	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	18
Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	0	0	25	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	30
Landröhricht	0	0	0	0	1	41	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	46
Großseggenröhricht	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
Arten der Feuchtwiesen	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	2	0	0	0	0	0	0	12
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	2	19
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	1	27
Grünland, intensiv	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	16
Arten der Frischwiesen/-weiden	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	21	0	0	0	0	0	22
Grünland, gemäht	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	17
Trockene Sandheide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	1	0	0	21
Gehölz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	23
Acker	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	22
versiegelt	2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	18	22
Summe	16	16	21	17	27	42	10	10	20	27	22	22	17	21	25	22	23	358

Tab. A.6: Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit BTNTK 1992/93 abgeleitet)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Σ
Wasser	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
Röhricht an Gewässern	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
offener Boden	0	0	21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	24
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	0	0	21	3	1	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	29
Landröhricht	0	0	0	0	0	36	1	2	0	0	2	0	0	1	1	0	0	43
Großseggenröhricht	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Arten der Feuchtwiesen	0	0	0	0	2	2	0	6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	11
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0	0	0	0	1	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	19
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	29
Grünland, intensiv	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	17	1	0	0	0	0	0	20
Arten der Frischwiesen/-weiden	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	20	0	0	0	0	0	22
Grünland, gemäht	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	1	0	18
Trockene Sandheide	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	19	1	0	0	21
Gehölz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	23
Acker	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	21	1	23
versiegelt	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	22
Summe	16	16	21	17	27	42	10	10	20	27	22	22	17	21	25	22	23	358

Tab. A.7: Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit BTNTK 1998 abgeleitet)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Σ	
Wasser	1	NULL																		
Röhricht an Gewässern	4	NULL																		
offener Boden	5	0	0	21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	6	0	0	0	16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	19
Arten der Gras- und Staudenfluren	7	0	0	0	0	22	18	2	0	0	0	0	10	0	3	1	0	0	0	56
Landröhricht	9	NULL																		
Großseggenröhricht	10	NULL																		
Arten der Feuchtwiesen	11	NULL																		
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	14	0	0	0	0	1	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	1	3	19	
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	27
Grünland, intensiv	17	0	0	0	0	0	5	0	1	0	0	21	1	0	0	0	0	0	0	28
Arten der Frischwiesen/-weiden	18	0	1	0	0	0	6	4	5	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	26
Grünland, gemäht	19	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	25
Trockene Sandheide	20	0	3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	18	1	0	0	0	24
Gehölz	22	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	23	0	0	0	27
Acker	23	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	21	2	0	26
versiegelt	25	7	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	16	0	25
Summe		7	6	21	17	25	35	10	6	19	27	22	21	17	21	25	22	23		324

Tab. A.8: Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit CORINE 2000 abgeleitet)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Σ
Wasser	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
Röhricht an Gewässern	0	16	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
offener Boden	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 2	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	22
Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	0	0	21	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	25
Landröhricht	0	0	0	0	0	39	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	43
Großseggenröhricht	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Arten der Feuchtwiesen	0	0	0	0	2	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0	0	0	0	1	0	0	0	20	1	0	0	0	0	0	0	1	23
Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	27
Grünland, intensiv	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	18
Arten der Frischwiesen/-weiden	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22	0	0	0	0	0	24
Grünland, gemäht	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	17
Trockene Sandheide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	20
Gehölz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	23
Acker	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	22	0	23
versiegelt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	16
Summe	16	16	21	17	27	42	10	10	20	27	22	22	17	21	25	22	23	358

Tab. A.9: Konfusionsmatrix Testgebiet Jüterbog (Trainingsgebiete mit BTNTK 2003 abgeleitet)

	1	2	4	5	7	9	12	14	17	18	19	20	21	22	24	Σ
Wasser	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
Arten der Wasserlinsendecken	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
Röhricht an Gewässern	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
offener Boden	0	0	0	20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	21
Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
Landröhricht	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
Arten der feuchten Hochstauden	0	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	11
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	19
Arten der Frischwiesen/-weiden	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Grünland, gemäht	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7
Trockene Sandheide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	10
Besenginster	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	20	0	0	0	31
Gehölz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	20
Acker	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	30	0	36
versiegelt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7
Summe	20	20	3	20	20	20	10	20	16	12	20	20	20	30	7	258

Tab. A.10: Konfusionsmatrix Testgebiet Döberitz

	1	4	5	7	9	10	11	12	14	16	17	18	19	21	22	23	24	Σ
Wasser	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Röhricht an Gewässern	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
offener Boden	0	0	8	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Arten der Gras- und Staudenfluren	0	0	0	25	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
Landröhricht	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
Großseggenröhricht	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Arten der Feuchtwiesen	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
Arten der feuchten Hochstauden	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Sandtrockenrasen kryptogamenarm	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Grünland, intensiv	0	0	0	1	0	0	0	0	0	21	3	0	0	0	4	0	0	29
Arten der Frischwiesen/-weiden	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	21
Grünland, gemäht	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	13	0	0	0	0	0	15
Trockene Sandheide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4
Gehölz	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	51	0	0	0	53
Acker	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	1	0	43
Arten der Ackerbrache versiegelt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	7
Summe	10	10	9	28	15	10	8	15	7	21	25	13	5	51	45	8	12	292

Tab. A.11: Konfusionsmatrix Testgebiet Harras

GebNr	LRT	Subtyp	Habitatstruktur	Artinventar	Beeinträchtigungen	Gesamtbewertung
1	3150		A	B	A	A
3	3150		A	B	A	A
4	91E0		B	B	A	B
5	91A1		B	C	C	C
6	91A1		B	C	C	C
7	4030		B	B	C	B
8	9190					E
9	4030		B	A	A	A
10	4030		A	B	C	B
11	4030		A	A	B	A
12	3130	3132	B	C	A	B
13	3130	3132	A	B	B	B
14	2330		A	B	A	A
15	2330		B	B	C	B
16	2330		A	B	A	A
17	2330		C	C	B	C
18	7140		B	C	C	C
19	3150		C	B	C	C
20	3150		A	B	C	B
21	9110		C	B	C	C
22	6120		C	B	A	B
23	91E0		A	B	A	A
24	3260		A	B	A	A
25	91A0		A	B	A	A
26	9160		B	C	A	B
27	4030		B	B	B	B
28	4030		C	C	C	C
29	6120		C	B	C	C
30	4030		C	C	C	C
31	2330		C	B	B	B
32	2330		A	B	A	A
33	2310		A	B	B	B
34	2330		B	C	C	C
35	9190		C	C	C	C
40	3260		A	B	A	A
41	9160		A	B	A	A
42	9190		C	B	A	B
43	9160		B	B	A	B
44	9160		B	C	B	B

Tab. A.12: Bewertung terrestrisch kartierter LRT in Jüterbog

BILDSCHLÜSSEL

- LRT 2310: Trockene Sandheiden mit *Calluna* und *Genista* [Dünen im Binnenland]
 LRT 4030: Trockene europäische Heiden
 LRT 2330: Dünen mit offenen Grasflächen mit *Corynephorus* und *Agrostis* [Dünen im Binnenland]

Beschreibung: dominant durch Zwergsträucher geprägte trockene Heiden oder offene lückige Grasflächen auf bodensauren Binnendünen oder Flugsandaufwehungen
 siehe LUA, 2002

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: oft Verzahnung mit Offensandstellen und mit Sandtrockenrasen oder Vorwaldstadien, unregelmäßige Struktur, oft schollenartig

Farbmerkmale: offene Sandflächen haben meist gleichmäßige Farbverteilung, weiß oder sehr helles beige-grau bis bläulich weiß,
 vegetationsbestandene Flächen sind bei Dominanz von Silbergras oder Sandsegge hell-gräulich oder bläulich, wenige Rotanteile
 bei Dominanz von Moosen und Flechten schwärzlich bis dunkelgrau-grün
 bei Dominanz von ruderalen hochwüchsigen Gräsern gelblich bis rötlich

Abbildungsverhalten

2003: Bildbeispiel zeigt LRT 2310 und 2330

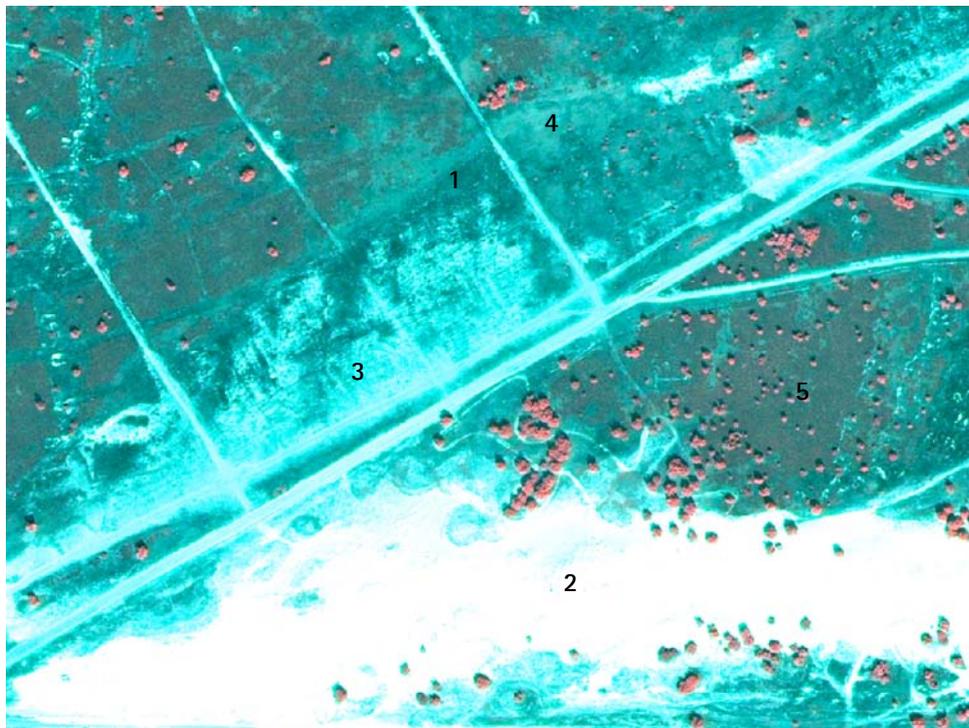


Abb. A.1: Bildschlüssel LRT 2310, 2330 und 4030; 1 moos- und flechtenreiche Silbergrasflur, 2 offene Sandflächen, 3 Silbergrasflur kryptogamenarm, 4 grasreiche Flächen (Landreitgras und Straußgras), 5 Heide (Maßstab ca. 1 : 3.000, Aufnahme datum 06.08.2003)

bessere Unterscheidbarkeit der einzelnen Bestandteile nach Histogrammstreckung:

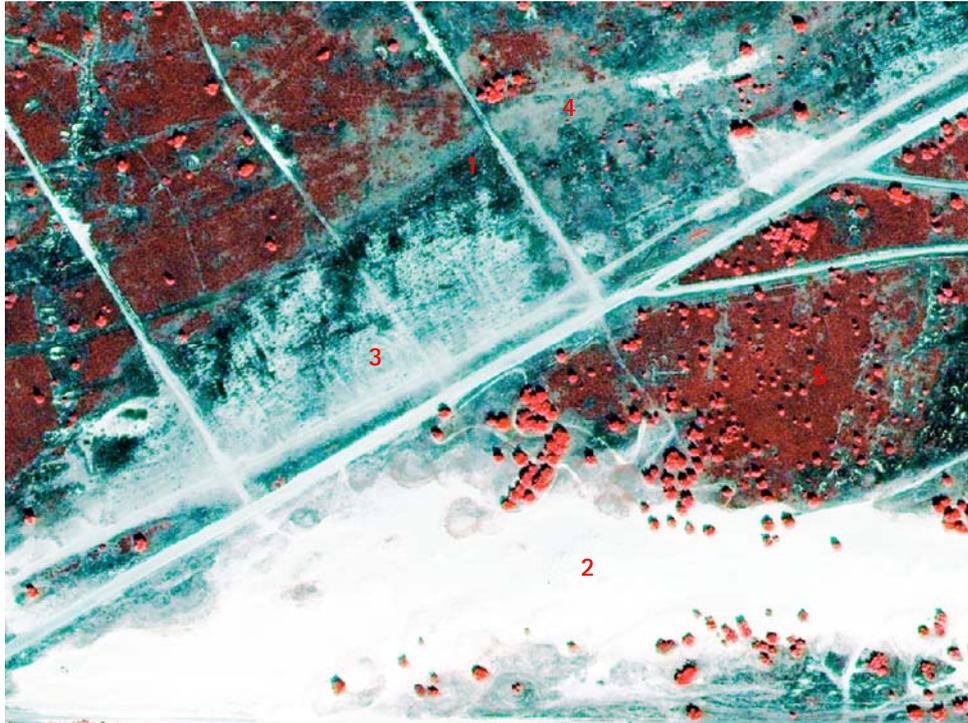


Abb. A.2: Bildschlüssel LRT 2310, 2330 und 4030; 1 moos- und flechtenreiche Silbergrasflur, 2 offene Sandflächen, 3 Silbergrasflur kryptogamenarm, 4 grasreiche Flächen (Landreitgras und Straußgras), 5 Heide (Maßstab ca. 1 : 3.000, Aufnahmedatum 06.08.2003)

LRT 3130: Oligo- bis mesotrophe stehende Gewässer mit Vegetation der Littorelletea uniflorae und/oder der Isoeto-Nanojuncetea

Beschreibung: oligo- bis mesotrophe Stillgewässer mit zeitweilig trockenfallenden Ufern, durch das Vorkommen von sehr niedrig wüchsigen Strandlingsgesellschaften charakterisiert (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: äußere Form unterschiedlich rundlich,

Farbmerkmale: Wasserfläche schwarz bis blauschwarz, durchscheinender Gewässerboden hellblau bis hellgrün; sandige Ufer weiss bis hellbeige, bei Vorkommen von Vegetation rosa bis rötlich

Abbildungsverhalten

2003: Bildbeispiel zeigt LRT 3130 (allerdings einen künstlich angelegten See)



Abb. A.3: Bildschlüssel LRT 3130; 1 Wasserfläche, 2 offene Sandflächen, 3 Uferbewuchs (Zwergbinsen), 4 grasreiche Flächen (Landreitgras und Straußgras), (Maßstab ca. 1 : 1.800, Aufnahmedatum 06.08.2003)

LRT 3140: Oligo- bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer mit benthischer Vegetation aus Armleuchteralgen

Beschreibung: oligo- bis mesotrophe basen- und/oder kalkreiche Standgewässer mit submersen Armleuchteralgenbeständen der Gattungen Chara und Nitellopsis (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: äußere Form unterschiedlich rundlich, Röhricht stark texturiert, bänderförmig am Gewässerrand, bei Landröhricht oft Wildpfade erkennbar, Schwimmblatt flach und oft punktförmig

Farbmerkmale: Wasserfläche im Gegensatz zu anderen Gewässern hellblau bis mittelblau, durchscheinender Gewässerboden hellblau bis hellgrün; je nach Jahreszeit sind Landröhrichtbestände hellrot bei Dominanz von Arten wie Glyceria maxima oder Phragmites australis, gräulich rosa bei Wasserröhricht von Arten wie Phragmites australis mit viel abgestorbenen Bestandteilen oder dunkelrot bei Dominanz von Arten wie Typha latifolia, Schwimmblattvegetation ist hellrosa,

Abbildungsverhalten

2004: Bildbeispiel zeigt LRT 3140



Abb. A.4: Bildschlüssel LRT 3140; 1 Wasserfläche, 2 Schwimmblattvegetation, 3 Schilfröhricht, (Maßstab ca. 1 : 2.000, Aufnahme datum 29.07.2004)

LRT 3150: Natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation des Magnopotamions oder Hydrocharitions

Beschreibung: natürliche meso- bis eutrophe Standgewässer mit Schwimmblatt- und Wasserpflanzenvegetation (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: äußere Form unterschiedlich rundlich, Röhricht stark texturiert, bänderförmig am Gewässerrand, bei Landröhricht oft Wildpfade erkennbar, Schwimmblatt flach und oft punktförmig

Farbmerkmale: Wasserfläche schwarz bis blauschwarz, durchscheinender Gewässerboden hellblau bis hellgrün; je nach Jahreszeit sind Landröhrichtbestände hellrot bei Dominanz von Arten wie *Glyceria maxima* oder *Phragmites australis*, gräulich rosa bei Wasserröhricht von Arten wie *Phragmites australis* mit viel abgestorbenen Bestandteilen oder dunkel braunrot bei Dominanz von Arten wie *Typha latifolia*, Schwimmblattvegetation ist hellrosa, Großseggenbestände in Verlandungszonen sind eher dunkel und grünlich

Abbildungsverhalten

2003: Bildbeispiel zeigt LRT 3150



Abb. A.5: Bildschlüssel LRT 3150; 1 Erlen, 2 Großseggen, 3 Schilfröhricht, 4 Rohrkolbenröhricht, 5 Wasserfläche (Maßstab ca. 1 : 2.000, Aufnahmedatum 06.08.2003)

LRT 3160: Dystrophe Seen und Teiche

Beschreibung: nährstoffarme oligo- bis mesotrophe Stillgewässer auf oder in Kontakt mit sauren Moorsubstraten in Mooren (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: Lage in Mooren, oft fließender Übergang zu Vegetation

Farbmerkmale: Wasserfläche schwarz bis blauschwarz, Landröhrichtbestände hellrot bei Dominanz von Arten wie *Glyceria maxima* oder *Phragmites australis*, gräulich rosa bei Wasserröhricht von Arten wie *Phragmites australis* mit viel abgestorbenen Bestandteilen oder dunkelrot bei Dominanz von Arten wie *Typha latifolia*, Schwimmblattvegetation ist hellrosa

Abbildungsverhalten

2004: Bildbeispiel zeigt LRT 3160



Abb. A.6: Bildschlüssel LRT 3160; 1 Wasserfläche, 2 Landröhricht (Schilf und Binsen), 3 Wasserröhricht, (Maßstab ca. 1 : 3.000, Aufnahmedatum 06.09.2004)

LRT 3270: Flüsse mit Schlamm­bänken mit Vegetation des *Chenopodium rubri* p.p. und des *Bidention* p.p.

