

# **Operationalisierung von Monitoring periodischer Überflutung im Nigerbinnendelta durch satellitengestützte Radarfernerkundung**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

der Fakultät Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Ing. Jana Schmidt  
geboren am 04.11.1980 in Dresden

Gutachter:

Herr Prof. Dr. habil. Elmar Csaplovics

Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Herr Ao.Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Josef Jansa

Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Frau Privatdozentin Dr. habil. Hannelore Kußerow

Freie Universität Berlin, Fachrichtung Fernerkundung und Geoinformatik

verteidigt am 14.Oktober 2013 in Dresden



Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Operationalisierung von Monitoring periodischer Überflutung im Nigerbinnendelta durch satellitengestützte Radarfernerkundung“

wird hiermit bestätigt.

Jana Schmidt

Dresden, 21.03.2014





# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vii
Kurzzusammenfassung	3
1 Einleitung	5
2 Mali und das Nigerbinnendelta	9
2.1 Republik Mali	9
2.1.1 Klima und Niederschlagsverteilung	9
2.1.2 Vegetation	12
2.1.3 Geomorphologie und Böden	14
2.2 Das Nigerbinnendelta	17
2.2.1 Periodische Überschwemmung des Binnendeltas	19
2.2.2 Vegetation im Binnendelta	24
2.2.3 Böden des Binnendeltas	26
3 Radarsystem mit synthetischer Apertur	29
3.1 Geometrische Grundlagen abbildender Radarsysteme	29
3.2 Radiometrische Eigenschaften von SAR-Daten	34
3.2.1 Oberflächenstreuung	36
3.2.2 Volumenstreuung	38
3.3 Systemspezifische Abbildungsparameter	40
3.4 Der Speckle-Effekt	43
3.5 Rückstreuung von Feuchtgebieten in SAR-Daten	45
3.5.1 Rückstreuverhalten von Vegetation	45
3.5.2 Rückstreuverhalten von offenen Böden	51
3.5.3 Rückstreuverhalten von Gewässerflächen	53
4 Datenaufbereitung und Voranalyse	57
4.1 Zusatz- und Vergleichsdaten	57
4.1.1 Kartenmaterial	58
4.1.2 Aufbereitung der multispektralen Daten	59
4.1.3 Erfassung von Texturmerkmalen	65
4.2 Vorverarbeitung der SAR-Daten	67
4.2.1 Radiometrische Kalibrierung der SAR-Daten	68
4.2.2 Reduzierung des Speckle-Effekts	70
4.3 Interpretation und Analyse der SAR-Daten	73
4.3.1 Hauptkomponententransformation	73

4.3.2	Visuelle Analyse der Rückstreuung anhand der Überschwemmung im hydrologischen Jahr 2003/2004 . . . . .	77
5	Objektorientierte Auswertung	83
5.1	Segmentierung . . . . .	83
5.2	Klassifikation . . . . .	87
5.2.1	Regelwerk zur Klassifikation von Aufnahmen mit Niedrigwasser . . . . .	89
5.2.2	Regelwerk zur Klassifikation von Aufnahmen während der Überschwemmung . . . . .	92
6	Evaluierung und Interpretation	99
6.1	Genauigkeitsanalyse . . . . .	99
6.1.1	Genauigkeitsanalyse der ASAR Oktober- und Dezember-Aufnahme . . . . .	101
6.1.2	Genauigkeitsanalyse der ASAR März-Aufnahme . . . . .	104
6.2	Interpretation der Klassifikationsergebnisse . . . . .	106
7	Zusammenfassung	113
	Literaturverzeichnis	117
A	Anhang	131

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Verlauf des Niger durch Mali . . . . .	10
2.2	Durchschnittlicher Jahresniederschlag für die Stationen Bamako-Sénou, Mopti und Timbuktu über den jeweils angegebenen Zeitraum . . . . .	12
2.3	Vegetationseinheiten Malis . . . . .	13
2.4	Lage des Untersuchungsgebietes . . . . .	18
2.5	Zeitliche Verschiebung sowie Abflachung der Kurve anhand der mittleren Durchflussmenge . . . . .	20
2.6	Geplante und bereits existierende Dämme . . . . .	23
3.1	Aufnahmeprinzip eines Seitensichtradars . . . . .	30
3.2	Bodenauflösung in Entfernungsrichtung . . . . .	30
3.3	Auflösung in Azimutrichtung für Systeme mit realer Apertur . . . . .	31
3.4	Auflösung in Azimutrichtung eines Radars mit synthetischer Apertur . . . . .	32
3.5	Verkürzungseffekt und Radarschatten . . . . .	33
3.6	Abbildungseffekt Layover . . . . .	34
3.7	Flächenbezug der Rückstreuoeffizienten . . . . .	35
3.8	Gerichtete Reflexion . . . . .	37
3.9	Diffuse Rückstreuung . . . . .	37
3.10	Verschiedene Anordnungen eines dielektrischen Zylinders bezüglich der einfallenden Welle . . . . .	41
3.11	Überlagerung der verschiedenen Streuer (random walk) . . . . .	44
3.12	Rückstreumechanismen bei überfluteter Vegetation in C-Band Aufnahmen . . . . .	48
4.1	Ausbreitung der überschwemmten Flächen . . . . .	61
4.2	Ergebnis der Klassifikation der Landsat-Aufnahme vom Oktober 2003 . . . . .	62
4.3	Ergebnis der Klassifikation der Landsat-Aufnahme vom März 2003 . . . . .	64
4.4	Klassifikationsergebnis der Hauptkomponenten . . . . .	75
4.5	Pegelstände der Station Mopti . . . . .	76
4.6	Rückstreuoeffizienten der Oberflächen „Boden“ und „Wasser“ . . . . .	79
5.1	Homogenitätskriterium, nach DEFINIENS (2009a) . . . . .	85
5.2	Beispiel einer Segmentierung . . . . .	86
5.3	Beispiel aus der Klassifikation . . . . .	88
5.4	Ergebnis der Klassifikation der ASAR-Aufnahme vom 19.03.2004 . . . . .	91
5.5	Gegenüberstellung Flusslauf ERS-1 und ERS-2 . . . . .	92
5.6	Übergangsbereich bei beginnender Überflutung und im Stadium der Überschwemmung . . . . .	93
5.7	Ergebnis der Klassifikation der ASAR-Aufnahme vom 31.10.2003 . . . . .	94
6.1	Beispiel für eine Fehlermatrix . . . . .	99
6.2	Ausbreitung der überschwemmten Flächen im Oktober und Dezember 2003 . . . . .	106
6.3	Ausbreitung der überschwemmten Flächen im Oktober und November 1995 . . . . .	108

6.4	Ausbreitung der überschwemmten Flächen im November und Dezember 1992	109
6.5	Ausbreitung der überschwemmten Flächen . . . . .	110
6.6	Austrocknung des Deltas . . . . .	111
6.7	Verlauf der Austrocknung . . . . .	112
A.1	Klimaklassifikation Malis durch das Verfahren von Köppen und Geiger . . . . .	132
A.2	Florenregionen Malis . . . . .	132
A.3	Bodenklassen der „Soil Map of the World“ der FAO . . . . .	133
A.4	Lageübersicht einiger geographischer Objekte und Gebiete im Binnendelta . . . . .	135
A.5	Lage der Testbereiche zur Berechnung der Jeffries-Matusita-Distanzen . . . . .	138
A.6	Segmentierung mit verschiedenen Gewichtungen von Shape und Compactness	139
A.7	Pegelstände der Station Mopti der hydrologischen Jahre 1992/1993, 1995/1996 und 2003/2004 . . . . .	140

# Tabellenverzeichnis

2.1	Phasen der Überschwemmung . . . . .	19
3.1	Wellenlängenbereiche in der Radarfernerkundung . . . . .	42
4.1	Überblick topographischer Karten vom Nigerbinnendelta . . . . .	58
4.2	Übersicht der vorhandenen SAR-Daten . . . . .	74
5.1	Klassen der Kategorie <i>Überflutet</i> . . . . .	97
5.2	Klassen der Kategorie <i>Nicht überflutet</i> . . . . .	97
6.1	Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme für die Kategorien <i>Überflutet</i> und <i>Nicht überflutet</i> . . . . .	102
6.2	Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme für die Kategorien <i>Überflutet</i> und <i>Nicht überflutet</i> (nach Kontrolle) . . . . .	102
6.3	Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme für drei Kategorien . . . . .	103
6.4	Fehlermatrix der ASAR Dezember-Aufnahme für die Kategorien <i>Überflutet</i> und <i>Nicht überflutet</i> . . . . .	104
6.5	Fehlermatrix der ASAR März-Aufnahme für die Kategorien <i>Wasser</i> und <i>Nicht-Wasser</i> . . . . .	105
6.6	Flächen der einzelnen Klassen während der Überschwemmung . . . . .	107
6.7	Flächen der einzelnen Klassen nach der Überschwemmung . . . . .	112
A.1	Auszug aus der GLC2000 . . . . .	134
A.2	Überblick über die Landsat-Aufnahmen . . . . .	136
A.3	Kanaldefinitionen von Landsat MSS . . . . .	136
A.4	Kanaldefinitionen von Landsat TM . . . . .	136
A.5	Kanaldefinitionen von Landsat ETM+ . . . . .	137
A.6	Jeffries-Matusita-Distanzen . . . . .	138
A.7	Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme der pixelbasierten Klassifikation . . . . .	140



# Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analogue to Digital Converter
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
DN	Digital Number
Envisat	Environmental Satellite
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GLC	Global Land Cover
GLC2000	Global Land Cover 2000
GM	Global Monitoring Mode
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
IM	Image Mode
IRD	Institut de recherche pour le développement
ITC	Innertropischen Konvergenzzone
MNF	Minimum Noise Fraction
MODTRAN	Moderate resolution atmospheric Transmission
NDPI	Normalized Difference Pond Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
PAF	Processing and Archiving Facilities
PCA	Principal Components Analysis
PRI	Precision Image Mode
Radar	Radio Detection and Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RMS	Root Mean Square
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIR	Shuttle Imaging Radar
SLAR	Side Looking Airborne Radar
SLC	Scan Line Corrector
SNR	Signal-to-noise ratio
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	U.S. Geological Survey
WS	Wide Swath Mode
ü. NN	über Normalnull





# Danksagung

Das erste Mal kam ich während meiner Diplomarbeit mit Radardaten und dem Nigerbinnendelta in Berührung. Daraus entwickelte sich ein Fortsetzungsthema, welches mir eine weiterführende Vertiefung mit diesem Gebiet und der Thematik der Radarfernerkundung, Dank eines Stipendiums zur Promotions- und Habilitationsförderung für Frauen der Technischen Universität Dresden, ermöglichte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Elmar Csaplovics für die Möglichkeit und die Unterstützung die vorgelegte Arbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung realisieren zu können. Besonders wertvoll war mir seine stetige Ermutigung zur Abfassung der Arbeit, wobei Prof. Csaplovics mir den nötigen Freiraum zur Entwicklung kreativer Gedanken gelassen hat.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Josef Jansa und Frau Dr. Hannelore Kußerow für die freundliche Übernahme der weiteren Gutachten danken.

Ebenso möchte ich mich bei Dr. Ousmane Diallo vom Institut d'Economie Rurale in Mali für das Zusammenstellen und Aufbereiten der Pegelstandsmessungen und bei Frau Dagmar Bartels für das Lektorat sehr bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie und Freunde bedanken, dass sie mir immer Mut und Verständnis zugesprochen haben und mir meine soziale Zurückhaltung der letzten Monate nicht übel genommen haben.



# Kurzzusammenfassung

Einen großräumigen Überblick über ein Gebiet von Interesse können Satellitenbilddaten ermöglichen. Dabei werden räumliche Beziehungen erkennbar und lassen sich untersuchen. Die Bestimmung der räumlichen Verteilung und des zeitlichen Ausmaßes eines großräumigen Ereignisses, wie einer Überflutung, ist oftmals nur mit Unterstützung von fernerkundlichen Daten möglich. Es besteht der Bedarf an kontinuierlichen Informationen über den Zustand eines Systems über einen längeren Zeitraum, wenn Zusammenhänge zwischen den natürlichen Schwankungen und unterschiedlichen anthropogenen sowie natürlichen Einflüssen untersucht werden sollen.

Das Nigerbinnendelta in der Republik Mali nimmt in der semi-ariden Region eine besondere Stellung ein, da es sich um einen Gunststandort handelt, der wesentlich zur wirtschaftlichen Entwicklung der Region beiträgt.

Die im Rahmen dieser Arbeit zu erstellende Datenbasis beruht auf SAR-Daten, deren größter Vorteil in der Wetter- und Tageszeitunabhängigkeit liegt. Eine Herausforderung bei der Nutzung von Radaraufnahmen sind die spezielle Bildgeometrie, der auftretende Speckle-Effekt sowie das komplexe Rückstreuverhalten der Strahlung.

Die Datenbasis bilden ERS- und Envisat-Aufnahmen, deren Auswertung zunächst die Datenaufbereitung bzw. die Vorverarbeitung, u. a. in Form einer radiometrischen Kalibrierung und einer Speckle-Filterung, vorangestellt ist. Die Anwendung von pixelbasierten Auswertemethoden ist aufgrund der radiometrischen Eigenschaften der Daten weniger geeignet, weshalb die in der Fernerkundung neuere objektorientierte und wissensbasierte Klassifikation zur Anwendung kam.

Das Fehlen von zeitnah erhobenen Geländebeobachtungen sowie das komplexe Rückstreuverhalten der Mikrowellen erfordern eine ausführliche Auseinandersetzung mit dem Untersuchungsgebiet sowie mit dem Verhalten der C-Band SAR-Daten in Feuchtgebieten. Innerhalb der SAR-Daten treten vermehrt Überschneidungen in der Rückstreuung unterschiedlicher Landbedeckungen auf. Deren Trennung erfordert Vorkenntnisse über die Ausbreitung der Landbedeckungen zu unterschiedlichen hydrologischen Stadien. Die zum Aufbau der wissensbasierten Auswertung erfolgte Auseinandersetzung mit dem Untersuchungsgebiet beinhaltete neben der geographischen Aufbereitung die Erstellung einer Vergleichsbasis, basierend auf multispektralen Aufnahmen.

Auf Grundlage je einer Aufnahme während sowie nach der Überschwemmung wurden für die objektorientierte Klassifikation zwei Regelwerke, in die neben der auszuwertenden SAR-Aufnahme zusätzliche Informationen wie z. B. der Texturparameter Entropie eingingen, erstellt. Das Ergebnis ist eine Datenbasis der Überschwemmungsflächen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. Die Evaluierung von zwei Klassifikationsergebnissen ergab eine sehr gute Trennung der überschwemmten und nicht überschwemmten Bereiche. Die aufbereiteten SAR-Daten geben einen Überblick über die Ressource Wasser für bereits vergangene Zeitschnitte. Zusammen mit aktuellen Informationen können diese einen Beitrag für ein nachhaltiges Management dieser Lebensgrundlage im Nigerbinnendelta leisten.



# 1 Einleitung

Satellitenbilddaten ermöglichen einen großräumigen Überblick über ein Gebiet von Interesse, sodass räumliche Beziehungen erkennbar werden und sich untersuchen lassen. Umweltphänomene lassen sich beobachten, bei wiederholten Aufnahmen auch die Veränderungen an der Erdoberfläche. Die Bestimmung der räumlichen Verteilung sowie des zeitlichen Ausmaßes eines großräumigen Ereignisses, wie einer Überflutung, ist deshalb oftmals nur mit Unterstützung von fernerkundlichen Daten möglich.

Mittels verschiedener Fernerkundungsdaten wird ein großflächiges und zunehmend lückenloses Monitoring der Landbedeckung möglich. Vorteilhaft an Satellitendaten ist die flächenhafte Erfassung großer Gebiete zu einem Zeitpunkt. Neben der hohen Dynamik eines Flutereignisses befürwortet auch der eingeschränkte Zugang zu unwegsamem Gelände den Einsatz von Fernerkundung. Zudem kann die politische Situation eines Landes den Zutritt zum jeweiligen Untersuchungsgebiet verhindern.

Es besteht der Bedarf an kontinuierlichen Informationen über den Zustand eines Systems über einen längeren Zeitraum. Auf der Grundlage dieser Informationen können Zusammenhänge zwischen den natürlichen Schwankungen und unterschiedlichen anthropogenen sowie natürlichen Einflüssen untersucht werden. Fernerkundungsdaten liefern die Datengrundlage, aus der mittels Auswertung Informationen nutzbar gemacht werden (ALBERTZ, 1991). Die gewünschte hohe zeitliche Auflösung kann durch Aufnahmen verschiedener Satellitensysteme erreicht werden. Die Nutzung von Aufnahmen überwiegend im optischen und nahen Infrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums wird durch das Vorhandensein von Bewölkung in den Szenen limitiert. Die passiven optischen Systeme sind zudem von der Sonne als Beleuchtungsquelle abhängig. Mit Synthetic Aperture Radar (SAR) arbeitende aktive Sensoren können hingegen in periodischen Abständen zuverlässig Daten liefern.

Feuchtgebiete gehören zu den produktivsten Lebensräumen auf der Welt. Sie bilden nicht nur den Lebensraum für eine Vielzahl an Pflanzen und Tieren, sondern sind auch ein wichtiger Bestandteil des globalen Wasserhaushaltes. Feuchtgebiete erfüllen verschiedene Funktionen; so sind sie u. a. Wasserspeicher, sie unterstützen die Grundwasserneubildung und fungieren als Schutzfunktion bei Stürmen und Hochwassern (RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT, 2006). Als Teil des Wasserkreislaufs dienen Feuchtgebiete der Gesellschaft sowie der vorherrschenden Flora und Fauna.

Das Nigerbinnendelta in der Republik Mali nimmt in der semi-ariden Region eine besondere Stellung ein, da es sich um einen Gunststandort handelt, der wesentlich zur wirtschaftlichen Entwicklung der Region beiträgt. Durch das Vorhandensein von Wasser während Teilen der Trockenzeit mitten in der Sahelzone wird dem Binnendelta eine große ökologische wie auch ökonomische Bedeutung beigemessen. So bilden die Fischerei, die Landwirtschaft und die Viehzucht im Delta für über eine Millionen Menschen die Lebensgrundlage (ZWARTS et al., 2005a).

Aufgrund der regionalen Unterschiede gibt es verschiedene nationale wie internationale Definitionen für Feuchtgebiete (TINER, 1999). Nach Artikel 1 Absatz 1 der Ramsar-Konvention

werden Feuchtgebiete wie folgt definiert: „Feuchtgebiete im Sinne dieses Übereinkommens sind Feuchtwiesen, Moor- und Sumpfgebiete oder Gewässer, die natürlich oder künstlich, dauernd oder zeitweilig, stehend oder fließend, Süß-, Brack- oder Salzwasser sind, einschließlich solcher Meeresgebiete, die eine Tiefe von sechs Metern bei Niedrigwasser nicht übersteigen.“ (UNESCO, 1996) In der Ramsar-Konvention wurden die ursprünglich fünf großen Arten von Feuchtgebieten in drei Kategorien zusammengefasst: Marine und Küsten- Feuchtgebiete, Binnen-Feuchtgebiete wie das Nigerbinnendelta und vom Menschen erschaffene Feuchtgebiete. (RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT, 2006)

Der Großteil der Feuchtgebiete Afrikas befindet sich im zentralen und südlichen Teil des Kontinents. Entlang der Küste kommen Mangroven-Wälder vor, der überwiegende Teil der afrikanischen Feuchtgebiete hingegen befindet sich im Landesinneren. Die Lage des Binnendeltas, mit seiner saisonal überfluteten Graslandschaft, in Westafrika am südlichen Rande der Sahara sowie dessen Ausmaß lassen das Binnendelta hervorragen (DENNY, 1993).

Das Nigerbinnendelta ist nach dem Okavango-Delta in Botswana das zweitgrößte Binnendelta Afrikas. Es beherbergt eine große Anzahl an Pflanzen- und Tierarten und ist ein wichtiger Standort der biologischen Vielfalt. Neben den jährlich rund 1 Million Zugvögeln zeichnet sich das Binnendelta durch seinen Fischreichtum aus (RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT, 2004).

Da dieser Naturraum sehr sensibel auf Veränderungen reagiert, ist er durch die wachsenden anthropogenen Einflüsse, sowohl direkt innerhalb des Binnendeltas als auch flussaufwärts, stark gefährdet. Mit der Aufnahme des Binnendeltas in die Liste der Ramsar-Gebiete Anfang 2004 hat sich Mali bereit erklärt, die Region nachhaltig und ökologisch ausgewogen zu nutzen (RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT, 2004).

Die Ramsar-Konvention steckt die Rahmenbedingungen für den zwischenstaatlichen Vertrag, der die internationale Zusammenarbeit zur Erhaltung und Nutzung von Feuchtlebensräumen festlegt, ab. Das „Übereinkommen über Feuchtgebiete, insbesondere als Lebensraum für Wasser- und Watvögel, von internationaler Bedeutung“ wurde 1971 in Ramsar, Iran, aufgesetzt und während der folgenden Jahren angepasst. Am 01.02.2004 wurde das gesamte Nigerbinnendelta mit einer Größe von 41 195 km<sup>2</sup> zum Ramsar-Gebiet ernannt. Zuvor waren 1987 bereits die Bereiche um Lake Horo, Séri und Lac Débo mit Walado Debo zu Ramsar-Gebieten erklärt worden (RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT, 2004).

Aufgrund seiner Sonderstellung war das Binnendelta mit seinen Überschwemmungsflächen schon immer ein Gebiet von Interesse. Luftbilder vom Sahelraum in Mali entstanden bereits während der Zeit unter französischer Vorherrschaft. Die Befliegung sowie die Auswertung erfolgten in den 1950er Jahren. Zur Auswertung gehörte neben der Vegetations- und Bodenkartierung auch die Erfassung der Topographie. Mit dem Start der Landsat-Serie begannen ab der Mitte der 70er Jahre Satellitendaten einen wichtigen Beitrag zum Monitoring zu leisten (CSAPLOVICS, 1992).

Die im Rahmen dieser Arbeit zu erstellende Datenbasis beruht auf SAR-Daten, deren größter Vorteil in der Wetter- und Tageszeitunabhängigkeit liegt. Aus diesem Grund spielen SAR-Daten eine wichtige Rolle in Anwendungsbereichen, die sich mit der Erfassung von Landbedeckungen beschäftigen, insbesondere wenn die Aufnahmen mittels optischer Systeme aufgrund der Wolkenbedeckung selbst bzw. an der problematischen Informationsextraktion von Dunst- und Wolkenschattengebieten fehlschlagen. Dennoch gibt es auch nachvollziehbare Gründe, weshalb der Einsatz von SAR-Daten begrenzt ist. Dies betrifft die spezielle Bildgeometrie,

---

das komplexe Rückstreuverhalten der Strahlung sowie den Speckle-Effekt in den Aufnahmen (BRUZZONE et al., 2004).

An der Professur Geofernerkundung der TU Dresden liegen für das Nigerbinnendelta aus dem ESA-ERS-AO3-363 Projekt „SAR-Based Monitoring of Human Impact and Flood Patterns for the Assessment of Land Cover and Land Use Change in the Region of the Inland Delta of the River Niger, Mali“ Aufnahmen von den beiden European Remote Sensing (ERS) Satelliten zu verschiedenen hydrologischen Stadien vor. Davon wurde eine Auswahl von sieben Aufnahmen getroffen, welche das Untersuchungsgebiet im zentralen Bereich des Deltas enthalten. Die Aufnahmezeitpunkte erstrecken sich von 1992 bis 1996. Des Weiteren existieren aus dem ESA-ENVISAT-AO-776 Projekt „ENVISAT-MERIS-Based High Spectral Resolution Imaging Spectrometry for Monitoring Spatio-Temporal Patterns of Land Use and Land Cover Change in SubSaharan Wetlands - the Cases of the Inland Deltas of the Niger and Okavango Rivers“ Advanced Synthetic Apertur Radar (ASAR) Aufnahmen des Environmental Satellite (Envisat), dem Nachfolger der ERS-1 und ERS-2 Satelliten, von drei Zeitpunkten in den Jahren 2003 und 2004.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Aufbereitung und Nutzbarmachung der in den SAR-Daten enthaltenen Informationen. Das Vorhaben orientiert auf die Unterstützung eines nachhaltigen Managements zur Nutzung der Ressource Wasser im Untersuchungsgebiet.

Aufgrund beinahe identischer Systemparameter der beiden SAR-Instrumente auf den ERS- und Envisat-Satelliten ist von einem vergleichbaren Rückstreuverhalten auszugehen, wodurch für die Auswertung der Aufnahmen die gleichen Klassenbeschreibungen verwendet werden können. Bei verschiedenen Systemvoraussetzungen ist die Kompatibilität der Klassenbeschreibungen für die verschiedenen Datenbestände bzw. die Umgruppierung der Klassen zu überprüfen, damit Vergleiche untereinander möglich werden.

Die Datenbasis bilden C-Band Aufnahmen, deren Auswertung zunächst die Datenaufbereitung bzw. die Vorverarbeitung, welche aus der radiometrischen Kalibrierung, der Co-Registrierung und der Speckle-Filterung der Daten besteht, vorangestellt ist. Die ausschließlich einkanalen SAR-Daten sind von dem Speckle-Effekt geprägt. Da dieser die pixelbasierte Auswertung erheblich erschwert, wird die in der Fernerkundung neuere objektbasierte Klassifikation angewandt. Somit soll der Einfluss des Effektes auf das Ergebnis reduziert sowie die Klassifikationsgüte der einkanalen Daten durch das Einbeziehen von Zusatzdaten und Kontextinformationen gesteigert werden.

Die SAR-Aufnahmen aus den früheren Projekten liegen zwischen rund 10 und 20 Jahren zurück. Zu keinem der Aufnahmezeitpunkte liegen Ground-Truth Messungen vor. Deren Erhebung gestaltet sich während der Überschwemmung aufgrund des unwegsamen Geländes als sehr schwierig. Zudem wurden für die Republik Mali in den letzten Jahren immer wieder Teilreisewarnungen, die insbesondere den Norden des Landes betrafen, bzw. Reisewarnungen für die gesamte Republik verhängt (AUSWÄRTIGES AMT, 1995–2012, Stand: 18.05.2012).

Mit Hilfe der multispektralen Daten wird eine Vergleichsbasis für die Klassifikation der Landbedeckungen erstellt. Die Herausforderung bestand darin, da angesichts der genannten Gründe der Zugang zum Untersuchungsgebiet und somit ein Vorortabgleich nicht möglich war bzw. keine Ground-Truth Daten aus den Projekten vorlagen, Plausibilitätsnachweise für die Vergleichsdaten zu finden. Deswegen ist der Erstellung der Vergleichsdaten eine ausführliche Literaturstudie zu den geographischen Gegebenheiten des Binnendeltas und dem Rückstreuverhalten von Landbedeckungen in Feuchtgebieten vorangestellt. Bei einer

visuellen Interpretation wird mit Hilfe der erstellten Vergleichsbasis exemplarisch für insgesamt drei Aufnahmezeitpunkte im Oktober 2003 und Dezember 2003 sowie März 2004 die hydrologische Situation im Binnendelta sowie die Rückstreuung der Landbedeckungen im Untersuchungsbereich analysiert.

Die sich daraus ergebene wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit ist es beschreibende Merkmale für die erarbeiteten Landbedeckungen zu finden und diese auf die SAR-Daten in Form einer objektorientierten und wissensbasierten Klassifikation anzuwenden, insbesondere im Hinblick auf die Unterscheidung zwischen den Wasser- und Vegetationsflächen von den von der Überschwemmung unberührten Bereichen. Die Umsetzung des Zieles setzt sich aus folgenden Herausforderungen zusammen:

- Erstellen der Vergleichsbasis
- Analyse und Vorabinterpretation zur Klassenunterscheidung
- Finden von klassenbeschreibenden Zusatzinformationen
- Erstellung des Regelwerks zur Klassifikation und Evaluierung
- Übertragbarkeit des Regelwerks.

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an den genannten Herausforderungen. Die Vergleichsbasis wird auf Grundlage multispektraler Aufnahmen und mit Hilfe der Literaturstudie in Kapitel 2, welches u. a. einen geographischen Überblick über das Untersuchungsgebiet gibt, erstellt. Zusätzlich werden die Analyse und die Vorabinterpretation der SAR-Aufnahmen mit Hilfe der Ergebnisse der Literaturstudien aus Kapitel 2 und Kapitel 3, zu den Rückstreuverhalten der Landbedeckungen in Feuchtgebieten, in Kapitel 4 umgesetzt.

Der in Kapitel 5 erarbeitete Ablauf zur Klassifikation der SAR-Daten setzt sich aus den bekannten Komponenten der Vorverarbeitung, Merkmalsextraktion und Klassifikation zusammen. Für die Klassifikation wurde ein objektorientierter und wissensbasierter Ansatz verwendet. Den Abschluss bildet Kapitel 6 mit einer Genauigkeitsanalyse zur Unterscheidung in die drei Kategorien Wasser, Vegetation und Boden sowie eine inhaltliche Auswertung der Klassifikationsergebnisse, welche u. a. die Ermittlung der Flächenmaße der drei Kategorien enthält.



## 2 Mali und das Nigerbinnendelta

Dieses Kapitel widmet sich der physisch-geographischen Einordnung der Republik Mali. Um die Gegebenheiten Malis und die daraus resultierende Sonderstellung des Binnendeltas hervorzuheben werden, insbesondere die Geofaktoren Klima, Vegetation und Boden betrachtet.

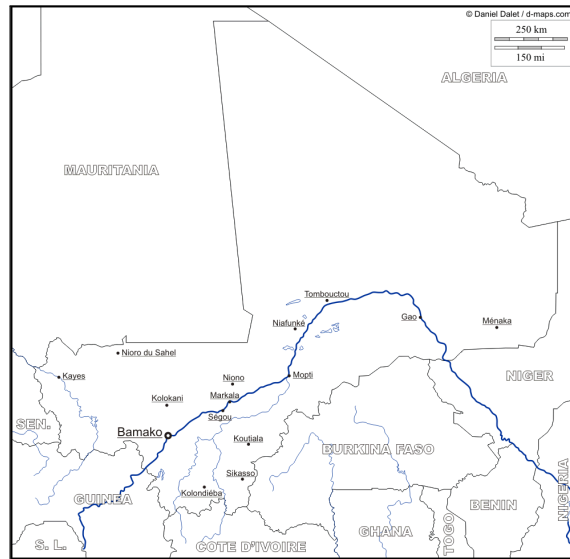
Für ein besseres Verständnis der Struktur und Dynamik des Nigerbinnendeltas und der anthropogenen Einflüsse wird im Anschluss der Verlauf der periodischen Überschwemmungen vorgestellt. Insbesondere wird auf den Zusammenhang zwischen den Durchflussmengen und dem Überschwemmungsausmaß sowie auf den Einfluss der Dämme eingegangen. Die Vegetation und die Böden des Binnendeltas werden am Ende des Kapitels gesondert behandelt. Die gewonnenen Informationen zu den Landbedeckungen im Binnendelta werden für die spätere Interpretation der SAR-Daten sowie zur Erstellung des Regelwerks für die Klassifikation herangezogen.

### 2.1 Republik Mali

Die in Westafrika gelegene Republik Mali (im Folgenden Mali genannt) erstreckt sich auf einer Fläche von rund 1,24 Mio. km<sup>2</sup>, wovon ca. 1,6% mit Wasser (ca. 20 000 km<sup>2</sup>) bedeckt sind. Mali hat keinen direkten Zugang zum Meer und liegt zwischen 10° und 25° nördlicher Breite und 12° westlicher und 4° östlicher Länge. Der Binnenstaat grenzt im Nordosten an Algerien, im Osten an Niger, im Südosten an Burkina Faso, im Süden an die Elfenbeinküste und Guinea, im Westen an den Senegal sowie im Nordwesten an Mauretanien. Die Hauptstadt des mit rund 14,5 Millionen Einwohnern bevölkerten Landes ist Bamako, welches sich im Südwesten des Landes befindet. 44% der Fläche Malis befinden sich im trockenen Naturraum der Sahara, 24% in der semiariden Sahel- und 32% in der Sudanzone (CSAPLOVICS, 1992). Der wichtigste Fluss ist der Niger, die Lebensader des Landes. Seine bedeutendsten Nebenflüsse sind der Bani und der Sankarani. Die Abbildung 2.1 zeigt den Verlauf des Niger durch Mali sowie einige der größeren Städte (CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2012, Stand: 08.12.2011).

#### 2.1.1 Klima und Niederschlagsverteilung

Für die Typisierung von Klimaten wird je nach Datenbasis entweder das effektive oder das genetische Verfahren angewandt. Bei den effektiven Verfahren werden Klimaklassifikationen verwendet, welche auf messbaren Werten, wie der Temperatur, der Verdunstung sowie dem Niederschlag, basieren. Die Abgrenzung der verschiedenen Klimatypen erfolgt durch Schwellwerte. Liegen keine bzw. nicht ausreichend Messwerte für eine Region vor, wird auf das genetische Verfahren zurückgegriffen. Dabei erfolgt die Einordnung in einen Klimatyp



**Abbildung 2.1:** Verlauf des Niger durch Mali, Quelle: D-MAPS.COM (2007–2012), <http://d-maps.com>

über die geographische Lage der Region innerhalb der globalen Zirkulation (DEUTSCHER WETTERDIENST, 1996–2012).

Nach der effektiven Klimaklassifikation von Köppen und Geiger finden sich in Mali, von Süden beginnend, folgende Klimatypen:

- *Savannenklima*, winter trocken (*Aw, Equatorial savannah with dry winter*),
- *Steppenklima*, arid und trocken heiß (*BSh, Hot steppe climate*) und
- *Wüstenklima*, arid und heiß (*BWh, Hot desert climate*).

Durch die Großbuchstaben erfolgt die Zuordnung in die Klimazonen, wobei *A* für die tropischen Klimate (*Equatorial climates*) und *B* für die Trockenklimate (*Arid climates*) steht. Die Einteilung beruht auf Schwellwerten der Temperatur sowie des Niederschlags. Für eine Zuordnung in das Savannenklima muss die mittlere Temperatur des kältesten Monats mehr als 18°C betragen. Des Weiteren muss der trockenste Monat im Winter eine mittlere Niederschlagsmenge von unter 60 mm aufweisen. Sowohl für das Steppen- als auch das Wüstenklima gilt, dass die mittlere Jahresniederschlagsmenge kleiner als das 10fache des Trockenheitsschwellwertes ist. Der Trockenheitsschwellwert wird in Abhängigkeit von der Jahresdurchschnittstemperatur und der Jahresniederschlagsverteilung berechnet. Für das Steppenklima gilt zusätzlich, dass der Jahresdurchschnittsniederschlag größer als der 5fache Trockenheitsschwellwert ist. Für das Wüstenklima hingegen muss dieser kleiner/gleich dem 5fachen Trockenheitsschwellwert sein. Ein Gebiet wird als „trocken heiß (*hot*)“ bezeichnet, wenn die Jahresdurchschnittstemperatur größer/gleich 18°C beträgt (KOTTEK et al., 2006). Das Binnendelta befindet sich nach der Einteilung von Köppen und Geiger sowohl in der Zone des Wüsten- als auch des Steppenklimas (siehe Abbildung A.1 im Anhang).

Die witterungsklimatischen Ereignisse in Mali werden von den Luftdruckverhältnissen in der Sahara bzw. den daraus resultierenden Strömungen geprägt. Ausgelöst von dem warmen

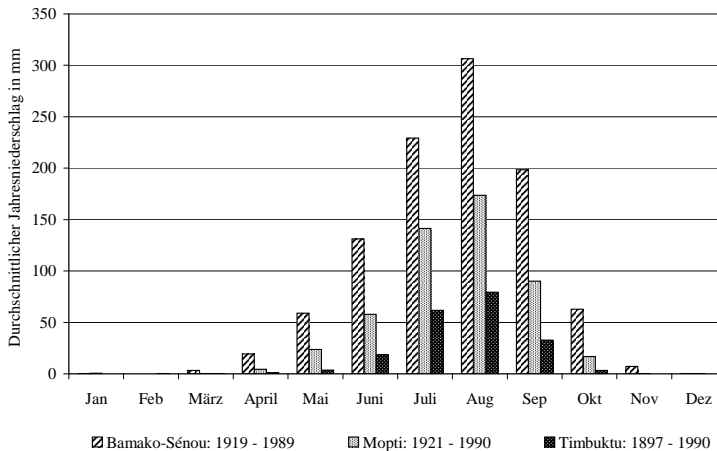
Hochdruckgebiet „Azorenhoch“ bildet sich im Winter über der Wüstenregion Nordafrikas ein Hochdruckgürtel. Im Sommer entsteht aufgrund der erhöhten Sonneneinstrahlung ein Hitzetief. Diese beiden Druckverteilungen bewirken, dass in den bodennahen Schichten zum einem Tropikluft (Passatwinde) im Winter in Richtung Äquator und zum anderen äquatoriale Luftmassen im Sommer Richtung Sahara ziehen. In Westafrika wird die von Nord nach Ost strömende Tropikluft „Harmattan“ genannt. Die Luftmassen treffen in der Innertropischen Konvergenzzone (ITC) aufeinander. Im Winter befindet sich die ITC in Äquatornähe, wandert aber durch die Erwärmung im Sommer in Richtung Norden. Die trockene und heiße Luft wird im Laufe des Sommers von der tropisch maritimen Äquatoralluft zurückgedrängt. Dieser jahreszeitliche Wechsel der Strömungsverhältnisse beeinflusst sowohl die räumliche als auch die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge in Mali. Die Lage der ITC beeinflusst, insbesondere in der Sahelzone, den Beginn und das Ende der Regenzeit. Dabei ist die ITC in ihrer Ost-West-Ausbreitung nicht stetig bzw. durchgängig. Je nördlicher eine möglichst zusammenhängende ITC vordringen kann, desto regenreicher wird es im Nordsahel bzw. in den Wüstenrandgebieten. Trockene Jahre entstehen, wenn die ITC in sich unterteilt ist und nicht sehr weit nach Norden vordringen kann. Tritt diese Konstellation mehrere Jahre nacheinander auf, spricht man von einer Dürreperiode (BARTH, 1986). Dürren treten in der Sahelregion immer wieder in unregelmäßigen Abständen auf. Im letzten Jahrhundert gab es drei Dürreperioden. Die letzte Dürreperiode des 20. Jahrhunderts zwischen 1972 und 1993 wird nach ZWARTS (2010) „La Grande Sécheresse“ (die große Dürre) genannt.

Die Sahelzone ist aus klimatologischer sowie vegetationsgeographischer Sicht die Übergangszone zwischen der Sahara bzw. den Halbwüsten im Norden und den wechselfeuchten Savannen im Süden. In diesem von Ost nach West verlaufenden, zwischen 400 und 600 km breiten Gürtel erhöht sich die jährliche Niederschlagsmenge von Norden nach Süden (CSAPLOVICS, 1992). Es gibt verschiedene Angaben von Niederschlagsmengen, die zur nördlichen und südlichen Abgrenzung der Sahelzone verwendet werden. Die Angaben variieren zwischen der unteren Grenze von 100 mm für den Norden sowie der oberen Grenze von 700 mm an der südlichen Grenze (SIVAKUMAR, 1989). Die mittlere Niederschlagsmenge variiert deutlich innerhalb des Sahelraums. Dies wirkt sich in der Dauer der Regenzeit (zwischen zwei und vier Monaten) aus: je weiter nördlich, desto kürzer wird die Regenzeit bzw. desto länger die Trockenzeit (entsprechend zwischen zehn und acht Monaten) (HAMMER, 2005).

Neben der Niederschlagsmenge nehmen auch kurze, unregelmäßige und intensive Niederschlagsereignisse nach Norden hin zu. Durch die Unregelmäßigkeit können auch während der Regenzeit längere Abschnitte trocken bleiben. Die hohe Niederschlagsvariabilität bezieht sich nicht nur auf die Niederschlagsmenge, sondern auch auf die Verteilung der jährlichen Niederschläge in den einzelnen Jahren. Die räumliche und auch die zeitliche Verteilung variiert stark. Im Süden liegt die Variabilität bei ca. 20 % und im Norden bereits bei 40 % (KRINGS, 2006). Diese Trockenphasen während der Regenzeit haben ernsthafte Folgen für die Vegetation sowie die Landwirtschaft. Auch die Böden werden durch den Wechsel zwischen Trockenperioden und kurzen, aber starken Niederschlägen beansprucht. So lässt die Durchnässung der Böden bei gleichzeitiger Zunahme des Oberflächenabflusses nach (BARTH, 1986).

Das Diagramm in Abbildung 2.2 verdeutlicht den Rückgang der Niederschlagsmenge nach Norden sowie die Verteilung über das Jahr anhand von drei Stationen in Mali. Die Station Bamako–Sénou repräsentiert den südlichen Teil des Landes mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 1 018 mm. Im rund 460 km entfernten Mopti beträgt der mittlere Jahresniederschlag nur noch 521 mm. Mit 203 mm ist der Niederschlag in Timbuktu am nördlichen Rand der Sahelzone nochmals deutlich geringer und zeigt die große Variation innerhalb der Übergangszone. Die Angaben beziehen sich auf die im Diagramm vermerkten

Beobachtungszeiträume (WORLDCLIMATE, 1996–2012). Die Regenzeit liegt in der Regel zwischen Mitte Juni und Mitte September. Im Süden können allerdings auch bereits im Mai bzw. bis in den Oktober hinein Niederschläge fallen. Der niederschlagsreichste Monat ist der August (HAMMER, 2005).



**Abbildung 2.2:** Durchschnittlicher Jahresniederschlag für die Stationen Bamako-Sénou, Mopti und Timbuktu über den jeweils angegebenen Zeitraum (WORLDCLIMATE, 1996–2012, Stand: 16.02.2012)

## 2.1.2 Vegetation

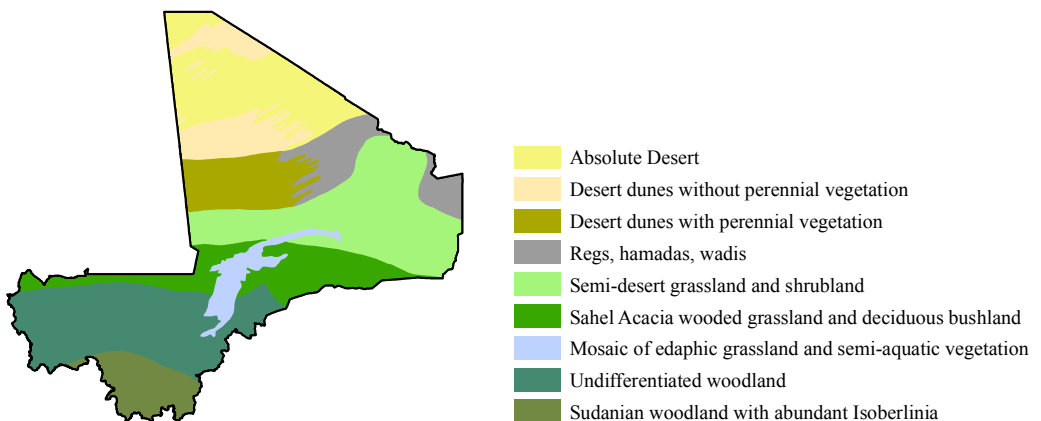
Die Sahelzone kann auf vegetationsökologischer Grundlage in eine nördliche, eine mittlere und eine südliche Zone unterteilt werden. Der Norden wird hauptsächlich von der Grassavanne geprägt. Die Vegetation im mittleren Teil gehört zu der Strauch-, Dornstrauch- bzw. Dornbuschsavanne, wohingegen im Süden Baumsavannen und Trockenwälder dominieren (HAMMER, 2005). Eine ausführliche Beschreibung der Flora und Vegetation Afrikas enthält u. a. die physiognomische Klassifikation von WHITE (1983). WHITE (1983) teilt den afrikanischen Kontinent in verschiedene Regionen, sogenannte Florenregionen (*phytogeographical areas* oder *phytochoria*), ein. Florenregionen sind große Bereiche, in denen bestimmte Artengruppen einer Flora (Florenelemente) vorherrschen (LESER, 2010). Diese Gebiete werden auf Basis der Fülle ihrer endemischen Flora, die sich auf der Ebene der Pflanzenarten zusammensetzt, voneinander abgrenzt.

WHITE (1983) unterteilt die Florenregionen in vier verschiedene Arten, u. a. in die regionalen endemischen Zentren (*Regional Centres of Endemism*) und Übergangszonen (*Transition Zones*). Die endemischen Zentren zeichnen sich dadurch aus, dass über 50 % der Arten auf diese Region begrenzt sind und in dem Bereich mehr als 1 000 endemische Arten vorkommen. In Mali befinden sich drei verschiedene Florenregionen, wobei die sudanische Zone zu den endemischen Zentren und der Sahel sowie die Sahara zu den Übergangszonen gehören. Anhang A.2 zeigt die Einteilung Malis in der Ebene der Florenregionen nach WHITE (1983).

Die sudanische Zone (*III. Sudanian Region*) im Süden Malis befindet sich im Einflussgebiet der tropischen Sommerregenzone, welche sich durch den periodischen Wechsel von Regen-

und Trockenzeit auszeichnet. Der jährliche Niederschlag liegt zwischen 500 und 1 400 mm. Der Harmattan bringt staubige Luft aus der Sahara im Norden in die Sahelzone und die südlichen Gebiete, was zusätzlich die Trockenzeit verschärft (DIARRA et al., 2004). Durch die Harmattan-Winde können Temperaturen von bis zu 40°C auch im südlichen Teil des Landes erreicht werden (HUGHES et al., 1992).

Die Abbildung 2.3 zeigt die Verteilung der verschiedenen Pflanzenformationen bzw. Vegetationstypen innerhalb Malis nach WHITE (1983). Beginnend im Süden der sudanischen Zone kommen überwiegend bewaldete Gebiete vor. Die südlichen bewaldeten Gebiete besitzen einen großen Anteil an *Isobertinia doka* (*sudanian woodland with abundant Isobertinia*), eine Art der Unterfamilie der Johannisbrotgewächse. WHITE (1983) definiert bewaldete Gebiete (*woodlands*) als Bereiche mit frei stehenden, mindestens 8 m hohen Bäumen, deren Kronendach 40 % oder mehr der Fläche bedecken. Der Unterwuchs wird hauptsächlich durch Gras dominiert. Im Norden schließen sich Flächen an, die als allgemeine Waldgebiete (*undifferentiated woodland*) bezeichnet werden. Diese Bereiche unterscheiden sich von den bewaldeten Flächen im Süden dadurch, dass es trockenere Gebiete sind, in denen noch Ackerbau betrieben werden kann. Eine dichte, geschlossene Vegetationsdecke kann sich nicht mehr bilden. Zudem können sich die Böden durch die intensive Landnutzung nicht mehr ausreichend erholen, sodass in zunehmendem Maß degradierte Flächen zu beobachten sind, auf denen sich Dickicht und Sträucher angesiedelt haben (WHITE, 1983).



**Abbildung 2.3:** Vegetationseinheiten Malis nach WHITE (1983), Quelle der Shapefile: UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2006), <http://geodata.grid.unep.ch/results.php>

Die Sahelübergangszone (*XVI. Sahel Regional Transition Zone*) befindet sich am südlichen Rand der Saharawüste. Die Sahelzone ist eine geomorphologisch recht flache Region. Der Niederschlag variiert zwischen 150 und 500 mm im Jahr und fällt hauptsächlich in drei bis vier Monaten während des Sommers. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt zwischen 26°C und 30°C. Regional kann vereinzelt bereits Frost auftreten. Die Flora der Sahelzone ist eher spärlich. Auf einer Fläche von rund 3 Mio. km<sup>2</sup> befinden sich nach LE HOUÉROU (1989) um die 1 500 bzw. nach WHITE (1983) ca. 1 200 verschiedene Pflanzenarten.

In Mali kommen in der Sahelzone drei Vegetationsformationen vor, darunter auch die Gruppe des edaphischen Graslands und semi-aquatischer Vegetation, welche im Binnendelta zu finden ist. Umrundet wird das Überschwemmungsgebiet im Sahel von bewaldetem Grasland bzw. Gras- und Buschland. Bewaldete Grasflächen (*Sahel Acacia wooded grassland and*

*deciduous bushland*) sind charakterisiert durch Grasland und andere krautige Vegetation sowie vereinzelt auftretende Holzgewächse, die zwischen 10 und 40 % der Fläche bedecken können (*wooded grassland*). Meist handelt es sich bei den Gehölzen um Akazien-Arten, welche im Süden noch Höhen bis zu 8 m erreichen können. Weiter nördlich werden die Gehölze niedriger und buschiger. Die Vorkommensdichte hängt im großen Maße von dem Vorhandensein von Wasser sowie von den menschlichen Aktivitäten in der Region ab. Ergänzt werden diese Flächen von sommergrünen Sträuchern und Gebüschern, die zwischen 3 und 7 m hoch werden können und mehr als 40 % der Fläche bedecken (*deciduous bushland*). Im nördlichen Teil der Sahelübergangszone, in Bereichen mit einer jährlichen Niederschlagsmenge von weniger als 250 mm, ist Grasland die auf den sandigen Böden vorherrschende Vegetationsform (*semi-desert grassland*). Lokal können noch Büsche oder kleine buschige Bäume auftreten (*shrubland*), deren Anteil an der Gesamtfläche aber unter 10 % liegt. Die dominanten Gräserarten, wie beispielsweise *Cenchrus biflorus* und *Schoenefeldia gracilis*, sind meist einjährige Pflanzen. Aufgrund von edaphischen Faktoren, insbesondere dem Relief, treten im Norden zunehmend Wüstengräser auf. Der Übergang zu Wüstengräsern beginnt bei ca. 100 mm jährlichen Niederschlags und einem sandigem Boden. Ist das Dünenrelief bereits weiter südlich ausgeprägt, können die Wüstengräser bereits auf Dünenkämmen im nördlichen Teil der Sahelzone vorkommen (WHITE, 1983).

Die Saharaübergangszone (*XVII. Sahara Regional Transition Zone*) im Norden Malis wird durch eine sehr warme Atmosphäre, bedingt durch hohe Temperaturen und spärliche Vegetation, charakterisiert. Die südliche Grenze dieser trockenen Landschaft entspricht in groben Zügen dem Verlauf der 150-mm-Isohyete. In den Kies- und Steinwüsten (Hammada) sowie entlang ausgetrockneter Flussläufe oder -täler (*regs, hamadas, wadis*) können Wüstenhabitats mit Bäumen und Sträuchern entstehen. Auf stabilen Wüstendünen kann sich ganzjährig Vegetation (*desert dunes with perennial vegetation*) ansiedeln, wenn genügend Feuchtigkeit vorhanden ist. Im westlichen Teil der Sahara kommen im Wesentlichen zwei verschiedene Vegetationsarten vor: die Grasart *Stipagrostis pungens* sowie die zu der Familie der Gänsefußgewächse gehörige Strauchart *Cornulaca monacantha*. Auch weniger stabile Wüstendünen können zeitweise (nach Regenfällen) mit Vegetation bedeckt sein (*desert dunes without perennial vegetation*). Wandernde Dünen, wie die Sicheldünen, sind hingegen frei von Vegetation. Im Norden des Landes beginnt die reine Wüste (*absolute desert*). In diesen Bereichen ist keine Vegetation mehr vorhanden, mit Ausnahme der Oasen. Die Tagestemperaturen überschreiten 35°C. Der jährliche Niederschlag für den zentralen Teil zwischen 18° und 30° n. Br. liegt unter 20 mm. Regenereignisse können jedoch über mehrere Jahre hinweg ausfallen (WHITE, 1983).

### 2.1.3 Geomorphologie und Böden

Das westliche Sahel-Sudangebiet besteht aus einer Becken- und Schwellenlandschaft, die sich hauptsächlich durch weite Ebenheiten und Bergplateaus mit abfallenden Schichtstufen auszeichnet. Die Schwellen, welche stellenweise von paläozoischem Sandstein überlagert sind, trennen die Becken voneinander. Sieht man von den Flachländern und einigen Gebirgsregionen ab, liegen die mittleren Höhen für die Landschaften Malis zwischen 200 und 500 m ü. NN. (HUGHES et al., 1992). Die Becken sind Sedimentationsräume, welche aus maritimen und kontinentalen Ablagerungen entstanden sind. Geomorphologisch unterteilt sich die Sahelzone in Lateritplateaus, Beckenlandschaften, fossile Altdünen, Flachmuldentäler und Wadi-Systeme sowie Gebirgsregionen (KRINGS, 2006).

Das Nigerbinnendelta ist aus geologischer Sicht Teil des Ségou-Beckens, einer Synklinale bzw. Mulde, welche bei dem Prozess der Faltung entstanden ist (BARTH, 1986). Der westliche Teil des Beckens wird durch Sedimente des tertiären (Miozän-Pliozän) Continental Terminals bestimmt. Die Landschaft zeichnet sich durch weite Ebenen aus Tongesteinen und Lehm sowie Duricrustformationen aus. Dieser Teil des Beckens wird auch *Delta mort* genannt und enthält noch einige wenige Altarme sowie zahlreicher Mare (abflusslose Süßwasserseen). Das trockenliegende Delta ist von Dünen und tonigen Sanden geprägt. Das heutige Nigerbinnendelta ist ein periodisch überschwemmtes Sedimentationsgebiet, das auch die Bezeichnung *Delta vif* trägt (BARTH, 1986; MCINTOSH, 1983).

Nördlich der Beckenlandschaft schließen sich fossile Dünen an. Die sandigen Gebiete im nördlichen Sahel werden von den markanten Dünenformationen geprägt. Die sogenannten Longitudinaldünen verlaufen, mit einem Abstand zwischen 1 und 7 km, fast parallel in nordöstlich-südwestlicher Richtung. Die Dünen erreichen Höhen zwischen 10 und 30 m. Zu den Dünengebieten gehört u. a. das *Erg von Niafunké*, welches im Norden an das Binnendelta grenzt. Der Großteil der Dünen in dieser Gegend verläuft von Ost nach West. Jüngere Dünen besitzen eine weiße bis gelbe Färbung und bestehen aus feinem Sand. Ältere Dünen hingegen weisen eine markante rötliche Färbung auf, die bei der Rubefizierung, einem bodenbildenden Prozess mit Anreicherung von Eisenoxiden, entstanden ist (BARTH, 1986; MCINTOSH, 1983).

Östlich vom Nigerbinnendelta schließt sich das Bandiagara-Plateau an. Am westlichen Rand des Plateaus befinden sich in Richtung Binnendelta abfallende paläozoische Sandsteintafeln. Das Plateau und die Sandsteintafeln bilden zusammen die Bandiagara-Schichtstufe (BARTH, 1986).

