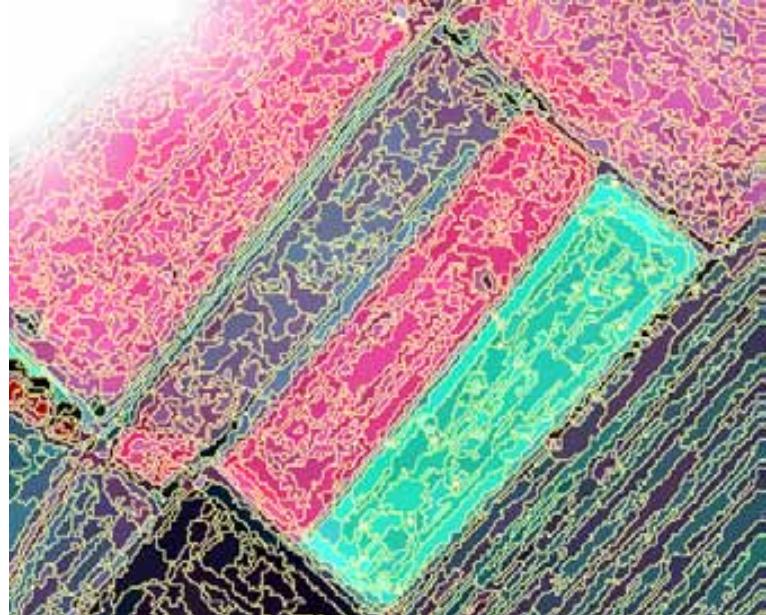


Automatische Extraktion von Schlaggrenzen für die Erosionsberatung:

Segmentierungsmethoden im Vergleich



Eingereicht von:
Andreas Völker
Emsstr. 60a
48145 Münster
avoelker@uni-muenster.de

Erstgutachter: Prof. Dr. Otto Klemm
Zweitgutachter: Prof. Dr. Christian Heipke

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen, als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Andreas Völker
Münster, im Juli 2005

INHALT

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 <i>Einführung</i>	1
1.2 <i>Zielstellung</i>	2
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 <i>Erosionsberatung beim Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung</i>	3
2.2 <i>Agrarsubventionskontrollen per Fernerkundung – Das Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsysteem (InVeKoS)</i>	5
2.3 <i>Modellierung von Schlägen</i>	6
2.4 <i>Extraktion von Schlägen</i>	8
2.4.1 Bildverarbeitung und Bildverständen	8
2.4.2 Segmentierungsverfahren	10
2.4.3 Schlagextraktionsverfahren	11
3 UNTERSUCHUNGSGEBIET	17
3.1 <i>Geographische Lage und naturräumliche Gliederung</i>	17
3.2 <i>Geologie und Böden</i>	19
3.3 <i>Klima</i>	19
3.4 <i>Landnutzung</i>	20
3.5 <i>Winderosionsgefährdung</i>	21
3.6 <i>Datengrundlagen</i>	22
3.6.1 Rasterdaten	22
3.6.2 Vektordaten	24
4 FEHLERDEFINITION UND EXTRAKTIONSMETHODEN	25
4.1 <i>Fehlerdefinition und -berechnung</i>	25
4.1.1 Referenzdaten	26
4.1.2 Definition eines Gesamtflächenfehlers F_G	28
4.1.3 Vergleich von statistischen Maßzahlen zur Beschreibung des Gesamtflächenfehlers F_G	29
4.1.4 Aufstellen von Fehlerkategorien	31
4.1.5 InVeKoS-Schlagtoleranz	32
4.2 <i>Extraktion von Schlaggrenzen mit eCognition 3.0</i>	33
4.2.1 Die objektbasierte Bildanalyse-Software eCognition	33
4.2.2 Segmentierungswerzeuge in eCognition	34
4.2.3 Berechnung des Homogenitätskriteriums	35
4.2.4 Segmentierungsstrategie mit eCognition 3.0	37
4.2.5 Einstellen der Parameter für die Gesamtszene	40
4.2.5.1 Parametertests in einem Bildausschnitt	40
4.2.5.2 Umsetzung der Segmentierung für die Gesamtszene	43
4.3 <i>Extraktion von Schlaggrenzen mit SegmentationFields</i>	44
4.3.1 Die Bildanalyse-Softwarebibliothek HALCON	44
4.3.2 Segmentierungsstrategie mit SegmentationFields	45
4.3.3 Geregelte Operatoren in SegmentationFields	48
4.3.4 Einstellen der Parameter für die Gesamtszene	53
4.3.4.1 Parametertests in einem Bildausschnitt	53
4.3.4.2 Umsetzung der Segmentierung für die Gesamtszene	54
5 ERGEBNISSE DER SCHLAGEXTRAKTION	57
5.1 <i>Einführung in die Fehlerauswertung und Ergebnisübersicht</i>	57

5.2 Erosion	73
5.2.1 Gesamtflächenfehler Schlagerkennung	73
5.2.2 Gesamtflächenfehler Abzugsflächenerkennung	76
5.2.3 Gesamtflächenfehler Gesamterkennung	77
5.2.4 Fehlerkategorien	78
5.3 InVeKoS	79
5.3.1 Gesamtflächenfehler Schlagerkennung	79
5.3.2 Gesamtflächenfehler Abzugsflächenerkennung	81
5.3.3 Gesamtflächenfehler Gesamterkennung	82
5.3.4 Fehlerkategorien	83
5.3.5 InVeKoS-Schlagtoleranz	84
6 VERGLEICH UND DISKUSSION	86
6.1 Qualität der Schlagextraktion	86
6.1.1 Ergebnischarakteristika der Gesamtszene	86
6.1.2 Gesamterkennung	87
6.1.3 Schlagerkennung	87
6.1.4 Abzugsflächenerkennung und Fehler im Randbereich	89
6.1.5 Externer Fehler F_E und Interner Fehler F_I	92
6.1.6 Grenzgenauigkeit	93
6.1.7 Fehler in der Fläche (Übersegmentierung)	95
6.1.8 Vollständigkeit der Grenzen (Untersegmentierung)	97
6.2 Diskussion methodischer Besonderheiten	98
6.2.1 Geometrische Auflösung der Bilddaten	98
6.2.2 Verwendung von Feldblöcken als Vorwissen	100
6.2.3 Vektorisierung der Segmentierungsgeometrien	103
6.2.4 Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit	105
6.2.5 Zeitaufwand und Kosten	105
7 AUSBLICK	108
7.1 Klassifikation von Schattenbereichen und Landschaftselementen mit eCognition	108
7.2 Nutzung multitemporaler Satellitenbilder mit eCognition	109
7.3 Nutzung des Snake-Algorithmus mit SegmentationFields	111
7.4 Extraktion von Winderosionshindernissen mit SegmentationFields	112
8 FAZIT UND ZUSAMMENFASSUNG	113
8.1 Ergebnisintegration in ein GIS zur Erosionsberatung	113
8.1.1 eCognition	114
8.1.2 SegmentationFields	114
8.1.3 Winderosionshindernisse	115
8.2 Ergebnisintegration in die InVeKoS-Kontrollen	116
8.2.1 eCognition	116
8.2.2 SegmentationFields	117
8.3 Zusammenfassung	119
8.4 Summary	120
9 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	121
9.1 Literatur (inkl. Internet-Dokumente)	121
9.2 Quellcode, Emails, mündliche Mitteilungen	124
9.3 Gesetze und Verordnungen	125
9.4 Karten, Raster- und Vektordaten	125
DANKSAGUNG	126
ANHANG	127
A Klassifikation mit eCognition	127
B Tabellen	129

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Bonn
BTI	Bodentechnologisches Institut des NLfB, Bremen
BÜK	Bodenkundliche Übersichtskarte
cc	Closing_circle (HALCON-Operator)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn
DFN	Digitale Feldblockkarte Niedersachsen
DGK 5	Deutsche Grundkarte 1:5.000
DirektZahlVerpfIg	Direktzahlungen-Verpflichtungsgesetz
ec	Erosion_circle (HALCON-Operator)
EU	Europäische Union
EUSI	European Space Imaging, München
gcr	Gen_contour_region_xld (HALCON-Operator)
GIS	Geoinformationssystem
gp	Gen_polygons_xld (HALCON-Operator)
i. d. F. d. B. v.	in der Fassung der Bekanntmachung vom
i. d. R.	in der Regel
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsyste
IPI	Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Hannover
NLfB	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover
NLÖ	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover
rg	Regiongrowin_n (HALCON-Operator)
VHR	Very High Resolution

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1:	Gegenüberstellung der genutzten Software und der als Referenzsysteme zur Evaluation verwendeten Praxisanwendungen	S. 2
Abb. 2.1:	Standort- und Nutzungsfaktoren der Bodenerosion (Quelle: NLÖ 2003, S.13)	S. 3
Abb. 2.2:	Modellbildung für die Extraktion von Schlaggrenzen mit <i>Segmentation-Fields</i> (Quelle: BUTENUTH u. HEIPKE 2003)	S. 7
Abb. 2.3:	Prinzip der Wasserscheidensegmentierung	S. 10
Abb. 2.4:	Extrahierte Schlaggeometrien (Quelle: FOCKELMANN 2001, S.1)	S. 13
Abb. 2.5:	Verschiebung durch den Neigungseffekt (Quelle: OESTERLE u. HAHN 2004, S. 518, verändert)	S. 15
Abb. 3.1:	Übersicht über das nördliche Niedersachsen mit der Lage des Untersuchungsgebietes (blauer Kasten), Ausschnitt aus der Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (Quelle: LANDESVERMESSUNG U. GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN o. J., verändert)	S. 17
Abb. 3.2:	Übersicht über das Untersuchungsgebiet, Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:50.000 (Quelle: LANDESVERMESSUNG U. GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN 1998 u. 1999, verändert)	S. 18
Abb. 3.3:	Klimadiagramm Bremen, Monatsmittel (1961-1990) der Temperatur (rot) und der Niederschlagshöhe (blau) (Datengrundlage: DEUTSCHER WETTERDIENST 2005)	S. 20
Abb. 3.4:	Winderosionsgefährdung auf Gemeindeebene, Anteil erosionsfördernder Früchte [in %] (Lage des Untersuchungsgebietes: blauer Pfeil) (Quelle: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 2005b, o. S., verändert)	S. 22
Abb. 3.5:	Übersicht über das Untersuchungsgebiet, IKONOS-Bilddaten, (Kanal-Kombination: Grün, Rot, Nahes Infrarot) (Quelle: European Space Imaging 2004, verändert)	S. 23
Abb. 3.6.:	Feldblockgrenzen (gelbe Linie, Ausschnitt) (LAND NIEDERSACHSEN 2004)	S. 24
Abb. 4.1:	Gegenüberstellung der unterschiedlichen Schlagabgrenzung in den Referenzdaten aufgrund der unterschiedlichen Genauigkeitsanforderungen der Erosionsberatung (b) und der InVeKoS-Kontrollen (c)	S. 27
Abb. 4.2:	Die größte interne Teilfläche T_{Max} (grün gerastert) nach der Verschneidung von Referenz- (A_{Ref} , rot-gepunktet) und Ergebnisgeometrie (grün)	S. 28
Abb. 4.3:	Fläche des internen Fehlers F_I (blau gerastert)	S. 28
Abb. 4.4:	Fläche des externen Fehlers F_E (blau gerastert)	S. 29
Abb. 4.5:	Ergebnisfläche A_{Erg} , der T_{Max} zugehörig ist	S. 29
Abb. 4.6:	Gegenüberstellung von Referenzflächen und Segmentierungsergebnissen (<i>eCognition</i>) mit dem geringsten arithmetischen Mittel bzw. dem Median von F_G	S. 30
Abb. 4.7:	Einrichten eines Projektes mit Raster- (a) und Vektordaten (b) in <i>eCognition</i>	S. 33

Abb. 4.8:	Plane Four-Neighborhood (a) und Diagonal Eight-Neighborhood (b)	S. 34
Abb. 4.9:	Bildung von Sub- und Superobjekten bei der Segmentierung mit <i>eCognition</i>	S. 34
Abb. 4.10:	Simultanes Regionenwachstum bei der Multiresolution Segmentation. (Quelle: BAATZ u. SCHÄPE, 2000, S.16)	S. 35
Abb. 4.11:	Gliederung des Homogenitätskriteriums	S. 36
Abb. 4.12:	Regionenwachstum mit <i>eCognition</i>	S. 37
Abb. 4.13:	Segmentierungsstrategie mit <i>eCognition</i>	S. 38
Abb. 4.14:	Spektrale Reflektionsgrade verschiedener Oberflächen (Quelle: ALBERTZ 2001, S.19)	S. 39
Abb. 4.15:	Bildausschnitt für die Parametertests (gelber Kasten) im Unter- suchungsgebiet	S. 40
Abb. 4.16:	Beispiel für die Auswirkung der unterschiedlichen Gewichtung von Spektral- und Formkriterium auf die Segmentierung (Scaleparameter = 210)	S. 42
Abb. 4.17:	Segmentierungsstrategie mit <i>SegmentationFields</i> (Quelle: BUTENUTH ET AL. 2004, o. S.)	S. 47
Abb. 4.18:	Grundprinzip der Dilatation	S. 50
Abb. 4.19:	Grundprinzip der Erosion	S. 50
Abb. 4.20:	Grundprinzip des Closing	S. 51
Abb. 4.21:	Position der genutzten Operatoren im Programmablauf (Abkürzungen siehe Tab. 4.5) (Quelle: BUTENUTH ET AL. 2004, o. S., verändert)	S. 52
Abb. 5.1:	Darstellung der Aufgliederung der Ergebnisbeschreibung	S. 58
Abb. 5.2:	Ergebnis der Segmentierung (Eco1) mit <i>eCognition</i> (gelb)	S. 59
Abb. 5.3:	Ergebnis der Segmentierung (Eco1) mit <i>eCognition</i> (gelb) und über- lagerten Feldblockdaten (blau)	S. 60
Abb. 5.4:	Ergebnis der Segmentierung (Eco2) mit <i>eCognition</i> (gelb)	S. 61
Abb. 5.5:	Ergebnis der Segmentierung (Eco2) mit <i>eCognition</i> (gelb) und über- lagerten Feldblockdaten (blau)	S. 62
Abb. 5.6:	Ergebnis der Segmentierung (Eco3) mit <i>eCognition</i> (gelb)	S. 63
Abb. 5.7:	Ergebnis der Segmentierung (Eco3) mit <i>eCognition</i> (gelb) und über- lagerten Feldblockdaten (blau)	S. 64
Abb. 5.8:	Ergebnis der Segmentierung (Sgf1) mit <i>SegmentationFields</i> (gelb)	S. 65
Abb. 5.9:	Ergebnis der Segmentierung (Sgf1) mit <i>SegmentationFields</i> (gelb) und über- lagerten Feldblockdaten (blau)	S. 66
Abb. 5.10:	Ergebnis der Segmentierung (Sgf2) mit <i>SegmentationFields</i> (gelb)	S. 67
Abb. 5.11:	Ergebnis der Segmentierung (Sgf2) mit <i>SegmentationFields</i> (gelb) und über- lagerten Feldblockdaten (blau)	S. 68
Abb. 5.12:	Ergebnis der Segmentierung (Sgf3) mit <i>SegmentationFields</i> (gelb)	S. 69

Abb. 5.13:	Ergebnis der Segmentierung (Sgf3) mit <i>SegmentationFields</i> (gelb) und überlagerten Feldblockdaten (blau)	S. 70
Abb. 5.14:	F_I , F_E , F_G (Median) der Schlagerkennung mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i> (Erosion)	S. 73
Abb. 5.15:	Häufigkeitsverteilung F_G (Eco1-3), Schlagerkennung Erosion [in %] (11 Klassen: 0 % bis $\geq 100\%$)	S. 74
Abb. 5.16:	Häufigkeitsverteilung F_G (Eco1) Schlagerkennung Erosion (25 Klassen über die gesamte Spannbreite) [in %]	S. 74
Abb. 5.17:	Häufigkeitsverteilung F_G (Sgf1-3), Schlagerkennung Erosion [in %] (11 Klassen: 0 % bis $\geq 100\%$)	S. 75
Abb. 5.18:	F_I , F_E , F_G (Median) der Abzugsflächenerkennung mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i> (Erosion)	S. 76
Abb. 5.19:	F_I , F_E , F_G (Median) der Gesamterkennung mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i> (Erosion)	S. 77
Abb. 5.20:	Erfasste Fehlerkategorien (Erosion) [in %] für <i>eCognition</i> (Eco3) und <i>SegmentationFields</i> (Sgf2), 969 Referenzflächen	S. 78
Abb. 5.21:	F_I , F_E , F_G (Median) der Schlagerkennung mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i> (InVeKoS)	S. 79
Abb. 5.22:	Häufigkeitsverteilung F_G (Eco1-3), Schlagerkennung InVeKoS [in %] (11 Klassen: 0 % bis $\geq 100\%$)	S. 80
Abb. 5.23:	Häufigkeitsverteilung F_G (Sgf1-3), Schlagerkennung InVeKoS [in %] (11 Klassen: 0 % bis $\geq 100\%$)	S. 81
Abb. 5.24:	F_I , F_E , F_G (Median) der Abzugsflächenerkennung mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i> (InVeKoS)	S. 82
Abb. 5.25:	F_I , F_E , F_G (Median) der Gesamterkennung mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i> (InVeKoS)	S. 83
Abb. 5.26:	Erfasste Fehlerkategorien (InVeKoS) [in %] für <i>eCognition</i> (Eco3) und <i>SegmentationFields</i> (Sgf2), 1416 Referenzflächen	S. 84
Abb. 5.27:	Gegenüberstellung von <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i> bzgl. der Häufigkeit der Flächen ohne Überschreitung der InVeKoS-Toleranzgrenze [in %]	S. 85
Abb. 6.1:	Nicht erkannte Abzugsflächen (rot-schraffiert) und Segmentierungsresultat (gelb)	S. 90
Abb. 6.2:	Wertung des Segmentierungsergebnisses (gelbe Linie) als fehlende Grenze (linker Pfeil) und Fehler im Randbereich (rechter Pfeil) im Bezug zu den Referenzdaten (rote Linie)	S. 91
Abb. 6.3:	Identische Flächen für den externen Fehler F_E (blau kariert) bei einer langen (a) und einer kurzen (b) fehlenden Grenze (gelb)	S. 93
Abb. 6.4:	Pixelgenauer Grenzverlauf und Treppeneffekt mit <i>eCognition</i>	S. 93
Abb. 6.5:	Von <i>eCognition</i> segmentierte Schatten und Kronenbereiche	S. 94
Abb. 6.6:	Starke Generalisierung mit <i>SegmentationFields</i>	S. 94
Abb. 6.7:	Abknicken an Eck- und Kreuzungspunkten mit <i>SegmentationFields</i>	S. 94

Abb. 6.8:	Gegenüberstellung von Übersegmentierung durch Wolken und Wolkenschatten mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i>	S. 95
Abb. 6.9:	Gegenüberstellung von Übersegmentierung durch Bodenvariabilitäten mit <i>eCognition</i> und <i>SegmentationFields</i>	S. 96
Abb. 6.10:	Nichterkennen von Grenzen mit <i>eCognition</i> (Eco1)	S. 97
Abb. 6.11:	Nichterkennen von Grenzen mit <i>SegmentationFields</i> (Ipi1)	S. 98
Abb. 6.12:	Nichterkannte Hecke (Sgf1)	S. 99
Abb. 6.13:	Geringe Abweichungen von den Feldblockdaten (türkis) bei <i>eCognition</i> (grün) und <i>SegmentationFields</i> (gelb)	S. 101
Abb. 6.14:	Abweichung der Segmentierung mit <i>SegmentationFields</i> (gelb) von den Feldblockgrenzen (türkis)	S. 101
Abb. 6.15:	Feldblockinsel (gelber Pfeil) innerhalb der Feldblockfläche (gelb umrandet)	S. 102
Abb. 6.16:	Überlappung (a) und Lückenbildung (b) von vektorisierten Flächen bei <i>SegmentationFields</i> (Operator: gen_contour_region_xld)	S. 104
Abb. 7.1:	Exemplarische Klassifikation von Schattenwurfflächen mit <i>eCognition</i>	S. 109
Abb. 7.2:	Exemplarische Klassifikation von Wasserflächen mit <i>eCognition</i>	S. 109
Abb. 7.3:	Spektral ähnliche Flächen im IKONOS-Bild (blau: Referenzflächen)	S. 110
Abb. 7.4:	Deutliche Trennbarkeit im Multitemporal-Bild (blau: Referenzflächen)	S. 110
Abb. 7.5:	Durch multitemporale Segmentierung erkannte Grenze (gelb) ergänzt die IKONOS-Segmentierung mit <i>eCognition</i> (orange)	S. 110
Abb. 7.6:	Multitemporale Segmentierung (blau u. rot) ergänzt die IKONOS-Segmentierung mit <i>eCognition</i> (grau)	S. 110
Abb. 7.7:	Segmentierungsergebnis mit <i>SegmentationFields</i> (gelb, oben) und Geometrieverbesserung (Pfeil) durch Snakes (rot, unten) (Quelle: BUTENUTH 2004a, S.1069, verändert)	S. 111
Abb. A.1:	Nearest Neighbour-Verfahren: Darstellung von Klassen (A-E) mit ihren arithmetischen Mitteln (+) (Quelle: ALBERTZ 2001, S.165)	S. 127
Abb. A.2.:	Vergleich von Spektralwerten und anderen Merkmalen im Sample Editor von <i>eCognition</i>	S. 128
Abb. A.3:	Definition einer Zugehörigkeitsfunktion anhand von Fuzzy Logic in <i>eCognition</i>	S. 128

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 3.1:	IKONOS-Spektralkanäle (SPACE IMAGING 2004, S. 7)	S. 23
Tab. 3.2:	Zusätzliche Satellitenbilddaten (STEIN 2004, S. 28 ff.)	S. 24
Tab. 4.1:	Rahmendaten der Referenzgeometrien	S. 27
Tab. 4.2:	Parametereinstellungen für die Vorsegmentierung im Bildausschnitt mit <i>eCognition</i>	S. 41
Tab. 4.3.:	Parametereinstellungen für die Hauptsegmentierung im Bildausschnitt mit <i>eCognition</i>	S. 43
Tab. 4.4:	Segmentierungsvariationen für die Gesamtszene mit <i>eCognition</i>	S. 43
Tab. 4.5:	Geregelte Operatorengruppen in <i>SegmentationFields</i>	S.48
Tab. 4.6:	Getestete Segmentierungseinstellungen im Bildausschnitt mit <i>SegmentationFields</i>	S. 53
Tab. 4.7:	Minimum des Gesamtflächenfehlers F_G (Median) der Operatorengruppen (Gesamterkennung) und die für die Gesamtszene verwendeten Variablenwerte	S. 55
Tab. 4.8:	Segmentierungsvariationen für die Gesamtszene mit <i>SegmentationFields</i>	S. 56
Tab. 5.1:	Gesamtübersicht: Flächenfehlerwerte bzgl. der Erosionsreferenz	S. 71
Tab. 5.2:	Gesamtübersicht: Flächenfehlerwerte bzgl. der InVeKoS-Referenz	S. 72
Tab. B.1:	Parametertests in einem Bildausschnitt, Segmentierung mit <i>eCognition</i>	S. 129
Tab. B.2:	Parametertests in einem Bildausschnitt, Segmentierung mit <i>SegmentationFields</i>	S. 130

1 EINLEITUNG

1.1 Einführung

Die vorliegende Arbeit bewertet anhand eines Vergleichs der Segmentierungsmethoden der kommerziellen Software *eCognition 3.0* und des Software-Prototyps *SegmentationFields* deren Eignung für die präzise Erfassung von landwirtschaftlichen Schlaggrenzen aus einer sehr hochauflösenden Satellitenbildszene. Für die Bewertung der Extraktion wird ein objektives Flächenfehlermaß entwickelt, das einen direkten Vergleich der Segmentierungsqualität beider Verfahren anhand von Referenzdaten ermöglicht.

Bodenerosion gefährdet die Produktivität landwirtschaftlicher Flächen, da besonders die fruchtbare Ackerkrume von der Abtragung durch Wind und Wasser betroffen ist. Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verpflichtet Landwirte, Bodenabträge nach Möglichkeit zu vermeiden. Für eine einheitliche Erosionsberatung benötigt das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLfB) landesweit verfügbare Daten über die Schlaggeometrien.

Die Erfassung von Geodaten ist mit sehr hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden, da derartige Objektgeometrien derzeit manuell abgegrenzt werden müssen. Die Automatisierung dieses Prozesses kann in kurzen Zeitintervallen eine großflächige Bereitstellung von Grenzgeometrien ermöglichen, die über die Fragestellung der Erosionsberatung hinaus auf vielfältige Anwendungsfelder trifft, u. a. auf die Schlagextraktion für Agrarsubventionskontrollen der Europäischen Union (EU) per Fernerkundung durch das Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsysteem (InVeKoS).

Die vorliegende Arbeit kann einen Beitrag zur Automatisierung der Schlagextraktion leisten, indem sie den gegenwärtigen Entwicklungsstand der Programme *eCognition* und *SegmentationFields* mit objektiven Qualitätsmaßen beschreibt und Fehlerursachen detailliert aufzeigt.

Die Software *eCognition* nutzt für die Segmentierung ein multiskalares Regionenwachstum unter Einsatz von Spektral- und Formkriterien. *SegmentationFields* kombiniert kanten- und regionenbasierte Segmentierungsmethoden für die Extraktion von Schlagflächen. Bei beiden Programmen wird Vorwissen für die Einschränkung des Suchraumes genutzt.

Die vorliegende Arbeit ist in ein Teilprojekt des Forschungs- und Entwicklungsprogramms ‚Geotechnologien – Informationssysteme für das Erdmanagement‘ integriert. Ziel des Teilprojektes ‚Integration von Raster- und Vektordaten‘ am Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI) der Universität Hannover ist es, durch die Entwicklung der Software *SegmentationFields* dem Niedersächsischen

Landesamt für Bodenforschung ein Instrument für eine schlaggenaue Erosionsberatung zur Verfügung zu stellen, das eine automatisierte Aufstellung und Aktualisierung landwirtschaftlicher Schlagflächen ermöglicht. Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Programm Geotechnologien soll geowissenschaftlich-technische Potentiale aufzeigen und Netzwerke mit direkten Verknüpfungen zur Wirtschaft hervorbringen. In diesem Teilprojekt nimmt die Firma EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH aus Münster einen Beobachterstatus ein.

1.2 Zielstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Extraktionsmethoden der Segmentierungsprogramme *eCognition* und *SegmentationFields* in einem direkten Vergleich bzgl. ihrer Nutzbarkeit für die automatische Extraktion von Schlaggrenzen im Rahmen der Erosionsberatung des NLfB bzw. der Fernerkundungskontrollen für InVeKoS zu evaluieren (siehe Abb. 1.1). Für beide Programme werden anhand einer empirischen Systematik optimale Parametereinstellungen für die Segmentierung ermittelt und auf eine 25 km² große, sehr hochauflöste IKONOS-Bildszene angewendet.

Um eine Bewertung der großflächigen Ergebnisse zu ermöglichen, wird ein objektives Maß für Fehlerflächen entwickelt und in einer halbautomatisierten Berechnungsprozedur realisiert. Dafür werden unter Berücksichtigung der in der Erosionsberatung und im Rahmen von InVeKoS gestellten Qualitätsanforderungen Referenzdaten erstellt.

Anhand einer detaillierten Darstellung der Ergebnisse und einer Aufgliederung der Fehlerwerte werden Fehlerursachen aufgezeigt und die genutzten Extraktionsmethoden diskutiert. Abschließend wird untersucht, ob zum gegenwärtigen Entwicklungsstand der genutzten Programme eine Integration der Ergebnisgeometrien in die Beratungspraxis des NLfB bzw. die InVeKoS-Kontrollen per Fernerkundung möglich ist. In einem Ausblick werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Segmentationsergebnisse aufgezeigt.

		Praxisanwendung	
		Erosionsberatung	InVeKoS-Kontrollen
Software	<i>eCognition</i>	Evaluation	Evaluation
	<i>SegmentationFields</i>	Evaluation	Evaluation

Abb. 1.1: Gegenüberstellung der genutzten Software und der als Referenzsysteme zur Evaluation verwendeten Praxisanwendungen

2 GRUNDLAGEN

Im folgenden Kapitel wird in die Erosionsberatung beim Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB) und das Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsysteem (InVeKoS) eingeführt. Außerdem wird die Modellierung von Schlägen als Grundlage für die vorliegende Arbeit vorgestellt und der Stand der Forschung in den Bereichen Bildverstehen, Segmentierungsmethoden und Schlagextraktion beschrieben.

2.1 Erosionsberatung beim Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung

Bodenerosion bezeichnet laut SCHACHTSCHABEL ET AL. (1992, S. 468) „*die Verlagerung von Bodenmaterial entlang der Oberfläche durch Wasser und Wind*“. Die Erosion durch Wasser tritt nur dann auf, wenn im Gelände eine Hangneigung vorliegt, während die Winderosion i. d. R. eine Erscheinung in der Ebene ist. Die landwirtschaftliche Ertragsfähigkeit von erodierten Böden kann sich beträchtlich senken, da zunächst die ökologisch günstige Ackerkrume von der Abtragung betroffen ist (vgl. ebd., S. 468). Die Bodenerosion wird einerseits von den langfristig wirkenden Standortfaktoren wie z. B. der Windgeschwindigkeit bei der Winderosion oder der Hangneigung bei der Wassererosion bestimmt (siehe Abb. 2.1). Andererseits haben auch kurzfristig wirkende Nutzungsfaktoren wie z. B. Bodenbedeckung und -struktur (siehe Abb. 2.1) einen Einfluss auf die Erosionsgefährdung landwirtschaftlicher Flächen (vgl. NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (NLÖ) 2003, S. 13).



Abb. 2.1: Standort- und Nutzungsfaktoren der Bodenerosion (Quelle: NLÖ 2003, S.13)

Für eine allgemein wirksame Erosionsvorsorge fordert das BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (BBodSchG) in § 17, Abs. 2, S. 4 zur ‚Guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft‘ nach Möglichkeit Bodenabträge durch eine standortangepasste Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung zu vermeiden. Auch die erweiterten Verpflichtungen (sog. Cross Compliance) für die Direktzahlungen für Ackerflächen im Rahmen von InVeKoS (siehe Kap. 2.2) schreiben den Landwirten laut § 2, Abs. 1, S. 2 des DIREKTZAHLUNGEN-VERPFLICHTUNGSGESETZES (DIREKTZAHLVERPFLG) Maßnahmen zum Schutz des Bodens vor Erosion und vor Verlust der organischen Substanz, zum Erhalt der Bodenstruktur und zu einer Instandhaltung der Flächen vor, um die genutzten Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand zu erhalten.

Um die Ausweisung erosionsgefährdeter Gebiete zu steuern, werden im Bodentechnologischen Institut (BTI) des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (NLfB) Daten und Auswertungskarten auf verschiedenen Maßstabsebenen zur Wind- und Wassererosion als Handlungsempfehlung für Planung und Beratung bereitgestellt: Für die potentielle Wind- und Wassererosion werden vom NLfB Karten der potentiellen Erosionsgefährdung auf Grundlage der Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK 50) anhand von bodenkundlichen Kriterien erstellt (vgl. NLÖ 2003, S. 14 ff.). Die Berechnung der Wassererosionsgefährdung wird durch morphologische und klimatologische Kriterien ergänzt und erfolgt mit der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) nach HENNINGS (vgl. KUNTZE ET AL., S. 360 ff.). Unter Berücksichtigung des gemeindespezifischen Fruchfolgefaktors nach der amtlichen Agrarstatistik werden die Ergebnisse aus der Berechnung der potentiellen Wind- und Wassererosionsgefährdung um den Einfluss der Bodenbedeckung auf die Erosionsgefährdung ergänzt (vgl. NLÖ, S. 17 f.).

Seit 2001 arbeitet das NLfB mit verschiedenen Projektpartnern in einem Pilotprojekt an der „*Umsetzung einer Methode zur schlagspezifischen Beurteilung der aktuellen Erosionsgefährdung*“ (NLFB 2005c, o. S.). Erklärtes Projektziel ist „*ein einheitliches, aufeinander abgestimmtes Beratungskonzept zur Praxisreife zu bringen*“ (NLFB 2005c, o. S.), indem an repräsentativen Standorten ein Konzept zur Erreichung eines definierten Bodenqualitätsziels bzgl. der Bodenerosion entwickelt wird (vgl. NLFB 2005c, o. S.).

An den geowissenschaftlichen Hintergrund der schlaggenauen Erosionsberatung knüpft das Geotechnologien-Teilprojekt ‚Integration von Raster- und Vektordaten‘ des IPI mit dem Ziel an, Schlaggrenzen automatisch aus Luft- bzw. sehr hochauflösenden Satellitenbildern zu extrahieren (BUTENUTH 2004a, S. 1065).

2.2 Agrarsubventionskontrollen per Fernerkundung – Das Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsyste (InVeKoS)

Mit der Agrarreform von 1992 setzt die Europäische Union (EU) wesentliche Änderungen bei Subventionszahlungen für die Landwirtschaft um, indem die Auszahlungen nicht mehr an die produzierte Menge, sondern an die bearbeitete Fläche geknüpft werden.

Um Zuschüsse für landwirtschaftlich genutzte Flächen zu erhalten, muss der Landwirt einen Teil seiner Flächen stilllegen. Im Jahr 2004 betrug die Stilllegungsquote 10 %. Für die Verwaltung und Kontrolle der Subventionszahlungen ist in allen EU-Mitgliedstaaten ein sog. Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsyste (InVeKoS) einzuführen. Mit Hilfe des InVeKoS werden die flächenbezogenen Beihilfen organisiert und durch die jeweiligen Behörden der Mitgliedsstaaten an die Landwirte ausgezahlt (vgl. VERORDNUNG (EWG) Nr.3508/1992).

Auf der Grundlage der Verordnung (EG) Nr. 1782/2003 des Rates der Europäischen Union werden im Rahmen der gemeinsamen Agrarpolitik ab dem 1. Januar 2005 die flächenbezogenen Beihilfen in Direktzahlungen im Rahmen von Betriebsprämiens umgewandelt (vgl. VERORDNUNG (EG) Nr. 1782/2003, Art.17). Für die Identifikation von landwirtschaftlichen Schlagflächen sind Geoinformationssysteme (GIS) einzusetzen, die vorzugsweise durch Luft- und Satellitenorthobilder mit homogenem Standard ergänzt werden können, der mindestens eine dem Maßstab 1:10.000 entsprechende Genauigkeit gewährleistet (vgl. VERORDNUNG (EG) Nr. 1782/2003, Art.20). Des weiteren schreibt die VERORDNUNG (EG) 1782/2003 in Artikel 5 und Anhang IV im Rahmen weiterer Verpflichtungen (sog. Cross Compliance) für die Zahlung von Fördergeldern eine Erhaltung von besonderen Landschaftselementen (u. a. Hecken, Baumreihen, Fließ- und Kleingewässer, Quellbereiche, Moore, Röhrichte) vor.

In den einzelnen Mitgliedsstaaten müssen jährlich mindestens 5 % der geförderten Betriebe kontrolliert werden (vgl. VERORDNUNG (EG) Nr. 796/2004, Art.26). Die Projektabwicklung in der Bundesrepublik, in der das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) lediglich eine koordinierende Funktion übernimmt, liegt bei den Landwirtschaftsministerien der einzelnen Bundesländer (vgl. STEIN 2004, S. 1).

Da Vor-Ort-Kontrollen mit einem hohen Personal- und Zeitaufwand verbunden sind, wurden diese in den meisten Bundesländer durch eine Kontrolle durch Fernerkundung ergänzt. Das Antragsverfahren beginnt bereits gegen Ende des jeweiligen Vorjahres mit verschiedenen Vorarbeiten, die eigentliche Fernerkundungs-Kontrolle

der Antragsflächen im Rahmen von InVeKoS erfolgt innerhalb eines kurzen Zeitfensters von Mai bis Juli. Im Mai werden im Gelände Referenzflächen erhoben, da die spektrale Signatur der Kulturarten und somit ihr Aussehen im Satellitenbild jährlich stark variiert. In den Monaten Juni und Juli erfolgt die eigentliche Verarbeitung und Kontrolle der Antragsdaten. Die Erfassung der Flächengröße erfolgt derzeit durch manuelle Digitalisierung mit Hilfe von Bild- und Katasterdaten (vgl. STEIN 2004, S. 7 f.)

Die Erfassung von Schlaggeometrien nach InVeKoS-Kriterien dient in der vorliegenden Arbeit für die Evaluation der Programme *eCognition* und *Segmentation-Fields* als etabliertes Qualitätsmaß für die notwendige Erfassungsgenauigkeit von Geodaten in der freien Wirtschaft. Im Projektumfeld des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems wird die Abkürzung InVeKoS i. d. R. ohne Artikel verwendet. Diese vereinfachte Form wird in der vorliegenden Arbeit beibehalten.

2.3 Modellierung von Schlägen

Bei LESER (1994, S. 477) wird ein Schlag als ein Ackerstück definiert, „*das fruchtfolgemäßig einheitlich oder annähernd einheitlich behandelt bzw. bebaut wird*“. Für InVeKoS wird ein derartiger Schlag als Parzelle bezeichnet und als ein landwirtschaftlich genutztes, zusammenhängendes Stück Land beschrieben, welches von einem einzigen Betriebsinhaber für eine bestimmte Kultur genutzt wird (vgl. VERORDNUNG (EWG) Nr. 3508/1992, Art. 1, Abs. 4). Da der in der InVeKoS-Definition enthaltene Bezug zum landwirtschaftlichen Betrieb nicht aus den Bilddaten extrahiert werden kann, gilt für die vorliegende Arbeit der aus ökologischer Sicht definierte Schlagbegriff von LESER.

Eine wichtige Grundlage für die Extraktion von Geoobjekten aus Luft- und Satellitenbildern stellt die ausführliche Modellierung der zu extrahierenden Objekte dar. Die Modellierung beinhaltet eine ausführliche Darstellung der zu extrahierenden Objekte und ihrer Umgebung. Durch die Modellierung der jeweiligen Charakteristika und der Zusammenhänge zwischen den Objekten ist eine detaillierte Beschreibung möglich (vgl. BUTENUTH 2004a, S. 1065). BALTSAVIAS (2004, S. 143 f.) weist für die Objektextraktion auf die Notwendigkeit einer ausgewogenen Modellierung hin, deren Wissensrepräsentation weder zu einfach und restriktiv noch zu detailliert und ausufernd gehaltenen sein dürfe. Für die Extraktion von Straßen bildet BAUMGARTNER (vgl. 2003, S. 11) verschiedene Modellebenen:

- **Reale Welt:** eine „allgemeingültige, für einen Menschen bedeutungsvolle Beschreibung der Szene“ (BAUMGARTNER 2003, S. 11)
- **Bildebene:** berücksichtigt die verwendeten Sensoren und Eigenschaften des Bildmaterials
- **Geometrie-/Materialebene:** bezieht Form- und Oberflächeneigenschaften der Geoobjekte ein

Für die Extraktion von Schlaggrenzen erweitert BUTENUTH (2004a, S. 1066) die Real-, Material- und Bildebene um eine **GIS-Ebene**, die verschiedene Objekte des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) (z. B. Straßen, Wege, Bahnlinien) als Vorwissen in Form von Vektordaten in die Modellierung von Schlägen integriert (vgl. Abb. 2.2). Die hohe Bedeutung von Vorwissen in Form dieser kombinierten Nutzung von Raster- und Vektordaten wird durch die Bildung einer eigenen Ebene unterstrichen. Auch BALTSAVIAS (2004, S. 135) beschreibt die Vereinfachung und Beschleunigung des Extraktionsprozesses durch die Nutzung bereits existenter Geodaten.

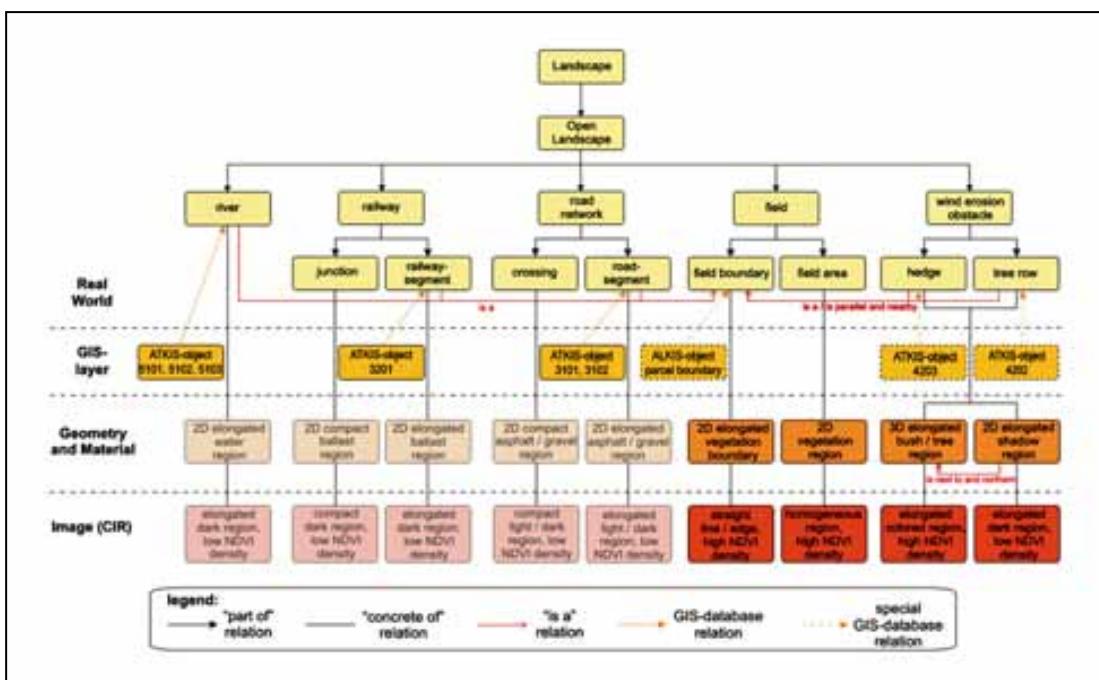


Abb. 2.2: Modellbildung für die Extraktion von Schlaggrenzen mit SegmentationFields
(Quelle: BUTENUTH u. HEIPKE 2003)

Die Modellierung nach BUTENUTH erfolgt unter der Annahme, dass die genutzten Bilddaten zu einem Zeitpunkt der Vegetationsperiode aufgenommen werden, in denen die Bedeckung der Schlagflächen ihr Maximum erreicht. Anhand der ATKIS-Daten (siehe Abb. 2.2, „GIS-Layer“) wird der Suchbereich für die Schlagextraktion

eingeschränkt, indem Siedlungs-, Wald- oder Wasserflächen ausmaskiert werden. Die Modellierung der Schläge unterscheidet zwischen der Schlagfläche und der Schlaggrenze (siehe Abb. 2.2, „Geometry and Material“), was unterschiedliche Strategieansätze für die Schlagextraktion ermöglicht (vgl. BUTENUTH 2004a, S. 1066).

In der vorliegenden Arbeit werden anstelle der ATKIS-Objekte die ebenfalls im Vektorformat vorliegenden Feldblockdaten (siehe Kap. 3.6.2) als Vorwissen für die Schlagextraktion genutzt. Der Begriff Feldblock bezeichnet eine von relativ feststehenden Grenzen (Strassen, Hecken, Gewässer, etc.) umschlossene Fläche verschiedenartiger landwirtschaftlicher Nutzung, die exakt an der Nutzungsgrenze endet. Auf diesem Wege werden keine Teile der den Suchraum in den Bilddaten eingrenzenden Vektorobjekte in das Suchraumraster mit einbezogen, wie es z. B. bei den nur als Polylinie vorliegenden ATKIS-Strassenobjekten der Fall ist.

2.4 Extraktion von Schlägen

2.4.1 Bildverarbeitung und Bildverstehen

Die in den letzten Jahren neu entwickelten sehr hochauflösenden Satellitensysteme, sog. VHR-Systeme (= very high resolution), liefern verstärkt dem klassischen Luftbild vergleichbare Ergebnisse (z. B. geometrische Auflösung von Quickbird: 0,6 m). Auch Luftbilddaten liegen zunehmend in digitaler Form vor. Durch den größeren Maßstab der Aufnahmen erfahren die Spektralwerte der einzelnen Pixel bei der Auswertung und Klassifikation der Aufnahmen eine geringere Bedeutung, da sich die zu extrahierende Information eher in Bildobjekte und ihren gegenseitigen Beziehungen befindet (vgl. GUINDON 2000, o. S. und BLASCHKE u. STROBL 2001, S. 12 f.)

Die umfangreiche Hierarchie von Bildverarbeitungsprozessen gliedert JÄHNE (vgl. 2002, S. 14 ff.) in die Schritte Bildaufnahme, -vorverarbeitung und -analyse. Am Ende dieser Kette finden sich Segmentierung, Klassifikation und Bildverstehen.

Die Analyse sehr hoch auflösender Luftbilddaten wurde zunächst insbesondere im militärischen Bereich vorangetrieben, wobei Bildanalysesysteme entstanden, die mit der Herangehensweise des Bildverstehens (sog. image understanding) Informationen aus Bilddaten extrahieren (vgl. GUINDON 1997, S. 39). Nach GUINDON charakterisieren folgende Merkmale das Bildverstehen:

- Analyse von Bildobjekten und deren Segmentierung in Regionen
- Wissensbasiertes Vorgehen
- Räumliche Analyse auf mehreren Ebenen
- Klassifikation von Teilmengen
- Mehrkanaligkeit
- Einbeziehen von Vorwissen in den Analyseprozess

Die Ziele des Bildverstehens sind die Integration neuer Bilddaten in bestehende Rauminformationen, die Entwicklung neuer Modellierungsansätze, das Aufzeigen von räumlichen Veränderungen und die Unterstützung bei der manuellen Interpretation (vgl. GUINDON 1997, S. 39).

BALTSAVIAS (2004, S. 139) beschreibt das Einbeziehen von bisher kaum genutzten Zusatzinformationen (z. B. Vorwissen, Modelle und Regelwerke) als wichtiges Charakteristikum für eine modellbasierte Bildanalyse und Objektextraktion.

Laut ANDRESEN (2004, S. 34 f.) kann für *eCognition* anhand der Kombination folgender Kriterien eine Zuordnung zu den Methoden des Bildverstehens erfolgen: Die Software *eCognition* verfolgt durch die Nachbildung kognitiver Prozesse die Strategie einer objektorientierten Bildanalyse. Bildobjekte und deren Beziehungen enthalten die für die inhaltliche Analyse notwendige semantische Information. Die Bildobjekte können in verschiedenen Auflösungen und in Form eines hierarchischen Netzes gebildet werden, die Auswertung erfolgt in den zwei Abschnitten ‚regionenbildende Segmentierung‘ und ‚Klassifikation‘, die Klassifikation wiederum erfolgt anhand zahlreicher Spektral-, Form- und Texturparameter.

Anhand der Kriterien von GUINDON lässt sich auch *SegmentationFields* in den Bereich des Bildverstehens einordnen, da u. a. die Kriterien ‚Bildobjektanalyse‘, ‚wissensbasiertes Vorgehen‘, ‚Regionensegmentierung‘, ‚Mehrkanaligkeit‘ und ‚Nutzung von Vorwissen‘ vorliegen.

Zu beachten ist, dass GUINDON für die Zugehörigkeit zum Bildverstehen die Möglichkeit zur Bildung von Teilmengen durch eine Klassifikation fordert. Eine derartige Funktionalität ist bei *SegmentationFields* nicht vorgesehen und somit auch nicht implementiert. Die Software *eCognition* bietet Werkzeuge zur Klassifikation, jedoch wurden diese für den direkten Vergleich beider Segmentierungsmethoden in der vorliegenden Arbeit nicht benutzt, um eine direkte Vergleichbarkeit mit der Segmentierungssoftware *SegmentationFields* zu erreichen. In Kapitel 7.1 wird ein exemplarischer Ausblick auf die Möglichkeiten der Klassifikation mit *eCognition* gegeben.

2.4.2 Segmentierungsverfahren

BAUMGARTNER definiert Segmentierung als „*die Unterteilung eines Bildes in sich nicht überlappende Regionen mit bestimmten einheitlichen Eigenschaften, deren Vereinigungsmenge die gesamte Bildregion umfasst*“ (BAUMGARTNER 2003, S. 15). JÄHNE (2002, S. 449 ff.) unterscheidet pixelorientierte, kantenbasierte, regionenorientierte und modellbasierte Segmentierung:

Die einfachste Methode sind **pixel-** oder **punktorientierte** Ansätze, bei denen jeder Bildpunkt einzeln einem Segment zugeordnet wird, u. a. indem man einen Schwellwert in der spektralen Signatur für die Entscheidung über die Zugehörigkeit setzt. Die Berechnung ist als einfache zu bezeichnen, allerdings können durch Grauwertübergänge in den Randbereichen der zu extrahierenden Objekte Probleme bei der exakten Größenbestimmung auftreten (vgl. JÄHNE 2002, S. 450 f.).

Kantenbasierte Verfahren suchen nach Übergängen und Kanten zwischen Objekten, indem lokale Maxima der Grauwertgradienten ermittelt und diese Maxima entlang der Objektgrenzen weiterverfolgt werden. Bei der Beurteilung von Ergebnissen eines kantenbasierten Verfahrens ist zu beachten, dass aufgrund der Gradientenbetrachtung die eigentliche Objektgrenze zwischen den Bildpunkten liegt (vgl. JÄHNE 2002, S. 453 f.). Eine verbreitete Variante ist die sog. Wasserscheidensegmentierung nach SOILLE, die auch von BUTENUTH in *SegmentationFields* verwendet wird (vgl. BUTENUTH 2004a, S. 1067). Die Bilddaten werden anhand der Topologie der Grauwerte zerlegt, indem diese als relative Höhenwerte interpretiert werden, wobei hohe Grauwerte ‚hohen Bereichen‘ und niedrige Grauwerte ‚tiefen Bereichen‘ entsprechen (siehe Abb. 2.3). Es entsteht ein dreidimensionales ‚Grauwertgebirge‘ in dem Wasserscheiden errechnet werden können: Bei einer virtuellen Flutung entstehen Wasserscheiden als Grade an den Stellen, an denen benachbarte, aus regionalen Grauwertminima entstehende Becken ineinander fließen (vgl. MVTEC SOFTWARE GMBH 2004, o. S.).

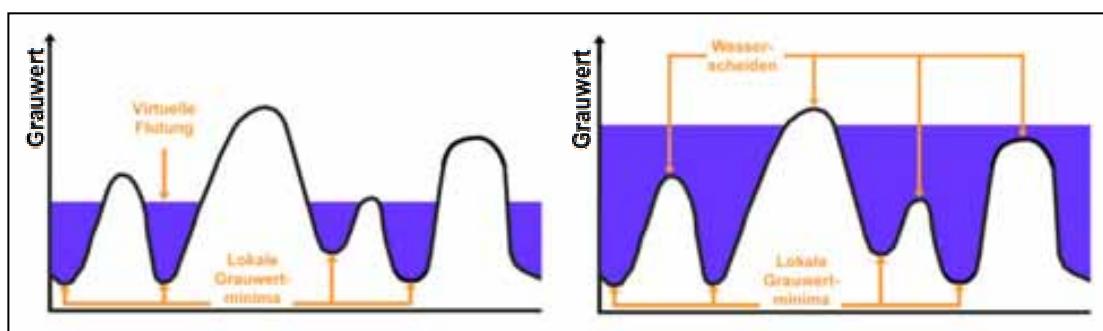


Abb. 2.3: Prinzip der Wasserscheidensegmentierung

Im Gegensatz zu punktorientierten Ansätzen, die jeden Bildpunkt isoliert prüfen, betrachten **regionenorientierte** Segmentierungsverfahren die Gesamtheit der Grauwertausprägungen und integrieren so die Nachbarpunkte eines Pixels in die Entscheidung über die Zugehörigkeit zu einem Segment (vgl. JÄHNE 2002, S. 455).

Weit verbreitet sind Regionenwachstums-Algorithmen (*region growing*), die auch in *eCognition* umgesetzt sind (siehe Kap. 4.2.2). Die Segmentierung startet in über das Bild verteilten Ursprungspixeln, denen bei ausreichender Ähnlichkeit Ihre Nachbarpixel-/segmente zugeordnet werden. In einem iterativen Prozess hält das Segmentwachstum an, bis ein zuvor definierten Endpunkt erreicht wird (vgl. BAATZ U. SCHÄPE 2000, S. 13).

Bei einer **modellbasierten** Segmentierung wird die bekannte Form eines Objektes als Modell für die Segmentierung zugrunde gelegt. Modellbasierte Verfahren sind in der Lage auch durch Rauschen unterbrochene Kanten zu identifizieren, jedoch ist der Rechenaufwand für derartige Methoden sehr hoch (vgl. JÄHNE 2002, S. 459 ff.). Auch *SegmentationFields* ist aufgrund der detaillierten Schlagmodellierung (siehe Kap. 2.3) als modellbasiertes Verfahren einzuordnen.

Im Gegensatz zur Segmentierung beinhaltet die Extraktion bestimmter Strukturen nicht die lückenlose Flächenerfassung, sondern eine Suche nach Merkmalen, die für weitere Bildverarbeitungsschritte interessant sind, so dass die Merkmalsextraktion eine Grundlage der Bildanalyse darstellt. Für die Extraktion von Flächen können u. a. die beschriebenen Operatoren ‚Schwellwertbildung‘, ‚Regionenwachstum‘ und ‚Texturanalyse‘ genutzt werden (vgl. BAUMGARTNER 2003, S. 15).

2.4.3 Schlagextraktionsverfahren

Mit der Anwendung ihrer Kombination aus einer Regionenwachstums-Methode und dem Einsatz von verformbaren Geometriemodellen (sog. Snakes) wandelt sich aus Sicht von TORRE und RADEVA (2000, S. 889 ff.) die Position des Anwenders von einem Digitalisierer zu einem Überwacher des Segmentierungsprozesses. Snakes sind elastische Kurven, die sich dynamisch der Kontur eines Bildobjektes anpassen, indem sie einem Algorithmus zur Energieminimierung folgen. Für diese Minimierung werden der aus dem Regionenwachstum hervorgegangenen Linie elastische Eigenschaften anmodelliert, in deren Ausmaßen sich die Linie z. B. bestimmten Grauwertminima innerhalb des Bildes annähern kann (vgl. BUTENUTH 2004a, S. 1068). TORRE und RADEVA beschreiben ein halbautomatisches Werkzeug, in dem der Benutzer manuell einen Startpunkt der Berechnung für eine erste Annäherung an die

Parameter der Region festlegt. Die Quote für die erfolgreiche Detektion von Schlaggrenzen wird mit 70 % angegeben, was die Erfassungszeit in Produktionsprozessen halbieren könnte (vgl. TORRE u. RADEVA 2000, S. 892 ff.).