Beschreibung: einjährige nitrophytische Vegetation im Uferbereich naturnaher Fließgewässer und in den Zwischenbereichen von Buhnen (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: ungleichmäßige Struktur und Form, geringe Textur bei homogenen Abschnitten

Farbmerkmale: sehr hell grünlich bis weiss, bei dichterem Bewuchs leicht rosa

Abbildungsverhalten

2005: Bildbeispiel zeigt LRT 3270

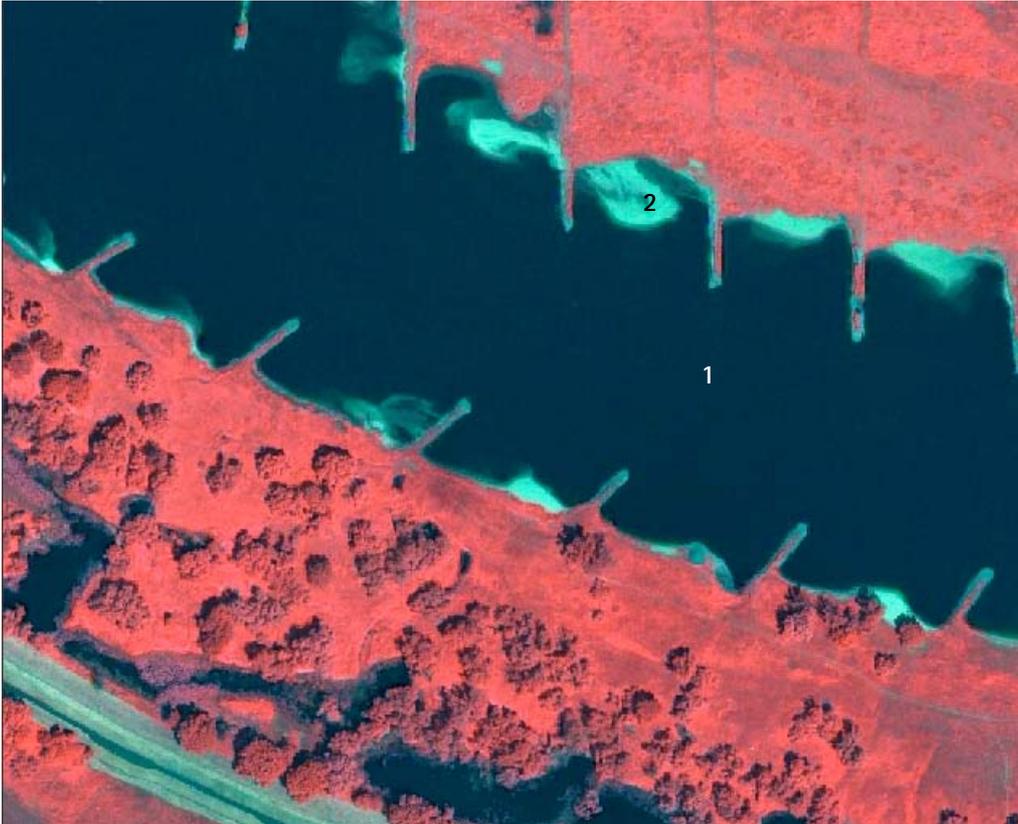


Abb. A.7: Bildschlüssel LRT 3270; 1 Wasserfläche, 2 Schlammbank (Maßstab ca. 1 : 3.500, Aufnahme datum 26.06.2005)

LRT 6120: Trockene, kalkreiche Sandrasen

Beschreibung: offene ungedüngte Grasfluren auf kalkreichen oder basenreichen Substraten (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: ungleichmäßige Struktur, geringe Textur bei homogenen Abschnitten

Farbmerkmale: hell gelblich bis hell rötlich – im Spätsommer nicht von sonstigen Gras- und Staudenfluren zu unterscheiden

Abbildungsverhalten

2003: Bildbeispiel zeigt LRT 6120



Abb. A.8: Bildschlüssel LRT 6120; 1 trockener kalkreicher Sandrasen auf Anhöhe (Bunker), 2 sonstige Gras- und Staudenfluren (Maßstab ca. 1 : 1.800, Aufnahmedatum 06.08.2003)

LRT 6430: Feuchte Hochstaudenfluren der planaren und montanen bis alpinen Stufe

Beschreibung: von Stauden geprägte Flächen frischer, nährstoffreicher Standorte (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: ungleichmäßige Struktur, geringe Textur bei homogenen Abschnitten

Farbmerkmale: kräftig hellrot

Abbildungsverhalten

2005: Bildbeispiel zeigt LRT 6430

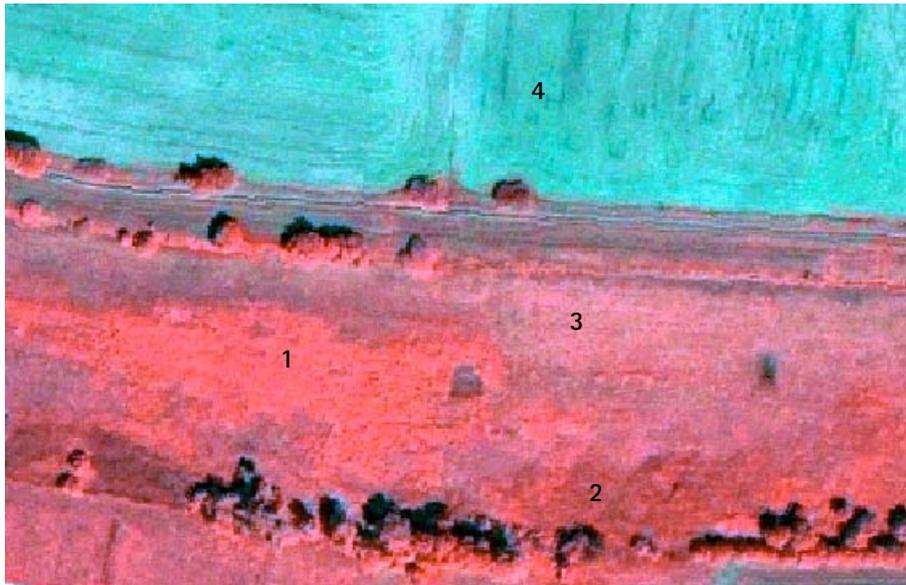


Abb. A.9: Bildschlüssel LRT 6430; 1 feuchte Hochstauden, 2 Landröhricht, 3 Frischwiese, 4 gemähtes Grünland (Maßstab ca. 1 : 1.500, Aufnahme datum 11.07.2005)

LRT 7140: Übergangs- und Schwingrasenmoore

Beschreibung: überwiegend durch Torfmoose geprägte Übergangs- und Schwingrasenmoore auf Torfsubstraten (siehe auch LUA, 2002)

Vegetation: siehe LUA, 2002

Gestaltmerkmale: ungleichmäßige Struktur, geringe Textur bei homogenen Abschnitten

Farbmerkmale: braunrot bis braunorange

Abbildungsverhalten

2003/2004: Bildbeispiel zeigt LRT 7140 (jedoch ohne offene Torfmoosrasen, Krähenbeere überdeckt Torfmoos)

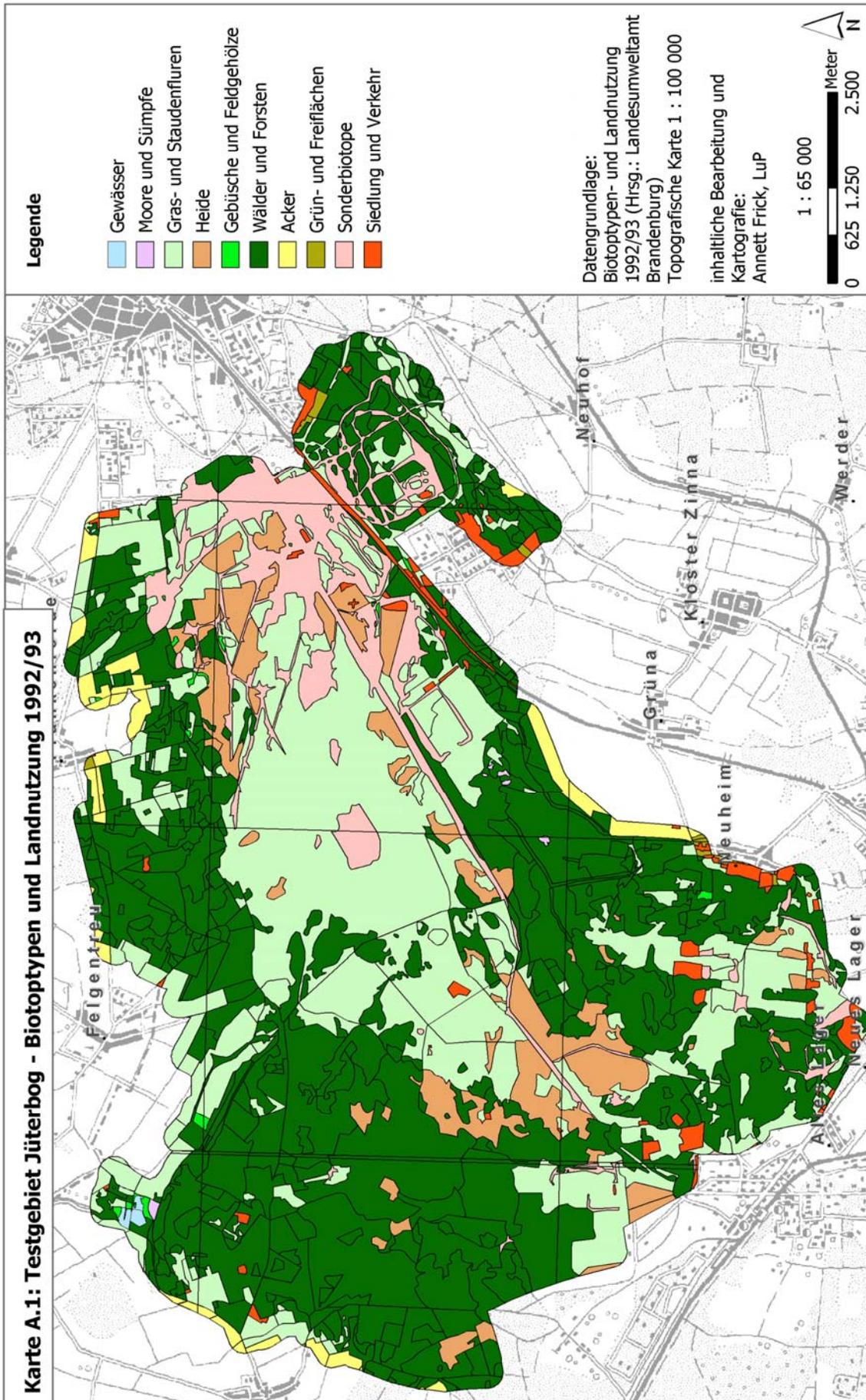


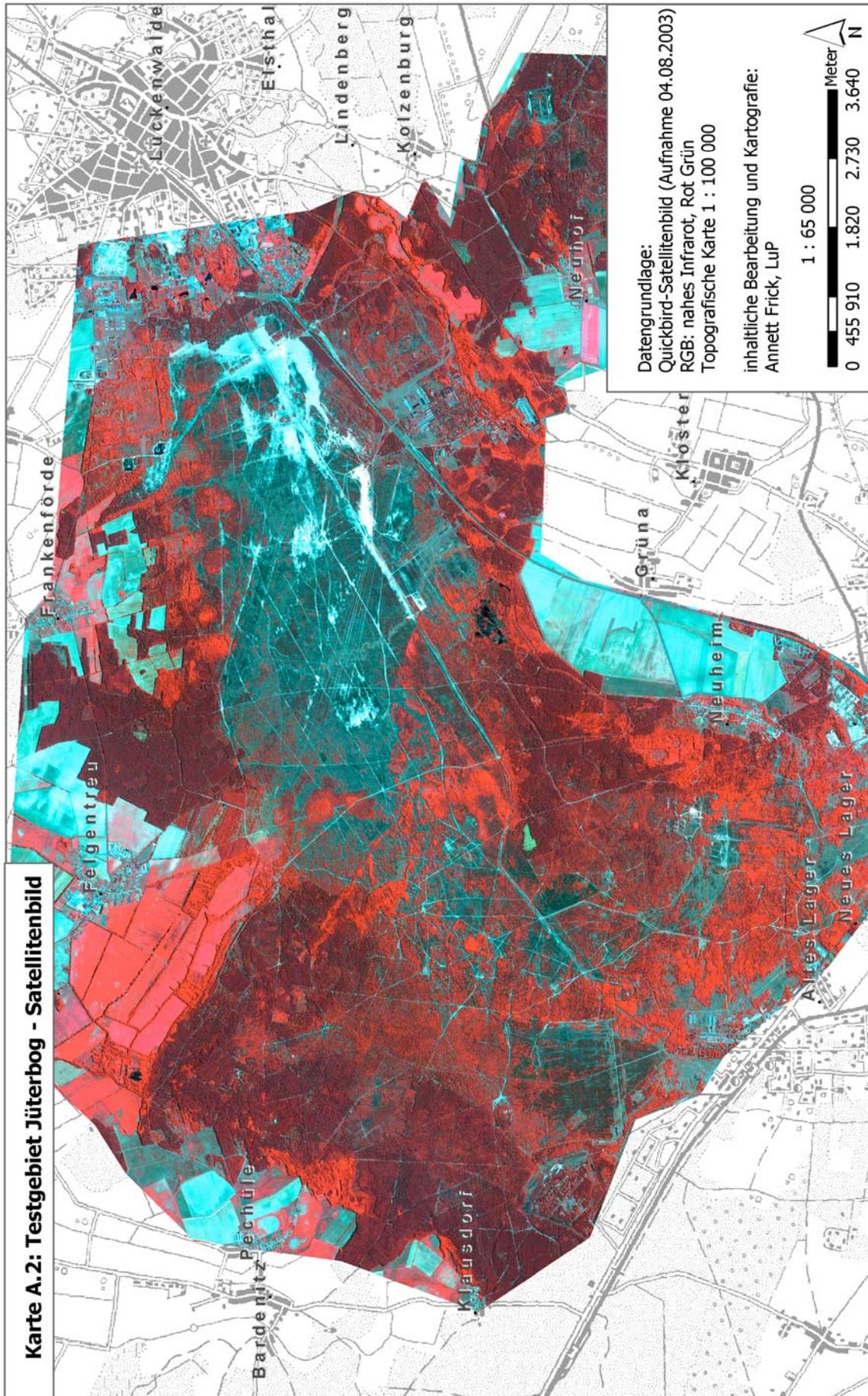
Abb. A.10: Bildschlüssel LRT 7140; 1 Torfmoos und Krähenbeeren, 2 Landröhricht (Schilf), 3 Schlenken (Maßstab ca. 1 : 1.500, Aufnahmedatum 06.09.2004)