### Böden

Bei der Bodenbildung wird in zonale, azonale und intrazonale Böden unterschieden. Im westafrikanischen Sahel-Sudan-Raum dominieren die azonalen und zonalen Böden. Die Bodenbildungsprozesse von azonalen Böden werden vom vorliegenden Relief sowie vom vorherrschenden Bodenwasser (insbesondere vom Grund- und Stauwasser) geprägt. Azonale Böden kommen in verschiedenen Klimazonen vor. Zu ihnen zählen u. a. die hydromorphen Böden des Binnendeltas. Zonale Böden werden hingegen durch das vorherrschende Klima sowie die Vegetation geprägt. Im Gegensatz zu den azonalen Böden sind zonale Böden an die für eine Klimazone typischen Bedingungen, wie beispielsweise die Temperatur, gebunden. In den Gebieten außerhalb des Überschwemmungsbereiches herrschen vor allem zonale Böden vor (KRINGS, 2006).

In den regenreichen Bereichen Malis treten vermehrt rote Böden (Ferrallite und Fersiallite) auf. Im nördlicheren, semi-ariden Bereich kommen gehäuft braune Böden (subaride Braunerde) vor (BARTH, 1986). Die Böden der Sahelzone können nach HAMMER (2005) zunächst in drei Bodentypen unterschieden werden:

- sandige Böden,
- eisenhaltige Böden und
- ton- und lehmhaltige Böden.

Flächenmäßig am stärksten verbreitet sind die sandigen und steinigen Böden. Durch die geringe Wasserspeicherkapazität und die dadurch bedingte geringe Vegetationsbedeckung sind diese Böden besonders anfällig für Erosion. Die Böden der fossilen Sanddünen zählen beispielsweise zu dieser Bodenkategorie. Für Pflanzenarten mit sehr langen Wurzelgängen

ist eine Versorgung über die Bodenfeuchte oder das Grundwasser möglich, sodass auch auf diesen Böden Weide- und Anbauwirtschaft (insbesondere Getreide) betrieben wird (HAMMER, 2005; KRINGS, 2006).

Die markante rotbräunliche Färbung der eisen- und säurehaltigen Böden entsteht durch Verwitterung. Dieser Bodentyp tritt häufig in den Hochebenen der Sahelzone auf. Der Boden ist nährstoffarm und weist neben dem hohen Eisengehalt einen hohen Säuregrad auf, was zu einer sehr lockeren Vegetationsbedeckung führt. (HAMMER, 2005)

Der dritte in der Sahelzone vorkommende Bodentyp sind die ton- und lehmhaltigen Böden, welche durch Anschwemmungen, die Ablagerung von Sedimenten, entstehen. Diese Böden weisen eine gräuliche bzw. graubraune Färbung auf und kommen in Senken, Tälern sowie Überschwemmungsgebieten vor. Aber auch in Tiefebene und ausgetrockneten Seen ist dieser Bodentyp oft zu finden. Im Gegensatz zu sandigen und eisenhaltigen Bodentypen eignen sich die ton- und lehmhaltigen Böden besser für landwirtschaftliche Aktivitäten, da sie im Vergleich zu den beiden anderen Bodentypen eine höhere Wasserspeicherkapazität und einen größeren Anteil an organischem Material aufweisen. Die nährstoffreichen Böden werden für den Anbau von Gemüse, Reis und anderen Nahrungsmitteln verwendet, da sie bei genügend Wasser sehr produktiv sind. Die Bodenschicht ist nur wenige Zentimeter dick, weshalb die mechanische Bearbeitung des Bodens nicht zu tief erfolgen darf (HAMMER, 2005).

Allen drei Hauptbodenarten ist gemein, dass sie während des Jahres über einen großen Zeitraum hin trocken fallen und somit der Erosion durch Wind und Wasser ausgesetzt sind. Zudem werden sie durch die hohe Verdunstung und Evapotranspiration zusätzlich gestresst, sodass es zu Verkrustungen u. ä. kommen kann. Auch benötigen alle drei Bodenarten lange Regenerations- bzw. Brachzeiten (HAMMER, 2005). Im Norden Malis überwiegt die mechanische Erosion. Durch die großen Temperaturschwankungen werden die Felsoberflächen zersetzt und anschließend vom Wind abgetragen. Mit den steigenden Regenfällen in Richtung Süden nimmt die chemische Zersetzung zu. Während der Trockenzeiten beginnt der Boden auszutrocknen. Die Felsen sind mit einem Konglomerat aus Ton, Kies und Sand bedeckt. Dieses ist mit Eisen angereichert, wodurch die Kruste eine rötliche bis violette Färbung erhält (BEUCHELT, 1966).

Im Norden und Osten des Binnendeltas schließen Flächen an, welche überwiegend aus Sandböden bestehen (Arenosole und Dünen/Flugsand) (BARTH, 1986). Durch die lockere Struktur der Dünenböden sind diese Flächen sehr anfällig gegenüber Übernutzung (HAMMER, 2005) sowie Winderosion (PONCET & TROUBAT, 1994b). Dennoch können die Dünen mit einjährigen Gräsern bewachsen sein (KRINGS, 2006). Im Osten beginnt das Bandiagara-Plateau mit seinen in Richtung Nigerbinnendelta abfallenden Sandsteintafeln. Diese Bereiche werden in der „Carte des Sols du Mali“ (STROOSNIJDER, 1979) als stark versandet bezeichnet. PONCET & TROUBAT (1994b) führen an, dass auf den Sandsteintafeln ein Gemisch aus Sand und Lehm sowie Kies auf konvex geformten Flächen auftreten kann. Das Bandiagara-Plateau besteht nach der FAO-Bodenkarte „Soil Map of the World“ (FAO GEONETWORK, 2012) überwiegend aus Lithosolen. Diese Böden auf Festgestein kommen überwiegend in Gebirgen vor und sind nur schwach entwickelt. Ebenfalls im Osten befinden sich Luvisole, Böden die durch Lessivierung im Unterboden einen höheren Tongehalt aufweisen als im Oberboden. Im Süden des Binnendeltas schließen sich Luvisole mit ferritischen Eigenschaften an. Durch die Eisenanreicherung besitzen diese Bodeneinheiten rote bis gelbe Flecken. Westlich beginnen große Regosol-Bereiche. Diese in Erosionslandschaften weit verbreiteten Böden bilden sich meist auf Lockermaterial wie Sand und sind schwach entwickelt (UNESCO,



1997; UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY, 2012). Die Abbildung A.3 im Anhang zeigt die Verteilung der dominierenden Bodeneinheiten aus der FAO-Bodenkarte für den Großraum des Binnendeltas.

## 2.2 Das Nigerbinnendelta

Mit einer Länge von ca. 4 200 km ist der Niger, nach dem Nil und dem Kongo, Afrikas drittlängster Fluss. Der Niger durchquert zunächst Guinea, bevor er durch Mali, Niger und Benin fließt und in Nigeria am Golf von Guinea in den Atlantischen Ozean mündet. Bis zu Malis Hauptstadt Bamako münden mehrere Zuflüsse in den Niger. Flussabwärts schließt sich südlich von Mopti noch der Bani, einer der wichtigsten Nebenflüsse, an. Der Niger fließt in Richtung Nordosten bis an den südlichen Rand der Sahara. Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, beginnt bei Mopti der Nigerbogen, bevor er bei Timbuktu eine Wende nach Südost macht und weiter nach Niger fließt (JOHN et al., 1993). ANDERSEN et al. (2005) unterteilen das Stromgebiet des gesamten Nigers in sechs hydrographische Regionen, welche sich voneinander durch ihre topographischen Charakteristika und Abflusseigenschaften unterscheiden. Das Quellgebiet, welches den Niger und seine Nebenflüsse mit Wasser versorgt, ist die Guineaschwelle in Malis Nachbarland Guinea. Die Sommerniederschläge im Quellgebiet lösen eine Hochwasserwelle aus, welche zunächst im September die Hauptstadt Bamako erreicht (BARTH, 1986). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge an der Guineaschwelle beträgt über 1 500 mm. Die Regenzeit beginnt bereits im April und erlangt ihren Höhepunkt im Juli bzw. August. Im Quellgebiet des Banis variiert die jährliche Niederschlagsmenge zwischen 1 000 und 1 200 mm (ZWARTS, 2010).

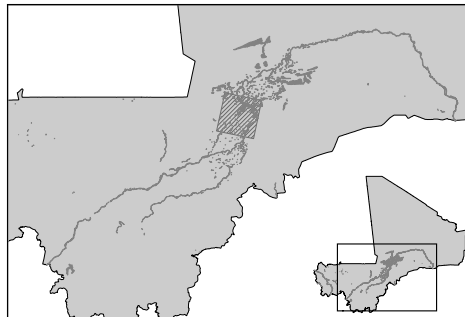
Eine eigenständige hydrographische Region bildet das Nigerbinnendelta mitsamt der Seenplatte. Das Binnendelta zeichnet sich durch die sehr fruchtbare, flache Überschwemmungsfläche mit einem weitläufig verzweigten Flusssystem und flachen Seen aus (ANDERSEN et al., 2005). Die Reste eines vormals großen, abflusslosen Sees zeigen sich im heutigen Seengebiet, u. a. mit den Seen Lac Débo und Lac Niangaye. Bis vor rund 8 000 Jahren existierte anstelle des Binnendeltas ein großer Binnensee, der vermutlich eine Fläche von 300 000 km<sup>2</sup> bedeckte (BARTH, 1986).

Das durchschnittliche Gefälle im Binnendelta ist sehr gering und beträgt rund 5 cm pro km (MCCARTHY, 1993; MCINTOSH, 1983). Im direkten Einflussgebiet der beiden Flüsse Niger und Bani im Binnendelta überwiegt der Vorgang der Sedimentation gegenüber der Erosion. Dies lässt sich durch das geringe Gefälle im Binnendelta bzw. die geringe Fließgeschwindigkeit der Hochwasserwelle, wodurch sich die auf den Boden wirkende Transportkraft vermindert, erklären (BARTH, 1986). DIARRA et al. (2004) geben für den Niger und Bani Fließgeschwindigkeiten von 0.3 bis 0.6 m/s an.

Der Pegelstand des Nigers im Binnendelta wird primär von der Hochwasserwelle bestimmt. Die lokalen Niederschläge haben nur einen sehr geringen Einfluss auf die Durchflussmenge (MAHÉ et al., 2009; ZWARTS et al., 2005b). In MAHÉ et al. (2009) wird der südliche Teil des Deltas als Transitzone bezeichnet, in der die Strömung langsamer wird. Bevor der Niger in den Lac Débo fließt, verzweigt sich der Fluss in ein Netzwerk aus Flussläufen, was seinen Lauf deutlich verlangsamt (BEUCHELT, 1966).

### Einteilung des Binnendeltas

Nach ANDERSEN et al. (2005) beginnt die hydrographische Region des Nigerbinnendeltas in Ségou und erstreckt sich bis zu dem Hafen von Timbuktu. Die hydrographische Region umfasst eine Fläche von rund 40 000 km<sup>2</sup>, mit Überschwemmungsflächen von 20 000 bis 30 000 km<sup>2</sup>. ANDERSEN et al. (2005) unterteilen das Nigerbinnendelta selbst auf der Grundlage morphologischer Eigenschaften nochmals in vier Bereiche: das obere, mittlere und untere Delta sowie das Seengebiet. Das obere Delta erstreckt sich von Douna bis Djenné und beinhaltet den entsprechenden Abschnitt des Nigers und des Banis. Der zentrale Teil zwischen Niger und dem Nebenfluss Diaka zeichnet sich durch die vielen individuellen Beckenräume sowie ein unsystematisches Abflussnetz aus (BARTH, 1986). Die Überschwemmungsflächen des Binnendeltas sind mit Altarmen, Uferdämmen sowie mit endorheischen Seen durchzogen (KRINGS, 2006). In diesem Bereich befindet sich das Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 2.4). Im Norden wird das mittlere Delta durch das Seengebiet mit seinen großen Seen Lac Débo, Lac Korientzé und Walado Debo begrenzt. Das untere Delta schließt sich an das Seengebiet an und erstreckt sich bis Diré. Mit den Dünengebieten verändert sich von hier an die geomorphologische Erscheinung. Durch die bereits erwähnte parallele Anordnung der Dünen sind zwischen den Dünen Senken vorhanden, die, in Abhängigkeit vom Pegelstand, überflutet werden. Auf diesem Wege werden auch Seen am Rande des Deltas gefüllt (ANDERSEN et al., 2005). Auf der linken Flussseite befinden sich große Seen wie Lac Télé und Lac Faguibine, weshalb dieses Gebiet oft als *Zone lacustre* (frz. Seengebiet) bezeichnet wird (KRINGS, 1985). Auf der rechten Flussseite befinden sich u. a. Lac Niangaye und Lac Do.



**Abbildung 2.4:** Verlauf des Nigers in Mali sowie Lage des Untersuchungsgebietes (schraffierter Bereich), Quelle der Shapedateien: DIVA-GIS (2013), <http://www.diva-gis.org>

Das Seengebiet um Lac Faguibine gehört ebenfalls zu dem noch verbliebenen Rest des ehemaligen Binnensees. Auch wenn die Seenregion abseits des eigentlichen Binnendeltas liegt, gehört sie hydrologisch zum Nigersystem. In der Seenregion befinden sich Senken, die auf einem niedrigeren Höhenniveau als der Niger selbst liegen. Durch Überlaufkanäle werden die Senken saisonal vom Niger befüllt. Die durch Felsenschwellen getrennten Senken bzw. Seen, die sich in mehreren Kilometer Entfernung vom Niger befinden werden, nacheinander, mit einer zeitlichen Verzögerung, befüllt. Wenn der Pegelstand des Nigers zurückgeht, entleert sich der See, unabhängig von dem Pegelstand des Flusses, langsam durch Verdunstung bzw. Versickerung (KRINGS, 1985). Die Ursache hierfür liegt an den bereits erwähnten Erhöhungen innerhalb des Deltas, sodass nach dem Auffüllen das Wasser mit sinkendem Pegel nicht mit zurückweicht. Wie die Flusspegelstände wird das Maximum der Seepegel in Abhängigkeit von der Hochwasserwelle während der Trockenzeit erreicht und nicht zu der Zeit mit dem höchsten lokalen Niederschlag. Durch das Überlaufprinzip werden die jeweiligen Seepegelmaxima

wiederum mit einem zeitlichen Versatz erreicht. Aufgrund des langsamen Auffüllens der Seen und Kanäle werden Erosionsvorgänge unterbunden. Zudem wird durch die Schwellen, welche die Seen voneinander trennen, der Transport an Schwebstoffen stark verringert. Sedimentation in den Seen, die sich außerhalb des direkten Überschwemmungsbereiches im Binnendelta befinden, findet in nur sehr geringem Maße statt. Dies resultiert in einer hohen Klarheit des Seewassers. Größere Gewässer trocknen auch in der ariden Zeit des Jahres nicht vollständig aus (BARTH, 1986). Beim Rückgang des Wasserstandes der größeren Seen, aber insbesondere am Lac Faguibine, werden diese fruchtbaren und noch mit Wasser durchsetzten Flächen für den Ackerbau benutzt (KRINGS, 1985).

### 2.2.1 Periodische Überschwemmung des Binnendeltas

Das Ausmaß der Überschwemmungsflächen wird entscheidend von der Hochwasserwelle geprägt. Der zeitliche Verlauf der Überflutung sowie der Zusammenhang zwischen Ausdehnung und Durchflussmenge ist Bestand dieses Abschnitts.

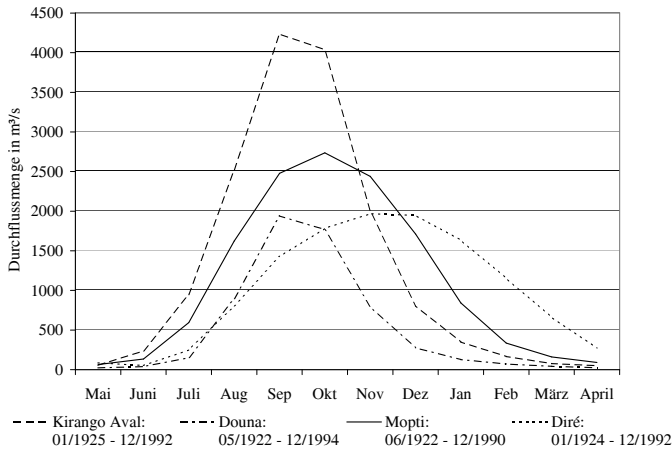
Das Binnendelta wird hauptsächlich durch die Flüsse Niger und Bani gespeist (MAHÉ et al., 2009). Einen großen Abschnitt des südlichen Deltas durchfließen zunächst beide als eigenständige Flüsse, bevor der Bani südlich von Mopti in den Niger mündet. Die Hochwasserwelle erreicht den zentralen Teil des Deltas während der Trockenzeit. Einen Überblick über die wesentlichen hydrologischen Ereignisse sowie die jeweiligen klimatischen Bedingungen für das Binnendelta geben MERING et al. (2000).

	Hydrologie	Witterung
April - Juni	Niedrige bzw. sehr niedrige Pegelstände	Sehr heiß und trocken
Juli - September	Eintreffen der Flutwelle im Süden, Beginn der Überschwemmung der Ebenen und tieferen Bereiche	Regensaison, kann bereits im Juni beginnen
Oktober - Dezember	Langsames Abklingen der Hochwasserwelle, das Wasser zieht sich aus den überschwemmten Gebieten zurück	Trocken und warm, vereinzelt Regenzeit auch bis in den Oktober
Januar - März	Abklingen der Hochwasserwelle, das Binnendelta beginnt auszutrocknen	Trocken und kalt

**Tabelle 2.1:** Phasen der Überschwemmung (nach MERING et al., 2000, geändert)

Die Pegelstände steigen in regenreichen Jahren zwischen Juli und Dezember um bis zu 6 m, in trockenen Jahren lediglich um 3 m (ZWARTS, 2010). Zunächst füllen sich im südlichen Delta die verschiedenen Flussarme, die Mare mit ihren Kanälen sowie die Überschwemmungsbereiche. Dadurch bewegt sich eine gedämpfte Hochwasserwelle mit einem zeitlichen Versatz weiter den Niger entlang. Dieser Phasenversatz führt dazu, dass der Scheitelpunkt der Welle in Mopti erst im Oktober/November, während der Trockenzeit, erreicht wird. Das Diagramm in Abbildung 2.5 zeigt den Versatz des Maximalwertes der Welle sowie das Abflachen der Kurve, je weiter flussabwärts sich die Messstationen befinden. Die Pegelmessstationen am Niger befinden sich flussabwärts in der Reihenfolge Kirango Aval, Mopti und Diré. Kirango Aval (bei Markala nahe Ségou) befindet sich zwischen Koulikoro und Mopti. Am südlichen Rand des Binnendeltas befindet sich am Bani die Station Douna. Das Diagramm zeigt die jährlichen mittleren Durchflussmengen über ein hydrologisches Jahr, welches für Mali am 1. Mai beginnt

(OLIVRY, 1995). Der spezifische Verlauf der vorherrschenden klimatischen Jahreszeiten legt das hydrologische Jahr, auch Abflussjahr genannt, fest (SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, 2012). Die zeitliche Verzögerung von einigen Monaten sowie die Dämpfung der Kurve resultieren aus der Größe der überfluteten Fläche im Binnendelta, welche das Wasser zunächst aufnimmt und es verzögert wieder freigibt, sowie aus der hohen Verdunstung (BARTH, 1986).



**Abbildung 2.5:** Zeitliche Verschiebung sowie Abflachung der Kurve anhand der mittleren Durchflussmenge; basierend auf Daten von FEKETE et al. (2012)

### Ausmaß der Überschwemmung

Das Ausmaß der Überschwemmung wird durch die beiden Flüsse Niger und Bani bestimmt. ZWARTS (2010) hat den Einfluss der Niederschlagsmengen in den Quellgebieten der beiden Flüsse sowie das Ausmaß der Überflutung untersucht. Seit 1922 variiert die durchschnittliche Niederschlagsmenge im Einzugsgebiet des oberen Nigers zwischen 1 200 und 1 800 mm. Für das Einzugsgebiet des Bani hat ZWARTS (2010) Schwankungen der mittleren Niederschlagsmenge zwischen 1 000 und 1 200 mm ermittelt. Die mittlere jährliche Durchflussmenge über den Zeitraum von 1935 bis 1995 betrug in Ké-Macina, ca. 80 km flussabwärts von Kirango Aval entfernt,  $37,9 \text{ km}^3$  ( $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ ), in Douna  $10,6 \text{ km}^3$  ( $335 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (BRICQUET et al., 1998). 1984 reduzierte sich die jährliche durchschnittliche Durchflussmenge an der Station Douna auf nur  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ , was rund  $2,2 \text{ km}^3$  entspricht (CENTER FOR SUSTAINABILITY AND THE GLOBAL ENVIRONMENT, 2012). Nach ZWARTS (2010) erreichten 1984 beide Flüsse eine Durchflussmenge von nur  $15 \text{ km}^3$ , woraus sich für den Niger eine jährliche mittlere Durchflussmenge von  $12,8 \text{ km}^3$  ergibt.

Aufgrund des zeitlichen Versatzes der Flutwelle werden die nördlichen Bereiche erreicht, wenn das Wasser im südlichen Teil bereits zurückgeht. Für eine zeitgleiche Überflutung von einer Fläche von  $25\,000 \text{ km}^2$  werden  $55 \text{ km}^3$  benötigt. Dies entspricht einer überdurchschnittlichen Durchflussmenge. Die Schwankungen der Durchflussmengen lassen die Überschwemmungsfläche zwischen rund  $8\,000$  und  $25\,000 \text{ km}^2$  variieren (ZWARTS, 2010).

Im Vergleich der Schwankungen der Regenfälle in den Quellgebieten und der Durchflussmengen ist auffällig, dass nach trockenen Jahren die Durchflussmenge trotz hoher Niederschläge nicht auf ein entsprechend hohes Niveau steigt. Dies begründet ZWARTS (2010) damit, dass in

den vorherigen trockenen Jahren der Grundwasserspiegel gesunken ist. Dadurch erhöht sich der Anteil der Versickerung, was sich auf die Durchflussmenge auswirkt. Es dauert demnach einige Jahre, den Grundwasserspiegel wieder anzuheben und wieder eine hohe Durchflussmenge zu erreichen. Somit beeinflussen neben den aktuellen Niederschlagsmengen die Mengen der vorherigen Jahre die Durchflussmenge im Binnendelta.

Nach den Untersuchungen von MAHÉ et al. (2009) zur Wasserbilanz im Binnendelta entspricht die durchschnittliche Durchflussmenge beim Eintritt in das Binnendelta (Summe von Ké-Macina und Douna) für den Zeitraum 1955 – 1996 rund  $1\,490\text{ m}^3/\text{s}$  ( $47,1\text{ km}^3$ ). In Diré, der Pegelstation im Norden des Binnendeltas, beträgt die durchschnittliche Durchflussmenge für denselben Zeitraum lediglich noch  $900\text{ m}^3/\text{s}$  ( $28,4\text{ km}^3$ ). Dies entspricht im Schnitt knapp 40 % der eintreffenden Durchflussmenge, wobei für den Zeitraum Schwankungen der Differenz zwischen 24 % und 48 % auftreten. MAHÉ et al. (2009) erkennen einen linearen Zusammenhang zwischen der eintretenden Durchflussmenge und dem Verlust, wobei unter Verlust die Differenz zwischen der Durchflussmenge zu Beginn und zum Ende des Untersuchungsgebietes verstanden wird (OLIVRY, 1995). Das lineare Verhältnis besteht sowohl in trockenen als auch regenreichen Jahren. Mit Bezug auf den Zeitraum 1955 – 1996 ergibt sich für das südliche Delta ein durchschnittlicher jährlicher Verlust von  $8,2\text{ km}^3$ , für das nördliche Delta von  $10,5\text{ km}^3$ . Werden die Differenzen der Durchflussmengen auf die Fläche bezogen, ist der Verlust pro  $\text{m}^2$  im nördlichen Teil 5fach so hoch wie im südlichen Teil des Deltas. Erklären lässt sich dies mit dem hohen Anteil an Senken im Norden, welche während der Hochwasserperiode mit Wasser gefüllt werden. Das Wasser bleibt beim Rückgang der Hochwasserwelle in den Senken zurück und bleibt somit bei den Pegelmessungen am Deltaausgang unberücksichtigt. Zudem ist die Infiltration im nördlichen Delta durch die größtenteils sandigen Böden ebenfalls höher als im südlichen Teil. Auch herrschen im nördlichen Teil des Deltas höhere Temperaturen, was im Zusammenhang mit einer geringeren Wolkenbedeckung die Evaporation erhöht. Der jährliche Verlust im nördlichen Delta steigt mit steigender Durchflussmenge, auch bei größeren Flutereignissen. Dies deutet darauf hin, dass bei einer großen Flut auch größere Gebiete überschwemmt werden können, wodurch sich ebenfalls der prozentuale Verlust erhöht. Anders verhält es sich mit dem südlichen Teil des Deltas. Dort hat sich der prozentuale Verlust seit den 60er Jahren nicht signifikant verändert, was auf eine Begrenzung der Überschwemmungsflächen im südlichen Delta hindeutet.

ZWARTS (2010) bestätigt, dass sich der Verlust überproportional zu der eintretenden Wassermenge erhöht. ZWARTS & GRIGORAS (2005) zeigen, dass die Differenz zwischen Ké-Macina bzw. Douna am südlichen Eintritt in das Delta und der Station Diré im nördlichen Teil des Deltas zwischen 22 und  $81\text{ km}^3$  variieren kann. In trockenen Jahren ist der prozentuale Unterschied zwischen den Wassermengen geringer als in regenreichen Jahren. ZWARTS (2010) gibt einen prozentualen Verlust von 32 % für trockene Jahre und 50 % für nasse Jahre an. Nicht nur können in regenreichen Jahren höhere Flutwellen ausgelöst werden, die ein größeres Gebiet mit Wasser bedecken und somit die Evaporation steigern, es wird auch die Zeitspanne, die das Wasser benötigt, um vom südlichen Teil an das nördliche Ende zu gelangen, erhöht. Dies wirkt sich ebenfalls auf den Verlust aus, denn je länger die Überschwemmung dauert, desto höher ist die Evaporation und desto höher der Verlust (ZWARTS, 2010).

Aus den Durchflussmengen beider Flüsse lässt sich sowohl die Größe des Überschwemmungsgebietes  $E$  (in  $\text{km}^2$ ) als auch der maximale Pegelstand  $P_{max\_Akka}$  (in cm) der Station Akka, welche sich nördlich von Lac Débo befindet, bestimmen (siehe Gleichung 2.1). Dazu werden die gemittelten Durchflussmengen  $Q$  (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) der beiden Pegelstationen Ké-Macina und Douna über die drei Monate August, September und Oktober benötigt (ZWARTS, 2010).

$$P_{\max\_Akka} = 16.844 \cdot \bar{Q}_{\text{Aug-Okt}}^{0.4038} \quad E = 24.729 \cdot \bar{Q}_{\text{Aug-Okt}}^{0.7701} \quad (2.1)$$

Für einen Großteil der Differenz der Durchflussmenge zwischen Deltaanfang und -ende wird auf die Evaporation verwiesen. Die Sahelzone weist ein hohes Verdunstungs- und Evapotranspirationspotential auf. Die hohen Temperaturen, die intensive Einstrahlung der Sonne sowie der starke Harmattan-Wind begünstigen dies (HAMMER, 2005). In Abhängigkeit von Temperatur und Sonnenstrahlung liegt die Evaporation bei 200 mm pro Monat (ZWARTS, 2010; OLIVRY, 1995). Die Verdunstung von offenen Wasserflächen in den Überschwemmungsbereichen variiert zwischen 1900 und 2300 mm pro Jahr und erreicht ihr Maximum am Ende der Trockenzeit (BRICQUET et al., 1998; BARTH, 1986). Die Evaporation wirkt sich auf das lokale Klima aus, wodurch zwischen den überschwemmten Flächen und Bereichen außerhalb des Deltas Temperaturunterschiede von bis zu 10°C auftreten können (ZWARTS, 2010). Das Evaporationspotential ist im nördlichen Teil des Binnendeltas aufgrund der höheren Temperaturen und der geringeren Wolkenbildung höher als im südlichen Delta (MAHÉ et al., 2009).

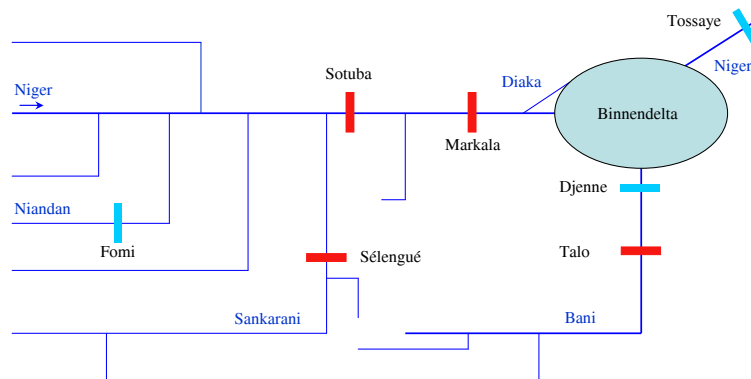
Die große Dürre in den 1970er und 80er Jahren führte dazu, dass im Jahr 1984 der Niger flussabwärts des Deltas sogar trocken fiel (DIARRA et al., 2004). Für dieses extrem trockene Jahr wurde eine maximale überflutete Fläche von nur 9500 km<sup>2</sup> (OLIVRY, 1995; ZWARTS & GRIGORAS, 2005) bzw. 9000 km<sup>2</sup> (MAHÉ et al., 2009) ermittelt. In sehr trockenen Jahren wird nur ca. ein Drittel der Fläche des Binnendeltas überflutet. Der nördliche Teil des Deltas kann sogar von Überschwemmungen ausgenommen sein. In sehr nassen Jahren, wie z. B. 2003, sind das komplette südliche Delta und große Teile des nördlichen Deltas inklusive dessen Seen geflutet (ZWARTS, 2010). Im Jahr 1994 endete mit einer ebenfalls langanhaltenden und stark ausgeprägten Überflutung eine Serie von sehr trockenen Jahren (MERING et al., 2000).

Die jährlichen Schwankungen wirken sich direkt auf die natürlichen Ressourcen, wie z. B. die Fischbestände, im Delta aus. In Jahren mit kleineren Flutwellen reduziert sich nicht nur der Fischbestand, sondern auch die Anbaufläche für Reis und Bourgou-Gras (ZWARTS, 2010). Zusätzlich werden die sozioökonomischen Aktivitäten im Binnendelta beeinträchtigt. So sind die Flüsse bei Niedrigwasser schwerer befahrbar, wodurch die Versorgung der ruralen Gebiete im Binnendelta erschwert wird (DIARRA et al., 2004).

### Dämme

Die (Re-)Produktion der natürlichen Ressourcen hängt von der jährlichen Überschwemmung und somit von den geführten Wassermengen des Nigers und des Banis ab. Die Wassermengen werden nicht nur von den Regenfällen in den Quellgebieten bestimmt, sondern auch von künstlich errichteten Strukturen entlang der Flussläufe. Im Bereich des oberen Flusslaufs des Nigers und seiner Nebenflüsse existieren bereits verschiedene Dämme, welche sich neben weiteren Bewässerungskonzepten auf die Hydrologie des Flusses auswirken. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die bereits vorhandenen sowie geplanten Dämme entlang des Nigers und seiner Nebenflüsse zwischen dem Quellgebiet und dem nördlichen Ende des Binnendeltas. Einen Überblick über die geplanten und bereits bestehenden Dämme gibt die Abbildung 2.6, deren Schema auf ZWARTS et al. (2007) beruht. Bewässerungsprojekte weiter flussabwärts sind nicht Bestandteil der Übersicht.

Seit 1982 wird der *Sélingué*-Damm am Sankarani, einem Nebenfluss des Nigers, betrieben. Bei Bamako befindet sich der *Sotuba*-Staudamm. Dieser seit 1929 bestehende Damm



**Abbildung 2.6:** Geplante Dämme (blau) und bereits existierende Dämme (rot) (nach ZWARTS et al., 2007, geändert)

hat aufgrund seines geringen Speichervermögens keinen signifikanten Einfluss auf das Flusseinzugsgebiet des Nigers. Beide Staudämme dienen der Energieerzeugung sowie der Bewässerung. Allein zu Bewässerungszwecken wurde der 1947 eröffnete *Markala*-Damm bei Ségou errichtet. Mit dessen Hilfe wird das Office du Niger bewässert (ZWARTS et al., 2005b). Das Office du Niger befindet sich innerhalb des Delta mort, in einem alten Nebenarm des Nigers. Jährlich, somit auch in trockenen Jahren, wird eine nahezu konstante Menge von  $2,69 \text{ km}^3$  an Wasser für das Office du Niger dem Niger entnommen. Dies bedeutet, dass der prozentuale Anteil des umgeleiteten Wassers an der Gesamtdurchflussmenge mit ca. 7% in regenreichen Jahren geringer ist als mit rund 16% in trockenen Jahren. Die Entnahme wirkt sich in trockenen Jahren stromabwärts stärker aus als in Jahren mit einer hohen Flutwelle. Die monatliche Entnahmemenge variiert, so wird im Oktober beispielsweise mehr als doppelt soviel Wasser für das Office du Niger entnommen wie im Januar. Am Bani entstand 2006 der *Talo*-Damm, um Flächen mit Reisfeldern und Bourgou-Gras sowie Fischteiche in der Nähe der Stadt San mit Wasser zu versorgen. Bis zum Zeitpunkt der Eröffnung des Staudamms hatte der Bani einen natürlichen Verlauf (ZWARTS, 2010).

Geplant sind weitere Dämme am Niger selbst bzw. an seinen Nebenflüssen. So will Guinea am Nebenfluss Niandan einen großen Damm (*Fomi*-Damm) zur Energieerzeugung, zur Bewässerung sowie zur Regulierung der Flutwelle (Hochwasserschutz) errichten. Der Stausee soll eine ähnliche Fläche wie der *Sélingué*-Damm haben, allerdings wird er deutlich tiefer sein. Dadurch wird der *Fomi*-Damm voraussichtlich dreimal so viel Wasser enthalten können wie der *Sélingué*-Damm und deutliche Auswirkungen auf die Bereiche stromabwärts haben (ZWARTS et al., 2005b). Insbesondere der Bau des *Fomi*-Damms wird das Binnendelta bzw. die Bereiche stromabwärts stark beeinflussen. ZWARTS et al. (2007) berechnen, dass der überflutete Bereich sich im Binnendelta zusätzlich um  $1\,400 \text{ km}^2$  verringern wird. Ein weiterer Damm am Bani mit dem Ziel der Bewässerung soll in nur ca. 150 Kilometer Entfernung flussabwärts des *Talo*-Damms entstehen (*Djenné*-Damm). Genehmigt ist ebenfalls der *Tossaye*-Damm nördlich von Diré. Dieser Damm dient der Energiegewinnung und soll auch die angrenzenden Länder Burkina Faso und Niger mit Elektrizität versorgen. Das gespeicherte Wasser soll für Bewässerungszwecke, zur Befüllung des Lac Faguibine und zu Verbesserung des Durchflusses auch für das angrenzende Niger sowie zur Verbesserung der Schifffahrt genutzt werden. Die Auswirkungen des Damms werden aufgrund der Lage den nördlichen Teil des Binnendeltas betreffen (ZWARTS et al., 2005b). Neben den Dämmen gibt es auch noch

kleinere Bewässerungsanlagen, wie beispielsweise die bewässerten Reisfelder in der Nähe des *Sélingué*-Damms am Sankarani. Auch sind weitere Projekte wie z. B. der *Kourouba*-Damm sowie Anlagen entlang des oberen Flussverlaufs des Nigers geplant.

Je mehr Dämme flussaufwärts zwischen dem Quellgebiet und dem Binnendelta entstehen, desto stärker macht sich deren Einfluss bemerkbar. Bereits die beiden älteren Dämme *Markala* und *Sélingué* haben Auswirkungen auf die fruchtbaren Feuchtgebiete bzw. auf die Größe des Überschwemmungsbereiches. Nach ZWARTS et al. (2007) hat sich der Wasserpegel im Binnendelta durch diese beiden Dämme bereits um 20 bis 25 cm gesenkt, was eine Reduzierung der Überschwemmungsfläche bis zu 900 km<sup>2</sup> nach sich zog. Ohne den *Sélingué*-Damm sowie andere Bewässerungsanlagen am oberen Teil des Nigers berechnet ZWARTS (2010), dass in trockenen Jahren eine Fläche von rund 10 600 km<sup>2</sup> im Binnendelta überschwemmt sein könnte. Das wären 1 400 km<sup>2</sup> zusätzlich zu der Fläche von 9 200 km<sup>2</sup>, die unter den bei der Berechnung vorliegenden Bedingungen geflutet würden. Durch die bereits operierenden Bewässerungsanlagen und Staubecken ist der Zufluss in das Binnendelta in trockenen Jahren um 16 % reduziert worden. Wird der Verbrauch für das Office du Niger verdoppelt oder sogar vervierfacht, wird sich der Zufluss um weitere 200 bzw. 400 m<sup>3</sup>/s verringern. Dies würde die Fläche des Überschwemmungsbereiches zusätzlich um 700 bzw. 1 500 km<sup>2</sup> reduzieren (ZWARTS, 2010). Die geplanten Dämme werden nicht nur die Größe der überschwemmten Flächen beeinflussen, sondern auch den Zeitraum, in dem der Niger mit größeren Booten befahren werden kann, deutlich verringern. Auch wird der Bau sich negativ auf den Fischfang, den Reisanbau sowie den Viehbestand im Binnendelta und somit direkt auf die Versorgung der dort lebenden Menschen auswirken. Ebenfalls betroffen werden die Populationen der einheimischen Vogelarten sowie der Zugvögel sein (ZWARTS et al., 2007). Da sowohl in trockenen als auch in regenreichen Jahren eine bestimmte Menge an Wasser für die verschiedenen Staudämme bzw. Bewässerungsanlagen entnommen wird, wirken sich die Anlagen besonders in trockenen Jahren auf die Wassermengen im Niger und in seinen Nebenflüssen aus (ZWARTS, 2010).

### 2.2.2 Vegetation im Binnendelta

Der Abschnitt 2.1.2 enthielt einen allgemeinen Überblick über die Vegetation der Sahelübergangszone. Aufgrund des vagen Raumbezugs wurde für die räumliche Verteilung der auftretenden Landbedeckungen im Untersuchungsgebiet die „Land-cover Map of Africa“ (GLC2000), welche im Rahmen des „Global Land Cover“- (GLC) und „Global burnt area mapping“-Projektes vom Joint Research Centre (Global Vegetation Monitoring Unit) erstellt wurde, herangezogen. Die GLC2000 basiert auf sechs verschiedenen Hauptklassen, die wiederum in insgesamt 27 Unterklassen unterteilt sind. Ein Auszug der Klassenbeschreibung befindet sich im Anhang A.1.

Umrandet wird das Binnendelta von der für die Sahelzone typischen Mischung aus Flächen mit unterschiedlich dichtem Gras- und Strauchbewuchs sowie vegetationslosen Bereichen (*Sparse grassland*, *Open grassland*, *Open grassland with sparse bush*). Die Landbedeckungen außerhalb der Überschwemmungsbereiche unterliegen, im Vergleich zum Delta selbst, weniger starken Veränderungen über das Jahr. In der GLC2000 werden die Überschwemmungsbereiche als regelmäßig überflutetes Gras- und Buschland (*Swamp bushland and grassland*) bezeichnet. Im südlichen Teil des Binnendeltas werden die Überschwemmungsflächen als Flächen ausgezeichnet, die einer landwirtschaftlichen Nutzung unterliegen (*Irrigated croplands* (>50 %)). Am Deltarand kommen vermehrt Flächen vor, die ebenfalls landwirtschaftlich genutzt



werden (*Croplands* (>50 %)). Aber auch im südlichen Teil des Binnendeltas gibt es Flächen mit offener und geringer Grasbedeckung. Bei einer Pixelauflösung von 1 km x 1 km geht die Klassifizierung mit einer Über- bzw. Unterschätzung der Klassen einher. Es kommt hinzu, dass in Afrika Anbaugelände meist mit natürlichem Gras- und Buschland vermischt und nach der Ernte als Weideflächen genutzt werden (MAYAUX et al., 2003).

Das regelmäßige Überschwemmen der großen Flächen im Binnendelta sowie der Zugang zum Wasser begünstigen den Anbau verschiedener Getreidearten. Im Binnendelta wird primär die Reissart *Oryza glaberrima* (Afrikanischer Reis) angebaut. Der Afrikanische Reis hat im Vergleich zu den asiatischen Reissorten einige qualitative Nachteile und ist zudem weniger ertragsfähig. Jedoch ist diese Reissart besser an die vorherrschenden Bedingungen im Delta angepasst. Sie ist toleranter gegenüber Schwankungen der Wassertiefe, weniger fruchtbaren Böden sowie schwierigen klimatischen Bedingungen (LINARES, 2002). Das Wachstum der Reispflanze geschieht mit Steigen des Wassers. Bevor die Flut im Reisanbaugelände angekommen ist, muss die Saat bereits keimen. Während der Überflutungsperiode kann der Pegel um mehrere Zentimeter am Tag steigen. Die Reispflanzen können am Tag 3 – 4 cm wachsen, sie sind so in der Lage, mit dem ansteigenden Wasserpegel zu wachsen. Der Halm kann bis zu 5 m lang werden, üblicherweise wachsen sie aber nur bis zu 2 m. Die Reispflanze muss mindestens drei Monate überflutet bzw. mit Wasser bedeckt sein (ZWARTS & KONE, 2005).

Nach WHITE (1983) setzt sich die Überschwemmungsebene des Binnendeltas aus einem Mosaik von edaphischem Grasland und semi-aquatischer Vegetation (*mosaic of edaphic grassland and semi-aquatic vegetation*) zusammen. Die Flächen können über Monate hinweg überschwemmt oder ausgetrocknet sein, sodass die Vegetation im Binnendelta über das Jahr starken Schwankungen ausgesetzt ist. Wegen dieser Extreme sind die Flächen des Binnendeltas bevorzugt von Gräsern bewachsen (BARTH, 1986). Das Grasland in den Überschwemmungsbereichen besteht aus verschiedenen dichten Arten, welche 3 m und höher werden können. Zu den vorherrschenden Gräsern zählen Arten aus der Familie der Süßgräser wie *Hyparrhenia cyanescens*, *Pennisetum unisetum* und *Pennisetum polystachion*. Charakteristisch für das Binnendelta sind ebenso Gräser der Gattung *Vossia cuspidata*, insbesondere das Bourgou-Gras (*Echinochloa stagnina*) (WHITE, 1983).

Das regelmäßige Übertreten der Flüsse über die Uferdämme und das anschließende Überfluten der dahinter liegenden flachen Ebenen lassen die saisonal überfluteten Graslandbereiche entstehen. Die Regelmäßigkeit, in der die Überschwemmungen auftreten, die Wassertiefe sowie die Dauer der Überflutung beeinflussen die Vegetationsartenverteilung deutlich.

In Anlehnung an die Überflutungsdauer fassen JOHN et al. (1993) die Vegetation im Binnendelta in drei typische Pflanzengesellschaften zusammen. Eine Pflanzengesellschaft bilden die überschwemmten oder Schwimmpflanzen, welche auf sandigem Grund in flachem Gewässer mit einer geringen oder nicht vorhandenen Strömung vorkommen. Bereiche mit zum Teil überschwemmten Pflanzen sowie Saumvegetation werden von Gras dominiert (*aquatic prairie*) und gehören einer zweiten Pflanzengesellschaft an, welche insbesondere vom Bourgou-Gras dominiert wird. Die dritte große Gruppe an Pflanzengesellschaften ist die Vegetation auf saisonal überfluteten Sandbänken. Es kann sich bei diesen Pflanzen um Arten semi-aquatischer Herkunft handeln sowie um Landpflanzen, welche tolerant gegenüber einer bestimmten Überschwemmungsdauer sind (JOHN et al., 1993).

Ebenfalls in Abhängigkeit von der Überflutungsdauer sowie unter Einbeziehung der Höhe der Pflanzen unterteilt BARTH (1986) die Grasflure des Binnendeltas wie folgt:

- bis zu sieben Monate überflutet; bis zu 4 m hohe aquatische Riesengräser (Bourgou-Gras),
- bis zu sechs Monate überflutet; zwischen 1 und 4 m hohe Süßwassergräser (beispielsweise Arten der Gattung Liebesgräser (*Eragrostis*)),
- bis zu vier Monate überflutet; Vetiver-Gräsern, primär durch die Art *Vetiveria nigriflora* vertreten, und
- zwischen einigen Wochen bis zu zwei Monate überflutet; Grasflure sowie vereinzelte Holzgewächse.

BARTH (1986) bestätigt, dass das Binnendelta insbesondere nach dem Rückgang der Überschwemmungen von Gräsern beherrscht wird. Innerhalb des Überschwemmungsgebietes kommen keine größeren Baum- und Gehölzgruppen vor. Allerdings können Bäume und Gehölze vereinzelt am Rande des Deltas bzw. auf Erhebungen auftreten. Allerdings sind durch Brände und durch den Bedarf an Brennholz diese Bestände zunehmend reduziert worden (BARTH, 1986).

Im Niger und in seinen Nebenarmen ist nahezu keine Wasservegetation vorhanden. Auch in den größeren Seen Lac Débo, Lac Walado und Lac Korientzé kommen Wasserpflanzen nahezu nicht vor. Die Seeufer können jedoch mit Bourgou-Gras bedeckt sein. Beginnt das Wasser sich zurückzuziehen, werden große Seebereiche offengelegt. Sehr deutlich wird dies am Lac Débo sichtbar, wenn der Pegelstand bei Akka unter 2 m gefallen ist. Die freigelegten Flächen können ebenso von einer niedrigen Grasschicht bedeckt sein (KONE et al., 2002). Die größeren Seen im Binnendelta fallen auch während der Trockenzeit nicht komplett trocken. Diese Seen sind ebenfalls auf das Abflussregime des Nigers eingestellt, d. h. sie füllen sich während der Hochwasserperiode nacheinander auf (BARTH, 1986). Die Bereiche um Lac Walado werden in den Monaten August bis Dezember mit Wasser bedeckt. In Abhängigkeit vom Wasserstand können Seerosen einen großen Teil des Sees bedecken. Diese Pflanzen bevorzugen Bereiche mit wenig Strömung und klarem Wasser (KONE et al., 2002).

### 2.2.3 Böden des Binnendeltas

Der periodische überschwemmte Teil des Deltas ist ein Sedimentationsgebiet, dessen jährlich überflutete Böden sich von den umgebenden Bodenarten unterscheiden (BARTH, 1986). Sie gehören zu den hydromorphen Böden und werden durch den Überschuss an Wasser, sei es durch Grund- oder Stauwasser, für eine bestimmte Dauer zu einer bestimmten Zeit des Jahres geprägt. Das Nigerbinnendelta selbst wird von den ton- und lehmhaltigen Böden dominiert (KRINGS, 2006).

Zu den hydromorphen Böden gehören der Stauwasserboden Pseudogley und die zu den Grundwasserböden gehörende Gleye. Charakteristisch für Pseudogleye ist die wasserstauende Schicht im Unterboden (BARTH, 1986). Die dunklen Böden sind aufgrund der saisonalen Überflutung und der anschließenden Austrocknung starken Schwankungen ausgesetzt (AHNERT, 1996). Im Übergangsbereich zwischen dem periodisch überschwemmten Teil des Deltas und den angrenzenden, überwiegend trockenen Bereichen sowie in den Akkumulationsterassen und Uferdämmen tritt Pseudogley auf. Unter dem sandig-tonigen Schwemmmaterial befindet sich der Stauhorizont, gebildet durch alluviale Tone. Durch die Staunässe besitzen diese Flächen eine dichte Grasvegetation (BARTH, 1986).

Die Gleyböden sind im Gegensatz zum Pseudogley vom oberflächennahen Grundwasser geprägt. Sie treten in den alluvialen Ebenen innerhalb des Binnendeltas auf. Der Oberboden ist durch seinen fahlen Grauton mit Rostflecken gekennzeichnet. Während der Trockenzeit kommt es zu der typischen Trockenrisstruktur (Schrumpfungsrisse) an der Erdoberfläche (BARTH, 1986). Gleyböden eignen sich für den Anbau von Reis, Sorghum oder auch Gemüse. Die tonigen Böden werden mit erhöhtem Aufwand kultiviert, da sie die Fähigkeit zur Speicherung von Wasser besitzen (KRINGS, 2006).



## 3 Radarsystem mit synthetischer Apertur

Die Abkürzung Radar für **R**adio **D**etection and **R**anging bezieht sich auf die anfängliche Nutzung, die sich zunächst auf die Entdeckung und Lokalisierung von Objekten anhand von Radiowellen beschränkte. Heute wird unter Radar ein aktives Ortungssystem verstanden, welches sich nicht nur auf die Entdeckung und Lokalisierung von Objekten bezieht, sondern auch deren Klassifizierung und Identifizierung sowie die Erfassung des Bewegungszustandes umfasst. Aufgrund der hohen Auflösung finden Radare mit synthetischer Antennenapertur bei der Observation und Erkundung der Erdoberfläche mittels Satellit oder Flugzeug Anwendung (LUDLOFF, 2002).

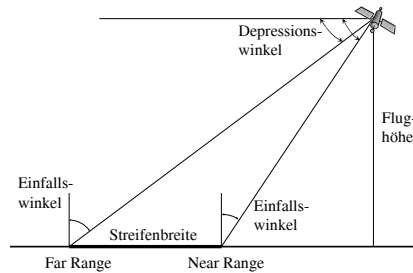
Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den geometrischen und radiometrischen Eigenschaften von Radardaten mit synthetischer Apertur. Anhand des Aufnahmeprinzips abbildender Radarsysteme werden im ersten Abschnitt dieses Kapitels zunächst die geometrischen Eigenschaften erläutert. Die radiometrischen Eigenschaften von SAR-Aufnahmen werden von einem komplexen Zusammenspiel von sensor- und objektspezifischen Parametern bestimmt. Auf Ursache und Wirkung des markanten Speckle-Effektes wird ebenfalls eingegangen, bevor nach den theoretischen Betrachtungen eine Zusammenstellung des Rückstreuerverhaltens von Landbedeckungen, speziell denen in Feuchtgebieten, dieses Kapitel beendet. Ausgewählte Studienergebnisse, welche möglichst mit vergleichbaren Systemparametern durchgeführt wurden, werden dafür näher vorgestellt.

### 3.1 Geometrische Grundlagen abbildender Radarsysteme

Mikrowellensysteme unterscheiden sich in passive und aktive Systeme. Radarsysteme gehören zu den aktiven Verfahren, welche Mikrowellen aussenden und die zurückgestreuten Signale empfangen. Die Aufnahmegeometrie abbildender Systeme unterscheidet sich von anderen in der Fernerkundung genutzten Systemen. Der Sensor erfasst die Erdoberfläche parallel zur Flugbahn, indem er senkrecht dazu seitlich schräg nach unten blickt. Durch die Vorwärtsbewegung der Plattform wird ein Streifen erfasst. Aufnahmesysteme, die nach dieser Methodik arbeiten, werden als Seitensichtradar bezeichnet (Side Looking Airborne Radar, SLAR). Mit dem Prinzip des Seitensichtradars wird die Trennbarkeit der Laufzeiten ermöglicht, aus denen die Entfernung zum Objekt ermittelt wird. Die Strahlung trifft zuerst die Bereiche des Nahbereichs (Near Range), zeitlich versetzt erreicht die Strahlung den Fernbereich (Far Range) des Streifens. Räumlich benachbarte Bereiche werden so zeitlich nacheinander aufgenommen. Sowohl Systeme mit realer Apertur (Real Aperture Radar, RAR) als auch mit synthetischer Apertur arbeiten auf Basis dieser Variante der Abbildungsgeometrie (KRAUS & SCHNEIDER, 1988).

Die Abbildung 3.1 zeigt das Aufnahmeprinzip eines Seitensichtradars. Der Sensor befindet sich auf einer satelliten- oder flugzeuggestützten Plattform. Der Depressionswinkel definiert

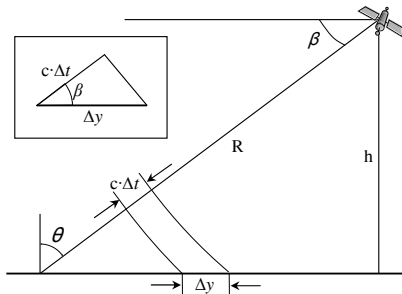
den Winkel zwischen der Horizontalebene und dem Radarstrahl. Der Winkel variiert über die aufgenommene Streifenbreite zwischen Nah- und Fernbereich. Der Einfallswinkel wird als Winkel zwischen dem Radarstrahl und der Normalen des Ellipsoids verstanden. Lässt man die Erdkrümmung und topographische Unterschiede unberücksichtigt, dann vereinfacht sich der Einfallswinkel zum Komplementärwinkel des Depressionswinkels und vergrößert sich entsprechend vom Nah- zum Fernbereich (vgl. Abb. 3.1). Der Einfallswinkel ist nicht zu verwechseln mit dem lokalen Einfallswinkel, welcher sich auf die tatsächlich lokal vorherrschende Geländeneigung bezieht (LEWIS & HENDERSON, 1998).