Der Ansatz von TORRE und RADEVA stellt insbesondere durch die Nutzung der Snakes einen sinnvollen Weg zur Geometrieverbesserung von Segmentierungsergebnissen dar, deren Nutzung für *SegmentationFields* von BUTENUTH (2004a, S. 1068) beschrieben ist. Zwar geben TORRE und RADEVA (2000, S. 894) an, 70 % der Flächen erfolgreich zu erkennen, jedoch wird nicht beschrieben, mit welcher Methode gemessen und anhand welcher Referenzen diese Aussage getroffen wird. BUTENUTH (2004a, S. 1065) weist auf den zeit- und kostenintensiven Aspekt halbautomatischer Ansätze hin, da weiterhin ein Eingreifen des Nutzers in den Extraktionsprozess notwendig ist. Auch für *eCognition* und *SegmentationFields* müssen Voreinstellungen für das jeweilige Bildmaterial vorgenommen werden (siehe Kap. 4.2.5 u. 4.3.4), die Segmentierung selbst verläuft jedoch ohne einen Eingriff des Nutzers. Es wäre sicherlich möglich, auch die Ergebnisse von *eCognition* mit Snakes zu verbessern, dieser Vorgang wäre allerdings nur in einem externen Verarbeitungsschritt realisierbar, da *eCognition* 3.0 keine Schnittstelle für die Einbindung derartiger Prozeduren bereitstellt. Es stellt somit einen großen Vorteil von *SegmentationFields* dar, dass derartige Anpassungen und neue Methoden aufgrund der offenen Programmstruktur direkt in die Segmentierungsstrategie integriert werden können.

Durch die Betrachtung der lokalen Varianz der Spektralwerte landwirtschaftlicher Nutzflächen beurteilen APLIN und ATKINSON (2004, S. 141 ff.) die Wahrscheinlichkeit, ob innerhalb von durch Vorwissen definierten Regionen Schlaggrenzen fehlen. Hierfür wird eine vorausgehende Landbedeckungsklassifikation zur Hilfe genommen und der Anteil der am häufigsten vorkommenden Bedeckung an der Fläche der Region berechnet. APLIN und ATKINSON nehmen an, dass ein geringer Flächenanteil der häufigsten Landbedeckungsklasse an der Gesamtfläche einer Region (was die Existenz mehrerer Klassen vermuten lässt) und eine hohe lokale Spektralvarianz zu einer hohen Wahrscheinlichkeit für fehlende Grenzen führen.

Es ist hervorzuheben, dass es sich nicht um die Ermittlung fehlender Grenzen, sondern um ein Bewertungssystem für die Möglichkeit des Auftretens fehlender Grenzen handelt. Auf diesem Wege könnte innerhalb eines Produktionsprozesses eine manuelle Kontrolle auf die stärker gefährdeten Regionen beschränkt werden. Für die Genauigkeit der Methode geben APLIN und ATKINSON einen Wert von 60 % für Bilddaten mit einer Auflösung von 20 m sowie 81 % für Bilddaten mit einer 4,0 m-

Auflösung an. Die Beurteilung von Regionen bzgl. ihres Risikos einer unvollständigen Schlaggrenzdetektion nach APLIN und ATKINSON stellt einen Anstoß für die Entwicklung eines Expertensystems dar, das die potentielle Segmentierungsqualität beurteilt. Auf diesem Wege müsste eine Kontrolle oder manuelle Bearbeitung der Schlaggeometrien nur noch in fehlergefährdeten Regionen durchgeführt werden. In Kombination mit einer guten Erkennungsquote könnte bei einer entsprechenden wissensbasierten automatischen Qualitätsbewertung eine wesentliche Reduktion des Digitalisieraufwandes in den Arbeitsbereichen Erosionsberatung und InVeKoS darstellen.

Für die Detektion von landwirtschaftlichen Parzellen aus Color-Infrarot-Luftbildern setzt FOCKELMANN (2001, S. 1 f.) *eCognition* 2.0 ein. Die Segmentierungseinstellungen werden mit einem relativ hohen Scaleparameter (siehe Kap. 4.2.3) so gewählt, dass die Parzellen als einzelne Segmente extrahiert werden (siehe Abb. 2.4). Als weitere entscheidende Charakteristika werden die Farbwerte sowie die starke Kompaktheit der zu extrahierenden Flächen aufgrund der Gliederung der Kulturlandschaft genannt. Der Segmentierung folgt eine Landnutzungsklassifikation mit *eCognition*. FOCKELMANN beschreibt die durch den Vektorexport leicht geglätteten Ergebnisgeometrien im Vergleich zu vorliegenden Katasterdaten als zufriedenstellend, auch die Integration der Vektordaten in ein Agrar-GIS verlief erfolgreich.

Die Methode zur Extraktion von Schlaggrenzen von FOCKELMANN ähnelt der in der vorliegenden Arbeit genutzten Strategie, jedoch werden in der kurzen broschürenartigen Anwendungsbeschreibung der Software *eCognition* die genutzten Methoden zur Segmentierung und insbesondere zur Qualitätsbewertung nicht näher erläutert, so dass die Extraktion von Schlaggrenzen in der vorliegenden Arbeit aus diesen eher generellen Beschreibungen keine Impulse erhält.



Abb. 2.4: Extrahierte Schlaggeometrien
(Quelle: FOCKELMANN 2001, S.1)

In ihrer Arbeit an sehr hochauflösenden Quickbird-Bilddaten detektieren GERIGHAUSEN und MÖLLER (2004, S. 303 ff.) Ackerschlaggrenzen und die jeweilige Bodenbearbeitungsrichtung mit *eCognition*. Die Segmentierung und Klassifikation der Ackerschläge erfolgt anhand des Bodenbedeckungsgrades sowie anhand von Texturmerkmalen. Aus den Ergebnisgeometrien werden durch die Berechnung von Grauwertabhängigkeitsmatrizen Texturmerkmalsbilder erstellt, aus denen vier Bearbeitungsrichtungen abgeleitet und den extrahierten Schlagflächen zugeordnet werden können. GERIGHAUSEN und MÖLLER geben zwar eine Erfassung aller Schläge in Form und Größe an, weisen jedoch auf Schwierigkeiten bei der Grenzextraktion mit lückigem Bewuchs hin. Für die Klassifikation der Bearbeitungsrichtung wird eine Genauigkeit von 90 % angegeben. Die horizontale Ausrichtung führt zu sehr guten Ergebnissen, während Probleme bei der Einordnung von vertikalem und diagonalem Bearbeitungsverlauf beständen. In einem Fazit kritisieren die Autoren, dass die Einstellung der Segmentierungsparameter in *eCognition* mit einem „*Trial-&-Error-Prozess*“ (GERIGHAUSEN u. MÖLLER, 2004, S. 314) ermittelt werden müssten.

Die Detektion von Schlaggrenzen und Bodenbearbeitungsrichtung durch GERIGHAUSEN und MÖLLER kann als Anregung für eine Verbesserung der Segmentierungsergebnisse mit *eCognition* durch eine Klassifikation der Bilddaten (siehe Kap. 7.1 u. Anhang A) darstellen. Die Klassifikation anhand von Texturmerkmalen in *eCognition* ist grundsätzlich mit allen anderen Klassifikationsmerkmalen kombinierbar. Insbesondere die automatische Erkennung der Bearbeitungsrichtung stellt für die Erosionsberatung Kenntnisse über einen wichtigen Nutzungsfaktor für die Winderosion zur Verfügung (vgl. Abb. 2.1). Auch die mit der Software *Segmentation-Fields* genutzte Bildanalyse-Operatorenbibliothek HALCON (siehe Kap. 4.3.1) stellt einen Texturfilter (*texture_laws*) bereit (vgl. MVTEC SOFTWARE GMBH 2004, o. S.). Die qualitative Beurteilung der Grenzverläufe durch GERIGHAUSEN und MÖLLER erfolgt visuell und wird methodisch nicht genauer erläutert.

In seiner Diplomarbeit beschreibt PETER (2004) eine Klassifikationsmethode zur Schlagextraktion mit *eCognition* auf der Basis von Color-Luftbildern unter Verwendung von Feldblockgeometrien als Vorwissen. Nach der relativ feingegliederten Segmentierung setzt PETER die Klassifikationsmechanismen von *eCognition* ein, um spektral ähnliche Segmente zu einer gemeinsamen Klasse zusammenzuführen und die Geometrien insbesondere in den Randbereichen der Schläge zu optimieren. Durch eine visuelle Evaluation werden ca. 60 % der Schläge als richtig ermittelt angegeben. PETER weist auf Segmentierungsfehler bei einer hohen spektralen Ähnlichkeit benachbarter Schläge sowie auf Probleme bei spektral sehr heterogenen

Flächen (u. a. durch Bodenvariabilitäten) innerhalb eines Schläges hin und verweist für eine Optimierung der Ergebnisse auf die höhere Informationsdichte von Color-Infrarotbildern.

Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit nutzt PETER zur Schlagextraktion die Klassifikationswerkzeuge von *eCognition*. Mit Segmentierungsfehlern bei spektral sehr heterogenen Flächen innerhalb eines Schläges (Übersegmentierung, siehe Kap. 6.1.7) und bei hoher spektraler Ähnlichkeit benachbarter Schläge (Untersegmentierung, siehe Kap. 6.1.8) werden Fehlerursachen beschrieben, die auch bei den vorliegenden Segmentierungsstrategien mit *eCognition* und *SegmentationFields* auftreten. Im Gegensatz zur visuellen Evaluation von PETER quantifiziert und präzisiert die vorliegende Arbeit diese Ursachen mit der Aufstellung von Fehlerkategorien und der Berechnung eines objektiven Gesamtflächenfehlers, der in einen internen und einen externen Fehler differenziert wird.

Für die Aktualisierung von Flächengeometrien im Rahmen von InVeKoS untersuchen OESTERLE und HAHN (2004, S. 515 ff.) eine Klassifikation von Farbluftbildern auf verschiedenen Ebenen mit *eCognition*. Da kein Vorwissen verwendet wird, um nicht zu extrahierende Flächen zu maskieren, werden z. B. Straßen auf einer feinen und Waldgebiete auf einer groben Segmentierungsebene klassifiziert. Die Extraktion von landwirtschaftlichen Flächen geschieht zwischen den erwähnten Skaleniveaus. Die Klassifikation von Ackerland, Grünland, Wald, Gewässer und Infrastruktur führt zu einer Klassifikationsgenauigkeit von 89 %, jedoch ist die Anwendung in einem anderen Testgebiet nicht ohne Anpassungen der Segmentierungs- und Klassifikationsparameter möglich. OESTERLE und HAHN weisen außerdem auf den perspektivisch bedingten, zum Bildrand zunehmenden Neigungseffekt und seine Bedeutung im Grenzbereich zwischen landwirtschaftlichen Flächen und Waldgebieten hin (siehe Abb. 2.5). Durch den Neigungseffekt werden höher gelegene Bildpunkte (z. B. Dächer, Baumkronen) nach außen versetzt wiedergegeben (vgl. ALBERTZ 2001, S. 71 f.). Beim Neigungseffekt ist allerdings zu beachten, dass neben der perspektivischen Neigung auch das Überhängen der Baumkronen über die Bearbeitungsgrenze zu Abweichungen in der Flächengeometrie führt.



Abb. 2.5: Verschiebung durch den Neigungseffekt (Quelle: OESTERLE u. HAHN 2004, S.518, verändert)

Für eine als Ausblick in Kap. 7.1 diskutierte Klassifikation der Ergebnisgeometrien kann die Skaleneinteilung in verschiedene Niveaus durch OESTERLE und HAHN ver einzelte Anhaltspunkte für zu wählende Segmentierungsebenen geben, jedoch werden keine genaueren methodischen Details zur Segmentierung und Klassifikation genannt. Die Klassifikationsgenauigkeit wird mit 89 % angegeben, jedoch fehlt eine Aussage über die geometrische Qualität der Ergebnisflächen.

LEUKERT (2002, o. S.) beschreibt neben der Segmentierung von künstlichen Bildern und Einzelhäusern die Segmentierung von landwirtschaftlichen Flächen aus IKONOS-Bilddaten mit *eCognition*. Hierbei beschreibt sie Probleme bei der Übertragung von Segmentierungseinstellungen zwischen verschiedenen Bildausschnitten: Bei dem Versuch, Einstellungen aus einem Gebiet mit großen Schlagflächen in einen Bildausschnitt mit relativ kleinen Schlägen zu übertragen, treten Fehler bei der Abgrenzung der Flächen auf, so dass aufgrund der hohen Variabilität in der Erscheinung der Landschaft die Anpassung der Segmentierungsparameter dringend notwendig ist.

Auch LEUKERT beschreibt keine methodischen Details der Segmentierung, da die Extraktion von landwirtschaftlichen Flächen aus IKONOS-Bilddaten nur exemplarisch, als eine von verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von *eCognition* genannt wird, so dass für die Segmentierungsstrategie dieser Arbeit keine Anregungen zur Ergebnisverbesserung gewonnen werden können.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Diese Einführung in das Untersuchungsgebiet beschreibt die wesentlichen landschaftsökologischen Charakteristika der untersuchten Flächen und stellt einen Bezug zu Landnutzung und Erosionsgefährdung her. Anschließend werden die verwendeten Raster- und Vektordaten erläutert.

3.1 Geographische Lage und naturräumliche Gliederung

Das Untersuchungsgebiet hat eine Fläche von 25 km² und liegt unmittelbar auf der Grenze der Kreise Ammerland und Friesland im Weser-Ems-Gebiet, das im Westen von der niederländischen Grenze sowie im Osten von der Weser bzw. im Norden von der Nordsee sowie im Süden vom Teutoburger Wald begrenzt wird. Der Nordwesten des Gebietes gehört zur Gemeinde Bockhorn, der Südwesten zu Westerstede (Stadt), der Osten zu Wiefelstede und ein kleiner Bereich im Nordosten zu Varel (Stadt) (siehe Abb. 3.1).

Nach POTT (1999, S. 9) gliedert sich das nordwestdeutsche Tiefland in das Küstenland, die Geest, ausgedehnte Moore und das Mittelgebirgsvorland. Das Untersuchungsgebiet liegt im südlich an die Marschen angrenzenden Geestgürtel.



Abb. 3.1: Übersicht über das nördliche Niedersachsen mit der Lage des Untersuchungsgebietes (blauer Kasten), Ausschnitt aus der Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (Quelle: LANDESVERMESSUNG U. GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN, o. J., verändert)

Im Nordwesten liegt ein Teil des Bockhorner Moores (siehe Abb. 3.2), das 1986 als ca. 321 ha großes Naturschutzgebiet ausgewiesen wurde (vgl. LANDKREIS FRIESLAND o. J., S. 22 f.).

Das Bockhorner Moor ist ein ehemaliges Hochmoor und Teil eines früheren, große Teile der ostfriesischen Geest bedeckenden Hochmoorkomplexes (vgl. LANDKREIS FRIESLAND o. J., S. 17 f.). Der Torfabbau hat das Moor stark entwässert und zerkuhlt, inzwischen wurden aber Renaturierungsmaßnahmen in Form von Wiedervernässungen durchgeführt (vgl. LANDKREIS FRIESLAND 2001, S. 4).

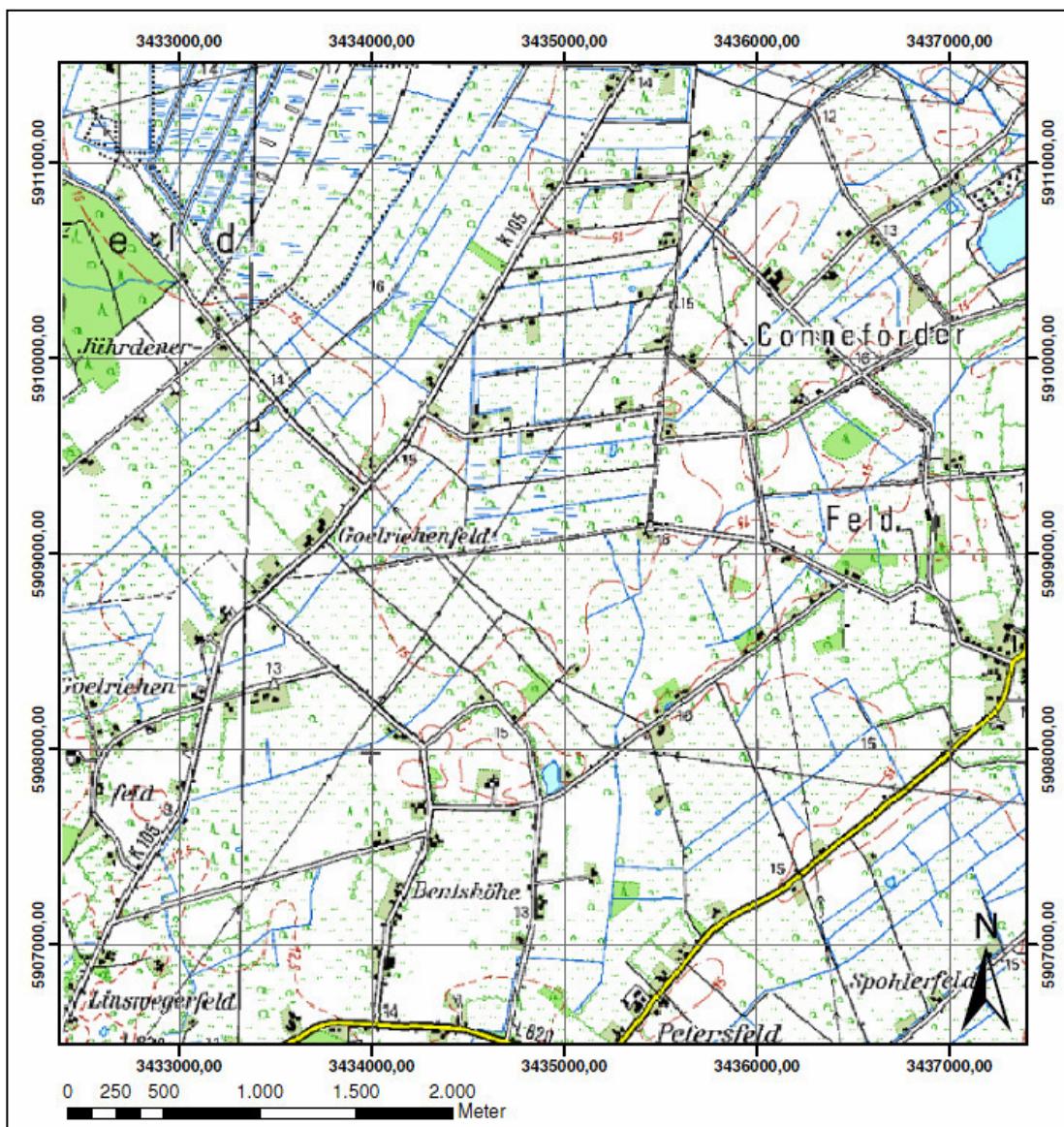


Abb. 3.2: Übersicht über das Untersuchungsgebiet, Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:50.000 (Quelle: LANDESVERMESSUNG U. GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN 1998 u. 1999, verändert)

3.2 Geologie und Böden

Das Weser-Ems-Gebiet ist durch Abtragung und anschließende Neuablagerung von Sedimenten durch Schmelzwässer glaziofluvial überformt. Von der dreifachen Vereisung Nordwestdeutschlands hat insbesondere die sog. Saalevereisung vor ca. 200.000 Jahren das Landschaftsbild der Geest mit Grund- bzw. Endmoränen, Sandern und Urstromtälern geprägt, indem skandinavische Gletscher dort glaziale Serien aufgeschüttet haben (vgl. POTT 1999, S. 10 f.).

Zu den wichtigsten Ablagerungen des Holozän zählen die fluviatilen Auenlehme sowie die Einschwemmung von Schluff, Ton, Sand und Kies in Seen (vgl. WALTER 1995, S. 141). Auch beginnt im „*frühen Atlantikum die großflächige topogene Vermoorung der Niederungen infolge hochstehenden Grundwassers und in gleichem Ausmaß auch die Bildung ombrogener Hochmoore*“ (WALTER 1995, S. 141).

Das Untersuchungsgebiet ist zu ca. einem Drittel von Hochmooren und Erdhochmooren aus Sphagnumtorfen geprägt, die das Gebiet zentral von Nordwesten nach Südosten durchziehen. Die Hochmoorböden werden großflächig von Gley-Podsolen über Flugsanden umrahmt, die ein weiteres Drittel des Untersuchungsgebietes abdecken. Im Nordosten des Gebietes finden sich Pseudogleye über Geschiebedecksanden. Im Nordosten treten Podsole über glaziofluvialen Ablagerungen auf, während die im südlichen Randbereich vereinzelt vorkommenden Gleye über fluviatilen Ablagerungen liegen (vgl. NLFB 1995).

Die Bodenart des oberen Horizontes bei den Pseudogleyen, Podsolen, Gleyen und Gley-Podsolen ist reiner Sand, während die Hochmoortorfe über lehmigem Sand und die Erdhochmoortorfe über reinem Sand liegen.

3.3 Klima

Nach der Klimaklassifikation von KÖPPEN-GEIGER liegt Niedersachsen in einem warmgemäßigten Regenklima (Klimagürtel = C), in dem der kälteste Monatsmittelwert der bodennahen Lufttemperatur zwischen -3 °C und 18 °C liegt. Diese Einteilung kann genauer als feuchtgemäßigtes Klima (Klimagebiet = Cf) im Westwindgürtel der Nordhalbkugel beschrieben werden (vgl. SCHÖNWIESE, S. 263 ff.). Charakteristisch sind der rhythmische Wechsel von vier ausgeprägten Jahreszeiten, die vorherrschenden Westwinde und häufig durchziehende Tiefdruckgebiete.

Die unmittelbare Nähe zur Nordsee und damit zum Atlantik führt Niedersachsen ständig ozeanische Luftmassen zu, die zu Niederschlägen zu allen Jahreszeiten führen (vgl. SEEDORF u. MEYER 1992, S. 215).

Das Klima Nordwestdeutschlands wird von seiner Breitenlage und den ozeanischen Einwirkungen bestimmt (vgl. POTT 1999, S. 58). Es ist gekennzeichnet durch ausgeglichene Temperaturverläufe und milde Winter, deren Durchschnittstemperaturen im Januar über 0 °C und im Juli bis zu 18 °C betragen. Die hohen gleichmäßig verteilten Niederschlagsraten von über 700 mm im Jahr sind u. a. wichtige Voraussetzungen für Hochmoorbildungsprozesse (vgl. POTT 1999, S. 26). Die Untersuchungsflächen liegen in einem Gebiet mit einem Jahresmittel der Windgeschwindigkeit von 4 bis 5,9 m/s (vgl. NLÖ 2003, S. 20). Als Vergleich zum Untersuchungsgebiet wird in Abbildung 3.3 mit dem Klimadiagramm Bremens eine Station von geographisch ähnlicher Lage und vergleichbaren klimatischen Kennwerten dargestellt.

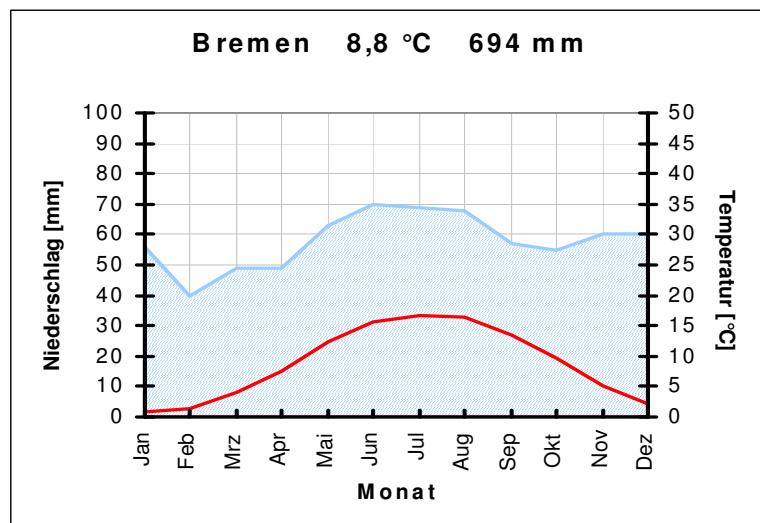


Abb. 3.3: Klimadiagramm Bremen, Monatsmittel (1961-1990) der Temperatur (rot) und der Niederschlagshöhe (blau) (Datengrundlage: DEUTSCHER WETTERDIENST 2005)

3.4 Landnutzung

Die Fläche des Bundeslandes Niedersachsen unterliegt zu fast 60 % landwirtschaftlicher Nutzung (vgl. SEEDORF u. MEYER 1992, S. 442), wobei 35 % der Landesfläche ackerwirtschaftlich und 22 % grünlandwirtschaftlich genutzt werden (vgl. ebd., S. 21), womit fast ein Sechstel der bundesdeutschen Agrarflächen in Niedersachsen liegen. Auch in dünnbesiedelten Gebieten findet man eine hochentwickelte Landwirtschaft. Aufgrund der baumlosen Marschen und der geringen Verbreitung ungenutzter Sandflächen liegt die Grünlandnutzung in Niedersachsen um 5 % höher als im Bundesdurchschnitt (vgl. ebd., S. 20 f.).

Diese Stellung der Landwirtschaft in Niedersachsen führt dazu, dass Themen und Planungen aus dem Agrarsektor wie die vom NLfB angestrebte schlaggenaue Erosionsberatung von Bedeutung für das gesamte Bundesland sind.

Im Gegensatz zum Landesdurchschnitt ist die landwirtschaftliche Nutzung der Gemeinden des Untersuchungsgebietes von Grünlandwirtschaft geprägt. So sind ca. 75 % der landwirtschaftlichen Flächen in den Gemeinden Bockhorn und Varel (Stadt) mit der Kulturart Dauergrünland bewirtschaftet (vgl. NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK 2003, S. 107). In der Gemeinde Wiefelstede findet man auf etwas mehr als der Hälfte der Flächen Dauergrünland (55 %), während in der Gemeinde Westerstede 62 % der Agrarflächen die Kulturart Dauergrünland aufweisen (vgl. ebd., S. 95).

Eine entsprechende Verteilung findet sich auch im Untersuchungsgebiet wieder: Die vorwiegende landwirtschaftliche Nutzung ist die Grünlandwirtschaft, in geringerem Maße wird Ackerwirtschaft betrieben. Im Nordwesten liegen die Moorflächen des Naturschutzgebietes Bockhorner Moor, an die im Südwesten kleinere Mischwaldflächen angrenzen.

3.5 Winderosionsgefährdung

Für das Untersuchungsgebiet ist insbesondere die Winderosion von Bedeutung, da für die Wassererosion im Untersuchungsgebiet keine ausreichende Hangneigung vorliegt. Anhand der Betrachtung der Gemeinden Niedersachsens nach ihrem Anteil erosionsfördernder Früchte, wobei insbesondere Sommer- und Hackfrüchte hervzuheben sind, lassen sich Gefährdungsschwerpunkte für die Winderosion lokalisieren (vgl. NLÖ 2003, S. 23 f.): Das Untersuchungsgebiet liegt auf der Grenze von drei Gemeinden, die einen Anteil von 50 % bis 70 % erosionsfördernder Früchte an den landwirtschaftlichen Ackerflächen aufweisen (siehe Abb. 3.4).

Sehr sandige Äcker gelten als besonders erosionsanfällig, insbesondere die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Hochmooräcker sind von Bodenabtragungen durch Wind stark betroffen (vgl. SEEDORF u. MEYER 1992, S. 444). Da bis auf die Hochmoortorfe alle oberen Horizonte der vorkommenden Bodentypen aus Reinsand bestehen, ist je nach Anteil der organischen Substanz des Oberbodens eine sehr hohe Erodierbarkeit der Böden gegeben. Nur bei Mittel- und Grobsanden mit einem Gehalt an organischer Substanz zwischen 1 % bis 15% ist die Erodierbarkeit mit einer Abstufung um einen Schritt als lediglich ‚hoch‘ anzusehen (vgl. NLÖ 2003, S. 18).

Betrachtet man die Erodierbarkeit der Böden in Abhängigkeit von den bereits in Kapitel 3.3 erwähnten sehr hohen Windgeschwindigkeiten zwischen 4,0 m/s und 5,9 m/s, so wird die Einstufung der Böden als ‚sehr hoch erodierbar‘ bestätigt.

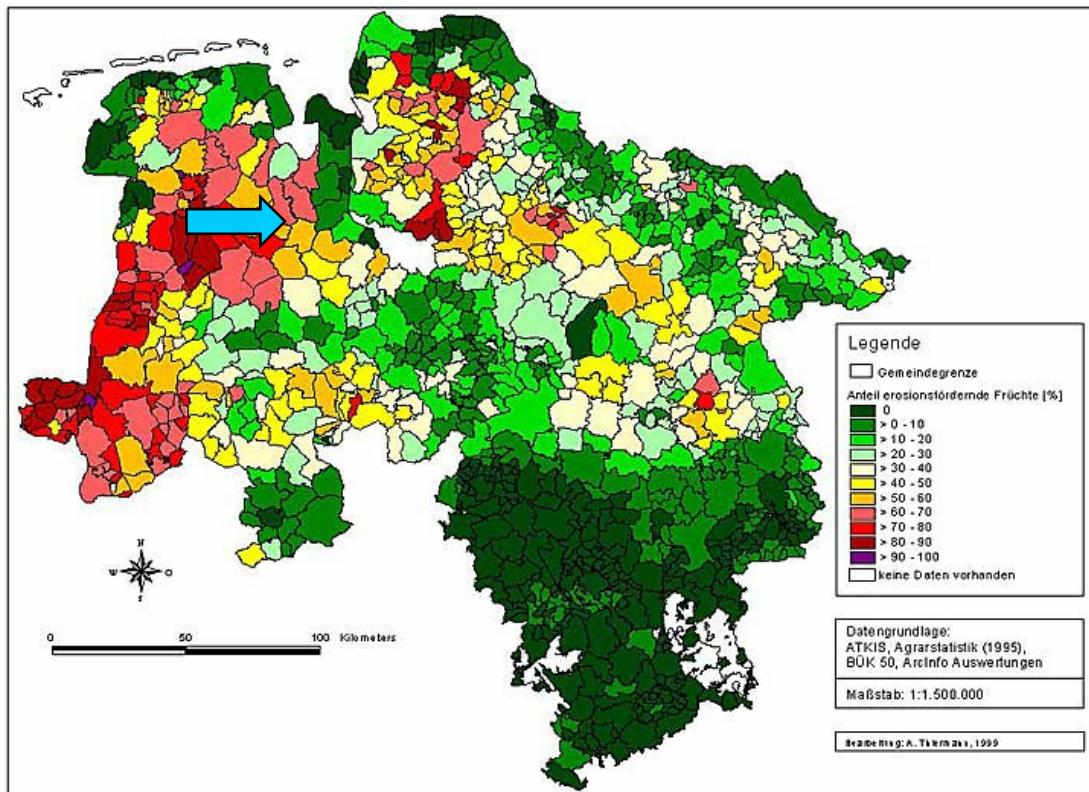


Abb. 3.4: Winderosionsgefährdung auf Gemeindeebene, Anteil erosionsfördernder Früchte [in %] (Lage des Untersuchungsgebietes: blauer Pfeil) (Quelle: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 2005b, o. S., verändert)

3.6 Datengrundlagen

3.6.1 Rasterdaten

Für die vorliegende Diplomarbeit wurden von der Firma EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH georeferenzierte IKONOS-Satellitenbilddaten (Aufnahmedatum: 15. Juli 2004) aus der InVeKoS-Kampagne 2004 zur Verfügung gestellt (siehe Tab. 3.1), für die bereits durch ein Resolution-Merge-Verfahren der Software Erdas Imagine 8.7 (Methode: Principal Component, Resampling: Cubic Convolution; vgl. LEICA GEOSYSTEMS 2003, S. 162 f.) der sehr hochauflösende panchromatische Kanal (1,0 m / Pixel) mit den geringer aufgelösten Multispektralkanälen (4,0 m / Pixel) zusammengeführt worden ist, so dass für das Untersuchungsgebiet ein Multispektralbild mit 1,0 m geometrischer Auflösung zur Verfügung steht.

Auch die Farbtiefe der Bilddaten ist bereits von 11 bit auf 8 bit reduziert, um mit der Verringerung der Bildgröße von ca. 150 MB auf ca. 75 MB Rechenzeiten zu verkürzen (vgl. ALBERTZ 2001, S. 96).

Tab. 3.1: IKONOS-Spektralkanäle (SPACE IMAGING 2004, S. 7)

Scanner	Kanal	geometrische Auflösung	Spektralbereich
Panchromatisch	Pan	1,0 m / Pixel	526 – 929 nm
Multispektral	1 (Blau)	4,0 m / Pixel	445 – 516 nm
	2 (Grün)	4,0 m / Pixel	506 – 595 nm
	3 (Rot)	4,0 m / Pixel	632 – 698 nm
	4 (Nahe Infrarot)	4,0 m / Pixel	757 – 853 nm

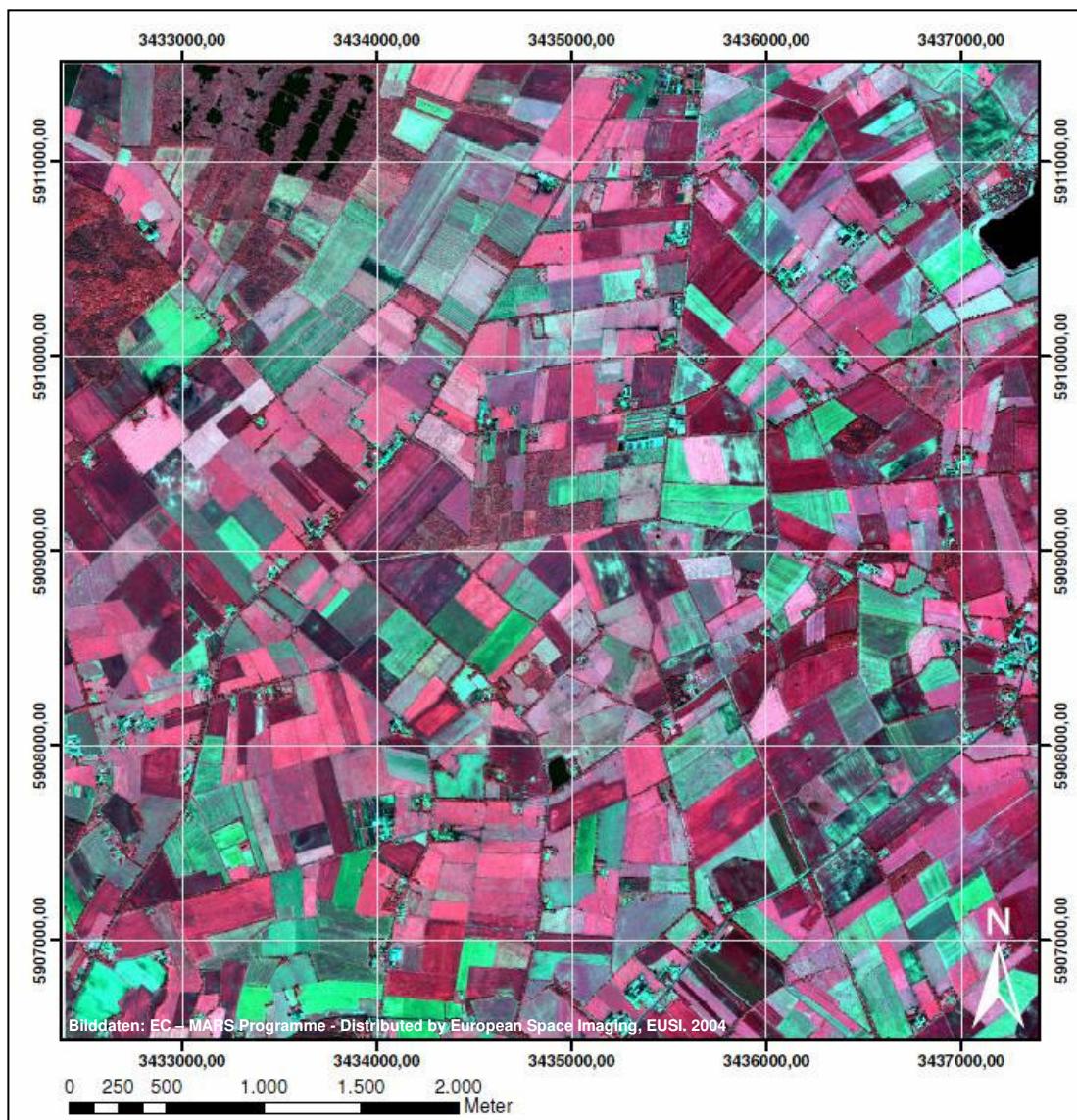


Abb. 3.5: Übersicht über das Untersuchungsgebiet, IKONOS-Bilddaten, (Kanalkombination: Grün, Rot, Nahe Infrarot) (EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

Neben den IKONOS-Bilddaten stehen aus der InVeKoS-Kampagne 2004 weitere georeferenzierte Satellitenbilddaten mit einer aneinander angepassten geringeren geometrischen Auflösung von jeweils 20 m pro Pixel zur Verfügung. Eine genaue Auflistung der zusätzlichen Bilddaten befindet sich in Tab. 3.3.

Tab. 3.2: Zusätzliche Satellitenbilddaten (STEIN 2004, S. 28 ff.)

Satellitensystem	Auflösung	Aufnahmedatum
SPOT-XI	20m / Pixel	27.10.2003
SPOT-XS	20m / Pixel	17.05.2004
IRS-LISS3	20m / Pixel	29.05.2004

3.6.2 Vektordaten

Das Amt für Agrarstruktur in Hannover hat für die vorliegende Arbeit die offiziellen Feldblockdaten für Niedersachsen bereit gestellt. Ein Feldblock ist eine von relativ feststehenden Grenzen (Strassen, Hecken, Gewässer, etc.) umschlossene Fläche unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung (vgl. FRANZ ET AL. 2004, S. 3). Die Feldblöcke können nicht zum Feldblock gehörige Inselflächen (Hecken, Strommasten, etc.) enthalten, die in einem separaten Vektordatensatz aufgeführt werden. Die Feldblockdaten werden i. d. R. anhand von Luftbildern manuell erfasst.



Abb. 3.6.: Feldblockgrenzen (gelbe Linie, Ausschnitt) (LAND NIEDERSACHSEN 2004)

Um die Feldblockdaten als Vorinformation für die Segmentierung mit *eCognition* zu nutzen (siehe Kap. 4.2.4), werden die Feldblöcke mit den Feldblockinseln verschneitten, um einen gemeinsamen Vektordatensatz zu erhalten. In *Segmentation-Fields* werden nicht die Inselflächen sondern nur die Feldblockgrenzen in die Segmentierung einbezogen (siehe Kap. 4.3.2). 556 Feldblöcke überschneiden sich mit dem Untersuchungsgebiet und werden somit als Vorwissen in die Segmentierung integriert.

4 FEHLERDEFINITION UND EXTRAKTIONSMETHODEN

Im folgenden Kapitel werden ein Gesamtflächenfehler sowie Fehlerkategorien zur genauen Untersuchung der Fehlerursachen definiert und die Segmentierungsmethoden der verwendeten Programme *eCognition* 3.0 und *SegmentationFields* sowie die jeweils verwendete Extraktionsstrategie dargestellt. Des weiteren werden Tests zur Optimierung der Parametereinstellungen im Rahmen einer empirischen Systematik für die Berechnung der Gesamtszene erläutert.

4.1 Fehlerdefinition und -berechnung

Bis auf die Arbeit von APLIN und ATKINSON (2004), die explizit einen Ansatz zur Qualitätsbewertung darstellt, enthalten die in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Arbeiten keine Darstellung der zur Qualitätsbewertung der Ergebnisse genutzten Methoden. Unabhängig von der Thematik der Schlagextraktion beschreiben MEINEL und NEUBERT (2004) einen Ansatz für einen direkten Vergleich und eine qualitative Bewertung von Segmentierungsprogrammen. Aufbauend auf den Beschreibungs- und Bewertungskriterien von MEINEL und NEUBERT (2004) wird in der vorliegenden Arbeit ein weiterführendes Fehlerkriterium entwickelt, dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse für großflächige Analysen sehr hochauflösender Satellitenbilddaten durch Segmentierungsalgorithmen ermöglicht.

In ihrem Vergleich verschiedener Segmentierungsprogramme evaluieren MEINEL und NEUBERT die Segmentierungsergebnisse anhand der durchschnittlichen Abweichung von Fläche, Umfang- und Flächen-Umfangs-Verhältnis (Shape-Index) manuell abgegrenzter Referenzdaten sowie anhand der Anzahl der Teilsegmente. Der aus der Landschaftsökologie stammende Shape-Index **SI**, der als der Quotient des Umfanges **U** und der 4-fachen Wurzel der Fläche **A** definiert wird, beschreibt Form und Komplexität der Segmente (vgl. MEINEL u. NEUBERT 2004, S. 1099):

$$\mathbf{SI} = \frac{\mathbf{U}}{4 \cdot \sqrt{\mathbf{A}}}$$

Vergleicht man den Shapeindex **SI** verschiedener Objekte, so weist ein höherer Wert auf komplexere Objekte hin, da diese i. d. R. einen höheren Umfang als einfache Geometrien haben. Zusätzlich wird von MEINEL und NEUBERT eine visuelle Bewertung der Ergebnisgeometrien anhand der Einstufungen ‚gut‘, ‚mittel‘ und ‚schlecht‘ durchgeführt.

Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit, die mit 969 (Erosion) bzw. 1416 Referenzflächen (InVeKoS) einen wesentlich größer angelegten, flächendeckenden Ansatz verfolgt, werden von MEINEL und NEUBERT nur 20 Referenzen betrachtet, die jeweils charakteristisch für bestimmte Flächenmerkmale (z. B. Lage, Form, Nutzung, Kontrast, Textur) sind (vgl. MEINEL u. NEUBERT 2004, S. 1099 ff.).

Die Beurteilung der Ergebnisgeometrie in der vorliegenden Arbeit orientiert sich durch die Beschreibung der Abweichung von Fläche, Umfang und Shape-Index an der Qualitätsmessung von MEINEL und NEUBERT. Deren Beschreibung der Segmentierungsergebnisse wird in der vorliegenden Arbeit ein objektives Fehlermaß hinzugefügt, das die Erfassung der Gesamtszene und die teilautomatisierte Berechnung eines Gesamtflächenfehlers ermöglicht.

Dieser Gesamtflächenfehler ist aus Sicht der Referenzdaten durch die Summe eines internen und eines externen Fehlers realisiert (siehe Kap. 4.1.2). Die Berechnung des Gesamtflächenfehlers erfolgt durch die Verschneidung der Ergebnis- und der Referenzgeometrien in einem GIS und anschließenden Abfragen in einer Datenbank, die zu den in Kapitel 4.1.2 definierten Teil- und Fehlerflächen führen. Für die Fehlerbeschreibung und eine qualitative Aussage über Art und Ursache der Fehler werden außerdem nominale Fehlerkategorien gebildet (siehe Kap. 4.1.4) und ein aus den InVeKoS-Kontrollen entliehenes Toleranzmaß für die Flächengenauigkeit angewendet (siehe Kap. 4.1.5).

4.1.1 Referenzdaten

Für die Berechnung eines Gesamtflächenfehlers der Segmentierungsergebnisse wurden zwei verschiedene Referenzdatensätze digitalisiert. Die Referenzen decken die Feldblockflächen (Kap. 3.6.1) komplett ab und sind in Schlag- und Abzugsflächen differenzierbar. Die genaue Definition eines Schlages findet sich in Kapitel 2.3. Abzugsflächen (Hecken, Vernässungen, etc.) sind Bereiche, die aus Sicht der jeweiligen thematischen Einordnung (Erosion und InVeKoS) keine landwirtschaftlich genutzten Flächen darstellen und somit gesondert abgegrenzt werden.

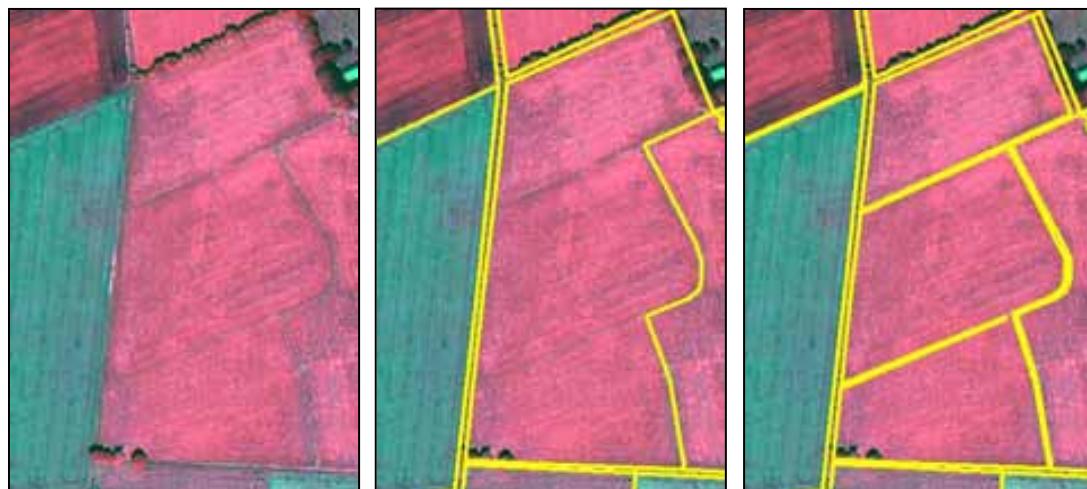
Die Referenzflächen für die Erosionsberatung (siehe Tab. 4.1) wurden auf Grundlage der IKONOS-Bilddaten anhand der im Rahmen des Teilprojektes Geotechnologien intern anvisierten Genauigkeit erfasst, die sich an der 3,0 m betragenden Genauigkeit von Objekten des ATKIS Basis-DLM (Digitales Landschaftsmodell) orientiert (vgl. LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN 2005, o. S.).

Die Referenzflächen für InVeKoS (siehe Tab.4.1) wurden anhand der IKONOS-Bilder mit dem für InVeKoS festgelegten Toleranzwert für sehr hochauflösende Satellitenbilder von 1,5 m erfasst (vgl. EFTAS 2004, S. 26). Die InVeKoS-Referenz ermöglicht eine Bewertung der Segmentierungsergebnisse bzgl. der Erfassungsgenauigkeit, die für die Anwendung bei den Subventionskontrollen per Fernerkundung notwendig ist.

Tab. 4.1: Rahmendaten der Referenzgeometrien

Referenz	Erfassungs-genaugkeit	Flächenzahl (gesamt)	davon Schlagflächen	davon Abzugsflächen	Fläche [ha]
Erosion	3,0 m	969	917	52	2010,48
InVeKoS	1,5 m	1416	977	439	2010,16

Aufgrund der höheren Erfassungsgenauigkeit ist die Zahl der Schlagflächen in der InVeKoS-Referenz höher als in der Erosionsreferenz, da mehr trennende Objekte (z. B. Gräben) digitalisiert werden (siehe Abb. 4.1). Auch liegen aufgrund der genaueren Abgrenzungskriterien bei der InVeKoS-Referenz deutlich mehr Abzugsflächen vor. Da die Flächen beider Referenzdatensätze die Feldblockzonen vollständig ausfüllen sollte, muss die auftretende, sehr geringe Differenz von 0,32 ha zwischen den Flächenkategorien Erosion und InVeKoS auf Abweichungen bei der Digitalisierung zurückgeführt werden.



a) IKONOS-Bilddaten

b) Referenzdaten:
Erosionsberatung

c) Referenzdaten:
InVeKoS-Kontrollen

Abb. 4.1: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Schlagabgrenzung in den Referenzdaten aufgrund der unterschiedlichen Genauigkeitsanforderungen der Erosionsberatung (b) und der InVeKoS-Kontrollen (c)

4.1.2 Definition eines Gesamtflächenfehlers F_G

Ein objektives Fehlermaß muss sowohl die fehlerhafte Fläche innerhalb als auch den bei fehlenden Grenzen oder Ungenauigkeiten auftretenden Fehler außerhalb der jeweiligen Referenzobjekte beschreiben. Aus diesem Grunde summieren sich die im folgenden beschriebenen internen und externen Fehlerdefinitionen zu einem Gesamtflächenfehler. Für die Berechnung des Gesamtflächenfehlers wird mit dem Modellierungstool ModelBuilder 9.0 aus ArcMap 9.0 eine mehrstufige halbautomatische Berechnungsprozedur realisiert:

- Hinzufügen von Attributfeldern zu den Attributtabellen der Ergebnisdatensätze
- Intersect (Verschneidung) der Ergebnisgeometrien mit einem Referenzdatensatz (Erosion oder InVeKoS)
- Berechnung von Fläche A und Umfang U der Intersect-Teilstücke
- Berechnung des Verhältnisses der Fläche der Intersect-Teilstückfläche A_{Int} zur Fläche des zugehörigen Referenzobjektes A_{Ref} :

$$\frac{A_{Int}}{A_{Ref}}$$

Anschließend wird anhand dieses Wertes mit einer Datenbankabfrage mit Microsoft Access 2000 für jedes Referenzobjekt die Teilfläche T_{Max} (siehe Abb. 4.2) ermittelt, die den größten Anteil an der Referenzfläche A_{Ref} aufweist. Für die weiteren Fehlerwertermittlungen wird diese Fläche jeweils als größte intern richtig erkannte Teilfläche der Referenz definiert.

Anhand einer auf alle T_{Max} -Flächen eingeschränkten Abfrage werden im nächsten Schritt die Flächen des internen Fehlers F_I und des externen Fehler F_E berechnet und zur Fläche der Referenz A_{Ref} in Verhältnis gesetzt.

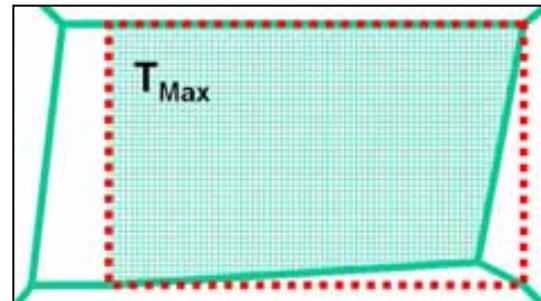


Abb. 4.2: Die größte interne Teilfläche T_{Max} (grün gerastert) nach der Verschneidung von Referenz- (A_{Ref} , rot-gepunktet) und Ergebnisgeometrie (grün)

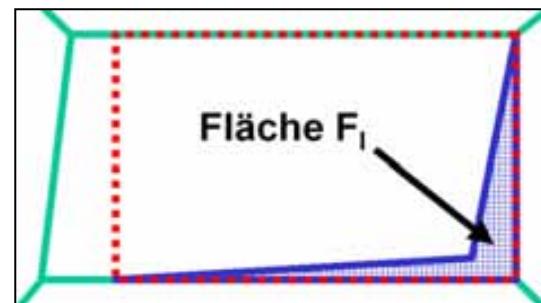


Abb. 4.3: Fläche des internen Fehlers F_I (blau gerastert)

Der **interne Fehler F_I** (siehe Abb. 4.3) wird definiert als die Differenz der Referenzfläche A_{Ref} und der maximalen Teilfläche T_{Max} :

$$\text{Formel 4.1: } F_I = \frac{A_{Ref} - T_{Max}}{A_{Ref}}$$

Der **externe Fehler F_E** (siehe Abb. 4.4) wird definiert als der außerhalb der Referenzfläche liegende Teil der Ergebnisfläche A_{Erg} , der T_{Max} zugehörig ist (siehe Abb. 4.5), im Verhältnis zur Referenzfläche A_{Ref} :

$$\text{Formel 4.2: } F_E = \frac{A_{Erg} - T_{Max}}{A_{Ref}}$$

Der **Gesamtflächenfehler F_G** ergibt sich aus der Summe des internen und des externen Fehlers:

$$\text{Formel 4.3: } F_G = F_I + F_E$$

Bei Betrachtung des Gesamtflächenfehlers F_G ist zu beachten, dass eine Addition der Werte von F_I und F_E zu F_G nur mit dem Mittelwert möglich ist, da der Median entsprechende arithmetische Rechenschritte nicht erlaubt, z. B. betragen die Mittelwerte von Eco2 für die Schlagerkennung (Erosion): $5,73\% (F_I) + 112,21\% (F_E) = 117,94\% (F_G)$, für den Median von Eco2 dagegen gilt: $2,10 (F_I) + 2,10 (F_E) \neq 6,93 (F_G)$ (siehe Tab. 5.1).

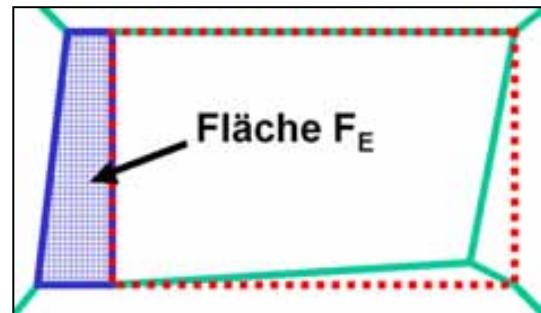


Abb. 4.4: Fläche des externen Fehlers F_E (blau gerastert)

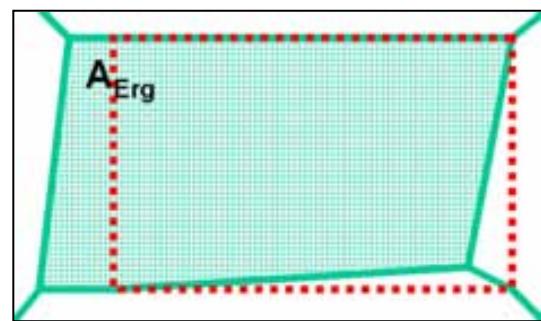


Abb. 4.5: Ergebnisfläche A_{Erg} , der T_{Max} zugehörig ist

4.1.3 Vergleich von statistischen Maßzahlen zur Beschreibung des Gesamtflächenfehlers F_G

Für die objektive Beschreibung und den Vergleich der Segmentierungsergebnisse benötigt man eindeutige statistische Maßzahlen, die charakteristische Eigenschaften der Ergebnisse darstellen (KÖHLER ET AL. 1996, S. 28 ff.). In Abbildung 4.6 sind Ergebnisse der Suche nach optimalen Parametereinstellungen für die Extraktion von Schlaggrenzen mit *eCognition* dargestellt (siehe Kap. 4.2.5).