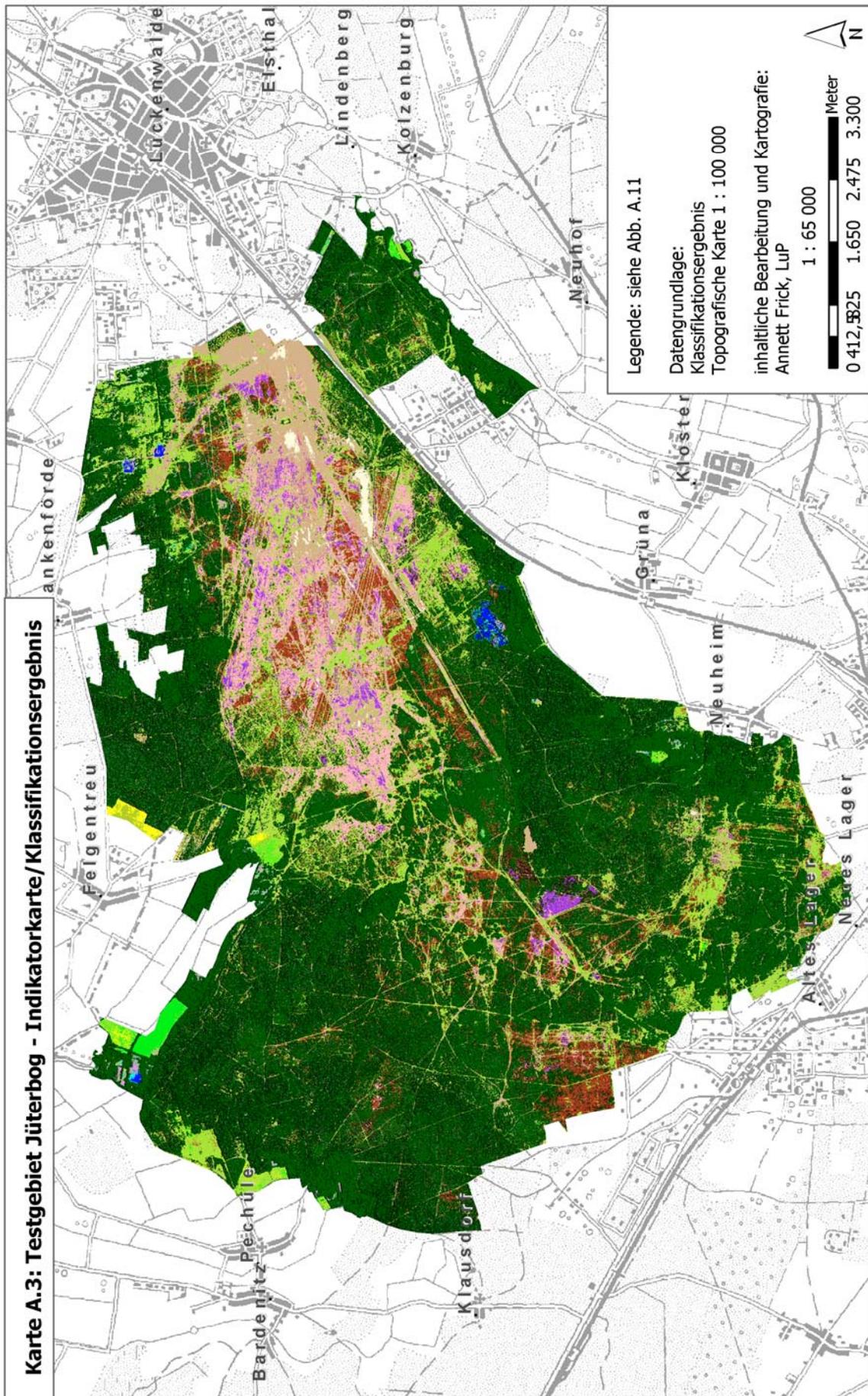
Legende für Indikatorkarten/Klassifikationsergebnisse

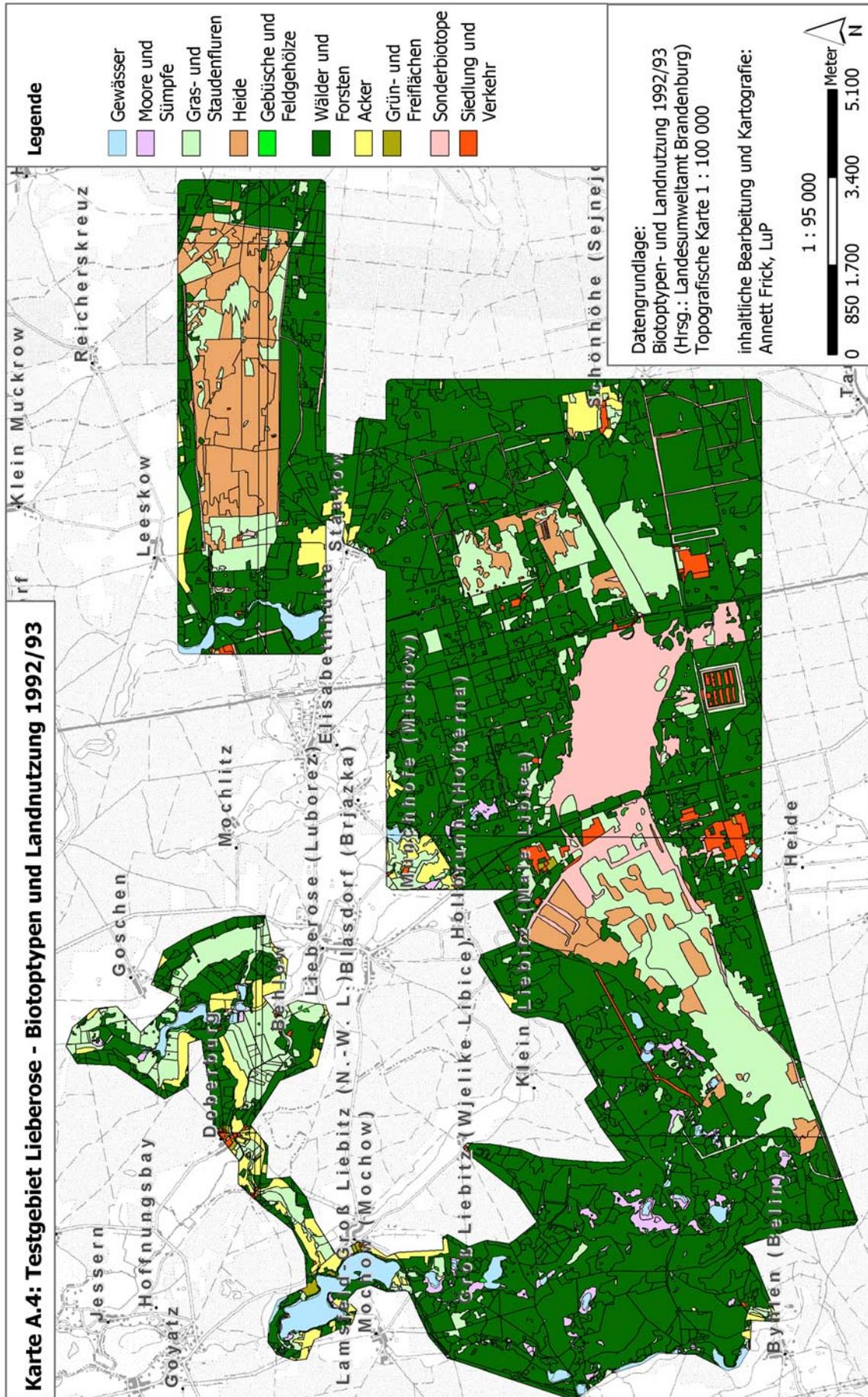
	Wasser
	Arten der Wasserlinsendecken
	Arten der Schwimmblattvegetation
	Röhricht in Gewässern
	offener Boden
	sonst. Gras- und Staudenflur
	Arten der toorfmoosdominierten Zwischenmoore
	Landröhricht
	Großseggenröhricht
	Arten der Feuchtwiesen
	Arten der feuchten Hochstauden
	Arten der Flutrasen
	Sandtrockenrasen kryptogamenarm
	Sandtrockenrasen kryptogamenreich 1
	Sandtrockenrasen, kryptogamenreich 2
	Grünland intensiv
	Arten der Frischwiesen/-weiden
	Grünland, gemäht
	Trockene Sandheide
	Besenginsterheide
	Gehölz
	Acker
	Arten der Ackerbrache
	Versiegelt
	Schatten
	Wolken

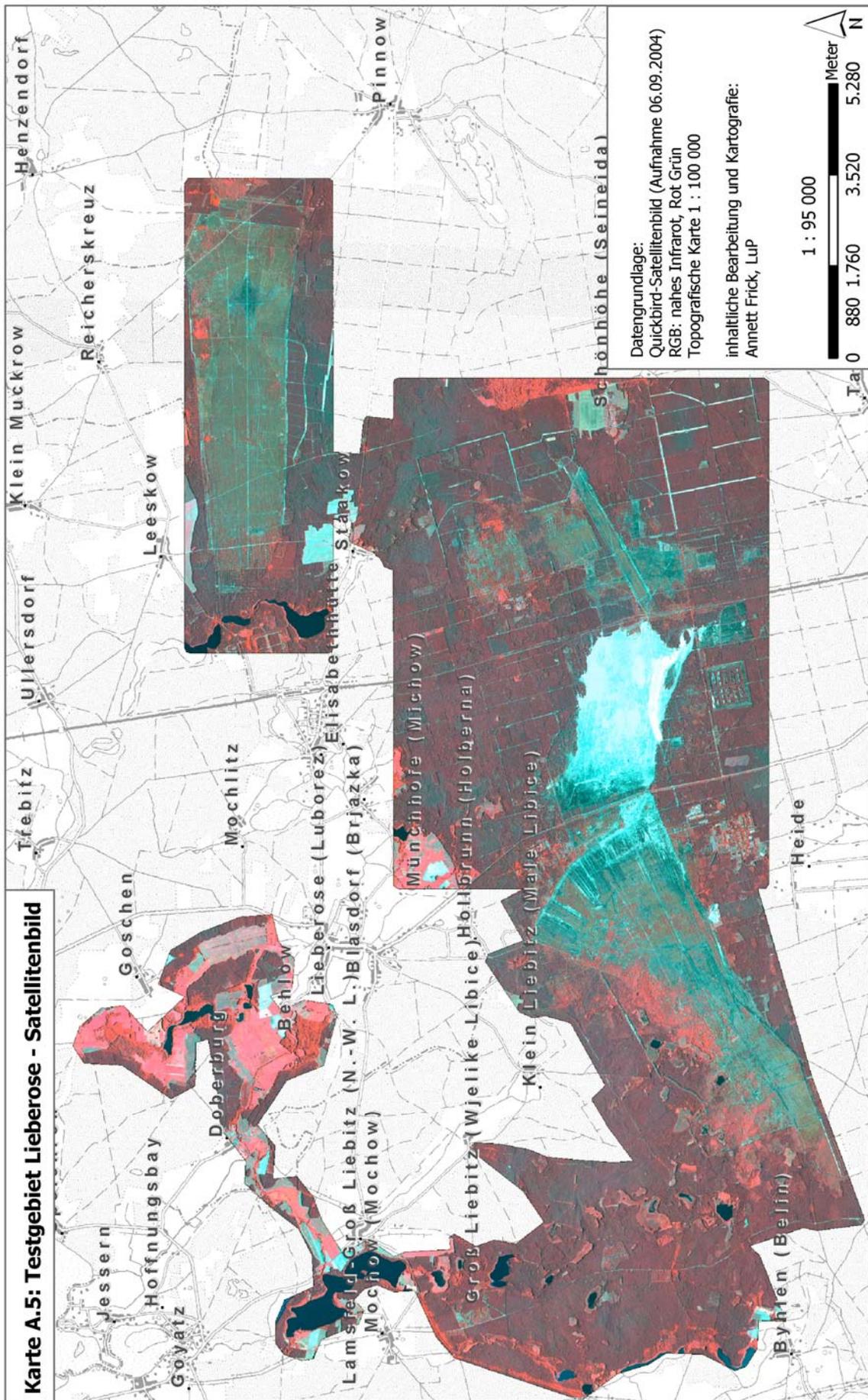
Abb. A.11: Legende für die Indikatorkarten

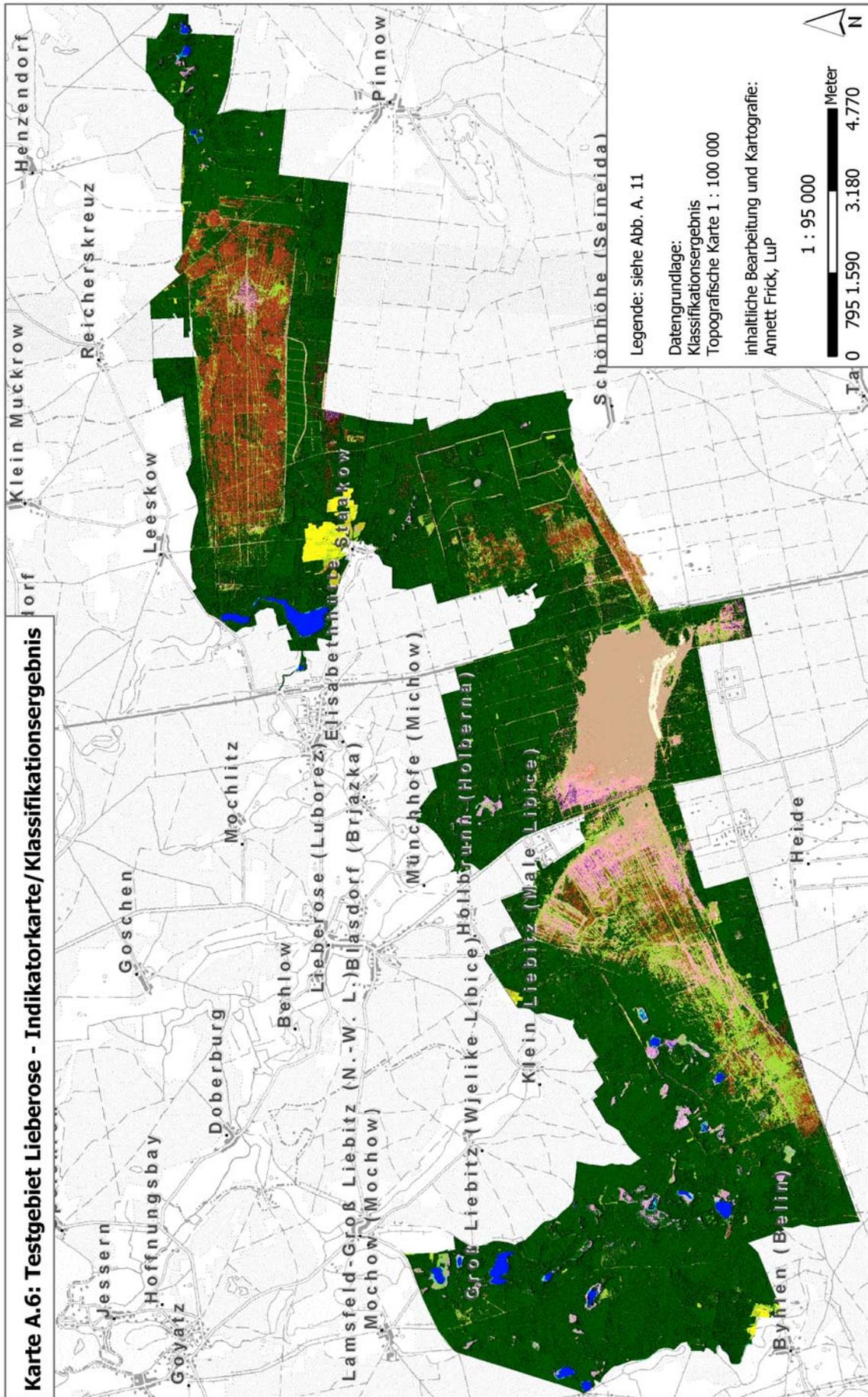










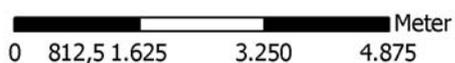


Karte A.7: Testgebiet Potsdam - Biotypen und Landnutzung 1992/93

Datengrundlage:
 Biotypen- und Landnutzung 1992/93
 (Hrsg.: Landesumweltamt Brandenburg)
 Topografische Karte 1 : 100 000