**Abbildung 3.1:** Aufnahmeprinzip eines Seitensichtradars (nach LEWIS & HENDERSON, 1998, geändert)

### Räumliche Auflösung

Die räumliche Auflösung in bzw. senkrecht zur Flugrichtung entspricht der Azimut- bzw. der Entfernungsauflösung. In Entfernungsrichtung hängt die Bildelementgröße ( $\Delta y$ ) von der Impulsdauer  $\Delta t$ , der Lichtgeschwindigkeit  $c$  sowie vom Depressionswinkel  $\beta$  ab (vgl. Abb. 3.2).



mit	$\beta$	...	Depressionswinkel	$R$	...	Schrägentfernung
	$\theta$	...	Einfallswinkel	$h$	...	Flughöhe
	$\Delta t$	...	Impulsdauer	$c$	...	Lichtgeschwindigkeit
	$\Delta y$	...	Bodenauflösung in Entfernungsrichtung			

**Abbildung 3.2:** Bodenauflösung in Entfernungsrichtung  $\Delta y$  (nach LEWIS & HENDERSON, 1998, geändert)

Mit Hilfe des Depressionswinkels oder des komplementären Einfallswinkels  $\theta$  kann die Entfernungsauflösung auf die Bodenebene (Ground Range) übertragen werden. Die Auflösung in Entfernungsrichtung ist unabhängig von der Zielentfernung  $R$  (Schrägentfernung, Slant Range),

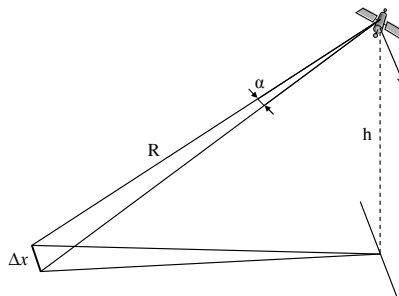
wird jedoch von der Impulsdauer und dem Depressionswinkel beeinflusst.

$$\Delta y = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cos \beta} = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \sin \theta} \quad (3.1)$$

Zwei Objekte können in Entfernungsrichtung aufgelöst werden, wenn sich deren Laufzeiten nicht überlappen. Der Abstand der Objekte auf der Oberfläche muss größer sein als die Strecke der halben Pulslaufzeit, sodass die Grenze für die Entfernungsauflösung  $\delta_y$  wie folgt angegeben werden kann:

$$\delta_y = \frac{c \cdot \Delta t}{2} = \frac{c}{2 \cdot B} \quad \text{mit Bandbreite } B \text{ und } B \cdot \Delta t = 1 \quad (3.2)$$

Für RAR-Systeme lässt sich die Bildelementgröße in Azimutrichtung  $\Delta x$  in Abhängigkeit von der Flughöhe  $h$ , der Wellenlänge  $\lambda$ , der Antennenlänge  $l$  und dem Depressionswinkel  $\beta$  bzw. dem Einfallswinkel  $\theta$  ermitteln (siehe Gleichung 3.3). Die geometrische Auflösung in Azimutrichtung entspricht der Breite des Footprints der vom Radar bestrahlten Fläche. Zwei Objekte können bei einmaliger Erfassung nur voneinander aufgelöst werden, wenn sie nicht im selben Footprint liegen. Die beiden Winkel in und quer zur Flugrichtung, welche die beleuchtete Fläche definieren, werden Antennenkeule oder auch Öffnungswinkel der Antenne genannt.



mit  $\alpha$  ... Öffnungswinkel des Radarstrahls  
 $h$  ... Flughöhe  
 $R$  ... Schrägentfernung  
 $\Delta x$  ... Bodenauflösung in Azimutrichtung

**Abbildung 3.3:** Auflösung in Azimutrichtung für Systeme mit realer Apertur (nach KRAUS & SCHNEIDER, 1988, geändert)

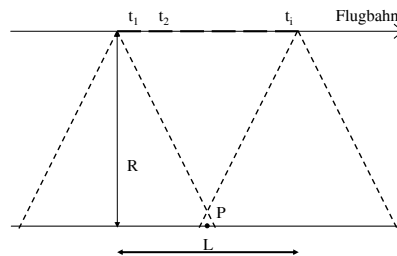
Vereinfacht kann die Auflösung in Azimutrichtung zunächst für RAR-Systeme wie folgt beschrieben werden:  $\Delta x = R \cdot \alpha$  mit dem Öffnungswinkel des Radarstrahls  $\alpha$  und der Entfernung zwischen Sensor und Ziel in Slant Range  $R$ . Der Öffnungswinkel in Flugrichtung enthält den Teil der Hauptkeule, deren Signalleistung um maximal 3 dB vom Maximalwert abfällt. Der Winkel kann näherungsweise durch das Verhältnis der verwendeten Wellenlänge und der realen Antennenlänge dargestellt werden. Wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, kann die Schrägentfernung  $R$  auch mittels der Flughöhe  $h$  und des Depressionswinkels  $\beta$  angegeben werden. Die Breite des Footprints am Boden für eine bestimmte Schrägentfernung für RAR-Systeme ergibt sich somit wie folgt:

$$\Delta x = R \cdot \frac{\lambda}{l} = \frac{\lambda \cdot h}{l \cdot \sin \beta} \quad (3.3)$$

mit  $R$  ... Schrägentfernung  $\lambda$  ... Wellenlänge  
 $l$  ... Antennenlänge  $h$  ... Flughöhe  
 $\beta$  ... Depressionswinkel

Im Gegensatz zur Entfernungsaufösung hängt  $\Delta x$  jedoch von der Flughöhe und der Antennenlänge ab (vgl. Gleichung 3.3). Die Abhängigkeit von der Wellenlänge, der Antennenlänge und der Flughöhe begrenzt die Einsatzmöglichkeiten des Systems. Um eine geeignete Auflösung für satellitengestützten Aufnahmen zu erreichen, müsste bei diesem Prinzip entweder die Wellenlänge verkürzt oder die Antennenlänge vergrößert werden.

Zur Lösung des Konflikts wird eine künstliche Antennenlänge, bestehend aus vielen kurzen Antennen, erzeugt. Für die Simulation einer Verlängerung der Antenne wird die Flugbahn der Plattform genutzt. Alle Amplituden und Phasenlagen der Objektpunkte werden über einen längeren Zeitraum erfasst. Die Aufnahme eines Objekt- bzw. Zielpunktes (vgl. P in Abb. 3.4) beginnt, wenn er das erste Mal von dem Radarstrahl erfasst wird (Zeitpunkt  $t_1$ ), und endet, wenn der Zielpunkt außerhalb der Antennenkeule liegt (bis inklusive Zeitpunkt  $t_i$ ).



mit  $P$  ... aufgenommenener Objektpunkt  
 $t_1 \dots t_i$  ... Aufnahmezeit in der P innerhalb der Antennenkeule liegt  
 $L$  ... Länge der synthetischen Antenne  
 $R$  ... Schrägentfernung

**Abbildung 3.4:** Auflösung in Azimutrichtung eines Radars mit synthetischer Apertur (nach KRAUS & SCHNEIDER, 1988, geändert)

Aus diesen Daten wird später ein Signal konstruiert, welches einem Signal entspricht, das mittels einer einzelnen langen Antenne erfasst wurde. Die Länge der synthetischen Antenne  $L$  entspricht der zurückgelegten Flugstrecke der Plattform, in der sich ein Objektpunkt in der Antennenkeule befindet. Mittels der Geschwindigkeit der Plattform und der verstrichenen Zeit zwischen  $t_1$  und  $t_i$  kann die Länge der synthetischen Antenne ermittelt werden. Die real verwendete kurze Antennenlänge verbessert die räumliche Auflösung um den Faktor 2. Die maximale Auflösung in Azimutrichtung für Aufnahmen mit synthetischer Apertur entspricht der halben Antennenlänge (vgl. Gleichung 3.4). Wie die Auflösung in Entfernungsrichtung ist nun auch die Auflösung in Azimutrichtung von der Flughöhe und der Wellenlänge unabhängig.

$$\Delta x = \frac{l}{2} \quad \text{mit } l \dots \text{Antennenlänge} \quad (3.4)$$

Mittels der synthetischen Apertur können entfernungsunabhängige Bilddaten mit einer hohen geometrischen Auflösung realisiert werden. Voraussetzung für die Umsetzung einer synthetischen Apertur ist ein aktives System, welches eine kohärente Strahlung verwendet, deren Phasenbeziehungen über längere Entfernungen und eine längere Zeitdauer unverändert

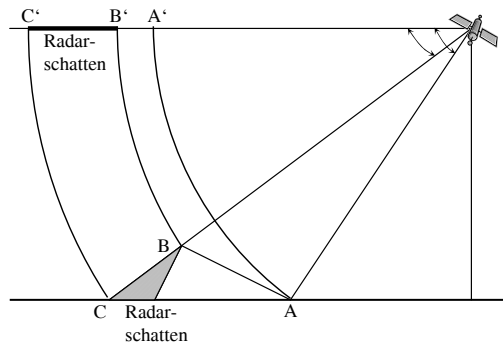


bleiben. Weitere Informationen zur Herleitung können u. a. aus RANEY (1998), LEWIS & HENDERSON (1998) und KRAUS & SCHNEIDER (1988) entnommen werden.

### Geometrische Abbildungseffekte

Bedingt durch das Aufnahmeprinzip besitzen Aufnahmen mittels Seitensichtradars besondere geometrische Eigenschaften. Bei der laufzeitgeometrischen Abbildung treten in Kombination mit der Geländeform sogenannte Verkürzungs- und Überlappungseffekte auf.

Die folgenden beiden Abbildungen 3.5 und 3.6 zeigen die Auswirkungen von bewegtem Gelände in Seitensichtaufnahmen. Auf der oberen Horizontalen sind die Abbildungen der Geländepunkte in einem nicht entzerrten Bild in Schrägdistanzen dargestellt.

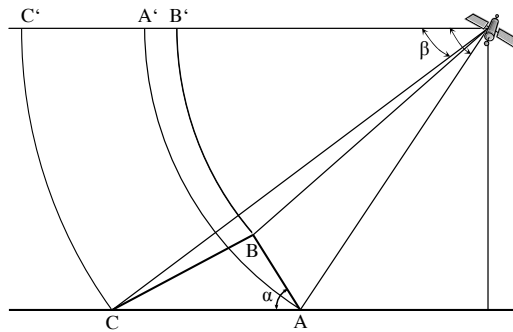


mit  $A', B', C'$  ... Lage der Punkte in der Bildebene in Slant Range  
 $A, B, C$  ... Geländepunkte

**Abbildung 3.5:** Verkürzungseffekt und Radarschatten (nach KRAUS & SCHNEIDER, 1988, geändert)

Wie Abbildung 3.5 zeigt, werden höher gelegene Geländepunkte ( $B$ ) in Richtung Flugachse versetzt. Der Versatz nimmt in Richtung Fernbereich ab. Dem Sensor zugewandte Hänge ( $AB$ ) werden verkürzt dargestellt (Foreshortening, siehe  $A'B'$ ). Die Radarimpulse erreichen die Hangfläche nahezu gleichzeitig, sodass die Laufzeiten von verschiedenen Geländepunkten auf dem Hang zeitlich zusammenfallen. Besitzen die Geländepunkte der Hangfläche einen lokalen Einfallswinkel von  $0^\circ$ , fallen diese Geländepunkte zu einem Punkt zusammen. Die dem Sensor abgewandten Hänge können, ab einer gewissen Neigung, nicht vom Radar beleuchtet werden. Dadurch haben die Geländepunkte im sogenannten Radarschatten keine Rückstreuung und erscheinen in der Aufnahme dunkel. Der Objektschatten wird mit steigendem Einfallswinkel länger (KRAUS & SCHNEIDER, 1988).

Umklappeneffekte (Layover) sind der Extremfall eines Geländeversatzes. Sie treten bei steilen Geländeneigungen ( $\alpha$ ) in Kombination mit großen Depressionswinkeln ( $\beta$ ) auf, sodass höher gelegene Geländepunkte ( $B$ ) zeitlich eher von der Radarwelle erfasst werden als die Bodenpunkte ( $A$ ). In Aufnahmen mit einem Depressionswinkel von  $60^\circ$  bzw.  $70^\circ$  müsste die Geländeneigung größer  $30^\circ$  bzw.  $20^\circ$  sein, damit der Layover-Effekt eintritt (LEWIS & HENDERSON, 1998). Die geometrischen Effekte wirken sich in den Schrägaufnahmen in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Einfallswinkel und Geländeneigung aus.



- mit  $A', B', C'$  ... Lage der Punkte in der Bildebene in Slant Range  
 $A, B, C$  ... Geländepunkte  
 $\alpha$  ... Geländeneigung  
 $\beta$  ... Depressionswinkel

**Abbildung 3.6:** Abbildungseffekt Layover (nach LEWIS & HENDERSON, 1998, geändert)

## 3.2 Radiometrische Eigenschaften von SAR-Daten

Die Radarantenne sendet kohärente Mikrowellen und empfängt das vom Boden zurückkommende Signal (Echo). Der grundlegende Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Radarsystems, dem aufgenommenen Punktziel und dem empfangenen Signal wird in der Radargleichung (Gleichung 3.5) beschrieben (vgl. u. a. ULABY et al., 1982). Die an der Antenne empfangene Leistung  $P_r$  wird durch die gesendete Leistung  $P_t$ , den Antennengewinn  $G$ , die Wellenlänge  $\lambda$ , den Abstand zum Ziel  $R$  und den Rückstreuerschnitt  $\sigma$  („*radar scattering cross-section*“) bestimmt. Die Radargleichung für ein Punktziel entspricht nach ULABY et al. (1982):

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3.5)$$

Aufgrund der hohen Richtwirkung der Antenne erhöht sich das Verhältnis der von der Antenne ausgestrahlten Energiedichte<sup>1</sup> zu der im selben Raumwinkel ausgestrahlten Energiedichte eines idealen (isotropischen) Kugelstrahlers. Dieser Leistungsgewinn wird Antennengewinn genannt (KRAUS & SCHNEIDER, 1988).

Wie aus Gleichung 3.5 entnommen werden kann, wird der vom Ziel zurück zum Sensor reflektierte Teil der abgestrahlten Leistung vom Radarrückstreuerschnitt mitbestimmt. Dieser beschreibt das Reflexionsverhalten in Abhängigkeit von der Beschaffenheit und dem Zustand des Objektes. Der Radarrückstreuerschnitt ist abhängig von der Objektgröße, der Objektform, dem Material, der Orientierung zum Sensor, der ausgesendeten und empfangenen Polarisation sowie der Wellenlänge (ROHLING; HOLECZ, 1993).

Die von der Radarkeule getroffene Fläche besteht aus verschiedenen Streuern. Die Gleichung 3.5 bezieht sich jedoch auf Punktziele. Um flächenhafte Ziele mit komplexen Zielstrukturen

<sup>1</sup> Energie pro Fläche

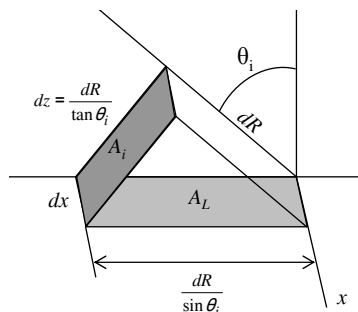
zu beschreiben, wird der Radarrückstreuquerschnitt auf eine bestimmte horizontale Flächeneinheit bezogen. Der Radarrückstreuquerschnitt pro Flächeneinheit wird Rückstreuoeffizient  $\sigma^\circ = \sigma/\Delta A$  („*differential scattering coefficient*“ kurz: „*scattering coefficient*“, „*Sigma Nought*“) genannt und ist mit der Einheit  $[m^2/m^2]$  dimensionslos. Für flächenhafte Ziele wird die Radargleichung 3.6 nach ULABY et al. (1982) wie folgt erweitert:

$$\bar{P}_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{\text{beleuchtete Areal}} \frac{P_t G^2 \sigma^\circ dA}{R^4} \quad (3.6)$$

In Abhängigkeit von den gegebenen Systemparametern Wellenlänge, gesendete und empfangene Polarisation sowie Einfallswinkel wird der Rückstreuoeffizient von den objektspezifischen Eigenschaften beeinflusst. Dazu gehören der lokale Einfallswinkel, die komplexe relative Dielektrizitätskonstante sowie die Orientierung, die Struktur und die Ausrichtung. Das komplexe Zusammenspiel der genannten Parameter beeinflusst die Art der Streuung, wenn das Signal auf die Oberfläche trifft. Meist wird  $\sigma^\circ$  in der logarithmischen Einheit Dezibel  $[dB]$  angegeben.

$$\sigma^\circ [dB] = 10 \log_{10} \sigma^\circ [m^2/m^2] \quad (3.7)$$

Abbildung 3.7 beschreibt den Flächenbezug der verschiedenen Rückstreuoeffizienten. Für eine normalisierte Beschreibung der Rückstreuung wird meist das genannt Sigma Nought ( $\sigma^\circ$ ), zum Teil aber auch Gamma ( $\gamma$ ) verwendet. Sigma Nought steht für die durchschnittliche Reflexion von einem bestimmten, ebenen Flächenelement am Boden ( $A_L$ ). Gamma bezieht sich im Gegensatz zu  $\sigma^\circ$  auf die Fläche senkrecht zur einfallenden Strahlung ( $A_i$ ). Für die Berechnung beider Koeffizienten ist der lokale Einfallswinkel  $\theta_i$  notwendig (RANEY, 1998). Der Vollständigkeit halber sei auch noch der Radar-Helligkeitskoeffizient Beta Nought ( $\beta^\circ$ ) an dieser Stelle erwähnt. Dieser bezieht sich auf die Flächenelemente in Schrägentfernung. Der Radar-Helligkeitskoeffizient steht zu  $\sigma^\circ$  in folgendem Verhältnis:  $\sigma^\circ = \beta^\circ \cdot \sin \theta_i$ . Der Vorteil der Nutzung dieses dimensionslosen Koeffizienten liegt darin, dass keine Kenntnisse über die lokalen Einfallswinkel notwendig sind (SARMAP SA, 2009).



- mit  $A_L$  ... Flächenelement am Boden ( $\sigma^\circ$ )  
 $A_i$  ... Flächenelement senkrecht zur einfallenden Strahlung, aufgespannt von  $dz$  und  $dx$  ( $\gamma$ )  
 $\theta_i$  ... lokaler Einfallswinkel

**Abbildung 3.7:** Flächenbezug der Rückstreuoeffizienten  $\sigma^\circ$  und  $\gamma$  (nach RANEY, 1998)

### Radiometrische Auflösung

Die radiometrische Auflösung  $\delta_r$  von SAR-Aufnahmen lässt sich mittels der effektiven Anzahl an Looks ( $L_{eff}$ )<sup>1</sup> und des Signal/Rausch-Verhältnisses ( $SNR$ , Systemrauschen) bestimmen und beschreibt den Grenzwert, ab dem sich zwei benachbarte Flächen trennen lassen (MOREIRA, 2000).

Das am Sensor empfangene Signal setzt sich aus einem Nutzsignal und einem überlagerten Rauschsignal zusammen. Unter Rauschen versteht man die Summe aller zufälligen Störungen im Signal, welche signalabhängig bzw. -unabhängig sein können. Das Signal/Rausch-Verhältnis wird als Verhältnis von Signalleistung zur Rauschleistung verstanden und dient als Maß für die Qualität des gemessenen Signals. Das Rauschen wird mittels der Standardabweichung ausgedrückt.

$$\delta_r = 10 \cdot \log_{10} \left[ 1 + \frac{1 + (SNR)^{-1}}{\sqrt{L_{eff}}} \right] \quad (3.8)$$

Damit der Sensor seinen Aufgaben gerecht wird, muss das Signal/Rausch-Verhältnis des empfangenen Signals einen bestimmten Wert überschreiten, um die geforderte Messgenauigkeit und Detektionssicherheit zu erfüllen (RANEY, 1998; KLAUSING & HOLPP, 2000). Wie Gleichung 3.8 zeigt, erhöht sich die radiometrische Auflösung bei größer werdender Anzahl an Looks<sup>2</sup>. Unter der Annahme, dass die Aufnahme rauschfrei erfolgt ( $SNR \rightarrow \infty$ ), beträgt die radiometrische Auflösung eines Single-Look-Bildes (mit  $L_{eff} = 1$ ) 3 dB, reduziert sich der Grenzwert bei einem 3-Look-Bild bereits auf knapp 2 dB.

#### 3.2.1 Oberflächenstreuung

An der Grenzschicht zweier homogener Medien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften finden, in Abhängigkeit von den Sensor- und Objekteigenschaften, Streu- und Absorptionsprozesse statt. Trifft die Mikrowellenstrahlung auf eine Grenzschicht, wird die Art der Streuung in Oberflächen- und Volumenstreuung unterschieden.

Die Oberflächenstreuung ist abhängig von der Frequenz bzw. der Wellenlänge ( $\lambda$ ) und dem Einfallswinkel ( $\theta$ ). Beide Parameter definieren die Stärke der Rauigkeit für eine Oberfläche. Für natürliche Oberflächen eignet sich das, verglichen mit dem Rayleigh-Kriterium (vgl. Gleichung 3.9 links), strengere Fraunhofer-Kriterium (rechts), um die relative Rauigkeit der Oberfläche in Abhängigkeit von beiden Parametern zu beschreiben. Der Grenzwert, welcher die Oberfläche für den lokalen Höhenunterschied  $h$  in glatt und rau unterscheidet, berechnet sich wie folgt:

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad h < \frac{\lambda}{32 \cos \theta} \quad (3.9)$$

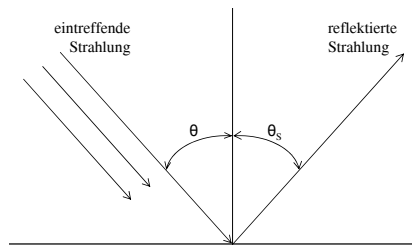
Der maximale Phasenunterschied zwischen zwei reflektierten Wellen muss bei dem Fraunhofer-Kriterium größer als  $\pi/8$  sein, um als rau zu gelten (HOLECZ, 1993). Unter gleichen Systembedingungen, also bei gleichem Einfallswinkel sowie gleicher Frequenz, entscheidet die Rauigkeit der Oberfläche über die Richtungsverteilung der Rückstreuung. Erscheint die

1 Anzahl der tatsächlich statistisch unabhängigen Looks, vgl. auch Abschnitt 4.2.2

2 Unabhängige Bilder bei der Prozessierung durch das Multilook-Verfahren, vgl. Abschnitt 4.2.2

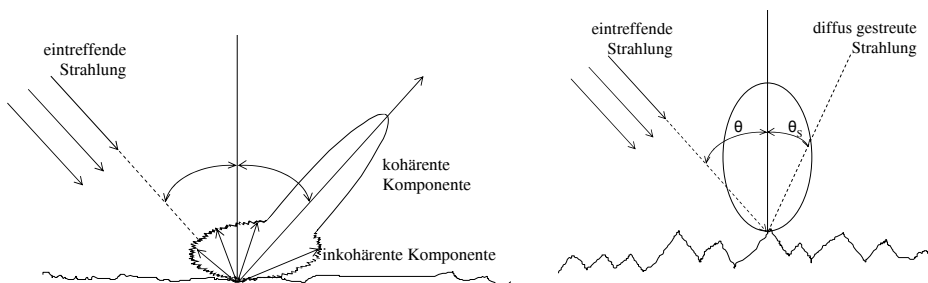
Oberfläche für die verwendete Wellenlänge glatt, findet eine gerichtete Reflexion statt. Je rauer die Oberfläche wird, desto größer wird der diffuse Streuanteil (ULABY et al., 1982). Das Streuverhalten in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit wird im Folgenden nochmals ausführlicher betrachtet.

Einfallende Strahlung wird an glatten Oberflächen vom Sensor weg reflektiert (vgl. Abbildung 3.8). Es tritt eine gerichtete Reflexion auf, d. h. der Einfallswinkel  $\theta$  entspricht dem Ausfallswinkel (auch Reflexionswinkel)  $\theta_s$ . Der diffuse Streuanteil unterliegt der Dominanz der gerichteten Reflexion. Dies trifft besonders in Aufnahmen mit Einfallswinkeln bis zu  $30^\circ$  zu (LEWIS & HENDERSON, 1998). Aufgrund der geringen Rückstreuung, als Folge von gerichteten Reflexionen, erscheinen diese Flächen im Radarbild sehr dunkel.



**Abbildung 3.8:** Gerichtete Reflexion an einer glatten Oberfläche (nach ULABY et al., 1982, geändert)

Wird die Oberfläche für die vorliegenden Systemparameter rauer, erhöht sich der Anteil der diffus reflektierten Strahlung. Zu der reflektierten Komponente (kohärente Komponente) kommt nun ein diffus gestreuter Anteil (inkohärente Komponente) hinzu (Abb. 3.9 links). Je rauer die Oberfläche wird, desto dominanter wird der diffuse Streuanteil (ULABY et al., 1982).



**Abbildung 3.9:** Diffuse Rückstreuung (nach ULABY et al., 1982, geändert)

Bei sehr rauen Oberflächen ist die Länge des Vektors der reflektierten Strahlung nahezu unabhängig vom Einfallswinkel und somit richtungsunabhängig. Die Strahlung wird komplett diffus gestreut. In diesem Fall nähert sich das Strahlungsmuster den Eigenschaften einer Lambert'schen Oberfläche an (Abb. 3.9 rechts) (LEWIS & HENDERSON, 1998).

Eine Zweifachreflexion (Double Bounce) tritt auf, wenn zwei Flächen senkrecht zueinander angeordnet sind und so die Strahlung zurück zum Sensor reflektiert wird. Solche Objekte werden Winkelreflektoren genannt. Von einer Mehrfachreflexion wird gesprochen, wenn die Strahlung mehrfach hintereinander reflektiert wird. Diese mehrfachen Streuprozesse erzeugen starke

Rückstreuungen, deren Nebenkeulen bisweilen die Nachbarschaft sternförmig überstrahlen können.

### 3.2.2 Volumenstreuung

Bevor die Volumenstreuung näher betrachtet, wird erfolgt an dieser Stelle ein Einschub zur komplexen relativen Dielektrizitätskonstante und Eindringtiefe.

Die entscheidende Materialeigenschaft für die Eindringtiefe von Mikrowellen in ein Medium ist die komplexe relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  (mit  $j = \sqrt{-1}$ ) der obersten Schicht bzw. deren Wassergehalt. Sie ist materialabhängig und dient der quantitativen Beschreibung der elektrischen Materialeigenschaften. Der Realteil  $\epsilon'$  der relativen komplexen Dielektrizitätskonstante bezieht sich auf die Durchlässigkeit (*permittivity*), der Imaginärteil entspricht dem Dämpfungsfaktor (*dielectric loss factor*) des Materials (ULABY et al., 1986). Der Realteil  $\epsilon'$  wird Dielektrizitätskonstante oder auch Permittivität, der Imaginärteil  $\epsilon''$  Verlustzahl genannt. Der Imaginärteil beschreibt die von der Frequenz abhängige elektrische Leitfähigkeit des Materials bzw. die Fähigkeit des Materials, die absorbierte Energie der elektromagnetischen Welle in eine andere Energieform (Wärmeenergie) zu wandeln (HOLECZ, 1993; KRAUS & SCHNEIDER, 1988). Beide Anteile der komplexen relativen Dielektrizitätskonstante sind frequenzabhängig. Je größer der Feuchtigkeitsgehalt ist, desto größer ist die Dielektrizitätskonstante und somit die Reflexion an der Oberfläche des Objektes. Mit der steigenden Reflexion reduziert sich wiederum die Eindringtiefe der Strahlung (LEWIS & HENDERSON, 1998).

Durch die Erhöhung des Imaginärteils erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit des Materials. Dies führt zu einer Verringerung der Eindringtiefe, da die Mikrowellen stärker gedämpft werden. Trockene, in der Natur vorkommende Materialien haben meist einen Realteil zwischen 1,5 und 10 bei einem sehr kleinen Imaginärteil ( $< 0,1$ ). Für Wasser erhöhen sich beide Anteil deutlich. Insbesondere steigt der Imaginärteil bei steigendem Salzgehalt und zunehmender Wellenlänge (Frequenzen kleiner  $10^{10}$  Hz/10 GHz) (KRAUS & SCHNEIDER, 1988).

Neben den bereits erwähnten Abhängigkeiten beeinflussen auch Temperatur und Salzgehalt die dielektrischen Eigenschaften eines Mediums. Die dielektrischen Bodeneigenschaften werden primär von der Bodenfeuchte bestimmt. Die komplexe relative Dielektrizitätskonstante steigt mit zunehmender Bodenfeuchte. Sowohl  $\epsilon'$  als auch  $\epsilon''$  werden von der Bodenart und der Wellenlänge beeinflusst (HALLIKAINEN et al., 1985). Besitzt der Boden einen hohen Salzgehalt wirkt sich dies ebenfalls auf dessen dielektrische Eigenschaften aus (TAYLOR et al., 1996). Laboruntersuchungen zeigen, dass der Salzgehalt keinen Einfluss auf den Realteil der komplexen relativen Dielektrizitätskonstante nimmt. Dieser wird hauptsächlich von der Bodenstruktur und der Bodenfeuchte bestimmt. Jedoch wirkt sich der Salzgehalt im Boden bei steigender Leitfähigkeit bzw. steigender Bodenfeuchte auf den Imaginärteil aus (SREENIVAS et al., 1995).

In Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  sowie vom Real- und Imaginärteil der komplexen relativen Dielektrizitätskonstante ergibt sich die Eindringtiefe  $\delta_P$  in ein homogenes Medium (ausgenommen Wasser) mit  $\epsilon''/\epsilon' < 0,1$  wie folgt (ULABY et al., 1982):

$$\delta_P = \frac{\lambda\sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (3.10)$$

mit	$\lambda$	...	Wellenlänge
	$\epsilon'$	...	Dielektrizitätskonstante (Realteil)
	$\epsilon''$	...	Verlustzahl (Imaginärteil)

Bei steigender komplexer relativer Dielektrizitätskonstante verringert sich die Transmission bei gleichzeitiger Erhöhung der Reflexion. Aufgrund der Abhängigkeit der Eindringtiefe von den dielektrischen Eigenschaften hängt diese stark von dem Wassergehalt des Materials ab. So beträgt die Eindringtiefe in trockene Böden für Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 30 und 1,5 cm je nach Wellenlänge zwischen einigen Metern und wenigen Zentimetern. Mit steigendem Wassergehalt des Bodens verringert sich die Eindringtiefe auf einige Zentimeter bis zu wenigen Millimetern. In Süßwasser kann die Mikrowelle nur bis zu einem Bruchteil eines Millimeters, in Salzwasser hingegen bis zu einigen Zentimetern eindringen. Die Eindringtiefe von Mikrowellen in Wasserflächen ist sehr gering, variiert jedoch in Abhängigkeit von der Frequenz, der Wassertemperatur und dem Salzgehalt (KRAUS & SCHNEIDER, 1988; ULABY et al., 1986).

Volumenstreuung tritt auf, wenn das ausgesendete Signal nicht nur mit der Oberfläche des aufgenommenen Objektes interagiert, sondern auch mit Elementen unterhalb der Grenzschicht. Der Streumechanismus ist abhängig von der Wellenlänge und den Materialeigenschaften des Objektes. Das zurückgestreute Signal ist das Resultat eines dreidimensionalen Umfeldes. Diese Art der Streuung tritt insbesondere bei Vegetationsflächen mit zunehmender Wellenlänge und somit höherer Eindringtiefe auf. Die Volumenstreuung wird von der Inhomogenität des bestrahlten Mediums sowie der Eindringtiefe bestimmt. Da mit größerer Wellenlänge die Strahlung tiefer in die Vegetationsdecke eindringen kann, wird das am Sensor empfangene Signal von verschiedenen Elementen, wie Blätter, Stamm, Bodenbedeckung etc., beeinflusst (LEWIS & HENDERSON, 1998).

Die einzelnen Elemente besitzen verschiedene dielektrische Eigenschaften und üben unterschiedlichen Einfluss auf das Reflexionsverhalten aus, wodurch die Ausbreitung innerhalb des Objekts bestimmt wird. Die Dielektrizitätskonstante hängt entscheidend vom Wassergehalt des Mediums, aber auch von dessen Struktur sowie der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ab. Die Volumenstreuung wird nicht nur durch den Sensorparameter Wellenlänge, sondern auch durch die Polarisierung und den Einfallswinkel beeinflusst. Aufgrund der auftretenden Depolarisierung durch Mehrfachstreuung erzeugen u. a. Waldflächen in kreuzpolarisierten Aufnahmen ein höheres Rückstreusignal, verglichen mit einer gleichpolarisierten Welle (HOLECZ, 1993).

Die am Sensor gemessenen Echos sind das Resultat von Oberflächenstreuungen, Volumenstreuungen und/oder Mehrfachreflexionen. Der Rückstreumechanismus sowie die Stärke der Rückstreuung sind an die geometrischen und dielektrischen Eigenschaften des Mediums geknüpft. Dabei wird der Streuprozess maßgebend durch die Oberflächenrauigkeit und die dielektrischen Eigenschaften bestimmt. Diese Faktoren hängen wiederum von den verwendeten Systemparametern Frequenz, Polarisierung und Einfallswinkel ab.

Findet sowohl Oberflächen- als auch Volumenstreuung statt, lassen sich nach ULABY et al. (1982) die beteiligten Faktoren zusammenfassen. Bei der Oberflächenstreuung gilt:

- die Stärke des zurückgestreuten Anteils ist proportional zur relativen Dielektrizitätskonstante der Oberfläche und
- die Richtungsverteilung der Rückstreuung wird von der Oberflächenrauigkeit beherrscht.

Für die Volumenstreuung gilt:

- die Rückstreustärke verhält sich proportional zu den dielektrischen Diskontinuitäten und der Dichte der Elemente im inhomogenen Medium und
- die räumliche Verteilung der Rückstreuung wird bestimmt von der Rauigkeit der Grenzschicht, der durchschnittlichen Dielektrizitätskonstante des Mediums und der geometrischen Größe der Elemente des inhomogenen Mediums im Verhältnis zur Wellenlänge.

Neben den bereits genannten Arten von Streumechanismen sei an dieser Stelle noch auf die Bragg-Resonanz verwiesen. Insbesondere bei einer regelmäßigen Anordnung parallel zum Sensor kann es in Abhängigkeit von der Wellenlänge, Einfallswinkel und Abstand der Strukturen zu Signalverstärkungen in Folge von Resonanz kommen. Bei Ozeanwasserflächen oder Ackerfurchen kann unter den genannten Bedingungen für Einfallswinkel ( $\theta$ ) zwischen  $20^\circ$  und  $60^\circ$  Bragg-Streuung auftreten, da für Einfallswinkel unter  $20^\circ$  die gerichtete Reflexion dominiert. Durch konstruktive Überlagerungen der zurückgestreuten Wellen erhöht sich die Rückstreuung. Vertikal gleichpolarisierte (VV) Aufnahmen sind im Vergleich zu horizontal gleichpolarisierten (HH) oder kreuzpolarisierten (HV) Aufnahmen stärker von der Bragg-Streuung beeinflusst (LEWIS & HENDERSON, 1998; ULABY et al., 1982; VAN DER SANDEN & THOMAS, 2004).

## 3.3 Systemspezifische Abbildungsparameter

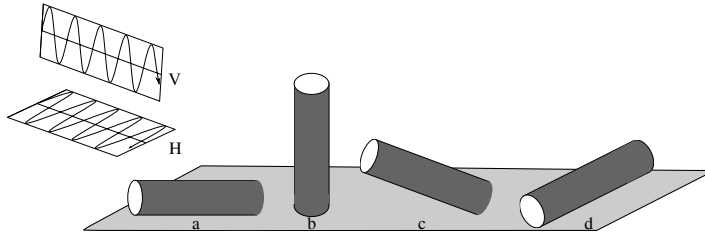
In der Radarfernerkundung übt die Wahl der Systemparameter *Polarisation* und *Wellenlänge* entscheidenden Einfluss auf die Rückstreuung aus. Zusätzlich prägt der *Einfallswinkel* der Strahlung das Rückstreuverhalten. Die Interaktion der Strahlung mit den Objekten besteht stets aus einer Kombination der objekt- und sensorspezifischen Eigenschaften. Bei der Analyse von SAR-Daten kann von bekannten Systemparametern ausgegangen werden. Der Einfluss bestimmter Kombinationen von Systemparametern auf die Rückstreuung des Signals bzw. auf die Darstellung der Landbedeckungen ist bei der Auswertung der Daten zu berücksichtigen und wird im Folgenden kurz umrissen.

Die aktiv gesendeten Mikrowellen besitzen eine polarisierte Komponente, die durch den elektrischen Feldvektor der Strahlung definiert wird. Die *Polarisation* legt die räumliche Orientierung des Vektors fest. Die Wellen können linear, elliptisch oder zirkular polarisiert sein. Am gebräuchlichsten sind lineare Systeme, die horizontal oder vertikal polarisierte Wellen erzeugen. Entspricht sowohl die gesendete als auch die empfangene Polarisation entweder einer horizontalen (HH) oder vertikalen (VV) Richtung, spricht man von Gleichpolarisation. Bei Aufnahmen von vertikal polarisiert gesendeter und horizontal polarisiert empfangener Strahlung (VH) bzw. vice versa (HV) spricht man von Kreuzpolarisation. In kreuzpolarisierten Aufnahmen wird nur der depolarisierte Teil der Strahlung aufgezeichnet. Depolarisation entsteht durch Mehrfachreflexion und durch die von dielektrischen Inhomogenitäten verursachte Volumenstreuung (LEWIS & HENDERSON, 1998).

Gleichpolarisierte Aufnahmen erscheinen schärfer und weniger körnig als kreuzpolarisierte. Dies liegt in dem höheren Signal/Rausch-Verhältnis begründet, mit dem die gleichpolarisierten Aufnahmen generiert werden (LEWIS & HENDERSON, 1998). So wirkt sich die Wahl der Polarisation der Welle in Kombination mit der Struktur und Orientierung des Objektes auf die Intensität der Rückstreuung aus. Vertikale Strukturen eines Objektes (z. B. Weizenfelder)



bewirken in VV-polarisierten Aufnahmen eine höhere Rückstreuung als Aufnahmen im HH- oder kreuzpolarisierten Modus (siehe Beispiel b in Abb. 3.10).



**Abbildung 3.10:** Verschiedene Anordnungen eines dielektrischen Zylinders (mit einem Radius kleiner der Wellenlänge), von dessen Orientierung und Polarisation der Welle die Stärke der Rückstreuung abhängt (nach LECKIE & RANSON, 1998, geändert)

LECKIE & RANSON (1998) haben die Rückstreustärke von gleich- und kreuzpolarisierten Wellen von verschiedenen orientierten, dünnen dielektrischen Zylindern gegenübergestellt (vgl. Abb. 3.10). Der Radius des Zylinders war für diese Untersuchung kleiner als die Wellenlänge. An dem in Strahlrichtung liegenden Zylinder (a) erreichen VV-polarisierte Wellen eine mittlere Rückstreustärke, HH- und kreuzpolarisierte nur eine geringe Rückstreustärke. Eine mittlere Rückstreustärke verursachen VV-polarisierte Wellen, wenn sie von einem aufrecht stehenden Zylinder (b) zurückgestreut werden, HH- und kreuzpolarisierte Strahlung hingegen nur eine niedrige Rückstreustärke. Ist der Zylinder in Richtung der einfallenden Wellen geneigt, sodass die Strahlung auf die Grundfläche des Zylinders trifft (c), gab es für alle Polarisationskombinationen keine Rückstreuung. Eine hohe Rückstreuung erzielen VV-polarisierte Wellen, wenn sie auf senkrecht zur Welle liegende Zylinder (d) treffen. HH- und kreuzpolarisierte Strahlung haben hingegen nur eine geringe bzw. keine Rückstreuung.

HENDERSON & LEWIS (2008) stellen in ihrem Review über die Verwendung von Radar für die Erfassung von Feuchtgebieten fest, dass HH-Polarisation gegenüber VV bevorzugt verwendet wird. Die Genauigkeit von polarimetrischen Aufnahmen, d. h. Aufnahmen in allen vier Kombinationen der Polarisation, scheint in der Größenordnung von HH-polarisierten Aufnahmen zu liegen. Dies kann jedoch nicht verallgemeinert werden, da in einigen Fällen polarimetrische Aufnahmen die Leistung der einfach polarisierten Aufnahmen übertreffen (z. B. BAGHDADI et al., 2001).

Basierend auf der zunächst militärischen Nutzung von Radarsystemen, hat sich für die Beschreibung der verschiedenen Wellenlängenbereiche die Nutzung von Großbuchstaben etabliert. Die in der Radarfernerkundung am häufigsten verwendeten Wellenlängenbereiche sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst (LEWIS & HENDERSON, 1998).

Die *Wellenlänge* beeinflusst als systemspezifischer Parameter die Eindringtiefe in eine Oberfläche (HOLECZ, 1993). Lange Wellenlängen (z. B. L-Band) können tiefer eindringen als kürzere und somit Informationen über tiefer liegende Schichten geben. Dadurch übt die Wellenlänge Einfluss auf die Art der Streuung aus. Für die Beschreibung der Oberflächenrauigkeit, von der wiederum die Oberflächenstreuung abhängig ist, wird auf die Wellenlänge zurückgegriffen (siehe Gleichung 3.9). Mit steigender Oberflächenrauigkeit erhöht sich der diffus gestreute Anteil der Oberflächenstreuung und somit die Rückstreuung. Im Allgemeinen vergrößert sich die Eindringtiefe in Vegetation und Boden bei größer werdender Wellenlänge. Die Rückstreuung unterschiedlicher Oberflächenbedeckungen im langwelligen Bereich ist im Vergleich

Bandname	Wellenlängenbereich in cm
L-Band	30 - 15
C-Band	7,5 - 3,75
X-Band	3,75 - 2,4
Ka-Band	1,18 - 0,75

**Tabelle 3.1:** Häufig verwendete Wellenlängenbereiche in der Radarfernerkundung (nach LEWIS & HENDERSON, 1998, geändert)

zu der Reflexion im kurzwelligeren Bereich komplexer, da sie sich aus Oberflächen- und Volumenstreuung zusammensetzt (LEWIS & HENDERSON, 1998).

HENDERSON & LEWIS (2008) eruieren, dass in bewaldeten Feuchtgebieten für die Unterscheidung von Waldflächen und krautiger Vegetation sowie anderen Oberflächenbedeckungen Aufnahmen verschiedener Wellenlängen benötigt werden. C-Band-Aufnahmen sind geeignet für Bereiche mit geringer Biomasse und für Waldflächen ohne Laub. Da in unterschiedlichen Untersuchungsgebieten die Trennung der Waldflächen von denen mit krautiger Vegetation sowie von anderen Landbedeckungen allein mittels C-Band unterschiedlich ausfiel und nicht immer mit hinreichender Genauigkeit gelang, empfehlen HENDERSON & LEWIS (2008) für eine widerspruchsfreie und hinreichend genaue Kartierung multifrequente Aufnahmen (z. B. C- und L-Band für bewaldete Feuchtgebiete).

Die Oberflächenstreuung ist abhängig von der Oberflächenrauigkeit, welche wiederum von der Wellenlänge und dem *Einfallswinkel* bestimmt wird (vgl. Gleichung 3.9). Der Einfallswinkel wirkt sich somit auf das Rauigkeitskriterium und dadurch ebenfalls auf das Rückstreuverhalten von Objekten aus. Für Waldflächen beispielsweise setzt sich der Rückstreukoeffizient aus den Rückstreuungen

- der Kronendachschicht  $\sigma_c^\circ$ ,
- der Baumstammschicht  $\sigma_t^\circ$ ,
- des Bodens  $\sigma_s^\circ$ ,
- dem Rückstreukoeffizienten resultierend aus der Interaktion der Strahlung mit der Baumstamm- und Bodenschicht  $\sigma_{st}^\circ$  sowie
- der Durchlässigkeit der Strahlung durch das Kronendach ( $\tau_c$ ) und der Stammschicht ( $\tau_t$ )

zusammen (vgl. Gleichung 3.11 DOBSON et al. (1995)).

$$\sigma^\circ = \sigma_c^\circ + \tau_c^2 \tau_t^2 (\sigma_t^\circ + \sigma_s^\circ + \sigma_{st}^\circ) \quad (3.11)$$

Die Mikrowellen interagieren bei größeren Einfallswinkeln stärker mit dem Kronendach, wodurch weniger Strahlung durch das Kronendach gelassen wird (geringere Transmissivität  $\tau_c$ ). Bei steileren Einfallswinkeln jedoch kann die Strahlung auf kürzerem Wege durch das Kronendach gelangen und besitzt noch genügend Energie, um mit dem darunter liegenden Boden und den Baumstämmen zu interagieren. Insbesondere Double Bounce und Mehrwegereflexionen können das zurückgestreute Signal deutlich erhöhen (LANG et al., 2008; KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ, 1997).

Der Rückstreuung von Waldflächen, wie LANG et al. (2008) beispielsweise anhand von Radarsat HH-Aufnahmen zeigen, variiert jedoch nicht nur aufgrund des Einfallswinkels, sondern auch durch Parameter der Waldstruktur, wie Kronenschlusshöhe und -tiefe, sowie durch die Eigenschaften des darunter liegenden Boden (Bodenfeuchte, überflutet/nicht überflutet). LANG et al. (2008) stellten unter Berücksichtigung der Parameter in ihren Daten fest, dass mit steigendem Einfallswinkel die Rückstreuung abnahm. Sie führen dies auf die geringere Durchlässigkeit des Kronendaches und somit die Dämpfung des zweiten Summanden in Gleichung 3.11 zurück.

Für inhomogene Volumina mit geringeren Dielektrizitätskonstanten nimmt die Rückstreuung mit steigendem Einfallswinkel gleichmäßig ab. Für größere Dielektrizitätskonstanten nimmt die Rückstreuung schneller ab, bleibt aber über eine größere Breite an Einfallswinkeln (bis zu ca.  $40^\circ$ ) nahezu konstant, bevor sie ebenfalls abnimmt (ULABY et al., 1982). Die Präferenz von steilen Einfallswinkeln hängt vom Untersuchungsgebiet ab. In ihrem Review zeigen HENDERSON & LEWIS (2008), dass die Genauigkeit von Aufnahmen mittels verschiedener Einfallswinkel insbesondere bei rauen Oberflächen nicht immer gesteigert wird. Nähert sich die Streuung jedoch einer gerichteten Reflexion, können mittels verschiedener Einfallswinkel zusätzliche Informationen gewonnen werden, mit denen die Genauigkeit der Auswertung erhöht werden kann.

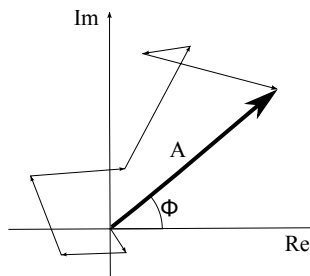
### 3.4 Der Speckle-Effekt

Die Entstehung dieses für Radaraufnahmen typischen Effektes lässt sich auf die Verwendung des eingesetzten kohärenten Signals zur Beleuchtung der Erdoberfläche und dessen Interaktion mit den verschiedenen, unabhängigen Streuern innerhalb der Auflösungszelle zurückführen (HOLECZ, 1993). Dies führt zu der charakteristischen Körnigkeit in den SAR-Bildern. Speckle wird von dem verwendeten kohärenten Aufnahmesystem verursacht und nicht von den aufgenommenen Landbedeckungen. Deshalb betrifft die Körnigkeit alle Bereiche in den Aufnahmen, sodass selbst homogene Flächen verrauscht erscheinen. Das Auftreten von Speckle beeinträchtigt die Interpretation sowie die weitere Verarbeitung, wie z. B. die Klassifikation, der Radaraufnahmen. Da Speckle durch das Aufnahmesystem bedingt auftritt, ist es unvermeidbar. Die Auswirkungen des Speckle-Effekts können jedoch nach der Aufnahme durch Multilookprozessierung und Filterung der Daten reduziert werden.

Bei den aktiven Verfahren werden Mikrowellen gleicher Wellenlänge und bekannter Phase ausgesendet und das zurückreflektierte Echo am Sensor erfasst. Die kohärente Welle wird durch eine Amplitude und einen stabilen Phasenbezug beschrieben. Die aufgezeichnete Signalleistung besteht aus einer Überlagerung der verschiedenen Rückstreusignale innerhalb des Flächenelementes (kohärente Addition). Aufgrund der zufällig verteilten Streuelemente kommt es zu unterschiedlichen Signallaufzeiten, wodurch sich Unterschiede in der Phase ergeben und die Kohärenz der Welle verloren geht. Durch die Phasenverschiebung können destruktive oder konstruktive Interferenzen entstehen. Löschen sich die Wellen dabei gegenseitig aus, spricht man von destruktiver Interferenz. Kommt es hingegen zu einer Verstärkung der Amplitude, heißt es konstruktive Interferenz. Diese lokalen konstruktiven oder destruktiven Interferenzen erscheinen im SAR-Bild als hellere oder dunklere Pixel und lassen das Bild körnig aussehen (BOLTER et al., 1996; HAGG, 1998).

Die am Sensor empfangenen Signalvektoren sind die komplexen, linearen Summen aller individuellen Streuer einer Auflösungszelle, die sich aus den jeweiligen, statistisch unabhängigen

Magnituden (Längen) und den Phasen (Orientierung) zusammensetzen. Die Entstehung der empfangenen Signalvektoren wird auch „random walk“ genannt (siehe Abb. 3.11). Die Summe kann gleichermaßen durch eine komplexe Zahl, basierend auf zwei Basisbandsignalen (*In-phase (I)* und *Quadrature (Q) Component*) der beleuchteten Fläche, repräsentiert werden. Die Gleichverteilung der Phase über den möglichen Bereich von 0 bis  $2\pi$  wird vorausgesetzt. Die Sensoren erfassen die Komplex-Daten, da aus ihnen sowohl Magnituden- als auch Phaseninformationen abgeleitet werden können. Für die Auswertung von Einzelbildern spielt die Phase keine weitere Rolle, wird jedoch für interferometrische und polarimetrische Anwendungen benötigt. Die Magnitude (Betrag) der Gesamtrückstreuung entspricht dem Betrag von  $A$  aus Abbildung 3.11; die Phase ergibt sich aus dem Imaginär- und dem Realteil des Signals wie folgt:  $\Phi = \arctan \frac{\text{Im}(A)}{\text{Re}(A)}$ . Liegen in der Auflösungszelle viele statistisch unabhängige Streuer vor, sind der Real- und der Imaginärteil unabhängig voneinander und gaußverteilt mit Mittelwert gleich Null (RANEY, 1998).



**Abbildung 3.11:** Überlagerung der verschiedenen Streuer (random walk) (nach RANEY, 1998, geändert)

Für die Streuer innerhalb der Auflösungszelle gelten folgende vier Annahmen (HOLECZ, 1993):

- Die Amplitude und die Phase sind unabhängig.
- Gleichverteilung der Phase zwischen 0 und  $2\pi$  (voll entwickelter Speckle).
- Die Anzahl der Streuer ist groß, sodass Real- und Imaginärteil unabhängig sind und eine Normalverteilung aufweisen.
- Keine dominanten Streuer, da sonst nicht mehr von einer Rayleigh-Verteilung ausgegangen werden kann.

Die Rückstreuung wird durch die komplexen Zusammenhänge der angeführten Systemparameter und die materialspezifischen Eigenschaften bestimmt. Das zurückgestreute Signal ist das Ergebnis einer Oberflächenstreuung, einer Volumenstreuung oder einer Kombination aus beiden Streuungsarten. Der Anteil des jeweiligen Streumechanismus hängt maßgeblich von der Oberflächenrauigkeit und den dielektrischen Eigenschaften des Mediums ab. Die genannten Faktoren hängen wiederum von der verwendeten Wellenlänge, der Polarisation und dem Einfallswinkel ab. Verschiedene Parameterkombinationen bestimmen die Rückstreuungstintensität verschiedener Oberflächen, wodurch Mehrdeutigkeiten innerhalb einer Aufnahme auftreten können. Die Rückstreuung lässt sich nicht allein durch eine einzelne Ursache erklären, sondern stellt immer ein vielschichtiges Zusammenspiel aus verschiedenen Ursachen dar.

## 3.5 Rückstreuung von Feuchtgebieten in SAR-Daten

Der Einsatz verschiedener SAR-Systeme zum Monitoring von Feuchtgebieten wurde bereits in mehreren Veröffentlichungen diskutiert, siehe dazu beispielsweise KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ (1997), POPE et al. (1997), LEWIS (1998), KARSZENBAUM et al. (2000), KANDUS et al. (2001) oder auch GRINGS et al. (2006). In Feuchtgebieten befinden sich für gewöhnlich mehrere verschiedene Streuer innerhalb einer Auflösungszelle. Die Kombination von Streuern kann sich je nach Untersuchungsgebiet von Wasserflächen mit schilf- bzw. grasartiger Vegetation bis hin zu offenen Böden mit Sträuchern und Buschwerk mit unterschiedlichem Feuchteanteil erstrecken.

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über das theoretische und beobachtete Rückstreuverhalten von Mikrowellen für die drei typischen Landbedeckungen Vegetation, Boden und Wasser innerhalb von Feucht- bzw. Überschwemmungsgebieten. Ziel ist es, das Rückstreuverhalten der im Binnendelta vorkommenden Landbedeckungen in den vorgestellten Beispielen für möglichst ähnliche Systemparameterkombinationen, wie die der vorliegenden SAR-Aufnahmen, zusammenzustellen. Das Rückstreuverhalten ist sehr komplex, da es von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird.

### 3.5.1 Rückstreuverhalten von Vegetation

Die Rückstreuung wird in Gebieten mit niedriger Vegetation stark von dem darunter liegenden Boden geprägt. Bei sehr dichter Vegetation ist der Einfluss des Bodens gedämpft, sodass das Signal deutlich von der Vegetation dominiert wird (GRINGS et al., 2006). Die Vegetationsschicht stellt ein inhomogenes Medium dar, in dem die Elemente ungleichmäßig verteilt sind und unterschiedliche dielektrischen Eigenschaften aufweisen. Maßgeblich beeinflussen die Pflanzenparameter Dichte der Vegetationsdecke, Form der Blätter, Zweige bzw. Äste, Verteilung, Orientierung, Höhe der Pflanzen sowie die Dielektrizitätskonstante das Signal. Aber auch die Kondition des Bodens (z. B. trocken oder überschwemmt) kann, unter der Annahme, dass das Signal bis zum Boden vordringt, die Rückstreuung beeinflussen (COSTA, 2004).

KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ (1997) beschreiben die Zusammensetzung des Rückstreu-koeffizienten für bewachsene, jedoch nicht bewaldete Flächen mittels eines Zwei-Schichten-Modells. Eine Schicht enthält die krautartige Vegetation, die andere Schicht den sich darunter befindenden Boden. Der Rückstreu-koeffizient setzt sich nach der Eliminierung des Einflusses der Stammschicht aus Gleichung 3.11 nach KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ (1997) wie folgt zusammen:

$$\sigma_{t-h}^{\circ} = \sigma_c^{\circ} + \tau_c^2 (\sigma_s^{\circ} + \sigma_m^{\circ}) \quad (3.12)$$

- $\sigma_c^{\circ}$  ... Rückstreu-koeffizient für Schichten mit kleinen Zweigen und Blattwerk
- $\tau_c$  ... Transmissionskoeffizient der Vegetationsschicht
- $\sigma_s^{\circ}$  ... Rückstreuung des Bodens
- $\sigma_m^{\circ}$  ... durch Boden und Vegetation beeinflusster Rückstreu-koeffizient (Mehrfach-reflexionen)

Die Mikrowellen interagieren mit der Vegetationsdecke, dem Untergrund sowie den Stämmen der Pflanzen. Die Vegetation betreffende Koeffizienten der obigen Formel sind nicht nur von der Vegetationsart (Geometrie der Pflanzen), sondern auch von den drei systemspezifischen Parametern sowie den dielektrischen Eigenschaften abhängig. Die Rückstreuung vom Boden hängt zudem von dessen dielektrischen Eigenschaften und der Rauigkeit ab (DOBSON & ULABY, 1998; COSTA, 2004).