Bei einer Betrachtung der Geometrien erkennt man, dass bei dem Ergebnis mit dem geringsten arithmetischen Mittel des Gesamtflächenfehlers F_G für die Gesamterkennung (Abzugs- und Schlagflächen) (Abb. 4.6b) eine sehr starke Übersegmentierung auftritt. Das arithmetische Mittel ist für einzelne sehr hohe Werte am Rand einer Verteilung hochempfindlich (vgl. KÖHLER ET AL. 1996, S. 42). Einzelne sehr hohe Gesamtflächenfehlerwerte treten u. a. aufgrund von kleinen nicht erkannten Abzugsflächen in großen Schlagflächen auf (siehe Abb. 6.1). Das arithmetische Mittel besitzt somit aufgrund seiner Anfälligkeit bzgl. einzelner Extremwerte nur eine geringe Aussagekraft bzgl. des Gesamtflächenfehlers F_G .

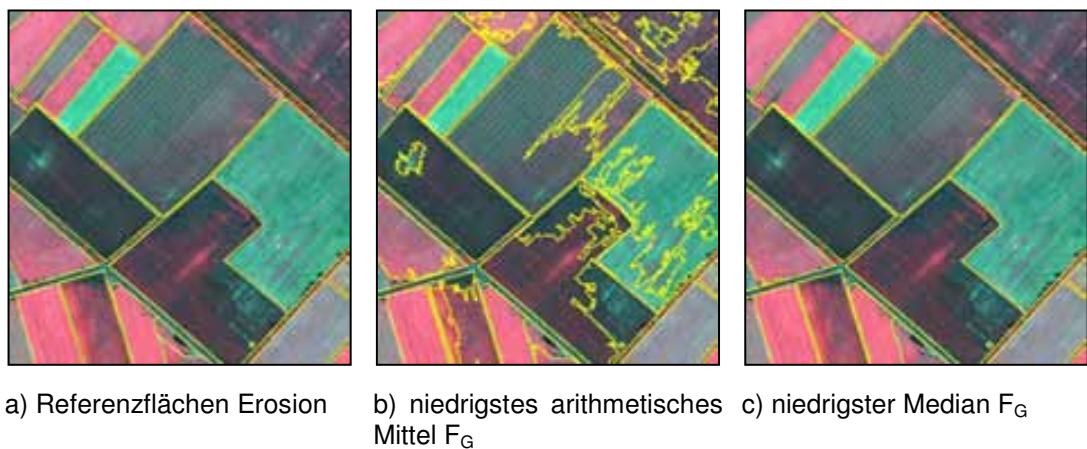


Abb. 4.6: Gegenüberstellung von Referenzflächen und Segmentierungsergebnissen (*eCognition*) mit dem geringsten arithmetischen Mittel bzw. dem Median von F_G

Die Ergebnisflächen mit dem geringsten Median des Gesamtflächenfehlers F_G (siehe Abb. 4.6c) zeigen hingegen Geometrien, die sich deutlich besser an den Referenzflächen (siehe Abb. 4.6a) orientieren. Das Auftreten von extrem hohen Einzelwerten spielt für den Wert des Medians kaum eine Rolle (vgl. KÖHLER ET AL. 1996, S. 42 f.).

Aufgrund dieser Feststellungen wird bei der Betrachtung der Ergebnisse jeweils der Median als zentraler Vergleichswert für die verschiedenen Kategorien herangezogen. Für eine bessere Lesbarkeit wird nachfolgend das Satzkonstrukt „der Median des Gesamtflächenfehlers“ i. d. R. durch die Bezeichnung „Gesamtflächenfehler (Median)“ ersetzt.

4.1.4 Aufstellen von Fehlerkategorien

Um neben der quantitativen Erfassung eines Fehlerwertes auch eine qualitative Aussage über die Art der Fehler und ihre Ursache zu treffen, werden nominale Fehlerkategorien gebildet. Im Gegensatz zum objektiven Gesamtflächenfehler F_G ist zu beachten, dass die erfassten Häufigkeiten für die bewerteten Ergebnisse, trotz einer klaren Fehlerdefinition, eine manuelle und interpretatorische Einordnung in die jeweiligen Kategorien darstellen.

Es wird jeweils die mit *eCognition* bzw. *SegmentationFields* erstellte Gesamtsszene mit dem geringsten Gesamtflächenfehler F_G (Median) der Schlagerkennung (Erosion) ausgewählt (Eco3 und Sgf2, siehe Kap. 5.2.1). Anschließend werden die Referenzflächen (Erosion und InVeKoS) mit jeder der beiden Ergebnisgeometrien verglichen.

Für die Auszählung der Fehlerkategorien wurden alle Referenzflächen evaluiert, da eine Stichprobe aus einer Grundgesamtheit von nur 1.000 Fällen keine ausreichende Aussagekraft bzgl. der Charakteristika einer Stichprobe hätte (THOMSEN 2005, mdl.). Typische Bildbeispiele zu den jeweiligen Fehlerkategorien, die im folgenden kurz erläutert werden, finden sich in der qualitativen und methodischen Diskussion in Kapitel 6.

- Die Kategorie ‚Fehler in der Fläche (Übersegmentierung)‘ beschreibt falsche Grenzen, die innerhalb des Schlages auftreten (siehe Kap. 6.1.7).
- ‚Fehler im Randbereich‘ repräsentiert Fehler und Übersegmentierungen im Bereich der Schlaggrenzen (siehe Kap. 6.1.4).
- Unter ‚Ungenauer Grenzbereich‘ werden Fälle gefasst, in denen eine vorhandene Grenze stark von ihrem eigentlichen Verlauf abweicht (siehe Kap. 6.1.6).
- Die Kategorie ‚Fehlendes Grenzteilstück / fehlende Grenze‘ wird in den Fällen vergeben, in denen aufgrund von Untersegmentierungen Teile der Schlaggrenze nicht erfasst wurden (siehe Kap. 6.1.8).
- Unter ‚Nicht bearbeitet‘ fallen Schlagflächen, die komplett nicht segmentiert wurden.
- In der Kategorie ‚Fehlerfrei‘ liegen Flächen, die richtig erkannt und somit in keine der anderen Kategorien eingeordnet wurden.

4.1.5 InVeKoS-Schlagtoleranz

Bei der Kontrolle der Antragsflächen im Rahmen der InVeKoS-Bearbeitung gilt für die Richtigkeit der beantragten Flächengröße ein sog. Schlagtoleranzwert (vgl. VERORDNUNG (EG) Nr. 796/2004, Art. 30, Abs. 1). Die Schlagtoleranz **ST** [in ha] berechnet sich aus dem 1,5-fachen Umfang **U_{Kontrolle}** [in m] der bei der Kontrolle gemessenen Fläche **A_{Kontrolle}**:

$$\text{Formel 4.4:} \quad ST = \frac{1,5 \cdot U_{\text{Kontrolle}}}{10.000}$$

Weicht die vom Landwirt beantragte Fläche **A_{Antrag}** um mehr als den für die Schlagtoleranz ermittelten Wert von der Kontrollmessung **A_{Kontrolle}** ab, so gilt diese Fläche als nicht korrekt beantragt. Für die Einordnung als Antragsfehler gilt somit folgende Bedingung:

$$\text{Formel 4.5:} \quad |(A_{\text{Antrag}} - A_{\text{Kontrolle}})| > ST$$

Überträgt man diesen Toleranzwert als Qualitätskriterium auf die in dieser Arbeit genutzten Segmentierungsmethoden, so ergibt sich aus Sicht der InVeKoS-Referenz folgende Formel, die den Umfang der Referenzfläche **U_{Ref}** berücksichtigt:

$$\text{Formel 4.6:} \quad ST = \frac{1,5 \cdot U_{\text{Ref}}}{10.000}$$

Um die Abweichung von ST als Qualitätskriterium zu nutzen, wird die Abweichung der Differenz der Ergebnisfläche **A_{Erg}**, der **T_{Max}** zugehörig ist (siehe Kap. 4.1.2) für die Antragsfläche und die zugehörige InVeKoS-Referenzfläche **A_{Ref}** für die Kontrollfläche eingesetzt:

$$\text{Formel 4.7:} \quad |(A_{\text{Erg}} - A_{\text{Ref}})| > ST$$

In Kapitel 5.3.5 wird die Häufigkeit der Einhaltung der InVeKoS-Schlagtoleranz für die Segmentierungsergebnisse mit *eCognition* und *SegmentationFields* dargestellt.

4.2 Extraktion von Schlaggrenzen mit eCognition 3.0

4.2.1 Die objektbasierte Bildanalyse-Software eCognition

Die Bildanalysesoftware *eCognition Professional* wird seit dem Jahr 2000 von der Firma Definiens Imaging GmbH aus München entwickelt und vertrieben. Seit dem Frühjahr 2004 ist die Version 4.0 für die Betriebssysteme Windows NT, 2000 und XP erhältlich, die als Neuerung insbesondere eine bessere Verarbeitung sehr großer Datenmengen bietet. Für die vorliegende Diplomarbeit wurde die Vorgängerversion 3.0 verwendet. Die Software *eCognition* bietet ein umfangreiches Paket an Tools für die Segmentierung und Klassifikation von Bilddaten, dessen Basiswerkzeuge im Folgenden sowie in Anhang A erläutert werden (vgl. DEFINIENS IMAGING GMBH, o. J., o. S.). Eine Einordnung der Software in den Bildanalysebereich ‚Bildverstehen‘ wird in Kapitel 2.4.1 erläutert.

Alle mit *eCognition* verwendeten Daten werden in einem Projekt zusammengefasst. Beim Einfügen von Rasterdaten werden die einzelnen Kanäle des Bildes aufgelistet (siehe Abb. 4.7a)) und können einzeln für das Projekt ausgewählt bzw. gelöscht werden. Durch das Hinzufügen von thematischen Layern können Zusatzinformationen in Form von Vektor- oder Rasterdaten im Projekt genutzt werden (siehe Abb. 4.7b). Die Bedeutung von Vorwissen für die Technik des Bildverständens ist in Kapitel 2.4.1 dargestellt. Es ist zu beachten, dass Vektordaten im Zuge der Einbindung ins Rasterformat überführt und, als an die geometrische Auflösung der Bilddaten angepasster künstlicher Zusatzkanal, sowohl die Segmentierung als auch die Klassifikation unterstützen können. Die Segmentierung führt zu einer Identifikation der Form von Objekten (siehe Kap. 2.4.1), auf der die Klassifikation mit einer inhaltlichen Unterscheidung dieser Objekte in unterschiedliche Objektklassen aufbaut (vgl. JÄHNE 2002, S. 541). Eine Zusammenstellung der wichtigsten Klassifikationsmethoden in *eCognition* findet sich in Anhang A.

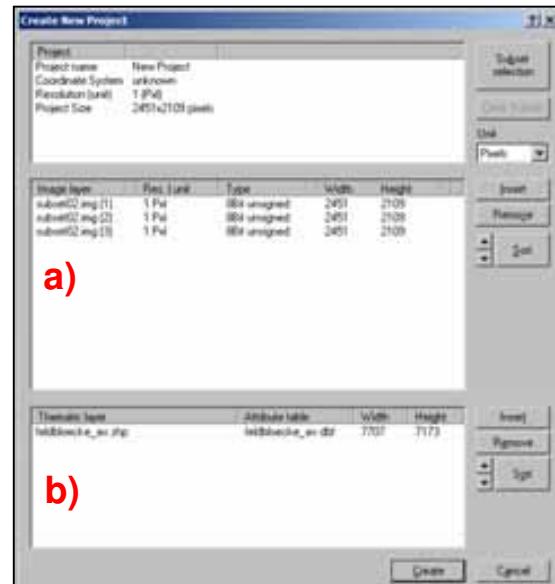


Abb. 4.7: Einrichten eines Projektes mit Raster- (a) und Vektordaten (b) in *eCognition*

4.2.2 Segmentierungswerzeuge in eCognition

Den Ausgangspunkt der Analysen mit *eCognition* bildet die sog. Multiresolution Segmentation. Durch den Aufbau der Objekte in der ersten Segmentierung werden die Bausteine für die Geometrie aller in weiteren Segmentierungen entstehenden Folgeobjekte festgelegt, die in einer späteren Klassifikation thematisch interpretiert werden können.

Die Multiresolution Segmentation ist eine Regionenwachstums-Prozedur (vgl. Kap. 2.4.2), in der zunächst einfache Objekte gebildet werden. Die Segmentierung beginnt mit pixelgroßen Objekten, die durch die Bewertung der minimalen Heterogenität in Bezug zu ihren Nachbarpixeln so lange zusammengefügt werden, bis mit dem als Endpunkt definierten sog. Scaleparameter (siehe Kap. 4.2.3) eine maximal zulässige Heterogenität erreicht ist. Hierbei werden die zwei horizontal und die zwei vertikal angrenzenden Pixel betrachtet (sog. Plane Four-Neighborhood, siehe Abb. 4.8a). Die Berechnung kann auch zusätzlich die diagonalen Nachbarn einbeziehen (sog. Diagonal Eight-Neighborhood siehe Abb. 4.8b), jedoch führt dieses zu einer Erhöhung der Rechenzeit. Die Startpixel der Multiresolution Segmentation werden über die gesamte Szene verteilt, so dass durch das simultane Segmentwachstum Objekte mit ähnlichen Ausmaßen gebildet werden.

Die Segmentierung kann, je nach Fragestellung, in verschiedenen frei wählbaren Auflösungen durchgeführt werden, so dass unterschiedliche Ebenen (sog. Level) vorliegen. Es entsteht ein reproduzierbares hierarchisches Netzwerk verknüpfter Objekte, in dem jedes Objekt seine Nachbar-, Super- und Subobjekte kennt (siehe Abb. 4.9). Die Grenztopologie ist hierbei konsistent, da die Grenzen der jeweiligen Sub- oder Superobjekte bei der Bildung neuer Level berücksichtigt werden. Bei der Segmentierung wird eine Datenbank der Objekte angelegt, die einen Zugriff auf die Objektinformationen (z. B. Fläche, Form, Umfang, Textur) und nach erfolgter Klassifikation auf ein Netzwerk der Klassifikationsergebnis-Beziehungen ermöglicht.

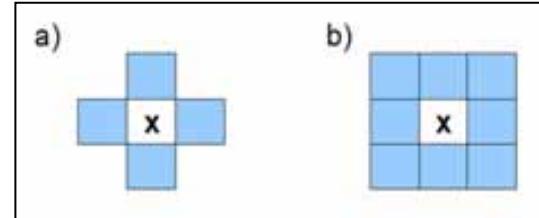


Abb. 4.8: Plane Four-Neighborhood (a) und Diagonal Eight-Neighborhood (b)



Abb. 4.9: Bildung von Sub- und Superobjekten bei der Segmentierung mit eCognition

4.2.3 Berechnung des Homogenitätskriteriums

Die nachfolgenden Berechnungen (Formel 4.8 bis 4.12) und Definitionen des Homogenitätskriteriums folgen dem Handbuch der Software *eCognition 3.0* (DEFINIENS IMAGINE 2002, o. S.). Eine genauere Beschreibung findet sich bei BAATZ und SCHÄPE (2000):

Bei der Fusion zweier Nachbarobjekte soll erreicht werden, dass eine zu definierende durchschnittliche Heterogenität \mathbf{h} der Bildobjekte gewichtet mit ihrer Größe \mathbf{n} [Pixel] minimal ist. Die Multiresolution Segmentation startet über das Gesamtbild verteilt jeweils bei einem einzelnen Pixel und überführt iterativ kleinere Bildobjekte in größere Einheiten. In jedem Iterationsschritt werden diejenigen benachbarten Bildobjekte zusammengeführt, zwischen denen die geringste Heterogenitätszunahme auftritt. Der Prozess stoppt erst dann, wenn die geringste Zunahme einen durch den Scaleparameter festgelegten Schwellenwert überschreitet. In Abbildung 4.10 ist die aus gleichmäßig verteilten Startpixeln fortschreitende Segmentierung durch ein Regionenwachstum dargestellt.



Abb. 4.10: Simultanes Regionenwachstum bei der Multiresolution Segmentation. (Quelle: BAATZ u. SCHÄPE, 2000, S.16)

Die Änderung der Heterogenität \mathbf{h} wird durch den Vergleich von \mathbf{h} vor und nach der Zusammenführung bestimmt, indem die Summe der mit der Objektgröße gewichteten Heterogenität der Fusionsobjekte mit dem Heterogenitätswert des Ergebnisobjekts verglichen wird.

Der Benutzer bestimmt durch die Wahl der Parameter des Homogenitätskriteriums \mathbf{h} und des Scaleparameters das Regionenwachstum. Das Homogenitätskriterium definiert sich durch die vom Anwender mit \mathbf{w} [0...1] gewichtete Kombination eines Spektralkriteriums \mathbf{h}_{Spek} mit einem Formkriterium \mathbf{h}_{Form} (siehe Abb. 4.11):

Die **spektrale Heterogenität** \mathbf{h}_{Spek} wird in *eCognition* durch die mit der gewichteten Summe der Standardabweichung $\mathbf{s}_{\text{Kanal}}$ der Spektralwerte jedes mit $\mathbf{w}_{\text{Kanal}}$ gewichteten Bildkanals definiert:

Formel 4.8:

$$\mathbf{h}_{\text{Spek}} = \sum \mathbf{w}_{\text{Kanal}} \cdot \mathbf{s}_{\text{Kanal}}$$

Um die Bildung stark verzweigter und komplexer Objekte zu steuern, wird das spektrale **Heterogenitätskriterium** h_{Spek} mit einem **Formkriterium** h_{Form} kombiniert, das durch die Gewichtung der **Kompaktheit** h_{Kmpkt} (compactness) des Segments gegenüber der **Glättung der Segmentkanten** h_{Glatt} (smoothness) charakterisiert wird (siehe Abb. 4.11). Die Abweichung eines Objektes von einer kompakten Form wird als h_{Kmpkt} durch das Verhältnis der tatsächlichen Kantenlänge \mathbf{l} und der Quadratwurzel der Bildobjektgröße \mathbf{n} in Pixeln beschrieben:

$$\text{Formel 4.9:} \quad h_{\text{Kmpkt}} = \frac{\mathbf{l}}{\sqrt{\mathbf{n}}}$$

Die Darstellung der Kantenglättung h_{Glatt} erfolgt durch das Verhältnis der tatsächlichen Kantenlänge \mathbf{l} und der kürzestmöglichen Kantenlänge \mathbf{b} , gegeben durch die parallel zum Raster verlaufende Bounding Box des Bildobjektes:

$$\text{Formel 4.10:} \quad h_{\text{Glatt}} = \frac{\mathbf{l}}{\mathbf{b}}$$

Die Software *eCognition* kombiniert die drei Kriterien (Formeln 4.8 bis 4.10), wobei die Formeln 4.9 und 4.10 unter Berücksichtigung der benutzerdefinierten Gewichtung für das Kompaktheitskriterium zu einem generellen Formkriterium zusammengefasst sind:

$$\text{Formel 4.11:} \quad h_{\text{Form}} = w_{\text{Kmpkt}} \cdot h_{\text{Kmpkt}} + (1 - w_{\text{Kmpkt}}) \cdot h_{\text{Glatt}}$$

Der **Scaleparameter** ist als das Maximum des erlaubten Heterogenitätswechsels bei der Zusammenführung zweier Objekte definiert. Der Endpunkt der Segmentation wird über den Vergleich eines **allgemeinen Fusionswertes f** (overall fusion value) mit dem Scaleparameter bestimmt. Mit Hilfe von h_{Spek} und h_{Form} wird der allgemeine Fusionswert f errechnet:

$$\text{Formel 4.12:} \quad f = w_{\text{Spek}} \cdot h_{\text{Spek}} + (1 - w_{\text{Spek}}) \cdot h_{\text{Form}}$$

Die Fusion stoppt, wenn f größer ist als der quadrierte Scaleparameter.

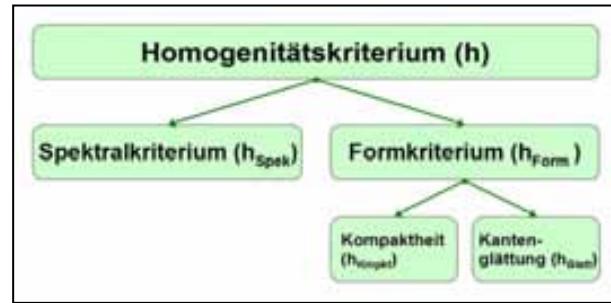


Abb. 4.11: Gliederung des Homogenitätskriteriums

Zusammenfassend lässt sich die Segmentierung als Prozedur beschreiben, die das gesamte Bild durchläuft und die Bildobjekte anhand anpassbarer Form- und Farbhöhenhomogenitätskriterien generiert (siehe Abb. 4.12). Die durchschnittliche Objektgröße wird indirekt durch die Anpassung des Scaleparameter beeinflusst, da größere Werte aufgrund eines höher liegenden Schwellwertes zu größeren Objekten führen.

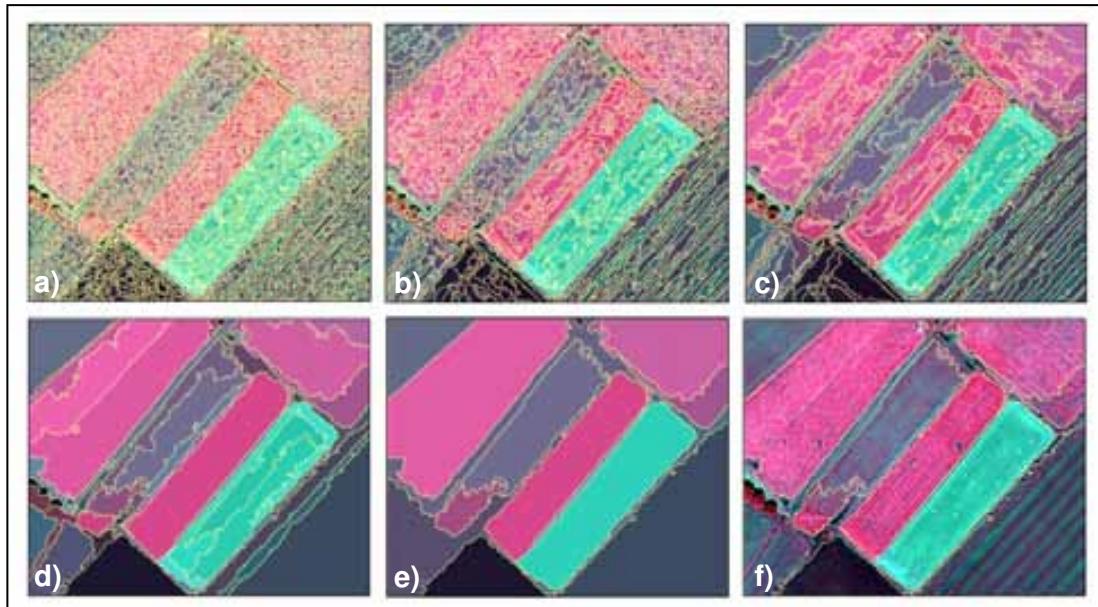


Abb. 4.12: Regionenwachstum mit *eCognition*

4.2.4 Segmentierungsstrategie mit *eCognition* 3.0

Für die vorliegende Arbeit wurde eine eigene Strategie für die Extraktion von Schlaggrenzen mit *eCognition* entwickelt. Die Besonderheit bei der Segmentierungsstrategie mit *eCognition* ist, dass die im Programm vorhandenen Klassifikationswerkzeuge nicht genutzt werden, um eine Vergleichbarkeit zur Segmentierung mit *SegmentationFields* zu ermöglichen, bei der keine Klassifikation der Geometrien vorgesehen ist. Mit *eCognition* wird allein durch die Anpassung der Segmentierungsparameter eine Annäherung an die Schlaggrenzgeometrien durchgeführt. Hierbei spielt besonders die Wahl eines hohen Scaleparameters eine Rolle, der für ein ausreichend starkes Regionenwachstum sorgt, so dass große einheitliche Segmente gebildet werden, die in der Lage sind, die Abgrenzung von Schlagflächen zu repräsentieren.

In Abbildung 4.13 ist die Segmentierungsstrategie mit *eCognition* dargestellt. Wie bereits bei der Modellierung von Schlägen (siehe Kap. 2.3) beschrieben stellt die Verwendung von Feldblockdaten als Vorwissen eine wichtige Grundlage für die Segmentierung mit *eCognition* dar (siehe Abb. 4.13).

Auf diesem Wege lässt sich der Suchraum sinnvoll auf die für die Schlagextraktion wesentlichen Flächen mit gesicherter landwirtschaftlicher Nutzung fokussieren. So mit bestehen bereits vorinterpretierte Außengrenzen, die nicht mehr erkannt werden müssen. Bei *eCognition* wird die gesamte Bildfläche innerhalb und außerhalb der Feldblockgrenzen segmentiert. Die Feldblockgrenzen stellen lediglich feststehende Grenzen dar, die durch die Segmentierung nicht verändert werden. Beim abschließenden Export werden dann durch eine Zuordnung die tatsächlich innerhalb der Feldblockflächen liegenden Ergebnisgeometrien in den Ausgabevektordatensatz überführt.

Das Ziel der Segmentierung ist die Extraktion der je nach Fragestellung (Erosionsberatung oder InVeKoS) in variierender Genauigkeit definierten Außengrenzen der landwirtschaftlichen Schlagflächen. Die Programmstruktur von *eCognition* stellt die Segmentierung an den Anfang der Bildanalyseprozedur, so dass eine genaue inhaltliche Klassifikation (z. B. der Fruchtart) für die Erzeugung geometrischer Objekte und die Evaluation im Rahmen dieser Arbeit nicht notwendig ist. Möglichkeiten zur Verbesserung der Segmentierungsergebnisse durch Klassifikation werden in einem Ausblick in den Kapiteln 7.1 und 7.2 exemplarisch erörtert.

Um einen Grenzverlauf zu erhalten, der sich an den natürlichen Gegebenheiten im Originalbild orientiert, werden im Rahmen der Vorsegmentierung (siehe Abb. 4.13) durch die Wahl eines niedrigen Scaleparameters (siehe Kap. 4.2.3) zunächst sehr kleine Bildobjekte erzeugt. Die so erhaltene Grundsegmentierung wird als Ausgangssituation (Level1, siehe Abb. 4.9) für die Berechnung der folgenden Segmentierungsebene mit einem höheren Scaleparameter (Level 2, siehe Abb. 4.9) genutzt. Mit dieser Hauptsegmentierung (siehe Abb. 4.13) wird ein wesentlich stärkeres Regionenwachstum durchgeführt, das homogene Objekte bzgl. der Grauwertverteilung in den Bilddaten bildet. Entsprechend der Schlagmodellierung (siehe Kap. 2.3) repräsentieren diese homogenen Flächen die natürlichen Schlaggrenzen (siehe Abb. 4.13).

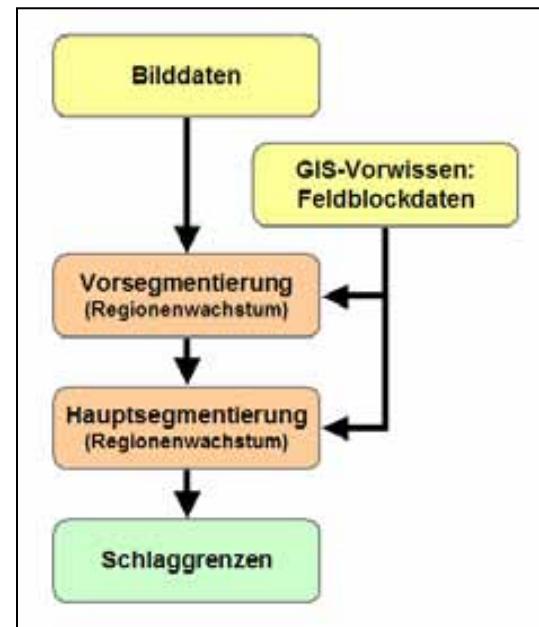


Abb. 4.13: Segmentierungsstrategie mit *eCognition*

Die Nutzung der Vorsegmentierung mit einem sehr kleinen Scaleparameter bedeutet für die mehrfache Berechnung neuer Variationen eine hohe Zeitsparnis. Die Erstsegmentierung des Testgebietes mit einem sehr geringen Scaleparameter benötigt ca. 90 Minuten (Prozessor: AMD Sempron 2500+, 1.750 MHz). Die anschließenden Segmentierungen mit hohen Scaleparametern lassen sich hingegen in weniger als 10 Minuten berechnen. Um den hohen Rechenaufwand bei der Segmentierung der sehr hochauflösten IKONOS-Bilddaten zu verringern, werden günstige Segmentierungseinstellungen für die Gesamtszene anhand eines kleineren Bildausschnittes ausgewählt (siehe Kap. 4.2.5).

Bei der Ableitung der Segmentierungsstrategie aus der Modellierung von Schlägen (siehe Kap. 2.3) ist bei Betrachtung der **Bildebene** die Auflösung der IKONOS-Daten (1,0 m im Resolution Merge-Bild) und der verwendete vierkanalige Spektralbereich (Blau, Grün, Rot, Nahes Infrarot, 445 nm bis 853 nm, siehe Kap. 3.6.1) eine wichtige Grundlage der Segmentierung.

Aus Sicht der **Materialebene** ist zu beachten, dass zum Bildaufnahmepunkt (15. Juli 2004) vegetationsbedeckte Flächen im Spektralbereich des nahen Infrarot (ca. 700 nm bis 1.000 nm) besonders stark reflektieren (vgl. Reflektionsgrad von Sojabohne und Ulme in Abb. 4.14). Flächen auf denen bereits geerntet wurde oder die ohne Bewuchs sind, lassen sich durch die geringe Reflektion im nahen Infrarotbereich von vegetationsbestandenen Flächen unterscheiden. Für andere Aufnahmepunkte sind u. U. gänzlich andere Spektralcharakteristika zu beachten. So kann für die Unterscheidung von Hack- und Halmfrüchten aufgrund der unterschiedlichen Zunahme der Biomasse eine multitemporale Auswertung von Frühjahrs- und Sommerbildern notwendig sein (siehe Kap. 7.2).

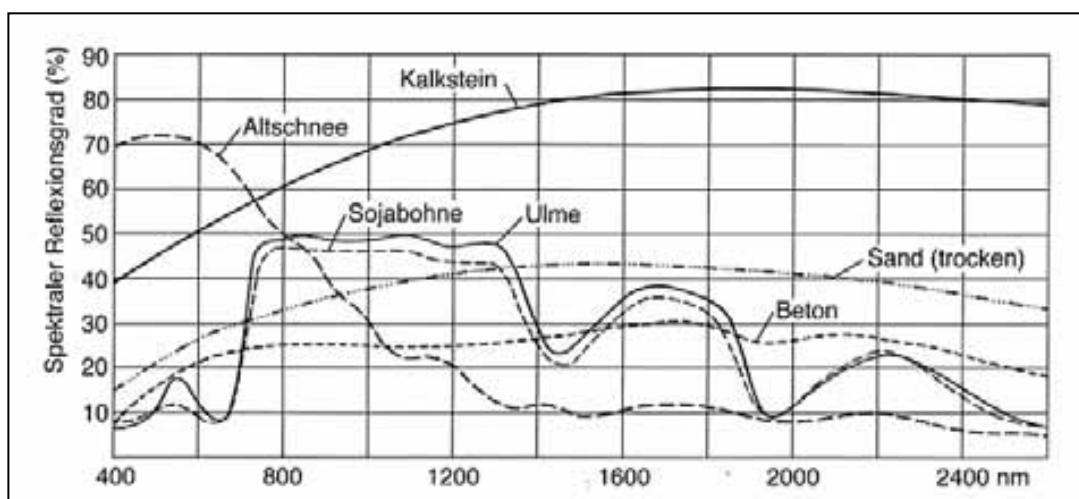


Abb. 4.14: Spektrale Reflektionsgrade verschiedener Oberflächen (Quelle: ALBERTZ 2001, S.19)

Im Bereich der **GIS-Ebene** werden die in Kapitel 3.6.2 beschriebenen Feldblockdaten als Vorwissen verwendet. Dabei ist zu beachten, dass *eCognition* zwar die gesamte Bildfläche segmentiert, aber die Feldblockdaten als feststehende Grenzen den äußeren Grenzverlauf der neu entstehenden Segmente vorbestimmen. Ohne die Feldblockdaten müssten eine hohe zusätzliche Anzahl an Schlaggrenzen gefunden werden, so dass die Nutzung als Vorwissen den Suchraum für die Schlagextraktion sinnvoll einschränkt. Auch die in den Feldblockdaten vorhandenen Inselflächen (siehe Kap. 3.6.2) können mit *eCognition* als Vorwissen eingebunden werden.

4.2.5 Einstellen der Parameter für die Gesamtszene

4.2.5.1 Parametertests in einem Bildausschnitt

Anhand der systematischen Untersuchung der Segmentierungseinstellungen für eine ca. 5,2 km² große Teilfläche im Westen des Untersuchungsgebietes (siehe Abb. 4.15) werden mögliche Voreinstellungen bei der Segmentierung mit den Programmen *eCognition* und *SegmentationFields* für die Gesamtszene getestet. In Publikationen zur Segmentierung mit *eCognition* wird wiederholt kritisiert, dass Parametereinstellungen für die Segmentierung je nach Datentyp und Fragestellung immer in einem „*Trial-&-Error-Prozess*“ (GERIGHAUSEN u. MÖLLER, 2004, S. 314) bzw. empirisch (vgl. ANDRESEN 2004, S. 91) ermittelt werden müssen, da bereits eine leichte Änderung der Einstellungen von Scaleparameter und Homogenitätskriterium zu einer starken Abweichung in den Segmentierungsergebnissen führt. Dieses hat zur Folge, dass für die vorliegende Fragestellung der Schlagabgrenzung unter Verwendung von IKONOS-Bilddaten keine Erfahrungen bzgl. der Segmentierungseinstellungen für die Gesamtszene vorliegen und mit einer empirischen Systematik anhand einer objektiven Fehlermessung (siehe Kap. 4.1) neu bestimmt werden müssen.

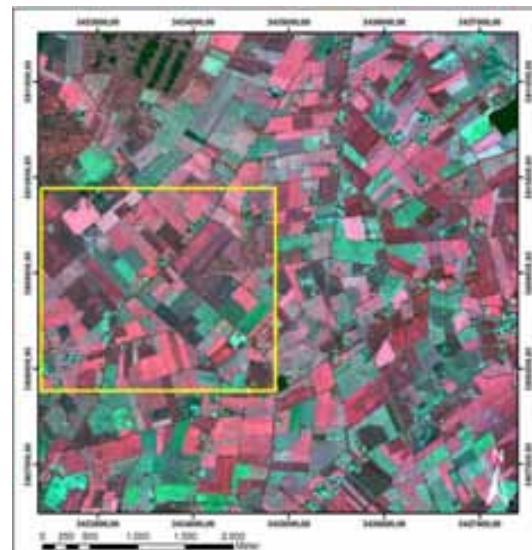


Abb. 4.15: Bildausschnitt für die Parametertests (gelber Kasten) im Untersuchungsgebiet

Für die Auswahl der Parametereinstellungen für die Gesamtszene werden in dem beschriebenen Geländeausschnitt systematisch 44 Varianten mit verschiedenen Einstellungen berechnet (siehe Tab. 4.3). Unter Verwendung der gleichgewichteten Kanäle Blau, Grün, Rot und Nahes Infrarot sowie der Feldblockgrenzen wird der Ausschnitt zunächst mit einer ‚Plane Four-Neighborhood‘-Matrix (siehe Abb. 4.8a) und den aus Tabelle 4.2 ersichtlichen Einstellungen segmentiert. Durch diese Vorsegmentierung (siehe Kap. 4.2.4) mit einem sehr geringen Scaleparameter von 10, der das Regionenwachstum frühzeitig stoppt, wird eine feinstrukturierte Grundlage für die Außengrenzen der Schläge geschaffen. Auch die Geschwindigkeit der anschließenden Hauptsegmentierung kann mit dieser Vorsegmentierung erhöht werden (siehe Kap. 4.2.4). Die Einstellungen für die Vorsegmentierung entsprechen den in *eCognition 3.0* vorgegebenen Standardeinstellungen und wurden angewendet, da für die Bildung sehr kleiner Subobjekte die Gewichtung des Formkriteriums h_{Form} (siehe Kap. 4.2.3) für die Geometrie der endgültigen Schlagobjekte eine geringere Rolle spielt als das Spektralkriterium h_{Spek} (siehe Kap. 4.2.3). Trotz der geringen Gewichtung von h_{Form} wurde h_{Glatt} (siehe Kap. 4.2.3) hoch gewichtet, um möglichst glatte Objektumrisse als Ausgangspunkt für die Begrenzung der im Rahmen der Hauptsegmentierung in einer höheren Ebene zu extrahierenden Schläge zu erhalten.

Tab. 4.2: Parametereinstellungen für die Vorsegmentierung im Bildausschnitt mit *eCognition*

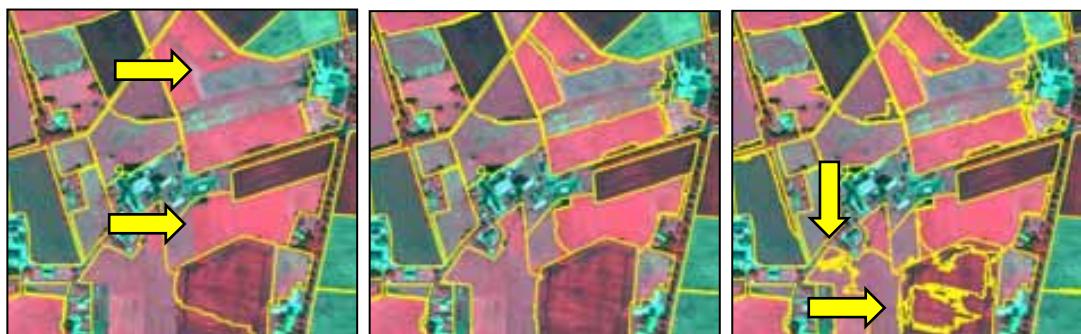
Scaleparameter	h_{Spek}	h_{Form}	h_{Kmpkt}	h_{Glatt}
10	0,8	0,2	0,1	0,9

In eigenen Voruntersuchungen wurden verschiedene Scaleparameter visuell unter Betrachtung der Vollständigkeit der Abgrenzung (Untersegmentierung) und des Auftretens von Fehlern am Randbereich und in der Fläche (Übersegmentierung) bewertet. Ein Größenbereich für einen Scaleparameter von 190 bis 230 hat sich dabei als sinnvolle Einstellung für die Gesamtszene herausgestellt, da in diesem Bereich die Segmentierung die besten Ergebnisse erreichte.

Aufbauend auf der Feinsegmentierung werden Variationen mit Scaleparametern von 190, 200, 210, 220 und 230 gerechnet. Für die systematische Überprüfung der für die Gesamtszene vorzunehmenden Einstellungen werden für jeden der erwähnten Scaleparameter verschiedene Einstellungen bzgl. des Spektral- und Formkriteriums berechnet (siehe Tab. 4.3).

Um die Einheitlichkeit der Variationen zu gewährleisten und die Anzahl der Variationen überschaubar zu halten, wurde die Gewichtung von Kompaktheit (0,1) und Kantenglättung (0,9) für alle Variationen konstant gehalten. Die Kompaktheit wurde gering gewichtet, um auch die Erkennung von sehr langen, komplexen Schlagstrukturen zu ermöglichen, die von der idealen kompakten Form eines Kreises abweichen.

Die unterschiedliche Gewichtung von Form- und Spektralkriterium hat deutliche Auswirkungen auf das Segmentierungsergebnis. So führt eine geringe Gewichtung der Spektralcharakteristika zu fehlenden Grenzen (siehe Abb. 4.16a), wohingegen eine alleinige Berücksichtigung der Spektralwerte, ohne das Formkriterium mit einzubeziehen, verstärkt zu Übersegmentierungen führt (siehe Abb. 4.16c). Erst eine mittlere Gewichtung führt zu einem ausgeglicheneren Ergebnis (siehe Abb. 4.16b).



a) Untersegmentierung bei geringer Gewichtung von $h_{\text{Spek}} (= 0,1)$ b) Ausgeglichenes Ergebnis bei mittlerer Gewichtung von $h_{\text{Spek}} (= 0,5)$ c) Übersegmentierung bei alleiniger Gewichtung von $h_{\text{Spek}} (= 1,0)$

Abb. 4.16: Beispiel für die Auswirkung der unterschiedlichen Gewichtung von Spektral- und Formkriterium auf die Segmentierung (Scaleparameter = 210)

Die zusätzlichen Varianten mit einer höheren Gewichtung der Kompaktheit (siehe Tab. 4.3) sind ebenfalls aus den beschriebenen Voruntersuchungen hervorgegangen und wurden durch die visuelle Bewertung von Über- und Untersegmentierungen als zusätzliche gute Ausgangseinstellungen eingeordnet und mit ihren spezifischen Scaleparametern mit in die Berechnung für den Ausschnitt aufgenommen, da insbesondere die nahezu gleiche Gewichtung von Kompaktheit und Kantenglättung mit 0,6 zu 0,4 eine interessante Variation der oben beschriebenen Standardeinstellungen darstellt. Auf diese Weise kann ohne bedeutenden Mehraufwand getestet werden, ob durch eine Variation in der Gewichtung des Formkriteriums ein wesentlicher Einfluss auf den Verlauf der Segmentierung genommen werden kann. Für jede Segmentierungsvariation werden arithmetisches Mittel, Median und Standardabweichung des eingangs erwähnten Gesamtflächenfehlers F_G (siehe Kap. 4.1.2) der Gesamtobjekterkennung (Schlag- und Abzugsflächen) ermittelt. Eine Aufstellung aller Variationen mit ihren Fehlerwerten befindet sich im Anhang in Tabelle B.1.

Durch diese systematische Berechnung zahlreicher vergleichbarer Varianten wird das am Anfang dieses Kapitels erwähnte „Trial-&-Error“-Verfahren für die Aufstellung der Segmentierungseinstellungen in eine nachvollziehbare, empirische Systematik integriert.

Tab. 4.3.: Parametereinstellungen für die Hauptsegmentierung im Bildausschnitt mit eCognition

Scaleparameter	h_{Spek}	h_{Form}	h_{Kmpkt}	h_{Glatt}
190, 200, 210, 220, 230	1	0	---	---
190, 200, 210, 220, 230	0,1	0,9	0,1	0,9
190, 200, 210, 220, 230	0,2	0,8	0,1	0,9
190, 200, 210, 220, 230	0,4	0,6	0,1	0,9
190, 200, 210, 220, 230	0,5	0,5	0,1	0,9
190, 200, 210, 220, 230	0,6	0,4	0,1	0,9
190, 200, 210, 220, 230	0,8	0,2	0,1	0,9
190, 200, 210, 220, 230	0,9	0,1	0,1	0,9
Zusätzlich:				
200, 210, 220	0,5	0,5	0,6	0,4
210	0,6	0,4	0,4	0,6

4.2.5.2 Umsetzung der Segmentierung für die Gesamtszene

Für die Berechnung der Gesamtszenen werden anhand des Gesamtflächenfehlers F_G (Median) in Bezug auf die Erosionsreferenzdaten die Einstellungen der drei besten Variationen ausgewählt. Die Auswahl anhand des Medians erfolgt aufgrund der besseren Beschreibung der Ergebnisse durch die geringere Anfälligkeit für extreme Einzelwerte im Randbereich der Werteverteilung und wird in Kapitel 4.1.3 genauer begründet.

Die in Tabelle 4.4 aufgeführten Einstellungsvariationen weisen die geringsten Mediane des Gesamtflächenfehlers der Gesamterkennung auf (8,29 %, 8,51 % und 8,51 %) und werden somit für die Berechnung der Gesamtszene verwendet. Diese Variationen werden im weiteren Text als Eco1, Eco2 und Eco3 bezeichnet.

Tab. 4.4: Segmentierungsvariationen für die Gesamtszene mit eCognition

Variante	Scaleparameter	h_{Spek}	h_{Form}	h_{Kmpkt}	h_{Glatt}
Eco1	230	0,2	0,8	0,1	0,9
Eco2	210	0,5	0,5	0,4	0,6
Eco3	220	0,5	0,5	0,4	0,6

In Bezug auf den Scaleparameter lässt sich sagen, dass sich mit Werten zwischen 210 und 230 ein relativ hoher Wert als vorteilhaft herausstellt. Überraschenderweise hat sich mit Eco1 eine Variante mit einer relativ hohen Gewichtung des Formkriteriums h_{Form} als die im Bildausschnitt beste Segmentierungseinstellung herausgestellt. Die Varianten Eco2 und Eco3 entsprechen hingegen der Erwartung, dass sich eine Gleichgewichtung von Form- und Spektralkriterium als sinnvolle Kombination herausstellen könnte. Hervorzuheben ist, dass beide Variationen (Eco2 u. Eco3) aus der Gruppe der zusätzlichen Variationen mit einer Abweichung in der Gewichtung von Kompaktheit und Kantenglättung stammen.

4.3 Extraktion von Schlaggrenzen mit SegmentationFields

Das Programm *SegmentationFields* wird am Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI) der Universität Hannover entwickelt. Für die vorliegende Diplomarbeit wurde vom IPI ein für die IKONOS-Bilddaten angepasster Software-Prototyp in der Version vom 17.01.2005 zur Verfügung gestellt. *SegmentationFields* greift durch die Programmierung mit C++ auf Bildverarbeitungs-Operatoren der Softwarebibliothek HALCON 7.0.1 zu.

4.3.1 Die Bildanalyse-Softwarebibliothek HALCON

HALCON 7.0.1 ist eine Software Bibliothek, die über 1100 Operatoren aus verschiedenen Bereichen der Bildverarbeitung und -analyse enthält (vgl. MVTEC SOFTWARE GMBH o. J.c, o. S.). Durch die vorgegebenen Bausteine der Operatorenbibliothek HALCON 7.0.1 kann der Nutzer auf die vorhandenen Bausteine zurückgreifen, die je nach Aufgabenstellung durch eigene Anpassungen und Erweiterungen ergänzt werden können. Wichtige Standardkomponenten sind u. a. Schwellwert- und Filteroperatoren, Linienextraktion und Mustererkennung.

HALCON ist der kommerzielle Nachfolger von HORUS, einem Bildanalyseentwicklungssystem, das ab 1988 am Institut für Informatik der TU München entwickelt und seit 1990 auch vertrieben wurde. 1997 ist die Entwicklung an die Firma MVTEC Software GmbH übergegangen, die nach einer Reimplementierung und Erweiterung des Systems, die Softwarebibliothek unter dem Namen HALCON vertreibt (vgl. TU MÜNCHEN, FORSCHUNGS- UND LEHREINHEIT INFORMATIK IX, 2000).

Das Konzept von HORUS, an das auch HALCON anknüpft, lässt sich als sog. Computer Aided Vision Engineering beschreiben. Computer Aided Vision Engineering beinhaltet sowohl Werkzeuge zur Entwicklung von Bildanalysesoftware als auch die Bereitstellung eines Systems, das die Realisierung aller Bildanalyseschritte von der Vorverarbeitung bis zur Interpretation ermöglicht (vgl. KIEMLE 1994).

Zur Softwarebibliothek HALCON gibt es verschiedene Schnittstellen für die Entwicklung eigener Programme. Unterstützt werden Visual Basic, Visual C++, C#, Delphi und das von MV Tec zur Verfügung gestellte Tool Hdevelop zur komfortablen Erstellung von Softwareprototypen (vgl. MVTEC SOFTWARE GMBH, o. J.a). HALCON wird für die Plattformen Windows NT 4.0/2000/XP, Linux 2.2/2.4, Solaris (ab Version 7), Irix 6.5, Tru64 UNIX 5.1 und Philips TriMedia angeboten (vgl. MVTEC SOFTWARE GMBH, o. J.b).

4.3.2 Segmentierungsstrategie mit SegmentationFields

Die Segmentierungsstrategie von *SegmentationFields* zeichnet sich durch die Kombination einer Wasserscheidensegmentierung mit anschließendem Regionenwachstum und einer Linienerkennung aus (siehe Abb. 4.17). Auf diesem Wege werden Grenzen, die in einem ersten Schritt nicht erkannt wurden, durch einen Folgeprozess ergänzt. Auch für *SegmentationFields* stellt die Nutzung von Vorwissen eine wichtige Grundlage zur Eingrenzung des Suchraumes dar.

Eine Grundsegmentierung zur Beschleunigung der Extraktionsberechnungen wie mit *eCognition* (siehe Kap. 4.2.4) ist mit *SegmentationFields* nicht möglich. Um operative Anwendbarkeit im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu ermöglichen muss eine verringerte geometrische Bildauflösung von 4,0 m genutzt werden, um die Rechenzeiten für die Produktion zahlreicher Einstellungsvarianten im Rahmen einer empirischen Systematik für die Parameterpräzisierung zu verringern. Eine Verringerung der geometrischen Auflösung kann einerseits den Verlust von Detailinformationen bedeuten, andererseits werden auf diesem Wege auch potentielle Störungen und Rauschen in den Bilddaten verringert, so dass die Nutzung einer geometrischen Auflösung von 4,0 m sowohl zu positiven als auch negativen Effekten führt. Segmentierungen mit einer höheren geometrischen Auflösung wurden in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt, da eine Änderung der Auflösung eine erneute aufwendige Einstellung der optimalen Segmentierungsparameter zur Folge hätte (vgl. JÄHNE 2002, S. 131 f.). Dieser Unterschied in den Ausgangsdaten ist für die Diskussion und den Vergleich der Ergebnisse zu beachten.

Auch mit *SegmentationFields* werden günstige Segmentierungseinstellungen zunächst anhand des bereits für *eCognition* in Kapitel 4.2.5 beschriebenen Bildausschnittes (siehe Abb. 4.15) ausgewählt.

Leitet man die Segmentierungsstrategie aus der Modellierung von Schlägen nach BUTENUTH (2004a, S. 1066) ab, so ist bei Betrachtung der **Bildebene** die verringerte Auflösung der IKONOS-Daten von 4 m je Pixel und der verwendete dreikanalige Spektralbereich (Grün, Rot, Nahes Infrarot, 506 nm - 853 nm, siehe Kap. 3.6.1) zu beachten.

Für die **Materialebene** gilt erneut die Eigenschaft vegetationsbedeckter Flächen, zum Bildaufnahmzeitpunkt (15. Juli 2004) im nahen Infrarotbereich (ca. 700-1000 nm) stark zu reflektieren, als wichtiges Merkmal (vgl. Kap. 4.2.4). Des weiteren gelten die bereits in Kapitel 4.2.4 erläuterten Besonderheiten bzgl. bereits geernteter und unbewachsener Flächen, die im nahen Infrarotbereich eine geringe Reflektion aufweisen, sowie der Hinweis, dass zu einem anderen Aufnahmzeitpunkt andere Spektraleigenschaften auftreten können, die eine Anpassung der Segmentierungsstrategie erfordern.

Als wichtige Voraussetzung für die Extraktion von Schlaggrenzen durch die Segmentierung mit *SegmentationFields* sieht BUTENUTH die Nutzung von Vorwissen. BUTENUTH verwendet in der **GIS-Ebene** dieses Wissen in Form der als Modell für Geoobjekte gängigen ATKIS-Daten, während in dieser Arbeit die in Kap. 3.6.2 beschriebenen Feldblockdaten genutzt werden (vgl. Butenuth 2004a, S. 1065). Mit *SegmentationFields* entfällt eine abschließende Unterscheidung zwischen Flächen innerhalb und außerhalb der Feldblockgrenzen, da im Gegensatz zu *eCognition* (siehe Kap. 4.2.4) entsprechend dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Modell nur die Flächen innerhalb der Feldblockgrenzen segmentiert werden.

Um die Beziehungen der unterschiedlichen Geoobjekte zueinander darzustellen, erfolgt eine gemeinsame Darstellung in einem Modell (siehe Abb. 2.2), das beispielsweise die ATKIS-Objekte ‚Fluss‘ oder ‚Bahnstrecke‘ als vorab feststehende Schlaggrenzen abbildet (vgl. Butenuth 2004a, S. 1066).

Das in der vorliegenden Arbeit genutzte Feldblockmodell hingegen benennt keine einzelnen Geoobjekte, sondern weist sämtliche Flächen innerhalb der Feldblockgrenzen als landwirtschaftlich genutzte, und somit als zu segmentierende Flächen aus. Die in den Feldblockdaten vorhandenen Inselflächen (siehe Kap. 3.6.2) können mit *SegmentationFields* derzeit nicht berücksichtigt werden.

In Abbildung 4.17 ist die Segmentierungsstrategie von BUTENUTH dargestellt. Die Vektor-Vorinformationen gliedern das Gebiet in einzelne Großregionen (‘regions of interest’). Eine Wasserscheidensegmentierung (siehe Kap. 2.4.2) strukturiert in einem ersten Schritt die Region. Durch ein Regionenwachstum (siehe Kap. 4.2.2) entstehen sog. Feldflächen (‘field areas’), in denen anschließend mit einer Linienerkennung (siehe Kap. 4.3.3) weitere Grenzen, die aufgrund eines zu ähnlichen spektralen Merkmalsraumes benachbarter Flächen noch nicht detektiert werden konnten, aus den Bilddaten extrahiert werden. Diese werden mit den bereits erkannten Grenzen zu vorläufigen Schlaggrenzen (‘preliminary field boundaries’) zusammengeführt. Als abschließende Verbesserung der geometrischen Genauigkeit setzt BUTENUTH einen Snake-Algorithmus ein (siehe Kap. 2.4.3), der jedoch in der für diese Arbeit vorliegenden Programmversion nicht implementiert ist. Der Einsatz von Snakes in *SegmentationFields* wird als Ausblick in Kapitel 7.3 diskutiert (vgl. BUTENUTH 2004a, S. 1067).

Die von *SegmentationFields* im Generate-Format erzeugten Vektordaten werden für die vorliegende Arbeit anhand der ArcView-Erweiterung ‘Generate to Shape 5.0’ von WARDENIER in

Polylinien im von ArcView und ArcGIS lesbaren Shape-Format umgewandelt und anschließend mit der Erweiterung ‘Vector Conversions 1.1’ von SARAF in Polygone überführt, um Berechnungen mit den Flächen der Ergebnisgeometrien durchführen zu können. Da *SegmentationFields* speziell für die Extraktion von Schlagflächen programmiert wird, sind über das eigentliche Projektziel hinausgehende Funktionalitäten wie z. B. Klassifikationsfunktionen nicht vorgesehen.