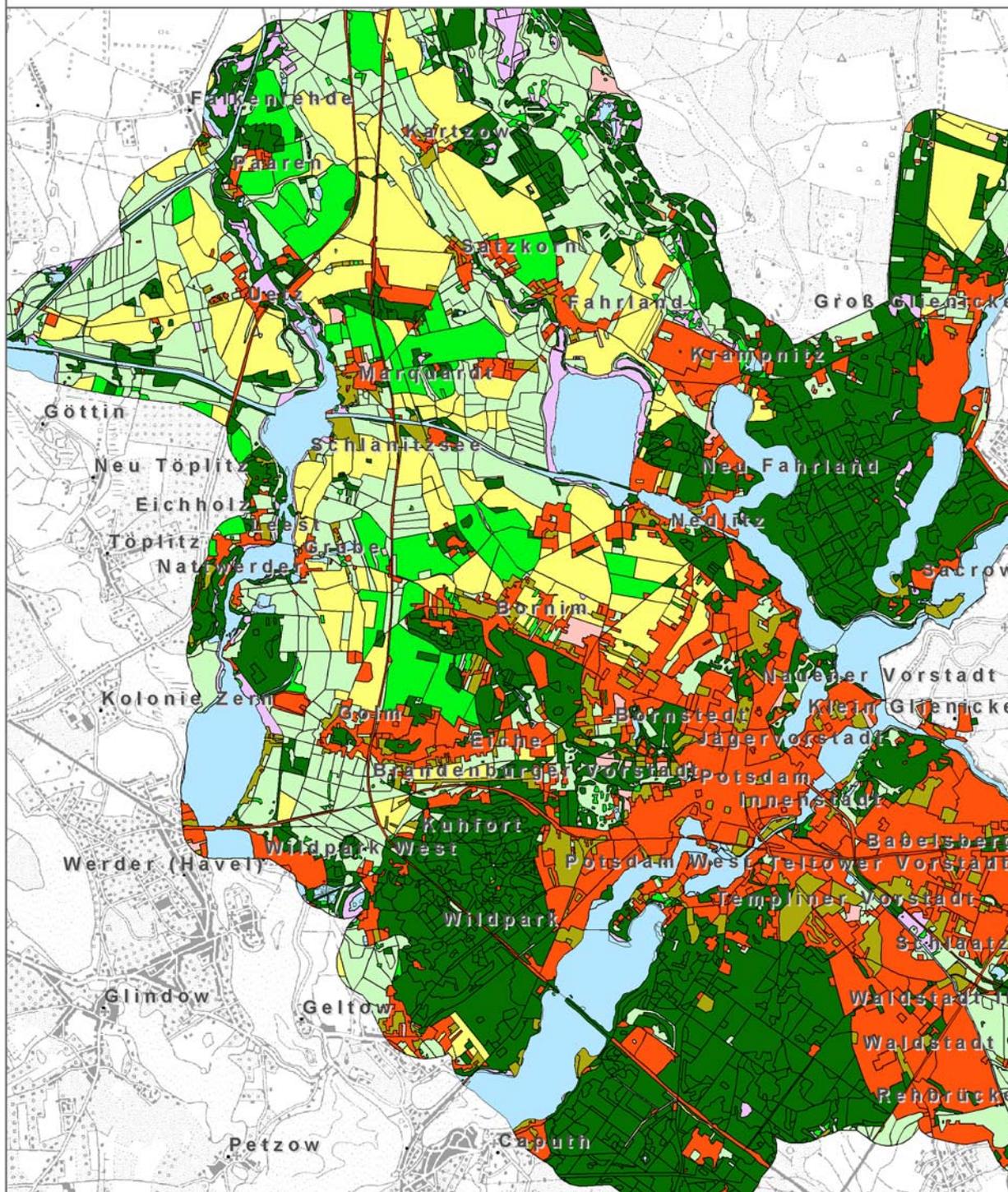
inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

1 : 85 000



Legende

- | | |
|---|---|
|  Gewässer |  Wälder und Forsten |
|  Moore und Sümpfe |  Acker |
|  Gras- und Staudenfluren |  Grün- und Freiflächen |
|  Heide |  Sonderbiotope |
|  Gebüsch und Feldgehölze |  Siedlung und Verkehr |

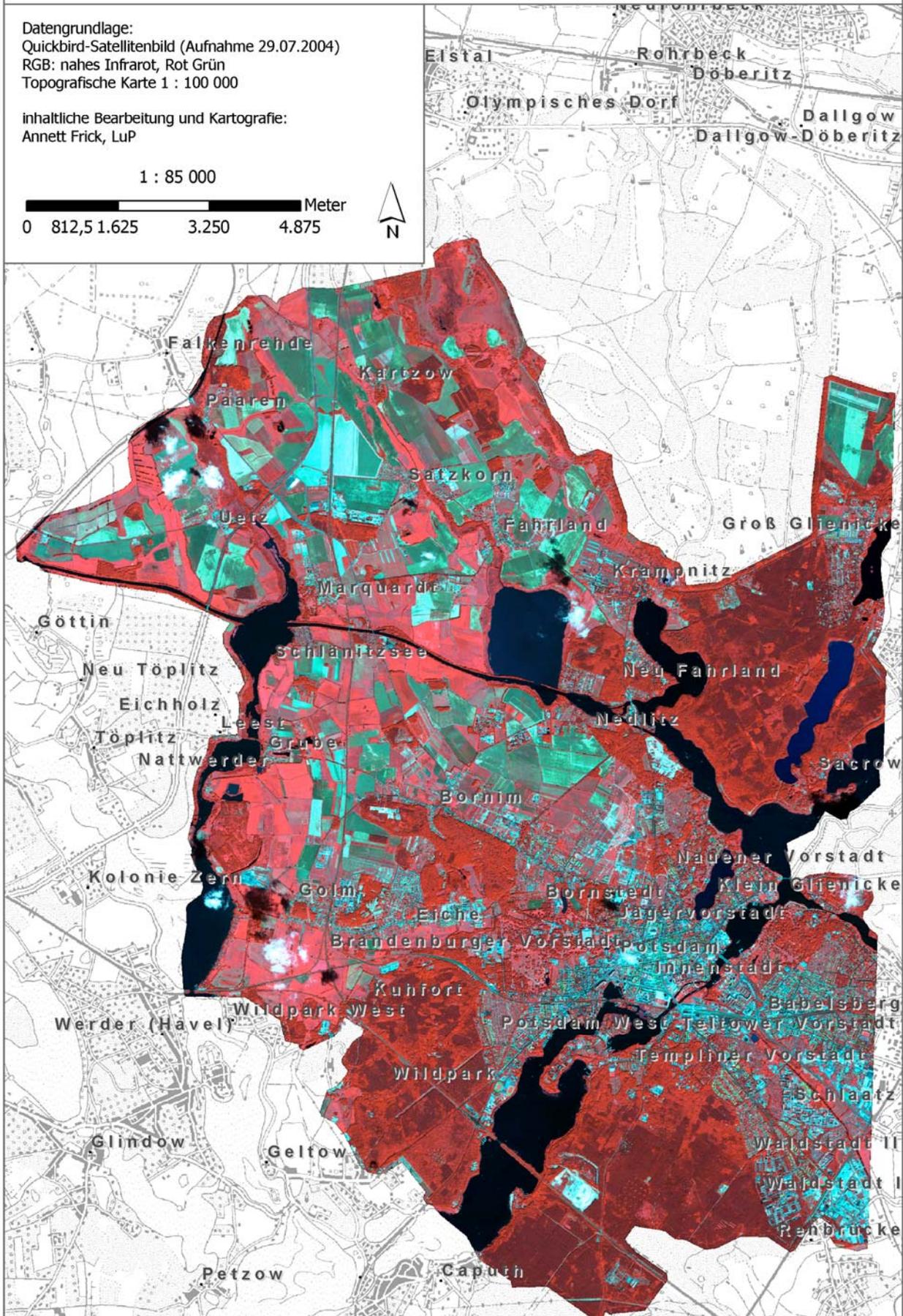
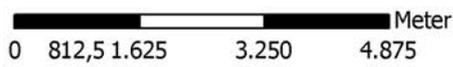


Karte A.8: Testgebiet Potsdam - Satellitenbild

Datengrundlage:
 Quickbird-Satellitenbild (Aufnahme 29.07.2004)
 RGB: nahes Infrarot, Rot Grün
 Topografische Karte 1 : 100 000

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

1 : 85 000



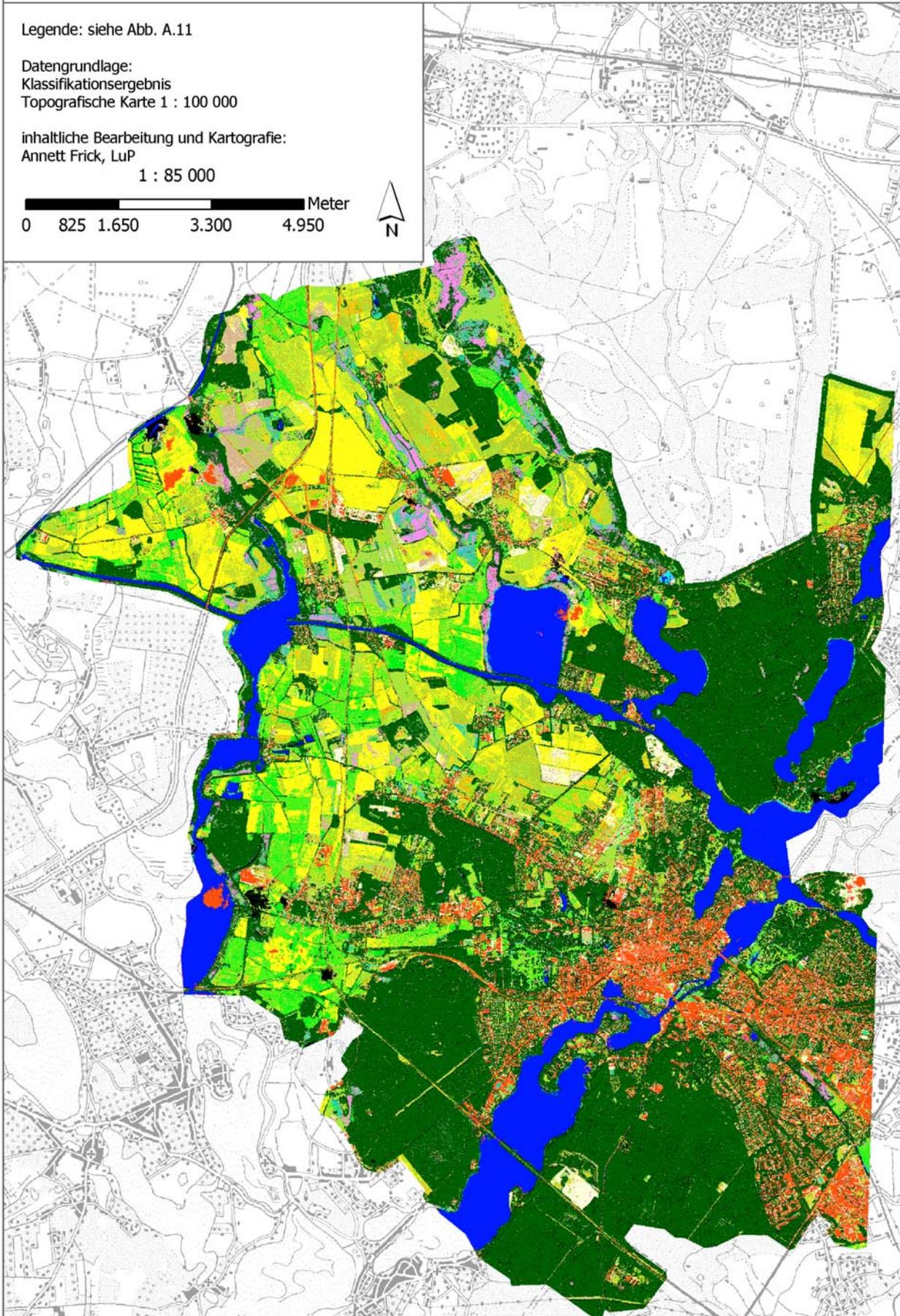
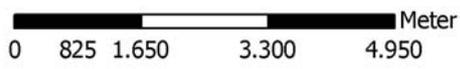
Karte A.9: Testgebiet Potsdam - Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis

Legende: siehe Abb. A.11

Datengrundlage:
 Klassifikationsergebnis
 Topografische Karte 1 : 100 000

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

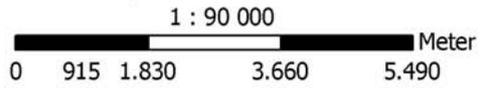
1 : 85 000



Karte A.10: Testgebiet Schwedt - Biotoptypen- und Landnutzung

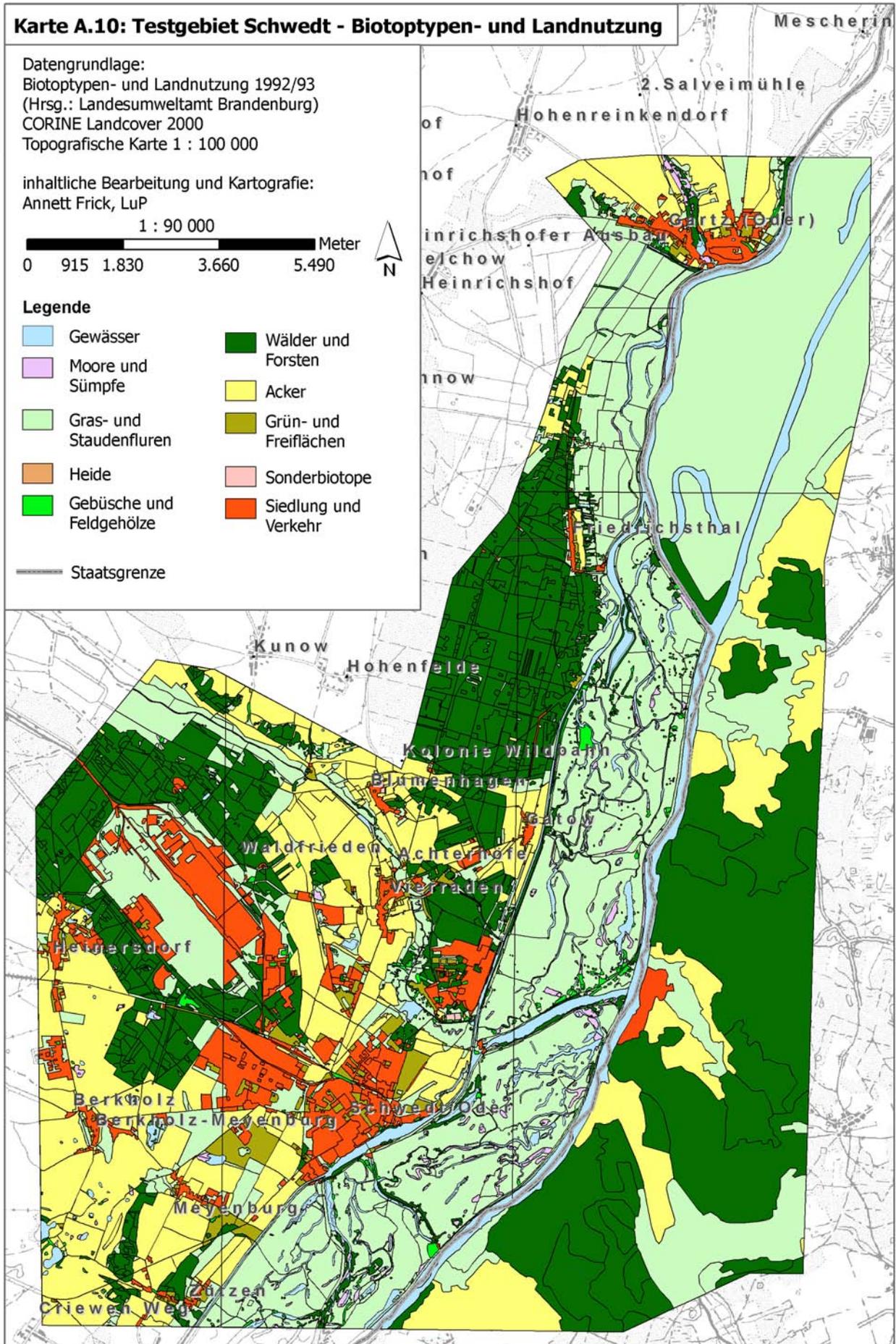
Datengrundlage:
 Biotoptypen- und Landnutzung 1992/93
 (Hrsg.: Landesumweltamt Brandenburg)
 CORINE Landcover 2000
 Topografische Karte 1 : 100 000