Bei identischen Systemparametern erhöht sich die Rückstreuung mit größer werdender Dielektrizitätskonstante bzw. steigendem Wassergehalt. So führen beispielsweise Tau und Regenfeuchtigkeit auf den Blättern zu einer erhöhten Dielektrizitätskonstante der Vegetationsschicht. Bei der Annahme einer unveränderten RMS-Höhe<sup>1</sup> führt die Erhöhung der Bodenfeuchte zu höheren Rückstreuoeffizienten ( $\sigma_s^\circ$ ,  $\sigma_m^\circ$ ). Die Oberflächenstreuung scheint den Rückstreuoeffizienten für Flächen mit vertikal orientierter, krautiger Vegetation, die eine geringe Biomasse besitzt, zu dominieren (KASISCHKE & BOURGEOU CHAVEZ, 1997).

Durch das Eindringen des Signals in die Vegetationsschicht reagiert es auf eine Vegetationsdecke in der Regel mit Volumenstreuung. Die Eindringtiefe wird durch die Wellenlänge des Signals bestimmt: je langwelliger das Signal ist, desto größer ist die Eindringtiefe. Weist die Pflanzendecke allerdings größere Lücken auf, sodass das Signal bis zum Boden gelangen kann, wird es ebenfalls durch Oberflächenstreuung sowie durch Mehrfachreflexionen an Vegetation und Boden beeinflusst.

Für die Zusammenstellung des Rückstreuerverhaltens der Vegetationsflächen wird auf verschiedene Untersuchungen von Feuchtgebieten in unterschiedlichen geographischen Regionen zurückgegriffen. Dabei wird das Rückstreuerverhalten im Hinblick auf die Wassertiefe, die Dichte und die Struktur der Pflanzen verdeutlicht. Es werden hauptsächlich die gewonnenen Erkenntnisse zum Rückstreuerverhalten, beruhend auf ähnlichen Systemparametern wie bei den vorliegenden ERS- und ASAR-Daten, zum Zwecke der Übertragbarkeit dargeboten und als Anstriche unter dem jeweiligen Untersuchungsgebiet zusammengefasst. Im weiteren Verlauf wird die Kombination der Systemparameter Wellenlänge und Polarisierung durch drei Buchstaben abgekürzt (z. B. bedeutet CVV C-Band mit VV-Polarisation).

#### Südflorida

KASISCHKE et al. (2003) evaluieren in ihrer Studie die Eignung multitemporaler ERS-2 Daten für das Monitoring hydrologischer Verhältnisse in Feuchtgebieten. Aufgrund der hydrologischen Veränderungen innerhalb eines Jahres im Untersuchungsgebiet (zwei Feuchtgebiete in Südflorida) kann von drei Phasen ausgegangen werden. Zu Beginn der nassen Saison steigt die Bodenfeuchte aufgrund erhöhter Niederschläge. Ab Mitte der Regenzeit fängt das Wasser an, den Boden zu bedecken, bis in der dritten Phase, etwa zur Mitte der Trockenzeit, wenn die Regenfälle deutlich nachgelassen haben, die Bodenfeuchte wieder zu sinken beginnt. KASISCHKE et al. (2003) betrachten in ihrer Studie zwei Arten von Feuchtgebieten: Flächen, die überwiegend von krautiger Vegetation, insbesondere mit Gräsern, Seggen und Schilf, bewachsen sind, sowie Gebiete, in denen Büsche und Bäume vorherrschen. Insbesondere für die Flächen mit krautiger Vegetation war ein Rückgang des Rückstreuoeffizienten mit steigender Wassertiefe zu beobachten.

Die Untersuchungen von KASISCHKE et al. (2003) ergaben, dass die Variation der Biomasse im Vergleich zu Veränderungen der Bodenfeuchte und der Wassertiefe nur geringen Ein-

---

<sup>1</sup> rms height, nach ULABY et al. (1982): die Standardabweichung der Höhenvariation; ein Parameter zur Beschreibung der Oberflächenrauigkeit

fluss auf die Schwankungen der Rückstreuung hat. KASISCHKE et al. (2003) weisen jedoch darauf hin, dass die betrachtete Vegetation im Untersuchungsgebiet nur aus einer dünnen Vegetationsdecke mit dünnen Stämmen besteht und generell eine eher geringe Biomasse aufweist.

Bereits während der Studie zur Nutzung von ERS-1 Daten für das Monitoring haben KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ (1997) festgestellt, dass sich bei steigendem Wasserstand die Rückstreuung insgesamt erhöht. Es gibt jedoch Bereiche, in denen sich die Rückstreuung reduziert hat. In diesem Fall hat das Wasser den Anteil des Bodens ( $\sigma_s^\circ$  in Gl. 3.12) gedämpft bzw. verschwinden lassen. In der Studie von KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ (1997) nahm beispielsweise die Rückstreuung von Feuchtwiesen, welche von Gras dominiert werden sowie eine niedrige krautige Vegetation aufweisen, von -9,3 dB auf -11,0 dB ab. Flächen mit Sauergrasgewächsen (Schneiden, *Cladium jamaicense*) und Binsen erfahren hingegen einen deutlichen Anstieg von -11,7 dB auf -9,4 dB bzw. von -11,9 dB auf -10,5 dB. Der Anstieg der Rückstreuung lässt sich durch den gestiegenen Anteil an Biomasse und somit durch eine gestiegene Rückstreuung der Vegetationsschicht erklären (KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ, 1997).

In den ERS-1 bzw. ERS-2 Aufnahmen war zu verzeichnen:

- Abnahme der Rückstreuung auf von Gras dominierten Flächen bei steigendem Wasser
- Zunahme der Rückstreuung bei von höheren Sauergrasgewächsen dominierten Flächen bei steigendem Wasser aufgrund erhöhter Rückstreuung in der Vegetationsschicht.

#### Yucatán

Einen Rückgang des Rückstreuungskoeffizienten für Schwemmland mit spärlicher und niedriger Vegetation beobachteten auch POPE et al. (1997) in ihrer Studie über die Überschwemmung der Mangroven im nordwestlichen Teil der Halbinsel Yucatán (Mexiko). Drei Pflanzengesellschaften sind charakteristisch für das Untersuchungsgebiet, dessen größtes jahreszeitliches Ereignis die Überflutung ist: Schneiden (*Cladium jamaicense*), Rohrkolben (*Typha dominicensis*), welche bis zu 2 m hoch werden, und die mit unter 1 m niedrigeren Sumpfbinsen (*Eleocharis cellulosa*). Die Shuttle Imaging Radar Aufnahmen (SIR-C) wurden 1994 zu zwei Zeitpunkten getätigt, zunächst im April (trocken) sowie später im Oktober (überschwemmt). Es liegen polarimetrische Daten im C- und L-Band vor. Mit dem Ziel, die Fähigkeit von multifrequenzen, polarimetrischen SAR-Daten für das Monitoring von Feuchtgebieten aufzuzeigen, wurden parallel Feldmessungen durchgeführt. Dafür sind biophysikalische Parameter, wie z. B. die Wassertiefe oder die Höhe der Pflanzen, für einzelne Testgebiete bestimmt worden.

Für Bereiche, die mehrheitlich und dicht mit Rohrkolben (>60 %) bewachsen waren, war ein deutlicher Anstieg zwischen den beiden Aufnahmen in der Magnitude sowohl in den C- als auch in den L-Band Daten zu verzeichnen. Der Anstieg betrug für CVV bis zu 5,2 dB. POPE et al. (1997) interpretieren diesen Anstieg durch Double Bounce Reflexionen zwischen der Vegetation und der spiegelnden Wasserfläche. Bei steigendem Wasserstand erhöht sich die Rückstreuung von Überschwemmungsflächen mit dichter, hoher Vegetation, welche mindestens 1,2 m aus dem Wasser ragt. Mit steigendem Wasserstand reduziert sich die Rückstreuung in CVV um bis zu 6,4 dB in Bereichen mit spärlicher, niedriger Sumpfbinsse.

Für CVV-Aufnahmen mit Einfallswinkel von 25,6° und 26,2° (ähnlich dem der vorliegenden ERS- und ASAR-Aufnahmen) zeigt sich eine

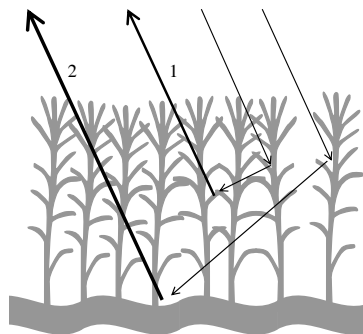
- Abnahme der Rückstreuung bei spärlicher, niedriger Vegetation bei steigendem Wasser und bestätigt die Beobachtungen von KASISCHKE & BOURGEOU CHAVEZ (1997) bzw. KASISCHKE et al. (2003)
- Zunahme der Rückstreuung bei dichter, hoher Vegetation bei steigendem Wasser aufgrund von Double Bounce Reflexionen.

#### Amazonas

COSTA (2004) diskutiert die Nutzung von SAR-Daten für die Kartierung der räumlichen Verteilung von Vegetationsgesellschaften innerhalb des Amazonas. Die neun SAR-Aufnahmen stammen aus den Jahren 1996, 1997 und 1999 und wurden mittels Radarsat oder JERS-1 aufgenommen. Die radiometrisch und geometrisch kalibrierten HH-Aufnahmen liegen in einer geometrischen Auflösung von 26 m x 27 m vor. Das im C-Band operierende Radarsat arbeitete mit einem Einfallswinkel von ca. 45°. JERS-1 hingegen agiert im langwelligeren L-Bandbereich mit einem etwas steileren Einfallswinkel von ca. 35°. Die Aufnahmen wurden u. a. während der Trockenzeit bei niedrigen Pegelständen und während der Regenzeit mit hohen Flusspegeln erstellt. Im Hinblick auf das Niger-Binnendelta sind insbesondere die drei Landbedeckungen semi-aquatische Vegetation, Weideland und Savanne interessant.

Die rund 0,85 m hohe, grasartige Pflanze *Hymenachne amplexicaulis* aus der Familie der Süßgräser ist die am häufigsten vorkommende Wasserpflanze. Die Klasse der hydrophytischen Vegetation weist eine hohe Bandbreite an Rückstreuwerten über die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte auf, was auf die hohe Abhängigkeit vom Wasserstand hinweist. Volumenstreuung (Variante 1 in Abb. 3.12) dominiert bei diesen Pflanzen in den CHH-Aufnahmen; im L-Band hingegen tritt auch gerichtete Streuung auf. Zusätzlich treten Double Bounce Reflexionen der Strahlung an den Pflanzenstämmen und der Wasseroberfläche auf (siehe Variante 2 in Abb. 3.12).

Bei einer voll ausgebildeten, dichten Vegetationsdecke dominiert bei einem flacheren Einfallswinkel (45°) die Volumenstreuung mit einer durchschnittlichen Rückstreuung von -7 dB. Aufgrund des flachen Einfallswinkels wird der Weg, den die Strahlung in der Vegetationsschicht zurücklegt, erhöht. Im Vergleich zu Aufnahmen mit einem steileren Einfallswinkel kommt es zu einer Dämpfung des Signals. Steilere Einfallswinkel bewirken ein tieferes Eindringen in die Vegetation, wodurch sich die Möglichkeit von Double Bounce Reflexionen insbesondere bei überfluteten Flächen erhöht.



**Abbildung 3.12:** Rückstreumechanismen überfluteter Vegetation in C-Band Aufnahmen: 1 = Volumenstreuung, 2 = Double Bounce Reflexion (nach COSTA, 2004, geändert)



Da langwellige L-Band Strahlung tiefer eindringen kann, ist neben der Volumenstreuung eine gerichtete Reflexion an der sich darunter befindenden Wasseroberfläche zu beobachten. Dies resultierte in einer geringeren durchschnittlichen Rückstreuung im Bereich von -9 dB. Liegt eine dichte Vegetationsdecke vor, kommt es bei L-Band Aufnahmen ebenfalls zu Volumenstreuung. Aufgrund von höheren Rückstreuwerten im L-Band in Bereichen mit hochgewachsenen Pflanzen und in Bereichen mit Lücken im Bestand kann angenommen werden, dass ebenfalls Double Bounce Reflexionen aufgetreten sind.

Das Weideland im Untersuchungsgebiet von COSTA (2004) wird als kurze, grasartige Vegetation, durchsetzt mit vereinzelt nicht holzigen Büschen sowie Stellen offenen Bodens, beschrieben. Die Höhe der Vegetationsdecke entspricht der Größenordnung der Wellenlänge des C-Bands (ca. 4 bis 7,5 cm), weshalb eine Interaktion der Strahlung mit der Vegetation erwartet wurde. L-Band Strahlung durchdringt diese Vegetationsschicht und interagiert hingegen mit dem Boden. Die ähnlichen Rückstreuwerte in den C- und L-Band Aufnahmen zeigen jedoch, dass auch im C-Band eine Interaktion mit dem sich darunter befindenden Boden stattfand. Zur Trockenzeit war die Rückstreuung mit -12 dB am geringsten. Sie stieg, mit größer werdender Bodenfeuchte, auf -10 dB für den nassesten Zeitraum. In den L-Band Aufnahmen erzielten diese Flächen Rückstreuwerte von -13 dB bzw. ebenfalls -10 dB.

In der Savanne, die sich durch eine spärliche, ca. 3 m hohe Vegetation, kurzes Gras und offenen, sandigen Boden auszeichnet, verhält sich die Rückstreuung der beiden Bänder ähnlich. Die geringe Rückstreuung sowohl im L- als auch im C-Band deutet darauf hin, dass das Signal auch hier hauptsächlich mit dem Boden und der dünnen Vegetationsschicht (Oberflächenstreuung) interagiert. Während der Trockenzeit beträgt die durchschnittliche Rückstreuung im C-Band -14 dB und erhöht sich auf -12 dB während der feuchteren Zeit des Jahres.

#### Delta des Rio Paraná

KARSZENBAUM et al. (2000) untersuchten das Potential der Kombination von CHH-Radarsat und CVV-ERS-2 Bildern für das Monitoring des Deltas des Rio Paraná (Argentinien) sowie zur Abschätzung des vorliegenden Flutstandes. Das Feuchtgebiet besteht aus einem komplexen Mosaik aus verschiedenen Landbedeckungen. In Abhängigkeit vom Flutstand wurde u. a. die Rückstreuung der Landbedeckungen Feuchtwiese/Sumpf und Binsengewächse analysiert. Ca. 1,5 bis 2 m hohe krautige Vegetation befindet sich auf den Feuchtwiesen, deren Böden über einen längeren Zeitraum mit Wasser gesättigt waren. Die Binsengewächse mit der 2 bis 2,5 m hohen dominanten Art *Schoenoplectus californicus* (Totora-Schilf) sind hingegen dauerhaft überflutet.

Unter diesen Bedingungen beträgt die Rückstreuung der Feuchtwiesen in den CVV-Aufnahmen ca. -11 dB. Steigt jedoch das Wasser, erhöht sich die Rückstreuung auf -7 dB. KARSZENBAUM et al. (2000) begründen den Anstieg mit der Mehrfachreflexion der Strahlung an den Pflanzen und der Wasserfläche. Die beiden CHH-Aufnahmen zeigen dagegen nur geringe Unterschiede in der Rückstreuung von Sumpfflächen. Eine höhere Rückstreuung aufgrund vermehrter Double Bounce Reflexionen wäre auch für die CHH-Aufnahmen erwartet worden. Die geringen Unterschiede sehen KARSZENBAUM et al. (2000) darin begründet, dass die durch Double Bounce Reflexion verursachte Rückstreuerhöhung durch die Dämpfung des Signals bzw. durch gerichtete Reflexion ausgeglichen wurde.

In den CVV-Aufnahmen erfährt die Rückstreuung der Binsengewächse nur eine geringe Veränderung zwischen den beiden hydrologischen Situationen, was auf die starke Dämpfung des Signals in der hohen, dichten (zwischen 60 und 80 %) Vegetationsschicht zurückzuführen

ist. Die Wasseroberfläche hat nur in den weniger dichten Bereichen bzw. an offenen Stellen eine Wirkung auf die Rückstreuung. In diesen Bereichen variiert die Rückstreuung bis zu 8 dB, was sich auf die verschiedenen hohen, dichten Pflanzen zurückführen lässt. Die Binsengewächse zeigen in den HH-Aufnahmen eine deutliche Abhängigkeit von den Wasserständen. Die dominierende Double Bounce Reflexion ging während der Überflutung in eine gerichtete Reflexion über.

Ebenfalls auf Daten vom Mündungsdelta des Rio Paraná basieren die Beobachtungen von GRINGS et al. (2006) zum Rückstreuverhalten der Binsen- und Sinsengewächse (*Totora-Schilf* (*Schoenoplectus californicus*) bzw. *Scirpus giganteus*). Die Analyse basiert auf multitemporalen ASAR VV- und HH-Aufnahmen mit einem mittleren Einfallswinkel von 19°. Auch hier bevorzugen die Binsengewächse permanent überflutete Bereiche, die Sinsen hingegen temporär überschwemmte Nassflächen. Die Flächen mit den durchschnittlich 2 m hohen Sinsen-Röhrichtern zeichnen sich durch lange Blätter aus, die vertikal nahezu gleichmäßig dicht sind. Die Form der Binsen ähnelt vertikalen Zylindern. Die Flächen sind je nach Alter durch unterschiedlich dichte und hohe (zwischen 25 cm und 2 m) Pflanzen gekennzeichnet. Während der ersten Aufnahme betrug der Wasserstand ca. 1 m, sank aber während der zweiten Aufnahme auf 20 cm.

Für beide Gattungen ist die HH-Rückstreuung während der Überflutung deutlich höher als VV. GRINGS et al. (2006) beobachteten, dass die überfluteten Flächen mit den zylindrischen Binsengewächsen in HH-Aufnahmen verstärkt Double Bounce Reflexionen zwischen Vegetation und Wasseroberfläche hervorrufen. Dies führt zu Rückstreuwerten hauptsächlich in dem Bereich zwischen -2 dB und -4 dB. Im Gegensatz dazu ergeben sich für VV-polarisierte Aufnahmen Werte in dem Bereich zwischen -9 dB und -12 dB. Auch die Sinsen reagieren bei Überschwemmung in den HH-polarisierten Aufnahmen stärker (ca. -1 dB bis -3 dB) als in VV-Aufnahmen (-5 dB bis -6 dB).

Während der zweiten Aufnahme bei geringem Wasserstand ist die Rückstreuung der Binsengewächse in HH (ca. -7 dB bis -10 dB) wieder deutlich höher als in VV (ca. -11 dB bis -13 dB). Der Unterschied in der CVV-Rückstreuung zwischen dem überschwemmten und dem sehr geringen Wasserstand beträgt nur rund 2 dB, was im Vergleich zu ca. 6 dB in den HH-Aufnahmen sehr gering ist. Der Unterschied zwischen der Rückstreuung in VV und HH bei den Flächen mit Sinsengewächsen zur Zeit der zweiten Aufnahme ist sehr gering. Beide variieren zwischen -7 dB und -9 dB.

Die ERS-2 bzw. ASAR CVV-Aufnahmen zeigen, dass

- sich die Rückstreuung von dichten Feuchtwiesen mit vormals gesättigtem Boden bei steigendem Wasser erhöht und
- dichte, hohe, vertikale Vegetation das Signal dämpft, sodass nur ein geringer Unterschied zwischen den Rückstreuwerten verschiedener Wasserstände entstehen kann.

#### Vegetation als Indikator für die Wasserzusammensetzung

Zum Schluss sei noch auf die Studie von COSTA & TELMER (2006) hingewiesen. Neben der eigentlichen Detektion von Wasserflächen werden SAR-Daten auf die Anwendbarkeit zur Klassifikation von Seen mit verschiedenen geochemischen Zusammensetzungen, mittels verschiedener Pflanzenarten als Indikator, hin untersucht.

Das Untersuchungsgebiet ist das Feuchtgebiet Pantanal im Zentrum Südamerikas, in dem sich zahlreiche Seen befinden. Die Spanne erstreckt sich von Brackwasser zu Seen mit verdünntem bis hin zu hohem Salzgehalt. COSTA & TELMER (2006) benutzen hierfür den

Zusammenhang zwischen der Geochemie eines Sees und den vorhandenen Sumpf- und Wasserpflanzen.

Zunächst wurden die Seen in die Gewässerkategorien Brackwasser und Süßwasser mit der Unterteilung in hartes und weiches Wasser, in Abhängigkeit von der Gesamtmenge der gelösten Feststoffe bzw. Salze, unterteilt. Während der Trockenzeit sind Aufnahmen sowohl mittels CHH-Radarsat, mit Einfallswinkeln um 25° (S1) und 50° (S7), als auch mittels LHH-JERS-1, mit 35° Einfallswinkel, ausgewertet worden. Typisch für dieses Untersuchungsgebiet sind Vertreter der Gattungen Sumpfbinsen (*Eleocharis*), Simsen (*Scirpus*) und Zypergräser (*Cyperus*) aus der Familie der Sauergrasgewächse. Ebenso ist die Art *Typha domingensis* aus der Familie der Rohrkolbengewächse (*Typhaceae*) ansässig, welche als Indikator für harte Süßwasserseen verwendet wurde. Brackwasserseen sind frei von über die Wasserflächen ragenden Sumpf- und Wasserpflanzen. Trockengefallene Seen werden von Bodenfeuchte und Sträuchern geprägt. Unter Zuhilfenahme dieser Pflanzenarten, deren Vorkommen an die genannten Kategorien geknüpft sind, ließen sich Brackwasser- und Süßwasserseen mit einer Genauigkeit von 91% klassifizieren.

Aufgrund der fehlenden Vegetation und somit der gerichteten Reflexion der Strahlung an der Wasseroberfläche ist die Rückstreuung von Brackwasserseen mit durchschnittlich -23,5 dB bzw. -26 dB für Radarsat S1 bzw. S7 sowie -17,8 dB für JERS-1 sehr gering. In die vertikal orientierte Vegetation der Sauergrasgewächse (Indikator für weiche Süßwasserseen) kann die CHH-Strahlung mit einem steilen Einfallswinkel (S1) tief in die Vegetationsdecke eindringen (Volumenstreuung). Die Rückstreuung beträgt durchschnittlich -6 dB. Mit -11 dB ist die Rückstreuung im S7-Modus deutlich geringer. Wie bereits erwähnt, muss die Strahlung bei einem flachen Einfallswinkel einen längeren Weg durch die Vegetationsdecke zurücklegen und wird dadurch stärker gedämpft. In der JERS-1 Aufnahme sind Rückstreuwerte um -14 dB ermittelt worden. COSTA & TELMER (2006) begründen dies mit einer Mischung aus Volumenstreuung und gerichteter Reflexion.

Die Struktur der Rohrkolbengewächse unterscheidet sich deutlich von den anderen Sumpf- und Wasserpflanzen. Die Strahlung kann an den langen Stängeln reflektiert werden, sodass es bei diesen Pflanzen oft zu Double Bounce Reflexionen kommt. In der Radarsat-S1-Aufnahme werden Rückstreuungen von -2 dB, in der S7-Aufnahme von -6 dB gemessen. Letzteres lässt auf einen höheren Anteil an Volumenstreuung schließen. Für die JERS-1 Aufnahme begründen COSTA & TELMER (2006) die unerwartet geringe Rückstreuung von nur -13,5 dB wieder mit einer Kombination aus Volumenstreuung und gerichteter Reflexion.

COSTA & TELMER (2006) weisen zudem darauf hin, dass der Aufnahmezeitpunkt länger zurückliegt als der der Radarsat-Aufnahmen und die Autoren deswegen die tatsächlich vorkommende Vegetation weniger zuverlässig bestimmen konnten. Insgesamt zeigt die CHH-S1-Aufnahme eine deutliche Trennbarkeit der Brackwasserseen von den Süßgewässern. Schwieriger wird die Unterscheidung in die beiden Wasserhärtegrade. Die Autoren betonen, dass für die Unterscheidung in die Härtegrade angenommen wurde, dass nur reine Rohrkolbenbestände als Indikator für hartes Wasser genutzt wurden.

### 3.5.2 Rückstreuverhalten von offenen Böden

Die Rückstreuung offener (vegetationsloser) Böden wird überwiegend von den bei der Aufnahme verwendeten Sensorparametern, insbesondere der Wellenlänge und dem Einfallswinkel, und den Oberflächeneigenschaften Rauigkeit und Dielektrizitätskonstante (Bodenfeuchte)

beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen den sensor- und bodenspezifischen Parametern lässt sich nach ULABY et al. (1986) wie folgt ausdrücken:

$$\sigma_{rt}^{\circ}(\theta) = f_{rt}(\epsilon_s, \theta) \cdot f_s(\rho(\xi), \theta) \quad (3.13)$$

mit  $rt$  ... empfangene und gesendete Polarisation  
 $\theta$  ... Einfallswinkel

Die Dielektrizitätsfunktion  $f_{rt}$  enthält die Abhängigkeit des Rückstreuoeffizienten von der relativen komplexen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_s$  der Oberfläche. Die Rauigkeitsfunktion  $f_s$  zeigt die Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit, repräsentiert durch die Autokorrelationsfunktion  $\rho(\xi)$  der Oberflächenhöhe. Beide Funktionen sind unabhängig voneinander, d. h.  $f_{rt}$  ist unabhängig von der Oberflächenrauigkeit und  $f_s$  ist unabhängig von der relativen komplexen Dielektrizitätskonstante.

Die Oberflächenrauigkeit beeinflusst die Form des Streumusters, wohingegen die dielektrischen Eigenschaften des Bodens die Größenordnung der Reflexion, Absorption und Transmission bestimmen. Neben den beiden genannten Eigenschaften des Bodens wirken sich der Bodentyp und, im Falle von trockenen Böden, der Anteil der Volumenstreuung auf das Signal aus, jedoch in einem geringeren Umfang (ULABY et al., 1982; DOBSON & ULABY, 1998). Vor allem bei trockenen Böden kann der Einfluss der Oberflächenrauigkeit durch eine Kombination aus langwelliger Strahlung und kleinem Einfallswinkel verringert werden, da die Welle tiefer eindringen kann. In feinkörniges Material, wie beispielsweise Sand oder Lehm, kann die Mikrowellenstrahlung in diesen Fällen besonders gut eindringen, sodass sich diese Bereiche durch eine geringe Rückstreuung auszeichnen (LEWIS & HENDERSON, 1998).

Für hydrologische Aufgabenstellungen ist vor allem die Bodenfeuchte von Interesse. Zur Ableitung von Informationen zu diesem Parameter ist die Entmischung des Signals, welches sich aus den Parametern aus Gleichung 3.13 zusammensetzt, notwendig. Die Zusammenhänge zwischen den Parametern werden mittels Rückstreumodellen beschrieben, welche theoretischer, empirischer oder semi-empirischer Natur sein können. Ziele der Modelle sind die Ableitung qualitativer und quantitativer Aussagen zur Bodenfeuchte. An dieser Stelle seien exemplarisch für die theoretischen Modelle das Integral Equation Model (IEM, vgl. u. a. FUNG et al. (1992)), das empirische Modell nach DUBOIS et al. (1995) und das semi-empirische Modell nach OH et al. (1992) genannt.

Anhand von zwei Studien soll die Rückstreuung von Böden, welche ähnliche Eigenschaften wie die Böden im Untersuchungsgebiet aufweisen, vorgestellt werden.

Während der bereits im Abschnitt 3.5.1 (S. 47) erwähnten Studie zur Eignung von ERS-1 Daten für das Monitoring von Feuchtgebieten in Südflorida ermittelten KASISCHKE & BOURGEOU CHAVEZ (1997) eine mittlere Rückstreuung von -16,4 dB für trockene, sandige Flächen, die einen geringen Anteil an Gras und anderer krautiger Vegetation aufweisen. Die niedrige Rückstreuung der sandigen Böden während der Trockenzeit resultiert aus einer geringen Dielektrizitätskonstante und einer verhältnismäßig glatten Oberfläche, was zu einer geringen Oberflächenstreuung führt. Diese Flächen sind nur in sehr feuchten Jahren von der Überschwemmung betroffen, weisen aber in der Phase der Überschwemmung einen gestiegenen Anteil an Bodenfeuchte auf.

Die kalkreichen Mergelböden<sup>1</sup> hingegen blieben auch während der Trockenzeit durchfeuchtet. Die Rückstreuung dieser Flächen, welche ebenfalls eine Gras- und krautige Vegetations-

<sup>1</sup> Mergel: Gemisch aus Kalk und Ton (LESER, 2010)

schicht besitzen, ist in der Trockenzeit mit -9,3 dB deutlich höher als die von sandigen Böden. Dies liegt in der Bodenfeuchte sowie in der im Vergleich zu den sandigen Flächen höheren Oberflächenrauigkeit begründet.

Beide Böden haben während der Überschwemmung eine ähnliche mittlere Rückstreuung von -11,3 dB für sandige und -11,0 dB für mergelige Böden. Durch die Zunahme an Bodenfeuchte in den sandigen Böden erhöht sich der Anteil der Oberflächenstreuung. Die Abnahme der Rückstreuung mergeliger Böden von -9,3 dB auf -11,0 dB erklären KASISCHKE & BOURGEAU CHAVEZ (1997) mit der Reduzierung der Oberflächenstreuung aufgrund des überschwemmten Untergrunds.

BAUP et al. (2007) untersuchen die Signatur der Böden der Gourma-Region östlich vom Nigerbinnendelta in Mali mittels multitemporaler ASAR-Daten, aufgenommen im Image (IM), Wide Swath (WS) und Global Monitoring (GM) Modus.

Die Sahelböden zwischen den Isohyeten mit Jahresniederschlägen zwischen 500 mm und 150 mm sind durch lange Trockenzeiten und kurze Regenzeiten zwischen Juni und Ende September geprägt. Es treten vereinzelt Bäume und Sträucher auf, jedoch sind insbesondere während der Trockenzeit die Böden überwiegend frei von grüner Vegetation. Aufgrund der fehlenden Vegetationsschicht wird die Rückstreuung zu dieser Zeit des Jahres primär von der Oberflächenrauigkeit und von der Topographie des Geländes bestimmt.

Die Region befindet sich in einem großen Sedimentbecken und besteht aus Sandstein- und Schieferböden. Dabei dominieren sandige und felsige Böden, Lehm- und Gleyböden sind weniger dominant. Die sandigen Böden haben unter allen Aufnahmemodi, welche sich durch verschiedene geometrische Auflösungen, Einfallswinkel und Polarisierungen unterscheiden, nur eine geringe Rückstreuung. Die Rückstreuung ist während der Trockenzeit gering, aber stabil bei -13 dB. Mit der Regenzeit erhöht sich die Bodenfeuchte und die Vegetation wird ausgeprägter. Dies führt zu einer Steigerung der Rückstreuung auf bis zu -9 dB. Die Rückstreuung sandiger Böden variiert somit über das Jahr um 3 bis 4 dB. Die Unterschiede zwischen den Rückstreuungskoeffizienten der HH- und VV-polarisierten Aufnahmen liegen für dieses Gebiet bei maximal 1 dB. Eine Ausnahme bildeten flache Lehm Böden, die nur eine spärliche Vegetation aufweisen. Diese Bereiche unterschieden sich in den beiden Polarisierungen bei einem Einfallswinkel von ca. 30° deutlich um 3 dB. Für einen Einfallswinkel von 23° zeigte die multitemporale Analyse der Daten, dass felsige Böden die geringste Rückstreuvariation über ein Jahr aufzeigen.

### 3.5.3 Rückstreuverhalten von Gewässerflächen

Die folgende Betrachtung der Abbildung von Wasserflächen in SAR-Aufnahmen bezieht sich ausschließlich auf eisfreie Binnengewässer. Die Detektion von offenen Wasserflächen (Fließ- und Stillgewässer), deren obere Wasserschicht frei von Vegetation ist, mittels SAR-Daten basiert auf der Annahme einer glatten Oberfläche. Die Rückstreuung von ungestörten Gewässern, deren Wasserfläche nicht durch Wind aufgeraut ist, ist für alle Wellenlängen gering. Die ruhige Wasseroberfläche erscheint für die Wellenlänge glatt, sodass die Strahlung an der Oberfläche gerichtet reflektiert wird (vgl. Abbildung 3.8). Entsprechend werden Wasserflächen in SAR-Aufnahmen dunkel dargestellt und heben sich deutlich von anderen Oberflächen ab (siehe u. a. LEWIS & HENDERSON, 1998; MASON et al., 2007).

Neben der geringen Rückstreuung sind Form, Größe und Kontext entscheidende Parameter für die Detektierbarkeit von Wasserflächen. Insbesondere die Form – der linienförmige

Verlauf von Flüssen bzw. die überwiegend runde Form natürlicher Seen und Gewässer – hilft, diese innerhalb der SAR-Aufnahme zu erkennen (LEWIS, 1998). Auch die Struktur der Umgebung beeinflusst die Detektierbarkeit von Wasserflächen erheblich. So hat HENDERSON (1995) beobachtet, dass in Landschaften, bestehend aus großflächigen Elementen oder aus einer einfachen Mischung von verschiedenen Landbedeckungen, Wasserflächen besser gefunden werden können als in Umgebungen, die stark strukturierte, unregelmäßig verteilte Landschaftselemente aufweisen. Der Kontrast zwischen Wasser- und Landflächen wird durch das Vorkommen von Bereichen mit ebenfalls geringer Rückstreuung, wie beispielsweise Sanddünen, offenen Böden bzw. Böden mit geringer Vegetation, geschwächt. Diese Bedingungen, welche in semi-ariden Gebieten vorkommen, führen zu einer erschwerten Detektion von Wasserflächen. In Gebieten mit einer ausgeprägten Topographie können zusätzlich auch Radarschatten die Klassifikation von Wasserflächen beeinträchtigen.

Zur Abgrenzung von Flussterrassen spielt zudem die Blickrichtung des Sensors eine Rolle. Verläuft eine ausgeprägte Flussterrasse parallel zur Flugrichtung, wird der Hang als linienförmiges Element in helleren Grauwerten abgebildet. Der dem Sensor zugewandte Hang wirkt wie ein Corner-Reflektor und erzeugt eine hohe Rückstreuung. Der dem Sensor abgewandte Teil der Flussterrasse kann, wie in sehr bewegtem Gelände auch, hingegen im Radarschatten liegen (LEWIS, 1998).

LEWIS (1998) schätzt, dass der Durchmesser des Gewässers rund dreimal größer sein muss als die räumliche Auflösung der Daten, damit die Wasserfläche detektiert werden kann. HENDERSON & LEWIS (2008) geben eine Mindestgröße von 200 m x 200 m für satellitengestützte SAR-Aufnahmen an.

Einige Ergebnisse zur Wasserdetektion in unterschiedlichen Untersuchungsgebieten werden im Folgenden vorgestellt.

BAGHDADI et al. (2001) bestätigen für das Feuchtgebiet „Mer Bleue“ in Kanada die geringe Rückstreuung von Wasserflächen in allen polarimetrischen C-Band Aufnahmen. Unabhängig von der Polarisation besitzen die offenen, ruhigen Wasserflächen die niedrigsten Rückstreuwerte, sodass eine sehr gute Unterscheidung zu allen anderen Oberflächenbedeckungen erreicht werden konnte. Mit Hilfe eines zweistufigen Schwellwertverfahrens, basierend auf den kreuzpolarisierten und HH-Bildern, konnten für alle Aufnahmezeitpunkte die Wasserflächen ermittelt werden. Der im ersten Schritt gesetzte Schwellwert in der kreuzpolarisierten Aufnahme variiert zwischen kleiner -9 dB und -6 dB. Der zweite Schwellwert in der HH-Aufnahme bleibt bei kleiner/gleich -10 dB über die drei Aufnahmezeitpunkte stabil.

SMITH et al. (1995) demonstrieren anhand des Verlauf des Iskut Rivers in British Columbia (Kanada) ebenfalls erfolgreich die Detektion von Gewässern in ERS-1 Aufnahmen mittels Schwellwert. Dabei kann der Flussverlauf bei einem Schwellwert von -10,5 dB aus den multitemporalen C-Band Daten extrahiert werden. SMITH et al. (1995) begründen die räumlich und zeitlich konstanten Rückstreuwerte mit der hohen Fließgeschwindigkeit des Flusses. Aufgrund der eigenen Geschwindigkeit ist der Fluss nicht so anfällig für die herrschenden Windbedingungen.

Die Rückstreuung der Wasserflächen verändert sich u. a. durch den vorherrschenden Wind. Die räumlich und zeitlich unterschiedlichen Windkonditionen während einer bzw. zwischen mehreren Aufnahme wirken sich auf die Rückstreuung der Gewässer aus. Die Aufrauung des Wassers kann demnach an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Flusslaufes auftreten, insbesondere bei breiteren Flussläufen und geringen Fließgeschwindigkeiten. Die Rückstreuung von Wasserflächen kann somit zwischen sehr dunklen und mittleren Grauwerten variieren

(SMITH et al., 1996). Neben dem Wind erhöhen auch aus dem Wasser ragende Pflanzen und das Vorhandensein von im Wasser treibender Unterwasservegetation die Rückstreuung eines Gewässers (MASON et al., 2007; LEWIS, 1998).

Basierend auf den SAR-Daten einer Befliegung durch das USGS konnten manuell Gewässer, die eine Größe von 20 ha und mehr aufwiesen, mit einer Genauigkeit von mindestens 95 % in den HH-polarisierten Aufnahmen detektiert werden. Der Kontrast zwischen Wasserflächen und angrenzenden Landbedeckungen trat bei kurzwelligeren X-Band Aufnahmen deutlich hervor. HENDERSON (1995) betont ebenfalls, dass neben der Form und Größe die Umgebung und der Kontext eine entscheidende Rolle bei der Detektierbarkeit spielen. Für andere Untersuchungsgebiete, wie für die Überschwemmungsgebiete des Flusses Bâ-Oulé in der Elfenbeinküste, konnten offenes Wasser und überflutete Bereiche deutlich von nicht überfluteten Bereichen sowohl für C- als auch für L-Band Aufnahmen (HH-Polarisation) unterschieden werden (VAN DE GIESEN, 2000).

Das Fraunhofer-Kriterium (siehe Gleichung 3.9) zeigt, dass bei der Kombination aus langer Wellenlänge und großem Einfallswinkel der Grenzwert zwischen glatter und rauer Oberfläche größer wird. Wiederum wird die Wahrscheinlichkeit, dass sich innerhalb des aufgenommenen Gebietes weitere Landbedeckungen befinden, deren Oberflächen für die Mikrowellen als glatt empfunden werden, bei kurzwelligeren Aufnahmen gesenkt.

Verschiedene multipolarimetrische Auswertungen zeigen, dass die Wahl der Polarisation nur einen geringen Einfluss auf die Rückstreuung von Wasserflächen ausübt (vgl. u. a. BAGHDADI et al., 2001). Vielmehr wirken sich große (ca.  $45^\circ$ ) oder auch sehr kleine (ca.  $15^\circ$ ) Einfallswinkel positiv auf den Kontrast aus (SWART et al., 2006).

#### Zwischenzusammenfassung

Basierend auf den vorgestellten Studien können für die Aufnahme von Feuchtgebieten mittels SAR folgende Präferenzen der drei Systemparameter zusammengefasst werden:

- C-Band Aufnahmen eignen sich für Feuchtgebiete mit überwiegend krautiger Vegetation. Kommen in dem Untersuchungsgebiet zusätzlich bewaldete Flächen vor, ist eine Kombination aus C- und L-Banddaten für die Trennung der beiden und die Abgrenzung zu anderen Landbedeckungen von Vorteil. Wasserflächen treten häufig in L- und C-Bandaufnahmen aufgrund der geringen Rückstreuung deutlich hervor. Kurzwelligere Aufnahmen können jedoch eine Kontrastverbesserung zwischen den Gewässern und angrenzenden Flächen bewirken.
- Als Polarisation wird HH gegenüber VV für das Monitoring von Feuchtgebieten bevorzugt. Es zeigte sich, dass in einigen Fällen eine Kombination von verschiedenen Polarisationen günstiger ist als einfach polarisierte Aufnahmen. Auf die Rückstreuung von Wasserflächen und teilweise von Böden wirkt sich die Polarisation nicht entscheidend aus.
- Die geeignete Größe des Einfallswinkels scheint mit dem Untersuchungsgebiet zusammenzuhängen. Radaraufnahmen mit mehreren Einfallswinkeln tragen nicht immer zur Erhöhung der Genauigkeit bei, insbesondere nicht bei Zielen mit einer starken Oberflächenrauigkeit. Können jedoch mittels Aufnahmen in verschiedenen Einfallswinkeln unterschiedliche Reflexionen an einer Oberfläche hervorgerufen werden, wie z. B. eine gerichtete Reflexion an den Wasseroberflächen, so verbessern diese Informationen deren Detektierbarkeit (HENDERSON & LEWIS, 2008).

Die Komplexität des Untersuchungsgebietes nimmt entscheidenden Einfluss auf die Auswertung der SAR-Daten. Je weniger Landbedeckungen vorhanden sind, desto höher ist die Klassifikationsgenauigkeit, bzw. je komplexer die Landschaft ist, desto schwieriger wird die Klassifikation. Aufgrund der vorliegenden einkanaligen Daten und deren Mehrdeutigkeitsproblematik ist für die Auswertung der Daten das Verständnis für die hydrologischen Abläufe im Untersuchungsgebiet und für die daraus resultierenden Landbedeckungen bzw. deren Rückstreuverhalten unter den gegebenen Systemparametern erforderlich.

Aufgrund der hohen zeitlichen Dynamik der hydrologischen Prozesse unterliegen die Flächen im Untersuchungsgebiet einem starken Wandel über das Jahr, was sich in einer zeitlichen Variation der Rückstreuung widerspiegelt. Um zunächst dieses Verständnis für die saisonalen Veränderungen zu erlangen, werden in einem ersten Schritt multispektrale Daten sowie weitere Zusatzdaten (z. B. Kartenmaterial) ausgewertet, um in einem zweiten Schritt die erworbenen Erkenntnisse zu den Landbedeckungen über den Verlauf eines hydrologischen Jahres auf die Rückstreuung in den SAR-Daten anzuwenden.



## 4 Datenaufbereitung und Voranalyse

Eine Möglichkeit, die Klassifikationsgüte zu steigern, ist die Einbeziehung zusätzlicher Objektattribute. Dies können typische Attribute wie die Größe oder Form des Objektes sein oder Informationen aus externen Quellen. Gebräuchliche Zusatzdaten sind Karten mit unterschiedlichsten Inhalten, digitale Geländedaten oder andere geographische Informationen. Die Aufnahmezeitpunkte der SAR-Szenen erstrecken sich über zwei Dekaden. Da keine zeitnah aufgenommenen Referenzdaten von dem Untersuchungsgebiet vorliegen, werden multispektrale Aufnahmen herangezogen. Das Heranziehen von Kartenmaterial und multispektralen Daten ist für diese Arbeit von großer Bedeutung, da keine Ortsbegehungen durchgeführt werden konnten. Insbesondere die zeitnahen multispektralen Aufnahmen ermöglichen es, einen Zusammenhang zwischen der Landbedeckung und den Rückstreuwerten herzustellen. Aufgrund der vertrauten Abbildung in multispektralen Daten erleichtern diese Aufnahmen die Interpretation und Auswertung der SAR-Bilder.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird die Aufbereitung der verwendeten zusätzlichen Daten und der für die Klassifikation genutzten Informationen vorgestellt. Im Anschluss werden die durchgeführten Schritte zur Aufbereitung der SAR-Daten, welche die radiometrische Kalibrierung und die Speckle-Reduzierung umfassen, sowie deren Voranalyse zusammengefasst. Die Bildanalyse erfolgt unter Zuhilfenahme der zuvor aufbereitenden Zusatzdaten. Ziel der Analyse ist es, die vorhandenen Landbedeckungen sowie die Variation der Rückstreuung über ein Flutereignis zu erfassen. Der Vergleich zwischen den Zusatzdaten und den SAR-Daten ist ein wichtiger Schritt zur Erstellung des Klassifikationsschemas.

Der Anhang A.4 enthält eine Übersicht über die Lage einiger geographischen Objekte bzw. Gebiete im Untersuchungsgebietes, auf die sich im Folgenden bezogen wird.

### 4.1 Zusatz- und Vergleichsdaten

Mit dem Ziel der Verbesserung des Ergebnisses können Zusatzdaten vor, während und nach der Klassifikation zugefügt werden. Werden die Daten vor der Klassifikation einbezogen (*stratification*), geschieht dies mit dem Ziel, kleine homogene Bereiche zu schaffen oder bereits eine Trennung spektral ähnlicher Objekte vorzunehmen. Die Trennung in unterschiedliche Bereiche erfolgt nicht stetig, weshalb sie einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat. Bei der Vorabunterscheidung in verschiedene Bereiche muss beachtet werden, dass die Aufteilung unabhängig von den gemessenen Daten erfolgt. Kommen die Zusatzdaten nach der Klassifikation (*postclassification sorting*) zum Einsatz, werden die Informationen zum Verfeinern verwendet, z. B. können mittels der Zusatzdaten Pixel problematischer Klassen unterschieden werden. Durch das Einbeziehen der Zusatzdaten in die Klassifikation an sich (*classifier operations*) wird die Anzahl der Merkmale (Attribute) oder die Anzahl der Kanäle erhöht. Die meisten Zusatzdaten besitzen keine Normalverteilung, welche jedoch für statistische Ansätze wie die Maximum-Likelihood Klassifikation die Voraussetzung darstellt (HUTCHINSON, 1982; CENTENO, 1998).

### 4.1.1 Kartenmaterial

Die topographischen Karten des staatlichen *Institut géographique national* (IGN) in Frankreich liegen im Maßstab 1:200 000 für das Binnendelta als Bilddaten digital vor. Die vier betreffenden Kartenblätter (siehe Tabelle 4.1) wurden um 1956 erstellt und zum Teil in den 70er Jahren aktualisiert. Die Karten basieren auf einer Reihe von Luftbildern, die in den Jahren zuvor aufgenommen wurden. Während der Befliegung war die Überschwemmung sehr großflächig, sodass das Ausmaß der Überschwemmungsfläche der Karte für ein ausgedehntes Flutereignis steht (ZWARTS & GRIGORAS, 2005). Auf den Karten sind die Ausmaße der Überschwemmungen für ein vollständiges Flutereignis verzeichnet. Im Vergleich zu den Satellitenbilddaten ist zu beachten, dass darin Momentaufnahmen festgehalten werden, die nicht dem gesamten Ausmaß des Flutereignisses entsprechen müssen (ZWARTS, 2010). Zudem waren zu dem Zeitpunkt der Aufnahmen größere Staudämme, wie beispielsweise der Sélingué-Damm, noch nicht in Betrieb. Die Ausmaße für ein durchschnittliches Flutereignis werden als geringer eingeschätzt.

Kartenname	Jahr
Carte Physiogéographique de la République du Mali	
Feuille ND-30-XIV (Mopti)	1972
Feuille ND-30-XV (Bandiagara)	1957
Feuille ND-30-XXI (Niafunké)	1956
Feuille ND-30-XXI (Sa)	1971

**Tabelle 4.1:** Überblick topographischer Karten vom Nigerbinnendelta in Mali (IGN)

Die Kartenblätter enthalten die Landbedeckungen sowie -nutzungen des Binnendeltas. Nach der Vektorisierung wurden die Klassen der topographischen Karte zu den vier Klassen Boden, offenes Gewässer, Überschwemmungsbereich und Grasland mit dominierendem Strauchbestand im Überschwemmungsbereich zusammengefasst. Neben den Überschwemmungsbereichen sind in den Karten Bereiche extra gekennzeichnet, die als Reisfelder bzw. als Anbauflächen sowie zur Anpflanzung von Bäumen bzw. Sträuchern genutzt werden.

Die Extraktion von Anbauflächen bzw. die Kartierung von Landnutzungskarten im Allgemeinen gestaltet sich in den semi-ariden Gebieten aus Satellitenbilddaten schwierig, denn die Vegetationsdichte ist in semi-ariden Gebieten nicht sehr hoch, wodurch das Signal durch den darunter liegenden Boden beeinflusst wird. Die Anbauflächen unterscheiden sich nur gering von der natürlichen Vegetation. Zudem ist die Größe der Anbauflächen üblicherweise gering, z. B. erreichen Reisfelder innerhalb des Binnendeltas selten Ausmaße von mehr als 2 km<sup>2</sup> (TURNER & CONGALTON, 1998). Da die Landnutzung sich nicht auf Basis des vorhandenen Datenmaterials bestimmen lässt, erfolgt bei der Klassifikation keine Unterscheidung in landwirtschaftlich genutzte Flächen. Je nach Lage wurden die mit Landnutzung deklarierten Flächen in den topographischen Karten zu den Klassen Überschwemmungsbereich oder Grasland mit dominierendem im Überschwemmungsbereich eingeordnet.

Neben den topografischen Karten liegen noch eine hydrologische Karte (PONCET & TROUBAT, 1994a) sowie eine morphologische Bodenkarte (PONCET & TROUBAT, 1994b) im Maßstab 1:500 000 vom *Institut de recherche pour le développement* (IRD) vor. Die Karten wurden u. a. zur Klassenbeschreibung genutzt.

Aus den frei verfügbaren digitalen Höhenmodell des USGS aus der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-3) wurde eine Maske erstellt, welche Bereiche über 270 m ü. NN im Untersuchungsgebiet enthält. Das SRTM-3 besitzt eine Auflösung von 90 m x 90 m. Nach der Maskierung mit Hilfe des genannten Schwellwertes wurden vereinzelt auftretenden Pixel innerhalb des Deltas mittels Filterung entfernt, sodass innerhalb der Überschwemmungsfläche keine Höheninformationen erhalten sind und nur die Erhöhungen zum Bandiagara-Plateaus und vereinzelt Bereiche der Dünen in der Maske enthalten sind. Die Maske wird während der Klassifikation zur Zuordnung dieser Erhöhungen verwendet.

#### 4.1.2 Aufbereitung der multispektralen Daten

Die multispektralen Aufnahmen werden für den Aufbau der Vergleichsbasis herangezogen. Konnten keine zeitnah aufgenommenen Daten gefunden werden, wurde alternativ nach Aufnahmen im jeweiligen Überflutungszyklus aus anderen Jahren gesucht. Des Weiteren werden die Daten benutzt, um die Ausbreitung der Überschwemmungsflächen für verschiedene Pegelstände zu ermitteln. Die Datenrecherche erfolgte mittels der Schnittstellen *Earth Science Data Interface* (UNIVERSITY OF MARYLAND, 1997–2010) und *EarthExplorer* (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2012). Limitiert wurde die Anzahl der gefundenen Bilddaten durch die vorhandene Bewölkung. Wolkenfreie Landsat-Aufnahmen aus der Mitte der 90er Jahren, die frei zur Verfügung stehen, konnten nicht gefunden werden.

Die Aufnahmen stammen aus der Landsat-Reihe von dem Multispectral Scanner System (MSS), Thematic Mapper (TM) und Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Das Untersuchungsgebiet im zentralen Teil des Binnendeltas wird von dem Path 197 Row 049 und 050 abgedeckt. Tabelle A.2 im Anhang gibt einen Überblick über die Aufnahmezeitpunkte und die jeweils abgedeckte Fläche des Untersuchungsgebietes.

Vor der Verarbeitung der multispektralen Daten wurden diese atmosphärisch korrigiert. Die Korrektur basiert auf dem MODTRAN-Strahlungstransfermodell, welches die Koeffizienten für die in der Korrektursoftware FLAASH verwendeten Gleichungen ermittelt. In Abhängigkeit von der geographischen Breite des Untersuchungsgebietes und den Aufnahmezeitpunkten wurde die Modellatmosphäre „Tropical“ verwendet (ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS, 2009). Anschließend wurden die folgenden Indices berechnet, welche zur Unterteilung der Überschwemmungsflächen in offenes Gewässer, Vegetation und überschwemmte Flächen verwendet wurden.

Um die Präsenz von offenen Wasserflächen in multispektralen Aufnahmen hervorzuheben, wird auf die normierte Differenz zweier Kanäle zurückgegriffen. Der Normalized Difference Water Index (NDWI) wird unterschieden in die Berechnung nach MCFEETERS (1996) und GAO (1996), welche auf verschiedenen Bandkombinationen basieren. Der NDWI nach MCFEETERS (1996) berechnet sich wie folgt:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (4.1)$$

Im grünen Band wird die maximale Reflexion der Wasserflächen gemessen. Dabei wird der Umstand genutzt, dass Wasserflächen im Vergleich zu Boden und Vegetation geringe Reflexanzen im nahen Infrarot besitzen. Die entsprechenden Bänder für Landsat TM und ETM+ Aufnahmen sind Kanal 2 (grün) und 4 (NIR) bzw. 1 (grün) und 3 (NIR) für MSS (siehe Anhang

A.3 bis A.5 für eine Übersicht über die Bandbreiten der Sensoren). Als Schwellwert zur Abgrenzung von Wasser- und Nicht-Wasserflächen schlägt MCFEETERS (1996) Null vor, wonach Pixel mit positiven Werten Wasserflächen und entsprechend mit Werten kleiner/gleich Null Nicht-Wasserflächen entsprechen. Der Schwellwert wurde für die verschiedenen Aufnahmen angepasst.