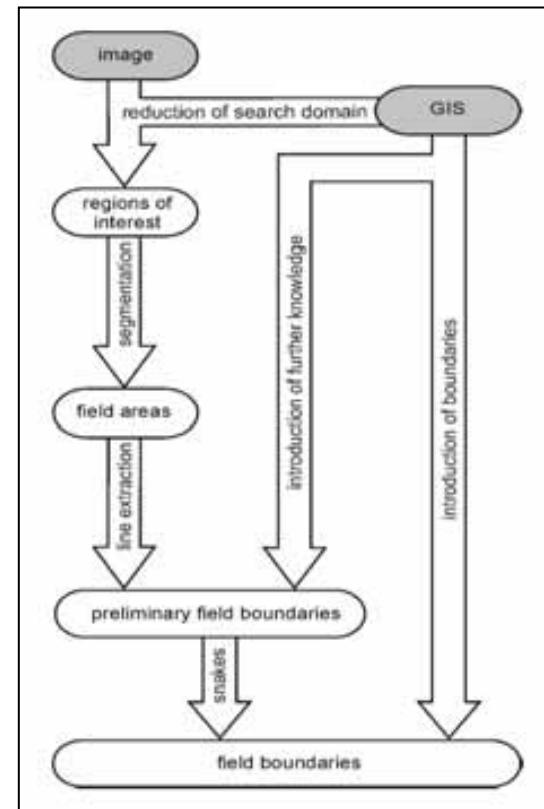


Abb. 4.17: Segmentierungsstrategie mit *SegmentationFields* (Quelle: BUTENUTH ET AL. 2004, o. S.)

4.3.3 Geregelte Operatoren in *SegmentationFields*

Das Programm *SegmentationFields* bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Einstellung der Analyseoperatoren. In der vorliegenden Arbeit wurden Operatoren exemplarisch untersucht und angepasst, deren Variation entscheidende Auswirkung auf die Schlagerkennung hat. Diese Operatoren sind mit einer kurzen Funktionsbeschreibung in der Tabelle 4.5 in der Reihenfolge ihrer Position im Programmcode aufgeführt sowie in das Strategiediagramm in Abbildung 4.21 integriert.

Tab. 4.5: Geregelte Operatorengruppen in *SegmentationFields*

Operatorenguppe	Abkürzung	Variablen	Beschreibung
Regiongrowing_n	rg1	MinSize	Flächenwachstumverfahren für mehrkanalige Bilder.
Closing_circle:	cc	Radius	Randglättung und Schließen von Löchern mit einer Kreismaske
Erosion_circle	ec	Radius	Glättung und Verkleinerung der Regionenränder / Randmaskierung
Lines_gauss,	lg	Sigma, High	Erkennen von Linien und deren Breite
Gen_contour_region_xld, Gen_polygons_xld	gcr/gp	Mode, Type, Alpha	Vektorisierung der Polygone

SegmentationFields kann die Segmentierung in verschiedenen geometrischen Bildauflösungen durchführen. Die verwendete Auflösung muss im Programm zu Beginn als Variable eingestellt werden. Damit nicht alle Variablenwerte aller Bildverarbeitungs-Operatoren, die Variablenwerte in Pixeln enthalten, bei einer Änderung der Bildauflösung umgestellt werden müssen, regelt eine interne Umrechnung die Korrektur des Variablenwerts in Abhängigkeit von der gewählten Auflösung. Für die genutzte verringerte Auflösung von 4,0 m bedeutet dies, dass die flächenbezogenen Variablenwerte (Regiongrowing_n) auf ein Sechzehntel (da mit der Vervierfachung der Kantenlänge eines Pixels gegenüber der Originalauflösung die Fläche auf das Sechzehnfache ansteigt) und die längenabhängigen (Closing_circle und Erosion_circle) auf ein Viertel reduziert werden müssen.

Im folgenden werden alle Variablenwerte mit ihren bereits umgeformten Werten genannt (gerundet auf zwei Nachkommastellen), um einen direkten Bezug zur gewählten geometrischen Auflösung von 4,0 m zu ermöglichen.

Die technische Darstellung und Einordnung der genutzten Operatoren in den Gesamtkontext des Programms *SegmentationFields* im folgenden Abschnitt orientiert sich an der Dokumentation zu HALCON 7.0.1 (MVTEC SOFTWARE GMBH 2004) sowie an den Quellcodekommentierungen von BUTENUTH (2005, Quellcode):

Regiongrowing_n: Flächenwachstum für mehrkanalige Bilder (Abkürzung: rg)

In diesem Schritt, der unmittelbar nach der Einteilung der Feldblockregionen durch eine Wasserscheidensegmentierung in sog. Bassins geschieht (siehe Kap. 2.4.2), werden die Bassins zu größeren Regionen zusammengeführt.

Der Operator Regiongrowing_n führt durch die Betrachtung eines mehrdimensionalen Merkmalsraumes ein Regionenwachstum unter Berücksichtigung aller verwendeten Bildkanäle (G, R, NIR) durch. Eine Fusion benachbarter Punkte wird durchgeführt, wenn die Differenzvektoren im Merkmalsraum innerhalb eines definierten Toleranzintervalls liegen. Bei der Berechnung wird die direkte Vierer-Nachbarschaft betrachtet (siehe Kap. 4.2.2).

Bei diesem Operator wurde die Variable ‚MinSize‘ variiert, mit der die Mindestgröße der Ausgaberegionen reguliert wird, um bei der Schlagerkennung Störungen durch zu kleine Regionen mit einer geringeren Fläche als ‚MinSize‘ zu vermeiden. Da es sich hierbei um eine Flächenangabe in Pixeln handelt, ist die Variable von der geometrischen Auflösung abhängig, so dass die oben beschriebene Umrechnung der Variablenwerte erfolgt ist.

Closing_circle: Randglättung und Schließen von Löchern (Abkürzung: cc)

Bei einer sog. Dilatation wird auf jeden Bildpunkt eine Filtermaske angewandt, die bestehende Objekte vergrößert und Löcher und Einschnitte füllt (vgl. JÄHNE 2002, S. 513). Wenn mindestens ein Bildpunkt des Eingangsbildes innerhalb der Dilationsmaske belegt ist, wird im Ausgangsbild der entsprechende Bildpunkt gesetzt (siehe Abb. 4.18).

Die sog. Erosion verkleinert Objekte durch die Anwendung einer Erosionsmaske auf die Pixel des jeweiligen Bildes (vgl. JÄHNE 2002, S. 512). Nur wenn im Eingangsbild alle Pixel innerhalb der Erosionsmaske belegt sind, wird im Ausgangsbild das zentrale Pixel gesetzt (siehe Abb. 4.19).

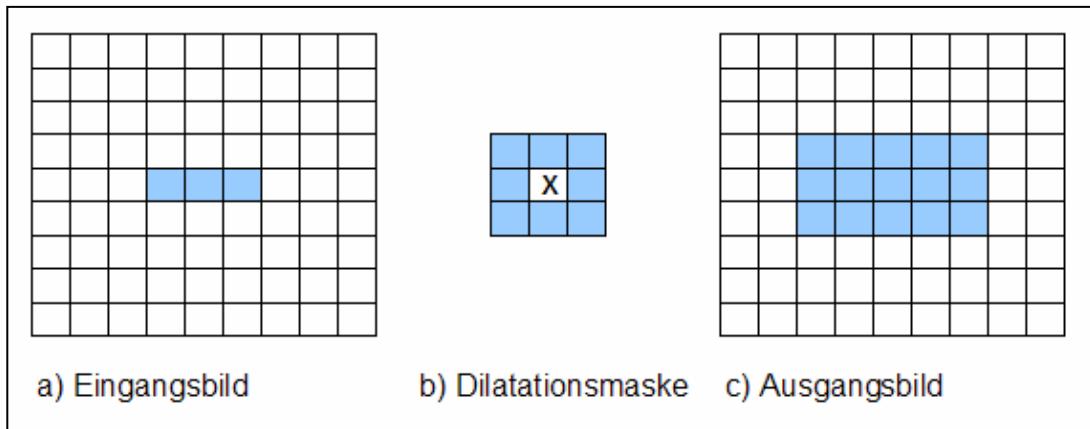


Abb. 4.18: Grundprinzip der Dilatation

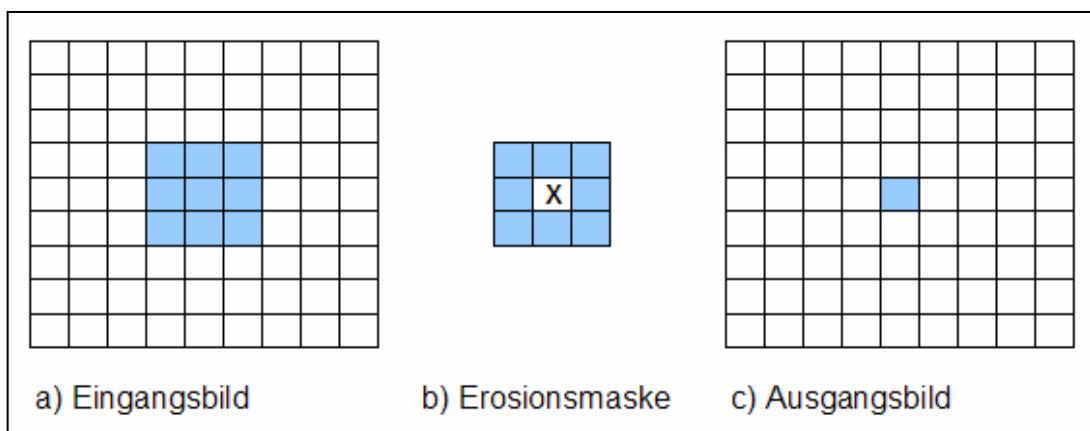


Abb. 4.19: Grundprinzip der Erosion

Als Closing (siehe Abb. 4.20) wird in der Bildverarbeitung ein Aufeinanderfolgen von Dilatation und Erosion bezeichnet. Kleine Einschnitte und Unebenheiten an den Rändern werden geglättet und Löcher geschlossen, die kleiner sind als die Erosionsmaske (vgl. JÄHNE 2002, S. 513). Nach diesem Prinzip glättet der Operator Closing_circle nach der Fusion zu größeren Objekten mit Regiongrowing_n die Regionenränder und schließt in diesen Regionen vorkommende Löcher. Für das Closing wird in diesem Fall eine Kreismaske verwendet, deren Variable ‚Radius‘ [in Pixeln] variiert wurde. Mit dem kreisförmigen Glättungs- und Schließungsfilter werden Störungen im Randbereich und innerhalb der Regionen entfernt, um die Ergebnisgeometrien der Schlagerkennung zu harmonisieren. Auch hier wird die beschriebene Umrechnung in Abhängigkeit von der geometrischen Auflösung durchgeführt, da mit dem Radius eine längenabhängige Variable geregelt wird.

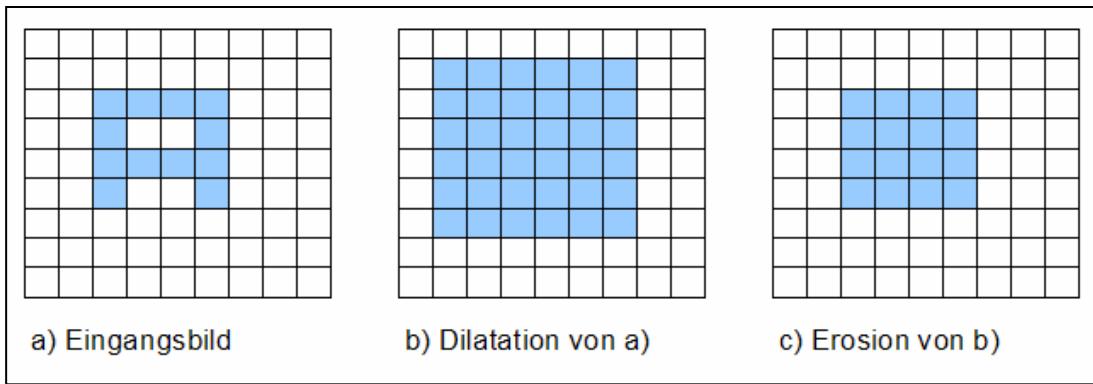


Abb. 4.20: Grundprinzip des Closing

Erosion_circle: Ausmaskierung der Regionenränder (Abkürzung: ec)

Als Vorbereitung für die Linienerkennung führt Erosion_circle eine im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Erosion (siehe Abb. 4.19) mit einer kreisförmigen Filtermaske durch. Hierbei wurde als zu variierende Variable der ‚Radius‘ des erodierenden Kreises [in Pixeln] gesteuert. Außerdem werden Objekte gelöscht, die eine geringere Fläche als die Erosionsmaske aufweisen. Die Segmentierungsstrategie von *SegmentationFields* vermutet noch nicht erkannte Schlaggrenzen innerhalb der Regionen, die mit einer Linienerkennung extrahiert werden. Da die Regionenränder bereits als Schlaggrenzen erkannt wurden, erfolgt durch die Erosion eine Ausmaskierung der Regionenränder. Dadurch wird erreicht, dass sich die nachfolgende Linienerkennung auf den Innenbereich der Regionen konzentriert. Auch die Werte der Variable ‚Radius‘ werden wie beschrieben an die geometrische Auflösung angepasst, da mit dem Radius erneut eine längenabhängige Variable variiert wird.

Lines_gauss: Erkennen von Linien und deren Breite (Abkürzung: lg)

Lines_gauss extrahiert Linien und gekrümmte lineare Strukturen aus den Bilddaten. Die Extraktion der Linien erfolgt anhand der Verfolgung eines Gradienten durch die Ableitung einer Gaußschen Glättungsmaske. Die Stärke der Glättung wird hierbei durch den Parameter ‚Sigma‘ bestimmt, der als Regelvariable verwendet wird. Sigma führt mit hohen Werten zu einer starken Glättung, was je nach Breite der gesuchten Linien die Lokalisation der Linien beeinflussen kann.

Ein Gradient stellt einen Vektor dar, der auf das stärkste Anwachsen der Grauwerte in der Umgebung eines Pixels zielt, wobei der Vektorbetrag die Größe der Zunahme darstellt, so dass sich eine Grauwertveränderung in eine beliebige Richtung errechnen lässt. Dazu nutzt man den Anstieg des Gradienten in Richtung des Vektors, was in einem höherdimensionalen Raum der sog. Richtungsableitung entspricht.

Für jeden Bildpunkt werden auf diesem Wege die Linienrichtung bestimmt und gefundene Linienpunkte zu Konturen zusammengeführt. Die Sicherheit der Erkennung als Linienbestandteil wird über Schwellwerte gesteuert, wobei die Regelvariable ‚High‘ den minimalen Schwellwert für eine sichere Zuordnung als Teil einer Linie darstellt. Punkte, deren zweite Richtungsableitung größer als der Schwellwert ‚High‘ ist, werden direkt als sicherer Bestandteil der Linie angenommen. Die besondere Bedeutung der Linienerkennung für die Segmentierung mit *Segmentation-Fields*, begründet sich durch die Ergänzung und Präzisierung des vorhergehenden Regionenwachstums und ist in Kapitel 4.3.4.1 erläutert.

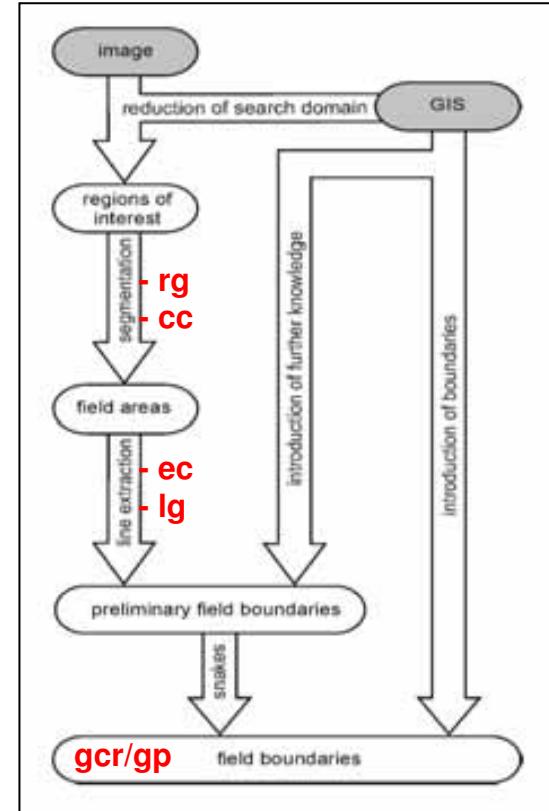


Abb. 4.21: Position der genutzten Operatoren im Programmablauf (Abkürzungen siehe Tab. 4.5) (Quelle: BUTENUTH ET AL. 2004, o. S., verändert)

Gen_contour_region_xld / Gen_polygons_xld: Vektorisierung der Polygone (Abkürzungen: gcr/gp)

Für die qualitative Beurteilung der Daten sowie für eine Weiternutzung in Geoinformationssystemen müssen die detektierten Grenzgeometrien im Vektorformat vorliegen. Dafür erzeugt Gen_contour_region_xld aus den abschließend extrahierten Regionen Außenkonturen, wobei je nach Belegung der Modusvariable ‚Mode‘ der Außenrand der als Rasterpunkte vorliegenden Außengrenze (border) oder der Mittelpunkt der Grenzlinie (center) dargestellt wird. Die aus der Vektorisierung resultierenden Effekte werden ausführlich in Kapitel 6.2.3 diskutiert.

Aus diesen Konturen werden mit Gen_polygons_xld Polygone berechnet, wobei für die Variable ‚Type‘ verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen. Durch das Verfahren nach RAMER werden die Konturen den Polygonen so angenähert, dass der Abstand eines Konturpunktes von der Polygonlinie maximal den Wert der Approximationsschwelle ‚Alpha‘ [in Pixeln] annimmt. Das Verfahren nach RAY nutzt keinen derartigen Näherungsschwellwert.

4.3.4 Einstellen der Parameter für die Gesamtszene

4.3.4.1 Parametertests in einem Bildausschnitt

Für die Auswahl der Parametereinstellungen für die Gesamtszene werden unter Verwendung der Kanäle Grün, Rot und Nahes Infrarot sowie der Feldblockgrenzen insgesamt 58 Varianten (komplette Liste: siehe Anhang B.2) mit unterschiedlichen Variablenwerten der in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Operatorengruppen in einem Ausschnitt des Untersuchungsgebietes berechnet. Der bereits für die Segmentierung mit *eCognition* beschriebene ca. 5,2 km² große Ausschnitt im Westen des Untersuchungsgebietes (siehe Abb. 4.15) umfasst 79 Feldblöcke, die den Segmentierungsprozess durchlaufen. Als Orientierung für die zu untersuchenden Wertintervalle dienen die Voreinstellungen im kommentierten *SegmentationFields*-Quellcode von BUTENUTH (2005, Quellcode) sowie die Beschreibung der Operatoren im HALCON-Tutorial (MVTec SOFTWARE GMBH, 2004). Eine genaue Aufstellung der berechneten Variationen ist in Tabelle 4.6 aufgeführt.

Tab. 4.6: Getestete Segmentierungseinstellungen im Bildausschnitt mit *SegmentationFields*

Operatorengruppe	Parameterwerte
Regiongrowing_n	1,88; 7,50; 15,63; 31,25; 62,50; 68,75; 75,00; 81,25; 87,50; 93,75; 100,00; 106,25; 112,50; 118,75; 125,00; 140,63; 156,25; 187,50 [in Pixeln]
Closing_circle	3,75; 11,25; 22,50 [in Pixeln]
Erosion_circle	0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00; 2,25; 2,50; 2,75; 3,00; 3,75 [in Pixeln]
Lines_gauss (sigma)	0,5; 0,7; 1,0; 1,3
Lines_gauss (high)	0,4; 0,8; 1,6; 3,2
Gen_contour_region_xld (mode)	center, border
Gen_polygons_xld (type)	Ramer, Ray
Gen_polygons_xld (alpha)	0,01; 0,1; 1,0; 2,0; 4,0 [in Pixeln]

Die Berechnung von arithmetischem Mittel, Median und Standardabweichung des Gesamtflächenfehlers F_G der Gesamtobjekterkennung (Schlag- und Abzugsflächen) in Bezug auf die Erosionsreferenzdaten wird für jede Segmentierungsvariation durchgeführt.

Aufgrund der Teilung in fünf unabhängige Operatorengruppen lässt sich die Parameterwertauswahl für die Gesamtszene nicht wie bei *eCognition* anhand der drei niedrigsten Mediane des Gesamtflächenfehlers F_G aller Variationen durchführen. Deshalb wird als Alternative folgendes Auswahlverfahren gewählt:

Die Linienerkennung mit dem Operator *Lines_gauss* stellt eine wichtige Komponente in der Segmentierungsstrategie mit *SegmentationFields* dar (siehe Abb. 4.21), da die zusätzliche Extraktion von Linien, die nicht durch die Wasserscheidensegmentierung gefunden wurden, einen erheblichen Einfluss auf die Vollständigkeit der Ergebnisgeometrien hat. Aus diesem Grunde werden aus dieser Operatorengruppe die Ergebniskombinationen mit den drei geringsten Gesamtflächenfehlern F_G (Median) für die Gesamterkennungsquote ausgewählt (siehe Tab. 4.7), deren Variablenwerte für die Berechnung der drei Varianten der Gesamtszene angewendet werden.

Die Einstellung der übrigen vier Operatorengruppen für die Gesamtszene erfolgt anhand des Variablenwerts mit dem niedrigsten Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Gesamterkennung (siehe Tab. 4.7) innerhalb der jeweiligen Gruppe. In den Fällen in denen zwei benachbarte Parameterwerte den gleichen Gesamtflächenfehler F_G (Median) aufweisen, wird das arithmetische Mittel der Variablenwerte, bei drei benachbarten identischen Werten der mittlere Variablenwert für die Gesamtszene genutzt. Die Auswahl der Einstellungen anhand des Medians wurde in Kapitel 4.1.3 begründet.

4.3.4.2 Umsetzung der Segmentierung für die Gesamtszene

Für die Berechnung der Gesamtszenen werden die besten Einstellungen für die Operatorengruppen *Regiongrowing_n*, *Closing_circle*, *Erosion_circle* und *Gen_contour_region_xld / Gen_polygons_xld* anhand des Gesamtflächenfehlers F_G (Median) der Segmentierung im kleineren Bildausschnitt in Bezug auf die Erosionsreferenzdaten ermittelt. Eine komplette Aufstellung aller im beschriebenen Bildausschnitt untersuchten Variationen und ihrer Gesamtflächenfehler befindet sich im Anhang in Tabelle B.2.

Für die Variable ‚MinSize‘ beim Regionenwachstum (Regiongrowing_n) haben sich Werte zwischen 75 Pixeln und 81,25 Pixeln als sinnvoll herausgestellt (siehe Tab. 4.7), da sich in diesem Bereich der geringste Gesamtflächenfehler F_G (Median) findet, so dass die optimale Mindestgröße der Ausgaberegionen bei ca. 0,13 ha liegt. Werte über 125 Pixeln zeigen deutlich schlechtere Fehlerwerte (siehe Anhang, Tab. B2).

Tab. 4.7: Minimum des Gesamtflächenfehlers F_G (Median) der Operatorengruppen (Gesamterkennung) und die für die Gesamtszene verwendeten Variablenwerte

Operatorengruppe	Median $F_{G\text{Min}}$	Variablenwert Gesamtszene
Regiongrowing_n	10,9 %	78,13 Pixel
Closing_circle	13,6 %	3,75 Pixel
Erosion_circle	11,6 %	1,75 Pixel
	11,3 %	0,5 (sigma), 0,4 (high)
Lines_gauss	11,6 %	1,0 (sigma), 0,4 (high)
	11,6 %	0,7 (sigma), 0,8 (high)
Gen_contour_region_xld	12,0 %	center (mode)
Gen_polygons_xld		ramer (type)
		1,0 Pixel (alpha)

Der Operator Closing_circle mit der Variable ‚Radius‘ weist bei 3,75 Pixeln den geringsten Gesamtflächenfehler F_G (Median) auf (siehe Anhang, Tab. B.2), so dass das Closing am Regionenrand in der Gesamtszene mit einem Radius von 15 m durchgeführt wird (siehe Tab. 4.7).

Bei Erosion_circle wird in der Gesamtszene mit einem Radius von 7 m gearbeitet (siehe Tab. 4.7), da sich für den Variablenwert von 1,75 Pixeln der geringste Gesamtflächenfehler F_G (Median) ergibt. Ein Radius unter 1,0 Pixeln bzw. über 2,25 Pixeln weist deutlich höhere Werte für F_G (Median) auf (siehe Anhang, Tab. B.2).

Die Vektorisierung wird für Gen_contour_region_xld mit den Einstellungen ‚center‘ für die Variable ‚mode‘ und ‚ramer‘ für die Variable ‚type‘ sowie für Gen_polygons_xld mit einer Approximationsschwelle von 1,0 Pixeln durchgeführt (siehe Tab. 4.7). Die Gesamtflächenfehlerwerte für die übrigen Varianten liegen deutlich höher (siehe Anhang, Tab. B.2).

Die Fehlerwerte der Linienerkennungsvariationen liegen relativ nah beieinander (11,32 bis 12,25 F_G (Median), siehe Anhang, Tab. B.2). Dennoch werden aufgrund der besonderen Bedeutung der Linienerkennung für die Segmentierungsstrategie mit *SegmentationFields* (siehe 4.3.2) die drei Einstellungsvariationen mit dem geringsten Gesamtflächenfehler F_G (Median) als Einstellungsvariationen für die drei Varianten der Gesamtszene ausgewählt (siehe Kap. 4.3.4.1).

Für den Operator Lines_gauss werden somit die Varianten 0,5 (sigma) und 0,4 (high), 1,0 (sigma) und 0,4 (high) sowie 0,7 (sigma) und 0,8 (high) gerechnet (siehe Tab. 4.7).

Aus dem beschriebenen Vorgehen resultieren für die Gesamtszene die in Tabelle 4.8 aufgeführten Varianten der Segmentierungseinstellungen, die im weiteren Text als Sgf1, Sgf2 und Sgf3 bezeichnet werden:

Tab. 4.8: Segmentierungsvariationen für die Gesamtszene mit *SegmentationFields*

Variante	rg1 [Pixel]	cc [Pixel]	ec [Pixel]	lg	gcr/gp
Sgf1	78,13	0,94	0,44	0,5 (sigma) 0,4 (high)	center (mode) ramer (type) 1,0 Pixel (alpha)
Sgf2	78,13	0,94	0,44	1,0 (sigma) 0,4 (high)	center (mode) ramer (type) 1,0 Pixel (alpha)
Sgf3	78,13	0,94	0,44	0,7 (sigma) 0,8 (high)	center (mode) ramer (type) 1,0 Pixel (alpha)

5 ERGEBNISSE DER SCHLAGEXTRAKTION

Das folgende Kapitel 5.1 gibt eine Übersicht über die Fehlerauswertung und beschreibt Besonderheiten, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten sind. In den darauffolgenden Kapiteln 5.2. und 5.3 werden die Ergebnisse der Fehlerberechnung bzgl. der Erosions- und InVeKoS-Referenz für die genutzten Programme *eCognition* und *SegmentationFields* gegenübergestellt. Es werden die Fehlerquoten der Schlag-, Abzugsflächen- und Gesamterkennung, die Werte der manuell ermittelten Fehlerkategorien und ergänzend die Einhaltung der InVeKoS-Schlagtoleranz dargestellt.

5.1 Einführung in die Fehlerauswertung und Ergebnisübersicht

In den Abbildungen 5.2 bis 5.13 sind die Ergebnisse der Segmentierung (gelbe Linien) mit *eCognition* (Eco1-3) und *SegmentationFields* (Sgf1-3) sowohl mit, als auch ohne eine Überlagerung durch Feldblockdaten (blau) dargestellt. Auf diesem Wege sind die tatsächlich extrahierten Grenzen erkennbar. Anschließend werden die Ergebnisse in einer tabellarischen Übersicht mit einer Gesamtübersicht ihrer Fehlerwerte bzgl. der Erosionsreferenz und der InVeKoS-Referenz dargestellt (siehe Tab. 5.1 u. 5.2). Die Aufstellung beinhaltet die Werte der Ergebnisflächen und der zugehörigen Referenzflächen bzgl. der Anzahl der gebildeten Segmente, der Flächengröße [in ha], des Umfangs [in km] und des Shape-Index (siehe Kap. 4.1). Außerdem sind Median, arithmetisches Mittel und Standardabweichung des internen (F_I), des externen (F_E) und des Gesamtflächenfehlers F_G [alle in %] (siehe Kap. 4.1.2) für die Schlag-, Abzugsflächen- und Gesamterkennung dargestellt.

Anschließend werden die Ergebnisse in den thematischen Zusammenhängen Erosionsberatung und InVeKoS in Bezug auf den Gesamtflächenfehler F_G in verschiedenen Aufgliederungen detailliert beschrieben (siehe Abb. 5.1). Für die Einordnung der sehr geringen Werte des internen Fehlers F_I und die starke Auswirkung des externen Fehlers F_E auf den Gesamtflächenfehler F_G ist u. U. die Beachtung der Fehlerdefinition in Kapitel 4.1.2 und die Diskussion der Ursachen in Kapitel 6.1.5 hilfreich.

Um die als Zielsetzung der Arbeit definierte Extraktion von Schlagflächen zu bewerten, wird zunächst der Gesamtflächenfehler der Schlagerkennung getrennt von dem der Abzugsflächenerkennung beschrieben. Für die Schlagerkennung wird außerdem die Häufigkeitsverteilung des Gesamtflächenfehlers F_G erläutert. Abschließend wird eine Gesamterkennungsquote angegeben, die beide Flächenarten zusammenführt. Die Erkennung bzgl. der Themenbereiche Erosion und InVeKoS

wird mit den in Kapitel 4.1.4 definierten Fehlerkategorien beschrieben. Die Abschnitte über die Erkennung im Rahmen von InVeKoS enthalten zusätzlich eine Übersicht, wie oft die in Kapitel 4.1.5 definierte InVeKoS-Schlagtoleranz eingehalten wurde.

Bei Betrachtung der Aufgliederung in Schlag-, Abzugsflächen- und Gesamterkennung ist zu berücksichtigen, dass die Erkennung großflächiger Schlaggeometrien den Kern der Segmentierungsstrategien von *eCognition* und *SegmentationFields* darstellt (siehe Kap. 4.2.4 u. 4.3.2). Entsprechend ist für die Einschätzung der Anwendbarkeit der Methoden *eCognition* und *SegmentationFields* für die Erosionsberatung der Gesamtflächenfehler F_G der Schlagerkennung mit einer wesentlich höheren Gewichtung gegenüber dem Gesamtflächenfehler F_G der Abzugsflächenerkennung aufzufassen. Dieses wird mit der Gegenüberstellung des Verhältnisses von 917 Schlagflächen zu lediglich 52 Abzugsflächen in der Erosionsreferenz (siehe Tab. 4.1) unterstrichen.

Der Schlagerkennungsquote ist zwar auch bei Betrachtung der Anwendbarkeit für InVeKoS die höhere Aussagekraft über die Segmentierungsqualität zuzusprechen, jedoch muss beachtet werden, dass bei den Subventionskontrollen durch Fernerkundung die Bildung und Erkennung von Abzugsflächen eine Grundvoraussetzung darstellt. Dieses wird an dem Anteil der Abzugsflächen von 30 % an der Gesamtzahl aller Flächen deutlich. Bei der Anwendbarkeit für die InVeKoS-Kontrollen nimmt der Gesamtflächenfehler F_G der Abzugsflächenerkennung somit einen höheren Stellenwert ein, da durch die wesentlich detailliertere Abgrenzung den 977 Schlagflächen die deutlich höhere Zahl von 439 Abzugsflächen in der InVeKoS-Referenz (siehe Tab. 4.1) gegenübersteht.

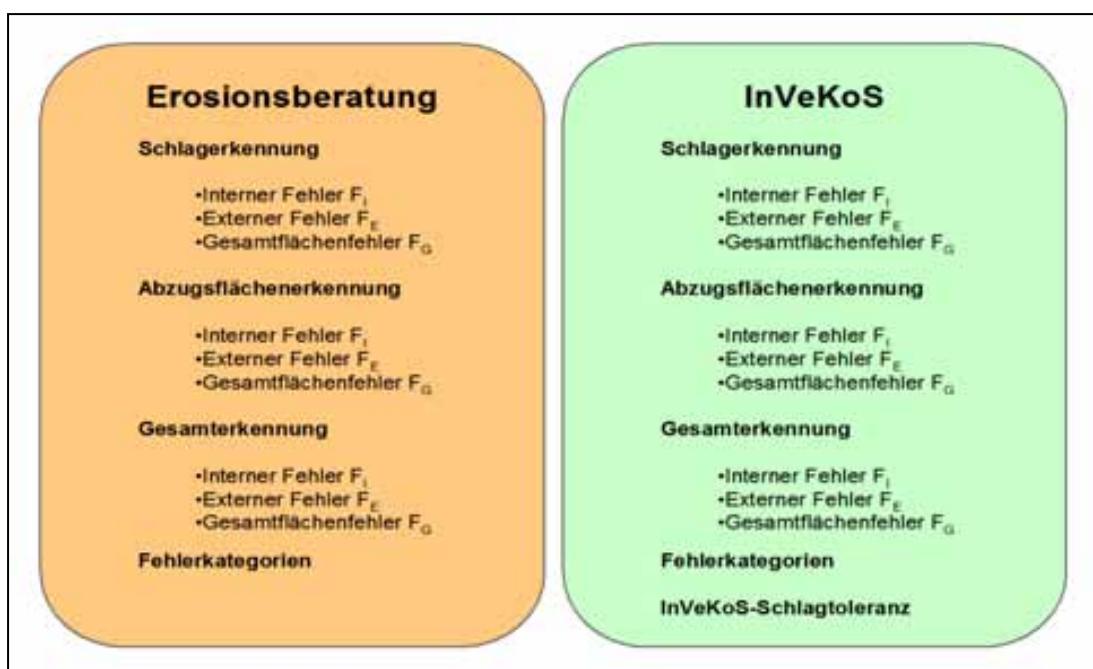


Abb. 5.1: Darstellung der Aufgliederung der Ergebnisbeschreibung

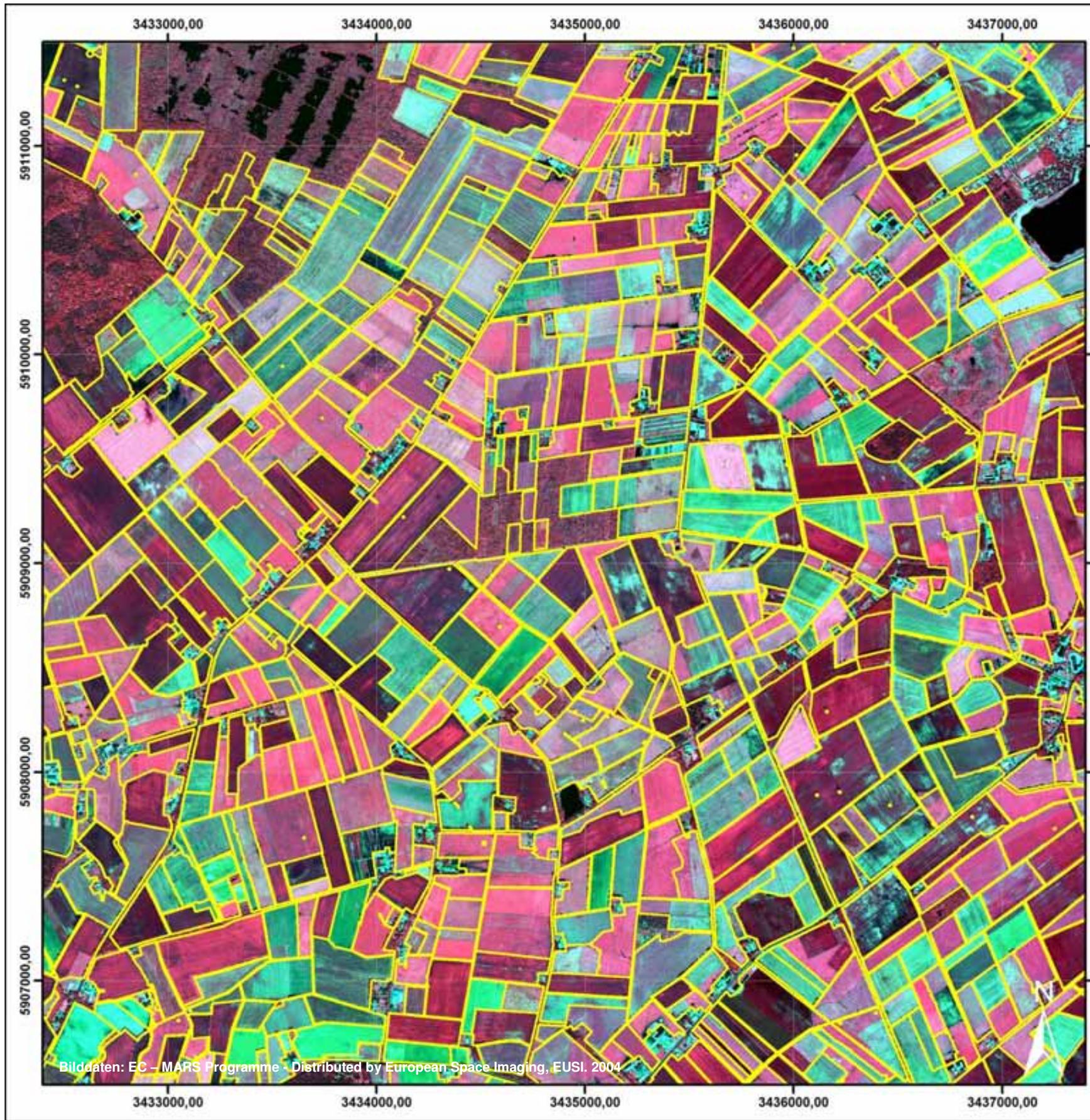


Abb. 5.2: Ergebnis der Segmentierung (Eco1) mit eCognition (gelb) (EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

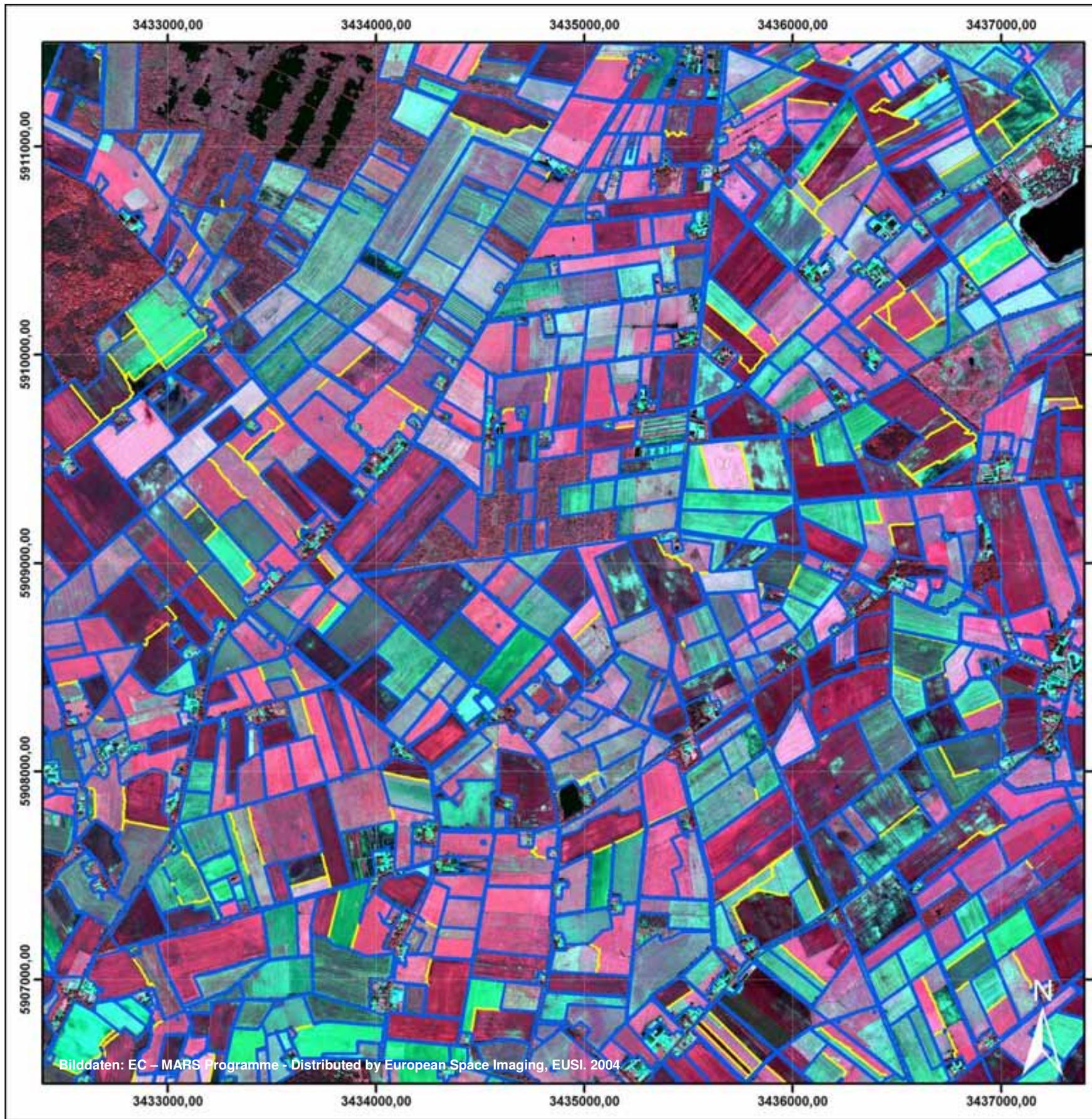


Abb. 5.3: Ergebnis der Segmentierung (Eco1) mit eCognition (gelb) und überlagerten Feldblockdaten (blau)
(EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

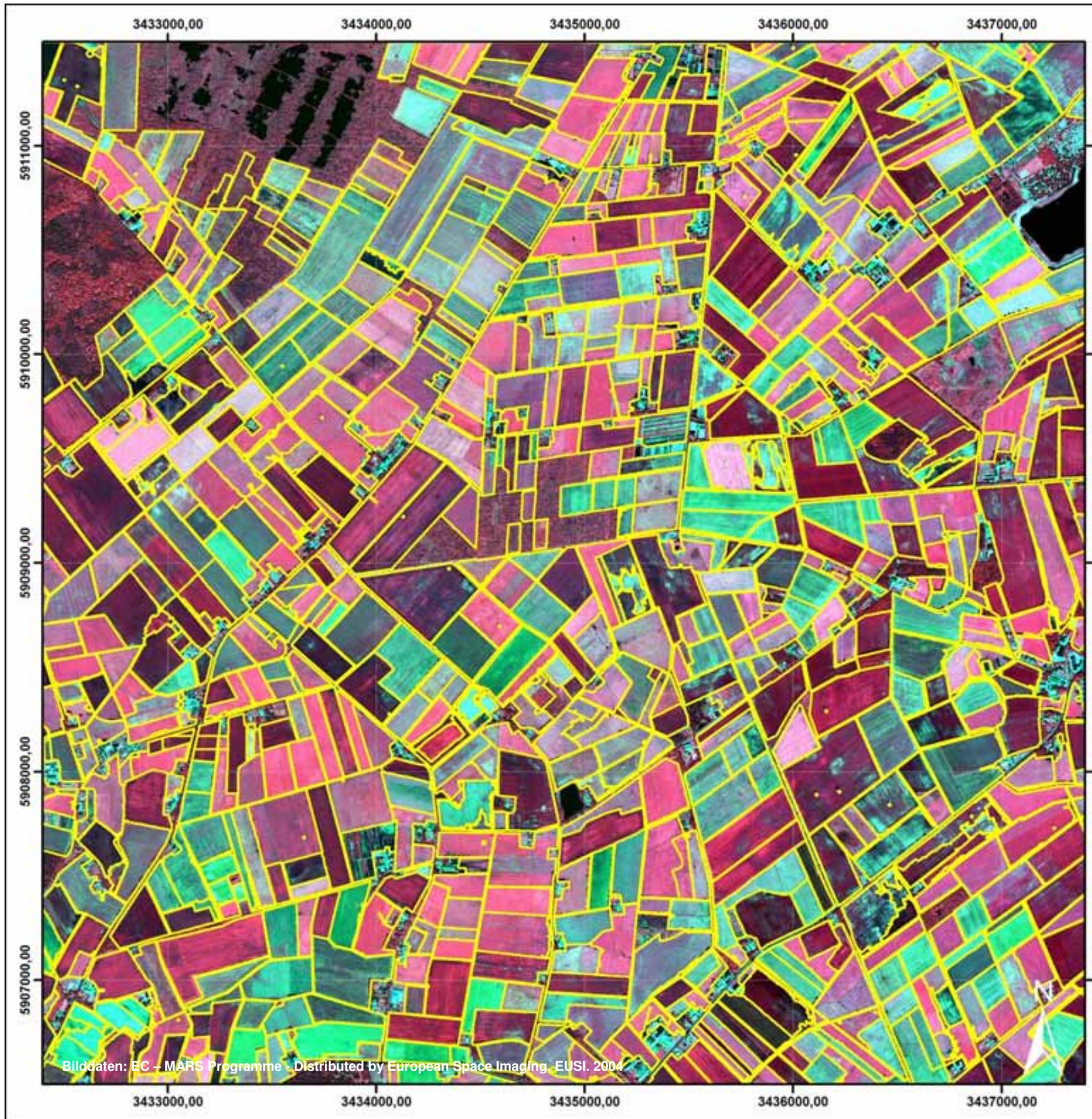


Abb. 5.4: Ergebnis der Segmentierung (Eco2) mit eCognition (gelb) (EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

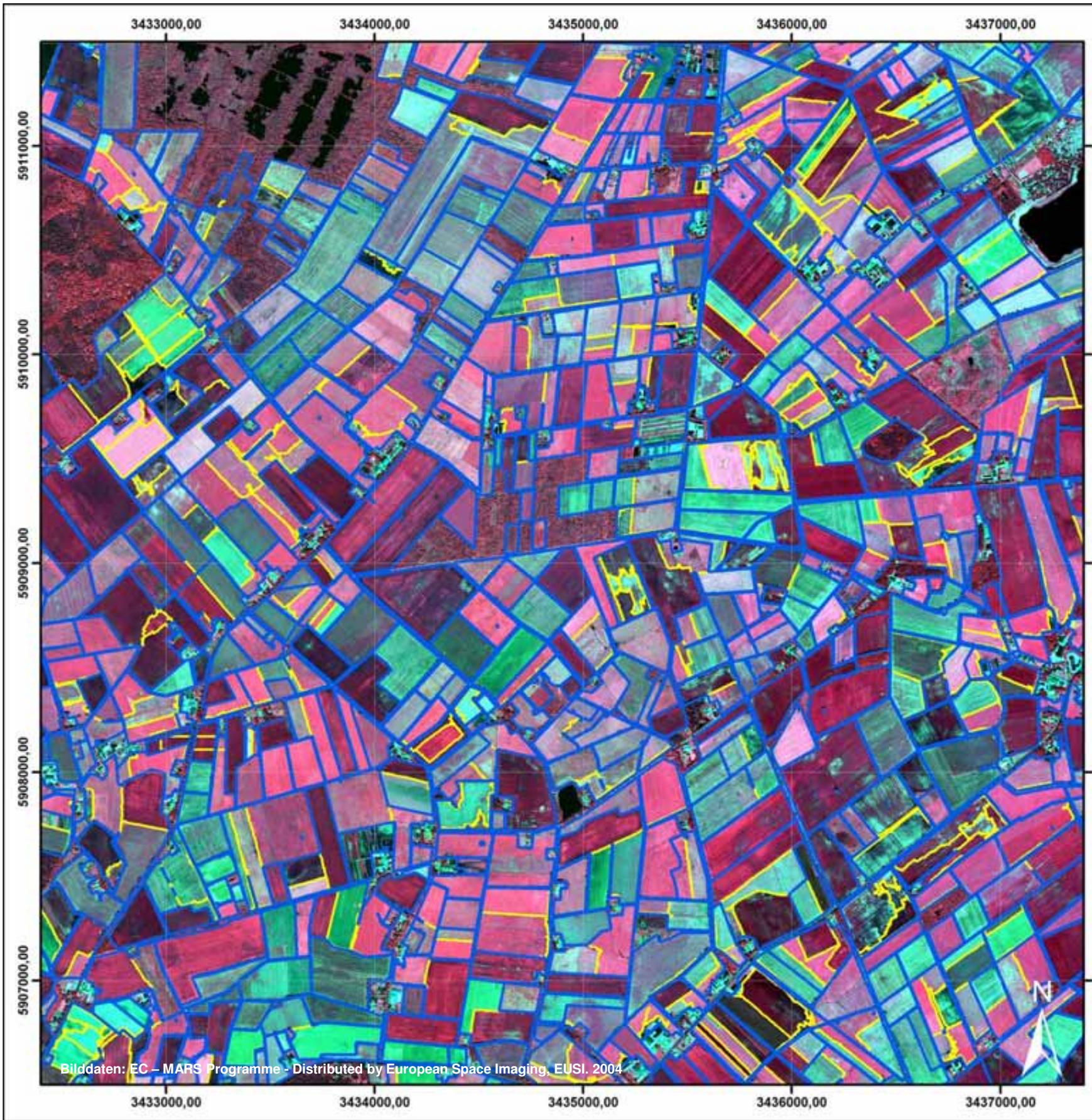


Abb. 5.5: Ergebnis der Segmentierung (Eco2) mit eCognition (gelb) und überlagerten Feldblockdaten (blau)
(EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

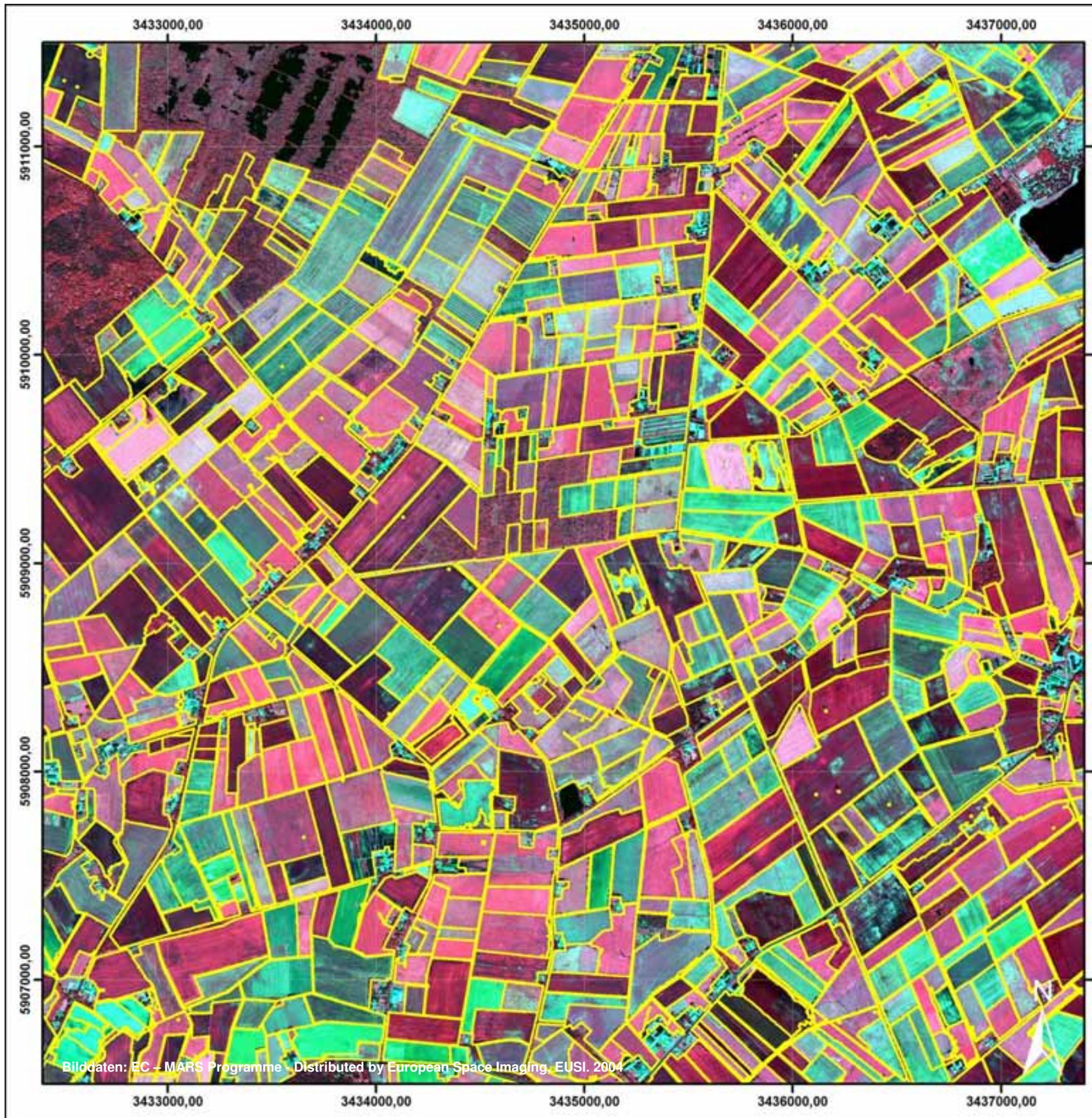


Abb. 5.6: Ergebnis der Segmentierung (Eco3) mit eCognition (gelb) (EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