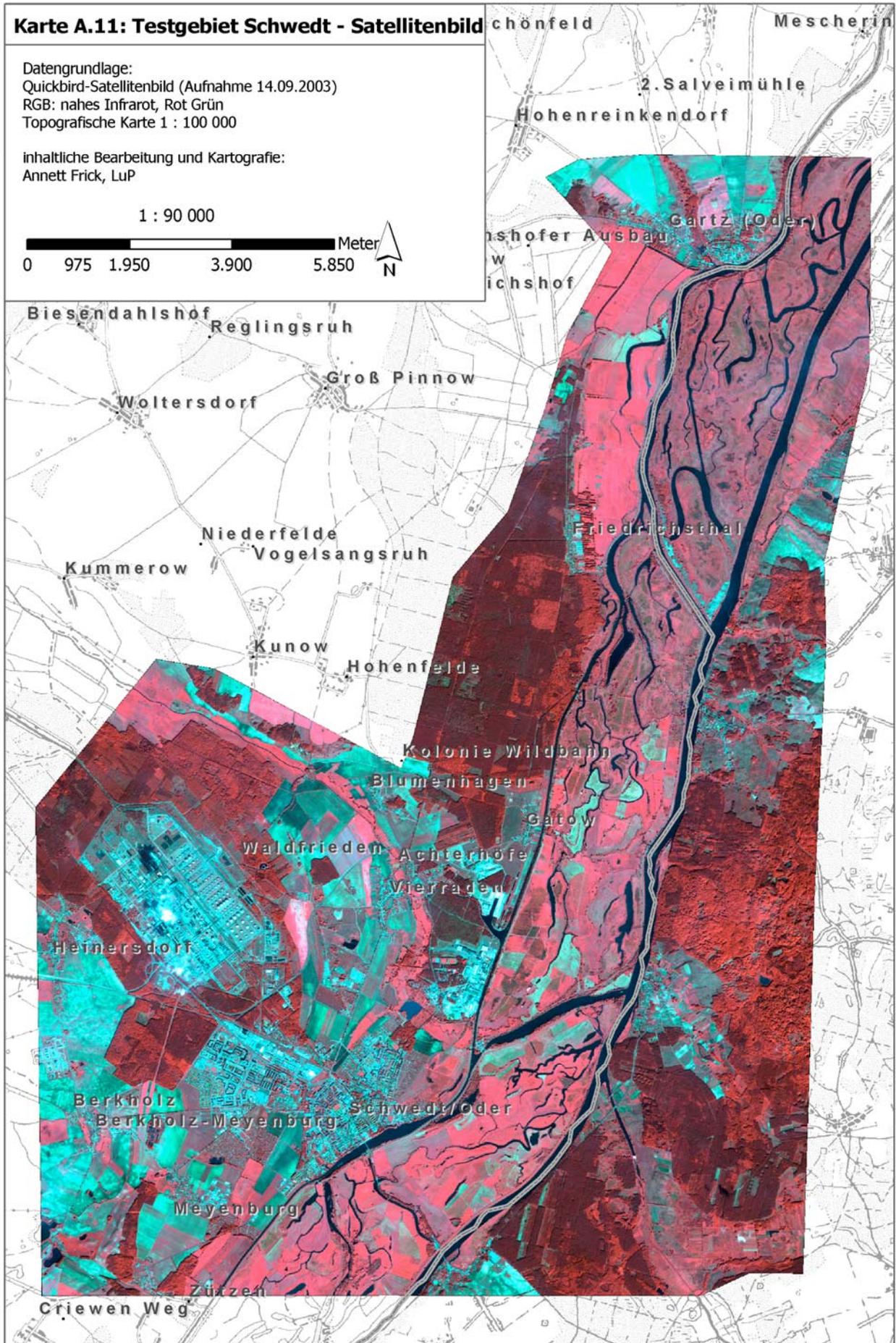
inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP



Legende

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| Gewässer | Wälder und Forsten |
| Moore und Sümpfe | Acker |
| Gras- und Staudenfluren | Grün- und Freiflächen |
| Heide | Sonderbiotope |
| Gebüsch und Feldgehölze | Siedlung und Verkehr |
| Staatsgrenze | |





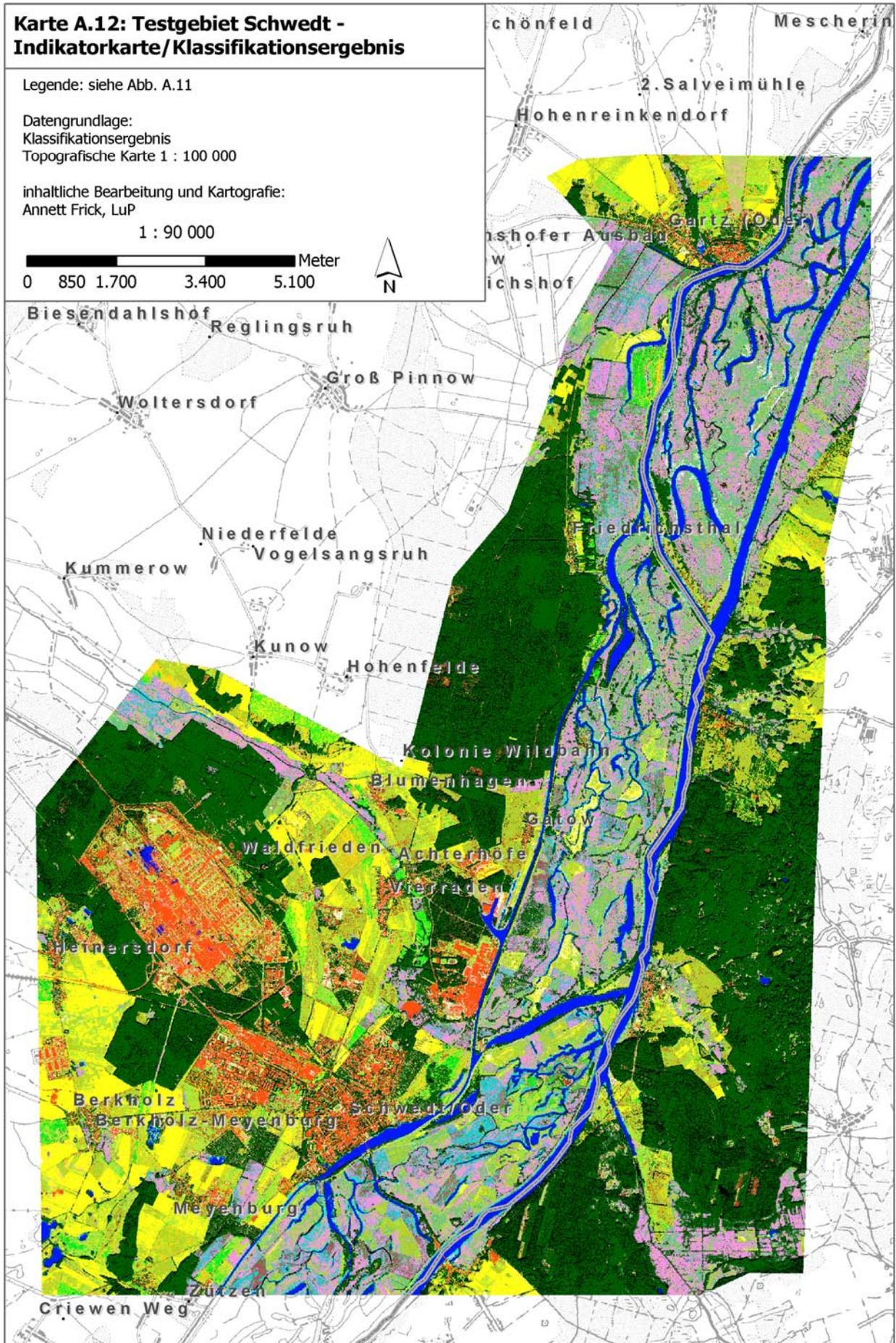
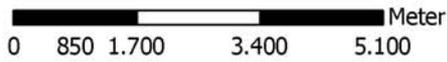
**Karte A.12: Testgebiet Schwedt -
Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis**

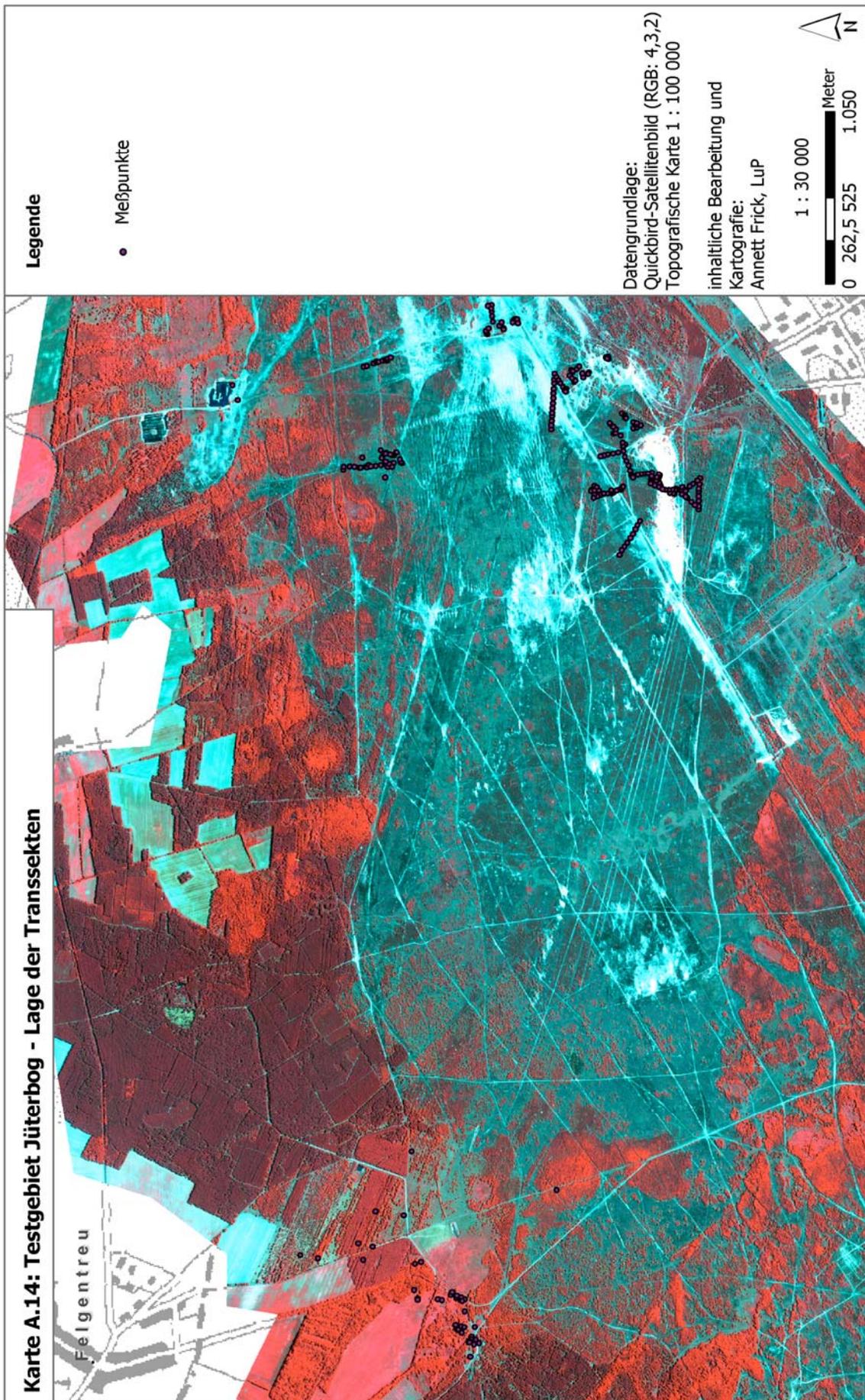
Legende: siehe Abb. A.11

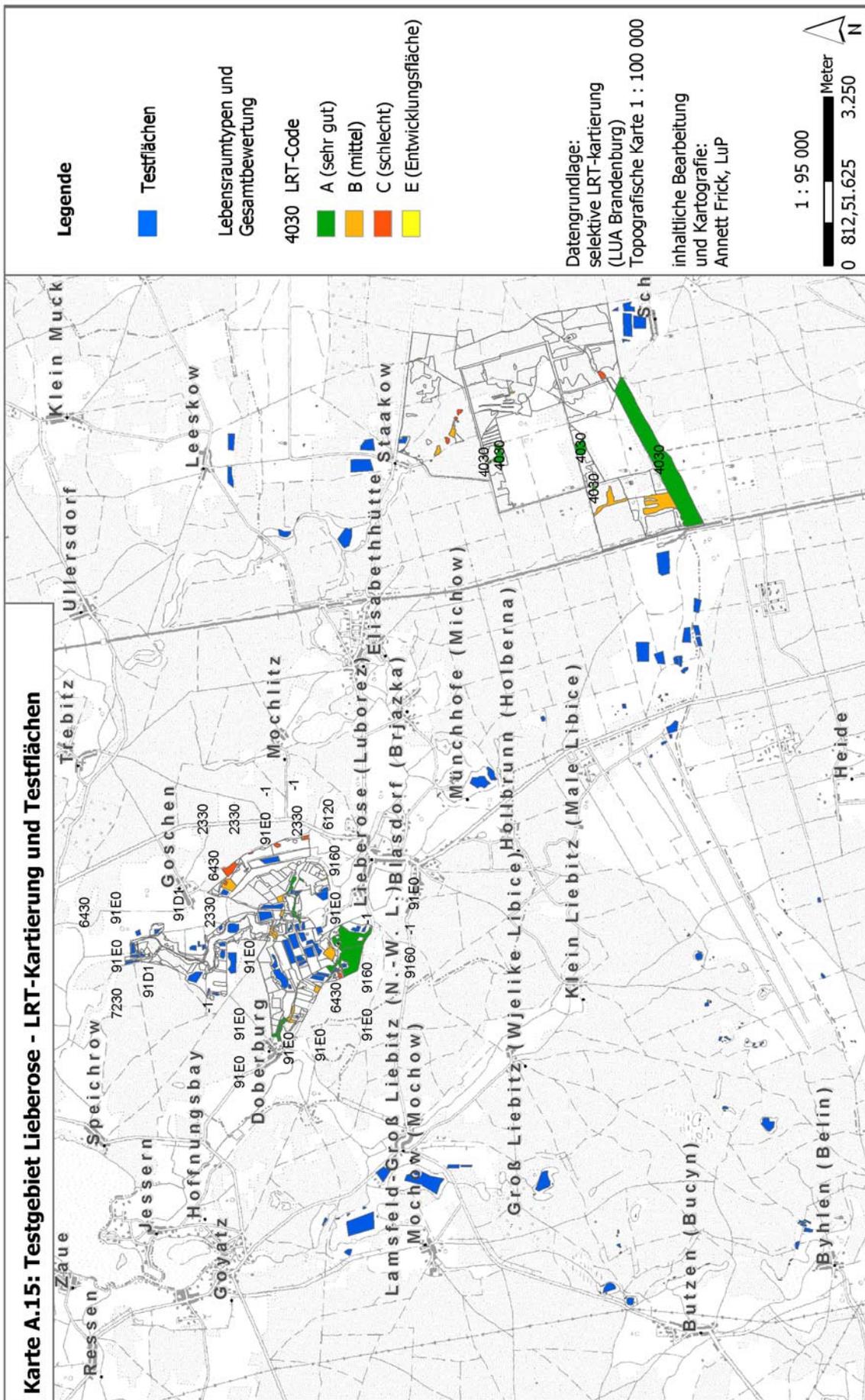
Datengrundlage:
Klassifikationsergebnis
Topografische Karte 1 : 100 000

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
Annett Frick, LuP

1 : 90 000





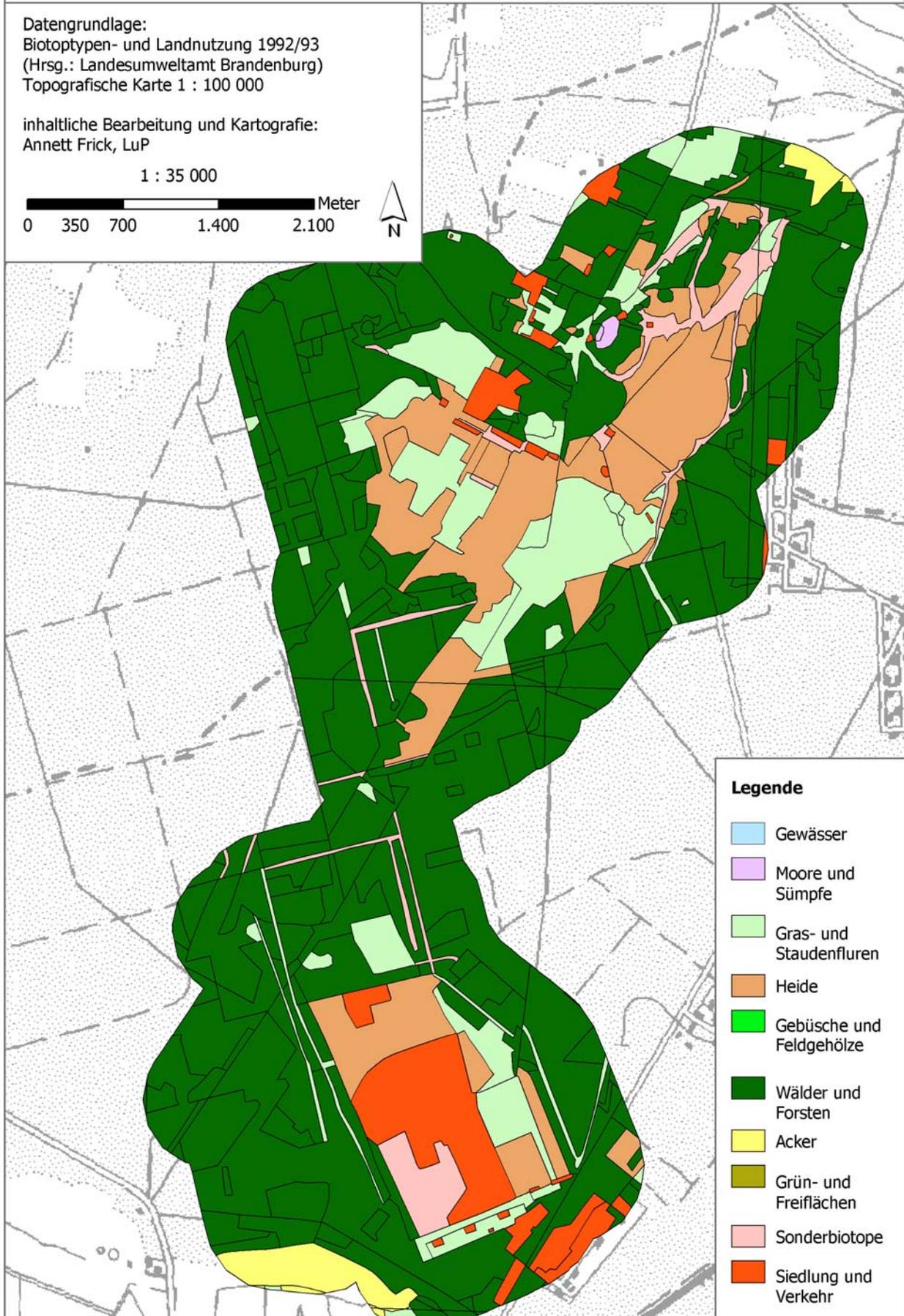
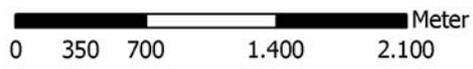