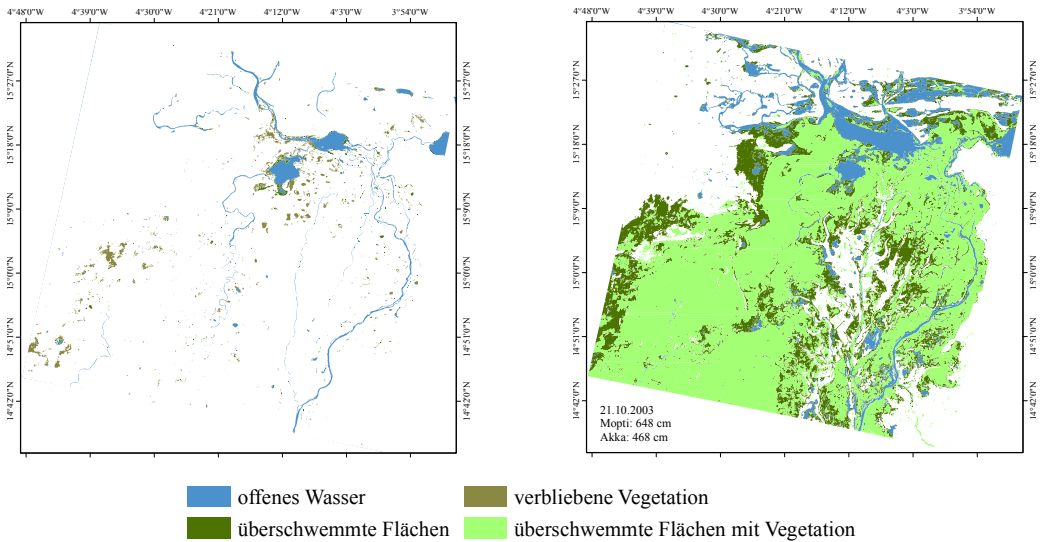
Der gleichnamige NDWI nach GAO (1996) wird, nach dem gleichen Prinzip wie Gleichung 4.1, jedoch aus zwei Bändern des nahen Infrarots berechnet. Das Zentrum des Bandes sollte zum einen bei  $0,86 \mu\text{m}$  und zum anderen bei  $1,24 \mu\text{m}$  liegen. Das Ziel ist die Abschätzung des Wassergehaltes in der Vegetationsbedeckung. Aufgrund der geringen Wasserabsorption bei  $1,24 \mu\text{m}$  erhält grüne Vegetation gewöhnlich positive Werte (GAO, 1996). Da für das Untersuchungsgebiet die Wasserflächen an sich von Interesse sind und die Vegetation durch den NDVI erfasst wird, ist der NDWI nach GAO (1996) für diese Arbeit nicht von Interesse. Nachstehende Verweise auf den NDWI beziehen sich aus diesem Grund auf die Berechnung nach MCFEETERS (1996).

Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), basierend auf dem Verhältnis der Differenz zwischen den nahen Infrarot und dem Rot zu deren Summe, ist ein gängiger Vegetationsindex (ROUSE JR. et al., 1974; TUCKER, 1979). Vitale, gesunde Vegetation absorbiert den Großteil der Strahlung im sichtbaren Bereich, reflektiert jedoch stark im nahen Infrarot. Insbesondere das Verhältnis von Rot und nahem Infrarot gibt Aufschluss über den Anteil an photosynthetische aktiver Vegetation (TUCKER, 1979). Der Vegetationsindex variiert, wie der NDWI und der NDPI, zwischen -1 und 1. Aktive Vegetation wird von höheren, positiven Werten repräsentiert.

Zur Detektion speziell von kleineren, trüben Gewässern, wie die Mare in Westafrika, wurde von LACAUX et al. (2007) der Normalized Difference Pond Index (NDPI), basierend auf der normierten Differenz aus dem mittleren Infrarot (Wellenlängenbereich  $1,58 - 1,75 \mu\text{m}$ ) und dem grünen Spektralbereich, entwickelt. Insbesondere in Aufnahmen bei ansteigender Überschwemmung befinden sich am Rande des Überschwemmungsgebietes Flächen bzw. Böden, welche bereits von der Überschwemmung betroffen sind. Die Extraktion dieser Bereiche erfolgte mittels des NDPI, da sich mit diesem Index insbesondere Böden besser von den überschwemmten Bereichen trennen ließen als mit dem NDWI.

Zuerst wurden mit Hilfe des NDWI offene Wasserflächen über einen Schwellwert extrahiert. In einem zweiten Schritt wurden die Vegetationsflächen aus dem NDVI hinzugefügt. Wenn die Aufnahme bei steigender Überschwemmung entstand, wurden noch die Flächen mit steigendem Wassergehalt zu dem Index-Bild hinzugefügt. Mit Hilfe der Index-Bilder lässt sich die Ausbreitung des Flutereignisses in verschiedenen Stadien der Überschwemmung bzw. zu verschiedenen Pegelständen darstellen. Stellvertretend zeigt die Abbildung 4.1 die Index-Bilder für das bereits abgeklungene Hochwasser im März 2003 und die darauf folgende Überschwemmung im Oktober. Der Aufnahmezeitpunkt ist entscheidend dafür, ob das Untersuchungsgebiet von offenem Boden oder von überschwemmten Flächen mit Vegetation dominiert wird.

Die Klasse „offene Gewässer“ der März-Aufnahme wird später mit bei der Klassifikation der SAR-Daten verwendet. Das Gewässernetz der topographischen Karte ist sehr ausgeprägt, wodurch es speziell bei Aufnahmen zur Zeit von Niedrigwasser zu Missverständnissen kommen kann. Da zum Teil sich auch der Verlauf zwischen Karte und Satellitenbildern unterscheidet wird zur Unterstützung der Klassifikation bei Gewässerflächen auf die aus der Landsat-Aufnahme extrahierten Flächen zurückgegriffen.



**Abbildung 4.1:** Ausbreitung der verbliebenden Vegetations- und Wasserflächen im März 2003 und der überschwemmten Flächen im Oktober 2003, Quelle der Landsat-Daten: U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2012)

#### Erstellen der Vergleichsdaten

Aufgrund der Generalisierung in den vorliegenden thematischen Karten sind Satellitenbilder zum Vergleich und Analyse der Landbedeckungen verwendet worden. Durch die Verfügbarkeit zeitnaher MERIS- und Landsat-Aufnahmen wurden die ASAR-Aufnahmen aus dem hydrologischen Jahr 2003/2004 für die Erstellung des Regelwerks zur Klassifikation verwendet. Die ASAR-Aufnahmen erfolgten am 31.10.2003, 05.12.2003 und 19.03.2004 und werden im Folgenden als Oktober-, Dezember- bzw. März-Aufnahmen bezeichnet.

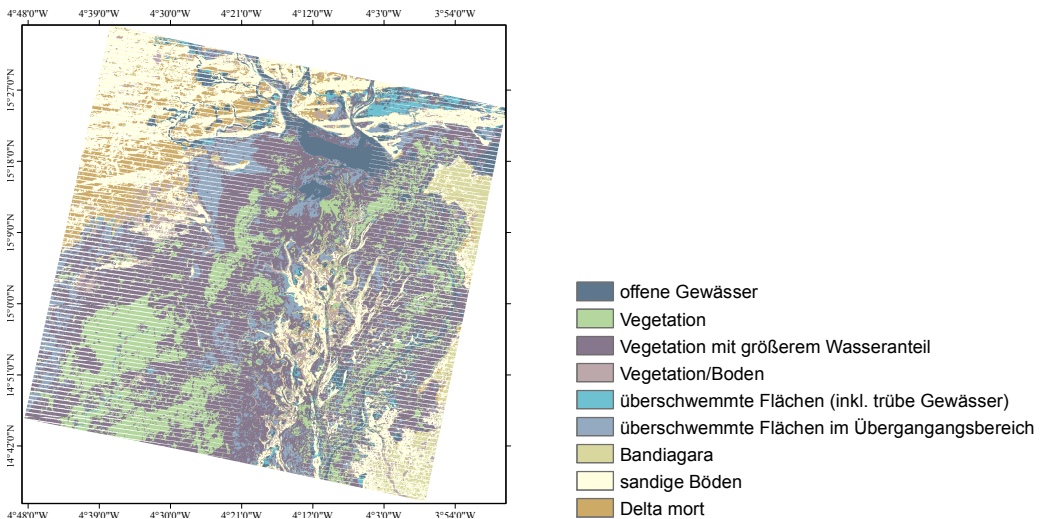
Für den Zeitpunkt der ASAR-Aufnahme vom 31.10.2003 liegen mit zwei zeitnahen Landsat-Aufnahmen vom 22.10.2003 wolkenfreie Vergleichsaufnahmen vor. Die zeitgleich mit der ASAR Dezember-Aufnahme entstandene MERIS-Szene enthält einen großen Anteil an Wolken und besitzt mit 300 m eine deutlich geringere Auflösung, weswegen nach alternativen multispektralen Aufnahmen gesucht wurde. Verwendet wurde eine Landsat-Aufnahme vom 16.12.2000. Für die März-Aufnahme liegt zwar eine überwiegend wolkenfreie MERIS-Aufnahme vor, welche aber aufgrund der geometrischen Auflösung von 300 m nur eingeschränkt für die Evaluierung geeignet ist (ESA, 2000–2012). Als Referenz für die März-Aufnahme wurde die Landsat-Aufnahme vom 12.03.2003 verwendet. Dennoch werden die beiden MERIS-Aufnahmen bei der visuellen Interpretation herangezogen.

Die Landsat-Aufnahmen vom 22.10.2003 wurden nach dem Ausfall des Scan Line Corrector (SLC) Ende Mai 2003 erstellt und enthalten entsprechende Datenlücken. Die Lücken wurden mittels lokaler Histogrammanpassung sowie mit einer Aufnahme vom 16.10.2001, basierend auf der Methode von SCRAMUZZA et al. (2004), geschlossen. Dies diente ausschließlich der Index-Berechnung und der Verbesserung des visuellen Vergleichs.

Für die Evaluierung der SAR-Klassifikation wurden die ausgewählten atmosphärenkorrigierte Landsat-Aufnahmen überwacht klassifiziert. Die Funktionsweise des angewandten Maximum-Likelihood Verfahrens kann den gängigen Lehrbüchern wie KRAUS (1990) und LILLESAND

et al. (2004) oder auch NISCHWITZ et al. (2007) entnommen werden. Da die Klassifikationsergebnisse als Referenz verwendet werden sollen, werden die Klassen so zusammengefasst, dass ein Übertragen der Klassen auf die SAR-Daten möglich ist.

Das Landsat-Mosaik vom 22.10.2003 wird aufgrund der zeitlichen Nähe als Referenzgrundlage für die Genauigkeitsanalyse der ASAR-Aufnahme vom 31.10.2003 verwendet. Für die Klassifikation wurde das atmosphärenkorrigierte, jedoch nicht SLC-korrigierte Mosaik benutzt. Somit werden nur die tatsächlich aufgenommenen Daten für die Genauigkeitsanalyse verwendet.



**Abbildung 4.2:** Ergebnis der Klassifikation der SLC-unkorrigierten Landsat-Aufnahme vom Oktober 2003, Quelle der Landsat-Daten: U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2012)

Die Überschwemmungsfläche wird von einem Wasser-Vegetationsgemisch dominiert; Bereiche mit offenen Böden befinden sich überwiegend außerhalb des Überschwemmungsgebietes. Die für den semi-ariden Raum typischen Böden besitzen überwiegend eine lockere Vegetationsdecke mit nur geringem Anteil an Büschen und Bäumen. Mit Hilfe der Karten des IRD und den Ergebnissen der Literaturstudie in Kapitel 2 können die Böden außerhalb des Überschwemmungsbereiches in drei verschiedene Klassen eingeteilt werden:

- Dünen und Bereiche mit einem hohen Sandanteil („sandige Böden“),
- Bereiche im „Delta mort“, dessen Böden aus einer Mischung von Tongesteinen und Lehm zusammengesetzt sind sowie
- die mit einem Gemisch aus Sand und Lehm sowie Kies bedeckten Ausläufer des „Bandiagara“-Plateaus.

In einem durchschnittlichen Überschwemmungsjahr sind innerhalb des Deltas, während der Überflutung, nur wenige Flächen nicht vom Wasser betroffen. Diese Erhöhungen befinden sich überwiegend entlang der Kanäle des Majo Dembé und des Majo Ranéo. Die Bodenschicht der Erhöhungen ist fast wasserundurchlässig und behindert Wurzeln, diese Schicht zu durchstoßen. In DIALLO (2000) werden diese Erhebungen entlang der Ufer als „Terres exondeés“ – Land oberhalb des Wasserspiegels – bezeichnet. Entlang des Nebenflusses Diaka befinden sich Erhebungen mit einem ebenfalls hohen Reflexionsgrad, welche von TURNER & CONGALTON (1998) als Ortstein (*Hardpan*) gekennzeichnet wurden. Diese verfestigte

Bodenschicht kann von Wurzeln meist nicht durchdrungen werden (LESER, 2010). Diese älteren, entwässerten alluvialen Flächen werden zusammen mit der Klasse der sandigen Böden erfasst.

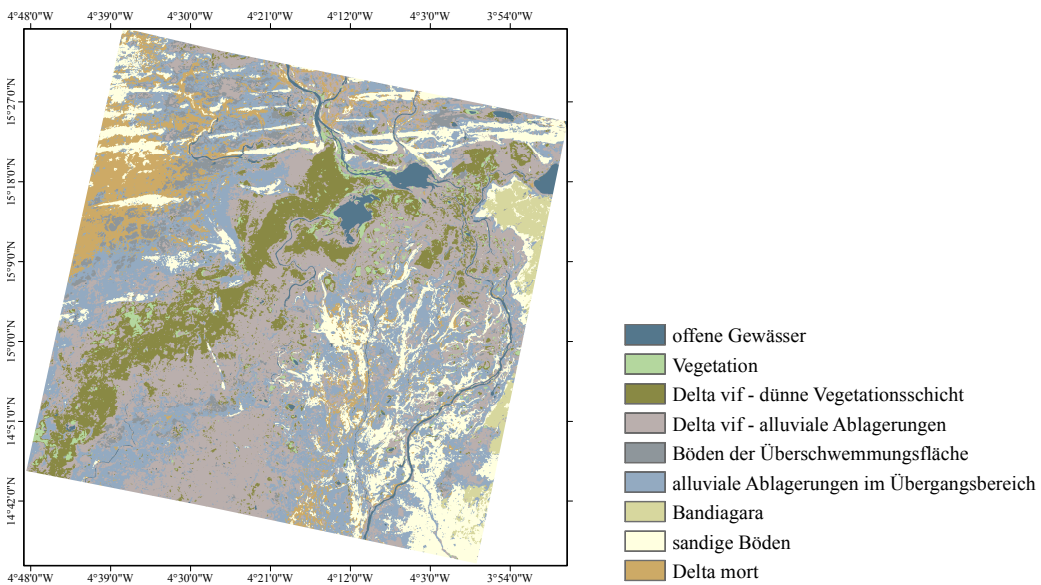
Das spektrale Reflexionsvermögen von Wasser wird von den gelösten und suspendierten Inhaltsstoffen sowie der Wassertiefe bestimmt. In den Binnengewässern variiert die Zusammensetzung von Phytoplankton, gelösten organischen Stoffen und Schwebstoffen, wodurch Gewässerflächen unterschiedlich abgebildet werden. Die Reflexionseigenschaften von klarem Wasser nehmen im sichtbaren Bereich mit zunehmender Wellenlänge ab. Der Reflexionsgrad erhöht sich jedoch bei trüben und seichten Gewässern. In flachen Gewässern kann zusätzlich der Seeboden, in Abhängigkeit von den Stoffen im Wasser, das gemessene Signal erhöhen (KRAUS & SCHNEIDER, 1988; SCHRÖDER, 2004). Mit steigender Trübung der Wasserflächen erscheinen diese Flächen in der CIR-Darstellung von Schwarz über Dunkelblau, Blau, Hellblau bis hin zu Weiß (MOORE, 1980). Basierend auf dem verschiedenen Reflexionsverhalten der Gewässer wurden zunächst vier Wasserklassen erstellt. Da sich die Wasserflächen in den SAR-Daten hauptsächlich anhand der Oberflächenrauigkeit abbilden, wurden die ursprünglich verschiedenen Gewässerklassen zu den Klassen „offene Gewässer“ und „überschwemmte Bereiche (inkl. trüber Gewässer)“ zusammengefasst.

Die Pegelstände der Station Mopti sanken zwischen dem 22.10. und 31.10.2003 von 647 cm auf 640 cm. Die Welle hatte in Mopti bereits ihr Maximum überschritten, in Akka jedoch noch nicht. Dort stiegen die Pegel in dem Zeitraum um 16 cm. Verglichen mit der Dezember-Aufnahme ist im Oktober die maximale Überschwemmung noch nicht erreicht worden. Das Ausmaß der Überschwemmungsflächen der ASAR-Aufnahme kann demnach größer als in der Landsat-Aufnahme ausfallen, worauf bei der Genauigkeitsanalyse geachtet werden muss.

Die Überschwemmungsfläche mit der vorhandenen Vegetation wurde in Abhängigkeit vom NDVI in zwei Klassen unterschieden (siehe Abschnitt 4.3.2, S. 80). Der Schwellwert für die Unterscheidung in Vegetation und Nicht-Vegetation liegt in der Oktober-Aufnahme bei 0,35. Die Mischung aus Wasser und Vegetation dominiert während der Überschwemmung, insbesondere in den Bereichen südlich der Seenplatte. Um das Mischverhältnis von Vegetation und Wasser quantitativ zu beschreiben, wurde das zeitnah entstandene Landsat-Mosaik im Hinblick auf diese Flächen spektral entmischt. Bei einer spektralen Entmischung wird in einem ersten Schritt eine Minimum Noise Fraction Transformation (MNF; zwei nacheinander durchgeführten Hauptkomponenten-Transformationen, siehe 4.3.1) durchgeführt. Die ersten drei Bänder der MNF-Transformation dienen als Basis für die Berechnung des Pixel-Purity-Indexes. Nach der Transformation sind die Dateninformationen gebündelt in den ersten Bändern enthalten, wohingegen die letzten Bänder stärker vom Rauschen bestimmt sind. Die selektierten, spektral reinsten Pixel wurden als Grundlage für die Wahl der Endmember „Boden“, „Wasser“ und „Vegetation“ verwendet (RESEARCH SYSTEMS INC., 2003). Bei der spektralen Entmischung wird für jedes Pixel der prozentuale Anteil des jeweiligen Endmembers (Abundanz) am Signal ermittelt. Nach der Unterteilung der Vegetationsbereiche durch den NDVI werden die Ergebnisse der spektralen Entmischung zur Beschreibung des Vegetations- bzw. Wasseranteils verwendet. In der Klasse „Vegetation“ überwiegt der Anteil an Vegetation (größer 50%) gegenüber dem des Wassers. Das umgekehrte Verhältnis wird in der Klasse „Vegetation mit größerem Wasseranteil“ repräsentiert. Der Anteil an Bodenpixeln spielt in beiden Klassen keine entscheidende Rolle. Das Ergebnis der spektralen Entmischung dient lediglich der Unterstützung der Interpretation bzw. Klassenbeschreibung, sodass an dieser Stelle keine detaillierte Ergebnisanalyse erfolgt.

Die klassifizierte Dezember-Aufnahme besitzt dieselben Klassen wie die Oktober-Aufnahme. Sowohl bei der Überschwemmung 2003/2004 als auch im Vergleichsjahr 2000/2001 gehen die Pegelstände in Mopti und Akka im Dezember bereits wieder zurück. Der Flächenanteil an Vegetation, insbesondere entlang des Nigers, hat sich vergrößert. An den Flächen am Rand des Überschwemmungsgebietes geht der Anteil an Wasser zurück, sodass eine Mischung aus Boden und Vegetation in diesen Bereichen auftritt.

Durch den Rückgang des Wassers unterliegen die Landbedeckungen des Deltas großen Schwankungen. Die Landsat-Aufnahme vom 12.03.2003 zeigt das Binnendelta zur Zeit des Hochwasserrückgangs. Die Hochwasserwelle war zur Zeit der Aufnahmen im März 2003 sowie 2004 bereits abgeklungen. Der mittlere monatliche Pegelstand Moptis betrug 2002/2003 nur 245 cm, 2003/2004 hingegen 316 cm. Die Klassifikation basiert, wie auch bei der Überschwemmungsaufnahme, auf dem atmosphärenkorrigierten Mosaik der beiden Landsat-Szenen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4.3.



**Abbildung 4.3:** Ergebnis der Klassifikation der Landsat-Aufnahme vom März 2003, Quelle der Landsat-Daten: U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2012)

Die Bodenklassen, welche sich außerhalb des Überschwemmungsgebietes befinden, können aus der Klassifikation der Oktober-Aufnahme übernommen werden. Ergänzt werden die Böden durch vormaliges Schwemmland, welches Flächen abdeckt, die im Oktober, bevor sie überschwemmt waren, noch zu der Klasse Delta mort gehörten. Die Übergangsbereiche zwischen den Erhebungen entlang der Flüsse im zentralen Teil und in den Senken des Delta vif sowie an der Grenze zum Delta mort bestehen aus lehmigem Ton bzw. neigen zu Vertisolen (PONCET & TROUBAT, 1994b). Die gegenwärtigen alluvialen Ablagerungen im Norden des Untersuchungsgebietes, überwiegend zwischen den Dünen, bestehen nach PONCET & TROUBAT (1994b) aus vergleyten Tonen.

Der zentrale Teil des Überschwemmungsgebietes im Delta vif wurde in zwei Klassen unterteilt, zum einem in Bereiche, welche noch eine dünne Vegetationsschicht („Delta vif – dünne Vegetationsschicht“) besitzen, und zum anderen in Bereiche, die bereits trockengefallen sind



(„Delta vif – alluviale Ablagerungen“). Die Böden zeichnen sich durch vergleyte, alluviale Ablagerungen aus (PONCET & TROUBAT, 1994b).

Der Anteil an dichter Vegetation ist zum Aufnahmezeitpunkt bereits stark zurück gegangen. Es gibt nur noch vereinzelt Flächen, überwiegend in Gewässernähe sowie in den Bereichen zwischen dem Nebenfluss Diaka und den Randflächen am Delta mort, die einen NDVI größer 0,3 aufweisen. Der NDVI bestätigt, dass die Vegetation in der Trockenzeit einer raschen Veränderung unterlegen ist und mit dem Wasser der Anteil an grüner Vegetation nahezu verschwindet (KUSSEROW, 1994; ZWARTS et al., 2005c).

Neben der Oktober- und Dezember-Klassifikation steht nun auch eine klassifizierte Aufnahme vom März 2003 als Vergleich zur Verfügung.

### 4.1.3 Erfassung von Texturmerkmalen

Aufgrund von Mehrdeutigkeiten innerhalb der Aufnahmen wird die Trennbarkeit bestimmter Landbedeckungen erschwert. Der Abschnitt 4.3 dieses Kapitels verdeutlicht das Mehrdeutigkeitsproblem für das Untersuchungsgebiet im Binnendelta. Um die Klassifikation zu verbessern bzw. die Mehrdeutigkeiten zu reduzieren, sind weitere Informationen notwendig. Diese können, wie bereits erläutert, von externen Quellen stammen oder aus den SAR-Daten selbst berechnet werden. Neben dem Grauwert helfen der Kontext und die Textur bei der Identifizierung von Zielobjekten (ULABY et al., 1986). Wie Letzteres quantitativ erfasst werden kann, ist Inhalt dieses Abschnitts.

Der Begriff „Textur“ wird in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet. Die Definition hängt von den einzelnen Anwendungen ab. Verschiedene Autoren verwenden den Begriff unterschiedlich, weshalb eine einheitlich exakte Definition von Textur schwer zu finden ist. „Textur“ stammt aus dem lateinischen *textura* und heißt wörtlich übersetzt „Gewebe“ (BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT, 2012). Im Bereich der Bildverarbeitung verstehen NISCHWITZ et al. (2007) unter der Textur die Oberflächenstruktur. *„Es sind dann künstliche oder natürliche regelmäßige Strukturen, aber auch künstliche oder natürliche unregelmäßige Strukturen gemeint.“* (NISCHWITZ et al., 2007, S. 611) Der Begriff der Textur ist eng mit dem Begriff „Struktur“ (lat. *structura*) verbunden, der Zusammenfügung bzw. Ordnung bedeutet (BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT, 2012). NISCHWITZ et al. (2007) setzen in diesem Zusammenhang Textur mit Oberflächenstruktur gleich. Die Struktur beschreibt die Beziehungen zwischen Objekten und deren Anordnung (NISCHWITZ et al., 2007). Eine ähnliche Definition gibt HANDELS (2009). Er bezeichnet die Textur als *„... eine Struktureigenschaft eines Musters oder Bildbereiches. Typische Texturen sind durch periodisch wiederkehrende Variationen von Grauwerten bzw. Mustern gekennzeichnet.“* (HANDELS, 2009, S. 162)

Durch die Textur werden Rückschlüsse auf die Oberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Objekte gezogen. Bei der Interpretation von Radaraufnahmen nimmt sie Bezug auf den Grad der Rauigkeit bzw. auf die Homogenität einer Fläche. Dabei lässt sich die Textur hinsichtlich der drei Komponenten Mikro-, Meso- und Makro-Textur untersuchen. Mikroskalige Texturen befinden sich in ihrer räumlichen Dimension ähnlich der geometrischen Auflösung der Aufnahme. Die Textur ist zufällig und steht im Zusammenhang mit dem Speckle. Die Textur in diesem Maßstab ist von der Wellenlänge und der Oberflächenrauigkeit abhängig und bestimmt den Grauwert. Meso-Texturen zeigen die natürlichen Variationen bzw. die räumlichen Inhomogenitäten in der Größenordnung von mehreren Auflösungszellen. Diese Texturen zeigen die räumliche Anordnung bzw. eine bestimmte Anordnung von Grauwerten. Ein Beispiel

wäre das Kronendach eines Waldes. Diese Texturinformationen werden insbesondere für die Bildinterpretation herangezogen. Die Makro-Textur zeigt die Grauwertvariationen, die sich über viele Auflösungszellen erstrecken. Die Fläche weist eine gewisse Regelmäßigkeit auf und wird von der vorherrschenden Topographie geprägt. Die Makro-Textur wird zur geomorphologischen und geologischen Interpretation herangezogen (LEWIS & HENDERSON, 1998).

Textur ist die Eigenschaft einer begrenzten Fläche. Aus diesem Grunde spielen sie eine entscheidende Rolle bei der Abgrenzung von verschiedenen Objekten. Durch die Maßstabsunabhängigkeit der Textur, d. h. durch den hierarchischen Aufbau, entstehen unterschiedliche Texturen in unterschiedlichen Skalen (JÄHNE, 1997). Die Wahrnehmung von Textur durch den Menschen erfolgt in der Regel im Kontext, z. B. unter Einbeziehung von Farben oder anderen Texturen, und kann vom menschlichen Auge meist sofort klassifiziert werden. Die erfassten Informationen werden unbewusst für die Bildinterpretation benutzt. Ohne den Kontext sinkt oft die Klassifizierungsrate. Für den Menschen sind die Gerichtetheit sowie die Periodizität und die Komplexität der Textur wesentlich für deren Unterscheidung (HANDELS, 2009).

Die Grundelemente einer Textur bilden die Texel (*Texture Elements*), auch Primitive genannt. Die Elemente einer Textur weisen eine bestimmte Anordnung auf, d. h. es existiert ein Zusammenhang, eine Beziehung zwischen den verschiedenen Primitiven (HANDELS, 2009). Die Elemente können periodisch (künstliche Texturen), quasiperiodisch (sich nur wenig von einem periodischen Vorgang oder einer periodischen Größe unterscheidend) oder zufällig (natürliche Texturen) angeordnet sein.

HANDELS (2009) unterscheidet die Methoden zur Texturanalyse in statistische und strukturelle Verfahren. Bei den *strukturellen Analysemethoden* wird davon ausgegangen, dass die Grundelemente wiederholt in unterschiedlichen Positionen und Orientierungen im Bild auftauchen. Aus der Anordnung dieser Primitiven entsteht die Textur. Die Primitiven haben spezielle invariante Bildeigenschaften, was eine bestimmte Form, ein konstanter Grauwert o. ä. sein kann. Die Textur wird durch ihre Eigenschaften, Verteilungsregeln und gegenseitigen Lagebeziehungen charakterisiert. Es müssen somit nicht nur die Primitiven, sondern auch deren Anordnung definiert werden (HANDELS, 2009).

Natürliche Objekte weisen zumeist nur schwach ausgeprägte, zufällig variierende Texturmuster auf. Sowohl die Identifikation der Primitiven selbst als auch die von deren Wiederholungsmustern ist ein schwieriges Unterfangen, weshalb strukturelle Modelle selten bei nicht-künstlicher Textur angewandt werden. Aus diesem Grunde wird der strukturelle Ansatz nicht weiter verfolgt. Stattdessen wird auf die statistischen Verfahren, welche für die Beschreibung natürlicher Texturen eher geeignet sind, zurückgegriffen.

#### Statistische Verfahren zur Texturanalyse

Der Vorteil der *statistischen Methoden* gegenüber den strukturellen Methoden liegt darin, dass im Voraus kein Wissen über die vorkommende Textur vorhanden sein muss (HANDELS, 2009). Statistische Verfahren sind auf beliebige Bildmuster anwendbar, d. h. sie können allgemein zur quantitativen Beschreibung von Bildstrukturen verwendet werden. Dabei dient die Textur als Maß für die quantitative und räumliche Zusammensetzung der Intensitäten einer Region. Daher stehen diese Verfahren in der Fernerkundung im Vordergrund. In räumlich begrenzten Bildausschnitten werden aus der Bildinformation statistische Parameter ermittelt.

Zu den Texturmerkmalen der *Statistik erster Ordnung* zählen u. a. der Mittelwert, die Standardabweichung und die Schiefe des Histogramms. Die Texturmerkmale basieren auf den lokalen Grauwerten bzw. auf den Informationen des Histogramms, enthalten jedoch keine Informationen über die geometrische Anordnung. Diese Informationen allein sind meist unzureichend für eine zufriedenstellende Charakterisierung der Textur. Nicht nur die Grauwertvariationen, sondern auch deren geometrische Anordnung innerhalb des Bildausschnitts sind bei einer Texturbeschreibung von Interesse (HANDELS, 2009).

Bei der Berechnung von Texturmerkmalen der *Statistik zweiter Ordnung* wird die Anordnung von Grauwertunterschieden mit berücksichtigt. HARALICK et al. (1973) schlagen 14 verschiedene Texturmerkmale vor, welche auf der Häufigkeit des Auftretens zweier Grauwerte in einer definierten Anordnung (Displacementvektor) innerhalb eines Bildbereiches beruhen. Der Displacementvektor beschreibt das räumliche Verhältnis des Pixelpaares durch den Abstand und die Richtung. Die Häufigkeit der Grauwertkombinationen ( $V_{i,j}$ ) wird in einer sogenannten Co-occurrence-Matrix eingetragen. Bevor die einzelnen Texturmerkmale aus der Co-occurrence-Matrix berechnet werden, wird diese mittels der Summe aller Grauwertkombinationen innerhalb des Operatorfensters normalisiert (Gleichung 4.2 links).

$$P_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}} \quad f_9 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\log P_{i,j}) \quad (4.2)$$

Mit Hilfe der normalisierten Matrix werden die verschiedenen statistischen Maße, wie beispielsweise das 9. Merkmal Entropie nach HARALICK et al. (1973) (Gleichung 4.2 rechts), berechnet.

Als zusätzliches Merkmal wurde die Entropie gewählt, welche zur Unterstützung der Segmentierung sowie auch der Klassifikation der jeweiligen Szene berechnet wurde. Je geordneter die Fläche innerhalb des Operatorfensters ist, d. h. je weniger Grauwertkombinationen auftreten bzw. je homogener die betrachtete Region ist, desto geringer ist der Entropiewert. Für die Berechnung des Merkmals wurde eine Fenstergröße von 21 x 21 Pixel verwendet. Das Entropie-Merkmal, basierend auf dieser Fenstergröße, begünstigt die Abgrenzung von größeren Gewässern, wie z. B. Lac Débo. In kleineren Operatorfenstern konnte das statistische Texturmerkmal nicht genügend erfasst werden.

Informationen zu den weiteren Texturmerkmalen, basierend auf Co-occurrence-Matrizen, können bei HARALICK et al. (1973) oder auch HANDELS (2009) nachgeschlagen werden.

## 4.2 Vorverarbeitung der SAR-Daten

Aufnahmen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten sowie von unterschiedlichen Plattformen getätigt wurden, bedürfen vor einer gemeinsamen Auswertung einer Kalibrierung und Koregistrierung. Des Weiteren ist für die vorgesehene segmentbasierte Auswertung der SAR-Daten die Reduzierung des Speckles erforderlich.

Ziel der radiometrischen Kalibrierung ist es, eine Beziehung zwischen der Digital Number (DN) und dem Rückstreuoeffizienten herzustellen. Durch eine Kalibrierung wird die Vergleichbarkeit von Aufnahmen mit unterschiedlichen systemspezifischen Parametern, unterschiedlichen Aufnahmepositionen sowie -zeitpunkten ermöglicht. Bei der *absoluten Kalibrierung* werden

absolute Messwerte, basierend auf den Rückstreukoeffizienten bekannter Ziele, ermittelt. Hierfür sind Referenzwerte notwendig. Somit wird der quantitative Vergleich der Rückstreuung von verschiedenen Sensoren möglich. Absolut kalibrierte Werte werden beispielsweise für die Ableitung von geophysikalischen Parametern benötigt.

Bei einer *relativen Kalibrierung* werden zum einem Einflüsse, die auf dem Einfallswinkel und der Topographie basieren, beseitigt, sodass innerhalb der Aufnahme eine gute radiometrische Genauigkeit herrscht. Der Einfallswinkel wird zwischen Nah- und Fernbereich innerhalb einer Aufnahme flacher. Da die Intensität der Rückstreuung wiederum an den Einfallswinkel gekoppelt ist, kann dieser Intensitätsabfall korrigiert werden. Zum anderem ist bei einer relativen Kalibrierung eine gute relative zeitliche Kalibrierung das Ziel. Dieser Teil der Kalibrierung bezieht sich auf das stabile Funktionieren der Instrumente bzw. auf die Korrektur möglicher Instabilitäten. Dies ist besonders für längere Monitoring-Zeiträume von Bedeutung (BUCHROITHNER & GRANICA, 1997).

Für die Aufgabenstellung eines Monitorings mittels ERS-1/2 und ASAR Aufnahmen, die mittels nahezu identischer Systemparameter erhoben wurden, ist eine relative Kalibrierung der Daten angemessen.

### 4.2.1 Radiometrische Kalibrierung der SAR-Daten

In den vorliegenden Image Mode Daten sind geländebedingte Verzerrungen noch weitgehend unberücksichtigt, denn bei der Transformation von Slant in Ground Range erfolgte die Beschreibung der Erdoberfläche mit Hilfe eines Ellipsoids. Erfolgte eine Aufnahme von bewegtem Gelände, sind größere Versätze im Bild mit Hilfe eines digitalen Geländemodells zu entzerren.

Durch die Aufnahmekonfiguration der SAR-Daten beeinflussen die Geländeneigung und die Geländeexposition sowohl die geometrische (siehe Abschnitt 3.1) als auch die radiometrische Abbildung. In Abhängigkeit von der Topographie und der Sensorposition können gleiche Landbedeckungen, insbesondere in bergigen Regionen, unterschiedliche Rückstreuwerte aufweisen. Mit Hilfe von digitalen Geländemodellen bzw. Oberflächenparametern und Radarrückstreumodellen für die entsprechenden Landbedeckungen können reliefspezifische radiometrische Korrekturen durchgeführt werden (HOLECZ, 1993). Sind Informationen zur Verteilung der verschiedenen Landbedeckungen nicht bekannt, kann auf klassenunspezifische Korrekturmodelle zurückgegriffen werden. Diese Modelle beruhen auf den lokalen, relativen Geländeneigungen, welche sich durch die Parameter lokaler Einfallswinkel, Hangneigung und Exposition zum Sensor beschreiben lassen (HAGG, 1998). Eine Auflistung verschiedener Modelle ist beispielsweise in HAGG (1998) zu finden.

Für die Berechnung der für die Modelle benötigten Oberflächeneigenschaften sind die räumlich geringer aufgelösten Höhenmodelle weniger geeignet, da die Gefahr der Über- oder Unterkorrektur besteht und somit grobe Fehler eingerechnet werden können (HOLECZ, 1993). Die pixelgenaue Überlagerung sowie die Qualität des Höhenmodells sind die entscheidenden Parameter der reliefspezifischen Korrektur (HAGG, 1998).

Sieht man von Ausläufern des Bandiagara-Felsmassivs und den Dünen ab, weist der zentrale Teil des Binnendeltas keine großflächigen markanten Erhöhungen auf, die einer reliefspezifischen radiometrischen Korrektur bedürfen. Der Überschwemmungsbereich selbst besitzt nur ein geringes Gefälle (MCCARTHY, 1993). Deshalb können für die Kalibrierung folgende Annahmen bezüglich des lokalen Einfallswinkels  $\theta_i$  getroffen werden: Es handelt sich um

ein flaches Gelände, sodass der Einfallswinkel nur vom Referenzellipsoid abhängig ist. Dabei werden alle tatsächlich vorhandenen Geländeerhebungen bzw. -senkungen außer Acht gelassen.

### Kalibrierung der ERS-Daten

1991 wurde der erste der beiden Erdbeobachtungssatelliten, der ERS-1, von der European Space Agency (ESA) gestartet. Vier Jahre später kam der zweite, nahezu identische Umweltsatellit ERS-2 hinzu. Das *Active Microwave Instrument* (AMI) war Bestandteil beider Satelliten und konnte Aufnahmen im Image, Wave und Wind Modus tätigen. Beide Instrumente operierten im C-Band mit einer Frequenz von 5,3 GHz bzw. einer Wellenlänge von 5,6 cm. Die Aufnahmen erfolgten mittels VV-Polarisation mit Einfallswinkeln zwischen  $20,1^\circ$  (*near range*) und  $25,9^\circ$  (*far range*) (ESA, 2000–2012). Die vorliegenden Daten entstanden alle im *Precision Image Mode* (PRI). Nach LAUR et al. (2004) lassen sich die Rückstreukoeffizienten sowohl für ERS-1 als auch ERS-2 PRI-Daten wie folgt berechnen:

$$\sigma^\circ = \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{i,j=1}^{i,j=N} DN_{ij}^2 \right) \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \theta_{ref}} \cdot C_i \cdot \frac{ProductReplicaPower}{ReferenceReplicaPower} \cdot Powerloss_{i,j} \quad (4.3)$$

- $N$  ... Anzahl der Pixel innerhalb des Area of Interest, z. B. Pixel, die zu einem Zielobjekt gehören
- $i,j$  ... Range- und Azimutposition
- $DN$  ... Digital Number
- $\theta_i$  ... lokaler Einfallswinkel
- $\theta_{ref}$  ... Referenzeinfallswinkel ( $23^\circ$ )

Aufgrund des langen Operationszeitraumes sind einige Quellen gefunden worden, die die radiometrische Genauigkeit bzw. Stabilität beeinträchtigen. Die Ursachen liegen entweder an den Instrumenten an Bord des Satelliten oder an den Prozessoren der *Processing and Archiving Facilities* (PAF). Mittels Gleichung 4.3 zur Berechnung des Rückstreukoeffizienten  $\sigma^\circ$  werden verschiedene Faktoren angebracht, um die Instabilitäten zu berücksichtigen bzw. zu kompensieren. Die notwendigen Daten können aus der jeweiligen LEA\_01.001 sowie aus LAUR et al. (2004) entnommen werden.

Der Faktor  $K$  ist eine Kalibrierungskonstante, die vom Prozessierungszeitpunkt des Datensatzes sowie vom Prozessierungszentrum abhängig ist. Eine Tabelle mit den entsprechenden Kalibrierungskonstanten ist in LAUR et al. (2004) zu finden. Der Einfallswinkel variiert zwischen  $19,5^\circ$  und  $26,5^\circ$ . Wenn ein digitales Höhenmodell mit ausreichender Auflösung und Genauigkeit vorhanden ist, kann der tatsächlich vorliegende (lokale) Einfallswinkel berechnet werden. Ansonsten entspricht  $\theta_i$  dem Einfallswinkel, wie in Abschnitt 3.1 (Abb. 3.1) definiert.  $\theta_i$  hängt von der Position in Entfernungsrichtung innerhalb der Aufnahme ab;  $\theta_{ref}$  entspricht dem Referenzeinfallswinkel und wird mit  $23^\circ$  angegeben. Die Positionsabhängigkeit innerhalb der Aufnahme wird durch eine winkelabhängige radiometrische Korrektur ausgeglichen. Der Korrekturfaktor  $C_i$  für das Elevationsantennendiagramm (*elevation antenna pattern*) ist vom PAF sowie auch vom Prozessierungszeitpunkt abhängig. Das Anbringen des Faktors zur Korrektur der Replica Pulse Power Schwankungen  $\left( \frac{ProductReplicaPower}{ReferenceReplicaPower} \right)$  ist nur bei ERS-1 Daten erforderlich. LAUR et al. (2004) stellen die Formel zur Berechnung von  $C_i$  in Abhängigkeit vom Prozessierungszeitpunkt und PAF sowie die Reference Replica Power bereit. Der Leistungsverlust bei der Analog/Digital-Konvertierung (ADC) wird mittels des Powerloss-Faktors ausgeglichen. Eine Tabelle mit den entsprechenden *Powerloss*-Korrekturwerten für bestimmte

Intensitätswerte befindet sich ebenfalls in LAUR et al. (2004). Wird die ADC-Sättigung nicht korrigiert, kann es zur Unterschätzung des Signals kommen. Dies trifft insbesondere auf Objektziele in ERS-1 Aufnahmen mit hoher Rückstreuung zu (LAUR et al., 2004).

Insgesamt besitzen beide ERS-Sensoren eine ausgezeichnete radiometrische Stabilität; die mittlere Stabilität für ERS-1 beträgt 0,2 dB, für ERS-2 0,26 dB. Eine gute Stabilität ist für die Kalibrierung der Daten wichtig. Sie entspricht der Standardabweichung der gemessenen Radarquerschnitte über die Zeit. MEADOWS et al. (1998) gibt sowohl für ERS-1 als auch ERS-2 eine radiometrische Genauigkeit von 0,13 dB an. Die Genauigkeit des abgeleiteten Rückstreuoeffizienten  $\sigma^\circ$  wird mit  $\pm 0,4$  dB beziffert (MEADOWS et al., 1998; LAUR et al., 2004).

### Kalibrierung der ASAR-Daten

Bei den vorliegenden ASAR-Szenen handelt es sich um Level-1B Produkte des Image Modes, die ebenfalls VV-polarisiert aufgenommen wurden und in Ground Range vorliegen. Der Rückstreuoeffizient lässt sich nach ROSICH & MEADOWS (2004) für jede Zeile  $i$  und jede Spalte  $j$  aus dem Intensitätswert ( $DN$ ), der absoluten Kalibrierungskonstante ( $K$ ), welche aus der jeweiligen N1-Datei ausgelesen werden kann, und dem Einfallswinkel ( $\theta$ ) wie folgt berechnen:

$$\sigma_{i,j}^\circ = \frac{DN_{i,j}^2}{K} \cdot \sin \theta_{i,j} \quad (4.4)$$

Die radiometrische Genauigkeit von ASAR Image-Daten liegt bei 0,65 dB (ESA, 2000–2012). Die radiometrische Stabilität ist mit 0,32 bis 0,40 dB etwas geringer als die der ERS-Satelliten (ZINK, 2002).

### 4.2.2 Reduzierung des Speckle-Effekts

Ein erster Schritt zur Reduzierung des Speckles erfolgt bei vielen SAR-Produkten bereits während der Prozessierung durch das sogenannte *Multilook*-Verfahren. Dabei wird das Intensitäts- oder Amplitudenbild durch die inkohärente Mittelwertbildung verschiedener unabhängiger Bilder, sogenannten Looks ( $N$ ), generiert (HOLECZ, 1993). Folgender Zusammenhang besteht zwischen Amplituden- und Intensitätsbildern: Die Signalamplitude entspricht der Spannung ( $V$ ) des Signals und wird in Amplitudenbildern wiedergegeben ( $A = V$ ). Die Signalleistung bzw. -intensität wird in Intensitätsbildern dargestellt. Die Signalleistung steht zu der Amplitude in folgendem Verhältnis:  $I = V^2$  (HAGG, 1998). Die Multilook-Intensitäts- bzw. Amplitudenbilder werden wie folgt berechnet:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2 \quad A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (4.5)$$

Durch die Mittelwertbildung verringert sich die Varianz eines jeden Pixels. Für die Intensitätsbilder reduziert sich die vorliegende Exponentialverteilung zu einer Chi-Quadrat-Verteilung ( $\chi^2$ -Verteilung). Bei einer  $\chi^2$ -Verteilung mit  $N \rightarrow \infty$  Freiheitsgraden ist die Zufallsvariable näherungsweise normalverteilt (RANEY, 1998). Für die gemittelten Amplitudenbilder ergibt sich entsprechend eine L-Rayleigh-Verteilung;  $L$  entspricht hier der verwendeten Anzahl an Looks (HAGG, 1998).

Durch die pixelweise Mittelung ist es möglich, die Varianz und somit den Speckle-Effekt zu minimieren. Die dafür benötigten, statistisch unabhängigen Looks werden bei der Prozessierung der SAR-Bilder durch eine Aufteilung der Bandbreite in verschiedene Subbereiche erstellt. Aus den Subbändern werden die jeweiligen SAR-Bilder (Looks) berechnet (HOLECZ, 1993). Werden bei der Prozessierung überlappende Looks  $L$  verwendet, ist die effektive Anzahl an Looks  $L_{eff}$  geringer als  $L$ . Dies liegt darin begründet, dass die überlappenden Looks teilweise miteinander korreliert sind.  $L_{eff}$  repräsentiert die Anzahl der tatsächlich statistisch unabhängigen Looks und muss nicht immer ganzzahlig sein (MOREIRA, 2000).

Durch die Mittelung der verschiedenen Looks ändern sich die statistischen Eigenschaften. Die Standardabweichung eines Multilookbildes reduziert sich um die Wurzel der Anzahl unabhängiger Looks  $L_{eff}$  (MOREIRA, 2000). Je größer die Anzahl der Looks ist, die den Freiheitsgraden  $N$  entsprechen, desto mehr nähert sich die Verteilung einer Gaußkurve an (BOLTER et al., 1996). Die notwendige Steigerung der radiometrischen Auflösung durch Mittelung der verschiedenen Looks geht mit einer Reduzierung der geometrischen Auflösung einher (HAGG, 1998). Die einhergehende Reduzierung limitiert wiederum die Anzahl der Looks, die für die Mittelwertbildung verwendet werden können (MOREIRA, 2000).

Trotz des bereits durchgeführten Multilook-Verfahrens ist für die geplante segmentbasierte Klassifikation eine zusätzliche Filterung der SAR-Bilder notwendig. Bei der Durchführung einer Filterung ist zu beachten, dass hauptsächlich der Speckle unterdrückt wird und die eigentlichen Bildinformationen, inklusive Kanten und kleiner Objekte, erhalten bleiben. Ein Speckle-Filter muss dafür folgende drei Bedingungen erfüllen (HOLECZ, 1993):

- hohe Adaptivität, d. h. homogene Flächen sollen bei gleichzeitiger Erhaltung von Kanten und Texturen geglättet werden,
- geringer Informationsverlust und
- Vermeidung von Artefakten.

Klassische Filterverfahren, wie z. B. Tiefpassfilter, sind für SAR-Daten nicht uneingeschränkt nutzbar, da es bei der Filterung ebenfalls zu einer Unterdrückung des Nutzsignals kommen kann. Die speziellen Speckle-Filter arbeiten mit einem Operatorfenster (moving window), das sich über das Bild bewegt und dessen Fenstergröße vor der Filterung festgelegt wird. Die jeweilige Filterfunktion adaptiert sich entsprechend dem Bildinhalt innerhalb des Filterfensters. Aus diesem Grunde fallen die adaptiven Filter in die Kategorie der nichtlinearen Filter (HAGG, 1998). Für die Beschreibung eines voll entwickelten Speckles wird ein multiplikatives Bildmodell angesetzt (RANEY, 1998).

Da Speckle direkt aus dem Nutzsignal entsteht, ist dessen Intensität an die Signalintensität gekoppelt. Der resultierende Wert entspricht der Multiplikation des Ausgangssignals mit dem Zufallsprozess. Geht man zusätzlich davon aus, dass die benachbarten Bildelemente unkorreliert sind, kann ein multiplikatives Bildmodell für die Elemente eines SAR-Bildes angenommen werden. Die beobachtete Intensität  $z$  (Signalkomponente) für ein Bildelement an der Stelle  $(i, j)$  ergibt sich aus der mittleren Rückstreuung  $x$  und der Speckle-Zufallsvariablen  $v$  (Störkomponente) wie folgt:  $z_{i,j} = x_{i,j} \cdot v_{i,j}$ . Durch den multiplikativen Charakter des Modells erhöht sich das Rauschniveau mit steigender Rückstreuung. Im Gegensatz zu additiven Störungen ist bei multiplikativen Störungen die Intensität des Speckle somit an die Signalintensität gebunden. Auf diesem multiplikativen Modell beruhen die adaptiven, statistischen Speckle-Filter (HAGG, 1998).

Adaptive Filter unterscheiden sich nach ihrer Arbeitsweise in statistische und geometrische Verfahren. Bei den statistischen Filtern wird allein mit dem abgeschätzten Mittelwert und der Varianz für die Signalkomponente in den entsprechenden Operatorfenstern gearbeitet (HOLECZ, 1993). Mit Hilfe der Varianz wird die glättende Wirkung der Filter kontrolliert und sie trägt somit u. a. zum Erhalt von Kanten bei. Bei größer werdender Varianz innerhalb des Operatorfensters wird die glättende Wirkung durch entsprechende Gewichtungen reduziert. Die statistischen Filter unterscheiden sich anhand ihrer Bildfunktion (HAGG, 1998). Bei den geometrischen Filtern werden neben der Statistik zusätzlich die geometrischen Relationen im Operatorfenster berücksichtigt, wie z. B. die Lage der Pixel zum Zentralpixel. Es können ebenfalls inhomogene Bereiche bei der Berechnung geringer gewichtet oder sogar ausgeschlossen werden (HOLECZ, 1993).

Zu den statistischen Filtern gehören Lee-Filter (LEE, 1980), Enhanced-Lee-Filter (LOPES et al., 1990b), MAP-Filter (KUAN et al., 1987), Gamma-MAP-Filter (LOPES et al., 1990a) und Kuan-Filter (KUAN et al., 1985). Zu den adaptiven Filtern zählen ebenso die geometrischen Filter Frost (FROST et al., 1982), Enhanced-Frost (LOPES et al., 1990b) und Refined-Lee (LEE, 1981). Trotz der adaptiven Filter bleibt auch die Speckle-Filterung ein Kompromiss zwischen der radiometrischen und der geometrischen Auflösung.

Für die vorliegenden SAR-Daten wurde auf die genannten adaptiven Filter, welche in der Software Envi 4.0 implementiert sind, zurückgegriffen. Von jeder Aufnahme wurden für einen kleinen Testbereich die verschiedenen Filter mit den Fenstergrößen 3x3, 5x5 und 7x7 Pixel angewandt. Um die genannten Anforderungen (siehe Anstriche auf S. 71) an eine Speckle-Filterung zu gewährleisten, wurden die Filterergebnisse visuell sowie unter Zuhilfenahme der Statistik überprüft. Nach LEE et al. (1994) wurde der Mittelwert von homogenen Flächen vor und nach der Filterung bzw. dessen Veränderung ermittelt. Dafür wurde das Verhältnis der Mittelwerte der Flächen, welches bei einem geringen Informationsverlust nahe 1 liegt, berechnet. Das Verhältnis von Standardabweichung ( $\sqrt{\text{var}(\hat{x})}$ ) zum Mittelwert ( $E[\hat{x}]$ ) ist ein gutes Maß für die Stärke des Speckles (Speckle-Index  $\beta$ , Gleichung 4.6). Der Vergleich des Index vor und nach der Filterung zeigt die glättende Wirkung des Filters (LEE et al., 1994).

$$\beta = \frac{\sqrt{\text{var}(\hat{x})}}{E[\hat{x}]} \quad (4.6)$$

Visuell erfolgte die Beurteilung der Kanten- und Texturerhaltung. Insgesamt zeigten der Enhanced-Lee- sowie der Enhanced-Frost-Filter mit einer Fenstergröße von 7x7 Pixeln für die Testbereiche die günstigsten Verhältnisse zwischen Mittelwert und Varianz sowie bei dem Erhalt des Mittelwertes. Auch die Kanten- und Texturerhaltung war zufriedenstellend. Bei größeren Operatorfenstern setzte bereits eine glättende Wirkung auf die Kanten und die Textur ein, sodass eine Fenstergrößen von maximal 7x7 Pixel zum Filtern benutzt wurde.

Nach der Vorverarbeitung der SAR-Daten erfolgte die visuelle Interpretation, einhergehend mit der Betrachtung der Mehrdeutigkeitsproblematik.



## 4.3 Interpretation und Analyse der SAR-Daten

Bei einer visuellen Bildinterpretation werden die Zusammenhänge der Objekte mit Hilfe verschiedener Faktoren bewusst oder unbewusst erfasst (BLASCHKE, 2000). Nach ALBERTZ (1991) setzt sich die visuelle Auswertung von Bilddaten aus zwei Stufen zusammen: dem Erkennen und dem Interpretieren. Zum Erkennen von Objekten in einem Bild tragen folgende Faktoren bei:

- Helligkeit einer Fläche bzw. Helligkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Flächen
- Form des Objektes
- Größe des Objekts
- Textur/Strukturierung der Oberfläche
- Schattierungen
- Relative Lage von Objekten bzw. Objektmuster.

Beim anschließenden Interpretieren werden aus dem Erkannten weitere Rückschlüsse, die nicht direkt abgebildet sind, gezogen. Das komplexe Zusammenspiel der genannten Faktoren sowie das Vorwissen über die Region wirken sich dabei auf das Erkennen und Interpretieren aus (ALBERTZ, 1991).

Ziel dieses Abschnitts ist die Erfassung der hydrologischen Situation bzw. der daraus resultierenden Landbedeckungen zur Zeit der drei Aufnahmen. Die Oktober-, Dezember- und März-Aufnahmen zeigen das Untersuchungsgebiet in verschiedenen Stadien der Überschwemmung 2003/2004. Ein erster Schritt der visuellen Analyse war es, die Bereiche zu finden, deren Landbedeckung Veränderungen aufgrund der Überschwemmung unterlag. Die Ergebnisse der Veränderungsanalyse und der visuellen Bildinterpretation dienen später der Erstellung des Regelwerks für die Klassifikation.

Bevor mit der Analyse der Rückstreuung begonnen wird, gibt Tabelle 4.2 einen Überblick über die Aufnahmezeitpunkte sowie, wenn bekannt, die vorherrschenden Pegelstände der auszuwertenden SAR-Daten. Die verschiedenen Aufnahmen entstanden in einem Zeitfenster von rund zehn Jahren.