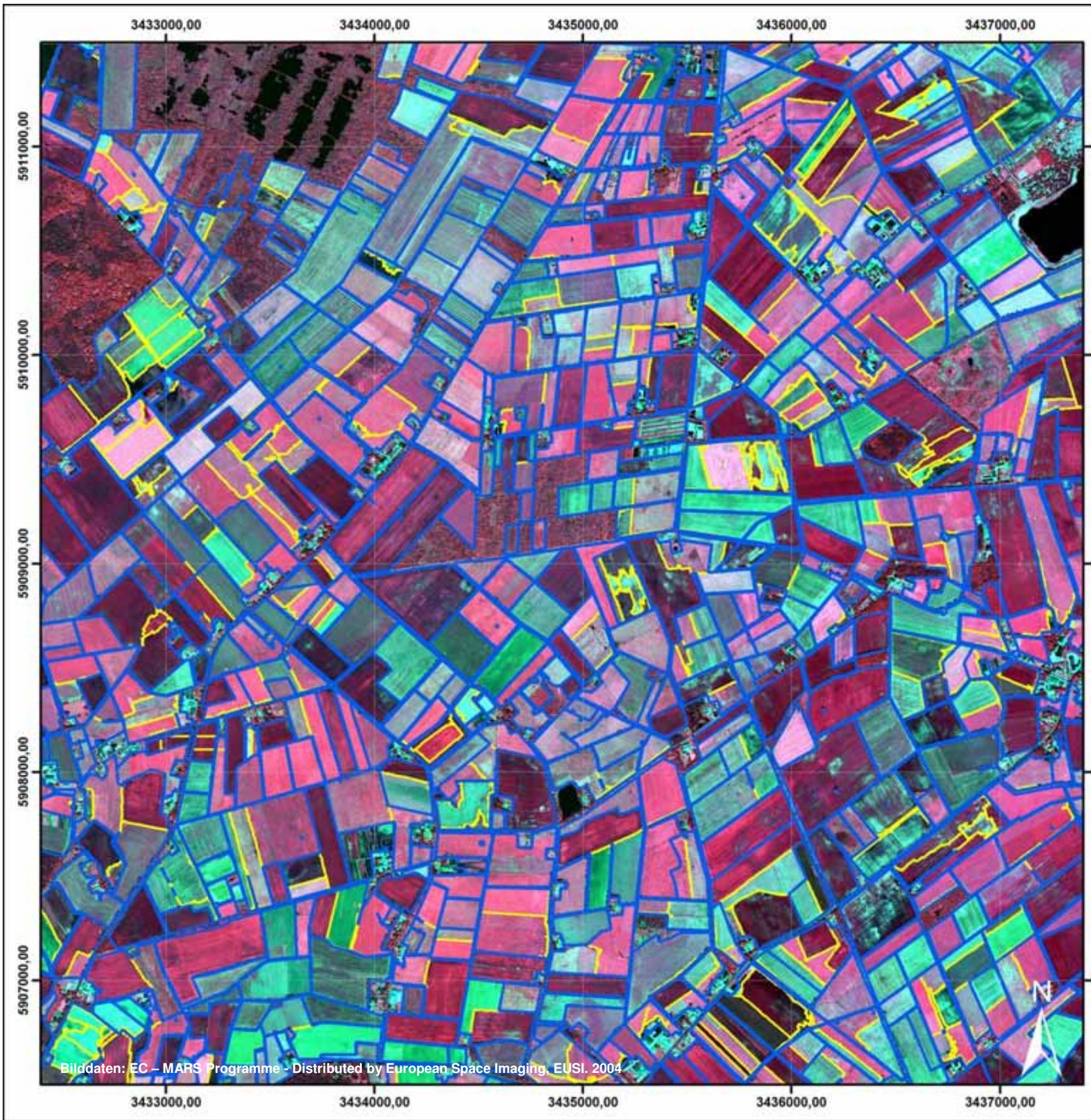


Abb. 5.7: Ergebnis der Segmentierung (Eco3) mit eCognition (gelb) und überlagerten Feldblockdaten (blau)
(EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

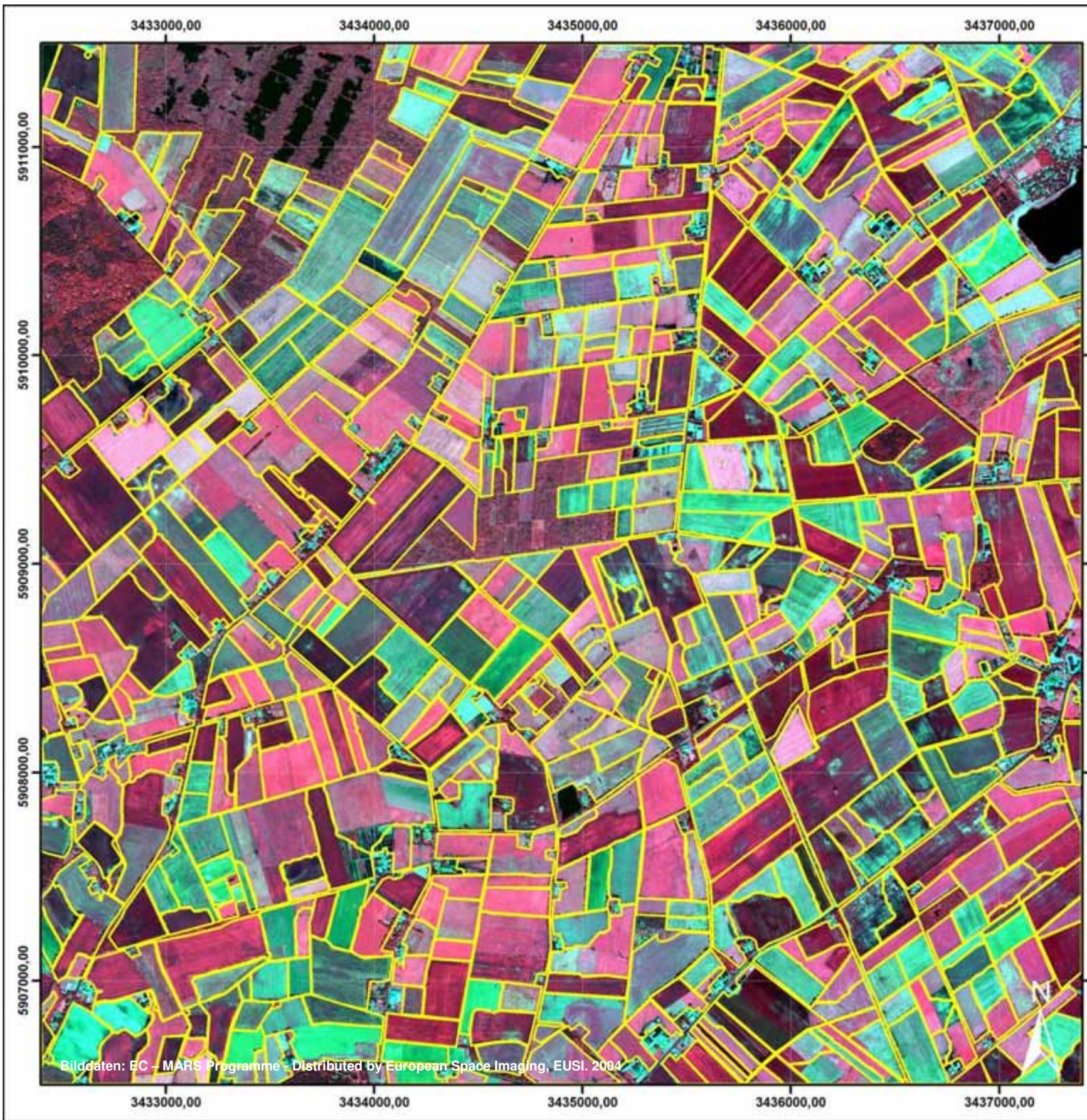


Abb. 5.8: Ergebnis der Segmentierung (Sgf1) mit SegmentationFields (gelb) (EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

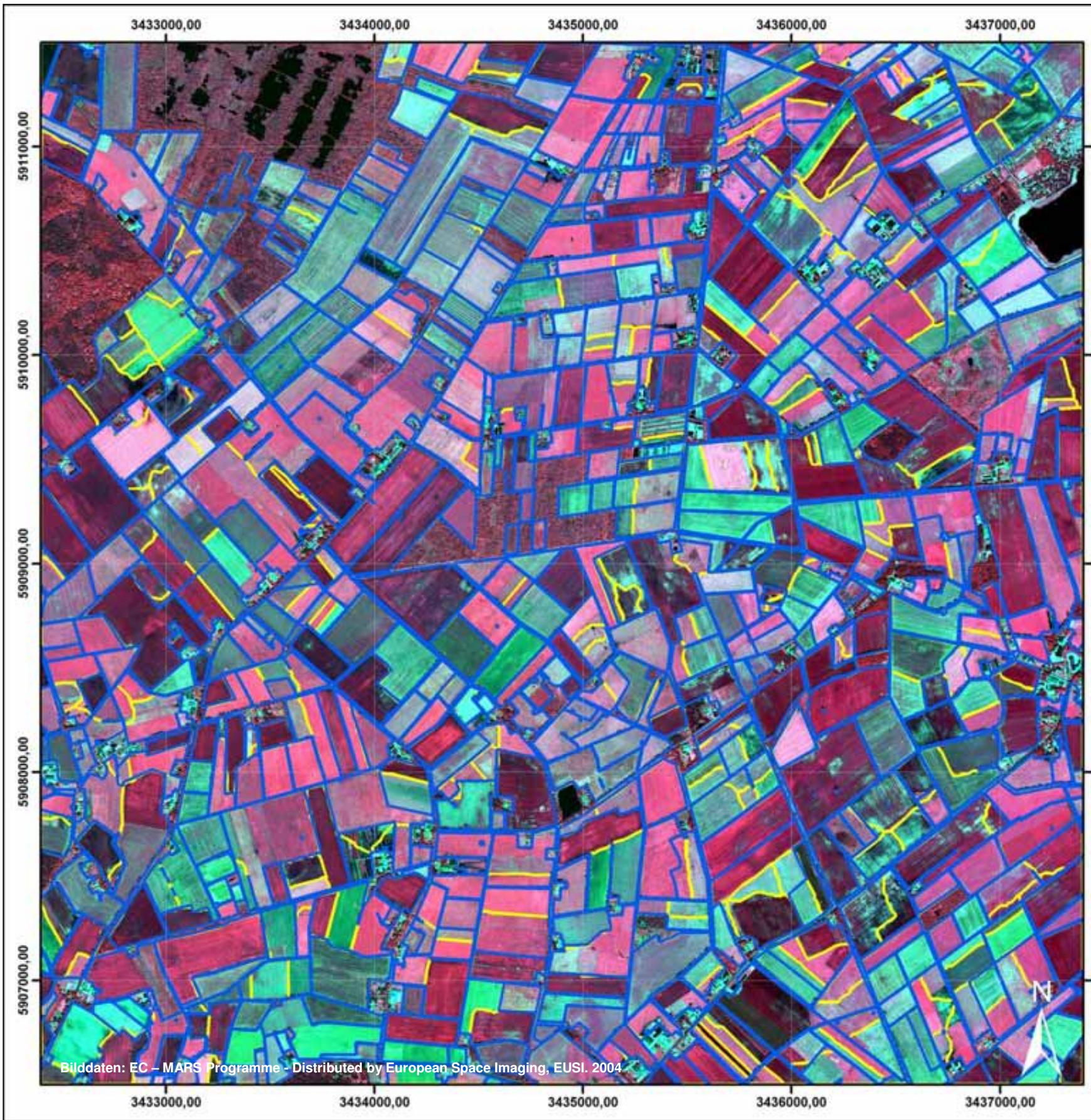


Abb. 5.9: Ergebnis der Segmentierung (Sgf1) mit SegmentationFields (gelb) und überlagerten Feldblockdaten (blau)
(EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)



Abb. 5.10: Ergebnis der Segmentierung (Sgf2) mit SegmentationFields (gelb) (EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

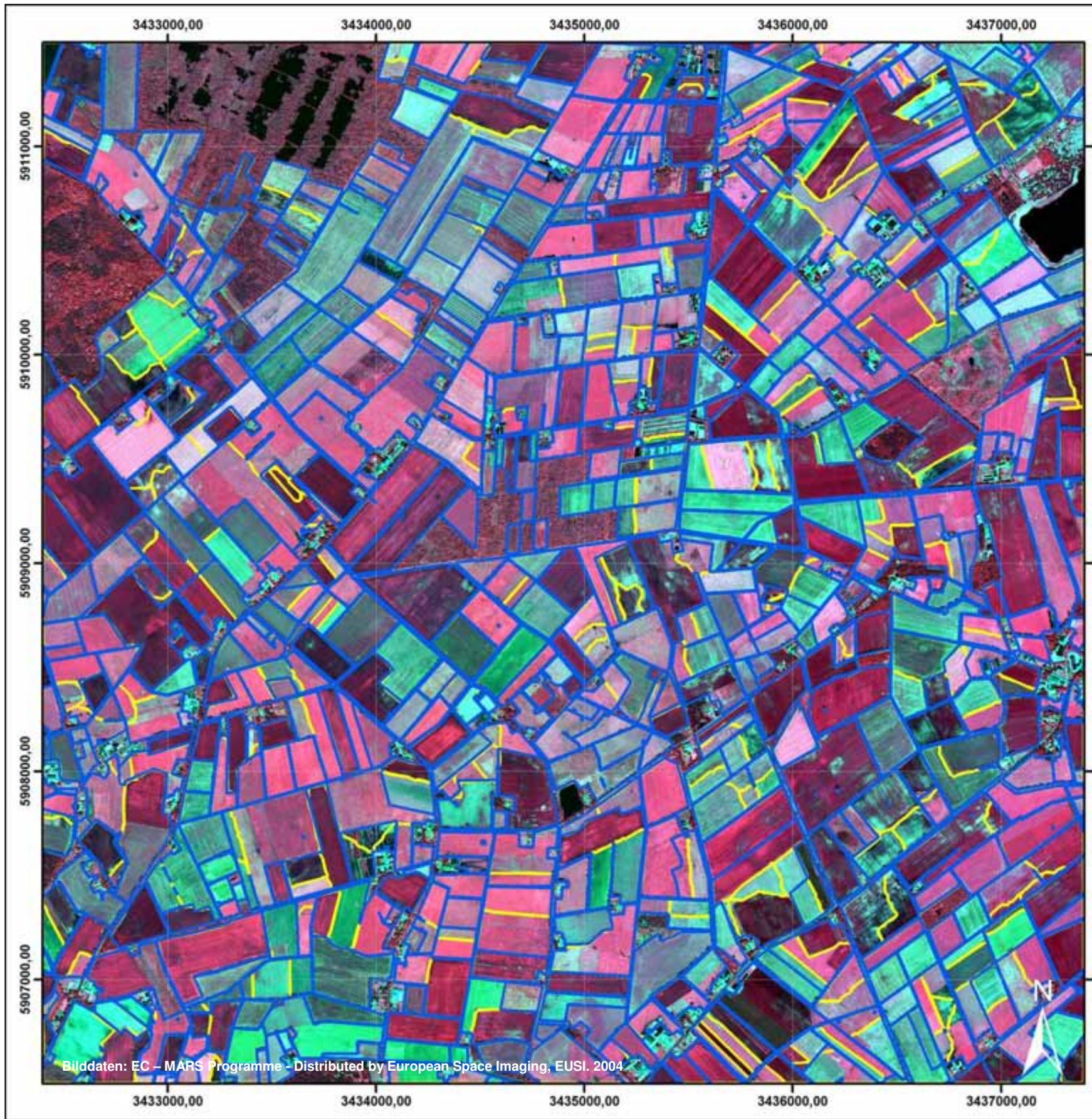


Abb. 5.11: Ergebnis der Segmentierung (Sgf2) mit SegmentationFields (gelb) und überlagerten Feldblockdaten (blau)
(EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

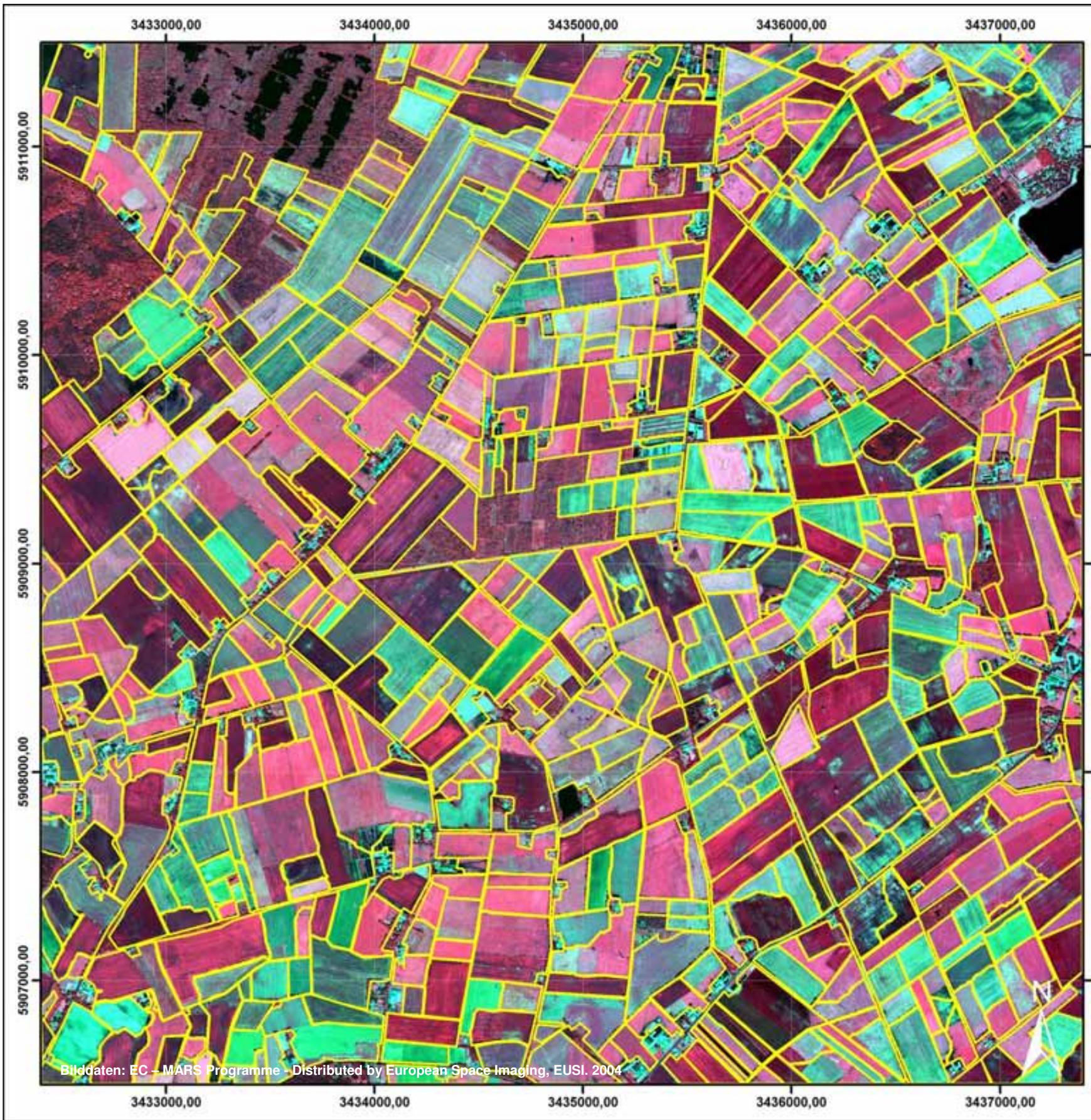


Abb. 5.12: Ergebnis der Segmentierung (Sgf3) mit SegmentationFields (gelb) (EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

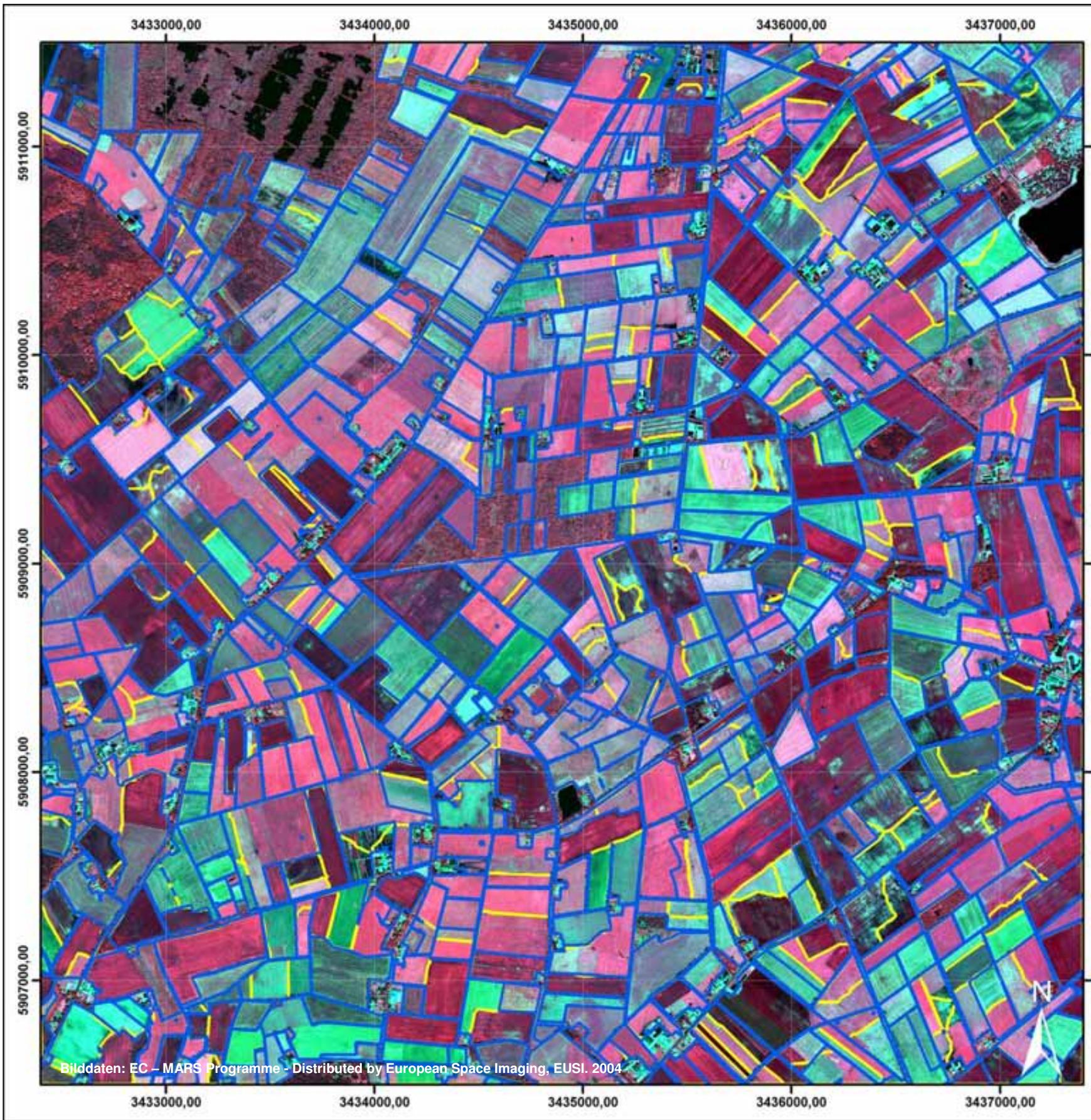


Abb. 5.13: Ergebnis der Segmentierung (Sgf3) mit SegmentationFields (gelb) und überlagerten Feldblockdaten (blau)
(EUROPEAN SPACE IMAGING 2004, verändert)

Ergebnisübersicht Gesamtszene – Erosion

Tab. 5.1: Gesamtübersicht: Flächenfehlerwerte bzgl. der Erosionsreferenz

	Eco1	Eco2	Eco3	Sgf1	Sgf2	Sgf3	Referenz Erosion
Segmentanzahl	724	967	933	643	646	647	969
davon Schlagflächen				nicht differenziert			917
davon Abzugsflächen				nicht differenziert			52
Fläche [ha]	2006,24	2006,24	2006,24	1963,67	1963,51	1963,58	2010,48
Umfang [km]	708,34	900,99	876,01	496,14	496,88	497,29	599,44
Shape-Index	39,54	50,29	48,89	27,99	28,03	28,06	33,42
1. Schlagerkennung							
Interner Fehler F_I							
Median F _I [%]	1,52	2,10	2,00	3,07	3,10	3,11	x
Mittelwert F _I [%]	3,02	5,73	5,30	8,11	8,09	8,23	x
Standardabweichung F _I [%]	6,17	10,51	10,04	14,04	13,95	14,36	x
Externer Fehler F_E							
Median F _E [%]	3,89	2,10	2,15	14,81	13,10	13,95	x
Mittelwert F _E [%]	255,94	112,21	123,07	377,30	381,28	380,80	x
Standardabweichung F _E [%]	1278,68	455,43	475,65	1718,36	1732,73	1731,69	x
Gesamtflächenfehler F_G							
Median F _G [%]	9,04	6,93	6,86	27,45	25,56	26,87	x
Mittelwert F _G [%]	258,95	117,94	128,38	385,41	389,37	389,03	x
Standardabweichung F _G [%]	1278,93	455,68	475,92	1719,12	1733,46	1732,42	x
2. Abzugsflächenerkennung							
Interner Fehler F_I							
Median F _I [%]	1,95	4,63	4,63	5,60	5,77	5,31	x
Mittelwert F _I [%]	4,03	6,13	5,94	13,90	13,67	13,31	x
Standardabweichung F _I [%]	5,13	6,24	6,08	18,27	18,09	17,82	x
Externer Fehler F_E							
Median F _E [%]	1626,18	661,23	697,97	2247,93	2301,11	2069,29	x
Mittelwert F _E [%]	3568,20	1621,95	1821,89	3904,87	3988,29	3872,18	x
Standardabweichung F _E [%]	4651,84	2590,86	2730,76	4273,45	4288,18	4290,67	x
Gesamtflächenfehler F_G							
Median F _G [%]	1627,28	673,02	700,65	2258,38	2309,56	2074,08	x
Mittelwert F _G [%]	3572,23	1628,08	1827,83	3918,78	4001,96	3885,49	x
Standardabweichung F _G [%]	4652,80	2591,42	2731,45	4273,03	4287,70	4290,20	x
3. Gesamterkennung							
Interner Fehler F_I							
Median F _I [%]	1,52	2,16	2,03	3,12	3,16	3,14	x
Mittelwert F _I [%]	3,07	5,75	5,34	8,41	8,38	8,50	x
Standardabweichung F _I [%]	6,13	10,32	9,87	14,34	14,24	14,60	x
Externer Fehler F_E							
Median F _E [%]	5,95	2,25	2,35	21,27	18,62	18,87	x
Mittelwert F _E [%]	433,87	193,31	214,33	562,55	570,71	563,96	x
Standardabweichung F _E [%]	1801,85	816,25	868,46	2087,46	2106,94	2096,32	x
Gesamtflächenfehler F_G							
Median F _G [%]	12,23	7,67	7,52	33,98	33,69	33,97	x
Mittelwert F _G [%]	436,94	199,06	219,67	570,97	579,09	572,45	x
Standardabweichung F _G [%]	1802,24	816,52	868,78	2088,50	2107,94	2097,26	x

Ergebnisübersicht Gesamtszene – InVeKoS

Tab. 5.2: Gesamtübersicht: Flächenfehlerwerte bzgl. der InVeKoS-Referenz

	Eco1	Eco2	Eco3	Sgf1	Sgf2	Sgf3	Referenz InVeKoS
Segmentanzahl	724	967	933	643	646	647	1416
davon Schlagflächen				nicht differenziert			977
davon Abzugsflächen				nicht differenziert			439
Fläche [ha]	2006,24	2006,24	2006,24	1963,67	1963,51	1963,58	2010,16
Umfang [km]	708,34	900,99	876,01	496,14	496,88	497,29	737,49
Shape-Index	39,54	50,29	48,89	27,99	28,03	28,06	41,12
1. Schlagerkennung							
Interner Fehler F_I							
Median F _I [%]	1,47	1,98	1,88	2,89	2,92	2,95	x
Mittelwert F _I [%]	2,88	5,13	4,80	8,03	7,96	8,08	x
Standardabweichung F _I [%]	6,15	9,90	9,47	14,13	14,07	14,34	x
Externer Fehler F_E							
Median F _E [%]	10,55	3,69	3,91	26,58	22,57	23,51	x
Mittelwert F _E [%]	448,83	311,63	324,91	748,68	737,07	752,65	x
Standardabweichung F _E [%]	1658,61	1490,52	1499,51	4617,00	4543,77	4623,08	x
Gesamtflächenfehler F_G							
Median F _G [%]	16,76	9,19	9,31	39,32	37,94	38,51	x
Mittelwert F _G [%]	451,71	316,76	329,71	756,70	745,02	760,73	x
Standardabweichung F _G [%]	16,59	14,90	14,99	46,20	45,47	46,26	x
2. Abzugsflächenerkennung							
Interner Fehler F_I							
Median F _I [%]	1,23	2,11	1,90	3,49	3,46	3,32	x
Mittelwert F _I [%]	7,50	9,82	9,33	16,31	15,53	16,01	x
Standardabweichung F _I [%]	13,31	14,89	14,53	22,82	21,92	22,41	x
Externer Fehler F_E							
Median F _E [%]	5860,89	3906,90	4067,63	6561,61	6652,03	6561,61	x
Mittelwert F _E [%]	19557,62	14805,06	15080,54	24212,08	24754,11	24384,39	x
Standardabweichung F _E [%]	84753,25	71719,80	71850,73	90107,50	90565,59	90622,41	x
Gesamtflächenfehler F_G							
Median F _G [%]	5861,65	3907,88	4076,69	6603,51	6652,03	6561,62	x
Mittelwert F _G [%]	19565,11	14814,87	15089,88	24228,39	24769,65	24400,41	x
Standardabweichung F _G [%]	84752,86	71718,97	71849,97	90105,87	90563,94	90620,76	x
3. Gesamterkennung							
Interner Fehler F_I							
Median F _I [%]	1,45	1,99	1,89	2,99	3,03	3,03	x
Mittelwert F _I [%]	4,32	6,59	6,22	10,56	10,27	10,51	x
Standardabweichung F _I [%]	9,25	11,88	11,48	17,65	17,20	17,58	x
Externer Fehler F_E							
Median F _E [%]	158,75	42,23	58,53	195,86	191,29	66,35	x
Mittelwert F _E [%]	6377,29	4808,19	4902,82	7904,32	8048,97	4909,03	x
Standardabweichung F _E [%]	48011,76	40494,87	40587,17	51024,50	51277,65	40587,11	x
Gesamtflächenfehler F_G							
Median F _G [%]	160,98	56,71	66,35	207,35	196,88	197,69	x
Mittelwert F _G [%]	6381,61	4814,78	4909,03	7914,88	8059,24	7964,72	x
Standardabweichung F _G [%]	48011,95	40494,78	40587,11	51024,63	51277,71	51299,44	x
4. InVeKoS-Schlagtoleranz							
eingehalten [%]	33,14	44,10	42,97	29,29	30,07	29,87	x

5.2 Erosion

5.2.1 Gesamtflächenfehler Schlagerkennung

eCognition

Die Schlagerkennung mit *eCognition* weist in Bezug auf die Erosionsreferenz einen Gesamtflächenfehler F_G (Median) von 9,04 % (Eco1), 6,93 % (Eco2) und 6,86 % (Eco3) auf (vgl. Abb. 5.14). Die Trennung von F_G in einen internen und einen externen Fehler (F_I und F_E) stellt folgende Verhältnisse dar: Bei Eco1-3 ist der Median von F_I im Vergleich zu F_G sehr viel kleiner (1,52 %, 2,10 % und 2,00 %). Der Median von F_E liegt bei 3,89 % (Eco1), 2,10 % (Eco2) und 2,15 % (Eco3).

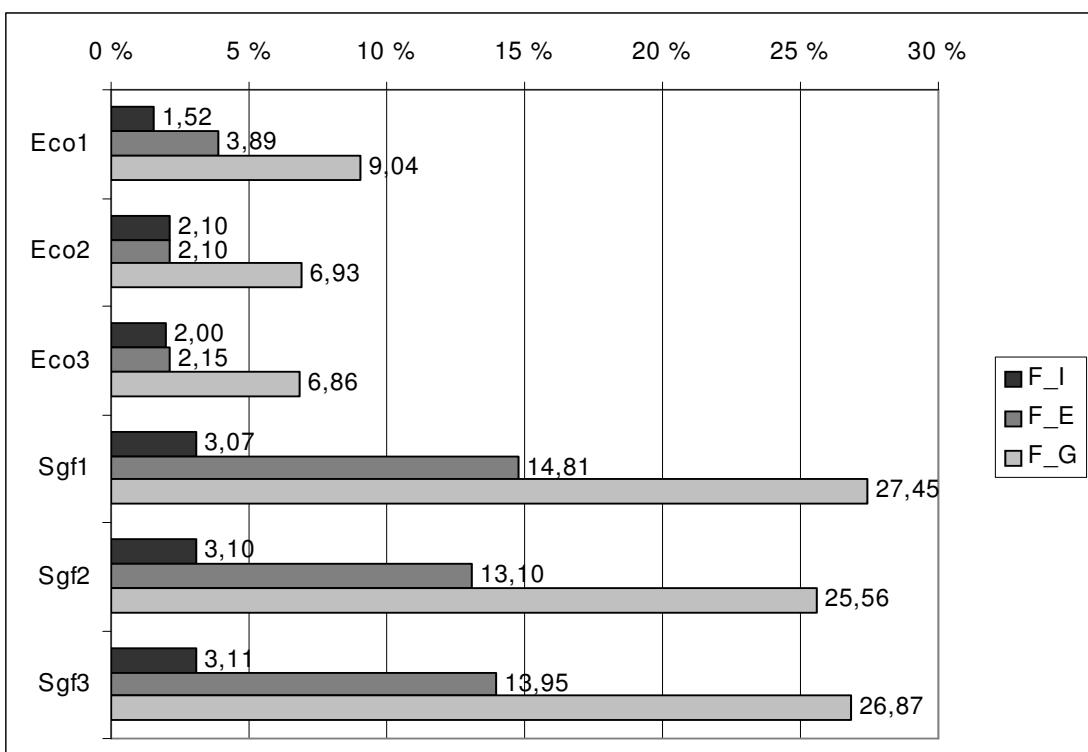


Abb. 5.14: F_I , F_E , F_G (Median) der Schlagerkennung mit *eCognition* und SegmentationFields (Erosion)

Abbildung 5.1.5 stellt die Häufigkeitsverteilung der Fehlerwerte der *eCognition*-Variationen bzgl. aller Referenzflächen in 11 Klassen dar, von denen die erste bei 0 % beginnt und die letzte Klasse alle Werte zusammenfasst, die größer oder gleich 100 % sind. Es zeigt sich, dass über die Hälfte der Referenzflächen bzgl. der Segmentierungsergebnisse von *eCognition* einen geringen Gesamtflächenfehler zwischen 0 % und 10 % aufweist (vgl. Abb. 5.15). Im Gegensatz dazu liegen bis zu 29,8 % (Eco1) im Bereich eines sehr schlechten Ergebnisses mit Werten über 100 %.

Die Klassen zwischen 10 % und 100 % weisen mit nur wenigen Prozentpunkten einen geringen Häufigkeitsanteil auf. Lediglich die Klasse von 10 % bis < 20 % zeigt mit 5,0 % (Eco1) bis 7,6 % (Eco2) höhere Anteilswerte.

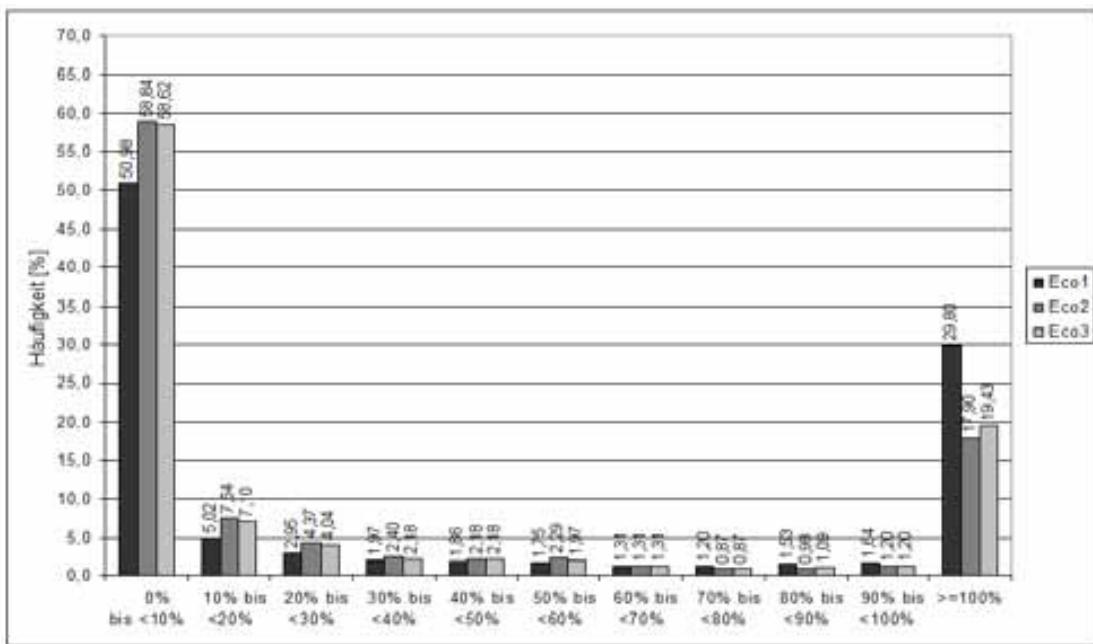


Abb. 5.15: Häufigkeitsverteilung F_G (Eco1-3), Schlagerkennung Erosion [in %] (11 Klassen: 0 % bis >=100 %)

Betrachtet man die in Abbildung 5.16 dargestellte Häufigkeitsverteilung über die gesamte Spannweite der Fehlerverteilung von Eco1 in 25 gleich großen Klassen, so häufen sich die Fehler in einem Bereich von 0 % bis 1.070 %. Die hohen Werte von über 5.347 % spielen für die Häufigkeitsverteilung eine untergeordnete Rolle.

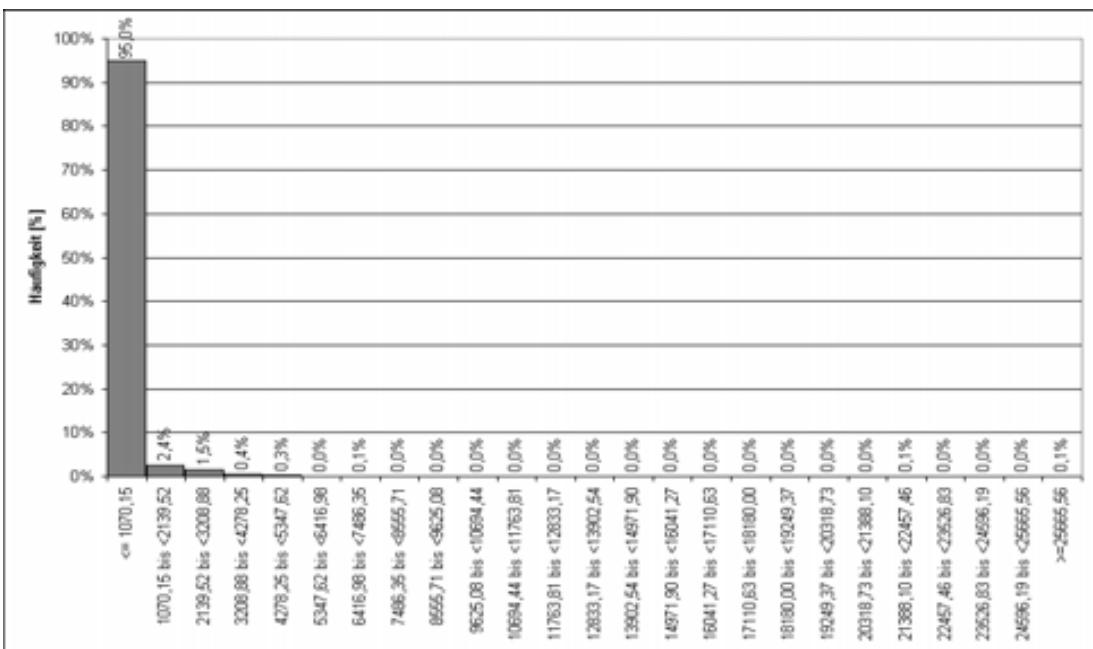


Abb. 5.16: Häufigkeitsverteilung F_G (Eco1) Schlagerkennung Erosion (25 Klassen über die gesamte Spannbreite) [in %]

Lediglich die Klasse von ca. 1.070 % bis ca. 2.140 % weist gegenüber den höheren Klassen noch einen relevanten Anteil von 2,4 % auf. Die Häufigkeitsverteilung von F_G weist in allen Ergebnisvariationen von *eCognition* und *SegmentationFields* sehr ähnliche Verläufe auf und wird an dieser Stelle nur exemplarisch als Erläuterung der Gesamtflächenfehlerwerte über die gesamte Spannweite der Verteilung aufgeführt.

SegmentationFields

Der Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Schlagerkennung mit *SegmentationFields* in Bezug auf die Erosionsreferenz liegt bei 27,45 % (Sgf1), 25,56 % (Sgf2) und 26,87 % (Sgf3) (vgl. Abb. 5.14). Bei der Betrachtung von internem und externem Fehler (F_I und F_E) zeigt sich bei Sgf1-3 für F_I ein Median von (3,07 %, 3,10 % und 3,11 %). Der Median von F_E hingegen liegt mit 14,81 % (Sgf1), 13,10 % (Sgf2) und 13,95 % (Sgf3) zwischen F_I und F_G .

Bei rund einem Drittel aller Referenzflächen tritt bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilung des Gesamtflächenfehlers F_G der *SegmentationFields*-Ergebnisse Sgf1-3 ein geringer Wert zwischen 0 % und 10 % auf (vgl. Abb. 5.17). Ein weiteres Drittel der Referenzflächen liegt im Wertebereich von über 100 % für F_G . Die Verteilung in den Klassen zwischen 20 % und 100 % zeigt Prozentwerte, die nie einen Anteil von 5 % übersteigen. Lediglich die Klasse von 10 % bis < 20 % setzt sich erneut mit 10,7 % (Eco3), 11,0 % (Eco1) und 11,4 % (Eco2) klar von den niedriganteiligen Klassen ab.

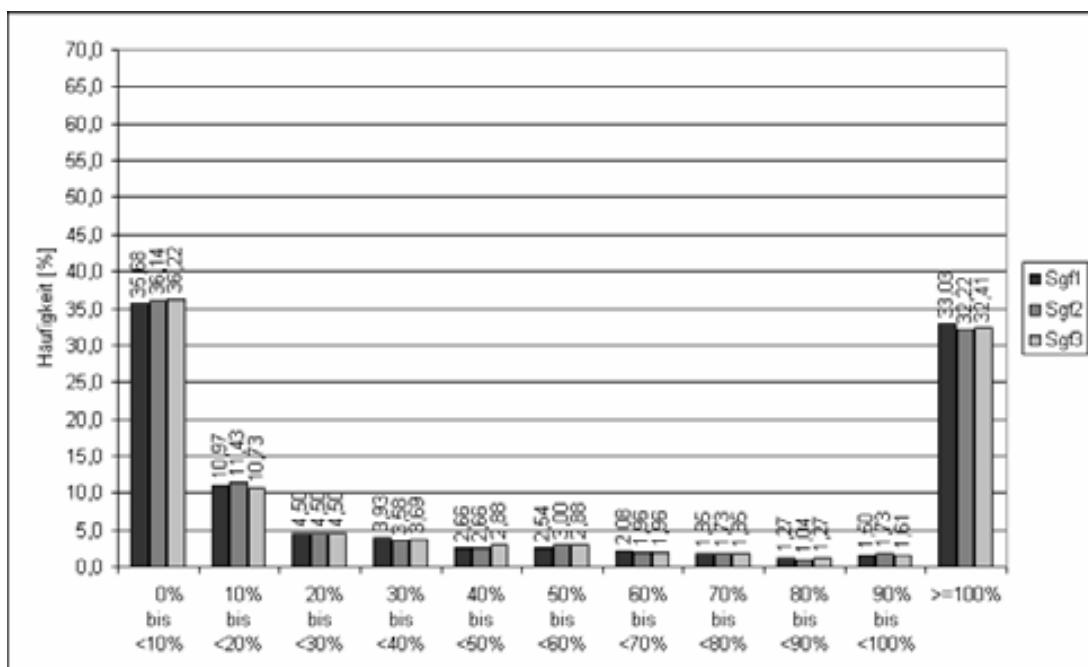


Abb. 5.17: Häufigkeitsverteilung F_G (Sgf1-3), Schlagerkennung Erosion [in %] (11 Klassen: 0 % bis >=100 %)

5.2.2 Gesamtflächenfehler Abzugsflächenerkennung

eCognition

Die Abzugsflächenerkennung von *eCognition* liegt in Bezug auf den Gesamtflächenfehler F_G (Median) bei der Erosionsreferenz bei 1.627,28 % (Eco1), 6.730,20 % (Eco2) und 700,65 % (Eco3) (vgl. Abb. 5.18). Betrachtet man die Komponenten F_I und F_E des Gesamtflächenfehlers F_G , so ist der Median von F_I bei Eco1-3 im Vergleich zu F_G sehr viel niedriger (1,95 %, 4,63 % und 4,63 %), der Median von F_E hingegen ist mit 1.626,18 % (Eco1), 661,23 % (Eco2) und 697,97 % (Eco3) nahezu identisch mit F_G .

SegmentationFields

Abbildung 5.18 zeigt, dass der Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Abzugsflächenerkennung mit *SegmentationFields* in Bezug auf die Erosionsreferenz bei 2.258,38 % (Sgf1), 2.309,56 % (Sgf2) und 2.074,08 % (Sgf3) liegt. Der interne Fehler F_I hat einen Median in Höhe von 5,60 %, 5,77 % und 5,31 % bei Sgf1-3. Diese Werte sind im Vergleich zu F_G sehr gering. Nahezu identisch mit F_G ist jedoch der Median von F_E mit 2.247,93 % (Sgf1), 2.301,11 % (Sgf2) und 2.069,29 % (Sgf3).

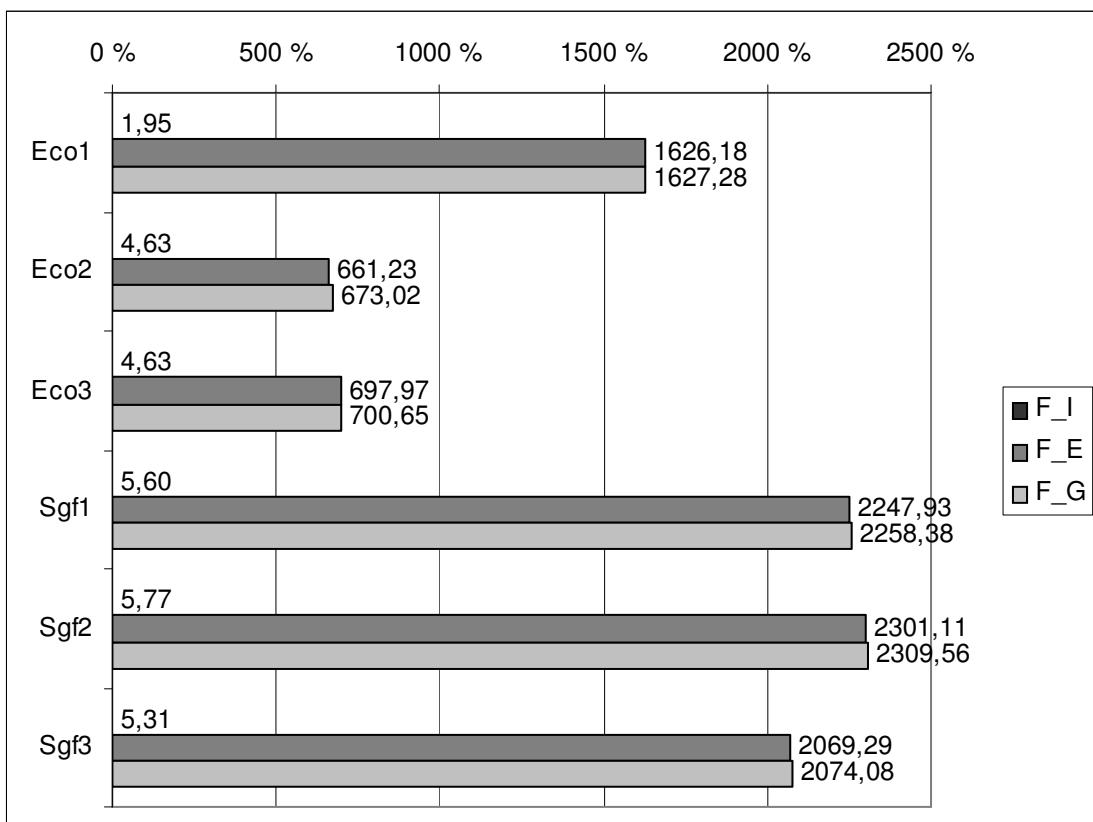


Abb. 5.18: F_I , F_E , F_G (Median) der Abzugsflächenerkennung mit *eCognition* und *SegmentationFields* (Erosion)

5.2.3 Gesamtflächenfehler Gesamterkennung

eCognition

Der Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Gesamterkennung mit *eCognition* liegt in Bezug auf die Erosionsreferenz bei 12,23 % (Eco1), 7,67 % (Eco2) und 7,52 % (Eco3) (vgl. Abb. 5.19). Bei der Aufgliederung von F_G in den internen und den externen Fehler (F_I und F_E) zeigt sich folgende Verteilung: Der Median von F_I ist bei Eco1-3 im Vergleich zu F_G sehr viel niedriger (1,52 %, 2,16 % und 2,03 %), der Median von F_E hingegen liegt bei 5,95 % (Eco1), 2,25 % (Eco2) und 2,35 % (Eco3).

SegmentationFields

Die Gesamterkennung mit *SegmentationFields* zeigt in Bezug auf die Erosionsreferenz einen Gesamtflächenfehler F_G (Median) von 33,98 % (Sgf1), 33,69 (Sgf2) und 33,97 % (Sgf3) (vgl. Abb. 5.19). Die Aufschlüsselung von F_G in F_I und F_E zeigt für F_I einen Median von 3,12 % für Sgf1, 3,16 % für Sgf2 und 3,14 % für Sgf3. Der Median von F_E hingegen liegt bei Sgf1-3 mit Werten in Höhe von 21,27 %, 18,62 % und 18,87 % zwischen F_I und F_G .

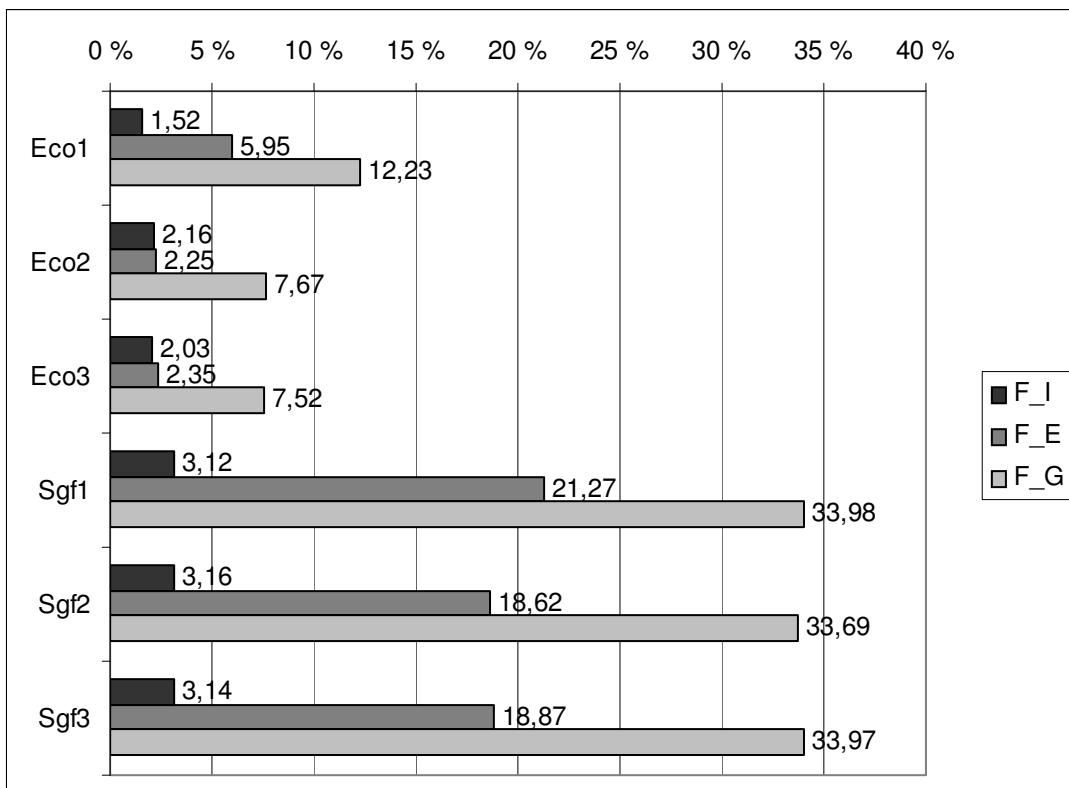


Abb. 5.19: F_I , F_E , F_G (Median) der Gesamterkennung mit *eCognition* und *SegmentationFields* (Erosion)

5.2.4 Fehlerkategorien

eCognition

Die manuelle Erfassung von Fehlerkategorien für die *eCognition*-Variante Eco3 zeigt folgende Häufigkeiten (siehe Abb. 5.20): In 8,6 % der betrachteten Fälle weist die Erosionsreferenz einen Fehler in der Fläche (Übersegmentierung) auf. Bei ca. einem Fünftel der Flächen wurden Fehler im Randbereich (21,4 %) bzw. eine ungenaue Grenzführung (22,7 %) gezählt, während ca. 39 % der Erosionsreferenzflächen von fehlenden Grenzen (Untersegmentierung) betroffen sind. Der flächendeckende Segmentierungsansatz von *eCognition* führt zu einer vollständigen Bearbeitung aller Feldblöcke. 38,5 % der Flächen wurden richtig erkannt und weisen keinen der genannten Fehler auf.

SegmentationFields

Die Häufigkeit der erfassten Fehlerkategorien für die *SegmentationFields*-Variante Sgf2 zeigt folgende Verteilung (siehe Abb. 5.20): Ein Fehler in der Fläche (Übersegmentierung) tritt bei 12,5 % der betrachteten Fälle der Erosionsreferenz auf. Fehler im Randbereich wurden bei ca. 30 % der Flächen bzw. eine ungenaue Grenzführung bei 34,8 % gezählt. Ca. 72,8 % der Erosionsreferenzflächen sind von fehlenden Grenzen (Untersegmentierung) betroffen. Aufgrund einer in *SegmentationFields* definierten Mindestgröße der zu segmentierenden Feldblöcke, liegt bei 6,1 % der Referenzflächen kein Ergebnis vor. 10,6 % der Flächen weisen keinen der genannten Fehler auf und wurden richtig erkannt.