Karte A.16: Testgebiet Hackenheide - Biotoptypen und Landnutzung 1992/93

Datengrundlage:
 Biotoptypen- und Landnutzung 1992/93
 (Hrsg.: Landesumweltamt Brandenburg)
 Topografische Karte 1 : 100 000

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

1 : 35 000



Legende

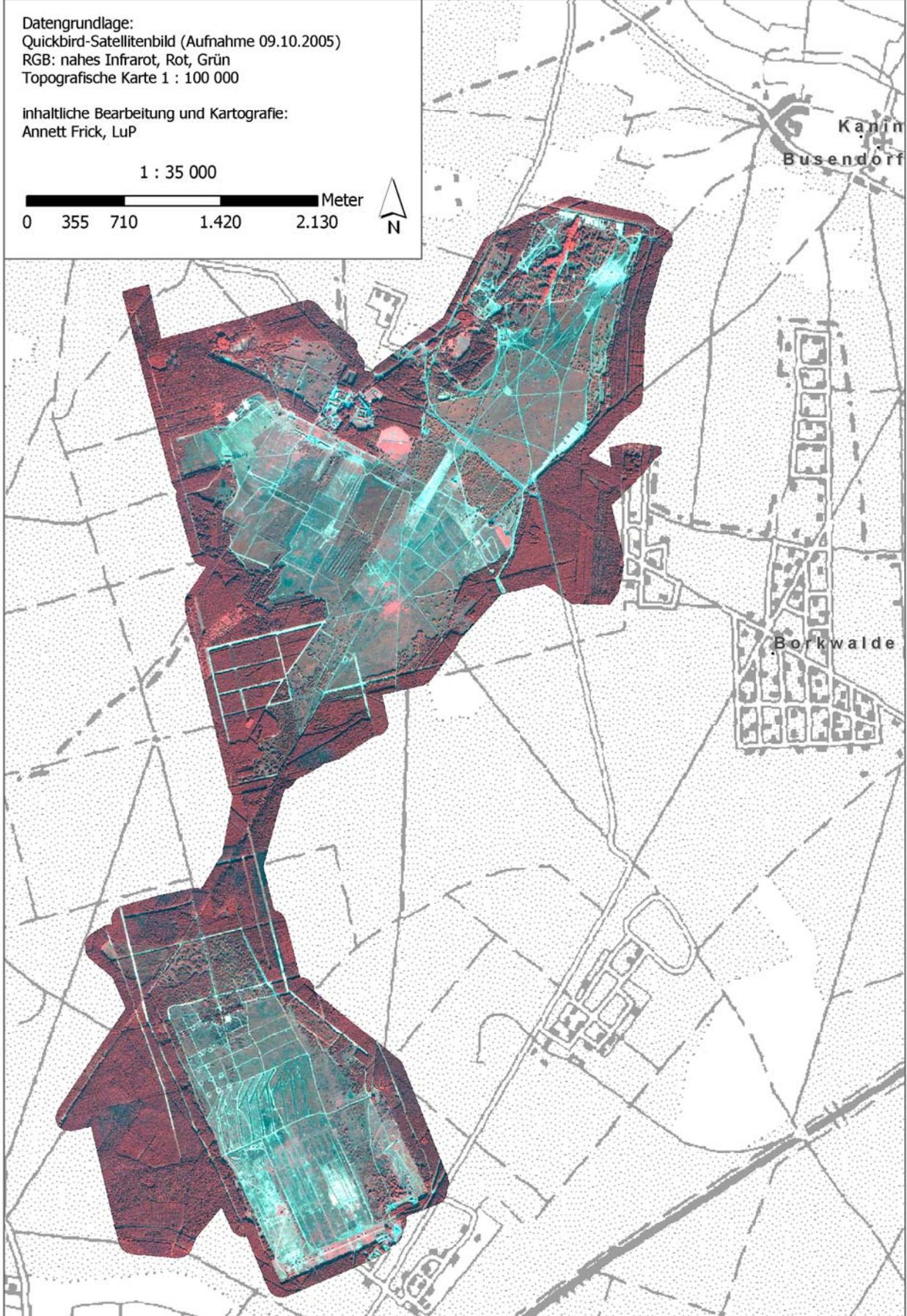
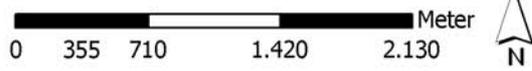
-  Gewässer
-  Moore und Sümpfe
-  Gras- und Staudenfluren
-  Heide
-  Gebüsch- und Feldgehölze
-  Wälder und Forsten
-  Acker
-  Grün- und Freiflächen
-  Sonderbiotope
-  Siedlung und Verkehr

Karte A.17: Testgebiet Hackenheide - Satellitenbild

Datengrundlage:
 Quickbird-Satellitenbild (Aufnahme 09.10.2005)
 RGB: nahes Infrarot, Rot, Grün
 Topografische Karte 1 : 100 000

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

1 : 35 000

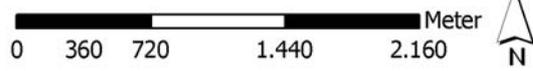


Karte A.18: Testgebiet Hackenheide - Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis

Legende: siehe Abb. A.11

Datengrundlage:
 Klassifikationsergebnis
 Topografische Karte 1 : 100 000

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP
 1 : 35 000

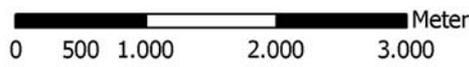


Karte A.19: Testgebiet Döberitz - Biotoptypen und Landnutzung 1992/93

Datengrundlage:
 Biotoptypen- und Landnutzung 1992/93
 (Hrsg.: Landesumweltamt Brandenburg)
 Topografische Karte 1 : 100 000

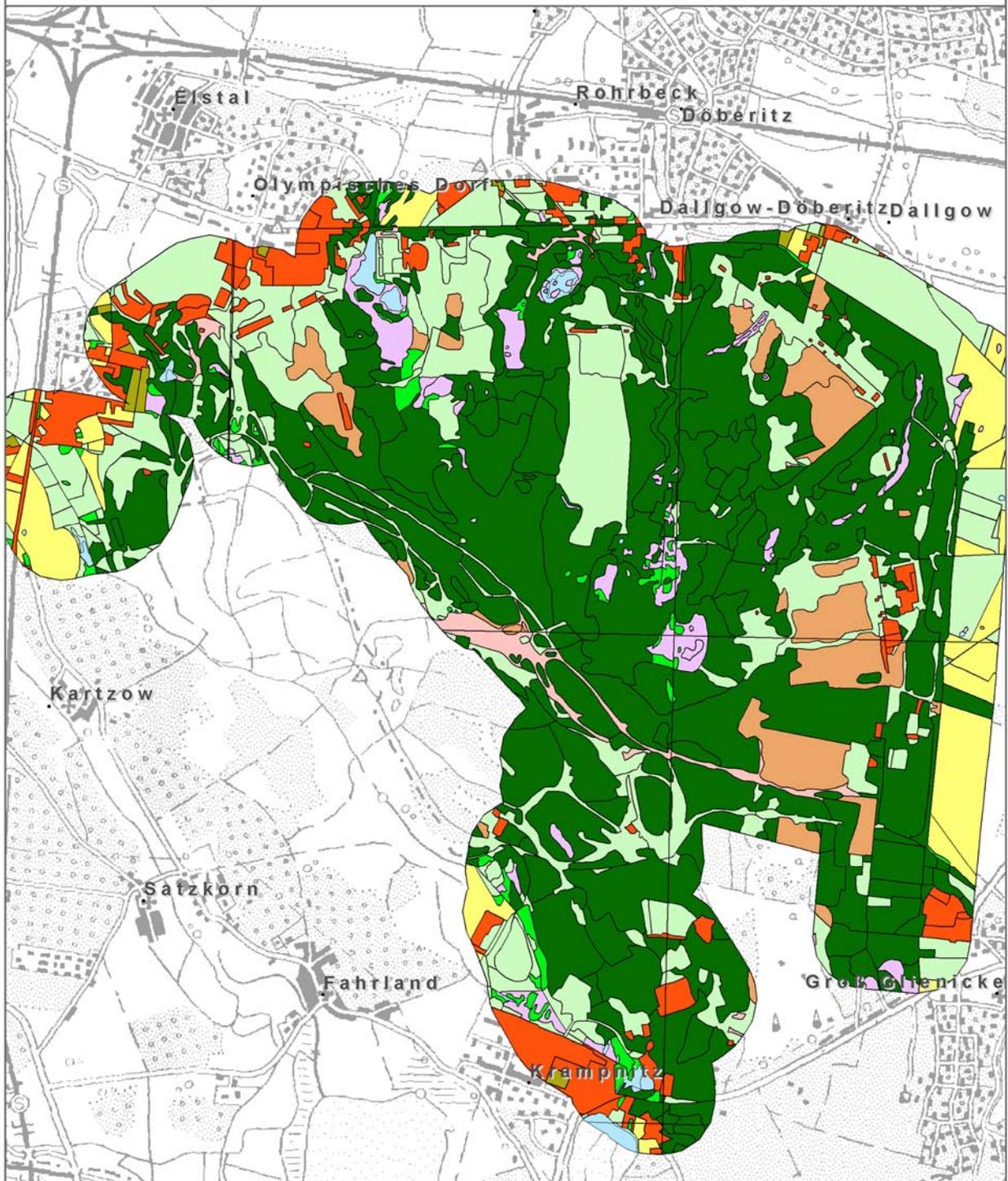
inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

1 : 50 000



Legende

- | | |
|---|---|
|  Gewässer |  Wälder und Forsten |
|  Moore und Sümpfe |  Acker |
|  Gras- und Staudenfluren |  Grün- und Freiflächen |
|  Heide |  Sonderbiotope |
|  Gebüsch und Feldgehölze |  Siedlung und Verkehr |

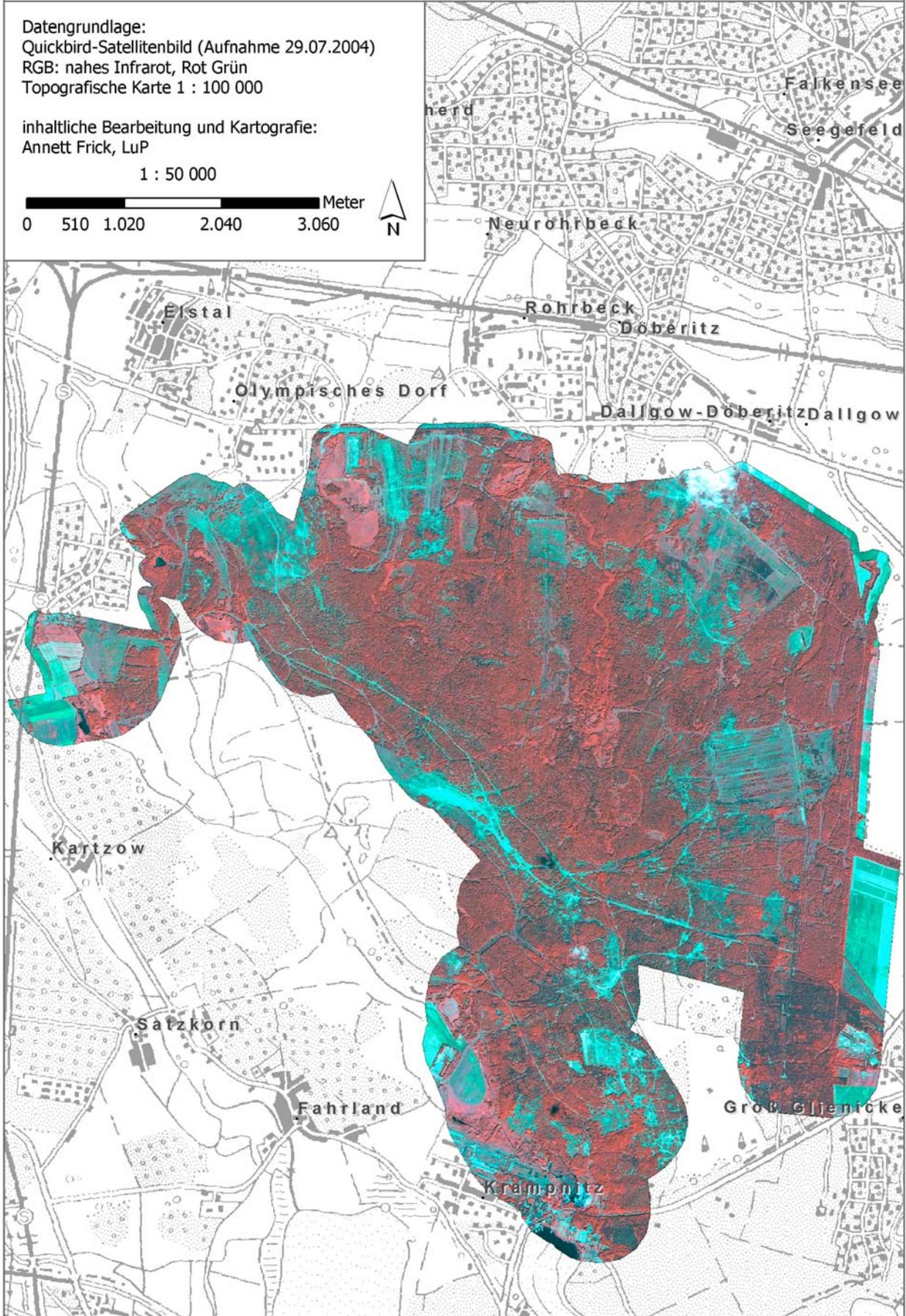
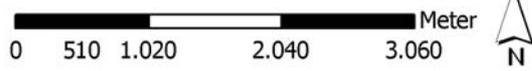


Karte A.20: FFH-Gebiet Döberitz - Satellitenbild

Datengrundlage:
 Quickbird-Satellitenbild (Aufnahme 29.07.2004)
 RGB: nahes Infrarot, Rot Grün
 Topografische Karte 1 : 100 000