### 4.3.1 Hauptkomponententransformation

Für das Erkennen von Veränderungen, die sogenannte Change Detection, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. LU et al. (2004) gruppieren die Methoden in verschiedene Kategorien und stellen deren Vor- und Nachteile vor. Mit dem Ziel einer besseren Unterscheidung der Oberflächen soll das Ergebnis der Change Detection Informationen darüber enthalten, welche Bereiche einem Wandel während des Überflutungsereignisses unterliegen bzw. welche Bereiche nicht von der Überschwemmung betroffen sind. Die Change Detection Methode soll dafür Daten von mehr als zwei Eingabezeitpunkten verarbeiten können. Von den gängigen Change Detection Verfahren erfüllt die Hauptkomponententransformation, auch Karhunen-Loève-Transformation oder Principal Components Analysis (PCA) genannt, die gestellten Anforderungen.

Die Hauptkomponententransformation zeichnet sich durch die Reduzierung von redundanten sowie die Betonung von unterschiedlichen Informationen in den beteiligten Kanälen aus. Das

hydr. Jahr	Aufnahmezeitpunkt	Pegel [cm]		Max. Mopti	Min. Mopti	Max. Akka	Min. Akka
		Mopti	Akka				
1992/93	03.11.1992 <sup>1</sup>	431	385	538 cm	89 cm	387 cm	-2 cm
	08.12.1992 <sup>1</sup>	267	311	07.10.1992	10.04.1993	26.10.1992	20.04.1993
1995/96	26.10.1995 <sup>1</sup>	614	446				
	17.11.1995 <sup>2</sup>	559	483				
	29.02.1996 <sup>1</sup>	132	126	614 cm	101 cm	485 cm	26 cm
	04.04.1996 <sup>1</sup>	107	43	25.10.1995	30.04.1996	19.11.1995	29.04.1996
	05.04.1996 <sup>2</sup>	106	40				
2003/04	31.10.2003 <sup>3</sup>	640	484*				
	05.12.2003 <sup>3</sup>	439	483	649 cm	95 cm	497* cm	12 cm
	19.03.2004 <sup>3</sup>	123	86	15.10.2003	30.04.2004	15.11.2003**	30.04.2004

**Tabelle 4.2:** Übersicht der vorhandenen SAR-Daten und der Pegelstände zum Aufnahmezeitpunkt für die Stationen Mopti und Akka sowie die höchsten und niedrigsten Stände des jeweiligen hydrologischen Jahres (von Mai bis April); <sup>1</sup> ERS-1, <sup>2</sup> ERS-2, <sup>3</sup> ASAR, \*mittels kubischer Spline-Funktion interpolierter Pegelwert (Datenlücke); \*\*gemessener max. Wert: 492 cm am 02.12.2003

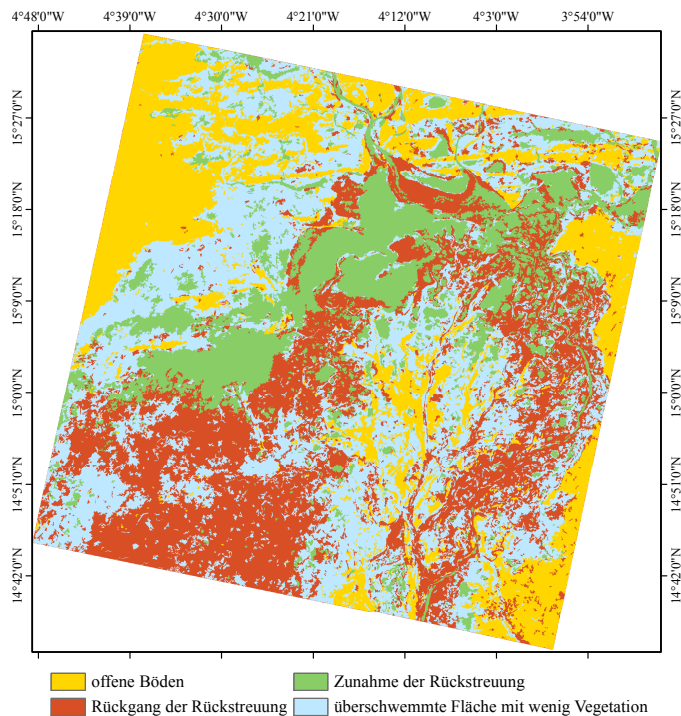
Ergebnis der Transformation ist von der Landschaft und dem dokumentierten Ereignis abhängig, weswegen die Interpretation und die Bezeichnung der zeitlichen Veränderungen erschwert wird. Vor der Veränderungsanalyse müssen die multitemporalen Aufnahmen zueinander registriert und radiometrisch normalisiert sein sowie möglichst in der gleichen räumlichen und spektralen Auflösung vorliegen (LU et al., 2004).

Um die Redundanz bzw. den Datenumfang zu verringern, werden die einzelnen Kanäle untereinander auf starke Grauwertkorrelationen untersucht. Dafür werden die Varianzen und Kovarianzen der einzelnen Kanäle bzw. Kanalpaare berechnet. Des Weiteren wird ein n-dimensionaler Merkmalsraum definiert, wobei n der Anzahl der Kanäle des Bilddatensatzes entspricht. Die Varianz eines Kanals gibt über den Informationsgehalt des Kanals Auskunft. Die Korrelation lässt sich mittels der Kovarianz zwischen zwei Kanälen bestimmen. Basierend auf der Varianz-Kovarianz-Matrix bzw. auf deren Eigenwerten und Eigenvektoren, werden neue Koordinatenachsen (Hauptachsen) berechnet. Dabei wird das Koordinatensystem so gelegt, dass die Achsen jeweils in die Richtung der maximalen Streuung zeigen. Die Eigenvektoren der Varianz-Kovarianz-Matrix definieren die Richtung, die Eigenwerte repräsentieren die jeweilige Länge der Hauptachsen. Die Kovarianz der neuen Kanäle wird mit Null vorausgesetzt, da diese nun nicht mehr untereinander korreliert sind. Die erste Hauptachse zeigt in Richtung der größten Ausdehnung des Datenclusters im Merkmalsraum und enthält somit bereits den Großteil der Bildinformationen. Orthogonal zur ersten Hauptachse steht die zweite Hauptachse, welche in Richtung der zweitgrößten Ausdehnung des Datenclusters zeigt. Nach diesem Prinzip erfolgt die Berechnung der verbleibenden Hauptkomponenten, sodass die höheren Hauptkomponenten meist nur noch das Rauschen enthalten (SCHÖWENGERDT, 2006). Diente ein multitemporaler Datensatz als Eingabe, enthalten die höheren Hauptkomponenten die Veränderungen zwischen den zeitlich versetzten Datensätzen. (LU et al., 2004)

Weitere Informationen zur Hauptkomponententransformation können u. a. aus KRAUS (1990), JÄHNE (1997) oder NISCHWITZ et al. (2007) entnommen werden.

Nach der Transformation enthält jede Hauptkomponente einen Varianzanteil des gesamten Datensatzes. Für die drei ASAR-Aufnahmen enthält die erste Hauptkomponente 92,9 %, die zweite 4,5 % und die dritte Hauptkomponente nur noch 2,6 % der Varianz. Im Hinblick auf eine Unterscheidung in veränderte und unveränderte Bereiche ist die zweite Hauptkomponente von Interesse. Dort werden insbesondere Bereiche, deren Rückstreuung deutlich variiert hat, durch negative (dunkle) bzw. positive (helle) Grauwerte dargestellt. In mittleren Grauwerttönen erscheinen die Flächen, die weniger starken Rückstreuungswankungen unterlegen waren und als unverändert angesehen werden können.

Ein kritischer Schritt bei der Auswertung der Hauptkomponenten ist das Setzen von Schwellwerten, die u. a. die Trennung in veränderte und nicht veränderte Bereiche bestimmen. Das Ziel der Klassifikation der Hauptkomponenten ist die Extraktion der Ausdehnung der Überschwemmungsfläche sowie der Flächen mit verhältnismäßig stabiler Rückstreuung. Die Abbildung 4.4 zeigt das Ergebnis der Klassifikation.



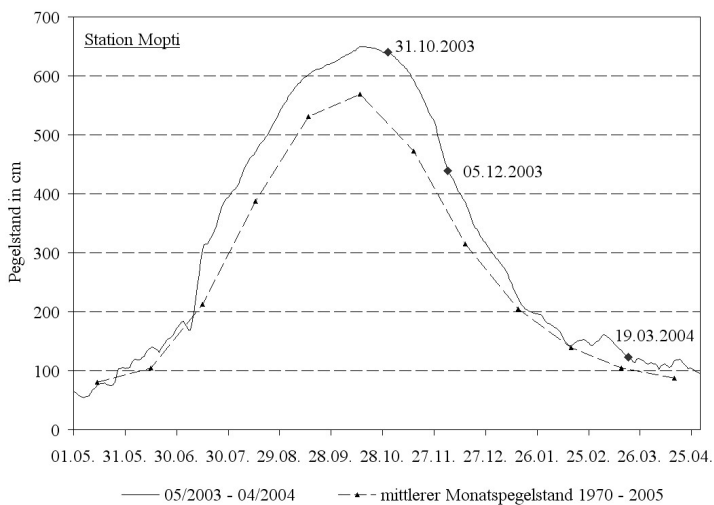
**Abbildung 4.4:** Klassifikationsergebnis der Hauptkomponenten, basierend auf den ASAR-Aufnahmen vom 31.10.2003, 05.12.2003 und 19.03.2004

Hauptsächlich die nicht überschwemmten Flächen (gelb) innerhalb und außerhalb des Überschwemmungsgebietes unterlagen geringen Schwankungen und können als unverändert angesehen werden. Die Rückstreuung der in allen drei Aufnahmen vorhandenen Gewässerflächen variiert teilweise zu stark, als dass sie ebenfalls als unverändert erfasst werden konnten. Insbesondere die Rückstreuungen des Lac Korientzé und des unteren Nigerlaufs (bezüglich des Untersuchungsgebietes) unterlagen großen Schwankungen, sodass die gemeinsame Erfassung des Seen- und Gewässernetzes nur zu einem ungenügenden Teil gelang. Die Wasserflächen wurden aus diesem Grund nicht separat bzw. als unverändert erfasst, sondern in die jeweiligen Kategorien der Zu- oder Abnahme eingeordnet.

Flächen am Rande des Überschwemmungsgebietes sind in der Klasse überschwemmte Flächen mit wenig Vegetation (hellblau) zusammengefasst. Diese Bereiche waren in der Oktober-Aufnahme noch nicht überflutet. Im Dezember waren die Flächen mit Wasser und/oder Vegetation bedeckt und im März bereits wieder trockengefallen. Somit unterlagen die Flächen zuerst einem Anstieg der Rückstreuung, gefolgt von einer Abnahme. Ein Teil dieser Flächen enthält in der Oktober- bzw. Dezember-Aufnahme einen geringen Anteil an Vegetation. Am Rand des Überschwemmungsbereiches dominieren jedoch die Wasserflächen. Teile des Übergangsbereichs zum Delta morn wiesen in der zweiten Hauptkomponente mittlere Grauwerte auf. Dies indiziert, dass sich die Rückstreuung und somit die Landbedeckung dieser Flächen nicht signifikant verändert hat. Die Landsat- und MERIS-Aufnahmen bestätigen jedoch, dass die Bereiche zwischen Oktober und März einem Wandel unterlagen. Erklären lässt sich dies durch die ähnliche Rückstreuung der Böden mit Vegetation und der überschwemmten Flächen. In diesem Fall gelang die Erfassung der Veränderungen allein mit Hilfe der zweiten Hauptkomponente nicht vollständig, sodass die erste Hauptkomponente hinzugezogen wurde.

In der zweiten Hauptkomponente repräsentieren die negativen Werte (dunkle Flächen) einen Anstieg der Rückstreuung, welche insbesondere durch die Zunahme an Vegetation von Oktober zu Dezember verursacht wurde (grün). Ein großen Anteil an Flächen mit Zunahme haben die Bereiche des Binnendeltas, welche im Oktober bzw. Dezember überschwemmt und im März noch nicht ausgetrocknet waren. Eine Abnahme der Rückstreuung (rot) betrifft überwiegend Flächen, auf denen sich die Vegetation von Oktober bzw. Dezember zum März zurückgezogen hat, aber auch trockengefallene Bereiche im Lac Débo.

Wie aus Tabelle 4.2 entnommen werden kann, war im Dezember der maximale Pegelstand in Mopti und Akka bereits überschritten. Die Flächen der beiden Kategorien Zu- und Abnahme sowie der überschwemmten Bereiche zeigen zusammen das maximale Ausmaß der Überschwemmungen für das Untersuchungsgebiet des hydrologischen Jahres 2003/2004.



**Abbildung 4.5:** Pegelstände der Station Mopti des hydrologischen Jahres 2003/2004 und die durchschnittlichen Monatspegel zwischen 1970 und 2005 (basierend auf Daten des INSTITUT D'ECONOMIE RURALE)

Das Diagramm 4.5 zeigt die drei Aufnahmezeitpunkte sowie die gemessenen Pegelstände an der Station Mopti. Der Vergleich mit den mittleren Pegelständen (1970–2005) zeigt, dass das hydrologische Jahr 2003/2004 über dem Durchschnitt liegt. Inclusive der Wasserflächen ergibt sich eine Fläche von 6 930 km<sup>2</sup>. Zum Vergleich: der Überschwemmungsbereich sowie die Gewässer in der topographischen Karte decken eine Fläche von rund 8 000 km<sup>2</sup> ab. Wie bereits im Abschnitt 4.1.1 erwähnt, waren die Überschwemmungsbereiche bei der Befliegung sehr großflächig.

Das Ergebnis der Klassifikation der Hauptkomponenten geht in das Regelwerk zur Klassifikation der SAR-Daten mit ein. Das Ziel ist es mit Hilfe der Klasse offene Böden insbesondere die Trennung der unveränderten Bodenflächen zu unterstützen. Da die Überschwemmung 2003/2004 sehr ausgeprägt war, repräsentiert die Klasse „überschwemmte Bereiche“ mögliche Überschwemmungsflächen auch für die anderen Aufnahmen. Die Landbedeckung der Flächen, welche sich durch eine Zu- bzw. Abnahme auszeichnen, unterliegt großen Schwankungen (ausgenommen die erwähnten Wasserflächen). Im Zusammenhang mit dem Aufnahmezeitpunkt kann u. a. die Klassifikation von Vegetationsflächen unterstützt werden.

#### 4.3.2 Visuelle Analyse der Rückstreuung anhand der Überschwemmung im hydrologischen Jahr 2003/2004

Die aufbereiteten Zusatzdaten sowie das Kartenmaterial werden bei der Analyse der Rückstreuung zu den Aufnahmezeitpunkten im Oktober und Dezember 2003 sowie März 2004 mit einbezogen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Erstellung der Regelwerke für die Klassifikation. Dabei sind auftretende Überschneidungen bei der Rückstreuung von unterschiedlichen Landbedeckungen sowie das Verhalten der Rückstreuung anhand von Testflächen über den Zyklus einer Überschwemmung von Interesse.

Der Verlauf der Rückstreuung verschiedener, beständiger Boden- und Wasserflächen über die drei Aufnahmezeitpunkte ist im Anschluss in einem Diagramm (Abbildung 4.6) dargestellt. Auf dieses Diagramm beziehen sich die „Graph“-Verweise im folgenden Abschnitt.

##### Offene Gewässer

Zu den offenen Gewässern zählen sowohl die Fließgewässer als auch stehende Gewässer, wie Seen und Mare. Auffällig ist die große Bandbreite der Rückstreuung von Gewässerflächen. Wie in Abschnitt 3.5.3 erläutert, erscheinen die Wasserflächen für Mikrowellen oft als glatte Oberflächen, welche den Großteil der Strahlung gerichtet reflektieren. Dies trifft auf die kleineren Wasserflächen innerhalb der Überflutungsfläche und auf den Großteil der temporär überschwemmten, überwiegend vegetationsfreien Flächen zu. Die dunklen Wasserflächen, mit einer durchschnittlichen Rückstreuung von -16,2 dB für die Testfläche, treten insbesondere am Rande des Überschwemmungsgebietes in der Oktober-Aufnahme auf. Der Anteil dieser Flächen reduziert sich in der Dezember-Aufnahme. Durch die Schwankungen innerhalb der Testflächen von  $\pm 1,3$  dB treten Überschneidungen mit dem Wertebereich der trockenen Böden auf.

Verglichen mit dem Niger heben sich Nebenflüsse, wie der Diaka, innerhalb der Überschwemmungsebene von ihrer Umgebung sowohl im Oktober als auch Dezember deutlich ab. Die geringen Rückstreuwerte der Nebenflüsse erhöhen den Kontrast zu den benachbarten überschwemmten Vegetationsflächen. Mit Rückstreuwerten zwischen -11 dB und -15 dB (Oktober-Aufnahme) überschneiden sich die Nebenflüsse ebenfalls mit der Rückstreuung von trockenen, vegetationsarmen Böden. Im März ist durch das zurückgewichene Wasser die Vegetation auf

den Überschwemmungsflächen deutlich reduziert. Die an die Nebenflüsse angrenzenden Flächen weisen entsprechend niedrige Rückstreuwerte auf, sodass sich der Kontrast merklich verringert hat. Zudem können die kleineren Flüsse bereits trocken gefallen sein.

Betrachtet man die Rückstreuung im Verlauf des Nigers wird die hohe Variabilität dieser Werte deutlich. Im oberen Flusslauf, welcher für das Untersuchungsgebiet des südlichen Flussabschnitt bis Lac Débo umfasst, schwanken die Werte zwischen -7,3 dB und -8,6 dB, einige Bereiche erreichen auch Werte von bis zu -4 dB (siehe Graph 8 im Diagramm 4.6). Im unterem Flusslauf, welcher sich auf den Flussabschnitt zwischen Lac Débo und der nördlichen Begrenzung des Untersuchungsgebietes bezieht, ist die Rückstreuung sichtbar niedriger und variiert hauptsächlich zwischen -8,8 dB und -9,7 dB (Graph 7). Eine Ausnahme bildet die März-Aufnahme, in der sich die Differenz zwischen den oberen und unteren Flussabschnitten mit -6,5 dB bzw. -6,7 dB deutlich verringert hat. Im Vergleich zu der Oktober- und Dezember-Aufnahme ist die Rückstreuung des Nigers insgesamt gestiegen. Sowohl die hohen als auch die mittleren Rückstreuungen innerhalb des Flusslaufes überschneiden sich mit den Rückstreuwerten der überschwemmten Bereiche mit Vegetation. Dadurch ist während der Überschwemmung der Kontrast zwischen dem Niger und den angrenzenden überschwemmten Gebieten für längere Abschnitte gering.

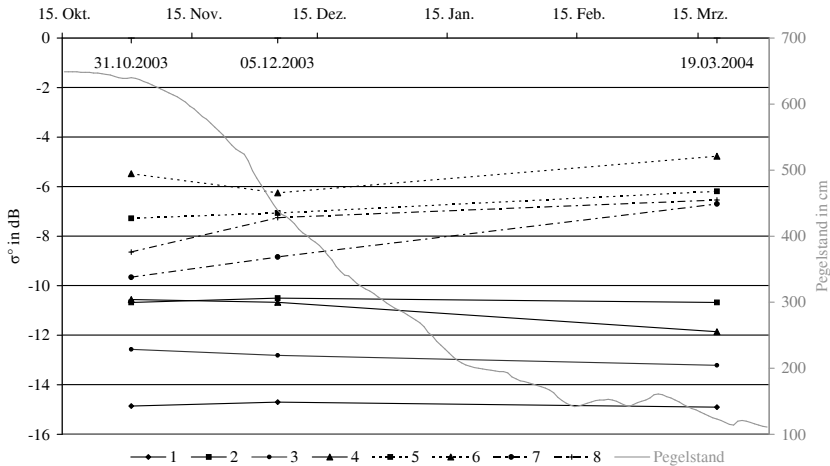
Die Rückstreustärke der Seen Lac Débo und Lac Korientzé ist sehr unterschiedlich. Mit Werten zwischen -6,2 dB und -7,3 dB befindet sich die Rückstreuung des Lac Débo (Graph 5) in der Größenordnung des Nigers. Auffällig ist die unerwartet hohe Rückstreuung des Lac Korientzé im Nordosten des Untersuchungsgebietes (Graph 6). Dessen mittleren Rückstreuwerte sind, verglichen mit Lac Débo, über die drei Aufnahmezeitpunkte mit -5,5 dB, -6,3 dB und -4,7 dB deutlich höher. Da sowohl in den ERS- als auch in den ASAR-Daten große Unterschiede zwischen den beiden Seen auftraten, erscheint Wind bzw. die daraus resultierende erhöhte Rauigkeit als Ursache unwahrscheinlich. Der Vergleich der spektralen Signatur im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot des Lac Korientzé mit der des Lac Débo in der Landsat-Aufnahme (Oktober) zeigt erhöhte Reflektanzen zur Seemitte des Lac Korientzé. Dies kann aufgrund zunehmender Trübung und abnehmender Tiefe auftreten. Im März ist die Rückstreuung des Lac Korientzé für die drei Aufnahmezeitpunkte am höchsten. Die aus der dazugehörigen MERIS-Szene entnommenen spektralen Signaturen zeigen jedoch höhere Reflektanzen für den Lac Débo. Da die Rückstreuung des Lac Débo wieder geringer ist als von Lac Korientzé, scheinen Wassertrübung bzw. -tiefe nicht für die erhöhte Rückstreuung verantwortlich zu sein. Eine zufriedenstellende Erklärung für die abweichende Rückstreuung des Lac Korientzé konnte nicht gefunden werden. Die mittlere Standardabweichung der Testflächen über die drei Aufnahmezeitpunkte ist für Lac Débo und Lac Korientzé mit ca.  $\pm 0,9$  dB verglichen mit den anderen Testflächen am geringsten.

Beim Vergleich der Oktoberszene mit der CIR-Ansicht des Landsat-Mosaiks war auffällig, dass sich die temporären hellblauen bis türkisen Wasserflächen in der Radarszene kaum von ihrer Umgebung abheben. Diese Wasserflächen sind insbesondere am nördlichen Rande der überfluteten Bereiche zu finden, sodass deren Umgebung vor allem durch trockene Böden mit eher spärlicher Vegetation geprägt ist. Mit Rückstreuwerten zwischen -10,1 dB und -11,7 dB liegen diese Wasserflächen in der Größenordnung der Böden des Delta mort. Aufgrund der Randlage und der spektralen Signatur kann angenommen werden, dass es sich hierbei um überwiegend seichte trübe Gewässer handelt, die im März bereits wieder verschwunden sind.

Durch den teilweise geringen Kontrast zwischen Gewässerflächen und deren überschwemmter Umgebung heben sich diese nur gering hervor. Dies erschwert die Abgrenzung bzw. Klassifi-

zierung insbesondere bei Aufnahmen, in denen das Umland überflutet ist bzw. von Vegetation dominiert wird. Insgesamt heben sich die großen Wasserflächen in der März-Aufnahme deutlich besser von ihrer Umgebung ab.

Die große Bandbreite an Rückstreuwerten für die Gewässerflächen erfordert eine getrennte Erfassung. Zudem führt die hohe Variabilität zu Überschneidungen insbesondere mit überschwemmten Vegetationsflächen und trockenen Böden.



**Abbildung 4.6:** Mittlere Rückstreuungskoeffizienten für Testflächen der Oberflächen „Boden“ und „Wasser“ über drei Aufnahmezeitpunkte, mit: 1 = sandige Böden, 2 = Sand/Lehm/Kies-Gemisch (Ausläufer des Bandiagara-Pl.), 3 = alluviale Ablagerungen, 4 = Düne, 5 = Lac Débo, 6 = Lac Korientzé, 7 = Niger, unterer Flusslauf, 8 = Niger, oberer Flusslauf

### Böden

Zu der Kategorie Böden zählen die Flächen, welche nicht von der Überschwemmung betroffen sind. In der semi-ariden Umgebung ist der Anteil an grüner Vegetation zum Aufnahmezeitpunkt gering. Das Signal wird vom Boden dominiert.

Während der Überschwemmung gehören in diese Klasse die genannten Hänge des Bandiagara-Plateaus, das Delta mort sowie die sandigen Böden der erhöhten Flächen im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes und der Dünen. Wenn das Wasser sich aus dem Binnendelta zurückgezogen hat, fallen die vormals überschwemmten Flächen ebenfalls in diese Kategorie.

Der im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes beginnende Anstieg zum Bandiagara-Plateau zeichnet sich durch einen hohen Anteil an Sand sowie Kies aus. Diese Flächen sind aufgrund des Anstiegs nicht von der Überschwemmung betroffen. Die Rückstreuung der Testflächen variiert zwischen den drei Aufnahmezeitpunkten lediglich zwischen -10,5 dB und -10,7 dB (Graph 2). Die geringe Streuung zwischen den Aufnahmen deutet darauf hin, dass diese Flächen geringen Veränderungen unterworfen waren. Die Größenordnung der Rückstreuung lässt auf eine raue Oberfläche schließen. Auch ist die Standardabweichung innerhalb der Testfläche mit  $\pm 1,2$  dB bis  $\pm 2,2$  dB, verglichen mit den anderen Testflächen, sehr hoch.

Die Rückstreuung der Dünen geht über die drei Aufnahmezeitpunkte von anfänglich -10,6 dB auf -11,9 dB zurück (Graph 4). Die Standardabweichung der Dünenfläche der Oktober-Aufnahme ist mit  $\pm 1,5$  dB höher als die Abweichungen zu den anderen Aufnahmezeitpunkten. Da diese Bereiche nicht vom Wasser erreicht werden, ist davon auszugehen, dass die Rückstreuung von der vorhandenen (dünnen) Vegetation und/oder durch die Oberflächenrauigkeit der Dünen verursacht wird. Da der Bodenanteil im Signal überwog, wurden die Dünen in der multispektralen Klassifikation mit Flächen, die einen hohen Sandanteil aufweisen, zusammengefasst. In den SAR-Daten ist die Rückstreuung der Dünen, verglichen mit der von sandigen Böden (Graph 1), deutlich höher, denn die sandigen Flächen variieren zwischen -14,7 dB und -14,9 dB und haben somit eine deutlich geringere Rückstreuung als die Dünen. Die erhöhten, trockenen, vegetationsarmen Flächen im mittigen Teil des Untersuchungsgebietes weisen teilweise eine geringere Rückstreuung als die sandigen Böden auf. Da sich diese Flächen in den multispektralen Aufnahmen nicht von den sandigen Bereichen unterscheiden, werden sie zusammengefasst.

Regelmäßig überschwemmte Flächen mit alluvialen Ablagerungen (Graph 3) befinden sich zwischen den Dünen und den angrenzenden Flächen des Delta mort. Im Oktober und März waren die Bereiche noch nicht bzw. nicht mehr vom Wasser bedeckt. Im Dezember hingegen dominiert das Wasser. Trotz des Wandels der Oberfläche variiert die Rückstreuung lediglich zwischen -12,6 dB und -13,2 dB. Im März ist die Rückstreuung mit -13,2 dB am geringsten, da die Flächen bereits wieder austrocknen. Die Übergangsbereiche zwischen dem Binnendelta und dem Delta mort enthalten im Oktober zum Teil Vegetation, wodurch sich die Rückstreuung teilweise erhöht.

Die Veränderung der Landbedeckung im Delta vif zwischen der Überschwemmung und den anschließenden trockenen Zeitraum ist enorm. Die grüne Vegetation ist flächenmäßig verschwunden und der darunter liegende Boden kommt zum Vorschein. Die im März freigelegten Flächen des Überschwemmungsgebietes werden in drei Klassen unterteilt. Zum einen in die vormals überschwemmten Bereiche am Rand zum Delta mort und der erhöhten Flächen im zentralen Teil sowie entlang des Flusslaufs des Diaka. Deren Rückstreuung variiert zwischen -10 dB und -12 dB. Zum anderem wird der zentrale Teil des Delta vif unterteilt in Flächen, welche noch Vegetation bzw. Bodenfeuchte enthalten, und Flächen, die von offenen Böden dominiert werden. Letztere haben eine Spanne von rund -10 dB bis -7 dB. Innerhalb der Überschwemmungsfläche sind nur noch wenige Pixel mit einem NDVI (MERIS) größer 0,15 vorhanden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die räumliche Auflösung der MERIS-Aufnahme nur 300 m beträgt. Zusätzlich wurde die höher aufgelöste Landsat-Aufnahme vom März 2003 zum Vergleich herangezogen. Insbesondere die kleineren Vegetationsflächen entlang der Gewässer sind, aufgrund der räumlichen Auflösung von MERIS, in dessen NDVI-Bild nicht enthalten. In der SAR-Aufnahme heben sich diese Flächen mit Werten größer -7 dB ab. Zusammen mit den Informationen des NDVI deutet die hohe Rückstreuung auf eine Kombination aus Vegetation und erhöhter Bodenfeuchte hin.

#### Überschwemmte Bereiche mit Vegetation

Während der Überschwemmung wird das Delta vif von einer Mischung aus Vegetation und Wasser dominiert. Die Vegetationsflächen sind mit Hilfe des NDVI der Landsat Oktober-Aufnahme extrahiert worden. Flächen mit einem NDVI größer 0,35 werden in der zeitnah entstandenen ASAR-Aufnahme in einer Spanne von -11 dB bis -5 dB wiedergegeben. Der hohe NDVI lässt auf eine gesunde, aktive Vegetation schließen. Da eine Unterscheidung nach Vegetationsarten nicht erfolgt, werden die Überschwemmungsflächen anhand des Mischungsverhältnisses der beiden Komponenten unterteilt (vgl. Abschnitt 4.1.2, S. 63).



Die Vegetationsflächen werden in Bereiche mit einem dominierenden Anteil an Wasser (größer 50 %) bzw. mit einem größeren Anteil an Vegetation unterschieden. In der ASAR-Aufnahme werden die Bereiche mit höherem Wasseranteil von Bereichen mit Rückstreuwerten zwischen -11 dB und -9 dB abgebildet. Diese Flächen befinden sich hauptsächlich am Rande der Überschwemmungsfläche sowie in Nachbarschaft zu den Bereichen mit dichter Vegetation. Zudem haben sich zwischen Oktober und Dezember diese Bereiche reduziert. In die genannte Spanne an Rückstreuwerten fallen auch Bereiche des Delta dort sowie der Dünenformationen. Auch Teile des nördlichen Nigerlaufs werden in dieser Rückstreustärke wiedergegeben.

Die Gebiete mit einem höheren prozentualen Anteil an Vegetation weisen einen NDVI größer 0,6 auf, weswegen diese Bereiche als Flächen mit dichter Vegetation deklariert werden. In der SAR-Aufnahme werden sie von Rückstreuwerten zwischen -9 dB und -5 dB repräsentiert. Auch in diesem Fall überschneidet sich der Wertebereich mit anderen Landbedeckungen, insbesondere Wasserflächen der großen See Lac Débo und Lac Korientzé. Der Anteil an dichter Vegetation hat sich zwischen Oktober und Dezember, insbesondere durch die Reduzierung der Vegetationsflächen mit einem höheren Wasseranteil, erhöht.

Die visuelle Analyse verdeutlicht bereits, dass zwischen den verschiedensten Landbedeckungen eine Trennbarkeit allein auf Grundlage der radiometrischen Informationen zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führt. Ein Maß zur Abschätzung der Trennbarkeit zweier Klassen ist die Jeffries-Matusita-Distanz. Anhand der ASAR-Aufnahme vom 31.10.2003 sind Trainingsgebiete für die Klassen erstellt worden, auf deren Basis die Jeffries-Matusita-Distanzen ermittelt wurden (siehe Anhang A.6). Basierend auf der visuellen Analyse und den Jeffries-Matusita-Distanzen können für die überschwemmten Aufnahmen folgende Herausforderungen in der Trennbarkeit zusammengefasst werden:

- offene Wasserflächen vs. Flächen mit überwiegend Vegetation,
- offene Wasserflächen vs. überschwemmte Flächen mit Vegetation,
- offene Wasserflächen vs. nicht überschwemmte Flächen im Übergangsbereich (mit Vegetation),
- Flächen mit beginnender Überflutung vs. trockene Böden mit geringer Rückstreuung und
- überschwemmte Flächen mit Vegetation vs. trockene Bereiche mit erhöhter Rückstreuung aufgrund von Rauigkeit bzw. Vegetation.

In Aufnahmen nach dem Rückgang der Überschwemmung weisen folgende Bereiche bzw. Landbedeckungen eine ähnliche Rückstreuung auf:

- Flächen mit erhöhter Bodenfeuchte und teilweise Vegetation vs. offene Wasserflächen,
- abfallende Hänge des Bandiagara-Plateaus vs. vormals überschwemmte Bereiche mit alluvialen Ablagerungen sowie
- Flussläufe vs. bereits trockenengefallene Überschwemmungsflächen.

Die visuelle Bildinterpretation zeigt zudem, dass Flächen mit ähnlicher Rückstreuung in Abhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt, von deren Nachbarschaft sowie von der Lage innerhalb der Aufnahme unterschieden werden können. Ist zum Beispiel die Aufnahme während der Überschwemmung entstanden, handelt es sich bei den Flächen mit geringer Rückstreuung im Übergangsbereich um überschwemmte Bereiche, wenn die benachbarten Flächen des Delta vif

hohe Rückstreuungen (hervorgerufen durch überschwemmte Vegetation) aufweisen. Ebenso unterstützen die Objektmerkmale Form und Größe die Abgrenzung insbesondere von Steh- und Fließgewässern.

Basierend auf den Ergebnissen der in diesem Kapitel vorgestellten Interpretation sowie den Grauwerten, dem Kontext, der Lage und dem Aufnahmezeitpunkt werden die Regelwerke für die Klassifikation erstellt.

## 5 Objektorientierte Auswertung

Mit dem Anstieg der räumlichen Auflösung von Fernerkundungsaufnahmen wurden alternative Auswertemethoden zu den vorhandenen pixelbasierten Verfahren benötigt. Die hohe räumliche Auflösung reduzierte die Problematik der Mischpixel, welche bei gering aufgelösten Aufnahmen mehrere Klassen enthalten konnten. Mit der höheren Auflösung steigt jedoch das Rauschen innerhalb der Klassen. Mischpixel treten somit auch in den hoch aufgelösten Aufnahmen auf, nur hat sich die Dimension geändert. Das Rauschen innerhalb einer Klasse bzw. innerhalb eines Objektes erhöht deren spektrale Variabilität und erschwert die pixelbasierte Auswertung erheblich (NEUBERT, 2005).

Erschwert wird die Auswertung von SAR-Daten nach wie vor durch das Auftreten von Speckle, welches auch durch ein vorangestelltes Filtern nicht vollständig reduziert werden kann. Das körnige Erscheinen erhöht die Spanne der Rückstreuwerte für ein Objekt und erschwert so die Extraktion von den enthaltenen Informationen erheblich. Insbesondere bei Verfahren der pixelbasierten Klassifikation sind die Auswirkungen des Speckles im Klassifikationsergebnis zu erkennen.

Das Ergebnis einer überwachten Klassifikation allein auf Grundlage der einkanaligen SAR-Aufnahme ist ungenügend. Die Rückstreuung allein genügt nicht, um eine ausreichende Klassenbeschreibung zu kreieren, nach der die Objekte verschiedenen Klassen zugewiesen werden können (HENDERSON & LEWIS, 2008). Aufgrund der auftretenden Mehrdeutigkeiten in der Rückstreuung müssen neben dem Grauwert weitere Merkmale zur Beschreibung der Landbedeckungen gefunden werden.

Seit der kommerziellen Verfügbarkeit sehr hoch aufgelöster Daten wird auch vermehrt das Verfahren der Segmentierung, wodurch Nachbarschaften gebildet werden, in der Fernerkundung angewandt (NEUBERT, 2005). Insbesondere durch das Einbeziehen von Nachbarschaftsbeziehungen und somit des Kontextes in die Klassifikation besitzen objektorientierte Auswerteverfahren eine bedeutende Erweiterung gegenüber den pixelbasierten Verfahren. Neben den Grauwerten, den Nachbarschaften und dem Kontext können beispielsweise noch Informationen über die Form, die Größe des Bildobjektes sowie die Textur in die Klassifikation eingebunden werden.

Das Wissen über ein Objekt kann für die Klassifikation genutzt werden. Dies birgt eine Verbesserung der Klassifikationsergebnisse, weshalb eine objektorientierte Auswertung durchgeführt wurde. Die Objekte werden durch Segmente dargestellt, wodurch der Klassifikation eine Segmentierung vorangestellt ist.

### 5.1 Segmentierung

Bei der objektorientierten Bildanalyse repräsentieren Bildobjekte bzw. -segmente die abgebildeten realen Objekte. Die einzelnen Segmente sollen nach HARALICK & SHAPIRO (1985) einheitlich und homogen bezüglich ihrer Eigenschaften sein. Die Homogenität der Segmente

kann sich neben der spektralen Signatur auch auf die Textur oder die Größe des Segments beziehen (BÄHR, 2005). Segmente bestehen aus benachbarten Pixeln, die einen Teil oder ein ganzes Objekt präsentieren. BLASCHKE (2000) hat drei vereinfachte Kriterien, die ein Segment erfüllen sollte, abgeleitet:

- Homogenität innerhalb des Segments,
- Abgrenzung von den angrenzenden Segmenten durch Verschiedenheit und
- einfache Segmentgrenzen.

SPIRKOVSKA (1993) unterteilt die Bildsegmentierungstechniken in drei Gruppen: die pixel- (*pixel-based*) und kantenbasierten (*edge-based*) Verfahren sowie regionen-basierte (*region-based*) Verfahren, bei denen, beruhend auf einem oder mehreren Pixeln, spektral ähnliche Nachbapixel zusammengeführt werden. Zu den regionen-basierten Verfahren gehören u. a. die in HARALICK & SHAPIRO (1985) genannten *split and merge* Methoden sowie auf dem *Region-Growing* basierenden Methoden (BLASCHKE, 2000). Bei kantenbasierten Segmentierungsverfahren werden mittels Kantendetektoren starke Gradienten im Bild gesucht. Die gefundenen Kanten werden in einem nächsten Schritt in Gruppen zusammengefasst. Rein kantenbasierte Verfahren erfüllen allerdings das Kriterium der Homogenität innerhalb des Segmentes nicht zwangsläufig, sodass weitere Bearbeitungsschritte vonnöten sind (BLASCHKE, 2000). Zu den pixelbasierten Verfahren gehören z. B. Schwellwertverfahren. Diese sowie die kantenbasierten Verfahren spielen bei der weiteren Betrachtung der Segmentierung keine Rolle.

### Segmentierung mittels eCognition Developer

Für die Segmentierung und Klassifizierung der SAR-Daten wurde die Software eCognition Developer 8.0 verwendet. Dem Nutzer stehen verschiedene Segmentierungsalgorithmen zur Auswahl, u. a. der *Multiresolution Segmentation* Algorithmus, auf den sich das Folgende bezieht.

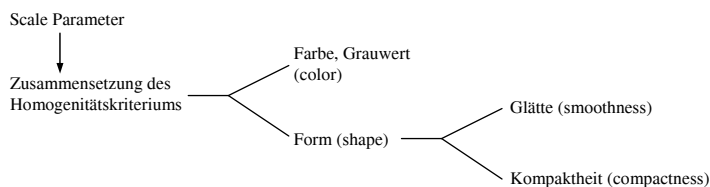
Die Segmentierung basiert auf dem *Fractal Net Evolution* Ansatz. Mittels einer heuristischen Optimierungsprozedur wird die durchschnittliche Heterogenität minimiert, wodurch eine Kontinuität der Werte sowie eine räumliche Kontinuität erreicht werden. Es handelt sich hierbei um einen Ansatz, für den keine Vorkenntnisse erforderlich sind (BLASCHKE, 2000). Die bei der Segmentierung entstandenen, hierarchisch vernetzten Bildobjektprimitiven bilden die Grundlage für die darauf folgende objektorientierte Klassifikation. Die Anforderungen an das von Definiens entwickelte Multiresolution-Segmentation Verfahren werden in BAATZ & SCHÄPE (2000) wie folgt zusammengefasst:

- Hohe Qualität der Bildobjektprimitiven, sodass die Segmentierung eine geeignete Grundlage für verschiedene Problemstellungen bildet
- Anpassbarkeit des Maßstabes der Bildobjekte an einen gewünschten Maßstab
- Bildobjekte mit ähnlicher Größe, damit sie vergleichbar sind (die Attribute der Bildobjekte (z. B. die Textur) sind mehr oder weniger maßstabsabhängig)
- Reproduzierbarkeit der Segmentationsergebnisse
- Anwendbar auf verschiedene Datentypen und Problemstellungen
- Akzeptable Berechnungszeiten auch für größere Datensätze.

Das Multiresolution-Segmentierungsverfahren gehört zu den *Region-Merging*-Methoden. Die zwei Hauptbestandteile der Segmentierung sind zu einem die Entscheidungsheuristiken, um die Bildobjekte zu bestimmen, welche in dem jeweiligen Schritt verschmolzen werden, und zum anderen die Festlegung der Homogenität der Bildobjekte, um den Übereinstimmungsgrad für die betrachteten Bildobjektpaare zu bestimmen (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Dabei werden zunächst alle Pixel als Segmente aufgefasst. Diese werden nach und nach mit benachbarten Bildobjekten zu größeren Bildobjekten zusammengeführt (*bottom-up region-merging*). Die Ähnlichkeit zu den Nachbarbildobjekten wird durch das lokale Homogenitätskriterium beschrieben (LEUKERT, 2002). Bevor benachbarte Bildobjekte verschmolzen werden, wird das Homogenitätskriterium berechnet und mit einem Schwellwert verglichen. Übersteigt das Kriterium diesen Schwellwert, den Scale-Parameter, kann das entsprechende Bildobjekt nicht weiter verschmolzen werden. Ansonsten wird das Bildobjekt mit dem Nachbarbildobjekt verschmolzen, welches den geringsten Anstieg an Heterogenität verursacht hat. Sind keine Verschmelzungen mehr möglich, wird der Prozess beendet (NEUBERT, 2005).

Der Nutzer kann die Segmentierung durch den Scale-Parameter beeinflussen. Ein größerer Schwellwert lässt mehrere Verschmelzungen zu und führt somit zu größeren Bildobjekten. Somit kann der Nutzer die Größe der Segmente beeinflussen (BLASCHKE, 2000). In Definiens eCognition ist die Segmentierung in verschiedenen, hierarchisch angeordneten Ebenen möglich. Ein größerer Scale-Parameter kann genutzt werden, um Ebenen (Level) mit größeren Segmenten zu generieren, mit kleineren Scale-Parametern können entsprechend kleinere Segmente auf den unteren Ebenen erzeugt werden. Der Grenzverlauf des Superobjektes lässt sich in den Grenzverläufen bzw. Teilen der Grenzen der Sub-Objekte wiederfinden. Jedes Sub-Objekt gehört zu genau einem Super-Objekt und steht zum Super-Objekt in einer 1 : m-Beziehung.

Neben dem Scale-Parameter kann die Segmentierung durch das Homogenitätskriterium beeinflusst werden, welches sich aus einer Kombination der Homogenität von Farb- und Formeigenschaften der Bildobjekte zusammensetzt. Die Formhomogenität wiederum wird aus der Linienglätte (*smoothness*) sowie Kompaktheit (*compactness*) der Segmente bestimmt. Das Homogenitätskriterium wird seitens des Nutzers durch die Festlegung der Gewichtung der Formparameter *shape* sowie *compactness* festgelegt, wodurch die Gewichtung der konträren Parameter *color* bzw. *smoothness* indirekt erfolgt (DEFINIENS, 2009b). Die Abbildung 5.1 zeigt die Zusammenhänge der einzelnen Parameter.

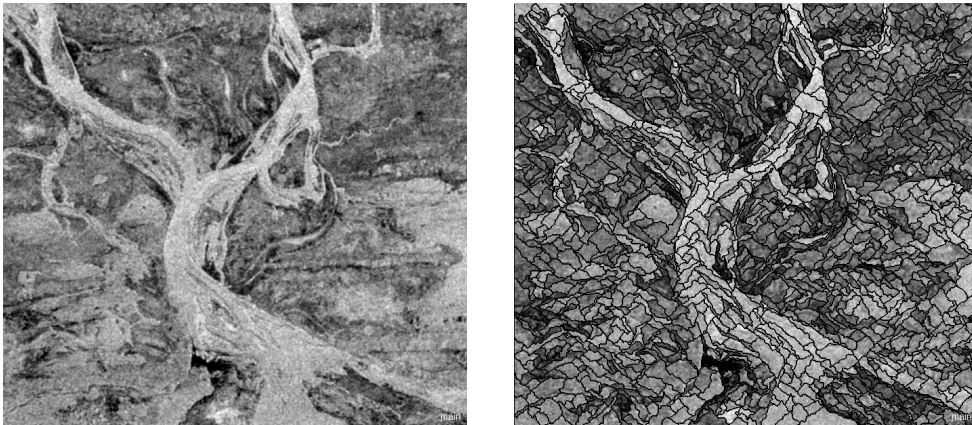


**Abbildung 5.1:** Homogenitätskriterium (nach DEFINIENS, 2009a, geändert)

Eine Untersegmentierung liegt vor, wenn die Segmente Flächen von Objekten unterschiedlicher Klassen enthalten und somit bei einer Klassifizierung nicht eindeutig einer Klasse zugeordnet werden können. Die Segmente sind noch zu groß und repräsentieren die realen Objekte nicht sinnvoll. Das Gegenteil davon ist die Übersegmentierung, bei der ein Objekt aus mehreren Segmenten besteht. Das Segment ist zu klein, um das Objekt vollständig

wiederzugeben. Es repräsentiert nur einen Objektteil. Das ein Segment genau das zu extrahierende Objekt darstellt, ist jedoch recht selten (NEUBERT, 2005). Vielmehr treten sowohl Unter- als auch Übersegmentierungen innerhalb eines Bilddatensatzes auf (BAATZ & MIMLER, 2002).

Für ein zufriedenstellendes Segmentierungsergebnis muss eine geeignete Gewichtung der einzelnen Parameter des Homogenitätskriteriums sowie des Scale-Parameters gefunden werden. Die Segmentierungsparameter wurden iterativ ermittelt. Die Abbildung 5.2 zeigt einen Bildausschnitt einer Segmentierung für die Ebene mit dem Scale-Parameter 20. Es wurden verschiedene Gewichtungen der Größen *shape* und *compactness* durchgeführt, um eine gute Übereinstimmung der Segment- mit den Objektgrenzen zu erreichen.



**Abbildung 5.2:** Ausschnitt der Segmentierung; links: Ausschnitt aus der originalen ERS-Szene, rechts: Segmentierung für das Level 20 (Shape: 0,3, Compactness: 0,1)

Zu sehen ist die Flussgabelung nördlich von Lac Débo in der Aufnahme vom 17.11.1995. Für den dargestellten kleinen Scale-Parameter von 20 werden die Objektgrenzen überwiegend von Segmentgrenzen wiedergegeben. Die realen Objekte einer Klasse bestehen demnach aus mehreren Segmenten, welche nach der Klassifikation zusammengefügt werden müssen. Eine Übersegmentierung lässt sich bei den vorliegenden Daten nicht vermeiden. Die Objekte weisen durch den Speckle eine geringe Homogenität bezüglich des Grauwertes auf, wodurch kleinere Segmente nötig sind, um eine Untersegmentierung zu vermeiden. Aus diesem Grund erfolgte die Klassenzuweisung auf einer kleinen Segmentierungsebene.

Basiert die Segmentierung allein auf der Farbeigenschaft als bestimmender Parameter des Homogenitätskriteriums, werden größere Bereiche mit ähnlichen Grauwerten zwar gefunden und zu größeren Segmenten zusammengeschlossen (Anhang A.6, Beispiel b), allerdings unterscheiden sich diese Segmente in ihrer Größe deutlich von den anderen. Durch die unterschiedlichen Größen der Bildobjekte wird die Vergleichbarkeit der Attribute bei der Klassifikation der verschiedenen Segmente erschwert, weshalb diese Einstellung nicht verwendet wurde. Segmentierungen mit Gewichtung auf dem Parameter *compactness* eignen sich, auf Grund der oftmals fehlenden Lagegenauigkeit der Segmentgrenze mit der realen Objektgrenze, ebenfalls nicht als Klassifikationsgrundlage (Anhang A.6, Beispiel d). Auch bei der Verlagerung der Gewichtung auf den Parameter *smoothness* ist das Segmentierungsergebnis nicht zufriedenstellend (Anhang A.6, Beispiel c).

Für das Untersuchungsgebiet liegt die Gewichtung für die verschiedenen Level hauptsächlich auf der Farbhomogenität. Der Formanteil ist vorwiegend geringer als die Farbhomogenität, bleibt jedoch nie unberücksichtigt. In allen Ebenen wird der Formanteil durch *smoothness* bestimmt (*compactness* = 0,1). Zusätzlich fließt in den unteren Leveln die topographische Karte mit in die Segmentierung ein, um vor allem die Segmentgrenzen der Dünenformationen und teilweise auch der Flussläufe zu verbessern. Die Qualitätsprüfung der Segmentierung erfolgte visuell.

Im eCognition Developer 8.0 können größere Daten mit Hilfe der *tile and stitch* Funktion bearbeitet werden. Die SAR-Daten, mit jeweils rund 7 200 x 7 200 Pixeln, wurden in Kacheln mit maximal 3 000 x 3 000 Pixeln unterteilt, welche segmentiert und anschließend wieder zusammengefügt wurden.

Es wurden insgesamt zehn Segmentierungsebenen berechnet, wobei die erste Ebene ausschließlich der Bestimmung des Hintergrunds dient. Von den restlichen neun Leveln wurden fünf für die Klassifikation verwendet. Auf den höheren Ebenen werden u. a. Teile der Flussläufe klassifiziert sowie relative Flächenanteile bestimmter Klassen auf den unteren Leveln bestimmt. Das Ergebnis der Klassifikation enthält die kleinste Segmentierungsebene.

## 5.2 Klassifikation

Anhand der Oktober- und der März-Aufnahme werden für die vorliegenden SAR-Daten zwei Regelwerke erstellt: eines für die ansteigende Überschwemmung sowie für die Zeit der maximalen Ausdehnung und ein zweites für die Zeit der bereits deutlich gesunkenen Pegelstände und des deutlichen Rückgangs der Überschwemmungsfläche (im Folgenden als Niedrigwasser bezeichnet). In den Regelwerken werden mit Hilfe der Zusatzdaten und Nachbarschaftsbeziehungen die auftretenden Klassen beschrieben.

In die Klassifikation werden die Objektmerkmale Grauwert, Textur, Form sowie klassenbezogene Eigenschaften (z. B. die Beziehung zu benachbarten Objekten mittels der relativen gemeinsamen Grenzlänge) eingebunden. Neben den Objektmerkmalen fließen zusätzlich die SRTM-Maske, das Ergebnis der Klassifikation der Hauptkomponenten, die 2. Hauptkomponente, die bearbeitete topographische Karte, die Standardabweichung zwischen den einzelnen Aufnahmen während der Überflutung sowie das aus der Landsat März-Aufnahme extrahierte Gewässernetz mit ein.

Die visuelle Analyse der SAR-Daten in Kapitel 4.3.2 zeigt, dass Flächen mit ähnlicher Rückstreuung u. a. durch die Lage im Bild bzw. durch die angrenzenden Landbedeckungen unterschieden werden können. Mit Hilfe von Start-Segmenten, deren Positionen durch die Zusatzdaten sowie durch Objektmerkmale bestimmt werden, und eines Region-Growing Verfahrens (vgl. u. a. HANDELS, 2009) werden die Flächen klassifiziert. Als Region-Growing Verfahren wurde auf die absolute mittlere Differenz bestimmter Klassen zu benachbarten, überwiegend unklassifizierten Objekten zurückgegriffen.

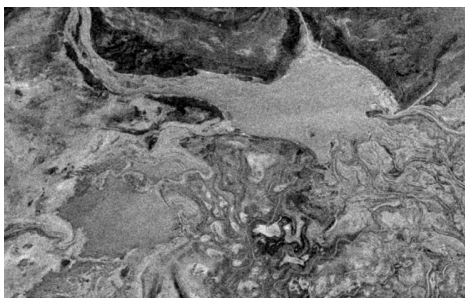
Das Region-Growing Verfahren wurde bei einem Großteil der Klassen angewandt. Dabei erfolgt zunächst die Klassifikation mit einer engen Klassenbeschreibung, welche die Start-Segmente bestimmt. In Verbindung mit einer Schleifenfunktion werden nun mittels der absoluten Grauwertdifferenz benachbarte Segmente, mit zum Teil großzügigerer Klassenbeschreibung, zugeordnet. Der Ablauf umfasst hauptsächlich diese drei Schritte:

- Erstellung der Start-Segmente

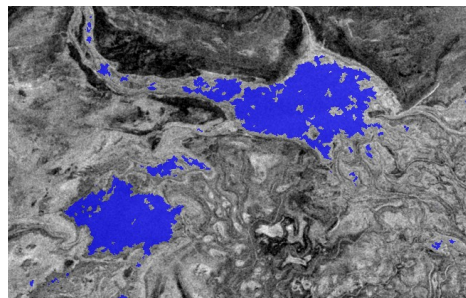
- Ausschluss von vereinzelt klassifizierten Start-Segmenten
- Region-Growing mittels absoluter Grauwertdifferenz.

Exemplarisch sei der Ablauf des Region-Growing anhand der Klassifikation von offenen Seeflächen, speziell des Lac Débo und des Walado Debo der März-Aufnahme, gezeigt (vgl. Abb. 5.3). Die Kombination der drei Merkmale Grauwert, Entropie-Wert sowie Gewässernetz als Basis der Klassenbeschreibung ermöglicht es, die große Spanne an Grauwerten der Gewässerflächen abzudecken und die Start-Segmente in der untersten Segmentierungsebene zu setzen (vgl. Abb. 5.3b). Die unterste Segmentierungsebene wird an dieser Stelle verwendet, da für die Berechnung der Entropie ein größeres Fenster benötigt wird (vgl. Abschnitt 4.1.3) und somit an den Übergängen (Gewässerrand) höhere Entropie-Werte berechnet werden. Werden die Segmente zu groß, können die Übergangsbereiche den Entropie-Wert des Segmentes ebenfalls erhöhen.