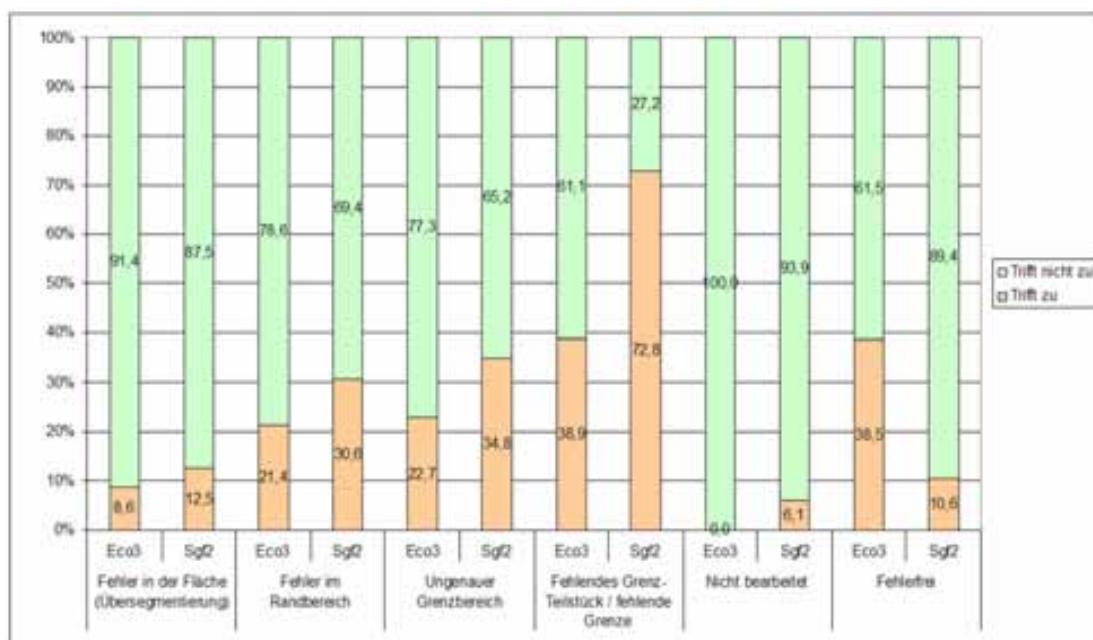


Abb. 5.20: Erfasste Fehlerkategorien (Erosion) [in %] für *eCognition* (Eco3) und *SegmentationFields* (Sgf2), 969 Referenzflächen

5.3 InVeKoS

5.3.1 Gesamtflächenfehler Schlagerkennung

eCognition

Der Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die auf die InVeKoS-Referenz bezogene Schlagerkennung mit *eCognition* weist bei Eco1-3 Werte von 16,76 %, 9,19 % und 9,31 % auf (vgl. Abb. 5.21). Der interne Fehler F_I (Median) ist bei Eco1-3 sehr viel niedriger (1,47 %, 1,98 % und 1,88 %) als der Gesamtflächenfehler F_G . Zwischen diesen Werten liegt der externe Fehlers F_E (Median) mit 10,55 (Eco1), 3,69 % (Eco2) und 3,91 % (Eco3).

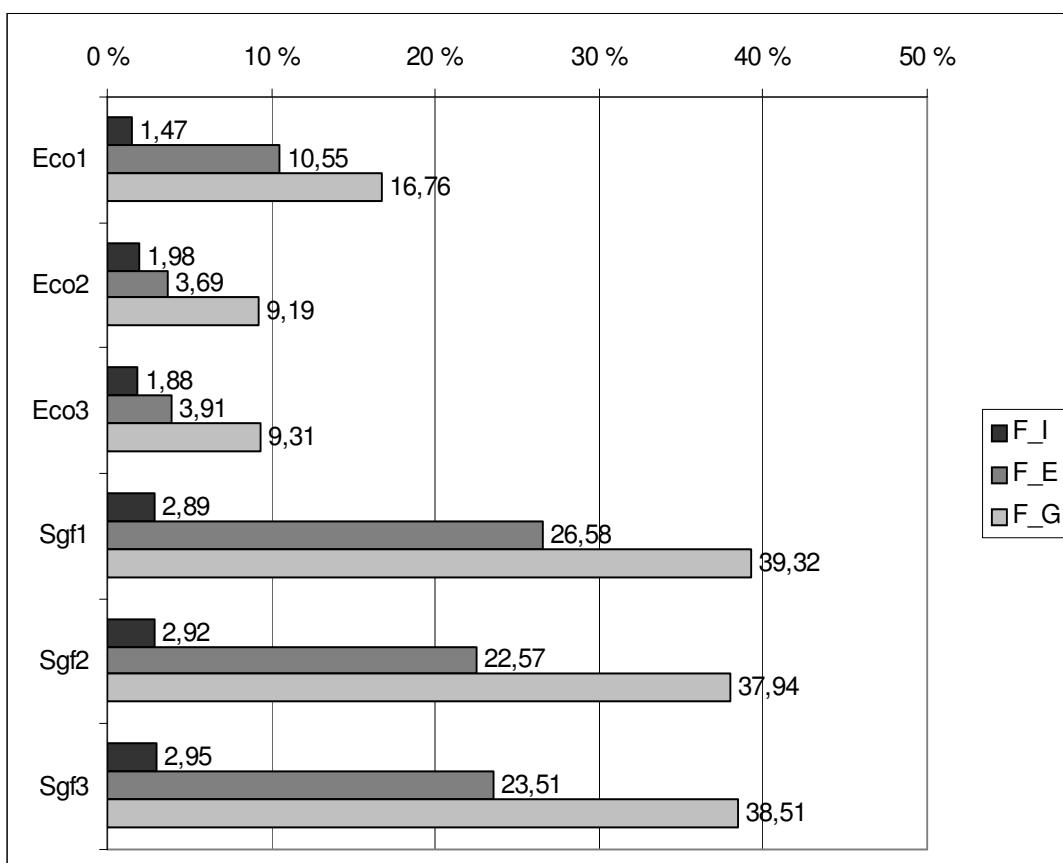


Abb. 5.21: F_I , F_E , F_G (Median) der Schlagerkennung mit *eCognition* und SegmentationFields (InVeKoS)

Die Häufigkeitsverteilung der Fehlerwerte aller Referenzflächen für die *eCognition*-Varianten in 11 Klassen zeigt, dass bei 44,1 % (Eco1) bis 51,1 % (Eco2) der Referenzflächen ein geringer Gesamtflächenfehler zwischen 0 % und 10 % vorliegt (vgl. Abb. 5.22). Zwischen 23,2 % (Eco2) und 35,2 % (Eco1) befinden sich im Bereich eines sehr hohen Gesamtflächenfehlerwertes mit über 100 % für F_G .

Die Klassen zwischen 20 % und 100 % weisen stets eine Häufigkeit von unter 4 % auf. Die Klasse von 10 % bis < 20 % tritt hier mit 7,1 % (Eco1) bis 10,7 % (Eco2) deutlicher hervor, als bei der Erosionsreferenz.

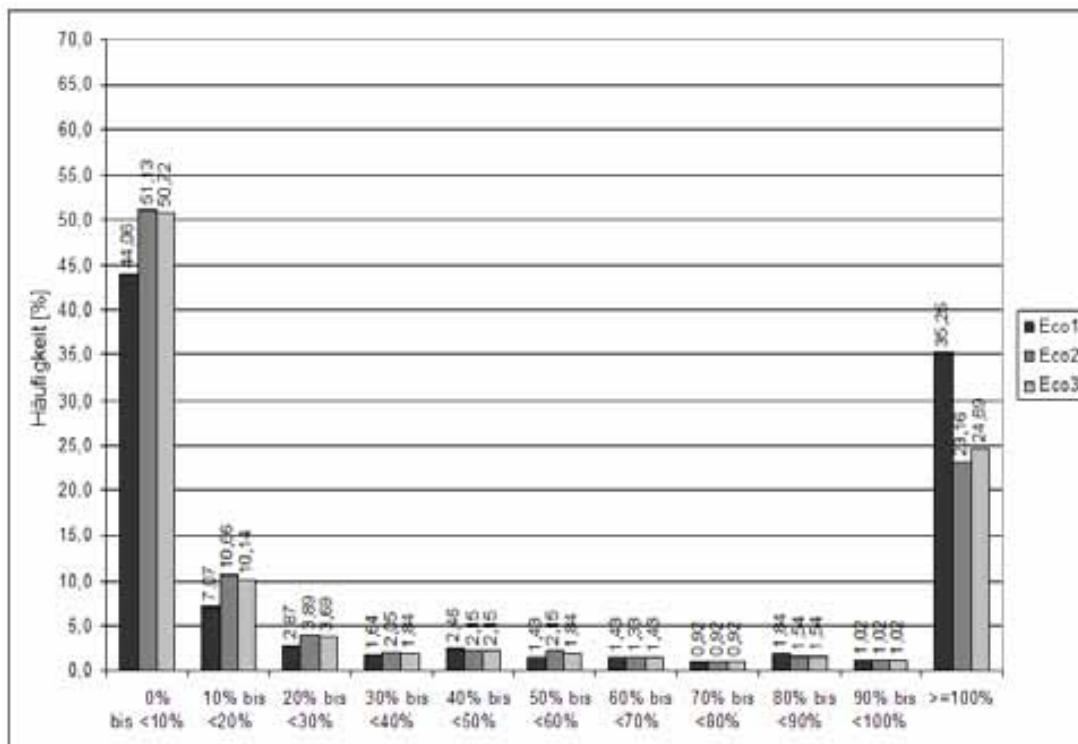


Abb. 5.22: Häufigkeitsverteilung F_G (Eco1-3), Schlagerkennung InVeKoS [in %] (11 Klassen: 0 % bis >=100 %)

SegmentationFields

Bei der Untersuchung des Gesamtflächenfehlers F_G (Median) für die Schlagerkennung mit *SegmentationFields* für die InVeKoS-Referenz befindet sich F_G bei 39,32 % (Sgf1), 37,94 % (Sgf2) und 38,51 % (Sgf3) (vgl. Abb. 5.21). Bei der Aufgliederung von F_G in den internen und den externen Fehler tritt folgende Verteilung auf: Der Median von F_I ist bei Sgf1-3 im Vergleich zu F_G sehr viel niedriger (2,89 %, 2,92 % und 2,95 %), der Median von F_E hingegen liegt bei 26,58 % (Sgf1), 22,57 % (Sgf2) und 23,51 % (Sgf3).

Wie in Abbildung 5.23 erkennbar ist, wird ein geringer Wert zwischen 0 % und 10 % für den Gesamtflächenfehler F_G auch aus der Sicht der InVeKoS-Referenz bei rund einem Drittel der Referenzflächen erreicht. Bei 32,4 % bis 37,7 % der Referenzflächen wird ein Wert von 100 % für F_G überschritten.

Mit niedrigen Prozentwerten zwischen 1,0 % und 4,5 % weist die Verteilung in den Klassen zwischen 20 % und < 100 % ähnliche Werte wie in den vorhergehenden Häufigkeitsverteilungen des Gesamtflächenfehlers F_G für die Schlagerkennung auf. Auch hier weicht die Klasse von 10 % bis < 20 % mit Werten zwischen 10,7 % (Sgf3) und 11,9 % (Sgf2) deutlich von den Klassen zwischen 20 % und < 100% ab.

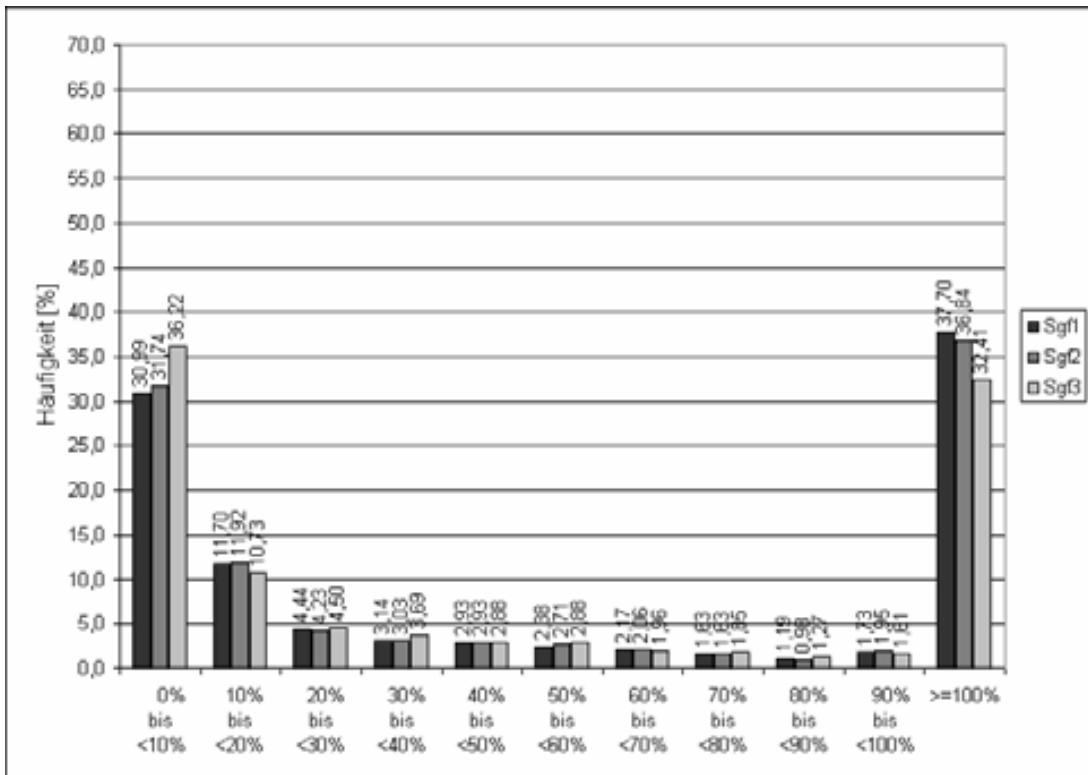


Abb. 5.23: Häufigkeitsverteilung F_G (Sgf1-3), Schlagerkennung InVeKoS [in %] (11 Klassen: 0 % bis >=100 %)

5.3.2 Gesamtflächenfehler Abzugsflächenerkennung

eCognition

Der Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Abzugsflächenerkennung der eCognition-Varianten bezogen auf die InVeKoS-Referenz liegt bei 5.861,65 % (Eco1), 3.907,88 % (Eco2) und 4.076,69 % (Eco3) (vgl. Abb. 5.24). Der Median des internen Fehlers F_I ist bei Eco1-3 im Vergleich zu F_G sehr viel niedriger (1,23 %, 2,11 % und 1,90 %). Der Median von F_E liegt mit 5.860,89 % (Eco1), 3.906,90 % (Eco2) und 4.067,63 % (Eco3) näher am Gesamtflächenfehler F_G .

SegmentationFields

Der in Abbildung 5.24 dargestellte Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Erkennung von Abzugsflächen mit *SegmentationFields* (bezogen auf die InVeKoS-Referenz) liegt bei 6.603,51 (Sgf1), 6.652,03 (Sgf2) und 6.561,62 (Sgf3). Der Gesamtflächenfehler F_G zerlegt sich in F_I und F_E mit einem Median von F_I bei Sgf1-3 in Höhe von 3,49 %, 3,46 % und 3,32 %. Im Gegensatz zu den sehr geringen Werten von F_I liegt der Median von F_E bei 6.561,61 % (Sgf1), 6.652,03 % (Sgf2) und 6.561,61 % (Sgf3) und damit sehr nah an den Fehlerwerten von F_G .

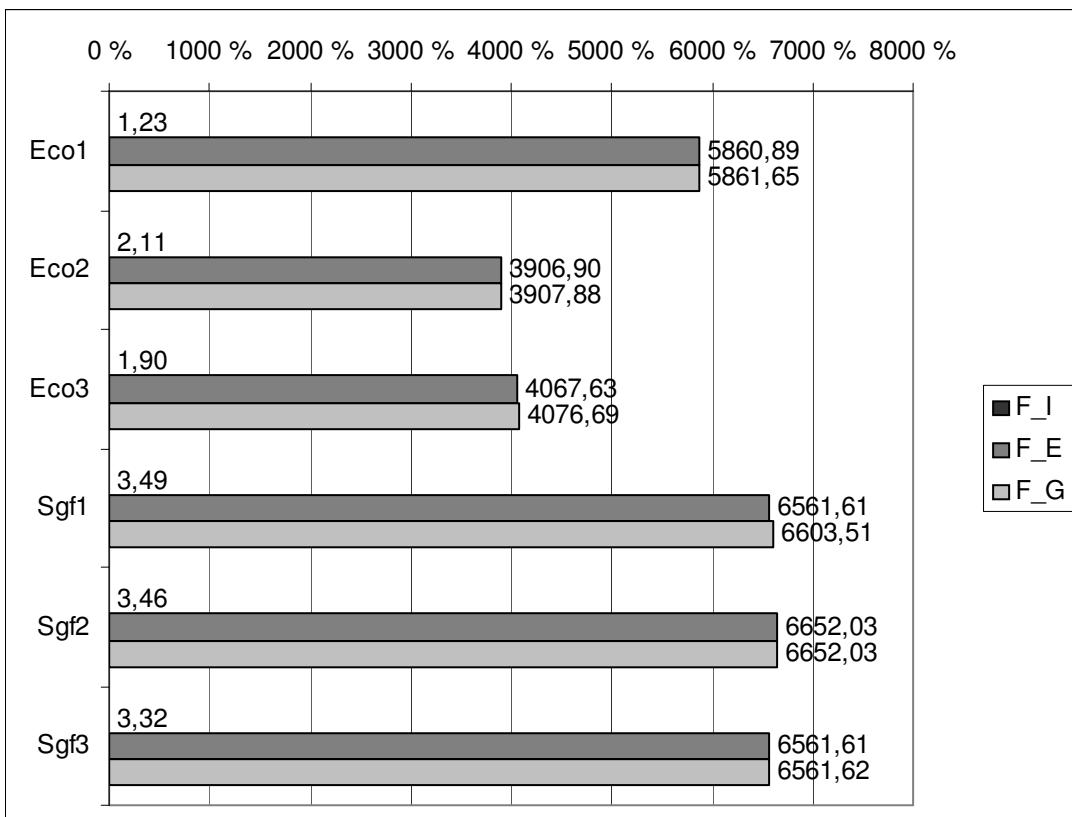


Abb. 5.24: F_I , F_E , F_G (Median) der Abzugsflächenerkennung mit *eCognition* und *SegmentationFields* (InVeKoS)

5.3.3 Gesamtflächenfehler Gesamterkennung

eCognition

Bezogen auf die InVeKoS-Referenz liegt der Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Gesamterkennung mit *eCognition* bei 160,98 % (Eco1), 56,71 % (Eco2) und 66,35 % (Eco3) (vgl. Abb. 5.25). Der interne und der externen Fehler (F_I und F_E) weisen folgende Aufteilung auf: Der Median von F_I ist bei Eco1-3 im Vergleich zu F_G um ein Vielfaches geringer (1,45 %, 1,99 % und 1,89 %). F_E hingegen weist einen Median von 158,75 % (Eco1), 42,23 % (Eco2) und 58,53 % (Eco3) auf.

SegmentationFields

Betrachtet man die Gesamterkennung mit *SegmentationFields* für die InVeKoS-Referenz, so liegt der Median von F_G für Sgf1-3 bei 207,35 %, 196,88 % und 197,69 % (vgl. Abb. 5.25). Bei der Aufgliederung von F_G in F_I und F_E zeigt sich, dass der Median von F_I bei Sgf1-3 im Vergleich zu F_G sehr klein ist (2,99 %, 3,03 % und ebenfalls 3,03 %). Der Median von F_E hingegen liegt bei 195,86 % (Sgf1), 191,29 % (Sgf2) und 66,35 % (Sgf3).

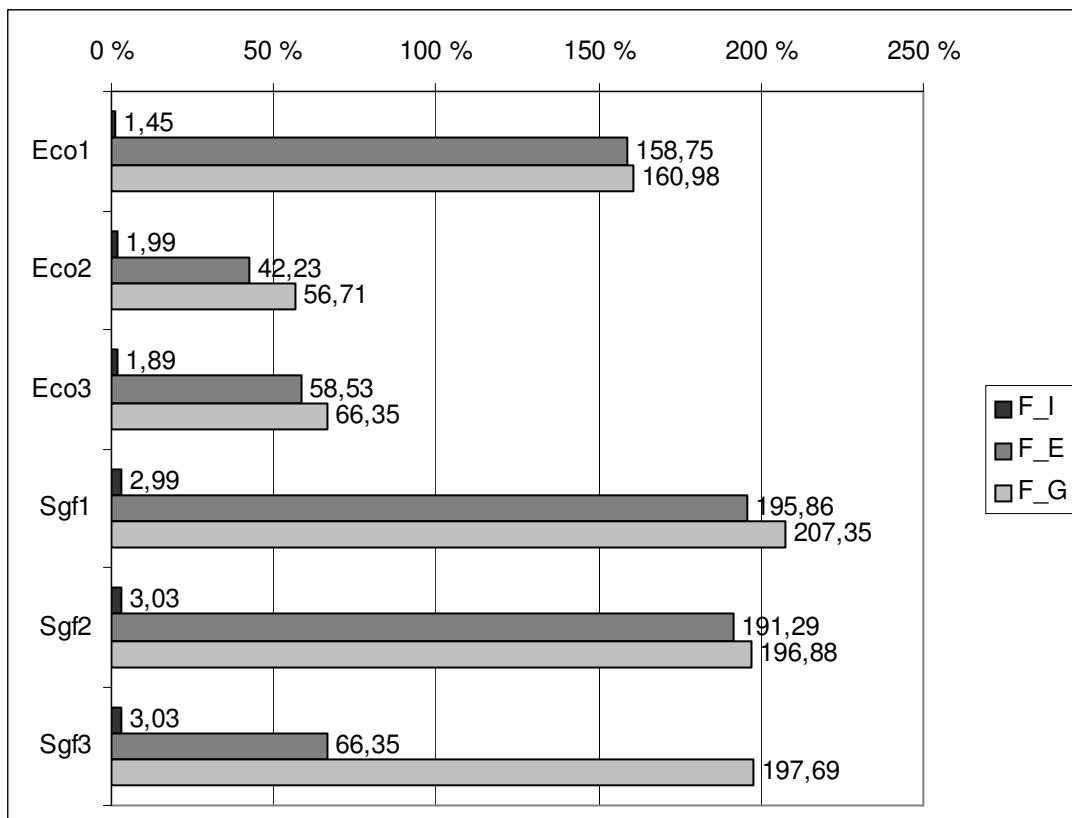


Abb. 5.25: F_I , F_E , F_G (Median) der Gesamterkennung mit *eCognition* und SegmentationFields (InVeKoS)

5.3.4 Fehlerkategorien

eCognition

Die Häufigkeit der manuell erfassten Fehlerkategorien für die *eCognition*-Variante Eco3 weist folgende Verteilung auf (siehe Abb. 5.26): In 7,8 % der betrachteten Fälle weist die InVeKoS-Referenz einen Fehler in der Fläche (Übersegmentierung) auf. Bei ca. einem Fünftel der Flächen treten Fehler im Randbereich (21,0 %) bzw. eine ungenaue Grenzführung (19,8 %) auf, während ca. zwei Drittel (62,2 %) der InVeKoS-Referenzen von fehlenden Grenzen (Untersegmentierung) betroffen sind. Aufgrund des flächendeckenden Ansatzes von *eCognition* wurden alle Feldblöcke bearbeitet. 27,3 % der Flächen wurden richtig erkannt.

SegmentationFields

Die erfassten Häufigkeiten der Fehlerkategorien für die *SegmentationFields*-Variante Sgf2 verteilt sich wie folgt (siehe Abb. 5.26): In 12,1 % der tritt bei der InVeKoS-Referenz ein Fehler in der Fläche (Übersegmentierung) auf. 29,4 % der Flächen zeigen Fehler im Randbereich, eine ungenaue Grenzführung wird bei 30,0 % gezählt. Ca. 84,1 % der InVeKoS-Referenzflächen sind von fehlenden Grenzen (Untersegmentierung) betroffen. Aufgrund einer in *SegmentationFields* definierten Mindestgröße der zu segmentierenden Feldblöcke, liegt erneut bei 6,1 % der Referenzflächen kein Ergebnis vor. 8,6 % der Flächen weisen keinen der genannten Fehler auf und wurden richtig erkannt.

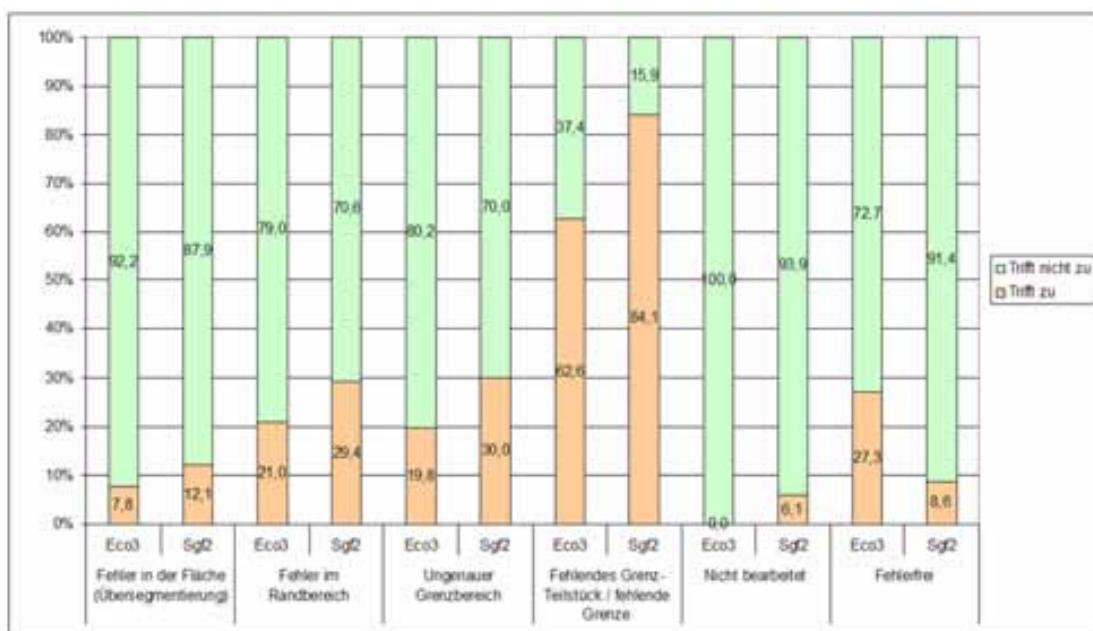


Abb. 5.26: Erfasste Fehlerkategorien (InVeKoS) [in %] für *eCognition* (Eco3) und *SegmentationFields* (Sgf2), 1416 Referenzflächen

5.3.5 InVeKoS-Schlagtoleranz

eCognition

Bei Berechnung der InVeKoS-Schlagtoleranz unter Verwendung der InVeKoS-Referenzflächen für die *eCognition*-Varianten liegen ca. 43 % bis 44 % der Flächen von Eco2 und Eco3 innerhalb des in Kapitel 4.1.5 definierten Toleranzbereiches. Die Flächen von Eco1 halten lediglich in einem Drittel der Fälle die Toleranzgrenze ein- (vgl. Abb. 5.27).

SegmentationFields

Betrachtet man für die *SegmentationFields*-Varianten die InVeKoS-Schlagtoleranz, so halten ca. 30 % der automatisch extrahierten Flächen den InVeKoS- Toleranzbereich ein (vgl. (vgl. Abb. 5.27)).

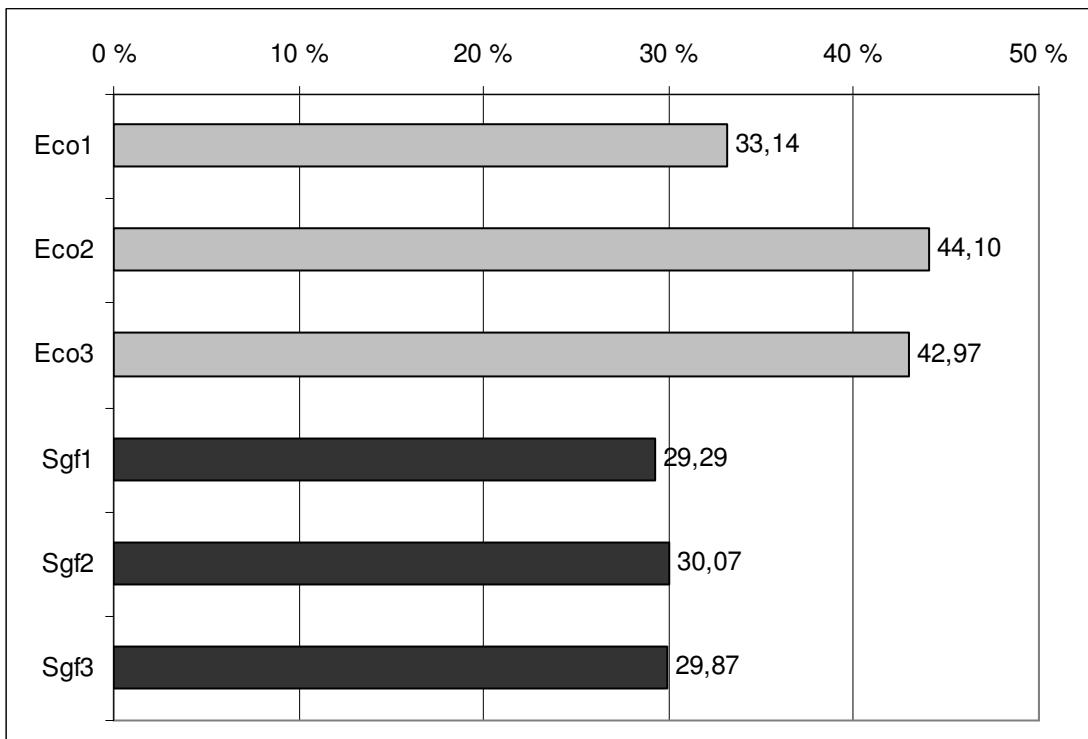


Abb. 5.27: Gegenüberstellung von *eCognition* und *SegmentationFields* bzgl. der Häufigkeit der Flächen ohne Überschreitung der InVeKoS-Toleranzgrenze [in %]

6 VERGLEICH UND DISKUSSION

In Kapitel 6.1 werden die Qualität der Schlagerkennung diskutiert und die Methoden *eCognition* und *SegmentationFields* direkt verglichen. Eine detaillierte Erörterung methodischer Besonderheiten erfolgt in Kapitel 6.2.

6.1 Qualität der Schlagextraktion

6.1.1 Ergebnischarakteristika der Gesamtszene

Für die mit *eCognition* berechneten Variationen (Eco1-3) beträgt die Gesamtfläche der Ergebnisgeometrien 2.006,24 ha (vgl. Tab. 5.1). Der identische Wert ist mit der Tatsache zu begründen, dass für alle Variationen die gleichen Feldblockdaten als Festlegung der äußeren Grenzen genutzt wurden und innerhalb der Feldblöcke die komplette Fläche segmentiert wurde. Dennoch tritt eine Differenz der Ergebnisgeometrien zu den Referenzdaten von bis zu 4,24 ha auf. Diese Differenz kann einerseits durch die Vektorisierung der zunächst als Rasterdaten vorliegenden Ergebnisflächen verursacht worden sein. Da aber auch zwischen den Referenzvarianten Erosion und InVeKoS eine sehr geringe Abweichung von ca. 0,32 ha vorliegt, ist es andererseits auch möglich, dass Abweichungen bei der Digitalisierung der Referenzdaten aufgetreten sind.

Die gesamte Ergebnisfläche beträgt für die mit *SegmentationFields* berechneten Variationen 1.963,67 ha (Sgf1), 1.963,51 ha (Sgf2) und 1.963,58 ha (Sgf3) (vgl. Tab. 5.1). Der unterschiedliche Wert ist möglicherweise auf die Vektorisierung der Grenzverläufe zurückzuführen, da jede extrahierte Schlagfläche unabhängig von ihren Nachbarn vektorisiert wurde. So können Lücken und Überschneidungen zwischen den Schlägen entstehen (siehe Kap. 6.2.3). Da die maximale Abweichung der Ergebnisflächen untereinander mit 0,1624 ha (Sgf1 - Sgf2) jedoch nur 0,0083 % ausmacht, ist diese Abweichung für die hier zu treffenden Betrachtungen zu vernachlässigen. Es tritt weiterhin eine Differenz zu den Referenzdaten von bis zu 46,97 ha auf. Diese Differenz könnte ebenfalls durch die Vektorisierung der zunächst als Rasterdaten vorliegenden Ergebnisflächen verursacht worden sein.

Vergleicht man anhand des Shape-Index SI (siehe Kap. 4.1) das Verhältnis von Fläche und Umfang der Erosions- (SI: ca. 33) und der InVeKoS-Referenz (SI: ca. 41), so fällt auf, dass die aufgrund der zahlreichen Abzugsflächen detaillreich-strukturierten InVeKoS-Geometrien einen deutlich höheren Shape-Index aufweisen.

Der Shape-Index der *eCognition*-Variationen liegt zwischen ca. 40 und 50, was im Gegensatz zu den eher kompakten Ergebnisflächen von *SegmentationFields* (SI: ca. 28) auf die Bildung komplexerer Geometrien schließen lässt. Die höhere Komplexität kann durch die pixelgenaue Vektorisierung (siehe Abb. 6.4 u. Kap. 6.2.3) oder durch komplexe Übersegmentierungen (siehe Kap. 6.1.7) entstehen. Auch hat die starke Generalisierung der Ergebnisflächen bei *SegmentationFields* (siehe Abb. 6.6 u. Kap. 6.2.3) eine direkte Auswirkung auf den Shape-Index.

6.1.2 Gesamterkennung

Der Gesamtflächenfehler der Gesamterkennungsquote, bei dem sowohl Schlag- als auch Abzugsflächen bewertet werden, ist mit Vorsicht zu interpretieren, da die im Vergleich zu den Schlägen eher kleinen Abzugsflächen mit oft extrem hohen Fehlerwerten in die Gesamterkennungsquote eingehen. Die Herleitung derart hoher Gesamtflächenfehlerwerte wird im Kapitel 6.1.5 erörtert. Die Gewichtung und Einordnung der Fehlerkategorien Schlag-, Abzugsflächen und Gesamterkennungsquote wurde bereits in der Kapitel 5.1 erläutert.

Die Gesamterkennungsquote ermöglicht zwar eine relative Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Variationen, so dass sie für die Auswahl der Segmentationseinstellungen für die Gesamtszene genutzt werden konnte. Sie hat aber nur eine geringe Aussagekraft bzgl. der tatsächlichen Qualität der Schlagerkennung. Aus diesem Grunde ist für die Beurteilung der Extraktionsqualität die Betrachtung der in Kapitel 6.1.3 diskutierten Schlagerkennungsquote von höherer Relevanz, so dass Schlag- und Abzugsflächenerkennung im Folgenden getrennt diskutiert werden.

6.1.3 Schlagerkennung

Die Erkennungsquote der Schlagflächen zeigt deutliche Unterschiede, sowohl bei den verwendeten Methoden *eCognition* und *SegmentationFields*, als auch bei den thematischen Fragestellungen Erosion und InVeKoS (siehe Kap. 5.2.1 und 5.3.1). Der Gesamtflächenfehler (Median) der Schlagerkennung (Erosion) ist bei *SegmentationFields* mit ca. 27 % um ca. das dreifache höher als bei den Varianten Eco2 und Eco3 (beide ca. 7 %) (siehe Abb. 5.14). Eco1 weist einen Gesamtflächenfehler F_G (Erosion) von ca. 9 % auf. Bei Betrachtung der InVeKoS-Referenz ist der Ge-

samtflächenfehler (Median) der *SegmentationFields*-Varianten mit ca. 39 % sogar vier mal höher als die *eCognition*-Varianten Eco2 und Eco3 mit ca. 9 % (siehe Abb. 5.21). Eco1 weist mit 17 % einen doppelt so hohen Fehler wie Eco1 und Eco2 auf, was auf den hohen Scaleparameter von 230 zurückzuführen ist, der feinstrukturierte Objekte wie z. B. Teiche oder Gräben bei der Segmentierung mit anderen Segmente fusioniert. Auch kann die geringere Gewichtung der Farbinformation (0,1) beim Homogenitätskriterium im Gegensatz zu Eco2 und Eco3 (beide 0,5) zu einem häufigeren Nichtsegmentieren von geringen Spektralunterschieden führen.

Die wichtigste Fehlerursache aus Sicht der Schlagflächen stellt die Nichterkennung von Grenzen dar. Wurde eine Grenze zwischen zwei Schlagflächen nicht erkannt, so geht die Fläche außerhalb der jeweiligen Referenz als externer Fehler in den Gesamtflächenfehler ein (siehe Kap. 4.1.2). Das kann u. U. schnell zu einem sehr hohen externen Fehler F_E führen, der auch weit über 100 % erreichen kann, falls die Nachbarfläche sehr viel größer als die Ausgangsfläche ist. Vergleicht man die Werte der Fehlerkategorien, so treten bei der Segmentierung mit *eCognition* bei 39 % (Erosion) bzw. 63 % (InVeKoS) aller Referenzflächen fehlende Grenz-Teilstücke bzw. fehlende Grenzen auf. Bei *SegmentationFields* sind es 73 % (Erosion) bzw. 84 % (InVeKoS) (siehe Kap. 5.2.4 u. 5.3.4). Diese höhere Fehlerquote stellt eine Ursache für den höheren Gesamtflächenfehler F_G bei der Schlagerkennung mit *SegmentationFields* dar. Die Definition des externen Fehlers F_E und deren Auswirkungen auf die Fehlerwerte werden in Kapitel 6.1.5 detailliert diskutiert.

Zwar weisen beide Methoden sehr hohe Gesamtflächenfehler für die Abzugsflächenerkennung auf (Erosionsreferenz: *eCognition* ca. 670 % bis 1.600 %, *SegmentationFields*: ca. 2.100 % bis 2.300 %; InVeKoS-Referenz: *eCognition*: ca. 3.900 % bis 5.900 %, *SegmentationFields*: ca. 6.600 %), dennoch liegen die Fehlerwerte von *eCognition* immer unter denen von *SegmentationFields*. Die Erkennung der Abzugsflächen wird zwar bei der Berechnung der Schlagerkennungsquote nicht direkt berücksichtigt, jedoch führt eine nicht erkannte Grenze zwischen einem Schlag und einer Abzugsfläche dazu, dass die Abzugsfläche als externer Fehler für die Schlagfläche gewertet wird.

Bei der Segmentierung mit *eCognition* tritt zwar in verschiedenen Bereichen des Bildes eine fehlerhafte Übersegmentierung auf (siehe Kap. 6.1.7), es werden aber eher zufällig auch zahlreiche kleinere Objekte und Abzugsflächen richtig erkannt, so dass diese nicht als Fehlerwert in die benachbarten Schläge eingehen (siehe Kap. 6.1.4). Eine derartige Erkennung sehr kleiner Bildobjekte (Abzugsflächen) wird mit *SegmentationFields* nicht erreicht, da das Ziel der Segmentierungsstrategie dieses nicht vorsieht. Dementsprechend werden insbesondere in den

Randbereichen der Schläge mögliche Störungen beseitigt, um die Extraktion eines gleichförmigen Grenzverlaufs zu ermöglichen.

Ein weiterer Aspekt, der die Unterschiede in den Ergebnissen der Methoden unterstreicht, ist die Nutzung unterschiedlicher Bildauflösungen, die in Kapitel 6.2.1 genauer erläutert wird. Die bessere Schlagerkennungsquote von *eCognition* weist darauf hin, dass der Einfluss von Störungen durch die spektrale Vielfalt in den Pixeln und Bildobjekten zwar durch eine geringere geometrische Auflösung minimiert werden kann, dieser positive Effekt bei der mit *SegmentationFields* genutzten Auflösung von 4,0 m jedoch durch eine höhere Genauigkeit in der Grenzziehung bei der Nutzung von 1,0 m geometrischer Auflösung mit *eCognition* nicht nur wieder ausgeglichen, sondern übertroffen wird. Die eng miteinander verknüpften Fehlerwerte der Kategorien ‚Randbereichsfehler‘ und ‚ungenaue Grenzen‘ liegen bei *eCognition* jeweils bei ca. 22 %, bei *SegmentationFields* jedoch jeweils bei ca. 30 %, trotz der geometrischen Bildauflösung von 4,0 m. Dieses macht deutlich, dass die höhere Genauigkeit der Grenzverläufe aufgrund der höheren geometrischen Auflösung mit *eCognition* zu geringeren Fehlerwerten als die Minimierung von Störungen durch eine geringere geometrische Auflösung mit *SegmentationFields* führt.

Die Art der Vektorisierung der Ergebnisgeometrien hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Extraktionsergebnisse. Im Gegensatz zur Vektorisierung mit *eCognition*, die einen lücken- und überlappungsgesunden Vektordatensatz mit angepassten Topologien liefert, führt die Vektorisierung mit *SegmentationFields* zu Lücken zwischen den einzelnen Schlägen. Die Ursache für die Lücken wird in Kapitel 6.2.3 beschrieben. Die entstehenden Lücken zwischen den Schlagflächen können einige Meter betragen, die sich über die gesamte Szene addieren und sich somit stark auf den Gesamtflächenfehler F_G auswirken.

Eine Bewertung der Schlagerkennungsquote für die Einsetzbarkeit für Erosionsberatung und InVeKoS wird in den Kapiteln 8.1 und 8.2 diskutiert.

6.1.4 Abzugsflächenerkennung und Fehler im Randbereich

Für die Bewertung der Abzugsflächenerkennung ist zu beachten, dass eine Erkennung von Objekten mit im Vergleich zu den Schlaggeometrien sehr geringer Fläche (Abzugsflächen) in der Schlagmodellierung nach BUTENUTH (2004a, S. 1066) nicht vorgesehen ist. Spektrale Heterogenitäten im Randbereich werden bewusst ignoriert, um Störung im Grenzverlauf zu vermeiden. Auch die Segmentierung mit *eCognition* zielt mit einem hohen Scaleparameter auf die Erkennung von im Vergleich

zu den Abzugsflächen wesentlich großflächigeren Schlägen. Die notwendige Gewichtung der Schlag-, Abzugsflächen- und Gesamterkennungsfehler wurde bereits in Kapitel 5.1 erläutert. Allerdings stellt die Bewertung der Extraktion von Abzugsflächen einen Ansatz für das Aufzeigen von Fehlerursachen dar und kann somit zu einer detaillierten Aufzählung von notwenigen Folgeschritten für die Verbesserung der Extraktionsqualität beitragen.

Der extrem hohe Gesamtflächenfehler für die Abzugsflächen in Bezug zur Erosions- und InVeKoS-Referenz hat verschiedene Ursachen: Bei sehr kleinen, nicht erkannten Abzugsflächen (Abb. 6.1) wirkt sich der externe Fehler F_E sehr stark auf den Betrag des Gesamtflächenfehlers F_G aus, da die Abzugsfläche i. d. R. innerhalb eines um ein Vielfaches größeren Schläges liegt. Ein großer Teil bzw. die gesamte Fläche des angrenzenden Schläges kann sich somit als externer Fehler F_E ergeben.

Die in die Summe des Gesamtflächenfehlers F_G eingehenden Abzugsflächen liegen zumeist an den Randbereichen der Feldblöcke, so dass die Ausmaskierung in den Randbereichen mit *SegmentationFields* (siehe Kap. 4.3.3) die Erkennung dieser Objekte herabsetzt.

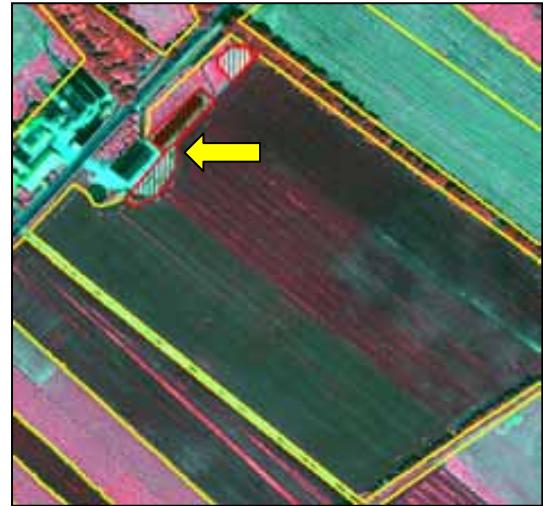


Abb. 6.1: Nicht erkannte Abzugsflächen (rot-schraffiert) und Segmentierungsergebnis (gelb)

Lineare Abzugsflächen (z. B. Hecken oder Gräben) liegen häufig in den Randbereichen der Schläge und haben somit bei Erkennung oder Nichterkennung eine direkte Auswirkung auf die Genauigkeit der zu detektierenden Grenzen. Die Segmentierung mit *eCognition* weist bei etwa einem Fünftel der Flächen Fehler im Randbereich auf, wobei diese Quote bei Erosions- und InVeKoS-Referenz fast identisch ist (siehe Kap. 5.2.4 u. 5.3.4).

Obwohl der hohe Scaleparameter bei *eCognition* ein weit fortgeschrittenes Regionenwachstum ermöglicht und somit die Fusion zu großen Objekten begünstigt (siehe Kap. 4.2.3), werden in eher zufälliger und unregelmäßiger Häufigkeit auch Heckenstrukturen und ähnliche Abzugsflächen korrekt erkannt. Dieses wirkt sich positiv auf den Gesamtflächenfehler der Schlag- und Abzugsflächen aus. Die mit *SegmentationFields* erzielten Ergebnisse weisen sogar in ca. 30 % aller Fälle einen derartigen Randfehler auf. Fehlerhafte Randbereiche können sich direkt auf die Anzahl der fehlenden Grenzen auswirken. Dies ist der Fall, wenn zwar eine Seite einer

Hecke vom Schlag korrekt abgegrenzt wird, aber die andere Seite nicht erkannt wird, so dass für den Nachbarschlag eine fehlende Grenze angerechnet wird (siehe Abb. 6.2).

Die hohe Fehlerzahl im Randbereich bei *SegmentationFields* hängt zwar einerseits mit den bei der Vektorisierung entstehenden Lücken zwischen den Schlagflächen zusammen (siehe Abb. 6.16b). Andererseits sind die hohen Werte (84 % aller Flächen) bei den fehlenden Grenzabschnitten nicht nur auf das Nichterkennen von Objekten im Randbereich zurückzuführen, sondern auch auf z. T. starke Abweichungen von Sgf1-3 vom tatsächlichen Grenzverlauf. Verläuft nämlich eine Grenze zu weit im Nachbarschlag, so wird für den Ursprungsschlag eine fehlende Grenze und für den Nachbarschlag ein Fehler im Randbereich gewertet, was sich direkt auf die Anzahl der fehlenden Grenzen auswirkt (siehe Abb. 6.2). Für den Gesamtflächenfehler hat das beschriebene Beispiel i. d. R. nur geringe Auswirkungen.

Trotz der Strategie mit *SegmentationFields*, den Randbereich auszumaskieren, um Störungen zu vermeiden, haben die Parameterstudie für die Gesamtszene gezeigt, dass ein geringerer Radius (3,75 Pixel) beim Closing (Operator: *Closing_circle*, siehe Kap. 4.3.3) zu besseren Ergebnissen führt (vgl. Anhang, Tab. B.2) als ein höherer Radius. Der Gesamtflächenfehler F_G (Median) für die Randbereichserosion (Operator: *Erosion_circle*, siehe Kap. 4.3.3) ist nicht bei den niedrigsten Variablenwerten (0,25 Pixel bis 1,0 Pixel) am geringsten. Das Optimum liegt vielmehr im mittleren Bereich der getesteten Einstellungen (1,75 Pixel). Allerdings steigt der Fehlerwert stark an, wenn man diesen mittleren Bereich verlässt und den Radius vergrößert (2,5 bis 3,75 Pixel) (vgl. Anhang, Tab. B.2). Dieses deutet darauf hin, dass die Maskierung des Randbereiches, insbesondere unter Berücksichtigung der geringen geometrischen Auflösung, nicht übermäßig stark betrieben werden darf.

Auch wenn Abzugsflächen nicht die primär zu extrahierenden Objekte in den verwendeten Segmentierungsstrategien darstellen, sind sie wichtige Bestandteile in der Landschaftsstruktur. Die Erkennung von Abzugsflächen ist besonders für die InVeKoS-Kontrollen ein wichtiges Ziel, da sie die Grenzgeometrien der tatsächlichen Schlagflächen beeinflussen und für die Bereiche Erosionsberatung und InVeKoS



Abb. 6.2: Wertung des Segmentierungsresultates (gelbe Linie) als fehlende Grenze (linker Pfeil) und Fehler im Randbereich (rechter Pfeil) im Bezug zu den Referenzdaten (rote Linie)

wichtige Einflussgrößen darstellen. So können Abzugsflächen wichtige erosionsfördernde Abflussrinnen oder für Ausweihungen anfällige Bodenaufgrabungen sein. Besonders wichtig ist der erosionshemmende Einfluss von Hecken und Feldgehölzen auf die Kulturlandschaft.

Für die Einsetzbarkeit bei InVeKoS-Kontrollen stellt eine automatisierte Erkennung der Abzugsflächen ein wichtiges Ziel dar, da diese i. d. R. konkrete Landschaftselemente bilden (Hecken, Gewässer, Quellbereiche). Diese müssen seit dem 01. Januar 2005 auch im Rahmen der InVeKoS-Kontrollen erfasst werden, da zusätzliche Verpflichtungen (sog. Cross Compliance) als Voraussetzung für die Zahlung von Agrarsubventionen die Erhaltung derartiger Landschaftselemente fordern (siehe Kap. 2.2). Eine Erfassung von Landschaftselementen ist mit den in der vorliegenden Arbeit genutzten Segmentierungsstrategien nicht möglich, so dass für einen operativen Einsatz eine Erweiterung der Methoden notwendig ist. In einem Ausblick werden in den Kapiteln 7.1 und 7.4 Ansätze für die Extraktion von Landschaftselementen und Winderosionshindernissen erläutert. Eine abschließende Bewertung der Abzugsflächenerkennung für die Erosionsberatung und InVeKoS wird unter Berücksichtigung der Themen Winderosionshindernisse und Landschaftselemente in den Kapiteln 8.1 und 8.2 abgegeben.

6.1.5 Externer Fehler F_E und interner Fehler F_I

Bei der Diskussion der Abzugsflächen (siehe Kap. 6.1.4) wurde bereits die Bedeutung des externen Fehlers F_E insbesondere für kleine, nicht erkannte Objekte erläutert, die durch ein Nicherkennen sehr hohe Werte für F_E liefern können. Dieser Effekt ist auch als Ursache für die äußerst hohen Standardabweichungen, insbesondere bei der Abzugsflächenerkennung, aufzuführen (siehe Tab. 5.1 u. 5.2).

Der interne Fehler F_I hingegen kann aus seiner Definition heraus (siehe Kap. 4.1.2) keine derart großen Ausmaße annehmen, da er sich nur auf die Fläche innerhalb der Referenz bezieht und somit niemals über 100 % liegen kann. Außerdem ist F_I durch die Definition von T_{Max} als größte intern richtig erkannte Teilfläche der Referenz (siehe Kap. 4.1.2) beschränkt, so dass F_I sogar immer kleiner als 50 % ist, da die betreffende Fläche mit dem Überschreiten dieser Grenze als T_{Max} fungiert und nicht mehr als Fehler eingeordnet wird. Dieses führt dazu, dass der interne Fehler F_I , der den als falsch definierten Flächenanteil innerhalb einer Referenzfläche beschreibt, im Vergleich zum externen Fehler F_E immer relativ gering bleibt.

Diese Erkenntnisse zeigen, dass der externe Fehler F_E eine wesentlich stärkere Auswirkung auf den Gesamtflächenfehler F_G hat, als der interne Fehler F_I . Dieser Stellenwert hat durchaus seine Berechtigung, da durch den externen Fehler das Fehlen von Grenzbereichen und somit die Vollständigkeit der Schlagerkennung in die Berechnung des Gesamtflächenfehlers eingeht. Allerdings wird die Länge der fehlenden Grenzen nicht berücksichtigt, so dass eine kurze, nicht erkannte Grenze mit einer identischen externen Fehlerfläche den gleichen Fehlerwert verursacht, wie eine längere fehlende Grenze (siehe Abb. 6.3). Aus diesem Grunde müsste für eine Weiterentwicklung des Gesamtflächenfehlers in weiteren Arbeiten evtl. eine Gewichtung bzgl. der Vollständigkeit der Grenze herangezogen werden.

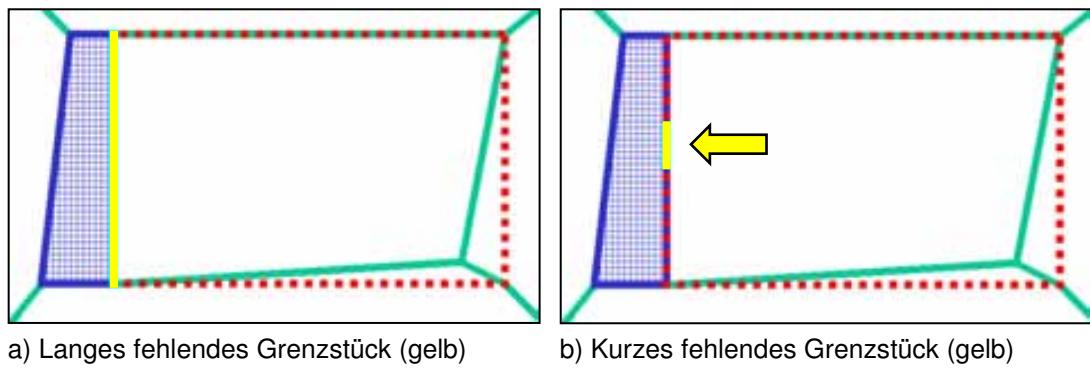


Abb. 6.3: Identische Flächen für den externen Fehler F_E (blau kariert) bei einer langen (a) und einer kurzen (b) fehlenden Grenze (gelb)

6.1.6 Grenzgenauigkeit

Da bei der Vektorisierung der Ergebnisse von *eCognition* keine Generalisierung durchgeführt wurde, orientiert sich der Grenzverlauf sehr stark an den in den Bilddaten erkannten Segmenten, deren Grenzen entlang der Pixelränder verlaufen (siehe Abb. 6.4). Diese pixelgenaue Grenzziehung ermöglicht einerseits die Nachbildung natürlicher Grenzen, es erfolgt andererseits aber auch eine massive Vergrößerung des Datensatzes.



Abb. 6.4: Pixelgenauer Grenzverlauf und Treppeneffekt mit *eCognition*

Die Software *eCognition* segmentiert auch häufig Schatten und Kronenbereiche von Hecken (siehe Abb. 6.5), die eigentlich der benachbarten Schlagfläche zugeschlagen werden müssten. An dieser Stelle könnte im Rahmen weiterer Arbeiten eine Klassifikation der Segmente, die Schattenbereiche als solche erkennt und den entsprechenden Schlägen zuordnet, eine Verbesserung der Ergebnisse herbeiführen (siehe Kap. 7.1).