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

1 : 50 000



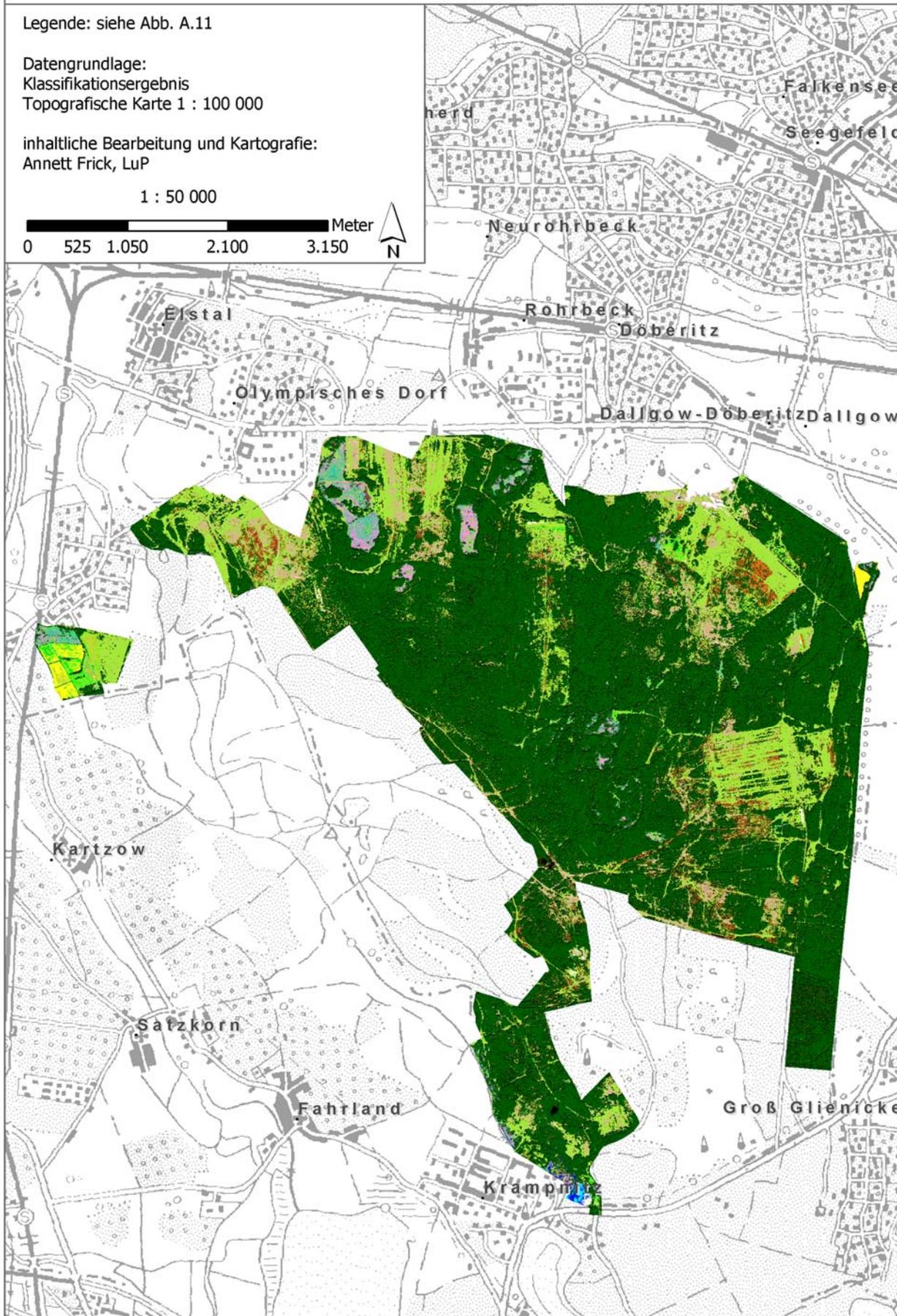
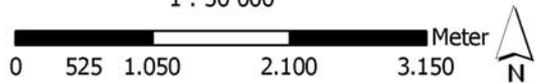
Karte A.21: Testgebiet Döberitz - Indikatorkarte/Klassifikationsergebnis

Legende: siehe Abb. A.11

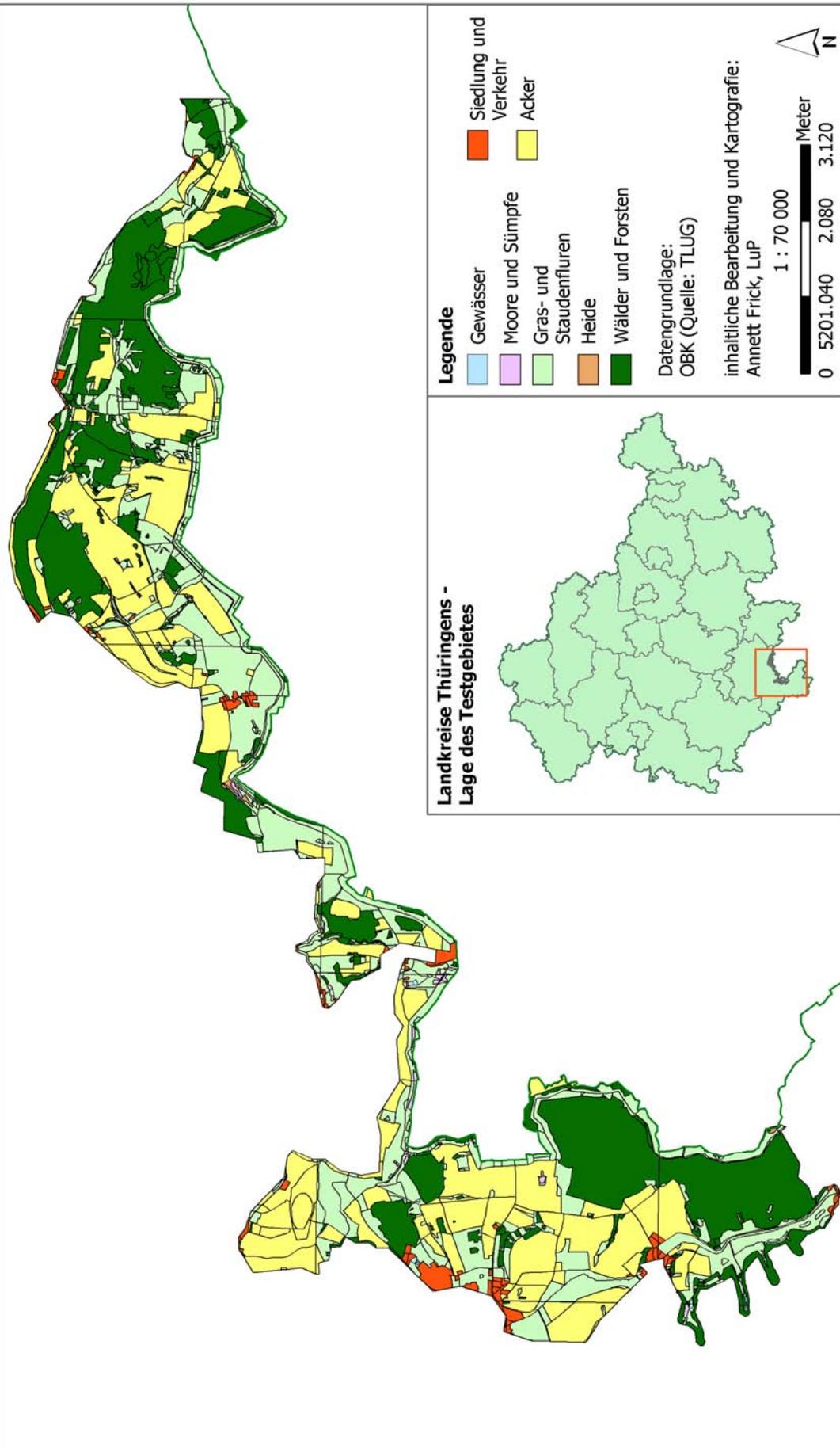
Datengrundlage:
 Klassifikationsergebnis
 Topografische Karte 1 : 100 000

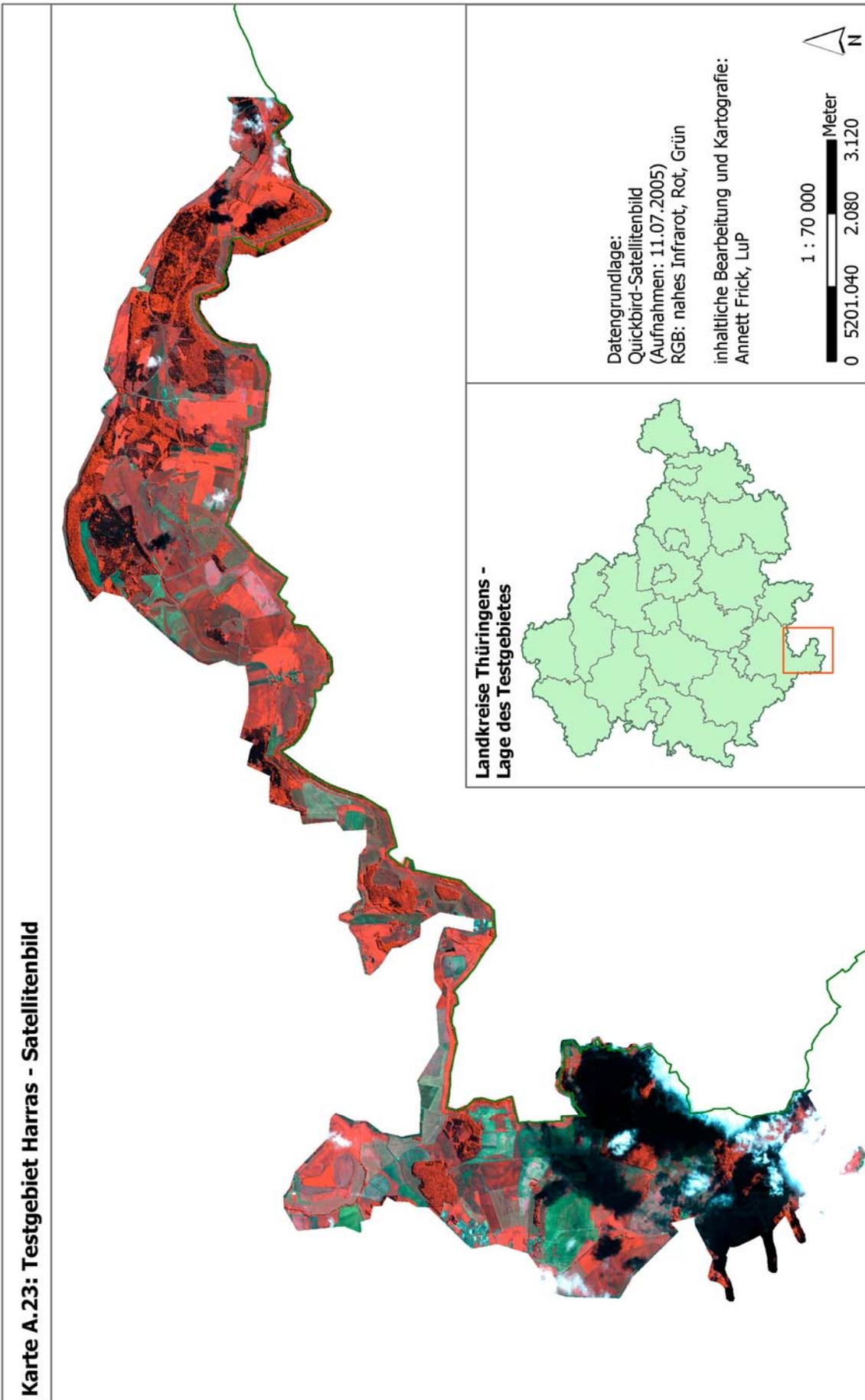
inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
 Annett Frick, LuP

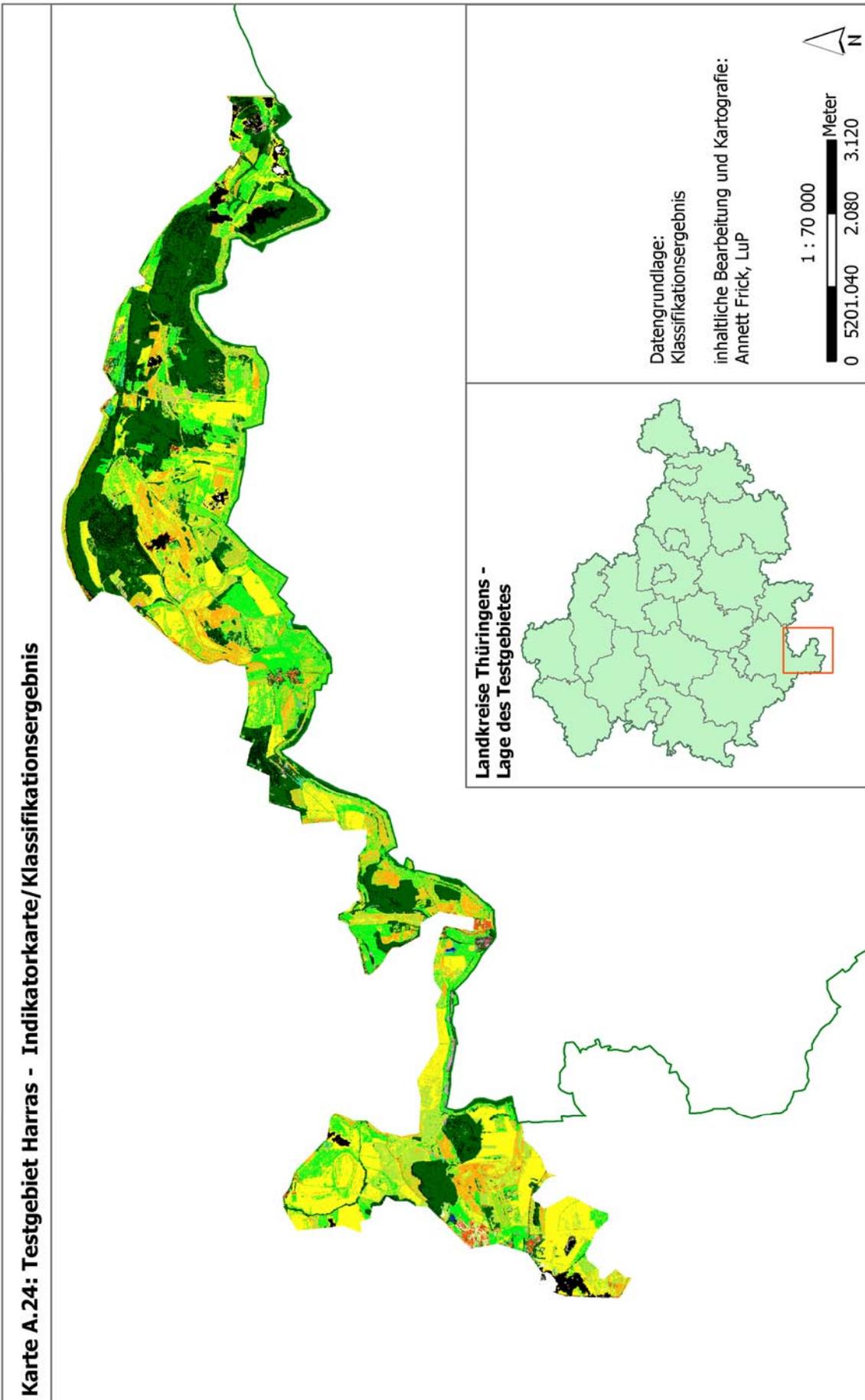
1 : 50 000



Karte A.22: Testgebiet Harras - Offenland Biotopkartierung 1998/99





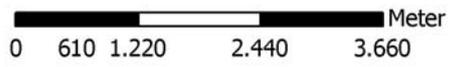


Karte A.25: Testgebiet Stör- CORINE 2000

Datengrundlage:
CORINE 2000
Flusslauch (TUHH)

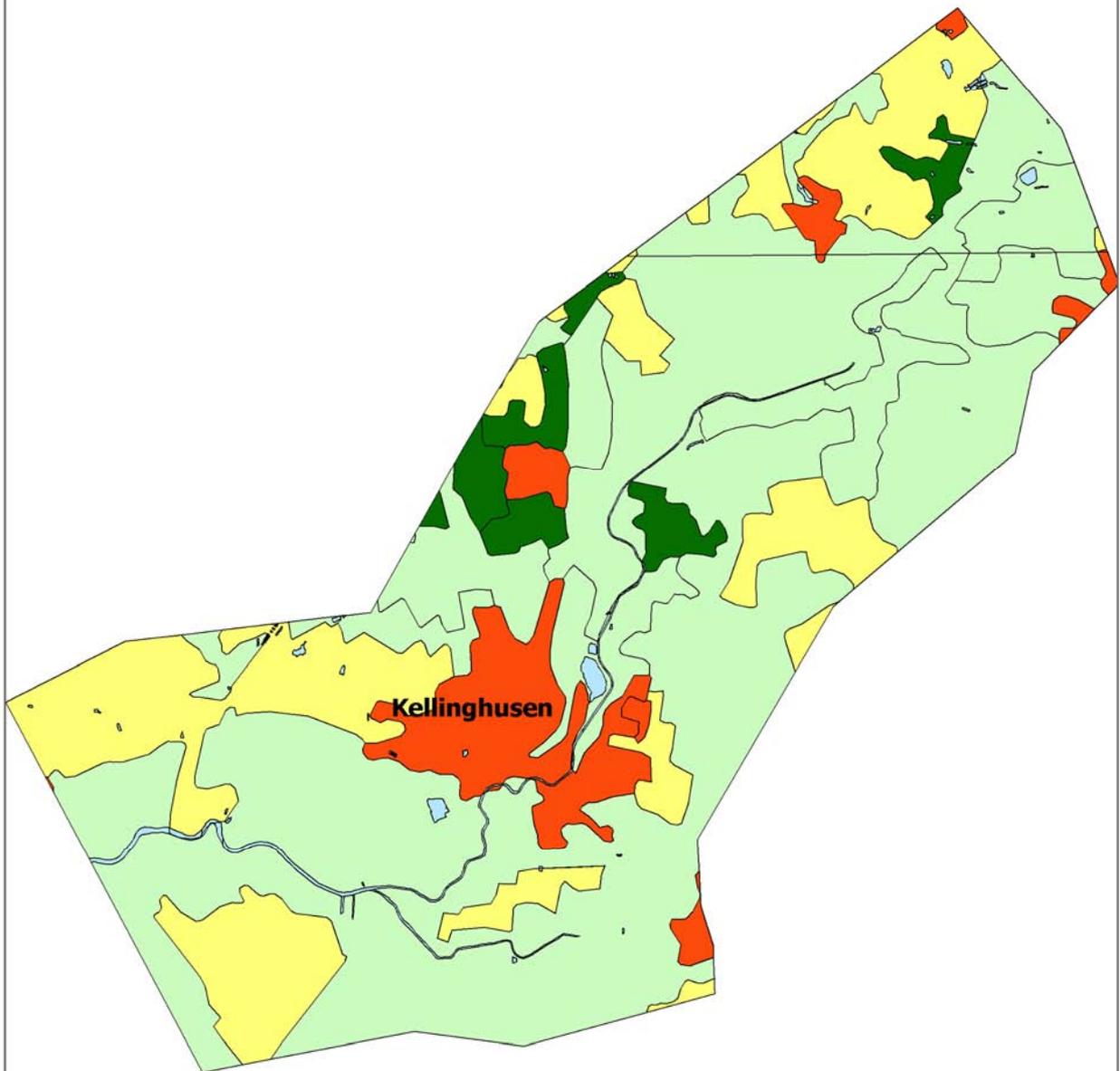
inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
Annett Frick, LuP