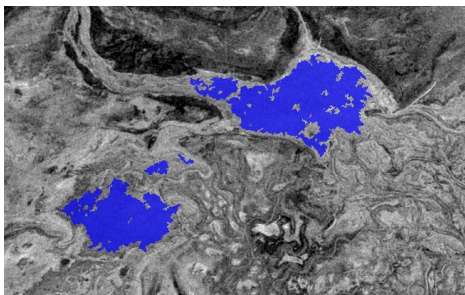
Neben der Grauwertspanne für die Seen und Flussläufe, mit dem Schwellwert der Mindest-rückstreuung als untere Grenze, sind Informationen des Gewässernetzes notwendig, um zunächst die Position von permanenten Seen zu erhalten. Die Erfassung der Ausbreitung des Sees erfolgt mittels der Entropie-Werte. Größere Wasserflächen, jedoch zum Teil auch überschwemmte Flächen, besitzen geringe Entropien, weswegen eine Kombination aus den drei Bedingungen notwendig ist.



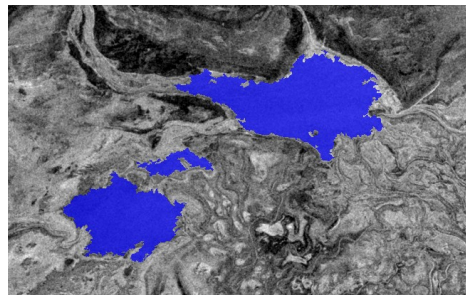
(a) Ausschnitt ASAR-Szene 19.03.2004



(b) Start-Segmente



(c) Bereinigung der Start-Segmente



(d) Region-Growing mittels absoluter Differenz

**Abbildung 5.3:** Beispiel für das Region-Growing anhand der Seen Lac Débo und Walado Debo

Zunächst sind neben den Seeflächen weitere vereinzelte Segmente in die Klasse eingeordnet worden. Es ist ersichtlich, dass die klassifizierten Segmenten innerhalb der Seen eine hohe Dichte aufweisen. Die vereinzelten Segmente außerhalb der Wasserflächen müssen zunächst



als „unklassifiziert“ zurückgewiesen werden. Um die Klassifizierung der vereinzelt Segmenten wieder zurückzuweisen, wurde die Klasse drei Segmentierungsebenen höher übergeben und anschließend in der untersten Ebene wieder als „unklassifiziert“ deklariert. Bei der Übergabe gilt die Bedingung, dass mindestens 40 % der Fläche des Segmentes (der höheren Ebene) in der untersten Ebene als „offenes Gewässer“ klassifiziert wurden. Somit werden die vereinzelt Segmenten ausgeschlossen. Nach der Rückweisung in die unterste Segmentierungsebene (vgl. Abb. 5.3c) wurden mit Hilfe der absoluten mittleren Differenz sowie eines größeren Entropie-Schwellwertes umliegende Segmente auf Klassenzugehörigkeit überprüft. Abbildung 5.3d zeigt die Klassifikation der Seeflächen. An dieser Stelle bricht das Region-Growing ab, da die Entropie-Werte für den Flusslauf über dem Schwellwert liegen. Würde das Region-Growing allein auf den Grauwerten und der Grauwertdifferenz zu den benachbarten Segmenten weitergeführt, werden neben den Wasserflächen auch die angrenzenden, überschwemmten Bereiche erfasst.

Sowohl die Entropie-Werte als auch der Mindestwert für die Gewässerflächen wurden als Variablen angelegt, damit diese bei der Übertragung auf die anderen Zeitpunkte angepasst werden können. Das beschriebene Regelwerk kann jedoch nur auf größere bzw. breite Gewässer angewandt werden. Der Flusslauf des Niger ist nur rudimentär in dieser Klasse erfasst. Dies liegt wieder in der Fenstergröße zur Texturberechnung begründet, wodurch neben dem Flusslauf auch die angrenzenden Ufer in die Berechnung eingingen und der Entropie-Wert entsprechend erhöht wird. Der angrenzende Flussverlauf wird im späteren Verlauf der Klassifikation erfasst.

Die Klassenzuweisungen der einzelnen Abschnitte des Regelwerks erfolgt, wie bereits erwähnt, auf einer niedrigen Segmentierungsebene. Die Klassifikation selbst kann in höheren Leveln erfolgen, deren Ergebnis an die untere Ebene weitergegeben wird.

Durch den Einbezug der Nachbarschaften erfolgt die Klassifikation in einer bestimmten Reihenfolge. Begonnen werden beide Regelwerke mit den Seeflächen und den dunklen Flächen im Übergangsbereich, bei denen es sich, je nach Aufnahmezeitpunkt, um trockene oder überschwemmte Flächen handeln kann. In einem zweiten Schritt werden die nicht überschwemmten Bereiche des Delta, der Dünen und des Bandiagara-Plateaus ermittelt. Dabei werden mögliche Überschwemmungsflächen zunächst nicht berücksichtigt. Die möglichen Überschwemmungsflächen werden vor allem aus dem Ergebnis der Hauptkomponententransformation sowie der 2. Hauptkomponente ermittelt. Die Erfassung des Flusslaufes und der Flächen mit Vegetation bzw. mit erhöhter Bodenfeuchte folgt. Die verbleibenden Übergangsbereiche werden am Ende geschlossen. Treten in diesen Bereichen erhöhte Rückstreuwerte auf, handelt es sich um noch nicht überschwemmte Bereiche, die einen größeren Anteil an Vegetation besitzen (z. B. in der Oktober-Aufnahme).

### 5.2.1 Regelwerk zur Klassifikation von Aufnahmen mit Niedrigwasser

Das Regelwerk wurde zunächst anhand der März-Aufnahme 2004 erstellt und später auf die drei Niedrigwasseraufnahmen vom Februar bzw. April 1996 angewandt.

In der März-Aufnahme lag die Herausforderung vor allem in der Trennung von offenen Gewässern und von Flächen mit hoher Bodenfeuchte bzw. Vegetation sowie von wasserführenden Flussläufen und bereits trockengefallenen Flächen des Delta.

In einem ersten Schritt erfolgte die Klassifikation der größeren Seenflächen wie im vorherigen Abschnitt beschrieben. Der Schwellwert der Entropie, mit dem die Wasserflächen von den restlichen Landbedeckungen unterschieden werden, muss individuell für jede Aufnahme festgelegt werden. Für die Aufnahmen bei Niedrigwasser variierte der Schwellwert zwischen 3 und 2,7. Zusammen mit der Festlegung einer Mindestrückstreuung für die Gewässer von größer -11 dB sowie des Gewässernetzes konnten in der März-Aufnahme die drei großen Seen extrahiert werden.

Die Flussläufe heben sich in der Zeit außerhalb der Überschwemmungen von der Umgebung deutlich ab. Dadurch existieren in den höheren Leveln (Level 75) bereits Segmente, die hauptsächlich deren Verlauf enthalten. Durch die linienhafte Natur der Flussläufe können diese mit Hilfe von formbeschreibenden Parametern, wie den *Shape-Index*, der die Glattheit der Segmentgrenze beschreibt, in dem höheren Level klassifiziert werden (DEFINIENS, 2009a). Aufgrund von Grauwertschwankungen innerhalb der Flussläufe, welche sich auf die Segmentierung ausgewirkt haben, oder wegen einer durch eine Kachelgrenze (hervorgerufen durch die *tile and stitch* Funktion) verursachten Unterbrechung des Segments werden die Flussläufe in der Regel nicht vollständig erfasst. Aus diesem Grund wird zusätzlich eine Kombination aus den Grauwerten und dem Gewässernetz für die Klassifikation hinzugezogen. Zusammen mit den Seeflächen bilden die beiden Klassen die „offenen Gewässer“.

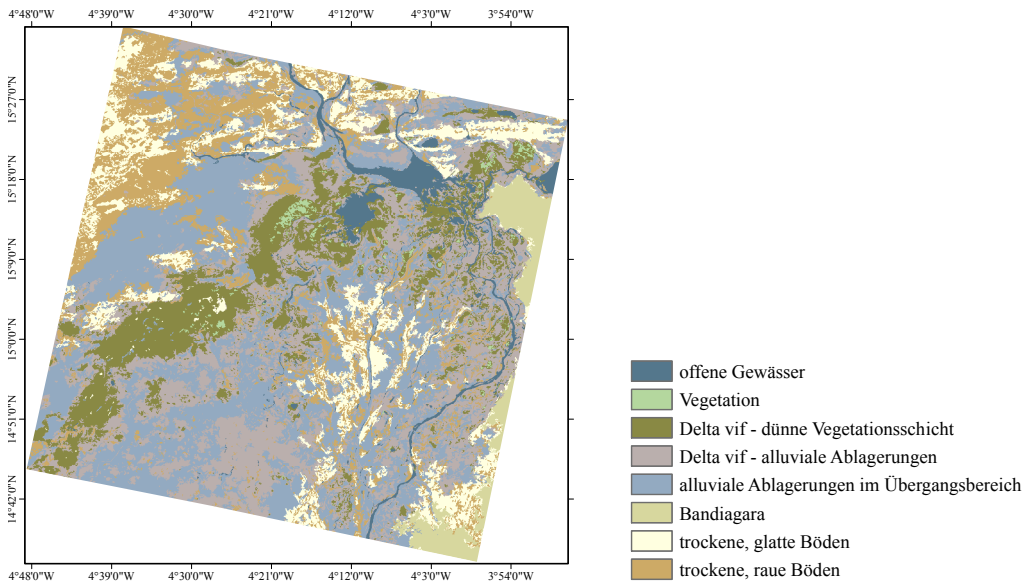
Die dunklen Flächen mit Werten kleiner -13 dB repräsentieren während der Trockenzeit Bereiche, in denen offene Böden dominieren. Vereinzelt fallen in diesen Wertebereich noch wasserführende Mare. Die größeren Flächen des Delta mort werden zunächst zusammen erfasst. Unter Zuhilfenahme der topographischen Karte und des Klassifikationsergebnisses der Hauptkomponententransformation wurden die Dünen sowie die Bereiche des Delta mort, welche keiner Überschwemmung unterliegen, klassifiziert. Dabei werden die Start-Segmente vor allem mit Hilfe der topographischen Karte (Klasse Boden) und des Grauwerts gesetzt. Mittels eines mehrstufigen Region-Growing werden die nicht überschwemmten Bereiche „trockene, raue Böden“ und „trockene, glatte Böden“ erfasst. Auf den Grund der Umbenennung der beiden Bodenklassen wird am Ende dieses Kapitels eingegangen. In beiden Regelwerken wurden zudem die im Osten des Überschwemmungsbereichs angrenzenden Ausläufer des Bandiagara-Plateaus mit Hilfe der aus den SRTM-Daten erstellten Maske sowie eines anschließenden Region-Growing extrahiert („Bandiagara“).

In den Senken des Delta vif hält sich die Feuchtigkeit länger im Boden. Durch die Feuchtigkeit kann in diesen Bereichen grasartige Vegetation auftreten („Delta vif – dünne Vegetationsschicht“). Diese Bereiche können nun allein mittels der hohen Rückstreuung erfasst werden, da die Gewässerflächen, welche zum Teil ebenfalls eine hohe Rückstreuung besitzen, bereits zuvor klassifiziert wurden. Ist der Boden bereits trockengefallen und die Vegetation verschwunden, überwiegen die Böden des Delta vif bzw. im Übergangsbereich mit den alluvialen Ablagerungen („Delta vif – alluviale Ablagerungen“ bzw. „alluviale Ablagerungen im Übergangsbereich“).

Das Ergebnis der Klassifikation der März-Aufnahme ist in Abbildung 5.4 zu sehen.

### Übertragung auf die ERS-Aufnahmen des hydrologischen Jahres 1995/1996

Bei der Übertragung des Regelwerks auf die drei Aufnahmen vom 29.02.1996 sowie 04.04.1996 und 05.04.1996 muss dieses zuweilen an die abgebildeten Gegebenheiten angepasst werden.



**Abbildung 5.4:** Ergebnis der Klassifikation der ASAR-Aufnahme vom 19.03.2004

So zeigte sich beispielsweise, dass der Lac Korientzé in der Februar-Aufnahme nicht durch den Entropie-Schwellwert erfasst werden konnte. Die Rückstreuung ist wie auch in den Oktober- und Dezember-Aufnahmen mit kleiner  $-6$  dB recht hoch und somit nicht untypisch für dieses Gewässer. Dennoch liegen die Entropie-Werte über dem Schwellwert. Dies trat nur in dieser Aufnahme auf. In den weiteren SAR-Szenen können die Seeflächen wie im vorherigen Abschnitt beschrieben erfasst werden.

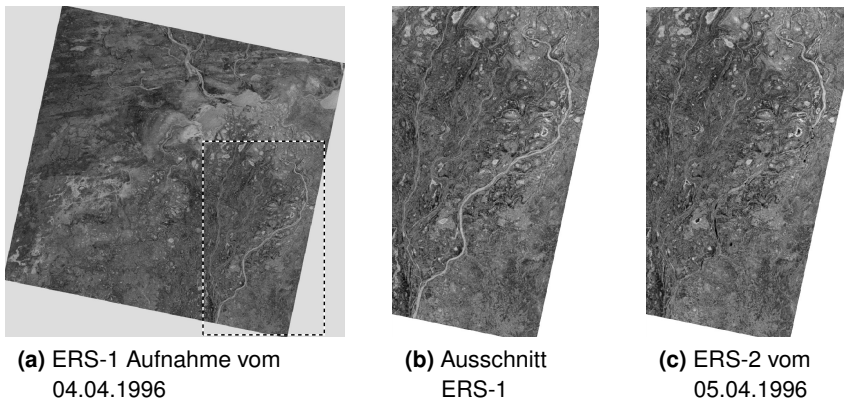
Um Lac Korientzé in der Februar-Aufnahme zu erfassen, bedurfte es einer zusätzlichen Regel, welche in den höheren Ebenen nach Segmenten mit einer geringen Standardabweichung, die vorwiegend bei Wasserflächen auftreten, sucht. Voraussetzung hierfür ist die Erfassung der Gewässerfläche in einem Segment. In der Niedrigwasseraufnahme ist der See gut als ein Segment in einer höheren Ebene erfasst worden, sodass über dessen Standardabweichung die Seefläche ermittelt werden konnte.

Die Flussläufe, insbesondere der Verlauf südlich der Seenplatte, werden überwiegend durch den großen Kontrast zu deren Umfeld gut von den Segmenten in den höheren Ebenen erfasst. Somit kann im Speziellen der Verlauf des Nigers wie in der März-Aufnahme mittels Formparameter erfasst werden. Jedoch besteht auch hier eine Ausnahme.

Zwischen den beiden April-Aufnahmen bestehen im oberen Nigerverlauf im Untersuchungsgebiet deutliche Unterschiede in der Rückstreuung. In der ERS-1 Aufnahme vom 04.04.1996 ist dieser deutlich erkennbar (vgl. Abb. 5.5b), wohingegen einen Tag später in der ERS-2 Aufnahme der Verlauf sich kaum von der Umgebung abhebt (vgl. Abb. 5.5c). Mit Rückstreuerten zwischen  $-7$  dB und  $-8,5$  dB liegt der obere Flusslauf in der Aufnahme vom 04.04.1996 in derselben Dimension wie die ASAR-Aufnahme. Die Spanne der Rückstreuerten für denselben Flussabschnitt in der Aufnahme vom 05.04.1996 ist deutlich größer, zudem sind die Werte überwiegend kleiner  $-11$  dB.

Die Aufnahmen erfolgten mit nur einem Tag Abstand, sodass gravierende Veränderungen der Landbedeckung unwahrscheinlich sind. Die Aufnahmekonfigurationen der beiden Satel-

liten sind ebenfalls beinahe identisch. Beide Aufnahmen entstanden zudem während der absteigenden Umlaufbahn (descending) des Satelliten mit westwärts schauender Blickrichtung.



**Abbildung 5.5:** Gegenüberstellung der unterschiedlichen Rückstreuung im oberen Flusslauf des Niger

Aufgrund der geringen Rückstreuung der Gewässerflächen wurde zusätzlich für die zweite April-Aufnahme die Möglichkeit von Wasserflächen mit sehr geringer Rückstreuung (-20 dB und kleiner) im Regelwerk ergänzt.

Zudem ist die Rückstreuung der dunklen, trockenen Flächen in den ERS-Aufnahmen mit Werten kleiner -16 dB für die Start-Segmente auch um 1 dB geringer als bei der ASAR März-Aufnahme.

### 5.2.2 Regelwerk zur Klassifikation von Aufnahmen während der Überschwemmung

Wie die Ergebnisse der visuellen Bildinterpretation aus Abschnitt 4.3.2 zeigen, besitzen die Landbedeckungen in Aufnahmen während der Überschwemmung Überschneidungen in der Rückstreuung. Durch die große Spannweite an Rückstreuwerten der Wasserflächen sind diese besonders häufig von den Überschneidungen betroffen, weshalb ebenfalls mit der Klassifikation der Seeflächen begonnen wird.

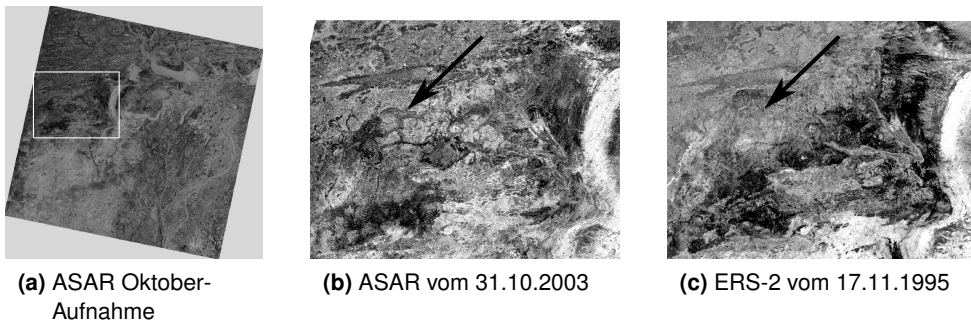
Die Seeflächen werden nach demselben Prinzip wie in dem Regelwerk des Niedrigwassers unter Zuhilfenahme des Entropie-Texturlayers klassifiziert. Der Schwellwert für die Entropie ist in den überschwemmten Aufnahmen teilweise höher, verglichen mit denen des Niedrigwassers. Für die Oktober-Aufnahme beträgt der Schwellwert der oberen Grenze beispielsweise 3,7, in der Dezember-Aufnahme jedoch 2,6. Zudem hat sich die Mindestrückstreuung der Flussläufe von -11 dB in der März-Aufnahme auf -13,5 dB verringert.

Im nächsten Schritt werden hier ebenfalls die Böden außerhalb des Überschwemmungsbereiches (ebenfalls „trockene, raue Böden“, „trockene, glatte Böden“, „Bandiagara“) sowie die bereits überschwemmten Flächen im Übergangsbereich („überschwemmte Flächen im Übergangsbereich“) klassifiziert. Letztere werden unter Zuhilfenahme des Ergebnisses der Hauptkomponententransformation sowie anhand der geringen Rückstreuung erkannt. In den

vorliegenden Aufnahmezeitpunkten ist die Überschwemmung bereits so fortgeschritten, dass die angrenzenden Flächen in Richtung Delta vif bereits vom Wasser erreicht wurden und somit die Flächen mit geringer Rückstreuung überschwemmten Bereichen entsprechen. Die Start-Segmente für die dunklen Wasserflächen im Übergangsbereich werden mittels des Grauwerts (kleiner -15 dB) auf einer höheren Segmentierungsebene sowie der Lage in der topographischen Karte (Nicht-Boden) ermittelt.

Die Bodenklassen werden mittels derselben Regeln wie die Niedrigwasser klassifiziert. Durch die hohe Dynamik innerhalb des Untersuchungsgebietes verändert sich während der Überschwemmung insbesondere die westliche Grenze zu den nicht überfluteten Bereichen. Dabei müssen in den Überschwemmungsaufnahmen die temporär überschwemmten Bereiche mit höherer Rückstreuung durch geeignete Schwellwerte extrahiert werden.

Um in der jeweiligen Aufnahme zwischen den beiden Zuständen überflutet und nicht überflutet unterscheiden zu können, werden neben dem Kontext auch Oberflächengegebenheiten mit einbezogen, da sich die überschwemmten Flächen mit Vegetation in ihrer Rückstreuung teilweise von nicht überschwemmten Flächen (Oberflächenrauigkeit, Vegetation) ähneln. So ist im westlichen Übergangsbereich ein Muster aus verschiedenen Bodenarten nur zu erkennen, wenn die Flächen noch nicht überflutet sind (vgl. 5.6b und 5.6c).



**Abbildung 5.6:** Übergangsbereich bei beginnender Überflutung (b) und im Stadium der Überschwemmung (c)

Im Fall der Oktober-Aufnahme sind die Übergangsflächen nur teilweise überflutet, sodass es sich bei den Flächen mit einer Rückstreuung über -12dB in diesem Bereich um offene Böden mit einem erhöhten Anteil an Vegetation handelt. Zieht man das Landsat-Mosaik hinzu, wird dies bestätigt. In der Dezember-Aufnahme sind die Übergangsbereiche noch überschwemmt (teilweise mit Vegetation) und besitzen eine durchschnittlich höhere Rückstreuung, was im Regelwerk angepasst wurde.

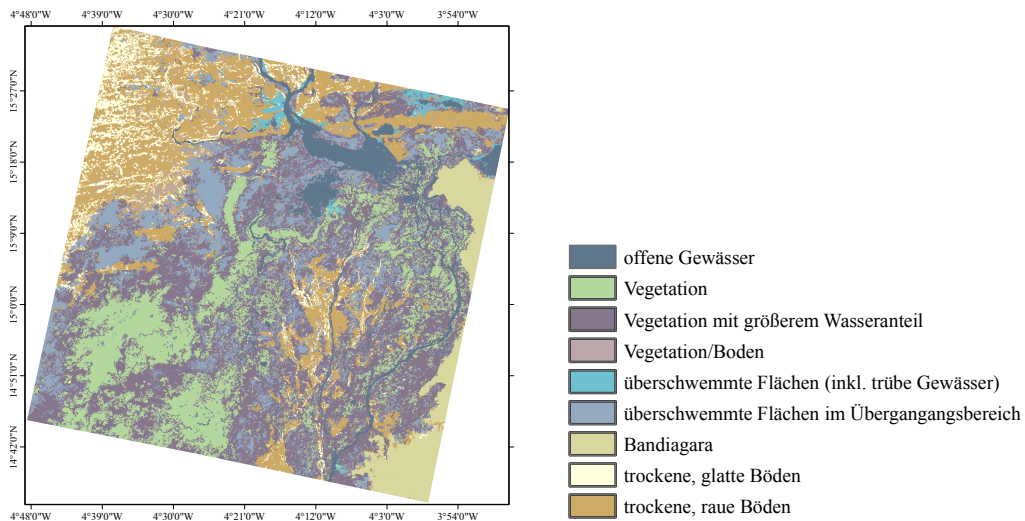
Im Gegensatz zu den Niedrigwasseraufnahmen hebt sich der Flusslauf des Niger nur schwer von seiner Umgebung ab. Aus diesem Grund könnten nur vereinzelt längliche Formen in den höheren Leveln segmentiert werden. An dieser Stelle wird wieder auf das Gewässernetz zurückgegriffen sowie auf die großzügigeren Gewässerflächen der topographischen Karte. Dies ist insbesondere für den unteren Flusslauf des Nigers im Untersuchungsgebiet von Bedeutung, da dieser Teil des Flusses geringere Rückstreuwerte hat und sich weniger von seiner Umgebung abhebt.

Da die größeren Seen bereits klassifiziert wurden, können die hohen Rückstreuwerte nun Flächen mit dichter Vegetation („Vegetation“) zugewiesen werden. Um noch verbliebene

Segmente des Flusslaufs nicht mit einzubeziehen, basiert die Klassifikation auf Flächen mit starken Veränderungen (Klassifikation der Hauptkomponenten). An diese Vegetationsflächen schließen sich die Vegetationsbereiche mit größerem Wasseranteil an. Mittels Region-Growing und der Nachbarschaft zu den dichten Vegetationsflächen, welche für die Start-Segmente verwendet wird, wird die „Vegetation mit größerem Wasseranteil“ klassifiziert.

Die im Westen an das Überschwemmungsgebiet angrenzenden Flächen sowie Bereiche zwischen den Dünen weisen, verglichen mit den Flächen des Delta mort, zum Teil höhere Rückstreuungen auf, welche durch Vegetation hervorgerufen werden. Für die Unterscheidung dieser Flächen wird auf die Lage dieser Flächen zurückgegriffen. Die Start-Segmente werden bei einer bestimmten Spanne an Grauwerten und der 2. Hauptkomponente ermittelt. Die Grauwerte werden zunächst niedriger angesetzt, damit die überschwemmten Flächen nicht mit in den Bereich fallen. Das Region-Growing erfolgt in Richtung Delta mort mittels kleinerer Grauwerte, um die Lücke zu schließen. Zudem werden höhere Schwellwerte zur Erfassung der Böden mit Vegetation („Vegetation/Boden“) verwendet.

Abgeschlossen wird das Regelwerk mit der Zuweisung von noch unklassifizierten Segmenten. Diese werden hauptsächlich durch deren relative Grenzlänge zu bereits klassifizierten Segmenten bzw. durch höhere Grauwertdifferenzen zugewiesen. Das Ergebnis der Klassifikation der Oktober-Aufnahme zeigt Abbildung 5.7.



**Abbildung 5.7:** Ergebnis der Klassifikation der ASAR-Aufnahme vom 31.10.2003

Für die Dezember-Aufnahme mussten nur geringfügige Anpassungen vorgenommen werden. Unter anderem wurden niedrigere Schwellwerte für den Abbruch des Region-Growing bei der Klassifizierung der trockenen Bereiche verwendet. Des Weiteren wurde der Wertebereich für die dichte Vegetation auf maximal -7 dB (im Vergleich zu -8,5 dB in der Oktober-Aufnahme) beschränkt.

Weiterhin wurden die Schwellwerte einiger Klassen angepasst, u. a. die überschwemmten Bereiche ohne Vegetation, deren Rückstreuung auf unter -11 dB von vormals -12 dB gesetzt wurde.

### Übertragung auf die ERS-Aufnahmen der hydrologischen Jahre 1992/1993 und 1995/1996

Die durchzuführenden Anpassungen des Regelwerks an die Aufnahmen während des Niedrigwassers fielen recht gering aus. Anders ist es bei den Aufnahmen während der Überschwemmung. Während der Aufnahmezeitpunkte herrschten, aufgrund der verschiedenen Pegelstände, unterschiedliche Bedingungen bei der Ausbreitung. Im Vergleich der drei hydrologischen Jahre ist der durchschnittliche Jahrespegelstand von 234 cm des Jahres 1992/ 1993 am geringsten. Die durchschnittlichen Pegel der Jahre 1995/1996 und 2003/2004 fielen mit 297 cm bzw. 316 cm deutlich höher aus (vgl. Diagramm der Pegelstände in Anhang A.7). Die niedrigen Pegelstände bzw. die geringe Durchflussmenge bewirkten 1995/1996 eine geringere Ausdehnung der Überschwemmungsfläche.

Insbesondere das vermehrte Auftreten von nicht überschwemmten Flächen innerhalb des Überschwemmungsgebietes sowie in dem Übergangsbereich muss hierbei berücksichtigt werden. Die Übertragung des erstellten Regelwerks gelang nur teilweise. Es konnte nur die Klassifizierung der Flächen mit Vegetation sowie der trockenen Bereiche außerhalb des Überschwemmungsbereiches übernommen werden. Für die trockenen Bereiche innerhalb des sonst überschwemmten Bereiches (entlang des Diaka) sowie die überschwemmten Wasserflächen mussten die Regeln angepasst bzw. neu verfasst werden, sodass überschwemmte Flächen in diesem Fall ausgeschlossen werden kann.

Für die Aufnahme vom 08.12.1992 musste zusätzlich für die Wasserflächen des Lac Débo und Lac Walado neue Regeln verfasst. Mit Hilfe des Entropie-Wertes konnten, aufgrund der unterschiedlichen Rückstreuwerten der Seen, diese nicht vollständig erfasst werden. Die hohe Spanne an mittlerer und geringer Rückstreuung, mit Werten zwischen ca. -14 dB und -9 dB bzw. kleiner -18 dB, trat in keiner anderen Aufnahme aus. Die Gewässerflächen der Aufnahme vom 03.11.1992 konnten hingegen mittels der Entropie klassifiziert werden.

In der ERS-2 Aufnahme vom 17.11.1995 sind die Rückstreuungen der überschwemmten Bereiche im Übergangsbereich mit kleiner/gleich -18 dB deutlich geringer als in den anderen Aufnahmen (zum Vergleich: in der Oktober-Aufnahme besitzen die Flächen Rückstreuungen von -15 dB und kleiner). Zudem ist in der Aufnahme vom 17.11.1995 der Unterschied zwischen den dunklen Wasserflächen und den Böden außerhalb deutlich größer. Die Schwellwerte der Zugehörigkeitsfunktionen für die überschwemmten Flächen wurden angepasst. Für die Bodenklassen lag der Unterschied zwischen der ASAR März-Aufnahme und der ERS-2 November-Aufnahme bei rund 1 dB.

Ähnlich verhält es sich mit der ERS-1 Aufnahme vom 26.10.1995, welche bei aufsteigender Umlaufbahn entstand und nur einen Teil des Untersuchungsgebietes abdeckt. Der obere Flusslauf des Niger sowie die frisch überfluteten Flächen werden durch sehr geringe Rückstreuwerte charakterisiert. Die permanenten Seeflächen besitzen wieder eine höhere Rückstreuung, jedoch können an den Gewässerrändern ebenfalls Bereiche geringer Rückstreuung auftreten. Diese Bereiche sind in der darauffolgenden November-Aufnahme bereits verschwunden, was darauf hinweist, dass diese Flächen frisch überschwemmt waren.

Die Rückstreuungen der Wasserflächen sind in der gesamten ERS-1 Aufnahme sehr gering, sodass sich diese während der Segmentierung, verglichen beispielsweise mit der ASAR Oktober-Aufnahme, deutlich besser extrahieren lassen.

### Zwischenzusammenfassung

Der starke objektspezifische Einfluss auf die Rückstreuung lässt die Rückstreuwerte von Oberflächen, wie z. B. von Wasserflächen, zwischen verschiedenen Aufnahmezeitpunkten trotz einer durchgeführten relativen Kalibrierung variieren, sodass bei jeder Anwendung des Regelwerkes diesbezüglich Anpassungen vorgenommen werden mussten. Nach der Anpassung von verschiedenen Rückstreuwerten konnte das erstellte Regelwerk für die Situation einer Überschwemmung auf Überflutungen ähnlichen Ausmaßes angewandt werden. Für den Fall einer geringen Ausdehnung der Überschwemmungsfläche, wie es 1992/1993 eintrat, eignet sich das Regelwerk jedoch nur für die Vegetationsflächen, für die Bereiche außerhalb des Überschwemmungsbereiches sowie zum Teil für die offenen Gewässer. Die Unterscheidung zwischen den überfluteten und nicht überfluteten Bereichen innerhalb des Delta vif gelang nur zum Teil. Für ein zufrieden stellendes Ergebnis wurden die Regeln verändert, entfernt bzw. teilweise neu erstellt.

Durch die hohe Streuung der Rückstreuwerte ist die Klassenbeschreibung sehr aufwändig und kann nur in einzelnen Schritten mit Hilfe verschiedener temporärer Hilfsklassen erfolgen. Dadurch vergrößert sich der Umfang des Regelwerkes, wodurch der Aufwand bei der Anpassung an andere Szenen zunimmt. Die hohe Anzahl der Bedingungen im Regelwerk sowie die Region-Growing Schleifen lassen zudem die Berechnungszeit ansteigen.





Die verwendeten Klassen für die Klassifizierung der SAR-Daten orientieren sich an der in Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Klassifikation der multispektralen Daten zur Erstellung der Vergleichsbasis. Aufgrund der unterschiedlichen gemessenen Größen (reflektierte Sonnenstrahlung bzw. rückgestreute Mikrowellen) werden unterschiedliche Eigenschaften der aufgenommenen Objekte abgedeckt. Dadurch sind Abweichungen zu den Klassenbeschreibungen aufgetreten. Mit Schwerpunkt auf die Situation einer Überschwemmung lassen sich die Unterschiede zwischen den Klassenbeschreibungen der SAR und der als Vergleichsbasis fungierenden multispektralen Ergebnisse wie folgt zusammenfassen.

Die in multispektralen Aufnahmen deutlich hervortretenden „überschwemmten Flächen (inkl. trübe Gewässer)“, welche überwiegend nördlich des Lac Débo in den Überschwemmungsflächen zwischen den Dünen vorkommen, können in den SAR-Daten nicht ausreichend von den „überschwemmten Flächen im Übergangsbereich“ unterschieden werden. Beide Klassen werden von einer vegetationsfreien Wasseroberfläche dominiert, sodass die Rückstreuung der Mikrowellen durch die Oberflächenrauigkeit entschieden wird anstatt durch die Wassertiefe bzw. -farbe. Für die SAR-Daten wurde deswegen keine Unterscheidung innerhalb der vegetationslosen Überschwemmungsflächen vorgenommen. Die Klasse der „überschwemmten Flächen (inkl. trübe Gewässer)“ wird in die Klasse der „überschwemmten Flächen im Übergangsbereich“ überführt.

Die Klasse „Vegetation“ entspricht überwiegend der getroffenen Definition, dass der Vegetationsanteil überwiegt. Eine Ausnahme bildet ein sichelartiges Gebiet westlich des Lac Walado. Dieser Bereich weist in den Überschwemmungsaufnahmen stets eine hohe Rückstreuung auf, sodass dieser Bereich in die Klasse „Vegetation“ eingeordnet wird. Der Vergleich mit den ermittelten NDVIs deutet jedoch an, dass es sich um Flächen der Klasse „Vegetation mit größerem Wasseranteil“ handelt. Zudem hob sich dieses Gebiet in keiner der gesichteten Karten besonders hervor. Durch die wiederkehrende Präsenz in den Überschwemmungsaufnahmen wäre ein Ortabgleich nötig, um die Ursache dieser hohen Rückstreuung und infolgedessen die Klassenzugehörigkeit zu klären.



Tabelle 5.1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Klassen, welche bei der Einteilung der Überschwemmungsflächen zur Anwendung kamen. Zusammen bilden die Klassen die Kategorie *Überflutet*.




Name	Beschreibung
 offene Gewässer	vegetationsfreie See- bzw. Wasserflächen
 Vegetation	von Vegetation dominierte Überschwemmungsflächen
 Vegetation mit größerem Wasseranteil	Flächen mit einer Mischung aus Wasser und Vegetation, wobei der Wasseranteil dem Anteil an Vegetation überwiegt
 überschwemmte Flächen im Übergangsbereich	umfasst alle überschwemmten Flächen, welche frei von Vegetation sind

**Tabelle 5.1:** Klassen der Kategorie *Überflutet*

Das Pendant bildet die Kategorie *Nicht überflutet*, deren nicht überschwemmte, trockene Böden in Flächen mit geringer Rückstreuung bzw. mittlerer Rückstreuung unterschieden werden. Ebene Flächen mit geringer Rückstreuung wurden als „trockene, glatte Böden“ bezeichnet und enthalten Teile der Bereiche der in der Vergleichsbasis als „sandige Böden“ erkannten Flächen. Die Dünen sowie Teile des Delta mort, deren Oberflächen eine Rückstreuung im mittleren Bereich hervorrufen, werden in die Klasse der „trockenen, rauen Böden“ eingeordnet. Die mittlere Rückstreuung wird durch die höhere Oberflächenrauigkeit sowie durch vorhandene Vegetation hervorgerufen. Aufgrund des Einflusses der Oberflächenrauigkeit auf die Rückstreuung unterscheidet sich die Unterteilung dieser nicht überschwemmten Böden deutlich von der Vergleichsbasis („sandige Böden“, „Delta mort“) und wurde infolgedessen als „trockene, glatte Böden“ bzw. „trockene, raue Böden“ neu definiert.

Die nicht überschwemmten Flächen mit einem erhöhten Vegetationsaufkommen („Vegetation/Boden“) ließen sich von den „trockenen, rauen Böden“ nicht ausreichend trennen. Beide Landbedeckungen besitzen überwiegend ähnliche Rückstreuwerte. Infolgedessen wurden die Flächen der Klasse „Vegetation/Boden“ in die Klasse „trockene, raue Böden“ überführt, welche ebenfalls unterschiedlich dichten Gras- und Strauchbewuchs enthalten kann.

Die Klasse „Bandiagara“ konnte unter Zuhilfenahme der Höheninformationen aus dem SRTM beibehalten werden. Einen Überblick über die verschiedenen Klassen der Kategorie *Nicht überflutet* für die Aufnahmen während der Überschwemmung kann aus der Tabelle 5.2 entnommen werden.

Name	Beschreibung
 Bandiagara	Ausläufer des Bandiagara-Plateaus, Gemisch aus Sand und Lehm sowie Kies
 trockene, raue Böden	enthalten sowohl Dünen und Bereiche mit einem hohen Sandanteil sowie Flächen des Delta mort, unterschiedlich dichter Gras- und Strauchbewuchs ist möglich
 trockene, glatte Böden	

**Tabelle 5.2:** Klassen der Kategorie *Nicht überflutet*



# 6 Evaluierung und Interpretation

Eine Klassifikation ist erst abgeschlossen, wenn sie bewertet wurde (CONGALTON, 1991). Die Bewertung erfolgt über den Vergleich mit Referenzdaten. Dabei wird bei thematischen Kartierungen mittels Fernerkundungsdaten die Genauigkeit benutzt, um den Grad der „Richtigkeit“ des Ergebnisses auszudrücken (FOODY, 2002). Verschiedene Maße zur Bewertung der Qualität werden im Folgenden vorgestellt und für die Evaluierung der Ergebnisse im Anschluss angewandt.

Um die Klassifikationsergebnisse bewerten zu können, müssen aus den im vorigen Abschnitt genannten Gründen die Klassen sowohl der multispektralen als auch der SAR-Aufnahmen so zusammengefasst werden, dass die Eigenschaften, die sie repräsentieren, vergleichbar werden.

Nach der Genauigkeitsanalyse erfolgt eine kurz inhaltliche Auswertung der klassifizierten SAR-Daten. Das Augenmerk liegt auf den Überschwemmungsbereichen und deren Ausmaß zu den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten.

## 6.1 Genauigkeitsanalyse

Es gibt verschiedene Methoden für die Evaluation der Klassifikation von fernerkundlichen Daten. Am geläufigsten ist es, die aus einer quadratischen Fehlermatrix (auch Konfusionsmatrix, vgl. Abb. 6.1) abgeleiteten Qualitätsmaße für die Genauigkeitsbetrachtung zu verwenden. In der Fehlermatrix werden die Referenzdaten dem klassifizierten Ergebnis gegenübergestellt. Die Spalten der Fehlermatrix enthalten für gewöhnlich die Referenzdaten und die Zeilen die entsprechende Klassifikation. Damit repräsentieren die Werte der Hauptdiagonalen die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen klassifizierten Pixeln und Referenzpixeln (CONGALTON, 1991).

	1	...	k	Zeilensumme $n_{i+}$
1	$n_{11}$	...	$n_{1k}$	
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	
k	$n_{k1}$	...	$n_{kk}$	
Spaltensumme $n_{+j}$				n

**Abbildung 6.1:** Fehlermatrix mit der Klassifikation in den Zeilen (i) und der Referenz in den Spalten (j), k = Klasse, n = Summe aller Werte der Fehlermatrix (nach CONGALTON & GREEN, 2008, geändert)

Als einfachstes statistisches Qualitätsmaß kann die Gesamtgenauigkeit (*overall accuracy*), das Verhältnis der korrekt klassifizierten Pixel zu der Summe aller Pixel der Fehlermatrix

$n$ , berechnet werden (siehe Gleichung 6.1 mit Klasse  $i$  ( $i=1, \dots, k$ ) im klassifizierten Bild; Klasse  $j$  ( $j=1, \dots, k$ ) in der Referenz und  $n_{ij}$  Eintrag der Fehlermatrix) (CONGALTON & GREEN, 2008).

$$\text{Gesamtgenauigkeit} = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} \quad (6.1)$$

Für die Einschätzung der Klassifikationsgenauigkeit der einzelnen Klassen bzw. Kategorien (Landbedeckung bzw. Landnutzungsklasse) werden die Hersteller- und die Nutzergenauigkeit (*producer's* und *user's accuracy*) verwendet. In einem hierarchischen Schema können bei Bedarf detaillierte Klassen zu einer allgemeinen Kategorie zusammengefasst werden. Die Herstellergenauigkeit (Gleichung 6.2 links) zeigt das Verhältnis der korrekt klassifizierten Pixel einer Klasse zu der Gesamtzahl der Referenzpixel dieser Klasse (Spaltensumme). Damit ist die Herstellergenauigkeit ein Maß für den Unterlassungsfehler (*omission error*). Die Nutzergenauigkeit (Gleichung 6.2 rechts) zeigt das Verhältnis der korrekt klassifizierten Pixel einer Klasse zu der Gesamtzahl aller in dieser Klasse klassifizierten Pixel (Zeilensumme). Die Nutzergenauigkeit gehört zu den Zuweisungsfehlern (*commision error*) (CONGALTON, 1991).

$$\text{Herstellergenauigkeit} = \frac{n_{jj}}{\sum_{i=1}^k n_{ij}} \quad \text{Nutzergenauigkeit} = \frac{n_{ii}}{\sum_{j=1}^k n_{ij}} \quad (6.2)$$

Um die Vergleichbarkeit der Maße innerhalb der Matrix untereinander sowie mit anderen Genauigkeitsanalysen (mit unterschiedlicher Anzahl an Referenzdaten) zu erreichen, werden die Einträge normalisiert. Auf diese Weise werden die Unterschiede in der Anzahl der Referenzpixel eliminiert (CONGALTON, 1991).

Die genannten Qualitätsmaße beschreiben die Klassifikationsgenauigkeit auf Basis der Fehlermatrix. Jedoch gibt es kein Maß, welches die Klassifikationsgüte vollständig beschreibt, sondern jedes Maß beschreibt die Güte mittels bestimmter Informationen aus der Fehlermatrix. Dies ist bei der Interpretation der Qualitätsmaße stets zu beachten.

Ein weiteres statistisches Maß zur Genauigkeitsabschätzung des klassifizierten Bildes ist der Kappa-Koeffizient, bei dessen Berechnung nicht nur die Einträge, der Hauptdiagonalen, sondern auch Einträge welche die Unterlassungs- und Zuweisungsfehler repräsentieren, mit eingehen (CONGALTON, 1991). Die Gleichung 6.3 zeigt die Berechnung des Kappa-Koeffizienten (CONGALTON & GREEN, 2008).

$$\hat{K} = \frac{p_0 - p_c}{1 - p_c} \quad \text{bzw.} \quad \hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}} \quad (6.3)$$

$N$  entspricht der Gesamtzahl an Referenzpixel. Der Term  $p_0$  steht für die tatsächlichen Übereinstimmungen. Die Zufallsübereinstimmung  $p_c$  (*change agreement*) enthält die Schätzung der zufälligen Anzahl an Übereinstimmungen.

Der Kappa-Koeffizient variiert zwischen -1 und 1, wobei jedoch von einer positiven Korrelation ausgegangen wird. Eine Einteilung der Werte kann wie folgt vorgenommen werden: Werte bis größer 0,8 repräsentieren eine starke Übereinstimmung, Werte zwischen 0,4 und 0,8

eine moderate und Werte unter 0,4 eine schlechte Übereinstimmung (CONGALTON & GREEN, 2008). Der Kappa-Koeffizient sowie die klassische Genauigkeitsanalyse gewichten alle Fehler gleich (FOODY, 2002).

Die Referenzdaten müssen unabhängig von den zu beurteilenden Daten sein, d. h. sie dürfen zuvor nicht als Trainingsgebiete bei einer überwachten Klassifikation eingesetzt werden, da dies zu einer Überbewertung der Klassifikationsgenauigkeit führt. Bei der Genauigkeitsanalyse wird davon ausgegangen, dass die Referenzdaten repräsentativ und fehlerfrei sind. Da insbesondere Letzteres in der Realität selten für die gesamten Referenzdaten zutrifft, kann dies zu einer Unterschätzung der Klassifikationsgenauigkeit führen (CONGALTON, 1991). Auch bedarf es einer gründlichen Registrierung zwischen den Referenz- und Ergebnisdaten, um insbesondere an den Klassengrenzen Fehler bei dem Vergleich zu vermeiden. An den Übergängen von verschiedenen Landbedeckungen treten zudem vermehrt Mischpixel auf. Da bei der Klassifizierung jedes Pixel genau einer Klasse zugeordnet wird, stimmen an diesen Stellen häufig die Referenzwerte nicht mit dem zu bewertenden Bild überein. Bei der Bewertung ist zudem ein möglicher zeitlicher Unterschied zwischen Daten- und Referenzdatenerhebung zu beachten (FOODY, 2002).

Pro Kategorie sollten mindestens 50 Referenzpixel vorhanden sein; bei größeren Flächen sowie bei mehr als zwölf Kategorien mindestens 75 bzw. 100 Referenzen (CONGALTON, 1991). Die Referenzpixel werden mittels zufälliger Stichproben ausgewählt.

Stellvertretend für die klassifizierten SAR-Daten wurden anhand der Oktober- und März-Aufnahmen unter Zuhilfenahme der in Kapitel 4.1.2 aufbereiteten multispektralen Landsat-Aufnahmen die genannten Qualitätsmaße ermittelt.

### 6.1.1 Genauigkeitsanalyse der ASAR Oktober- und Dezember-Aufnahme

Die ASAR-Aufnahme vom 31.10.2003 entstand nur neun Tage nach der Landsat-Aufnahme und liegt somit zeitlich der SAR-Aufnahme am nächsten. Jedoch ist auch in dieser kurzen Zeitspanne von Veränderungen in den Landbedeckungen auszugehen, da sich die Aufnahmezeitpunkte in der Überschwemmungsperiode befanden, in der die Ausbreitung des Wassers noch nicht das Maximum erreicht hat.

Wenn das Landsat-Klassifikationsergebnis als Referenz für die Genauigkeitsanalyse dienen soll, müssen einige Klassenverteilungen angepasst werden. Auf die Unterschiede zwischen den Klassen der multispektralen Aufnahmen und der SAR-Daten wurde am Ende des letzten Kapitels hingewiesen.

Zunächst wurde die Genauigkeit der Unterscheidung zwischen überfluteten und nicht überfluteten Flächen mit Hilfe des berechneten Index-Bildes (basierend auf dem NDVI, dem NDWI und dem NDPI) untersucht. Dafür werden die Klassen der ASAR-Aufnahmen sowie des Index-Bildes in die beiden Kategorien eingeordnet. Zu den im Folgenden mit *Überflutet* bezeichneten Bereichen gehören alle Wasserflächen und alle überschwemmten Bereiche inklusive der Vegetation. Nicht vom Wasser betroffen sind die Bodenklassen (*Nicht überflutet*). Mit Hilfe von 2 045 zufällig verteilten Referenzpunkten wurde zunächst folgende Fehlermatrix ermittelt:

	Überflutet	Nicht überflutet	Nutzergenauigkeit [%]
Überflutet	1289	125	91,16
Nicht überflutet	79	552	87,45
Herstellergenauigkeit [%]	94,23	81,54	

**Tabelle 6.1:** Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme für die Kategorien *Überflutet* und *Nicht überflutet*

Die Kappa-Koeffizienten der beiden Kategorien betragen 0,73 (*Überflutet*) bzw. 0,81 (*Nicht überflutet*) und liegen mit einem Durchschnitt von 0,77 im oberen, moderaten Übereinstimmungsbereich. Die Gesamtgenauigkeit beträgt 90 %.

Die Punkte, bei denen die Referenz und die Klassifikation nicht übereinstimmen, befinden sich überwiegend an den Übergangsbereichen zwischen den beiden Kategorien. Durch den zeitlichen Versatz der Aufnahmen konnten sich die Wasser- bzw. Vegetationsflächen weiter ausbreiten, wodurch sich teilweise die Unterschiede in der Zuweisung begründen lassen. Aus diesem Grund wurde die Referenz mit Hilfe der ASAR-Aufnahme für diese Punkte nochmals manuell kontrolliert. Die Referenz wurde verändert, wenn das Ergebnis der Kontrolle eindeutig war. Da in den SAR-Aufnahmen allein die Rückstreuung nicht immer eindeutig auf die Landbedeckung schließen lässt, wurde auch hier die Umgebung in die Entscheidungsfindung eingebunden. Der Eingriff in die Referenz erfolgte, da die Anzahl der Kategorien gering ist und die Unterscheidung in diese beiden übergeordneten Kategorien für den Bearbeiter i. d. R. eindeutig erfolgen kann. Die neu berechnete Fehlermatrix zeigt Tabelle 6.2.

	Überflutet	Nicht überflutet	Nutzergenauigkeit [%]
Überflutet	1329	85	93,99
Nicht überflutet	70	561	88,91
Herstellergenauigkeit [%]	95,00	86,84	

**Tabelle 6.2:** Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme für die Kategorien *Überflutet* und *Nicht überflutet* nach manueller Kontrolle der Referenzpunkte

Die Nutzer- und Herstellergenauigkeiten verbessern sich im Schnitt um 1 bis 2%. Ausgenommen hiervon ist die Herstellergenauigkeit der Kategorie *Nicht überflutet*, welche sich um 5,3% verbessert hat. Dies lässt sich durch die manuell veränderten Referenzpixel, welche in der Landsat-Aufnahme als nicht überflutet erkannt wurden, jedoch neun Tage später bereits überschwemmt waren, erklären. Die beiden Kappa-Koeffizienten sind ebenfalls auf 0,81 bzw. 0,84 gestiegen und deuten auf eine starke Übereinstimmung hin. Die Gesamtgenauigkeit liegt nun bei 92%.

Zum Vergleich wurde mit Hilfe von Texturmerkmalen eine pixelbasierte Maximum-Likelihood Klassifikation durchgeführt, mit deren Ergebnis ebenfalls eine Genauigkeitsanalyse, basierend auf den Kategorien *Überflutet* und *Nicht überflutet*, durchgeführt wurde. Dazu wurden die nachkontrollierten Referenzdaten verwendet. Die Kappa-Koeffizienten für die beiden Kategorien sind mit 0,54 (*Überflutet*) und 0,21 (*Nicht überflutet*) und einem Gesamt-Kappa-Koeffizienten von 0,3 deutlich geringer. Für die trockenen Bereiche ist die zufällige Übereinstimmung der klassifizierten Pixel und der Referenzpixel sehr hoch. Die Übereinstimmungen im überfluteten Bereich sind moderat, jedoch deutlich geringer als bei dem Ergebnis der objektorientierten Auswertung. Anzumerken ist, dass keine multitemporalen Informationen in die Klassifikation eingegangen sind. Die Fehlermatrix des Ergebnisses der Maximum-Likelihood Klassifikation befindet sich im Anhang A.7.

Wird die Kategorie *Vegetation*, welche sich aus den beiden Klassen „Vegetation“ und „Vegetation mit größerem Wasseranteil“ zusammensetzt, die vormals zu der Kategorie *Überflutet* zählten, mit in die Genauigkeitsbetrachtungen einbezogen, ergibt sich die in Tabelle 6.3 gezeigte Fehlermatrix. Die Kategorie der *Wasserflächen* beinhaltet die Klassen „offenes Gewässer“ und „überschwemmte Flächen im Übergangsbereich“. Die *trockenen Bereiche* entsprechen wieder den nicht überschwemmten Bodenklassen.

	Wasserflächen	Vegetation	Trockene Bereiche	Nutzergenauigkeit [%]
Wasserflächen	273	20	20	92,54
Vegetation	67	485	6	86,92
trockene Bereiche	97	42	569	80,37
Herstellergenauigkeit [%]	62,47	88,67	98,61	

**Tabelle 6.3:** Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme für die drei Kategorien *Wasserflächen*, *Vegetation* und *Trockene Bereiche*

Auch hier erfolgte eine manuelle Nachkontrolle der Punkte, welche keine Übereinstimmung der Referenz mit dem klassifizierten Ergebnis aufwiesen. Änderungen in der Referenz wurden wie zuvor nur vorgenommen, wenn sich die Landbedeckung in der ASAR-Aufnahme von der unterschied, die von der Referenz ausgewiesen wurde, und eindeutig bestimmbar war.

Dass die auf dem Landsat-Mosaik basierende Referenz nicht für jeden Punkt passend war, hat seine Ursache nicht nur in der zeitlichen Differenz der beiden Aufnahmen, sondern auch in den unterschiedlichen Pixelgrößen, welche in der ASAR-Aufnahme rund 12,5 m x 12,5 m und in der Landsat-Szene 30 m x 30 m abdecken. Insbesondere an den Übergangsbereichen zwischen den verschiedenen Kategorien können so unterschiedliche Ergebnisse verursacht werden.

Mit einem Gesamt-Kappa-Koeffizienten von 0,77 liegt die Übereinstimmung im oberen moderaten Bereich, ist jedoch geringer als zuvor. Für die Kategorien *Wasserflächen* und *Vegetation* sind mit Kappa-Koeffizienten von 0,90 bzw. 0,80 sehr gute Übereinstimmungen erzielt worden, im Gegensatz zu den *Trockenen Bereichen*, welche mit einem Kappa-Koeffizienten von 0,69 im moderaten Bereich liegen.

Die Fehlermatrix zeigt vor allem, dass Wasserflächen als Vegetation bzw. trockene Bereiche klassifiziert wurden, weshalb die *Wasserflächen* mit 62,47 % die geringste Herstellergenauigkeit aufweisen. Schaut man sich die betreffenden Punkte an, fällt auf, dass die als ein trockener Bereich klassifizierten Wasserflächen gehäuft in den überschwemmten Bereichen nördlich des Lac Débo, welche nur rudimentär erfasst werden konnten (vgl. auch Abschnitt 4.3.2), sowie entlang der Grenze zwischen den Übergangsbereichen und nicht überschwemmten Bereichen im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes zu finden sind. Recht gleichmäßig verteilen sich die als Vegetation klassifizierten Wasserflächen. Sie treten überwiegend außerhalb der Flussläufe auf und betreffen oftmals die Randbereiche zu den trockenen Flächen. Die als trockene Flächen klassifizierte Vegetation befindet sich ebenfalls überwiegend in den Übergängen zwischen den beiden Kategorien, insbesondere im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes sowie an den Ausläufern des Bandiagara-Plateaus.