Aufgrund der besonderen Glättung in den Randbereichen der Flächen mit *SegmentationFields* treten derartige Fehlerquellen i. d. R. nicht auf. Im Gegensatz zu *eCognition* führt allerdings die in *SegmentationFields* verwendete Vektorisierung zu einer sehr starken Generalisierung und Abstraktion der Geometrien (siehe Abb. 6.6), die neben den entstehenden Lücken (siehe Abb. 6.16b) die Genauigkeit der Grenzverläufe beeinflusst. Auch kommt es an Eck- und Kreuzungspunkten häufig zu einem nicht nachvollziehbaren Abknicken des Grenzverlaufes (siehe Abb. 6.7), was möglicherweise mit Glättung und Erosion am Flächenrand zusammenhängt.

Für die Verbesserung der Grenzgenauigkeit muss in *eCognition* eine Generalisierung der Vektordaten realisiert werden. In *SegmentationFields* muss bei der Abgrenzung und Vektorisierung unbedingt die Nachbarschaft

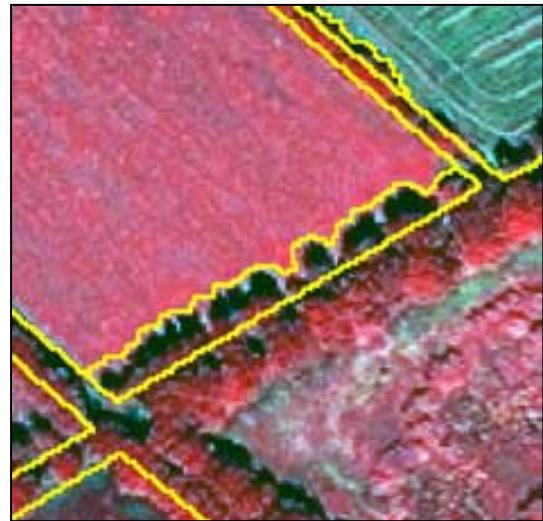


Abb. 6.5: Von *eCognition* segmentierte Schatten und Kronenbereiche

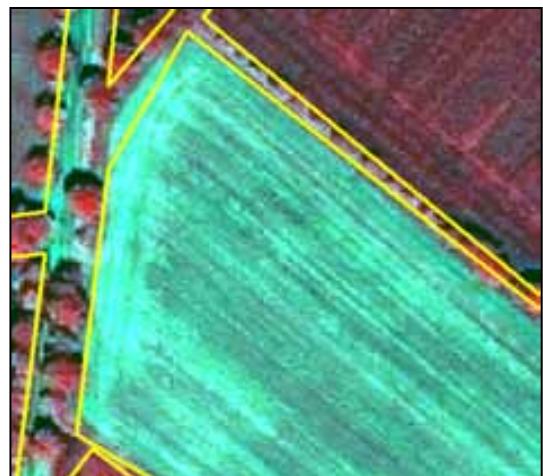


Abb. 6.6: Starke Generalisierung mit *SegmentationFields*

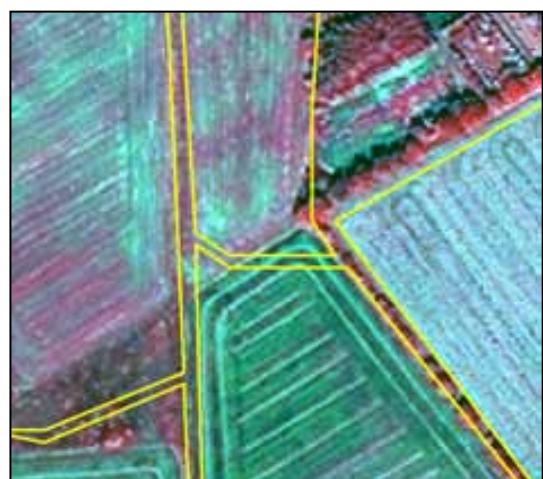


Abb. 6.7: Abknicken an Eck- und Kreuzungspunkten mit *SegmentationFields*

der Schlagflächen beachtet und einbezogen werden, um Lücken und Überlappungen zu verhindern. Aufgrund der höheren Zielgenauigkeit ist die Bedeutung der beschriebenen Effekte für die InVeKoS-Kontrollen entsprechend höher zu bewerten als für die Erosionsberatung und wird in den Beurteilungen zur Anwendbarkeit in Kapitel 8.2 aufgegriffen.

6.1.7 Fehler in der Fläche (Übersegmentierung)

Innerhalb der zu extrahierenden Flächen treten in den Ergebnisgeometrien verschiedenartige Fehler auf. Obwohl ein nahezu wolkenfreier Bildausschnitt gewählt wurde, kommt es in einem Bereich der Szene aufgrund von Wolken bei den Varianten Eco2 und Eco3 sowie Sgf1-3 zu Übersegmentierung (siehe Abb. 6.8). Auch der zugehörige Wolkenschatten führt zur Segmentierung überzähliger Teilstücke. Lediglich Eco1 reagiert nicht so stark auf die Störung durch die Bewölkung, weil der mit 230 höchste Scaleparameter der *eCognition*-Varianten weniger sensibel auf die durch die Bewölkung hervorgerufene Spektralheterogenität reagiert,. Dieses führt zu einem Fortschreiten der Segmentierung bis an die jeweiligen Schlag- oder Feldblockgrenzen. Auch die Gewichtung des Spektralkriteriums ist mit 0,1 sehr gering, so dass bei Eco1 die durch die Bewölkung hervorgerufenen Spektralvariabilitäten wesentlich geringere Auswirkungen haben, als bei den anderen *eCognition*-Variationen.

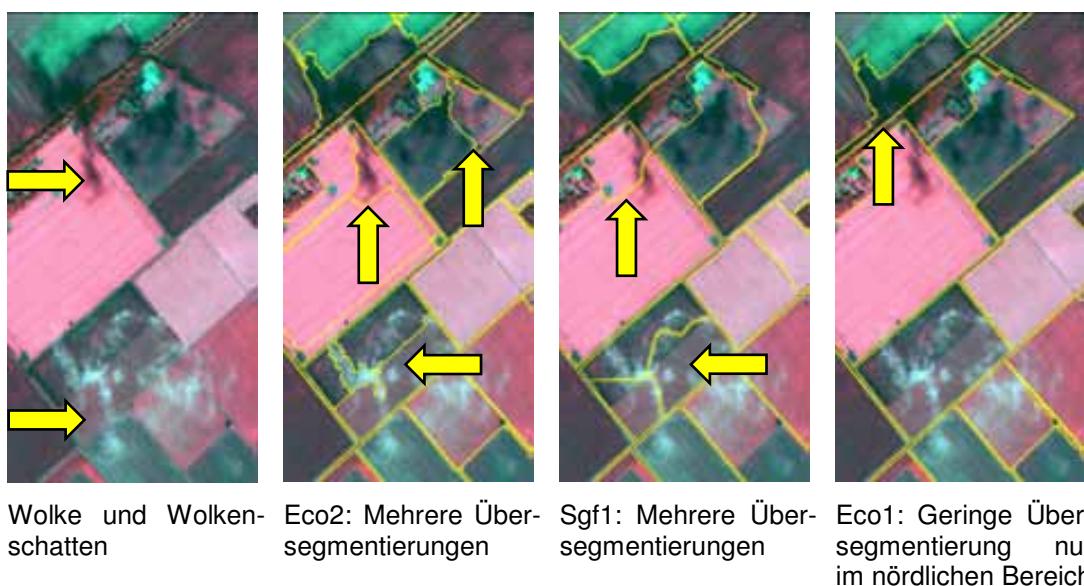
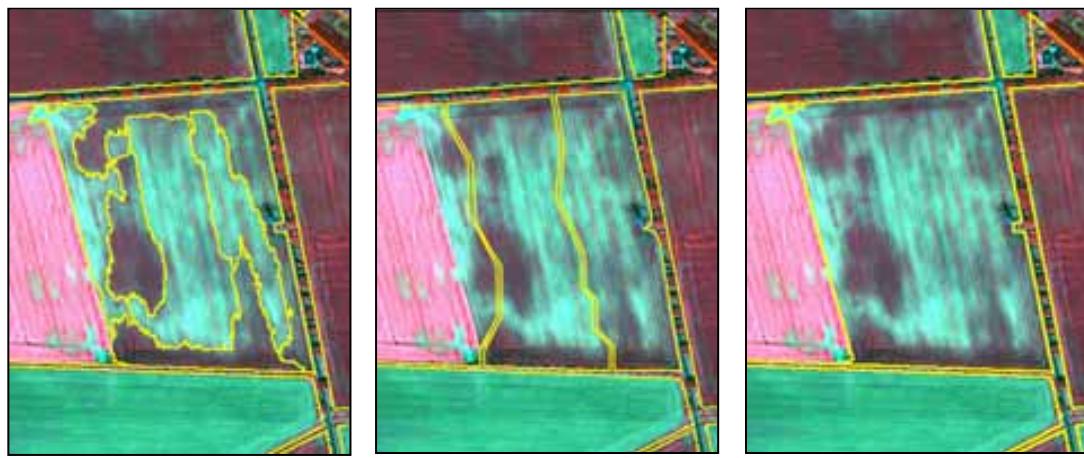


Abb. 6.8: Gegenüberstellung von Übersegmentierung durch Wolken und Wolkenschatten mit *eCognition* und *SegmentationFields*

Auch jahreszeitlich, oder durch Boden- und Feuchtevariabilitäten verursachter, unterschiedlich starker Vegetationsbestand führt zu einer hohen Spektralheterogenität innerhalb von Schlagflächen und somit in den Ergebnissen Eco2-3 sowie Sgf1-3 zu Fehlsegmentierungen (siehe Abb. 6.9). Erneut erweist sich Eco1 als weniger anfällig für die auftretenden Spektralunterschiede.



Eco2: Mehrere Übersegmentierungen

Sgf1: Übersegmentierungen und fehlende Grenze

Eco1: Keine Übersegmentierung

Abb. 6.9: Gegenüberstellung von Übersegmentierung durch Bodenvariabilitäten mit eCognition und SegmentationFields

Bei der visuell-manuellen Bewertung der Ergebnisgeometrien weisen bei *eCognition* ca. 8 % bzw. bei *SegmentationFields* 12 % der Flächen überschüssige Grenzen innerhalb der jeweiligen Referenzgeometrien auf. Die Häufigkeit von fehlerhaften Übersegmentierungen ist für beide Methoden in der InVeKoS-Referenz annähernd gleich hoch wie die Fehlerquote bei der Erosionsreferenz, somit ist zu vermuten, dass sich durch eine Übersegmentierung i. d. R. keine sinnvollen Objekte (z. B. in Form von InVeKoS-Abzugsflächen) ergeben.

Eine fehlerhafte Grenze innerhalb eines Schlages hat starke Auswirkungen auf die Anwendbarkeit der entsprechenden Ergebnisflächen für die Erosionsberatung und für InVeKoS, da die tatsächliche Geometrie der Schläge stark verändert wird, so dass entsprechende Effekte minimiert werden müssen. Dieses kann u. U. durch eine Anpassung der Gewichtung des Spektralkriteriums in *eCognition* geschehen, was dazu führt, dass die Empfindlichkeit gegenüber Grauwertvariabilitäten an die spektralen Gegebenheiten angeglichen wird. Allerdings führt eine geringere Empfindlichkeit auch schnell wieder zu einem systematischen Nichterkennen von Grenzen, so dass an dieser Stelle das schwerwiegende Problem deutlich wird, für eine Bildszene von 25 km² mit ca. 1.000 Schlagflächen Segmentierungseinstellungen zu finden, die sämtlichen Eventualitäten gerecht werden.

6.1.8 Vollständigkeit der Grenzen (Untersegmentierung)

Betrachtet man die Anzahl der Ergebnissegmente, so scheinen sich die Varianten Eco2 und Eco3 mit 967 bzw. 933 Objekten der Objektanzahl der Erosionsreferenz (969 Flächen) anzunähern. Jedoch zeigt sich bei der Betrachtung der in Kapitel 4.1.4 beschriebenen und aus der Variation Eco3 ermittelten Fehlerkategorien, dass bei fast 40 % der Erosionsreferenzflächen Grenzen teilweise oder komplett fehlen (siehe Abb. 5.20. u. 6.10). Diesem Wert steht eine Übersegmentierung im Randbereich bei 21,4 % der Erosionsschlagflächen gegenüber (siehe Abb. 5.20). Diese Gegenüberstellung zeigt, dass sich in der Variation Eco3 sowohl Übersegmentierung im Randbereich als auch ein häufiges Fehlen von Grenzen ausgleichen, wodurch deutlich wird, dass ein Vergleich der Segmentanzahl kein ausreichendes Kriterium für die Beurteilung der Vollständigkeit der Segmentierungsergebnisse ist. Für eine Betrachtung der Vollständigkeit müssen stets die fehlerhaften Über- und Untersegmentierungen berücksichtigt werden.



Abb. 6.10: Nichterkennen von Grenzen mit eCognition (Eco1)

Erneut zeigt Eco1 mit 724 Segmenten andere Werte als Eco2 und Eco3, weshalb in diesem Falle von einer deutlichen Untersegmentierung gesprochen werden kann. Diese kann auf die bereits im Rahmen der Abzugsflächen erläuterten Charakteristika der Variation Eco1 (hoher Scaleparameter und gering gewichtetes Spektralkriterium) zurückgeführt werden, da Unterschiede zwischen spektral ähnlichen Flächen nicht ausreichend genau erkannt werden. Insbesondere bei der Betrachtung der Ergebnisse der manuellen Fehlerkategorisierung für die InVeKoS-Referenz zeigt sich, dass bei nahezu zwei Dritteln aller Referenzflächen kleinere Grenzbereiche oder komplett Grenzzüge fehlen, so dass auch hier das Ziel einer nahezu vollständigen Erfassung der Schlaggrenzen verfehlt wird.

Im Vergleich der Ergebnissegmentanzahl der *SegmentationFields*-Variationen mit den Referenzdatensätzen Erosion (969 Flächen) und InVeKoS (1.416 Flächen) zeigen die 643, 646 und 647 Flächen (Sgf1-3, siehe Tab. 5.1) ebenfalls eine sehr deutliche Untersegmentierung.

Diese Tatsache ist deckend mit den Anteilswerten der Fehlerkategorien von Sgf2, die zeigen, dass bei ca. 73 % (Erosionsreferenz) bzw. ca. 84 % (InVeKoS-Referenz) der Referenzflächen ein in Teilbereichen unvollständiger Grenzverlauf vorliegt (siehe Abb. 5.20 u. 5.26).

Zwar tritt auch bei ca. 30 % der Flächen eine Übersegmentierung an Flächenrändern auf (siehe Abb. 5.20 u. 5.26), jedoch überwiegen die fehlenden Grenzen, woraus die geringe Segmentanzahl resultiert. Ursachen für die geringe Segmentanzahl können die zahlreichen Abzugsflächen und die sehr genauen Flächengliederungen in der InVeKoS-Referenz sein. Die Segmentierungsstrategie geht von Schlägen aus, die relativ einheitliche und kompakte Flächen darstellen, so dass, u. a. durch die Glättung im Randbereich und durch die geringe geometrische Auflösung der Bilddaten von 4,0 m bedingt, in der InVeKoS-Referenz erfasste Strukturen nicht erkannt werden.

Die Vollständigkeit der Segmentierung stellt ein wichtiges Kriterium für die Bewertung der Anwendbarkeit im Rahmen der Erosionsberatung am NLfB und der InVeKoS-Kontrollen dar und wird mit einer entsprechenden Gewichtung in die anwendungsbezogene Evaluation von *eCognition* und *SegmentationFields* integriert (siehe Kap. 8.1 u. 8.2).



Abb. 6.11: Nichterkennen von Grenzen mit SegmentationFields (Ipi1)

6.2 Diskussion methodischer Besonderheiten

6.2.1 Geometrische Auflösung der Bilddaten

Ein wichtiger Aspekt, der die Unterschiede in den Ergebnissen der Methoden unterstreicht, ist die in den Kapiteln 4.2.4 und 4.3.2 beschriebene Nutzung unterschiedlicher Bildauflösungen. Für *eCognition* konnte die Vorsegmentierung mit einem Scaleparameter in Höhe von 10 die Rechenzeit für die notwendigen Segmentierungsvarianten stark verkürzen, weshalb mit 1,0 m pro Pixel die hohe geometrische Originalauflösung des Resolution-Merge-Bildes (siehe Kap. 3.6.1) genutzt wurde, ohne dass ein wesentlicher zeitlicher Mehraufwand entstand.

Eine derartige systematische Beschleunigung des Segmentierungsprozesses besteht für *SegmentationFields* nicht, so dass ein geringer aufgelöstes Bild mit 4,0 m pro Pixel genutzt werden musste, um die Durchführung der vielen Testläufe im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der zahlreichen Parametereinstellungen in *SegmentationFields* zu ermöglichen. Dieses Vorgehen muss als Kompromiss zwischen praktikabler Rechenzeit und Segmentierungsgenauigkeit angesehen werden (siehe Kap. 4.3.2). Es wurden keine einzelnen Tests in einer höheren Auflösung durchgeführt, da eine Änderung der geometrischen Auflösung auch erneute Anpassungen an den Segmentierungseinstellungen erfordert (vgl. JÄHNE 2002, S. 131 f.).

Eine Verringerung der geometrischen Auflösung hat nicht nur negative Auswirkungen auf die Segmentierungsqualität, sondern kann aufgrund der Reduktion kleinfächiger Spektralheterogenitäten zu geringeren Störungen im Verlauf der Objektextraktion führen (vgl. JÄHNE 2002, S. 131 ff.). Feinstrukturierte Landschaftsmerkmale wie z. B. Hecken oder Gräben können mit der verwendeten Auflösung von 4,0 m nur ungenau oder gar nicht erfasst werden (siehe Abb. 6.12). Allerdings wurde bereits in Kapitel 6.1.3 aufgezeigt, dass für die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit eine höhere Grenzgenauigkeit durch die 1,0 m-Auflösung bei *eCognition* den Vorteil von geringeren Störungen durch eine 4,0 m-Auflösung bei *SegmentationFields* ausgleicht und übertrifft.

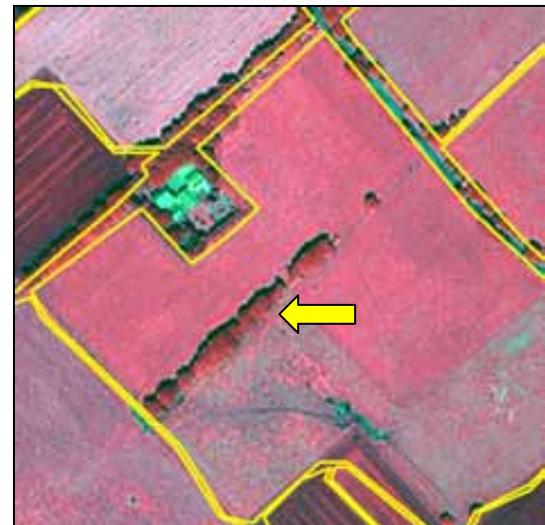


Abb. 6.12: Nichterkannte Hecke (Sgf1)

Für die Beurteilung der Anwendbarkeit beider Methoden bei den InVeKoS-Kontrollen ist zu beachten, dass ein Großteil der mit 1,5 m Genauigkeit erfassten Abzugsflächen innerhalb der Schläge nicht korrekt erkannt werden kann und somit per Hand nachzudigitalisieren ist. Dieses ist mit dem Gesamtflächenfehler der InVeKoS-Abzugsflächen von über 4.000 % eindeutig nachzuweisen.

Trotz der höheren geometrischen Bilddauflösung ist auch der Gesamtflächenfehler F_G (Median) der *eCognition*-Varianten Eco2 und Eco3 mit ca. 4.000 % für die Abzugsflächen (InVeKoS) äußerst hoch, was auf die hohen Scaleparametereinstellungen und das daraus resultierende lang anhaltende Regionenwachstum zurückzuführen ist. Eco1 nähert sich aufgrund des hohen Scaleparameters und der geringen

Berücksichtigung des Spektralkriteriums mit ca. 5.800 % den Werten der *SegmentationFields*-Variationen (ca. 6.600 %) an.

Die Erkennung von Abzugsflächen könnte durch eine Segmentierung auf mehreren Skalenebenen verbessert werden. Auch der in Kapitel 7.1 beschriebene Klassifikationsansatz kann eine Ergebnisverbesserung bewirken.

Für eine Nutzung sehr hochauflösender Bilddaten mit *SegmentationFields* muss für weitere Arbeiten eine praktikable Rechenzeit mit einer hohen Genauigkeit der Ergebnisse kombiniert werden, um auch die im zweiten Teilschritt des Projektes Geotechnologien anvisierte Erkennung von Winderosionshindernissen großflächig erfolgreich durchführen zu können. Die Realisierung ist in einem von *SegmentationFields* getrennten Prozess geplant (siehe Kap. 7.4). Die Nutzung von verschiedenen Bildauflösungen bei der Schlagextraktion könnte die Vollständigkeit der Segmentierung und Linienerkennung erhöhen.

Eine präzise Erfassung der Schlaggrenzen und Rechenzeiten, die sich für einen großflächigen Einsatz als realistisch erweisen, sind eng mit der gewählten geometrischen Auflösung der Bilddaten verknüpft und stellen somit eine weitere Voraussetzung für die Einsetzbarkeit von *SegmentationFields* und eCognition für die Erosionsberatung bzw. für InVeKoS dar (siehe Kap. 8.1 u. 8.2).

6.2.2 Verwendung von Feldblöcken als Vorwissen

Das Untersuchungsgebiet ist räumlich sehr stark gegliedert und kleinteilig parzelliert, weshalb sich viele der zu extrahierenden Schlaggrenzen bereits aus den Feldblockgeometrien übernehmen lassen, da ein Feldblock bereits einen einzelnen Schlag bilden kann. Bei der Verwendung von Feldblockdaten als Vorwissen ist zu beachten, dass die Daten zwar aus Luftbildern mit einer hohen Genauigkeit erfasst wurden, die manuelle Erfassung per Hand und auch die Fehlerquelle der subjektiven Interpretation zu Verzerrungen und Ungenauigkeiten führen kann (siehe Kap. 3.6.2). Außerdem liegen aufgrund der föderal verteilten Verantwortlichkeiten nicht für alle Bundesländer Feldblockdaten vor, was dazu führt, dass die Strategie der Nutzung von Feldblöcken nicht für alle Bundesländer greift.

Als feste Außengrenzen von Agrarflächen sollten die als Vorwissen verwendeten Feldblockdaten nur Flächen beinhalten, die tatsächlich landwirtschaftlich genutzt werden, so dass neben den erwähnten Feldblockinseln (siehe Abb. 6.15) weitere Abzugsflächen eigentlich nicht auftreten können. Allerdings führt bei der Übertragung der anhand von Luft- oder sehr hochauflösenden Satellitenbildern erstellten

Feldblöcke auf neue Bilddaten und die hohe Variabilität der Landschaft zu Abweichungen und neuen Grenzen (z. B. durch Aufforstungen, Straßenbau, etc.), die bei der Übertragung der verwendeten Methoden für einen großflächigen Einsatz berücksichtigt werden müssen. Auch die geometrische Auflösung und die Genauigkeit der Georeferenzierung der Bilddaten kann zu Verschiebungen im Vergleich zu den Feldblockvektoren führen, wodurch die Entstehung von Abzugsflächen im Grenzbereich möglich wird.

Die äußeren Feldblockgrenzen sind in den Strategien für die Segmentation mit *eCognition* und *SegmentationFields* als feststehende Abgrenzung definiert, die als Vorwissen den Segmentierungsprozess unterstützen soll und deren Grenzen durch die Segmentation nicht mehr verändert werden dürfen. In den Ergebnissen von *eCognition* und *SegmentationFields* treten jedoch leichte Abweichungen von den ursprünglichen Feldblockgrenzen auf (siehe Abb. 6.13), die aufgrund der Transformation von Vektor- in Rasterdaten für die Nutzung als Vorwissen sowie bei der Rücktransformation beim abschließenden Export der Daten auftreten. Diese Abweichungen bewegen sich in einem Bereich von ca. 1,0 m bis 3,0 m, so dass sie im Rahmen der für die Erosionsberatung anvisierten Genauigkeit liegen. Für InVeKoS können derartige Ungenauigkeiten allerdings bereits eine deutliche Abweichung von der tatsächlichen Nutzungsgröße darstellen.

In einigen Fällen treten bei *SegmentationFields* auch wesentlich stärkere Abweichungen vom Feldblockrand auf (siehe Abb. 6.14), deren Ursprung sich anhand der Ergebnisgeometrien nicht mehr detailliert nachvollziehen lässt. Möglicherweise ist die in Kapitel 6.2.3 diskutierte Vektorisierung als Ursache anzusehen.

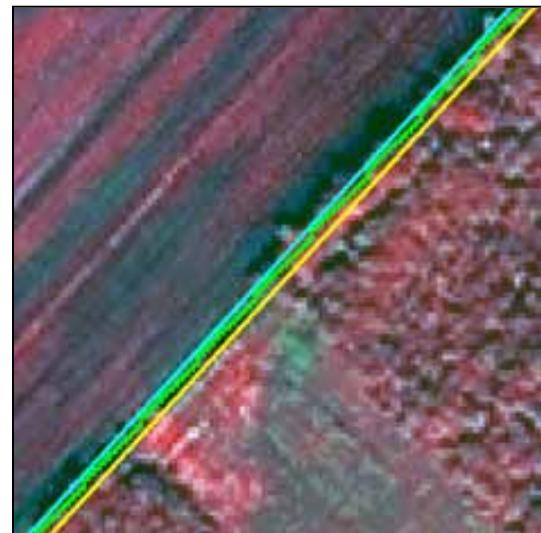


Abb. 6.13: Geringe Abweichungen von den Feldblockdaten (türkis) bei *eCognition* (grün) und *SegmentationFields* (gelb)



Abb. 6.14: Abweichung der Segmentation mit *SegmentationFields* (gelb) von den Feldblockgrenzen (türkis)

Die Feldblockdaten enthalten sog. Feldblockinseln, die inselartige Abzugsflächen innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen darstellen (siehe Abb. 6.15). Mit *eCognition* kann dieses Vorwissen über die Inselflächen in die Segmentierung integriert werden, was zur Folge hat, dass der Segmentgrenzverlauf im Ergebnisbild sich nicht nur an den Außengrenzen der Feldblöcke orientiert, sondern auch die innenliegenden Feldblockinseln abbildet. Für *eCognition* können die Feldblockinseln auch in einem der Segmentierung nachgeschalteten Klassifikationsprozess (siehe Kap. 7.1) als wichtige Vorinformation dienen. Durch die Vektordaten liegen bereits Informationen über die Geometrie der Objekte vor, die im Klassifikationsschritt inhaltlich interpretiert werden müssen (z. B. langgestreckte Polygone, die auf Hecken hindeuten).

In *SegmentationFields* ist die Integration von Inselflächen innerhalb der als Vorwissen verwendeten Vektordaten z. Zt. nicht implementiert, so dass die Inselflächen durch die Schlaggrenzextraktion als eigenständige Segmente abgegrenzt werden müssen. Da Feldblockinseln i. d. R. eher kleine Flächen (Überlandleitungsmasten, Teiche, etc.) darstellen, werden die Objekte aufgrund der auf großflächige Schlagbereiche ausgerichteten Segmentierungsstrategie sowie der Schließung von Löchern durch die Verwendung der HALCON-Operatoren *Closing_circle* und *Erosion_circle* (siehe Kap. 4.3.3) innerhalb der segmentierten Regionen durch *SegmentationFields* nicht erkannt. Des weiteren erschwert die geringere Auflösung der mit *SegmentationFields* verwendeten Bilddaten (4,0 m) die Detektion von sehr kleinen Objekten (z. B.: Teiche, Dauervernässungen).

Auch für die Detektion von Winderosionshindernissen können Feldblockdaten in einem weiteren Schritt im Geotechnologien-Teilprojekt am IPI als Vorwissen dienen. Dafür muss eine Nutzung der Feldblockinseln als wertvolle Vorinformation in die Modellierung integriert werden, da insbesondere innerhalb der Schläge liegende Heckenstrukturen einen wichtigen Schutz vor Winderosionsereignissen darstellen.



Abb. 6.15: Feldblockinsel (gelber Pfeil) innerhalb der Feldblockfläche (gelb umrandet)

6.2.3 Vektorisierung der Segmentierungsgeometrien

Um die Ergebnisgeometrien im Sinne der Erosionsberatung und der InVeKoS-Kontrollen in Geoinformationssystemen weiterverarbeiten zu können, müssen die detektierten Flächen als Vektoren vorliegen. Es ist zu beachten, dass durch eine Generalisierung keine Überlappungen der Schlagflächen oder Lücken zwischen den Schlagflächen entstehen dürfen, da für eine sinnvolle Nutzung und Weiterverarbeitung der Daten ‚saubere‘ Topologien notwendig sind. Auch entspricht das Vorkommen von sich überlappenden Objekten nicht der Definition einer Segmentierung nach BAUMGARTNER (2003, S. 15, siehe Kap. 2.4.2). Die Art der Vektorisierung der Ergebnisgeometrien hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Extraktionsergebnisse und einen direkten Bezug zur in den Kapitel 8.1 und 8.2 diskutierten Einsetzbarkeit für die Erosionsberatung und InVeKoS.

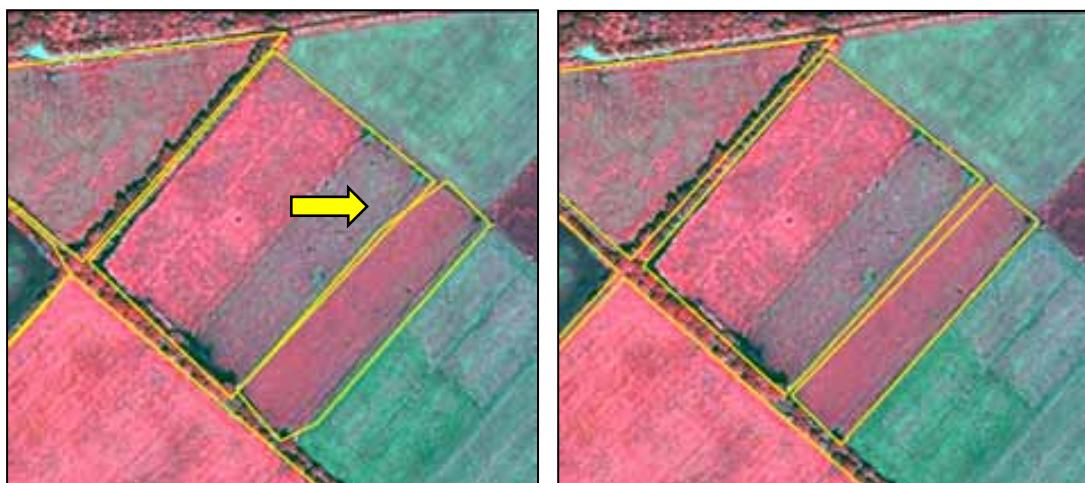
Die Vektorisierung mit *eCognition* führt zu einem lücken- und überlappungsfreien Vektordatensatz, in dem alle extrahierten Segmente an die Grenzen ihrer jeweiligen Nachbarobjekte angepasst sind, so dass die gesamte Fläche der als Vorinformation genutzten Feldblockdaten abgedeckt ist. Ein Problem für die direkte Einsetzbarkeit der von *eCognition* erzeugten Flächen stellt die Vektorisierung der zunächst als Rasterbilder vorliegenden Ergebnisgeometrien dar. So sind bei den Standardeinstellungen von *eCognition* deutliche Treppenbildungen zu erkennen (siehe Abb. 6.4). Die Software *eCognition* bietet Exportfunktionen, die zu einer unterschiedlichen Komplexität bzw. Generalisierung der Ergebnisgeometrien führen. Für die vorliegende Arbeit wurden Standardeinstellungen verwendet, die sich an den pixelgenauen Extraktionsergebnissen orientieren, um eine nicht durch Generalisierung beeinflusste Segmentierung bewerten zu können. Ein Weg die Komplexität der Objekte und damit auch die Größe der Datensätze zu verringern, wäre eine Nachbearbeitung der Daten mit entsprechenden GIS-Operationen. So bietet die GIS-Software ArcInfo der Firma ESRI eine Möglichkeit der Generalisierung von Vektorgeometrien. Eine derartige Nachbearbeitung wurde in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt, da für den direkten Vergleich der Methoden von *eCognition* und *SegmentationFields* die extrahierten Vektordaten in einem unbearbeiteten Zustand beurteilt werden müssen, um einen Einfluss der Nachbearbeitungsschritte auf die Segmentierungsqualität auszuschließen.

Der Export der extrahierten Objekte führt bei der Vektorisierung mit *SegmentationFields* zu Lücken und Überlappungen zwischen den einzelnen Schlägen. Diese Lücken entstehen aufgrund der Erzeugung von Vektorgeometrien aus den zunächst als Rasterkonturen vorliegenden Umrissen der erkannten Objekte.

Bei der Umwandlung werden die Objekte nicht in ihrer Gesamtheit transformiert und die Lage der Nachbargeometrien nicht einbezogen, sondern jede extrahierte Schlagfläche wird einzeln vektorisiert, ohne dass die jeweiligen Grenzen und Stützpunkte an die Nachbarobjekte angepasst werden.

Überlappungen an den Grenzen der detektierten Flächen (siehe Abb. 6.16a) ergeben sich insbesondere, wenn bei der Außenkonturerzeugung mit dem Operator Gen_contour_region_xld die äußere Seite der als Rasterdaten vorliegenden Schlaggrenzen vektorisiert wird (Variable: mode, Wert: border) (siehe Kap. 4.3.3). Erfolgt die Vektorisierung anhand des Zentrums der Kontur (Variable: mode, Wert: center), treten i. d. R. keine Überschneidungen auf, jedoch entsteht eine Lücke (siehe Abb. 6.16b) zwischen den Flächen, die aufgrund der geometrischen Auflösung von 4,0 m mehrere Meter betragen kann, und sich somit auf die Gesamtfläche der Ergebnisgeometrie auswirkt. Bereits die scheinbar geringe Lückenbildung von nur einem Meter kann sich aufgrund ihrer Regelmäßigkeit für die Gesamtszene systematisch auf mehrere Dutzend Hektar aufsummieren.

Die Vektorisierung des Zentrums (center) wurde dennoch aufgrund des geringeren Gesamtflächenfehlers F_G (Median) in den Parametertests gegenüber der Randvektorialisierung (border) (siehe Kap. 4.2.5.1) für die Berechnung der Gesamtszene mit *SegmentationFields* angewendet, auch, um das Auftreten von Überlappungen zu minimieren, die der Definition einer Segmentierung von BAUMGARTNER (2003, S. 15, siehe Kap. 2.4.2) widersprechen.



a) Überlappung (Variable: mode, Variablenwert: border)
b) Lückenbildung (Variable: mode, Variablenwert: center)

Abb. 6.16: Überlappung (a) und Lückenbildung (b) von vektorisierten Flächen bei *SegmentationFields* (Operator: gen_contour_region_xld)

Dieser ausgeprägte Vektorisierungseffekt muss bei der Betrachtung des Gesamtflächenfehlers beachtet werden und stellt eine grundlegende zu lösende Aufgabe bei der Weiterentwicklung von *SegmentationFields* dar, um eine Einsetzbarkeit der Software in den dieser Arbeit zugrunde liegenden, angewandten Fragestellungen Erosionsberatung und InVeKoS zu erreichen. Dieser Effekt steht am Ende der Extraktionsprozedur von *SegmentationFields* und lässt somit nur einen indirekten Schluss auf die als Rasterdaten vorliegenden programminternen Ergebnisse der Erkennungsmethoden zu. Eine genaue Berechnung von Fehlerflächen kann jedoch nur auf Grundlage der Ergebnisvektoren geschehen. Auch für die operative Einsetzbarkeit der Methoden von *eCognition* und *SegmentationFields* für die Erosionsberatung bzw. für InVeKoS-Kontrollen sind Vektorgeometrien unabdingbar, um in ein GIS integrierbar zu sein.

6.2.4 Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit

Bei früheren Versionen von *eCognition* hatte eine Änderung des Bildausschnittes unterschiedliche Segmentierungsverläufe zur Folge. Seit der Programmversion 3.0 ist eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben, da eine Abhängigkeit der Segmentierung vom gewählten Bildausschnitt nicht mehr besteht (vgl. MEINEL u. NEUBERT, 2003, S. 190). Bei *SegmentationFields* ist die Segmentierung ebenfalls vom Bildausschnitt der Gesamtszene unabhängig, da für jeden Feldblock eine separate Segmentierung und Linienerkennung durchgeführt wird (vgl. BUTENUTH 2004b, S. 80 f.). Der Aufwand für eine allgemeine Übertragbarkeit von Segmentierungsstrategien auf andere Bildausschnitte wird in Kapitel 6.2.5 diskutiert.

6.2.5 Zeitaufwand und Kosten

Sowohl *eCognition* als auch *SegmentationFields* können für die Segmentierung der Gesamtszene je nach Einstellung der Segmentierungsparameter, Auflösung der Bilddaten und Farbtiefe mehrere Stunden benötigen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit begrenzten Zeitressourcen und die somit notwendige Verringerung der Rechenzeit sind ausschlaggebend für die Wahl einer niedrigeren geometrischen Auflösung bei der Segmentierung mit *SegmentationFields*. Dennoch stellt die Rechenzeit aufgrund ständig steigender Hardwareperformance und der Möglichkeit Berechnungsprozesse zeitlich auszulagern nur einen Faktor bei der Betrachtung der

Variable Zeitaufwand dar. Die wesentlich größere Rolle spielt der manuelle Aufwand, um die Segmentierungsparameter der beiden Programme einzustellen und an neue Voraussetzungen anzupassen.

Für *eCognition* bedeutet das, einen Scaleparameter und entsprechende Segmentierungseinstellungen zu finden, die den jeweils vorliegenden Bilddaten (geometrische Auflösung und Farbtiefe), den zu extrahierenden Objekten sowie dem gewünschten Ergebnis entsprechen. Insbesondere unter Berücksichtigung des weiterführenden Schrittes einer Klassifikation kann dieses mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Wurden entsprechende Einstellungen gefunden, so ist ein schnelleres Anpassen eines neuen Bildausschnittes aus der gleichen Region mit identischen Bilddatencharakteristika denkbar. Es wird jedoch in verschiedenen Arbeiten auf Schwierigkeiten bei der Übertragbarkeit von Segmentierungseinstellungen hingewiesen (vgl. GERIGHAUSEN u. MÖLLER 2004 S. 314; LEUKERT 2002, o. S.; PETER 2004, S. 87).

Auch bei *SegmentationFields* müssen bei der Nutzung eines neuen Bilddatentyps Anpassungen direkt im Quellcode ausgeführt werden, da zahlreiche Operatoren von der geometrischen Auflösung und den spektralen Charakteristika eines Bildausschnittes abhängig sind. Testläufe können somit, je nach Erfahrung und Vertrautheit mit dem Programm, auch mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Für beide Verfahren gilt, dass sich der Aufwand für die Einstellung der Segmentierungsparameter um ein Vielfaches erhöht, wenn nicht nach einem Try-and-Error-Prinzip vorgegangen wird, sondern die Parameter in einer empirischen Systematik ermittelt werden.

Insbesondere unter dem Aspekt der Vektorisierung (siehe Kap. 6.2.3) wurde die Möglichkeit einer Nachbearbeitung der Ergebnisse in einem GIS diskutiert, um die entsprechenden Vektorgeometrien für die Erosionsberatung bzw. die InVeKoS-Kontrollen einsetzbar zu machen. Dieses bedeutet je nach Grad der Automatisierung einen zusätzlichen Zeitaufwand.

Die Kosten für eine kommerzielle Lizenz für aktuelle Version *eCognition* 4.0 liegen bei 14.000 €, für akademische Kunden bietet die Definiens Imaging GmbH eine spezielle Lizenz für 2.900 € an. Ein Mietmodell erlaubt die Nutzung von *e-Cognition* in einem maximalen Zeitrahmen von 3 Monaten für 300 € pro Monat (vgl. ERHARDT 2004, Email).

Für die Verwendung der in *SegmentationFields* genutzten Operatoren-Bibliothek HALCON 7.0.1 (siehe Kap. 4.3.1) gibt es verschiedene Lizenzmodelle: So kostet eine HALCON-Entwicklungsumgebung, die verschiedene Tools zur Programmierung und Softwareentwicklung enthält, für die kommerzielle Nutzung 5.500 €, für sog. Non-Profit-Organisationen 3.750 € und für Universitäten 1.750 €.

Die alleinige HALCON-Operatoren-Bibliothek für die Mehrfachnutzung und Weitergabe eigener Entwicklungen und die Einbindung in externe Programmiersprachen, wie das für *SegmentationFields* genutzte C++, kostet 1.350 € (vgl. ENGELHARDT 2005, Email). Des weiteren ist für den derzeitigen Einsatz von *SegmentationFields* der Erwerb einer C++-Entwicklungsumgebung notwendig. In beiden Fällen gilt, dass für die Nachbearbeitung der Vektorgeometrien mit der Anschaffung zusätzlicher Softwarelizenzen gerechnet werden muss.

Die Ergebnisse beider Methoden können zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht direkt in einen Produktionsprozess im Rahmen der Erosionsberatung bzw. der In-VeKoS-Kontrollen eingebunden werden (siehe Kap. 8.1 u. 8.2). Nur unter verschiedenen Vorbehalten bzgl. der Verbesserung der Ergebnisse (wie z. B. der Nutzung von Klassifikationstools in *eCognition*, der Anwendung von Snakes in *SegmentationFields* bzw. allgemein die Anwendung eines Qualitätsbewertungssystems) können weitere Schritte zu einer Nutzung angedacht werden. Aus diesem Grunde ist an dieser Stelle keine stichhaltige Abschätzung und direkte Gegenüberstellung der Kosten einer manuellen Digitalisierung mit denen einer automatischen Erfassung möglich.

7 AUSBLICK

In den folgenden Kapiteln werden Möglichkeiten zur Ergebnisverbesserung durch Klassifikationsmethoden und multitemporale Bilddaten mit *eCognition* sowie durch den Einsatz sog. Snakes mit *SegmentationFields* diskutiert.

7.1 Klassifikation von Schattenbereichen und Landschaftselementen mit *eCognition*

Die wichtigsten Klassifikationswerkzeuge von *eCognition* sind in Anhang A erläutert und wurden bereits mehrfach als Möglichkeit zur Ergebnisverbesserung erwähnt. Auch in den Arbeiten von FOCKELMANN (2001), GERIGHAUSEN und MÖLLER (2004), PETER (2004) sowie OESTERLE und HAHN (2004) werden verschiedene Verfahren zur Klassifikation der Segmentierungsergebnisse beschrieben und angewendet.

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Extraktion von Schlaggeometrien nur die Segmentierungsfunktionalität von *eCognition* 3.0 genutzt, um einen direkten Vergleich zu *SegmentationFields* zu ermöglichen, in dessen Extraktionsstrategie keine Klassifikationsansätze vorgesehen sind. Somit wurde eine intensive Auseinandersetzung mit Methoden zur Klassifikation sehr hochauflösender Bilddaten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt., so dass im Folgenden die eigenen Ergebnisse aus Klassifikationsansätzen rein exemplarisch dargestellt werden, um einen Ausblick auf die Möglichkeiten zur Klassifikation von Landschaftselementen mit *eCognition* aufzuzeigen.

Für die Erkennung von Schattenbereichen, die in unmittelbarer Nachbarschaft von Hecken und Baumkronen auftreten, bietet *eCognition* gute Möglichkeiten (siehe Abb. 7.1). Diese durch die Segmentierung u. U. als eigene Bereiche abgegrenzten Schattenbereiche könnten in einem zweiten Klassifikationsschritt wieder der Schlagfläche zugewiesen werden, der sie eigentlich angehören. Auch Wasser- und Vernässungsflächen lassen sich gut aus den Bilddaten extrahieren (siehe Abb. 7.2), jedoch können aufgrund der ähnlich geringen Spektralreflektion Probleme bei der deutlichen Trennung von Schattenflächen auftreten. Die Klassifikation von Heckenstrukturen und Baumreihen, die insbesondere unter dem Aspekt ihrer Funktion als Winderosionshindernisse von hoher Relevanz ist (siehe Kap. 7.4), kann durch die notwendige Abgrenzung zu anderen Vegetationsobjekten erschwert werden, da oft ähnliche Reflektionen im spektralen Merkmalsbereich auftreten.

In diesem Zusammenhang kann ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) wertvolle Zusatzinformationen liefern, indem die Zugehörigkeit zu der Klasse ‚Hecke‘ von einer bestimmten Höhe abhängig gemacht wird. Verbreitet sind auch Ansätze zur Klassifikation der Fruchtart oder der Landnutzung.

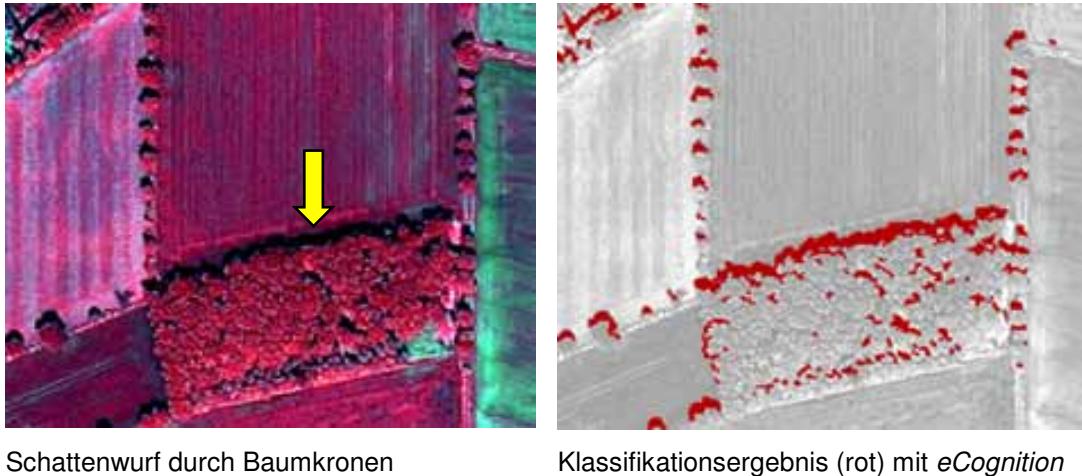


Abb. 7.1: Exemplarische Klassifikation von Schattenwurfflächen mit eCognition

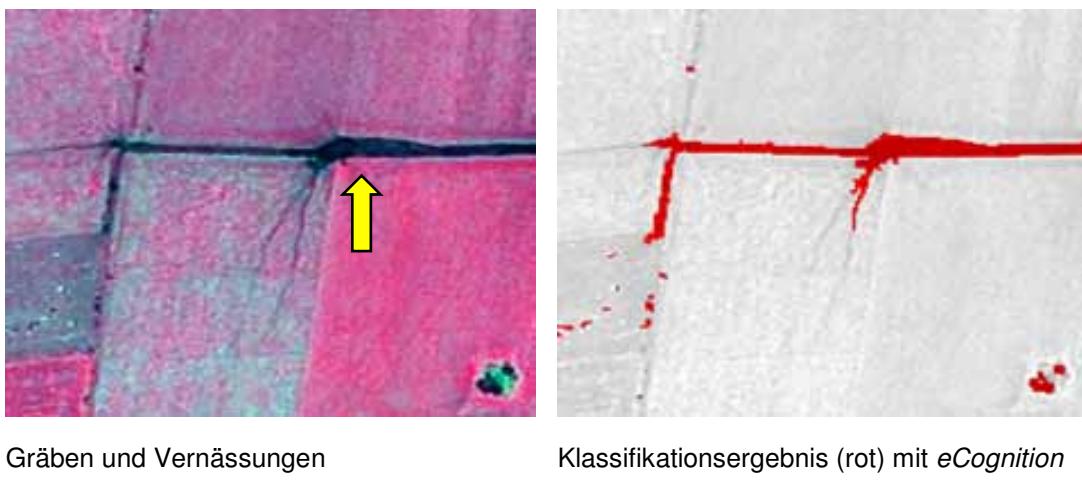


Abb. 7.2: Exemplarische Klassifikation von Wasserflächen mit eCognition

7.2 Nutzung multitemporaler Satellitenbilder mit eCognition

Wie in den Kapiteln 6.1.3 und 6.1.8 beschrieben, stellen fehlende Grenzen eine der Hauptursachen für die hohen Fehlerwerte der Segmentierung und Schlagextraktion mit *eCognition* und *SegmentationFields* dar. Einen Ansatz zur Erhöhung der Vollständigkeit stellt die Nutzung multitemporaler Bilddaten dar.

Neben den für die Segmentierung genutzten IKONOS-Daten stehen für das Untersuchungsgebiet weitere Satellitenbilddaten von unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (Herbst des Vorjahres, Frühsommer 2004) zur Verfügung (siehe Tab. 3.2), so dass eine multitemporale Segmentierung bzw. Klassifikation möglich ist. Die Analyse von Luftbild- und Satellitendaten muss nicht auf Einzelbilder begrenzt werden, weshalb die Kombination von Spektralkanälen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte in einem Multitemporalbild eine zusätzliche Schlagabgrenzung ermöglicht. In der Praxis werden häufig zwei bis drei Aufnahmezeitpunkte kombiniert.

Trotz der geringeren geometrischen Auflösung der SPOT- und IRS-Bilddaten (jeweils 20 m) können auf diesem Wege im Untersuchungsgebiet zusätzliche spektral sehr ähnliche Nachbarflächen (siehe Abb. 7.3) als unterschiedlich erkannt werden (siehe Abb. 7.4 u. 7.5). Hierfür wird die bessere Unterscheidbarkeit von Fruchtarten anhand ihrer spezifischen Bedeckung und Reflektion im Verlauf einer Vegetationsperiode genutzt. Vor allem die Unterscheidung von Winter- und Sommergetreide, die zum Aufnahmezeitpunkt der IKONOS-Bilddaten eine hohe spektrale Ähnlichkeit aufweisen, wird durch einen multispektralen Ansatz erleichtert und die Vollständigkeit der Grenzen erhöht (siehe Abb. 7.6).

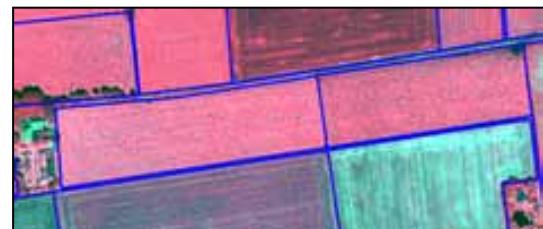


Abb. 7.3: Spektral ähnliche Flächen im IKONOS-Bild (blau: Referenzflächen)

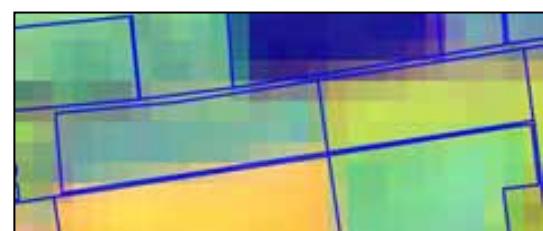


Abb. 7.4: Deutliche Trennbarkeit im Multitemporal-Bild (blau: Referenzflächen)

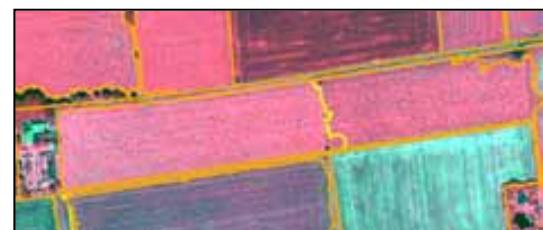


Abb. 7.5: Durch multitemporale Segmentierung erkannte Grenze (gelb) ergänzt die IKONOS-Segmentierung mit eCognition (orange)

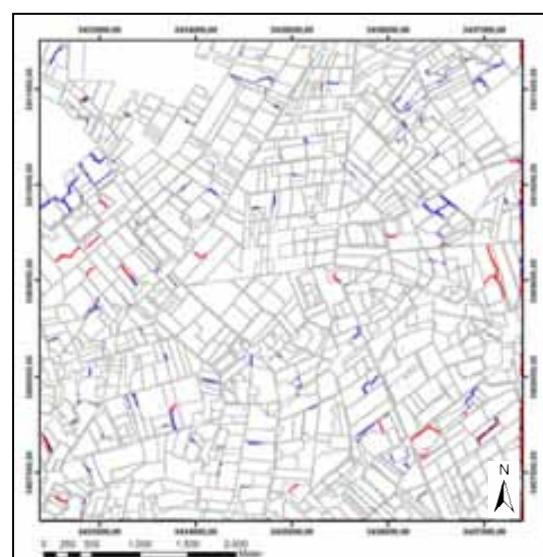


Abb. 7.6: Multitemporale Segmentierung (blau u. rot) ergänzt die IKONOS-Segmentierung mit eCognition (grau)

7.3 Nutzung des Snake-Algorithmus mit *SegmentationFields*

Die in der vorliegenden Arbeit genutzte Programmversion enthält keine Implementierung des Snake-Algorithmus, der als Methode zur Verbesserung von Geometrie und Topologie der Segmentierungsergebnisse bereits in Kapitel 2.4.3 beschrieben und dessen Integration in *SegmentationFields* in Kapitel 4.3.2 angesprochen wurde.

WIEDEMANN (2001, S. 8) weist darauf hin, dass für die Nutzung von Snakes i. d. R. eine manuelle Initialisierung durch das Setzen von Startpunkten notwendig ist. Bei der Integration in *SegmentationFields* wird dieser Schritt automatisiert, indem die Ergebnisgeometrien aus der vorhergehenden Schlagextraktion die Orientierung der Snakes festlegen. In den Algorithmus wird außerdem Wissen über die generelle Form der zu extrahierenden Schlagflächen (viereckig, gerade Kanten) integriert (vgl. BUTENUTH 2004a, S. 1068). Erste Ergebnisse von BUTENUTH (2004a, S. 1069) zeigen, dass der Einsatz des Snake-Algorithmus in vielen Fällen eine verbesserte Anpassung der Grenzlinien an die Geometrie und Topologie der Bildobjekte liefert (siehe Abb. 7.7), sich aber in einigen Bereichen Abweichungen in der Topologie der Objekte verstärken. Die in der Diskussion der Vektorisierung (Kap. 6.2.3) und der Grenzverläufe (Kap. 6.1.6) beschriebenen Unregelmäßigkeiten könnten auf diese Weise ausgeglichen werden. Bei der Betrachtung von Abbildung 7.8 ist zu beachten, dass die Ergebnisse nicht als Vektoren dargestellt sind, sondern als Rasterkonturen vorliegen, so dass die erwähnten Probleme bei der Vektorisierung (siehe Kap. 6.2.3) nicht auftreten.