1 : 65 000



Legende

- | | |
|---|---|
|  Gewässer |  Wälder und Forsten |
|  Moore und Sümpfe |  Acker |
|  Gras- und Staudenfluren |  Grün- und Freiflächen |
|  Heide |  Sonderbiotope |
|  Gebüsch und Feldgehölze |  Siedlung und Verkehr |



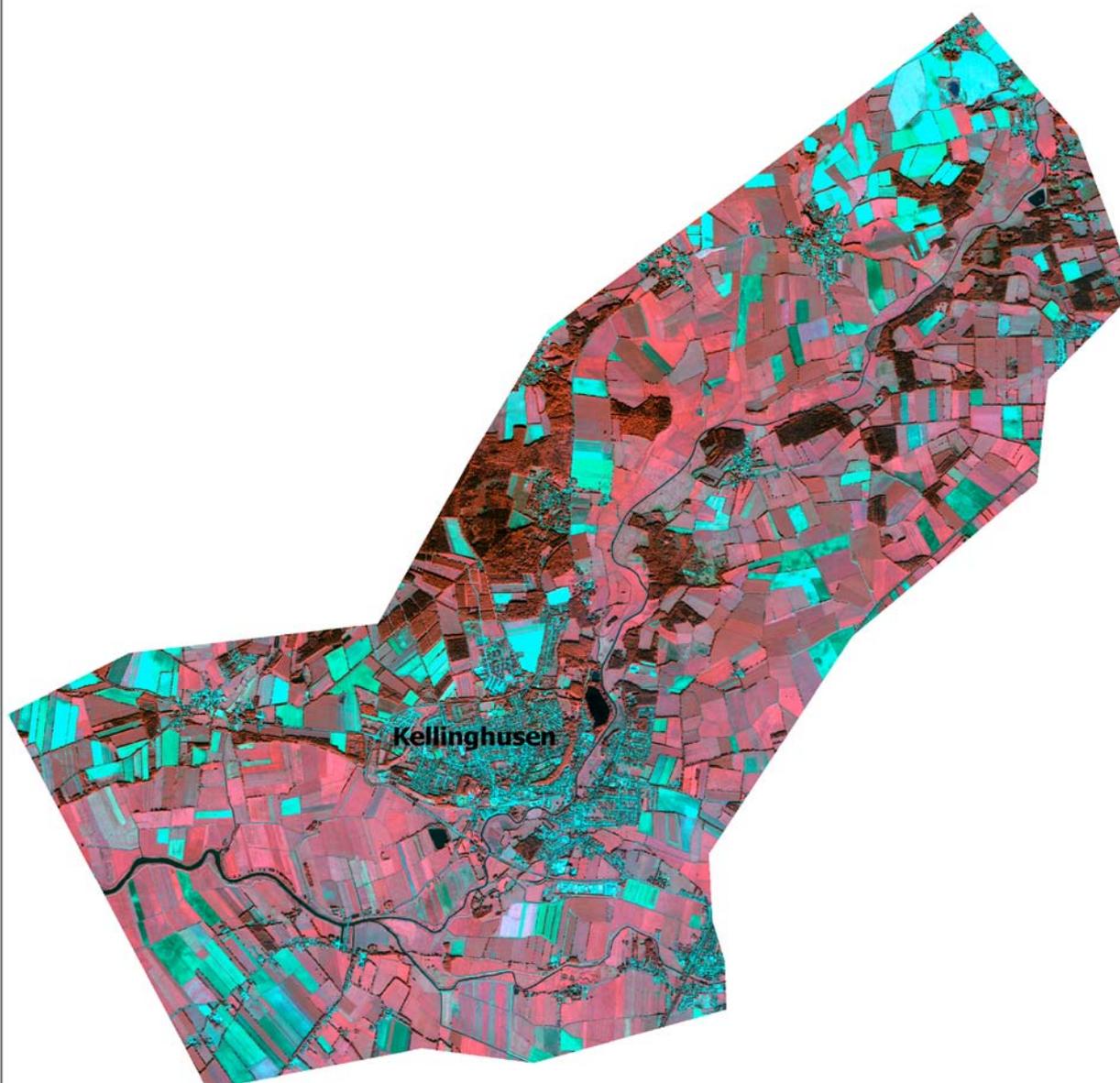
Karte A.26: Testgebiet Stör- Satellitenbild

Datengrundlage:
Quickbird-Satellitenbild (Aufnahme 21.09.2005)
RGB: nahes Infrarot, Rot, Grün

inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
Annett Frick, LuP

1 : 65 000

0 610 1.220 2.440 3.660 Meter

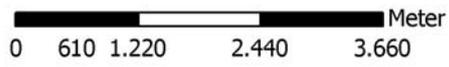


Karte A.27: Testgebiet Stör- Klassifikationsergebnis/Rauhigkeitsklassen

Datengrundlage:
Klassifikationsergebnis

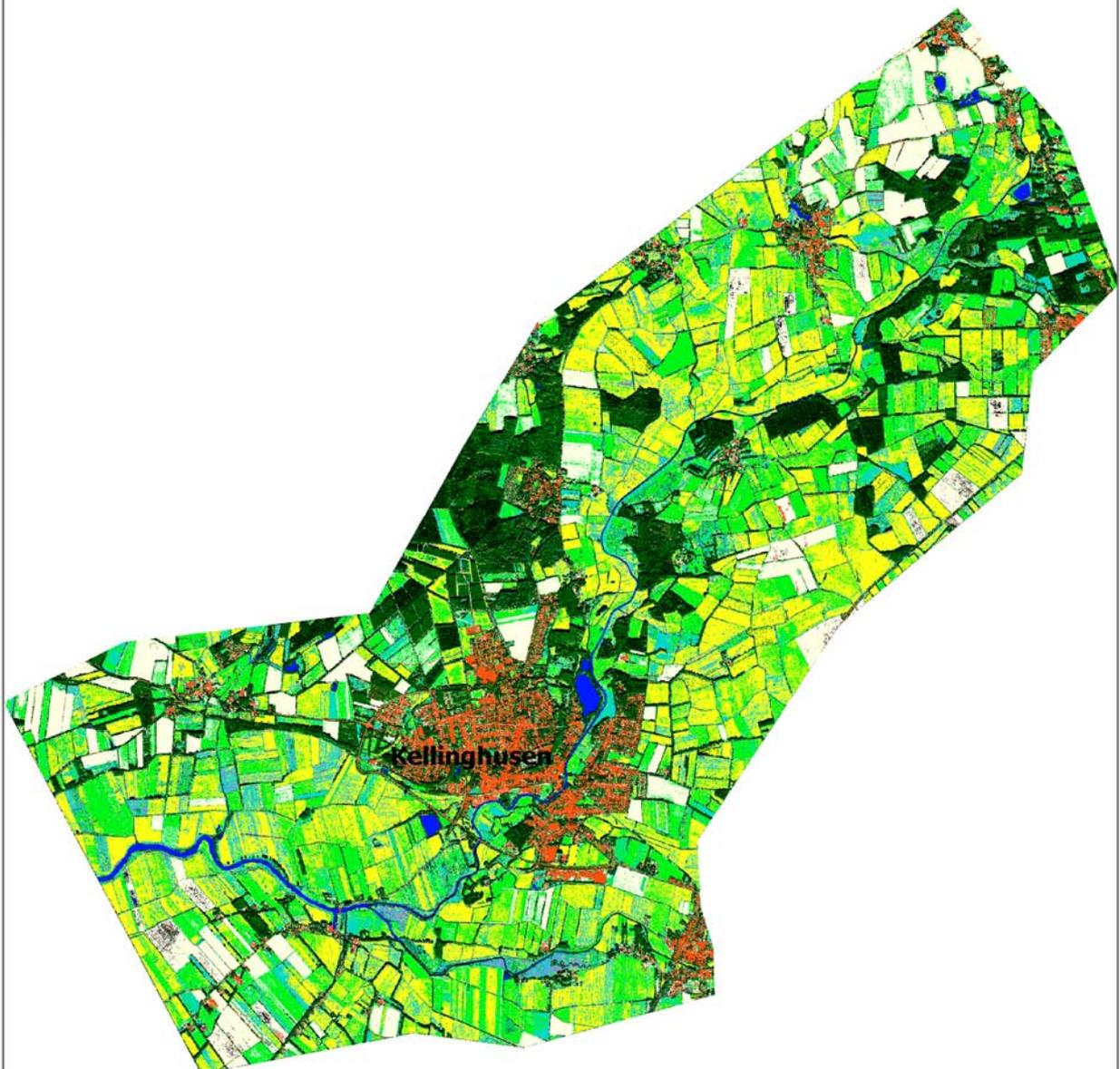
inhaltliche Bearbeitung und Kartografie:
Annett Frick, LuP

1 : 65 000



Legende

- | | |
|---|--|
|  #0 Schatten |  #5 Gras hoch |
|  #1 versiegelt |  #6 Acker/Grünland |
|  #2 offener Boden |  #7 Sumpfvegetation |
|  #3 Grünland, gemäht |  #8 Gehölz |
|  #4 Gras niedrig |  #9 Wasser |



DANK

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen des Projektes SARA'04, das in Zusammenarbeit der Luftbild und Planung GmbH mit der TU Berlin durchgeführt wurde.

Mein Dank gilt deshalb zuerst meinen Kollegen bei Luftbild und Planung, die mich immer in jeder Hinsicht unterstützt haben. Ganz besonders Gregor Weyer, der das Projekt mit großem Enthusiasmus vorangetrieben und sich immer geduldig meine Klagen angehört hat. Einen ebenso herzlichen Dank an Christiane Pankoke, die mir so viele organisatorische Arbeiten abgenommen hat und auch für die gründliche Fehlerkorrektur und den wunderbaren Vormittags-Kaffee.

Prof. Dr. Hartmut Kenneweg von der TU Berlin hat das Projekt die ganze Zeit begleitet. Ihm danke ich für seine großartige Unterstützung und die vielen fachlichen Gespräche und für die Übernahme des Erstgutachtens.

Prof. Dr. Birgit Kleinschmit von der TU Berlin hat dankenswerterweise das Zweitgutachten übernommen und mit vielen Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ein großer Dank gebührt dem Land Brandenburg und hier besonders der Zukunftsagentur und dem Wirtschaftsministerium, da es das Forschungsprojekt finanziell unterstützt hat.

An dieser Stelle möchte ich auch den Mitgliedern der Steuerungsgruppe des Projektes danken. Allen voran Martina Düvel vom Landesumweltamt Brandenburg, die sich so für die Fernerkundung und das Projekt begeistert hat, dass sie mir oft neue Motivation verschaffte. Auch die sehr zahlreichen fachlichen Hinweise zur Kartierung und zu vegetationskundlichen Fragestellungen waren ein unschätzbare Input für die Arbeit.

Das Landesumweltamt Brandenburg hat außerdem alle für die Verfahrensentwicklung notwendigen Geobasisdaten und terrestrische Kartierungen zur Verfügung gestellt. Einen Dank auch an Frank Plücken vom LUA Brandenburg für die Überlassung der schönen Schrägluftbilder von Lieberose.

Den Mitarbeitern der Landesumweltämter der befragten Bundesländer, die mir mit der Beantwortung der Fragebögen weitergeholfen haben, sei ebenfalls herzlich gedankt.

Des Weiteren muss der unermüdliche Einsatz von Christoph Rösrath von der TU Berlin beim Pansharpening der Satellitenbilder hervorgehoben werden. Frau Wohlrapp sei gedankt für die perfekten Korrekturen in den englischen Papers und die Abwicklung vieler organisatorischer Aufgaben.

Ein weiterer Dank gebührt den Mitarbeitern von EURIMAGE, besonders Ilaria Tramacere, die sich immer meine ungeduldigen Fragen anhören musste, wann nun endlich Bilder gemacht werden.

Vielen Dank an Franziska Tanneberger von der Universität Greifswald, die ihre Vegetationskartierungen an der Oder zur Verfügung gestellt und mir mit ihrem Enthusiasmus neue Energie gegeben hat.

Eine Bereicherung war auch die Zusammenarbeit mit Sebastian Rath und Budi Gunawan von der TU Hamburg-Harburg, die mich mit langen und interessanten Gesprächen in die Welt der Hydrologie entführt haben.

Meinen Freunden möchte ich für die Zeit, Geduld und Nerven danken, die sie mit der Korrektur dieser Arbeit verbracht haben. Die langen und inhaltlich sehr spannenden Telefonate mit Marc Zebisch haben mir in vielen fachlichen Problemfällen die Augen geöffnet. Einen großen Dank an Tino Moritz für seine höchst professionelle, schnelle und gründliche Redigierung der Arbeit und die unglaubliche Beherrschung der mir immer noch rätselhaften neuen Rechtschreibung.

Schließlich möchte ich meiner wunderbaren Familie danken, besonders meinen Eltern für die großartige Unterstützung und Beratung auf jedem denkbaren Gebiet und auch für die sehr willkommenen Durchhaltepakete und meinem Mann Gabriel Goltz für seine Liebe und unermüdliche Bereitschaft, mich wieder aufzurichten, wenn die Filter nicht so funktionierten wie gewollt oder bei anderen schlimmen Rückschlägen in technischer und emotionaler Hinsicht.

VERÖFFENTLICHUNGEN

Teile dieser Arbeit wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht:

Düvel, M. & Frick, A.: Brandenburg, Ersterfassung der Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-RL. Anwendung von höchstauflösenden Satellitendaten bei der Kartierung und Bewertung. In: Natur & Landschaft, Heft 05. Bonn 2005.

Frick, A.: Evaluation of Natura 2000 habitat types through very high resolution satellite imagery. In: Göttinger Geographische Abhandlungen, Heft 113, GGRS 2004, 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days. Göttingen 2005.

Frick, A., Weyer, G., Kenneweg, H. & Kleinschmit, B.: A Knowledge-based approach to vegetation Monitoring with Quickbird imagery. ISPRS Workshop 2005 - High- Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, May 17-20, 2005 , Hannover 2005.

Frick, A.: Urban Monitoring with Quickbird Imagery through a Knowledge-Based Extraction of Indices. In: Proceedings of Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodectic Days. Berlin 2006.

KURZLEBENS LAUF

Name: Annett Frick

Geburtsdatum: 03.04.1975

Geburtsort: Karl-Marx-Stadt (heute Chemnitz)

Nationalität: deutsch

Familienstand: verheiratet

Schulen: 1981 – 1990 Georgius-Agricola-Oberschule in Karl-Marx-sStadt
1990 – 1991 EOS Friedrich-Engels in Chemnitz
1991 – 1993 Latina August Hermann Francke in Halle/Saale
Abschluß: Abitur Juni 1993
08/93 – 12/93 Ecole Schulz in Genf, Schweiz
Abschluß: Diplôme de Langue Française in Annemasse

Studium: 1994 – 2000 Studium der Geoökologie an der Universität Potsdam
Nebenfächer: Geoinformatik/Geofernerkundung und
Ökologie/Naturschutz
Abschluß: Diplom-Geoökologin Februar 2000

Anstellungen: 2000 – 2004 wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Luftbild und Planung GmbH,
Potsdam
2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Universität Berlin
seit 2006 wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Luftbild und Planung GmbH,
Potsdam

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Potsdam, 18.06.2006