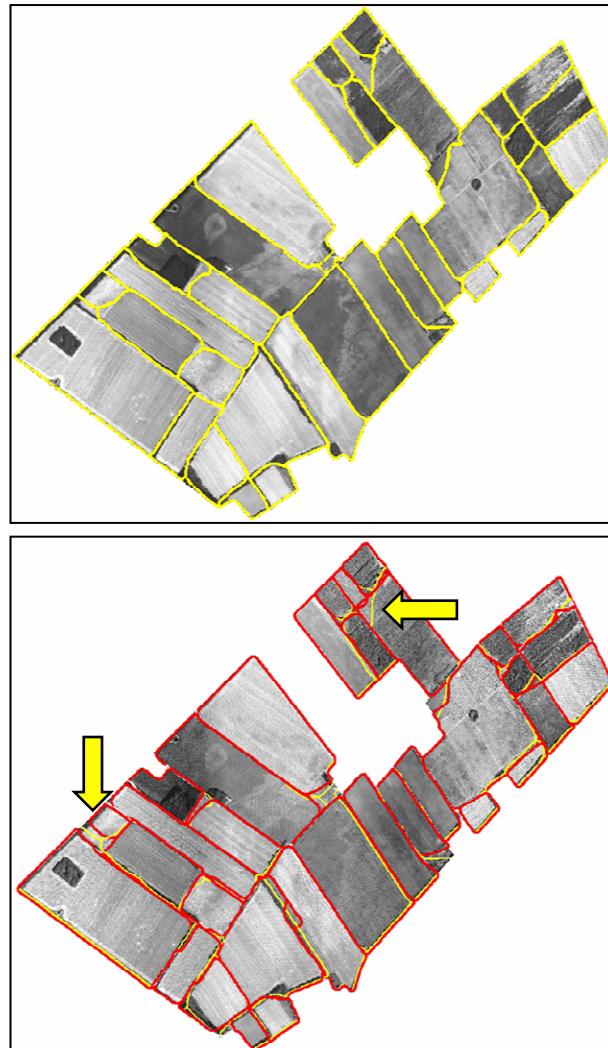


Abb. 7.7: Segmentierungsergebnis mit *SegmentationFields* (gelb, oben) und Geometrieverbessezung (Pfeil) durch Snakes (rot, unten) (Quelle: BUTENUTH 2004a, S.1069, verändert)

7.4 Extraktion von Winderosionshindernissen mit *SegmentationFields*

Ein weiteres Ziel des Geotechnologien-Teilprojektes am IPI stellt die Extraktion von Winderosionshindernissen dar. Die Bedeutung von Hecken und Baumreihen als Winderosionshindernisse, bei der Vernetzung von Lebensräumen und für die Modellierung der potentiellen Winderosionsgefährdung durch das NLfB wurde bereits in den Kapiteln 8.1.3 und 8.2.1 erläutert.

Die Extraktionsstrategie von BUTENUTH (2004a, S. 1068) sieht zunächst eine Verringerung des Suchraumes durch das Legen eines Pufferbereichs um linienhafte ATKIS-Objekte (z. B. Straßen oder Bahnlinien) vor. In diesem Suchraum wird unter Zuhilfenahme des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) und eines Digitalen Oberflächenmodells (DOM) nach Erosionshindernissen gesucht. Der NDVI ist eine speziell auf die Erkennung von Vegetationsflächen ausgerichtete Kombination und Verhältnisbildung von Spektralkanälen ($NDVI = [Nahes\ IR - Rot] / [Nahes\ IR + Rot]$), die stark mit der Vitalität der Vegetation korreliert (vgl. ALBERTZ 2001, S. 219). Außerhalb dieses Pufferbereichs, an den Grenzen der durch die ATKIS-Objekte eingegrenzten Regionen, müssen die gesuchten Objekte innerhalb der Flächen unabhängig von Vorwissen extrahiert werden (vgl. Butenuth 2004a, S. 1068).

8 FAZIT UND ZUSAMMENFASSUNG

In den Kapiteln 8.1 und 8.2 wird die Anwendbarkeit der Programme *eCognition* und *SegmentationFields* für die Erosionsberatung und die InVeKoS-Kontrollen abschließend bewertet. Die Darstellung erfolgt anhand eines Fazits der in Kapitel 6 diskutierten Schlagextraktionsqualität und der jeweiligen methodischen Charakteristika. In Kapitel 8.3 sind die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und liegen in Kapitel 8.4 in einer englischen Übersetzung vor.

8.1 Ergebnisintegration in ein GIS zur Erosionsberatung

Unter den die Wind- und Wassererosion beeinflussenden Faktoren finden sich die standortabhängigen Faktoren Feldlänge, Windoffenheit und verschiedene Angaben zu einer möglichen Hanglage der zu bewertenden Fläche. Die jeweilige Nutzung beeinflusst u. a. die Hanglänge und die Bearbeitungsrichtung der Schläge (siehe Abb. 2.1). Die genannten Faktoren sind maßgeblich von der Geometrie und Topologie der betroffenen Schlagflächen abhängig.

Für die Ausweisung der von Wind- und Wassererosion gefährdeten Gebiete erstellt das NLfB verschiedene thematische Auswertungskarten (siehe Kap. 2.1). Die Umsetzung der Berechnung der potentiellen Winderosionsgefährdung anhand des Konzepts der „tolerierbaren Feldlänge“ (NLÖ 2003, S. 25) in einem GIS erfolgt anhand der Ableitung von Erodierbarkeitsstufen auf der Basis von Bodenschätzungsdaten. Dann wird die Feldlänge in Hauptwindrichtung berechnet und anschließend die Schutzwirkung von Windhindernissen einbezogen. Diese Prozesskette führt zur abschließenden Berechnung der tolerierbaren Feldlänge und somit zur Ausweisung potentiell erosionsgefährdeter Ackerflächen (vgl. NLÖ 2003, S. 26).

Das Zusammenführen derart zahlreicher Parameter zur Abschätzung der Erosionsgefährdung erfordert eine hohe Genauigkeit der einzelnen Variablen. Zwar wird im Geotechnologien-Teilprojekt am IPI derzeit mit einer projektinternen Zielauflösung von 3,0 m gearbeitet, aus der die Genauigkeit der Erosionsreferenzflächen abgeleitet wurde, (siehe Kap. 4.1.1), jedoch bedeutet jede höhere Genauigkeit in der Erfassung von Schlaggrenzen eine Verbesserung der Gefährdungsvorhersage. So werden für die Berechnung der Erosionsgefährdung derzeit die Schlaggeometrien aus der Deutschen Grundkarte 1:5.000 (DGK 5) manuell digitalisiert, was je nach Erfahrung des Bearbeiters und entsprechend genauen Digitalisierinstrumenten eine Erfassungsgenauigkeit von maximal 1,0 m ermöglicht.

8.1.1 eCognition

Aufgrund der Tatsache, dass bis zu 59 % aller mit *eCognition* segmentierten Schlagflächen in Bezug auf die Erosionsreferenz einen Gesamtflächenfehler F_G von unter 10 % (Eco2, siehe Abb. 5.15) und sogar die Hälfte einen Gesamtflächenfehler F_G von 6,9 % aufweisen (Eco2 und Eco3, siehe Abb. 5.14), stellt die Methode einen vielversprechenden Ansatz für die Extraktion von Schlagflächen für die Erosionsberatung dar.

Die Genauigkeit der Grenzverläufe entspricht aufgrund der Nutzung der hohen geometrischen Auflösung von 1,0 m weitgehend den Genauigkeitsanforderungen für die Erosionsberatung. Eine Erhöhung der Vollständigkeit kann mit einer systematischen Präzisierung der Segmentierungseinstellungen (insbesondere des Formkriteriums) erreicht werden. Durch den Einsatz multitemporaler Satellitenbilder lassen sich durch weitere Segmentierungen zusätzliche, bisher nicht erkannte Grenzen extrahieren (siehe Kap. 7.2). Die inhaltliche Interpretation der Ergebnisseegmente durch eine objektbasierte Klassifikation kann zu einer Verbesserung der Ergebnisse im Randbereich (siehe Kap. 6.1.4 u. 6.1.6) führen, insbesondere durch die Erkennung von Schattenbereichen und Landschaftselementen (siehe Kap. 7.1).

Es muss weiterhin getestet werden, ob mit der integrierten Exportfunktion eine in den Kapiteln 6.2.4 diskutierte Generalisierung der Schlaggeometrien zu verwirklichen ist, so dass entsprechende Nachbearbeitungsschritte entfallen.

Da neben dem hohen Anteil an gut erkannten Flächen auch 18 % bis 20 % (Eco2 u. Eco3) einen sehr hohen Gesamtflächenfehler F_G aufweisen, müssten vor der Extraktion anhand einer wissensbasierten Qualitätskontrolle auf Basis der Arbeiten von APLIN und ATKINSON (2004, S. 141 ff., siehe Kap. 2.4.3) vorab potentiell schlecht erkennbare Flächen vorsortiert werden, um eine effektive Einbindung der Ergebnisse in einen Produktionsprozess zu ermöglichen.

8.1.2 SegmentationFields

Mit *SegmentationFields* hat in Bezug auf die Erosionsreferenz zwar die Hälfte der extrahierten Schlagflächen einen Gesamtflächenfehler F_G von unter 25 % (Sgf2, siehe Abb. 5.14), jedoch weisen mit 36 % mehr als ein Drittel der Flächen einen Gesamtflächenfehler F_G unter 10 % auf (siehe Abb. 5.17).

Diese Werte zeigen, dass für die Erosionsberatung auch die Segmentierung mit *SegmentationFields* eine vielversprechenden Strategie für die automatisierte Extraktion von Schlagflächen darstellt. Allerdings muss neben der Vollständigkeit der Segmentierung, die bei *eCognition* ebenfalls zu verbessern ist, auch ein genauerer Verlauf der Grenzgeometrien in Form der nach Abschluss der Segmentierung exportierten Vektordaten verwirklicht werden (siehe Kap. 6.1.6 u. 6.2.3).

Eine Verbesserung der Vollständigkeit der Schlaggrenzextraktion kann mit einer systematischen Präzisierung der Segmentierungsoperatoren, vor allem durch eine Anpassung an eine Erhöhung der geometrischen Auflösung (siehe Kap. 6.2.1) erfolgen. Die Genauigkeit der Grenzen genügt vielfach der Zielgenauigkeit, jedoch treten z. T. starke geometrische Abweichungen von den tatsächlichen Schlag- und Feldblockgrenzen auf (siehe Kap. 6.1.6 u. 6.2.2), die gelöst werden müssen. Der Einsatz des Snake-Algorithmus (siehe Kap. 7.3), der in der für die vorliegende Arbeit genutzten Programmversion nicht implementiert war, ermöglicht nicht nur die Verbesserung der Grenzverläufe, sondern auch eine Anpassung in der Topologie benachbarter Flächen. Auch für *SegmentationFields* wäre eine Nutzung multitemporaler Bilddaten möglich. Das für *eCognition* bereits erwähnte Instrument zur wissensbasierten Qualitätskontrolle könnte auch für die praktische Anwendung von *SegmentationFields* eine Vorauswahl potentiell gut zu extrahierender Flächen treffen, da derzeit ca. ein Drittel aller Flächen einen Gesamtflächenfehler F_G von über 100 % aufweisen.

Insbesondere die Tatsache, dass es sich bei *SegmentationFields* im Gegensatz zur kommerziellen Software *eCognition* um ein offenes System handelt, das detailliert an die Teilergebnisse des Projektes und die Bedürfnisse für die Erosionsberatung des NLfB angepasst werden kann, lässt eine Verbesserung der Ergebnisse durch entsprechende Entwicklungsschritte erwarten.

8.1.3 Winderosionshindernisse

Die Lage von Hecken, Gehölzen und Baumreihen geht als wichtige Eingangsgröße in die schlaggenaue Berechnung der potentiellen Winderosionsgefährdung des NLfB ein (vgl. NLÖ 2003, S. 29). Die im Rahmen der Modellierung von Schlägen (siehe Kap. 2.3) auf die Extraktion großflächiger Schlaggeometrien ausgelegten Segmentierungsstrategien von *eCognition* und *SegmentationFields* führen zu einem hohen Gesamtflächenfehler bei der Abzugsflächenerkennung, so dass entspre-

chend mit den untersuchten Methoden derzeit eine flächendeckende Erkennung von Winderosionshindernissen nicht möglich ist.

Zwar erkennt *eCognition* einige in den Randbereichen gelegene Heckenstrukturen, jedoch ist das Auffinden derartiger Objekte eher zufällig und in der derzeitigen Strategie nicht festgelegt. Eine Segmentierung bzw. Klassifikation auf mehreren Ebenen könnte hier ansetzen und mit einer Strategie zur Klassifikation von Landschaftselementen zu einer Ergebnisverbesserung führen. (siehe Kap. 7.1).

Die Segmentierungsstrategie von *SegmentationFields* betrachtet den Randbereich der Feldblock- und Schlagflächen als einen Bereich, der potentielle Störungen enthält, so dass explizit in diesem Gebiet Glättungsfilter angewendet werden. Diese verhindern eine Erkennung von Winderosionshindernissen. Die Erkennung von Winderosionshindernissen ist im Hannoveraner Geotechnologien-Projekt in einem weiteren Projektschritt durch die Realisierung einer eigenständigen Software vorgesehen, die als Ausblick in Kapitel 7.4 angesprochen wird.

8.2 Ergebnisintegration in die InVeKoS-Kontrollen

Im derzeitigen Kontrollverfahren werden die beantragten Schlagflächen manuell anhand von Luftbildern oder sehr hochauflösenden Satellitenbildern vermessen (siehe Kap. 2.2). Liegt die Messung im Vergleich zur beantragten Fläche außerhalb des in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Toleranzbereiches, so wird der Antrag des jeweiligen Landwirts auf flächenbezogene Beihilfe nicht als korrekt anerkannt und einer weiteren Kontrolle unterzogen. Im Rahmen der InVeKoS-Kontrollen wird aufgrund der notwendigen hohen Erfassungsgenauigkeit im Vergleich zur Erosionsreferenz (52 Abzugsflächen) mit 429 Objekten fast die zehnfache Anzahl an Abzugsflächen ausgewiesen, so dass für den Einsatz einer automatisierten Schlagerkennungs methode eine detaillierte Erkennung dieser Abzugsflächen notwendig ist.

8.2.1 eCognition

Bis zu 51 % aller mit *eCognition* (Eco2, siehe Abb. 5.22) segmentierten Schlagflächen weisen in Bezug auf die InVeKoS-Referenz einen Gesamtflächenfehler F_G von unter 10 % auf. Bei der Hälfte der Flächen liegt der Gesamtflächenfehler F_G sogar unter 9 % (Eco2, siehe Abb. 5.21). Betrachtet man die InVeKoS-Schlagtoleranz, so

liegen 44 % der Flächen (Eco2, siehe Kap. 5.3.5) innerhalb des in Kapitel 4.1.5 definierten Toleranzbereichs.

Diese Werte zeigen, dass die Schlagextraktion mit *eCognition* einen Ansatz darstellt, der gute Ergebnisse für den Einsatz in den InVeKoS-Kontrollen per Fernerkundung liefern kann, wenn die bereits in Kapitel 8.1 beschriebene Trennung von potentiell nur schlecht zu erkennenden Flächen anhand einer Qualitätskontrolle auf Basis der Arbeiten von APLIN und ATKINSON (2004, S. 141 ff.) gelingt (siehe Kap. 2.4.3). Eine derartige Vorsortierung ist notwendig, da ein Viertel aller Flächen einen sehr hohen Gesamtflächenfehler F_G von über 100 % aufweist. Für den Produktions-einsatz bei InVeKoS muss allerdings eine deutliche Erhöhung der Vollständigkeit anhand der bereits in Kapitel 8.1.1 genannten Ansätze (Präzisierung der Segmentierungseinstellungen, multitemporale Bilddaten, Klassifikation) realisiert werden.

Landschaftselemente wie z. B. Hecken, Baumreihen und Quellbereiche stellen in ihrer auf kleiner Fläche versammelten hohen biologischen Vielfalt einen wichtigen Baustein in der Vernetzung von Lebensräumen dar. Um den Erhalt dieser Bestandteile der Kulturlandschaft zu sichern, wird die Pflege auch im Rahmen der flächenbezogenen Beihilfezahlungen durch die EU bezuschusst (siehe Kap. 2.2). Auch für die genaue Extraktion der landwirtschaftlich genutzten Flächen ist eine präzise Abgrenzung von Schlag- und Abzugsflächen notwendig.

Die Erkennung der für die InVeKoS-Bearbeitung wesentlichen Abzugsflächen stellt somit derzeit ein deutliches Ausschlusskriterium für die Einsetzbarkeit der genutzten Segmentierungsstrategie mit *eCognition* dar. Mit einem Gesamtflächenfehler (Median) im Bereich von 4.000 % ist eine Abzugsflächenerkennung nicht annähernd realisierbar (siehe Kap. 6.1.4). Erst eine Ausweitung der Strategie auf die Charakteristika der relativ kleinflächigen Objekte kann zu einer brauchbaren Kombination von automatisierten Segmentierungsstrategien führen.

8.2.2 SegmentationFields

Die Hälfte der Flächen weist in Bezug auf die InVeKoS-Referenz lediglich einen Gesamtflächenfehler F_G von unter 38 % auf (Sgf3, siehe Abb. 5.21). Allerdings liegt bei nur 36 % aller mit *SegmentationFields* segmentierten Schlagflächen der Gesamtflächenfehler F_G unter 10 % (Sgf3, siehe Abb. 5.23). Die InVeKoS-Schlagtoleranz zeigt, dass 30 % der Flächen (Sgf2 u. Sgf3, siehe Abb. 5.27) innerhalb des in Kapitel 4.1.5 definierten Toleranzbereichs liegen.

Die Schlagextraktion mit *SegmentationFields* zeigt somit zwar in Ansätzen gute Ergebnisse für die Anwendbarkeit im Rahmen InVeKoS-Kontrollen, jedoch ist eine sinnvolle und produktive Verwendung nur mit einer Erhöhung der Vollständigkeit und Genauigkeit der extrahierten Schlaggrenzen denkbar. Die Genauigkeit hängt eng mit der jeweils genutzten geometrischen Auflösung zusammen, die in Abwägung mit einer praktikablen Rechenzeit für den in InVeKoS notwendigen großflächigen Einsatz erhöht werden muss (siehe Kap. 6.1.6 u. 6.2.1). Die bereits mehrfach erwähnte wissensbasierte Qualitätskontrolle (siehe Kap. 8.2.1) kann auch für InVeKoS potentiell gut zu extrahierende Flächen von weniger erfolgversprechenden trennen. Auch die bereits für den Einsatz im Rahmen der Erosionsberatung notwendige Steigerung der Vollständigkeit muss zusammen mit einer erhöhten Genauigkeit der Abgrenzung durch Verbesserung der Vektorisierung und unter Verwendung höher aufgelöster Bilddaten realisiert werden, um den hohen Genauigkeitsanforderungen im Rahmen von InVeKoS zu entsprechen.

Genau wie bei *eCognition* schließt der enorm hohe Fehlerwert für die Erkennung von Abzugsflächen eine tatsächliche Anwendbarkeit derzeit aus, da mit einem Gesamtflächenfehler (Median) von weit über 6.000 % der Bedeutung von Landschaftselementen und nicht landwirtschaftlich genutzten Abzugsflächen nicht annähernd entsprochen werden kann. Die derzeitige Modellierung und die entsprechende Segmentierungsstrategie schließen Einflüsse durch kleinflächige Objekte bewusst aus, um Störungen bei der Bildung von Grenzverläufen zu verhindern. Erst eine detaillierte Anpassung der Strategie auf die für InVeKoS notwenigen hohen Qualitätsanforderungen kann zu einer Annäherung an die in InVeKoS zu erfüllenden Genauigkeiten und somit zu einsetzbaren, automatisiert gewonnenen Ergebnissen führen. Derartige Anpassungen könnten, im Gegensatz zur in sich geschlossenen kommerziellen Software *eCognition*, mit einem entsprechenden Aufwand in die offene Programmstruktur integriert werden.

8.3 Zusammenfassung

Für den Vergleich der Schlagextraktionsmethoden des Software-Prototyps *SegmentationFields* und des Bildanalyseprogramms *eCognition* wurden anhand einer empirischen Systematik optimale Parametereinstellungen für die Segmentierung einer 25 km² großen IKONOS-Szene ermittelt (siehe Kap. 4.2.5 u. 4.3.4).

Der Vergleich erfolgte anhand des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten objektiven Gesamtflächenfehlers (siehe Kap. 4.1), und hat ergeben, dass beide Methoden gute Ansätze einer automatisierten Schlaggrenzerfassung für die schlaggenaue Erosionsberatung des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (NLfB) aufweisen (siehe Kap. 8.1). Für den praktischen Einsatz ist allerdings die Vollständigkeit der automatischen Erfassung, u. a. durch den Einsatz multitemporaler Bilddaten, zu erhöhen (siehe Kap. 6.1.8 u. 7.2).

Für eine Einsetzbarkeit der Segmentierungsergebnisse im Rahmen der EU-Agrarsubventionskontrollen per Fernerkundung (InVeKoS) muss bei beiden Systemen ebenfalls die Erfassungsvollständigkeit erhöht werden (siehe Kap. 8.2). Insbesondere die Erfassung von Abzugsflächen und Landschaftselementen muss in einem zusätzlichen Prozess realisiert werden, da die genutzten Segmentierungsstrategien keinen Ansatz für die Extraktion derartiger Elemente enthalten. Für *SegmentationFields* muss außerdem eine Verbesserung der Grenzgenauigkeit anhand einer Erhöhung der genutzten geometrischen Auflösung (siehe Kap. 6.1.6 u. 6.2.1) und der Verwendung des Snake-Algorithmus (Kap. 7.3) erreicht werden, wobei gleichzeitig die Realisierung von realistischen Rechenzeiten für den Praxiseinsatz zu berücksichtigen ist.

Die entwickelte objektive Flächenfehlerquantifizierung ist bei weiteren Arbeiten zu präzisieren, um u. a. die Länge nicht erkannter Grenzbereiche als Gewichtung in den Fehlerwert einzubeziehen (siehe Kap. 6.1.5).

Die objektbasierte Bildanalysesoftware *eCognition* zeigt für beide Anwendungsbereiche (Erosionsberatung und InVeKoS) vielfach gute Ansätze und bietet über die Segmentierung hinaus umfangreiche Werkzeuge zur Klassifikation der Bilddaten, die für eine weitere Optimierung der Ergebnisse genutzt werden können. Der Prototyp *SegmentationFields* weist aufgrund seiner offenen Systemstruktur die Möglichkeit auf, Anpassungen an die diskutierten Einsatzgebiete direkt zu implementieren. Aufgrund dieser Möglichkeit zu maßgeschneiderten, anwendungsorientierten Änderungen ist es wünschenswert und realistisch, dass *SegmentationFields* bei einer konsequenten Weiterentwicklung eine deutliche Verbesserung von Vollständigkeit und Genauigkeit erreicht.

8.4 Summary

Automatic extraction of field boundaries for soil erosion consultation: A comparison of segmentation methods.

For comparing the methods of field boundary extraction by the preliminary software *SegmentationFields* and the image analysis software *eCognition*, an IKONOS-image of 25 km² was segmented by empirically and systematically determinated parameter-settings (chapter 4.2.5 and 4.3.4).

The results were compared by a self-developed measurement device for the defective area (chapter 4.1), which attests good attempts for automatic field boundary extraction for soil erosion consultation by both methods (chapter 8.1). However, for a practicable application completeness has to be improved, e. g. by using multitemporal images (chapter 6.1.8 and 7.2).

For the application area of the Integrated Administration and Control System (IACS) via remote sensing, both systems have to improve their completeness of detection (chapter 8.2). Especially the detection of non-agricultural areas and further elements of open landscape have to be realized in an external process, because the used approaches do not include any attempt to extract those objects. For *SegmentationFields* a refinement of accuracy has to be improved by using a higher geometrical resolution (chapter 6.1.6 and 6.2.1) and snake algorithms (chapter 7.3), whilst taking into account the implementation of realistic computing times for practical experiences.

The above-mentioned self-developed impartial measurement of the defective area has to be specified in further studies, e. g. in order to integrate the length of not-extracted field boundaries into the value of the defective area measurement (chapter 6.1.5).

The object-based image analysis software *eCognition* shows good approaches for both application areas (soil erosion consultation and IACS) and provides numerous tools for improving the results of the extraction by image classification. Because of the open composition of its system, the preliminary software *SegmentationFields* can be customised precisely to the needs of the mentioned applications. Because of this possibility it seems to be realistic, that a further development of *SegmentationFields* leads to an explicit improvement of completeness and accuracy.

9 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

9.1 Literatur (inkl. Internet-Dokumente)

- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt.
- APLIN, P. u. P. ATKINSON (2004): Predicting missing field boundaries to increase per-field classification accuracy. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bd. 70, S. 141-149.
- ANDRESEN, T. (2004): Strategien zur wissensbasierten Bildanalyse hoch auflösender Fernerkundungsdatensätze für das Monitoring gewässernaher Feuchtgebiete. Dissertation am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität (TU) München.
- BALTSAVIAS, E.P. (2004) Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge. Current status and steps towards operational systems. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 58, Nr. 3-4, S. 129-151.
- BAUMGARTNER, A. (2003): Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität (TU) München.
- BLASCHKE, T. u. J. STROBL (2001): What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. In: GIS - Zeitschrift für Geoinformationssysteme. Heft 6, S. 12-17.
- BUTENUTH, M. (2004a): Modelling the extraction of field boundaries and wind erosion obstacles from aerial imagery. In: International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing. Bd. 35, Teil B4, Istanbul, S. 1065-1070.
- Butenuth, M. (2004b): Extraction of field boundaries and wind erosion obstacles from aerial imagery. In: SEYFERT, E. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation. Bd. 13, Halle. S. 77-86.
- BUTENUTH, M., STRAUB, B.-M. u. C. HEIPKE (2004): Automatic extraction of field boundaries from aerial imagery. In: KDNet Workshop Symposium. Knowledge Based Services for the Public Sector. Bonn, o. S.
- BUTENUTH, M. u. C. HEIPKE (2003): Modelling the integration of heterogeneous vector data and aerial imagery. In: SCHIEWE J., HAHN M., MADDEN M. u. M. SESTER [Hrsg.]: ISPRS Commission IV Joint Workshop „Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualisation“. Stuttgart, S. 55-60.
- DEFINIENS IMAGING GMBH (2002): *ECognition*. User Guide 3 (Interne Software-dokumentation). München.
- DEFINIENS IMAGING GMBH (o. J.): Company. Profile & history. München. Online: <http://www.definiens-imaging.com/company/company.htm> (Abgerufen: 07.05.2005)

- DEUTSCHER WETTERDIENST (2005): Klimadaten ausgewählter deutscher Stationen. Normalwerte (Station: 10224 Bremen). Online: http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/ausgabe_normwerte.htm (Abgerufen: 01.05.2005).
- FRANZ, S., HENTSCHEL, A., MÜLLER-LIST, R. u. O. VAN DER WALK (2004): Ratgeber Luftbildkarte. Hinweise zur Flächenerfassung. In: Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen-Lippe (Beilage), August 2004. Münster.
- EFTAS FERNERKUNDUNG TECHNOLOGITRANSFER GMBH (2004): InVeKoS 2004. Kontrolle durch Fernerkundung. Schlussbericht. Münster.
- FOCKELMANN, R. (2001): Agricultural parcel detection with eCognition 2.0. In: Definiens Imaging GmbH [Hrsg.]: Application note. Jg. 2, Nr. 10, S. 1-2. Online: <http://www.definiens-imaging.com/documents/an/gaf.pdf> (Stand: 10/2001, abgerufen: 02.05.2005).
- GERIGHAUSEN, H. u. M. MÖLLER (2004): Detektion von Schlaggrenzen und der Bodenbearbeitungsrichtung ackerbaulich genutzter Flächen aus sehr hochauflösenden Fernerkundungsdaten (Quickbird). In: SEYFERT, E. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation. Bd. 13, Halle, S. 303-316.
- GUINDON, B. (1997): Computer-based aerial image understanding. A review and assessment of its application to planimetric information extraction from very high resolution satellite images. In: Canadian Journal of Remote Sensing. Heft 23, S. 38-47.
- GUINDON, B. (2000): Combining diverse spectral and contextual attributes in segment-based image classification. In: Proceedings of the ASPRS 2000 Annual Conference, o. S.
- JÄHNE, B. (2002): Digitale Bildverarbeitung. Berlin, Heidelberg.
- KIEMLE, S. (1994): Horus. Computer Aided Vision Engineering. Konzepte. Online: <http://www.radiig.in.tum.de/research/horus/horus2.html> (Abgerufen: 15.12.2004).
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G. u. P. VOLESKE (1996): Biostatistik. Berlin, Heidelberg.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G. u. G. SCHWERDTFEGER (1994): Bodenkunde. Stuttgart.
- LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN (2005): Digitale Landschaftsmodelle – DLM – ATKIS. Online: http://www.lgn.niedersachsen.de/master/C8950158_N8913975_L20_D0_I7746208.html (Abgerufen: 14.04.2005).
- LANDKREIS FRIESLAND - UNTERE LANDSCHAFTSBEHÖRDE (2001): Bockhorner Moor und Spolsener Moor. Zwei naturkundliche Wanderungen im Kreis Friesland. Jever.
- LANDKREIS FRIESLAND - UNTERE LANDSCHAFTSBEHÖRDE (o. J.): Naturschutzgebiete in Friesland. Jever.

- LEICA GEOSYSTEMS (2003): Erdas Field Guide (Interne Softwaredokumentation). Atlanta.
- LESER H. [Hrsg.] (1994): Westermann-Lexikon Ökologie und Umwelt. Braunschweig
- LEUKERT, K. (2002): Untersuchungen zur Segmentierung von Satellitenbilddaten für die Extraktion von GIS-Objekten. In: SEYFERT, E. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Bd.11, Neubrandenburg, o. S.
- MEINEL, G. u. M. NEUBERT (2004): A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. In: International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing. Bd. 35, Teil B4, Istanbul, S. 1097-1102.
- MEINEL, G. u. M. NEUBERT (2003): Bildsegmentierer - Ansätze, vergleichende Untersuchungsmethodik und erste Ergebnisse. In: SEYFERT, E. [Hrsg.]: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Bd. 12, Münster, S. 187-194.
- MVTEC SOFTWARE GMBH (o. J.a): HALCON. Programming with HALCON. Online: <http://www.mvtec.com/halcon/programming> (Abgerufen: 15.12.2004).
- MVTEC SOFTWARE GMBH (o. J.b): HALCON. System requirements. Online: <http://www.mvtec.com/halcon/overview/requirements.html> (Abgerufen: 15.12.2004).
- MVTEC SOFTWARE GMBH (o. J.c): HALCON. Overview. Online: <http://www.mvtec.com/halcon/overview/index.html> (Abgerufen: 08.05.2005).
- MVTEC SOFTWARE GMBH (2004): HALCON Referenzhandbuch. Version 7.0.1 (Interne Softwaredokumentation). München.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (NLFB) [Hrsg.] (1995): Bodenkundliche Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen 1:500.000 (BÜK 500). Hannover.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (2005a): Erosionsgefährdung durch Wasser. Online: <http://www.nlfb.de/index.htm?/boden/projekte/wassererosion.htm> (Stand: 27.01.2005, abgerufen: 02.05.2005).
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (2005b): Erosionsgefährdung durch Wind. Online: <http://www.nlfb.de/index.htm?/boden/projekte/winderosion.htm> (Stand: 27.01.2005, abgerufen: 02.05.2005).
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (2005c): Pilotberatungsprojekt Erosion. Online: http://www.nlfb.de/index.htm?/boden/projekte/erosion_pilotprojekt.htm (Stand: 07.08.2003, abgerufen: 02.05.2005).
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (NLÖ) [Hrsg.] (2003): Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen. Teil 1: Bodenerosion und Bodenversiegelung. In: Nachhaltiges Niedersachsen. Heft 23, Hildesheim.

- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK [Hrsg.] (2003): Agrarstrukturerhebung 2001. Gemeindeergebnisse. Hannover.
- OESTERLE, M. u. M. HAHN (2004): A case study for updating land parcel identification systems (IACS) by means of remote sensing. In: International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing. Bd. 35, Teil B2, Istanbul, S. 515-520.
- PETER, C.B. (2004): Objektbasierte Analyse von Fernerkundungsdaten zur Erfassung von Schlagstrukturen landwirtschaftlich genutzter Flächen. Diplomarbeit am Institut für Geographie, Universität Münster.
- POTT, R. (1999): Nordwestdeutsches Tiefland zwischen Weser und Ems. Ulmer, Stuttgart.
- SPACE IMAGING (2004): IKONOS Imagery Products and Product Guide. Thornton.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G., HARTGE, K.-H. u. U. SCHWERTMANN (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart.
- SEEDORF, H. u. H.-H. MEYER (1992): Landeskunde Niedersachsen. Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes. Neumünster.
- STEIN, R. (2004): Schulungsunterlagen. InVeKoS 2004 (Eftas GmbH, internes Schulungsmaterial). Münster.
- TORRE, M. u. P. RADEVA (2000): Agricultural field extraction from aerial images using a region competition algorithm. In: International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing. Bd. 33, Teil B3, Amsterdam, S. 889-896.
- TU MÜNCHEN, FORSCHUNGS- UND LEHREINHEIT INFORMATIK IX (2000): Bildanalyse-Entwicklungssystem HORUS. Online: <http://wwwradig.in.tum.de/research/horus> (Abgerufen: 15.12.2004).
- WALTER, R. (1995): Geologie von Mitteleuropa. Stuttgart.
- WIEDEMANN, C. (2001): Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbildern. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität (TU) München.

9.2 Quellcode, Emails, mündliche Mitteilungen

- BUTENUTH (IPI) (2005, Quellcode.): Kommentierter Quellcode *Segmentation-Fields* (IKONOS) in der Version vom 17.01.2005.
- ENGELHARDT, D. (CGI Systems GmbH) (2005): Email vom 17.05.2005.
- ERHARDT, M. (Definiens Imaging GmbH) (2004): Email vom 06.04.2004.
- THOMSEN, W. (Institut für Mathematische Statistik, Universität Münster) (2005, mdl.): Mündliche Mitteilung vom 15.04.2005.

9.3 Gesetze und Verordnungen

- BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (BBodSchG) i. d. F. d. B. v. 17.03.1998 (BGBl. 1, S. 502-510), zuletzt geändert am 9.12.2004 (BGBl. 1, S. 3214).
- DIREKTZAHLUNGEN-VERPFLICHTUNGSGESETZ (DIREKTZAHLVERPFLG) i. d. F. d. B. v. 21.07.2004 (BGBl. 1, S. 1767-1769).
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1782/2003 i. d. F. d. B. v. 29.09.2003 (Amtsblatt der EU, Nr. L270/2003, S. 1-69).
- VERORDNUNG (EG) Nr. 796/2004 i. d. F. d. B. v. 21.04.2004 (Amtsblatt der EU, Nr. L141/2004, S. 18-58).
- VERORDNUNG (EWG) Nr. 3508/1992 i. d. F. d. B. v. 27.11.1992 (Amtsblatt der EU; Nr. L355/1992, S. 1-5).

9.4 Karten, Raster- und Vektordaten

- EUROPEAN SPACE IMAGING (EUSI) (2004): IKONOS-Bilddaten. EC - MARS Programme.
- LAND NIEDERSACHSEN (2004): Digitale Feldblockkarte Niedersachsen (DFN), Stand: 19.10.2004
- LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN [Hrsg.] (1998): Topographische Karte 1:50.000. L 2714 Varel. Hannover.
- LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN [Hrsg.] (1999): Topographische Karte 1:50.000. L 2712 Westerstede. Hannover.
- LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN [Hrsg.] (o. J.): Übersichtskarte Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 Hannover.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (1999): Winderosionsgefährdung auf Gemeindeebene.
Online: <http://www.nlfb.de/boden/projekte/winderosion.htm> (Abgerufen: 15.04.2005)

DANKSAGUNG

Für die Unterstützung und sehr gute Betreuung meiner Arbeit und die darüber hinaus gehenden wichtigen Anregungen und Diskussionen der vergangenen Jahre danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Dr. Otto Klemm vom Institut für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr. Christian Heipke und Herrn Dipl.-Ing. Matthias Butenuth vom Institut für Photogrammetrie und Geoinformation der Universität Hannover für die sehr gute Betreuung und Zusammenarbeit sowie für die Möglichkeit, meine Arbeit in das Forschungs- und Entwicklungsprogramm GEOTECHNOLOGIEN des BMBF zu integrieren.

Für die vertrauensvolle Bereitschaft, mir eine Diplomarbeit in einem praxisnahen Forschungs- und Entwicklungsprojekt zu ermöglichen, gilt mein sehr herzlicher Dank Herrn Dr. Klaus-Ulrich Komp, Herrn Dipl.-Ing. Georg Altrogge und Herrn Dipl.-Geogr. Robert Stein von der Firma EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH in Münster.

Allen Mitarbeitern der EFTAS GmbH danke ich sehr für die große Hilfsbereitschaft und die stets freundliche Zusammenarbeit. Mein besonderer Dank gilt hier Herrn Dr. Andreas Müterthies für sein allzeit offenes Ohr und die intensive Begleitung meiner Arbeit sowie Herrn Dipl.-Ing. Carsten Haub für die zahlreichen fachlichen Rückmeldungen und die konstruktiven Diskussionen.

Bei Herrn Dr. Walter Schäfer, Herrn Dr. Jan Sbresny und Frau Dipl.-Geogr. Annette Thiermann vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung bedanke ich mich herzlich für die Bereitstellung der bodenkundlichen Daten und die gute Kooperation im Laufe meiner Arbeit.

Für die unkomplizierte Überlassung einer Vollversion der Softwarebibliothek HALCON 7.0.1 bedanke ich mich sehr herzlich bei Frau Sabine Lochner von der MV Tec Software GmbH in München und Herrn Dieter Engelhardt von der CGI Systems GmbH in Seeshaupt.

Herrn Dr. Wolfgang Thomsen vom Institut für Mathematische Statistik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster danke ich für sein freundliches Interesse an der Beantwortung meiner Fragen zur Ergebnisauswertung.

Vielen Dank für die Bereitstellung der Feldblockdaten durch das Amt für Agrarstruktur (Landesweite Aufgaben) in Hannover.

Für das intensive Korrekturlesen und die hilfreichen Anmerkungen geht ein großes Dankeschön an Iris, Ullie und Nicolas.

Mein ganz spezieller Dank geht an meine Familie für ihre Hilfe und Unterstützung, an meine Freunde für all die erfrischenden Aufmunterungen und an Iris, die in den vergangenen Monaten zu der für den Erfolg meiner Arbeit notwendigen Energie und Tatkraft jederzeit mit viel Schwung und Geduld beigetragen hat.

ANHANG

A Klassifikation mit eCognition

Die Software *eCognition* bietet zwei Konzepte zur Klassifikation (vgl. DEFINIENS IMAGINE 2002, o. S.). Für das Nearest Neighbour-Verfahren werden Trainingsgebiete-/objekte (sog. Samples) ausgewählt, die den spezifischen Merkmalsraum für die jeweilige gesuchte Klasse definieren. Diese Samples können sowohl in *eCognition* definiert, als auch aus einer externen Quelle importiert werden. Anhand dieser Trainingsdaten führt *eCognition* statistisch ähnliche Objekte zu Klassen zusammen.

Die zweite Strategie beinhaltet den Aufbau von regelbasierten Zugehörigkeitsfunktionen, die anhand von Objekteigenschaften (Farbe, Form, Größe, Textur, Struktur, Topologie, etc.) die Klassenzugehörigkeit definieren. Nach der Klassendefinition können die Klassen in einer Hierarchie untergliedert werden, die eine Vererbung von Eigenschaften ermöglicht.

Beide Konzepte können in einer Klassenhierarchie, die eine Vererbung von Klassenmerkmalen ermöglicht, gegliedert und kombiniert werden. Nach der Klassifikation können die Ergebnisse als Raster- oder Vektordaten exportiert werden.

Nearest Neighbour-Verfahren

Das Nearest Neighbour-Verfahren (auch: Minimum Distance-Verfahren) stellt für eine überwachte Klassifikation eine einfache rechnerisch Methode dar. Nachdem für jede Klasse Trainingsgebiete definiert sind, werden für jede Objektklasse die arithmetischen Mittel der Spektralkanäle und anschließend für jedes Bildobjekt der Abstand zu den Mittelpunkten aller Klassen berechnet (siehe Abb. A.1). Die Zuweisung erfolgt letztendlich zu jener Klasse, zu deren Mittelpunkt das Bildobjekt den geringsten Abstand aufweist. Mit dem Nearest Neighbour-Verfahren werden immer alle Pixel oder Bildobjekte einer Klasse zugeordnet. Aufgrund starker spektraler Streuung in den Merkmalsräumen der definierten Klassen kann es jedoch zu Fehinterpretationen kommen, die mit einer Optimierung der Trainingsgebiete verringert werden können (vgl. ALBERTZ 2001, S. 166).

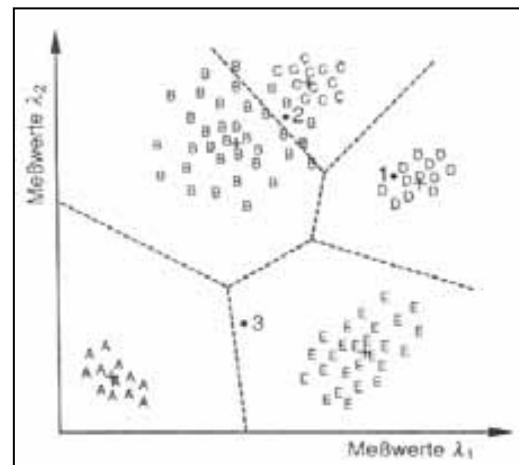


Abb. A.1: Nearest Neighbour-Verfahren: Darstellung von Klassen (A-E) mit ihren arithmetischen Mitteln (+) (Quelle: ALBERTZ 2001, S.165)

Da die Klassifikation nach dem Nearest Neighbour-Verfahren auf der Nutzung von Trainingsgebieten (sog. Samples) basiert, die durch die gesicherte Klassenzugehörigkeit den Merkmalsraum für die zu klassifizierenden Bildobjekte bilden, stellt *eCognition* zur Erstellung der Samples den sog. Sample Editor (siehe Abb. A.2) zur Verfügung.

Sobald dieser aktiviert ist, können Bildobjekte aus den segmentierten Bilddaten heraus per Doppelklick bestimmten Klassen als Sample zugewiesen werden. In einer Histogrammansicht können die Spektralwerte der Samples einer Klasse mit denen anderer Klassen verglichen werden, um die Unterscheidung in bestimmten Spektralkanälen oder Merkmalen zu visualisieren.

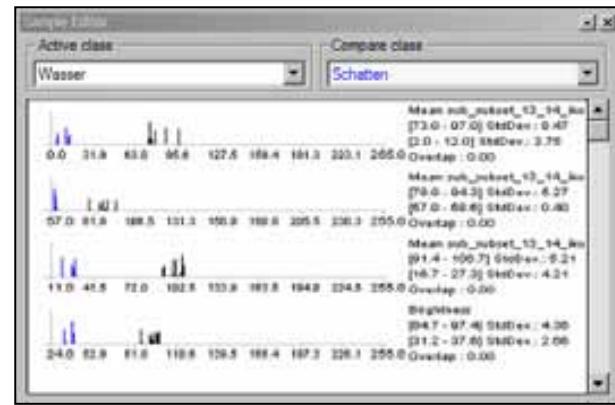


Abb. A.2.: Vergleich von Spektralwerten und anderen Merkmalen im Sample Editor von *eCognition*

Zugehörigkeitsfunktionen

Die Zugehörigkeitsfunktionen ermöglichen die Formulierung von logischen Aussagen über die Klassenzugehörigkeiten. Eine Besonderheit stellt hierbei die Verwendung sog. Fuzzy Logic dar, in der nicht zwingend eine strikte Zuweisung zu einer Klasse erfolgen muss, sondern in der ein kontinuierlicher Übergang von Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten zwischen 0 (nicht zugehörig) und 1 (voll zugehörig) im Wertebereich der Zugehörigkeitsfunktion möglich ist.

Diese Funktionalität erlaubt die Formulierung von Aussagen wie z. B.:

„Alles was im Kanal des nahen Infrarot einen Grauwert unter 30 aufweist ist absolut der Klasse Wasser zugehörig, ein Wert über 35 wird nicht mehr der Klasse zugeordnet“ (siehe Abb. A.3). Die Zugehörigkeitsfunktionen können mit logischen Operatoren zu einer hierarchischen Klassendefinition verbunden werden.

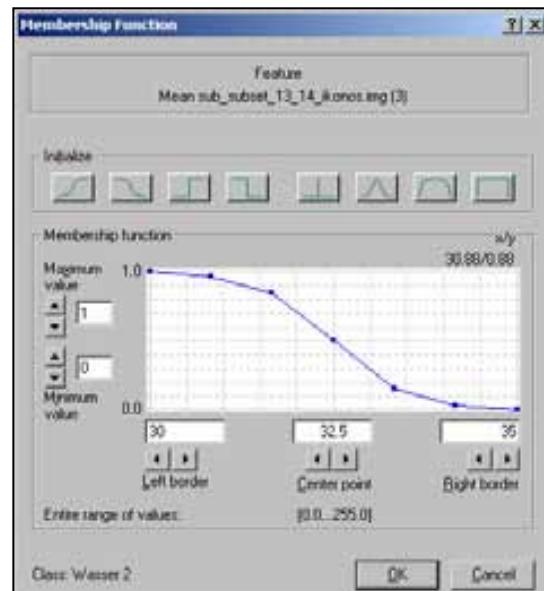


Abb. A.3: Definition einer Zugehörigkeitsfunktion anhand von Fuzzy Logic in *e-Cognition*

B Tabellen

Tab. B.1: Parametertests in einem Bildausschnitt, Segmentierung mit eCognition

Scale-parameter	h_{Spek}	h_{Form}	h_{Kmpkt}	h_{Glatt}	arithmetisches Mittel F_G	Median F_G	Standardabweichung F_G
190	0,1	0,9	0,1	0,9	4,0507	0,1253	11,3289
190	0,2	0,8	0,1	0,9	3,4084	0,0981	10,8039
190	0,4	0,6	0,1	0,9	2,5736	0,1169	8,2577
190	0,5	0,5	0,1	0,9	2,2625	0,1114	7,3163
190	0,6	0,4	0,1	0,9	1,3298	0,1184	4,3880
190	0,8	0,2	0,1	0,9	0,7833	0,1498	2,1753
190	0,9	0,1	0,1	0,9	0,6995	0,1477	1,9093
190	1	0	/	/	0,6875	0,2268	1,6888
200	0,1	0,9	0,1	0,9	4,0506	0,1253	11,3290
200	0,2	0,8	0,1	0,9	3,8016	0,0981	11,2366
200	0,4	0,6	0,1	0,9	3,1398	0,1176	10,5445
200	0,5	0,5	0,4	0,6	1,9042	0,0855	6,2256
200	0,5	0,5	0,1	0,9	2,2581	0,1103	7,3175
200	0,6	0,4	0,1	0,9	1,3291	0,1150	4,3887
200	0,8	0,2	0,1	0,9	0,8688	0,1531	2,3096
200	0,9	0,1	0,1	0,9	0,6933	0,1448	1,9105
200	1	0	/	/	0,7078	0,2176	1,9024
210	0,1	0,9	0,1	0,9	4,0717	0,1268	11,3227
210	0,2	0,8	0,1	0,9	3,8446	0,0981	11,3294
210	0,4	0,6	0,1	0,9	3,1462	0,1176	10,5431
210	0,5	0,5	0,4	0,6	2,1938	0,0851	7,1979
210	0,5	0,5	0,1	0,9	2,2597	0,1114	7,3171
210	0,6	0,4	0,4	0,6	1,6956	0,1046	5,6774
210	0,6	0,4	0,1	0,9	2,2401	0,0985	7,3264
210	0,8	0,2	0,1	0,9	0,8785	0,1460	2,4673
210	0,9	0,1	0,1	0,9	1,1196	0,1448	3,9524
210	1	0	/	/	0,7606	0,2020	1,9651
220	0,1	0,9	0,1	0,9	4,0708	0,1268	11,3228
220	0,2	0,8	0,1	0,9	3,8947	0,0981	11,3273
220	0,4	0,6	0,1	0,9	3,2209	0,1184	10,5382
220	0,5	0,5	0,4	0,6	2,5424	0,0851	8,2393
220	0,5	0,5	0,1	0,9	3,1520	0,1253	10,5872
220	0,6	0,4	0,1	0,9	2,2367	0,0886	7,3275
220	0,8	0,2	0,1	0,9	0,8754	0,1434	2,4682
220	0,9	0,1	0,1	0,9	1,1181	0,1445	3,9528
220	1	0	/	/	0,7837	0,2020	1,9741
230	0,1	0,9	0,1	0,9	4,1585	0,4176	11,3170
230	0,2	0,8	0,1	0,9	3,8914	0,0829	11,3284
230	0,4	0,6	0,1	0,9	3,2289	0,1184	10,5364
230	0,5	0,5	0,1	0,9	3,1769	0,1268	10,5811
230	0,6	0,4	0,1	0,9	2,4689	0,0864	7,7593
230	0,8	0,2	0,1	0,9	1,2791	0,1289	4,5145
230	0,9	0,1	0,1	0,9	1,1184	0,1445	3,9557
230	1	0	/	/	0,8696	0,2222	2,0871

Tab. B.2: Parametertests in einem Bildausschnitt, Segmentierung mit *Segmentation-Fields*

Operatorengruppe	Variable	Variablenwert	arithmetisches Mittel F_G	Median F_G	Standardabweichung F_G
Regiongrowing_n	MinSize	1,88 [in Pixeln]	424,18	11,62	1249,45
	MinSize	7,50 [in Pixeln]	409,91	11,66	1248,22
	MinSize	15,63 [in Pixeln]	409,87	11,66	1248,22
	MinSize	31,25 [in Pixeln]	400,38	11,62	1246,62
	MinSize	62,50 [in Pixeln]	399,99	11,62	1246,73
	MinSize	68,75 [in Pixeln]	403,51	11,62	1246,40
	MinSize	75,00 [in Pixeln]	403,26	10,85	1246,48
	MinSize	81,25 [in Pixeln]	403,26	10,85	1246,48
	MinSize	87,50 [in Pixeln]	405,17	12,25	1246,01
	MinSize	93,75 [in Pixeln]	418,02	11,62	1270,08
	MinSize	100,00 [in Pixeln]	418,02	11,62	1270,08
	MinSize	106,25 [in Pixeln]	417,98	12,25	1270,08
	MinSize	112,50 [in Pixeln]	421,94	12,20	1269,57
	MinSize	118,75 [in Pixeln]	426,36	12,20	1268,56
	MinSize	125,00 [in Pixeln]	415,59	14,56	1239,84
Closing_circle	Radius	3,75 [in Pixeln]	415,71	13,62	1239,54
	Radius	11,25 [in Pixeln]	415,57	14,56	1239,49
Erosion_circle	Radius	22,50 [in Pixeln]	415,70	14,56	1239,61
	Radius	0,25 [in Pixeln]	453,24	14,56	1370,53
	Radius	0,50 [in Pixeln]	418,31	14,62	1238,97
	Radius	0,75 [in Pixeln]	415,78	14,56	1239,53
	Radius	1,00 [in Pixeln]	415,69	13,62	1239,57
	Radius	1,25 [in Pixeln]	414,56	12,79	1240,76
	Radius	1,50 [in Pixeln]	414,44	11,60	1240,81
	Radius	1,75 [in Pixeln]	414,36	11,60	1240,82
	Radius	2,00 [in Pixeln]	414,50	11,60	1240,78
	Radius	2,25 [in Pixeln]	414,29	11,99	1240,70
	Radius	2,50 [in Pixeln]	414,28	14,56	1240,70
	Radius	2,75 [in Pixeln]	417,13	14,56	1240,16
	Radius	3,00 [in Pixeln]	422,99	20,37	1238,64
	Radius	3,75 [in Pixeln]	422,73	20,37	1238,68

Tab. B.2 (Fortsetzung): Parametertests in einem Bildausschnitt, Segmentierung mit *SegmentationFields*

Operatorengruppe	Variable	Variablenwert	arithmetisches Mittel F_G	Median F_G	Standardabweichung F_G
Linienerkennung:					
Lines_gauss	Sigma	0,5			
	High	0,4	405,00	11,32	1245,67
	Sigma	0,7			
	High	0,4	405,31	11,62	1246,17
	Sigma	0,7			
	High	0,8	405,31	11,62	1246,17
	Sigma	0,7			
	High	1,6	405,25	11,62	1246,01
	Sigma	0,7			
	High	3,2	405,58	11,93	1246,36
	Sigma	1,0			
	High	0,4	405,05	11,62	1246,00
	Sigma	1,3			
	High	0,4	405,17	12,25	1246,01
	Sigma	1,3			
	High	1,6	405,07	12,25	1246,04
Vektorisierung:					
Gen_contour_region_xld	Mode	center			
	Type	ramer	581,07	16,98	2027,08
Gen_polygons_xld	Alpha	0,01 [in Pixeln]			
Gen_contour_region_xld	Mode	center			
	Type	ramer	581,07	16,98	2027,08
Gen_polygons_xld	Alpha	0,1 [in Pixeln]			
Gen_contour_region_xld	Mode	center			
	Type	ramer	404,25	12,01	1243,10
Gen_polygons_xld	Alpha	1 [in Pixeln]			
Gen_contour_region_xld	Mode	center			
	Type	ramer	406,48	14,64	1246,32
Gen_polygons_xld	Alpha	2 [in Pixeln]			
Gen_contour_region_xld	Mode	center			
	Type	ramer	581,07	16,98	2027,08
Gen_polygons_xld	Alpha	4 [in Pixeln]			
Gen_contour_region_xld	Mode	border			
	Type	ramer	432,05	21,27	1282,52
Gen_polygons_xld	Alpha	2 [in Pixeln]			
Gen_contour_region_xld	Mode	center			
	Type	ray	406,21	14,27	1251,17
Gen_polygons_xld	Alpha	1 [in Pixeln]			



Dies ist die Veröffentlichung GEOTECH-180 des Forschungs- & Entwicklungsprogramms GEOTECHNOLOGIEN, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) getragen wird. Das dieser Arbeit zugrundeliegende Vorhaben "Informationssysteme für das Erdmanagement. Neue Methoden der semantischen und geometrischen Integration von geotechnologischen Fachthemen mit ATKIS - am Beispiel geologischer und bodenkundlicher Geoobjekte. Integration von Raster- und Vektordaten.“ wurde mit Mitteln des BMBF unter dem Förderkennzeichen 03F0374A gefördert."