Von einer Genauigkeitsanalyse mit weiteren Untergliederungen der Kategorien wurde aufgrund der teilweise abweichenden Klassenbeschreibung zwischen der Referenz und der Oktober-Aufnahme abgesehen.

Die Landsat-Vergleichsaufnahme der Dezember-Szene entstand drei Jahre zuvor (2000). Die Ausbreitung der Überschwemmungsflächen war zu diesem Zeitpunkt geringer als im Dezember 2003, was sich in den Übergangsbereichen deutlich bemerkbar macht. Der Eingriff in die Referenz durch Nachbesserungen wäre intensiver als in der Oktober-Aufnahme, weswegen in diesem Fall von einer Analyse auf Basis des Landsat-Mosaiks abgesehen wurde.

Jedoch konnte mit Hilfe der taggleichen MERIS-Aufnahme ein Vergleich der Ausdehnung der Überschwemmungsflächen (inklusive der Vegetation) durchgeführt werden. Ein Flächenabgleich für die Untergliederung in die drei Kategorien Wasserflächen, Vegetation und trockene Bereiche wurde aufgrund von Bewölkung über den Überschwemmungsflächen nicht durchgeführt. Auch erschwert die kleinere geometrische Auflösung der MERIS-Aufnahme einen detaillierteren Vergleich. Bereits bei der Analyse der beiden Kategorien mussten einige Referenzpunkte manuell kontrolliert und bei Bedarf angepasst werden. Der Großteil dieser Punkte befand sich an der Grenze zwischen den überfluteten und nicht überfluteten Flächen. Die Fehlermatrix, basierend auf rund 1 500 Referenzpixeln, zeigt die folgende Tabelle 6.4:

	Überflutet	Nicht überflutet	Nutzergenauigkeit [%]
Überflutet	1012	60	94,40
Nicht überflutet	38	425	91,79
Herstellergenauigkeit [%]	96,38	87,63	

**Tabelle 6.4:** Fehlermatrix der ASAR Dezember-Aufnahme für die Kategorien *Überflutet* und *Nicht überflutet*

Mit einem Gesamt-Kappa-Koeffizienten von 0,85 bzw. 0,82 für die Kategorie *Überflutet* und 0,88 für *Nicht überflutet* ist ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Referenz und dem klassifizierten Bild vorhanden. Die nicht korrekt erkannten überfluteten bzw. noch von der Überschwemmung beeinflussten Pixel befinden sich zu einem großen Teil in den Zwischenräumen der Dünen sowie wieder in den überschwemmten Flächen nördlich des Lac Débo. Auch an der Grenze zwischen dem zentralen, trockenen Teil und den angrenzenden Überschwemmungsflächen fehlte zum Teil die Übereinstimmung zwischen der Klassifikation und der Referenz.

Im umgekehrten Fall, in dem die nicht von der Überschwemmung betroffenen Referenzpixel in die Kategorie *Überflutet* gefallen sind, befinden sich diese hauptsächlich in dem zentralen Teil des Untersuchungsgebietes sowie in der Nähe der Gabelung des Niger, aber auch an der Grenze zum Bandiagara-Plateau.

Im Vergleich zu den Hersteller- und Nutzergenauigkeiten der Oktober-Aufnahme befinden sich die der Dezember-Aufnahme für die Flächen *Überflutet* und *Nicht überflutet* in derselben Größenordnung und bestätigen das sehr gute Ergebnis für die Unterscheidung in diese beiden Kategorien.

### 6.1.2 Genauigkeitsanalyse der ASAR März-Aufnahme

Die Vergleichsaufnahme der März-Szene entstand mit einem Jahr Unterschied. Insbesondere unterscheiden sich die Stadien der Austrocknung, sodass ein Vergleich zwischen den vormals



überschwemmten Flächen nicht sinnvoll erscheint, da ein Großteil der Referenzpunkte vom Beobachter gesetzt und zugewiesen werden müsste.

Jedoch können die noch vorhandenen Wasserflächen verglichen werden, da diese in der ASAR-Aufnahme im Falle einer Nachbesserung gut erkennbar sind. Da in den Überschwemmungsflächen die Wasserflächen bereits verschwunden sind, konzentrieren sich diese primär auf die größeren Seen und den Niger sowie den Diaka. Dabei ist jedoch zu beachten, dass 2003 der Pegelstand in Mopti am 12.03.2003 mit 79 cm niedriger war als der Stand von 123 cm bei der am 19.03.2004 entstandenen ASAR-Aufnahme. Dies zeigt sich unter anderem in dem unterschiedlichen Fortschritt der ausgetrockneten Flächen im Lac Débo.

Mit Hilfe von ca. 500 Referenzpunkten wurde deren Zugehörigkeit in die beiden Kategorien *Wasser* und *Nicht-Wasser* geprüft. Alle Punkte, bei denen Klassenzuweisung und Referenz nicht übereinstimmten, wurden nochmals manuell mit Hilfe der ASAR-Szene kontrolliert und bei Bedarf korrigiert (vgl. Tab. 6.5).

	Wasser	Nicht-Wasser	Nutzergenauigkeit [%]
Wasser	202	42	82,79
Nicht-Wasser	1	263	99,62
Herstellergenauigkeit [%]	99,51	86,23	

**Tabelle 6.5:** Fehlermatrix der ASAR März-Aufnahme für die Kategorien *Wasser* und *Nicht-Wasser* nach manueller Kontrolle

Für die Unterscheidung in die beiden Kategorien liegt der Kappa-Koeffizient für *Wasser* bei 0,71 bzw. für *Nicht-Wasser* bei 0,99. Es ergibt sich somit ein Durchschnitt von 0,83.

Die Wasserflächen unterscheiden sich von dem Großteil der übrigen Rückstreuwerte während des Niedrigwassers. Schaut man sich die 42 Punkte an, welche fälschlicherweise als Wasser erkannt wurden, handelt es sich überwiegend um Punkte nahe am Übergang der Wasserfläche des Lac Débo bzw. um Punkte mit höherer Rückstreuung (überwiegend Bereiche des „Delta vif – dünne Vegetationsschicht“) innerhalb der Überschwemmungsfläche.

Die Kontrolle der Klassifikationsergebnisse des Niedrigwassers mit einer zusätzlichen Untergliederung der Kategorie *Nicht-Wasser* wird dadurch erschwert, dass für keinen Aufnahmezeitpunkt multispektrale Vergleichsaufnahmen ähnlicher geometrischer Auflösung vorliegen. Da sich die Flächen des Binnendeltas während der Überflutung und des anschließenden Austrocknens kontinuierlich verändern, sind zeitnahe Vergleichsdaten notwendig. Lediglich für die März-Aufnahmen 2004 gibt es eine taggenaue MERIS-Aufnahme. Diese wurde jedoch aufgrund der geometrischen Auflösung von 300 m nicht für die Genauigkeitsanalyse der beiden Kategorien *Wasser* und *Nicht-Wasser* verwendet, da der Flusslauf des Niger nur ungenügend erfasst werden konnte. In der Dezember-Aufnahme war dies nicht ausschlaggebend, da die überschwemmten Flächen zusammen mit dem Flusslauf in dieser Kategorie erfasst wurden. Die MERIS-Aufnahme diente jedoch für den visuellen Abgleich mit dem Ergebnis, indem die Lage und die Ausdehnung der Klassen kontrolliert wurden.

Für die Unterscheidung zwischen überfluteten und nicht überfluteten Bereichen wurde während der Überschwemmung eine sehr gute Genauigkeit erreicht. Auch ist für die drei Kategorien *Wasser*, *Vegetation* und *Boden*, in Anbetracht der einkanaligen SAR-Aufnahme, ein gutes Ergebnis erzielt worden. Ein ähnliches Ergebnis zeigt die vorgestellte Studie zum Amazonas (vgl. S. 48), in der eine Klassifikation in die Klassen überflutete Wälder, nicht überflutete Wälder und hydrophytische Vegetation, bei vorheriger Ausmaskierung weiterer Klassen, erfolgte. Die

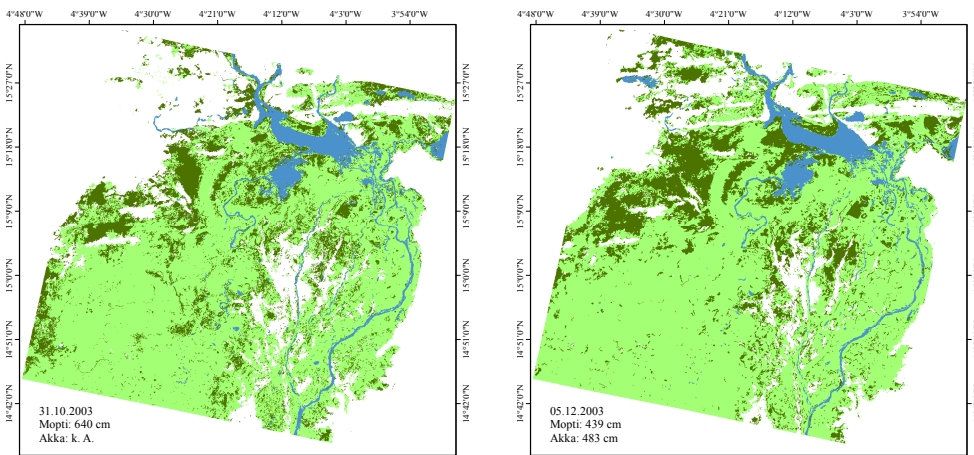
Gesamtgenauigkeit der regionenbasierten Klassifikation der dort verwendeten multifrequenten Daten für die einzelnen Zeitschnitte war überwiegend größer 95 %.

Überwiegend in der Oktober-, aber zum Teil auch in der Dezember-Aufnahme waren es häufig die überschwemmten Bereiche nördlich des Lac Débo, welche nicht korrekt erkannt wurden. Es wurde bereits bei der visuellen Analyse festgestellt, dass sich diese überschwemmten Bereiche schwer von ihrer Umgebung abheben bzw. sich die Rückstreuung kaum von der der umgebenden Böden unterscheidet. Da die Aufnahmen außerhalb der Regenzeit entstanden, sind die Böden in der semi-ariden Region sehr trocken und besitzen eine überwiegend geringe Rückstreuung. Bei beginnender Überschwemmung ist die Rückstreuung ebenfalls sehr gering und somit schwer erfassbar.

## 6.2 Interpretation der Klassifikationsergebnisse

Mit den SAR-Daten von 1995/1996 und 2003/2004 liegen Aufnahmen von zwei ausgeprägten Überschwemmungen vor. Den Gegensatz zeigen Aufnahmen des Jahres 1995/1996, welche von einer deutlich geringeren Ausdehnung der Wasserflächen gekennzeichnet waren.

Die in die drei Kategorien *offenes Wasser*, *überschwemmte Flächen mit Vegetation* und *überschwemmte Flächen* zusammengefassten Klassifikationsergebnisse in Abbildung 6.2 zeigen die Ausbreitungen der überschwemmten Flächen für die Oktober- (links) und Dezember-Aufnahme (rechts) des Jahres 2003.



offenes Wasser
  überschwemmte Flächen mit Vegetation
  überschwemmte Flächen

**Abbildung 6.2:** Ausbreitung der Kategorien *offenes Wasser*, *überschwemmte Flächen mit Vegetation* und *überschwemmte Flächen* im Oktober und Dezember 2003

Zur Kategorie des *offenen Wassers* zählen die Steh- und Fließgewässer. In der Dezember-Aufnahme fällt zudem ein Teil der überschwemmten Flächen im Norden des Untersuchungsgebietes mit in diese Kategorie. Je nach Rückstreuung werden diese Bereiche dieser Kategorie oder den *überschwemmten Flächen* zugeordnet. In der Oktober-Aufnahme ist bereits der

Beginn der Überschwemmung in dieser Region ersichtlich, auch wenn das Erfassen dieser Flächen aus den genannten Gründen nur unvollständig gelungen ist.

Das Ausmaß der offenen Wasser hat sich zwischen den beiden Aufnahmen von rund 452 km<sup>2</sup> auf 434 km<sup>2</sup> verringert, u. a. hat sich die Fläche des Lac Korientzé reduziert. Jedoch gibt es keine zusammenhängenden großräumigen Veränderungen in dieser Kategorie zwischen den Aufnahmen.

Die Kategorie der *überschwemmten Flächen mit Vegetation* umfasst die beiden Vegetationsklassen „Vegetation“ und „überschwemmte Flächen mit Vegetation“. Die verbleibende Klasse der „überschwemmten Flächen im Übergangsbereich“ repräsentiert die Kategorie *überschwemmte Flächen*. Zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten hat sich der Anteil der überschwemmten Flächen insbesondere im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes von rund 1 284 km<sup>2</sup> auf 1 410 km<sup>2</sup> erhöht. Ebenso hat sich das Wasser zwischen den Dünen ausgebreitet.

Der Anteil an dichter Vegetation ist ebenfalls gestiegen, insbesondere entlang des Niger, aber auch in den Überschwemmungsflächen rechts- und linksseitig des Diaka. In diesen Flächen überwog in der Oktober-Aufnahme noch der Anteil an Wasser, d. h. die Vegetation war noch nicht so großflächig ausgeprägt.

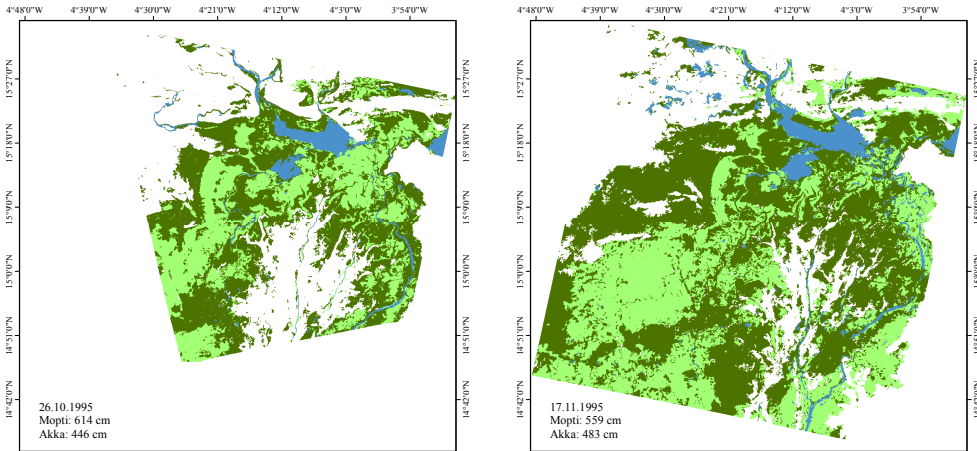
Insgesamt waren im Dezember 2003, inklusive der offenen Wasserflächen und Vegetationsflächen, 6 710 km<sup>2</sup> von der Überschwemmung betroffen, was eine Erweiterung der Fläche von rund 663 km<sup>2</sup> im Vergleich zum Oktober darstellt.

In der folgenden Tabelle 6.6 sind die Flächenausmaße der vier Klassen enthalten, aus denen sich die drei Kategorien, welche aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Abbildungen gezeigt werden, zusammensetzen. Die Aufnahme vom 26.10.1995 ist nicht Bestandteil der Tabelle, da diese nur einen kleineren Bereich im Untersuchungsgebiet abdeckt und die Werte sich somit auf eine andere Gesamtfläche beziehen.

Klasse	Aufnahmezeitpunkt				
	03.11.1992	08.12.1992	17.11.1995	31.10.2003	05.12.2003
1	324	296	414	452	434
2	1318	904	3406	1284	1410
3	395	1177	634	1383	1701
4	1742	1321	1728	2929	3166

**Tabelle 6.6:** Flächen der einzelnen Klassen während der Überschwemmung in km<sup>2</sup>, mit Klasse 1 = offenes Wasser, 2 = überschwemmte Flächen im Übergangsbereich, 3 = Vegetation, 4 = überschwemmte Flächen mit Vegetation

In die gleichen Kategorien wurden die Ergebnisse der hydrologischen Jahre 1992/1993 und 1995/1996 zusammengefasst. In den Aufnahmen vom Oktober bzw. November 1995 sind die überschwemmten Bereiche am westlichen Rand des Überschwemmungsbereichs, im Übergangsbereich entlang des Diaka sowie im zentralen Teil auffällig (vgl. Abb. 6.3). Diese Bereiche besaßen in der Aufnahme vom Oktober 2003 bereits einen höheren Vegetationsanteil. Sind die Überschwemmungsflächen in den Randbereichen im November, wie 1995, noch frei von Vegetation, beginnt im Dezember die Vegetation, sich auch in diesen Bereichen durchzusetzen, bevor das Austrocknen des Deltas beginnt. Dabei konzentriert sich die Vegetation auf die Randgebiete zu den überschwemmten Flächen.



offenes Wasser
  überschwemmte Flächen mit Vegetation
  überschwemmte Flächen

**Abbildung 6.3:** Ausbreitung der überschwemmten Vegetations- und der Wasserflächen im Oktober (nur ein Teil des Untersuchungsgebietes) und November 1995

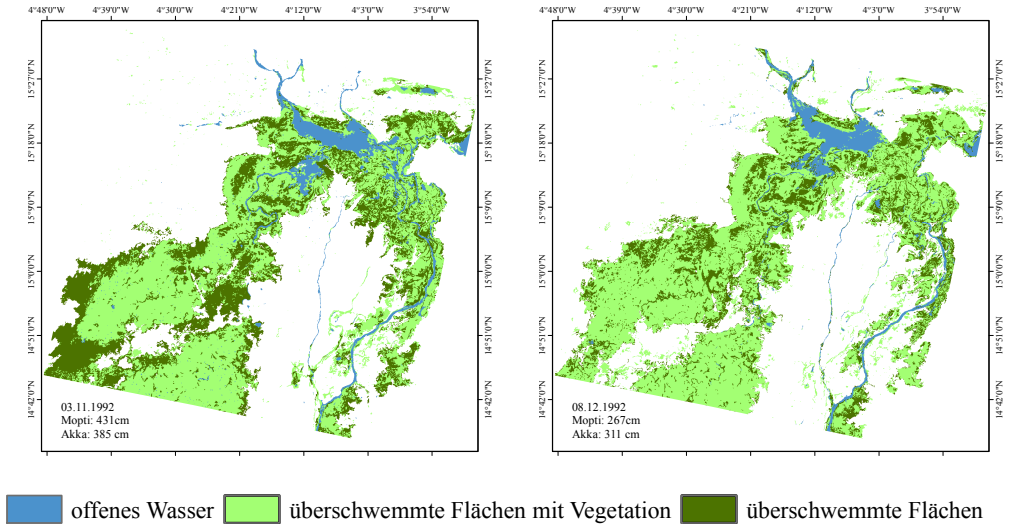
Vergleicht man die Flächenanteile an „Vegetation“ bzw. „überschwemmten Flächen mit Vegetation“ der November-Aufnahme von 1995 und der Dezember-Aufnahme von 2003, sind deutliche Unterschiede in den Flächen erkennbar. Die Fläche mit dichter Vegetation ist im Dezember 2003 über 2,5-mal so groß wie im November 1995.

Im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes sind im Oktober 1995 die trockenen Bereiche dominant im Vergleich zum Oktober 2003. Die Differenzen zwischen den durchschnittlichen Pegelständen von Juli und Oktober der Jahre 2003 bzw. 1995 können bis ca. 1 m betragen. Somit ist 2003 bereits mehr Wasser in das Binnendelta eingetreten, sodass, verglichen mit 1995, größere Flächen überflutet sind. Da die Aufnahme von 1995 nur einen Teil des Untersuchungsgebietes enthält, können an dieser Stelle keine absoluten Flächenmaße verglichen werden.

Die Abbildung 6.4 zeigt die Situation im November (links) und Dezember (rechts) 1992. Die Ausbreitung des Überschwemmungsgebietes ist, verglichen mit den beiden anderen hydrologischen Jahren, sichtbar geringer.

Die Abbildungen zeigen, dass bei einer geringen Flut, mit einem Höchststand in Mopti von 538 cm am 07.10.1992, der Übergangsbereich entlang des Diaka nicht überschwemmt wird. Die Erhöhung entlang des Diaka unterteilt die Überschwemmungsfläche des Delta vif. Dies ist ein deutlicher Unterschied zu den anderen Jahren, in denen die Überschwemmungsflächen zusammenhängend waren. Des Weiteren sind die Flächen im Übergangsbereich zum Delta dort nicht vom Wasser erreicht worden. Auch sind die Flächen entlang des Niger nicht so weiträumig überschwemmt wie in den anderen Jahren.

Die Summe der überschwemmten Flächen (inklusive der offenen Wasserflächen) ist bereits im Dezember von vormals rund 3 779 km<sup>2</sup> auf 3 698 km<sup>2</sup> zurückgegangen. Die Abbildung 6.4 zeigt, dass die überschwemmten, vegetationsfreien Flächen (dunkelgrün) beinahe vollständig in Bereiche mit Vegetation (hellgrün) übergegangen sind.

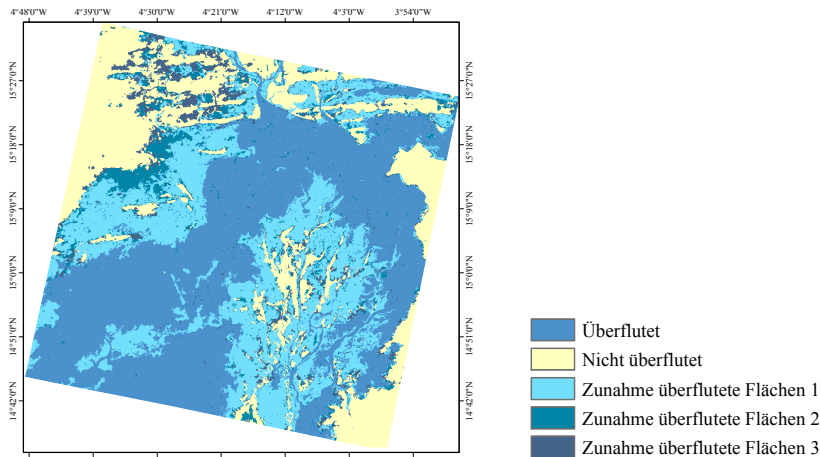


**Abbildung 6.4:** Ausbreitung der überschwemmten Vegetations- und der Wasserflächen im November und Dezember 1992

Der Verlauf der Ausbreitung der Überschwemmungsflächen wird anhand der Aufnahmen vom 03.11.1992, vom 31.10.2003 sowie vom 17.11.1995 und 05.12.2003 verdeutlicht. Obwohl die November-Aufnahme aus dem Jahr 1992 bereits zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt im Vergleich zu der Aufnahme vom Oktober 2003 entstanden ist, wird diese aufgrund der gering ausgeprägten Überschwemmungsflächen und unter der Annahme einer kontinuierlichen Ausbreitung als Beginn der Ausbreitung verwendet.

Für eine übersichtliche Darstellung des Verlaufs wurden die Aufnahmen wieder in die beiden Kategorien *Überflutet* und *Nicht überflutet* zusammengefasst. Die über alle Zeitpunkte unveränderten Überschwemmungsflächen und die unveränderten trockenen Bereiche sind in der Abbildung 6.5 als „Überflutet“ und „Nicht überflutet“ abgebildet. Die Zunahme der Überschwemmungsfläche zwischen der Aufnahme vom November 1992 und Oktober 2003 zeigen die Flächen „Zunahme überflutete Flächen 1“. Entsprechend mit „Zunahme überflutete Flächen 2“ bzw. „Zunahme überflutete Flächen 3“ bezeichnet sind die hinzugekommen Überschwemmungsflächen zwischen der Aufnahme vom Oktober 2003 und November 1995 bzw. zwischen November 1995 und Dezember 2003.

Die zu allen Aufnahmezeitpunkten überfluteten Flächen zeigen die Bereiche, welche bei begonnener Überschwemmung vom Wasser beeinflusst sind. Dies entspricht, bis auf wenige Pixel entlang der Grenze zwischen den überfluteten und trockenen Bereichen, der Überschwemmungsfläche vom November 1992. Im weiteren Verlauf der Überschwemmung werden zunächst die Übergangsbereiche zum Delta mort und entlang des Diaka überflutet. Bei sehr ausgeprägten Überschwemmungen wie im November 1995 und Dezember 2003 vergrößern sich die Überschwemmungsflächen beim Delta mort („Zunahme überflutete Flächen 2“ und „Zunahme überflutete Flächen 3“). Im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes breitet sich die Überschwemmung weniger zwischen den beiden letzten Zeitpunkten aus. Hier wurde der Großteil bereits im Oktober 2003, dem zweiten Zeitabschnitt („Zunahme überflutete Flächen 1“), vom Wasser erfasst.



**Abbildung 6.5:** Ausbreitung der überschwemmten Flächen basierend auf den Aufnahmen vom 03.11.1992, 31.10.2003, 17.11.1995 und 05.12.2003

Das Wasser im Delta vif beginnt ungefähr ab Dezember bzw. Januar zurückzugehen und gibt nach und nach Flächen wieder frei. In den tieferen Stellen hält sich die Feuchtigkeit länger, spätestens ab Februar bzw. März beginnt das ganze Delta trockenzufallen. Die Abbildung 6.6 zeigt die Situation Ende Februar (Abb. 6.6a) und Anfang April (Abb. 6.6b) im Jahr 1996.

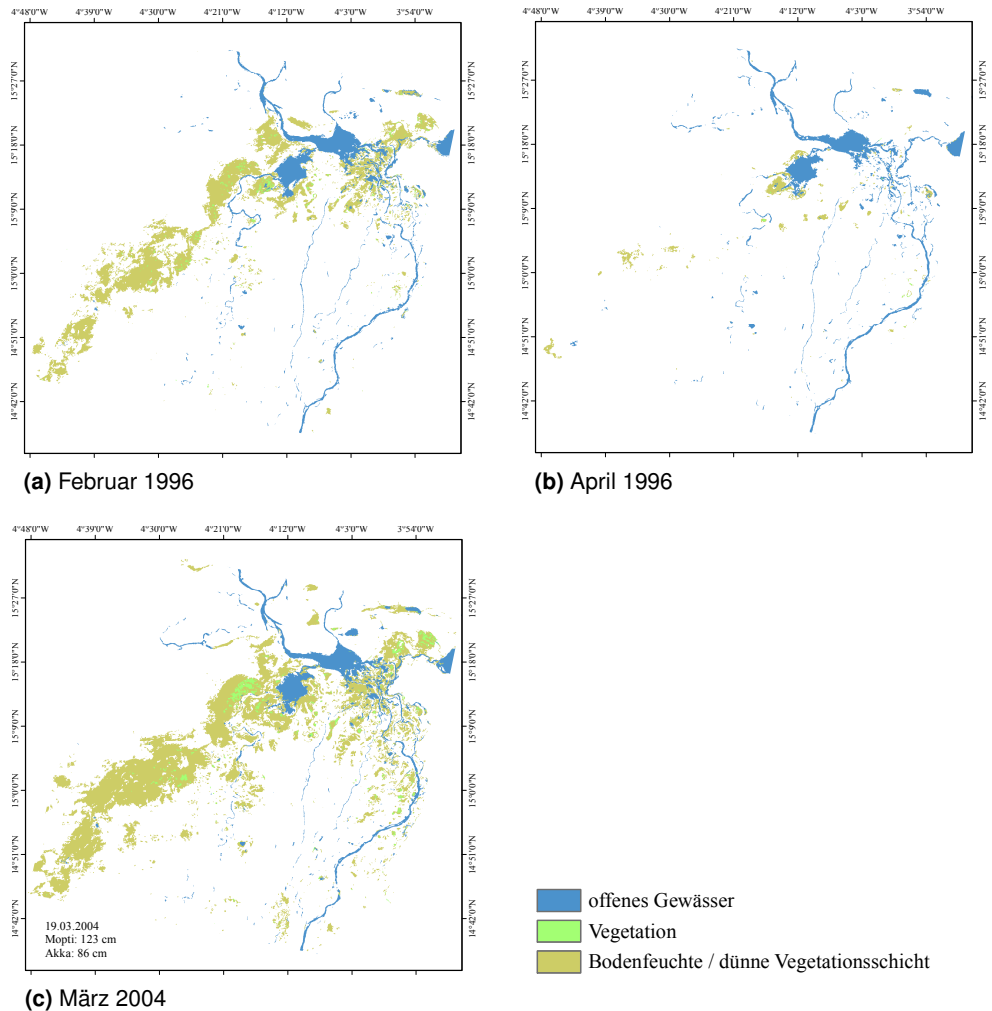
Zunächst hält sich die Bodenfeuchte entlang des nördlichen Randes des Überschwemmungsgebietes zum Übergangsbereich, jedoch sind große Bereiche des Deltas bereits trocken gefallen. Die Bereiche, welche noch von der Bodenfeuchte betroffen sind, sind Teil der Flächen, die bereits in einem frühen Stadium der Überschwemmung vom Wasser beeinflusst waren (vgl. „Überflutet“ in Abb. 6.5). Rund einen Monat später hat sich das Band der verbleibenden Bodenfeuchte stark reduziert, sodass nur noch vereinzelt zusammenhängende Flächen vorhanden sind. Vor allem um den Lac Walado hält sich die Bodenfeuchte länger. In der Februar-Aufnahme kommt insbesondere in Gewässernähe noch grüne Vegetation vor, jedoch ist deren Anteil sehr gering und verschwindet mit voranschreitender Trockenheit fast vollständig.

In den vormals überschwemmten Flächen des Übergangsbereiches rechtsseitig des Diaka befinden sich Ende Februar 1996 lediglich punktuell noch Bereiche, welche Bodenfeuchte speichern konnten. Dabei handelt es sich häufig um Mare bzw. kleine Senken und Wasserläufe, die beginnen trockenzufallen.

Noch deutlich zeigt sich der Bodenfeuchte-Streifen im März 2004, der mit 1 127 km<sup>2</sup> deutlich ausgeprägter ist als im Februar 1996 mit 648 km<sup>2</sup> (vg. Abb. 6.6c).

Für die Niedrigwasseraufnahmen repräsentieren die Klassen „offenes Gewässer“, verbliebene „Vegetation“ und „Delta vif – dünne Vegetationsschicht“ die Bereiche, welche noch vom Wasser beeinflusst sind. Da die letzte Klasse primär von der Bodenfeuchte geprägt ist sowie noch Anzeichen von grüner Vegetation enthalten kann, welche jedoch nicht dominiert, wird dies im Folgenden als „Bodenfeuchte / dünne Vegetationsschicht“ bezeichnet. Die Flächenanteile der drei Klassen sind in Tabelle 6.7 enthalten.

Die Abbildung 6.7 zeigt den Verlauf der Austrocknung, ermittelt aus der ASAR März-Aufnahme vom 19.03.2004 sowie mit Hilfe zweier ERS-Aufnahmen von 1996. Die März-Aufnahme enthält



**Abbildung 6.6:** Fortgeschrittene Austrocknung des Deltas zwischen Februar und April 1996 sowie März 2004

den größeren Anteil an Bodenfeuchte, verglichen mit der Aufnahme vom 29.02.1996, und wird als Ausgangssituation verwendet. Da sowohl 2003/2004 als auch 1995/1996 ausgeprägte Überschwemmungsflächen auftraten, kann davon ausgegangen werden, dass die in der März-Aufnahme dargestellten Flächen auch bei der Überschwemmung 1995/1996 betroffen waren.

Zunächst wurden in allen drei Aufnahmen die beiden Kategorien *offenes Wasser* und *Bodenfeuchte*, welche die verbliebene „Vegetation“ als auch „Bodenfeuchte / dünne Vegetationsschicht“ enthält, erstellt.

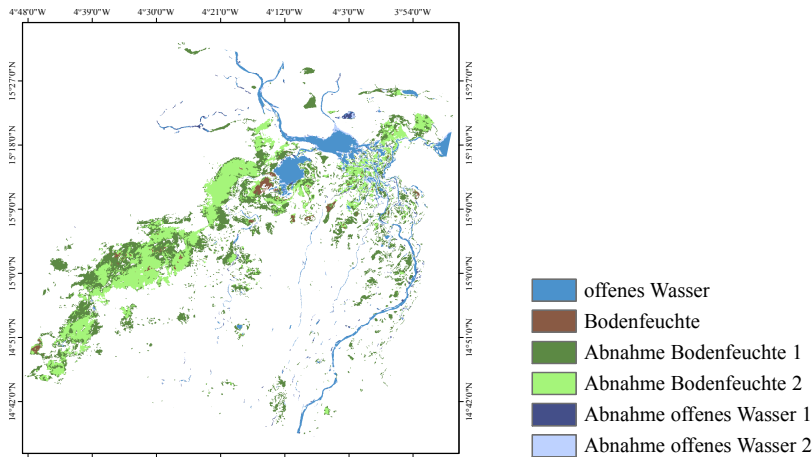
Der Verlauf beginnt mit der März-Aufnahme, gefolgt von den Februar 1996 und April 1996 Aufnahmen. Die über alle drei Zeitpunkte unveränderten Flächen sind in den beiden ursprünglichen Kategorien *offenes Wasser* und *Bodenfeuchte* abgebildet. Den Rückgang der Bodenfeuchte zwischen März und Februar zeigt die Kategorie „Abnahme Bodenfeuchte 1“,



Klasse	Aufnahmezeitpunkt		
	29.02.1996	04.04.1996	19.03.2004
1	316	293	317
2	24	2	57
3	648	72	1127

**Tabelle 6.7:** Flächen der einzelnen Klassen nach der Überschwemmung in km<sup>2</sup>, mit Klasse 1 = offenes Gewässer, 2 = Vegetation, 3 = Bodenfeuchte mit teilweiser, dünner Vegetationsdecke

die Abnahme vom Februar zum April im zweiten Zeitabschnitt enthält die Kategorie „Abnahme Bodenfeuchte 2“. Nach diesem Prinzip ist auch mit den Wasserflächen verfahren worden. Für den ersten Zeitabschnitt wird die Reduzierung in der Kategorie „Abnahme offenes Wasser 1“ gezeigt, für den zweiten Abschnitt entsprechend die Kategorie „Abnahme offenes Wasser 2“.



**Abbildung 6.7:** Verlauf der Austrocknung des Deltas über die drei Zeitpunkte März 2004, Februar 1996 und April 1996

Der Rückgang der Wasserflächen zeigt sich in einigen Flussarmen sowie anhand des Lac Débo und des Lac Korientzé. Aber auch entlang des Niger reduzieren sich die Wasserflächen. Insgesamt jedoch dominiert der Rückgang der Bodenfeuchte die Veränderung. Der zentrale Teil des Untersuchungsgebietes ist, bis auf die Flussläufe des Mayo Dembé und des Mayo Ranéo, bereits im März bzw. Februar beinahe vollständig ausgetrocknet. Ab April sind die letzten Flächen mit Bodenfeuchte nahezu verschwunden und das Binnendelta liegt trocken, bis die nächste Regenzeit bzw. die darauffolgende Überschwemmung eintritt.



## 7 Zusammenfassung

Die Herausforderung der Nutzbarmachung von Informationen aus den vorliegenden einkanali- gen SAR-Daten liegt in der Überwindung der Mehrdeutigkeiten und in der Abgrenzung der Landbedeckungen. Ein Ziel dieser Arbeit war es, Zusatzinformationen bzw. beschreibende Merkmale zur Charakterisierung der Landbedeckungen im Nigerbinnendelta zu finden. Dies- bezüglich zeigt die Arbeit eine Kette von Verarbeitungsschritten, um aus den vorhandenen Datensätzen die wesentlichen Landbedeckungen mit einer guten bis sehr guten Genauigkeit zu extrahieren.

Durch fehlende Ground-Truth Daten bzw. Unzugänglichkeit des Geländes bestand ein Teilziel in der Erstellung einer Vergleichsbasis. Nach einer Literaturstudie zu den geographischen Sachverhalten im Nigerbinnendelta Malis wurden zeitnahe bzw. inhaltlich zu den Gegebenhei- ten in den SAR-Aufnahmen passende multispektrale Aufnahmen (insbesondere Landsat) zur Referenzerstellung verwendet.

Bei einer gemeinsamen Auswertung mit zusätzlichen, externen Daten, welche aufgrund der Überschneidungen in der Rückstreuung verschiedener Landbedeckungen benötigt werden, ist insbesondere eine gute Co-Registrierung nötig. Neben den externen Daten werden sowohl mul- titemporale als auch texturbeschreibende Informationen genutzt. Bei SAR-Daten ist zudem die Reduzierung des Speckle-Einflusses Bestandteil der Vorverarbeitung. Möglichkeiten, um die Qualität der verschiedenen Speckle-Filter zu beurteilen, wurden aufgezeigt.

Eine vorangestellte multitemporale Analyse ist nötig, um u. a. die Bereiche außerhalb der Überschwemmungsflächen zu erfassen. Für die Ausmaskierung dieser trockenen, nicht von den Überflutungen betroffenen Bereiche werden zunächst die Gebiete benötigt, die zu keinem Zeitpunkt von der Überschwemmung beeinflusst waren. Da in die multitemporale Analyse die ausgeprägten Überschwemmungen des Jahres 2003 eingingen, enthält das Ergebnis ein entsprechendes großzügig mögliches Überschwemmungsgebiet. Aufgrund der dynamischen Grenze zu den Überschwemmungsflächen enthält die Maske lediglich ein Minimum der tro- ckenen Bereiche. Die Ermittlung des eigentlichen Übergangs zwischen den überschwemmten und trockenen Flächen erfolgt über ein Region-Growing. Durch die weitläufige Ausdehnung der Überschwemmungsflächen 2003 können die Informationen der multitemporalen Auswertung auf die weiteren SAR-Daten angewandt werden.

Die zur Anwendung gelangte objektorientierte und wissensbasierte Auswertung ermöglicht die Unterscheidung in verschiedene Klassen der drei übergeordneten Kategorien an Landbe- deckungen (Wasserflächen, Vegetation und Böden). Die beiden Regelwerke für die Monate mit fortschreitender Ausbreitung des Wassers sowie während des Abklingens der Über- schwemmung stellen ein Gerüst dar, mit dessen Hilfe die jeweilige Situation erfasst werden kann. Die Regelwerke wurden anhand von drei ASAR-Aufnahmen erstellt und auf sieben ERS-Datensätze, welche verteilt über zwei weitere Überschwemmungsereignisse vorlagen, angewandt. Die Regeln basieren überwiegend auf den Rückstreuwerten sowie auf den Eigen- schaften der vom Aufnahmezeitpunkt abhängigen Landbedeckung, z. B. der Lage sowie den Nachbarschaften.

Einen wesentlichen Anteil am Erfolg einer objektorientierten Klassifikation hat die vorangestellte Segmentierung. Die Segmentierung beruht auf verschiedenen Leveln und wird im überwiegenden Maße von der Farbhomogenität und somit von den Rückstreuwerten bestimmt. Der Formanteil ist mehrheitlich geringer gewichtet als die Farbinformation, bleibt jedoch nie unberücksichtigt. Die Verwendung der Form als bestimmenden Parameter in der Segmentierung wirkt sich weitgehend negativ auf deren Ergebnis aus. In den unteren Leveln fließt zudem die aufbereitete topographische Karte mit in die Segmentierung ein, um vor allem die Segmentgrenzen der Dünenformationen und zum Teil der Flussläufe zu verbessern. Das Regelwerk zur Segmentierung konnte auf alle Aufnahmen angewandt werden.

Die Charakteristik der SAR-Daten erforderte ein Eingreifen in das Regelwerk seitens des Bearbeiters bei allen Klassifikationen. Die Regelwerke geben jedoch ein Gerüst bzw. eine Abfolge vor, mit deren Hilfe die verschiedenen Landbedeckungen beschrieben bzw. klassifiziert werden können. In einem ersten Schritt konnten durch das Einbeziehen des Texturmerkmals Entropie die Gewässerflächen der großen Seen beinahe durchgängig in den SAR-Aufnahmen klassifiziert werden. Im Folgenden wurden, bei Aufnahmen während der Überschwemmung, die bereits überfluteten, überwiegend vegetationsfreien Flächen am Rand des Überschwemmungsgebietes (geringe Rückstreuung) erfasst. Die Übertragung der Maskierung sowie das anschließende Region-Growing zur Erfassung der nicht überschwemmten Bereiche gelang in den meisten Datensätzen. Ausnahmen diesbezüglich waren die beiden Aufnahmen aus dem Jahre 1992. Deren Besonderheit lag in den nicht überfluteten, erhöht liegenden Bereichen entlang des Diaka. Hierfür sind ergänzende Regeln erstellt worden, da diese Ebenen bei der Anfertigung des Regelwerks bereits überflutet waren.

Für die Erfassung des Niger und seiner Nebenflüsse ist ein aus einer Landsat-Aufnahme generiertes Gewässernetz hinzugezogen worden. Basierend auf dem Merkmal Nachbarschaft wurde in einem nächsten Schritt die an die Gewässer angrenzenden Vegetationsflächen (sowohl dichte Vegetation als auch überschwemmte Flächen mit einem höheren Wasser- als Vegetationsanteil) erfasst. Über Nachbarschaftsbeziehungen sowie Flächenanteile in den höheren Leveln sind die verbleibenden Segmente klassifiziert worden.

Das Regelwerk des Niedrigwassers beginnt ebenfalls mit der Erfassung der noch verbliebenen Seeflächen. Jedoch nimmt die Erfassung der trockenen Bereiche einen größeren Anteil ein. Anstatt ausgeprägter Vegetations- und Überschwemmungsflächen werden verschiedene Stadien der Austrocknung der vormals überschwemmten Flächen erfasst.

Bei der Übertragung der Regelwerke auf die ERS-Aufnahmen sind aufgrund des beschreibenden Charakters der Regeln sowie aufgrund des verschiedenartigen Rückstreuverhaltens Anpassungen vorgenommen worden. Bei Aufnahmen des Niedrigwassers waren primär Anpassungen der Schwellwerte zur Abgrenzung von verschiedenen Klassen sowie der Abbruchkriterien des Region-Growing notwendig. Bei der Klassifikation der Überschwemmungen waren weitere Anpassungen nötig, insbesondere wenn sich die Pegelstände deutlich von der Aufnahme, auf der das Regelwerk basierte, unterschieden. Die Regeln mussten teilweise um- bzw. auch neu geschrieben werden. Letzteres traf vor allem bei den Aufnahmen von 1992 zu, da sich die Situation durch die geringe Überschwemmungsfläche von dem für die Erstellung des Regelwerks zugrunde liegenden Zustand, deutlich unterschied. Durch die geringe Ausbreitung der Überschwemmung galten zum Teil andere Beziehungen zwischen den Landbedeckungen. Zudem bewirkte das unterschiedliche Rückstreuverhalten, insbesondere der Wasserflächen, dass das Regelwerk diesbezüglich modifiziert werden musste.

Die Klassen wurden für die Genauigkeitsanalyse in die drei Kategorien *Wasserflächen*, *Vegetation* und *Trockene Bereiche* zusammengefasst. Für die Analyse der Trennbarkeit zwischen

---

den überfluteten und nicht überfluteten Bereichen wurden zudem die beiden Kategorien *Wasserflächen* und *Vegetation* zusammengefasst.

Die Genauigkeitsanalyse bestätigt, dass die Unterscheidung in die drei übergeordneten Kategorien an Landbedeckungen mit einem sehr zufriedenstellenden Ergebnis verwirklicht werden konnte. Für eine Genauigkeitsanalyse mit weiteren Untergliederungen der Klassen wäre zunächst zu prüfen, ob die getroffenen Klassendefinitionen die Realität repräsentieren, da es hier zu Abweichungen zwischen der Vergleichsbasis und dem SAR-Klassifikationsergebnis gekommen ist. Als Beispiel sei die sichelartige Fläche westlich des Lac Walado in den SAR-Aufnahmen erwähnt. Hier könnte eine Begehung der Örtlichkeit dazu beitragen, eine Ursache bzw. Erklärung für die erhöhte Rückstreuung zu finden. Daraufhin muss geprüft werden, ob dieser Bereich der Klassenbeschreibung der „dichten Vegetation“ genügt.

Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Messgrößen ist insbesondere in den trockenen Bereichen eine Gegenüberstellung mit der Vergleichsbasis schwierig. Die aus den multispektralen Daten sowie dem Kartenmaterial ermittelten Klassenbeschreibungen für diese Flächen konnten nur modifiziert für die SAR-Daten angewandt werden. Dadurch ist die Referenz für den Vergleich bei einer Genauigkeitsanalyse für die einzelnen Klassen der Kategorie *Trockene Bereiche* nicht mehr gegeben.

Die erzielten Genauigkeiten für die beiden Kategorien *Überflutet* und *Nicht überflutet* sind für die objektorientierte Auswertung mit Kappa-Koeffizienten von 0,81 bzw. 0,84 deutlich größer als für den pixelbasierten Ansatz. Die Genauigkeitsanalyse für den pixelbasierten Ansatz erfolgte exemplarisch anhand einer Aufnahme und ergab einen Kappa-Koeffizienten von 0,54 für die Kategorie *Überflutet* bzw. 0,21 für *Nicht überflutet*. Es ist anzunehmen, dass in anderen Aufnahmen Kappa-Koeffizienten von ähnlicher Dimension erreicht werden. Der Gesamt-Kappa-Koeffizient für die Übereinstimmungen der Referenzdaten und dem Klassifikationsergebnis für die genannten drei Kategorien liegt mit 0,77 im oberen moderaten Bereich.

Die Genauigkeitsanalyse bestätigt ebenfalls noch vorhandene Unsicherheiten bei der Unterscheidung von überschwemmten Flächen und offenen Böden, insbesondere wenn die beiden Landbedeckungen benachbart sind. In dem vorliegenden Untersuchungsgebiet betrifft dies hauptsächlich die Überschwemmungsflächen im nördlichen Übergangsbereich zum Delta mort. In den einkanaligen Aufnahmen können diese Bereiche bzw. deren Ausdehnung am zuverlässigsten über mehrere Aufnahmezeitpunkte detektiert werden. Das Ausmaß dieser Überschwemmungsflächen lässt sich insbesondere in Aufnahmen ermitteln, die den Rückzug des Wassers abbilden. Die Rückstreuung der verbliebenen Flächen mit erhöhter Bodenfeuchte bzw. Vegetationsdecke hebt sich von der überwiegend trockenen Umgebung ab.

Die erzielten Genauigkeiten der objektorientierten Auswertung lassen sich durch das Zusammenspiel von zusätzlichen Informationen mit der Nutzung von Kontextmerkmalen in einem wissensbasierten Regelwerk sowie mit der Reduzierung des Speckles auf das Klassifikationsergebnis aufgrund von homogenen Segmenten begründen. Mit dem verbesserten Ergebnis geht ein erhöhter zeitlicher Aufwand einher, der sowohl durch die Modifizierung der Regeln als auch durch die längeren Rechenzeiten verursacht wird.

Da der Kontakt zum Envisat-Satelliten unerwartet abbrach, wurde die Mission am 08.04.2012 vorzeitig für beendet erklärt (ESA, 2000–2012). Dadurch hat sich in dem kontinuierlichen Monitoring der ESA eine Lücke aufgetan. Es befinden sich zur Zeit die im C-Band operierenden kommerziellen RADARSAT-Satelliten sowie der Satellit RISAT-1 im Umlauf, von denen

RADARSAT-2 und RISAT-1 im Gegensatz zu RADARSAT-1 vertikal polarisierte Wellen senden und empfangen können (CANADIAN SPACE AGENCY, 2013; INDIAN SPACE RESEARCH ORGANISATION, 2008).

Die für 2018 geplante *RADARSAT Constellation* Mission wird ebenfalls im C-Band operieren und dient als Nachfolger der beiden RADARSAT-Missionen. Zuvor ist noch der Start des ersten Satelliten des Programms *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) der ESA für Mitte 2013 geplant. Der Satellit Sentinel-1 wird wie die SAR-Instrumente der ERS- und Envisat-Satelliten im C-Band operieren. Somit wird die Fortführung der beiden Vorgängermissionen zur C-Band gestützten Erdbeobachtung ermöglicht (TORRES et al., 2012).

Allgemein ist mit einem Informationsgewinn bei der Verwendung von multifrequenten Aufnahmen zu rechnen (siehe z. B. BOUMAN & HOEKMAN, 1993; LEWIS & HENDERSON, 1998; FRISON et al., 2013). Es wäre zu untersuchen, ob sich zusätzliche kurzweilige SAR-Daten, wie beispielsweise TerraSAR-X Aufnahmen, deren Wellenlänge eine höhere Rückstreuung an den Bodenflächen verursachen könnte, oder langwelligere Daten (z. B. PALSAR), welche tiefer in die trockenen Böden eindringen, zur Unterstützung eignen. Der Vorteil bei der Verwendung von langwelliger Strahlung in semi-ariden Gebieten ist der reduzierte Einfluss der krautigen Vegetationsschicht, der Oberflächenrauigkeit sowie von oberflächiger Feuchtigkeit auf die Rückstreuung (FRISON et al., 2013). Mit einer reduzierten Empfindsamkeit gegenüber Vegetation, Rauigkeit und Feuchtigkeit wird das Signal stärker von den Bodeneigenschaften bestimmt, wodurch eine Annäherung an die Klassenbeschreibung der Trockenklassen der Vergleichsbasis vorstellbar wäre. Zudem könnten Überschneidungen in der Rückstreuung von trockenen Bereichen und überschwemmten Flächen verringert werden. Andererseits könnte in kurzweiligen Aufnahmen das unterschiedliche Rückstreuverhalten zwischen offenen Gewässerflächen und Vegetation in Feuchtgebieten für deren Abgrenzung genutzt werden (HENDERSON, 1995).

Die aufbereiteten SAR-Daten geben einen Überblick über die Ressource Wasser für bereits vergangene Zeitschnitte. Zusammen mit aktuellen Informationen können sie einen bedeutsamen Beitrag für ein nachhaltiges Management der Lebensgrundlage Wasser im Nigerbinnendelta und vergleichbaren Naturräumen leisten.

# Literaturverzeichnis

- [AHNERT 1996] AHNERT, Frank: *Einführung in die Geomorphologie*. Bd. 2., verbesserte Auflage. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 1996
- [ALBERTZ 1991] ALBERTZ, Jörg: *Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: eine Einführung in die Fernerkundung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1991
- [ANDERSEN et al. 2005] ANDERSEN, Inger ; DIONE, Ousmane ; JAROSEWICH-HOLDER, Martha ; OLIVRY, Jean-Claude: *The Niger River Basin: A Vision for Sustainable Management / The World Bank*. 2005. – Forschungsbericht
- [AUSWÄRTIGES AMT 1995–2012] AUSWÄRTIGES AMT: 1995-2012. – URL: [http://www.auswaertiges-amt.de/DE/Startseite\\_node.html](http://www.auswaertiges-amt.de/DE/Startseite_node.html). – Anmerkung: seit 03.05.2012 besteht Reisewarnung für die gesamte Republik Mali, Stand: 18.05.2012
- [BAATZ & MIMLER 2002] BAATZ, Martin ; MIMLER, Matthias: Bildobjekt-Primitive als Bausteine – Extraktion von Objekten „of interest“ bzw. anthropogenen Objekten basierend auf der expliziten Kanteninformation von Bildobjekt-Primitiven. In: BLASCHKE, Thomas (Hrsg.): *Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – innovative Methoden*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002, pp. 179–188
- [BAATZ & SCHÄPE 2000] BAATZ, Martin ; SCHÄPE, Arno: Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: J. STROBL ET AL. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 2000, pp. 12–23
- [BAGHDADI et al. 2001] BAGHDADI, N. ; BERNIER, M. ; GAUTHIER, R. ; NEESON, I.: Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping. In: *International Journal of Remote Sensing* 22 (2001), No. 1, pp. 71–88
- [BARTH 1986] BARTH, Hans K.: *Mali: eine geographische Landeskunde*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1986
- [BAUP et al. 2007] BAUP, F. ; MOUGIN, B. ; HIERNAUX, P. ; LOPES, A. ; DE ROSNAY, P. ; CHÉNERIE, I.: Radar Signatures of Sahelian Surfaces in Mali Using ENVISAT-ASAR Data. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (2007), July, No. 7, pp. 2354–2363
- [BEUCHELT 1966] BEUCHELT, Eno: *Mali*. Deutsche Afrika Gesellschaft e. V., Bonn. Kurt Schroeder Verlag, Die Länder Afrikas - Band 34, 1966
- [BÄHR 2005] BÄHR, Hans-Peter: Ein Gerüst der Bildanalyse. In: BÄHR, Hans-Peter (Hrsg.) ; VÖGTLE, Thomas (Hrsg.): *Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*, Bd. 4., völlig neu bearbeitete Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005, pp. 81–105

- [BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT 2012] BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT, GmbH: *Online-Duden*. 2012. – URL: [www.duden.de](http://www.duden.de)
- [BLASCHKE 2000] BLASCHKE, Thomas: Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer. In: *CORP'2000: Computergestützte Raumplanung, Wien* Band 1 (2000), pp. 159–168
- [BOLTER et al. 1996] BOLTER, Regine ; GELAUTZ, Margrit ; LEBERL, Franz: SAR Speckle Simulation. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 21 (1996), pp. 20–25
- [BOUMAN & HOEKMAN 1993] BOUMAN, B. A. M. ; HOEKMAN, D. H.: Multi-temporal, multi-frequency radar measurements of agricultural crops during the Agriscatt-88 campaign in The Netherlands. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 14 (1993), No. 8, pp. 1595–1614
- [BRICQUET et al. 1998] BRICQUET, J. P. ; GOURCY, L. ; MAHÉ, G. ; ORANGE, D. ; PICOUET, C. ; OLIVRY, J.-C.: Dissolved matter fluxes in the inner delta of the River Niger. In: *Hydrology in the humid tropic environment (Proceedings of a symposium held at Kingston, Jamaica, November 1996)* (1998), No. 253, pp. 435–445
- [BRUZZONE et al. 2004] BRUZZONE, Lorenzo ; MARCONCINI, Mattia ; WEGMÜLLER, Urs ; WIESMANN, Andreas: An Advanced System for the Automatic Classification of Multitemporal SAR Images. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 42 (2004), June, No. 6, pp. 1321–1334
- [BUCHROITHNER & GRANICA 1997] BUCHROITHNER, Manfred F. ; GRANICA, Klaus: Applications of imaging radar in hydro-geological disaster management: A review. In: *Remote Sensing Reviews* Vol. 16 (1997), pp. 1–134
- [CANADIAN SPACE AGENCY 2013] CANADIAN SPACE AGENCY: 2013. – URL: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/default.asp>. – Stand: 02.04.2013
- [CENTENO 1998] CENTENO, Jorge S.: Integrierte Vorverarbeitung von Satellitenbild- und gerasterter Karteninformation. In: *Digitale Bildverarbeitung, Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung, 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage*. H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 1998
- [CENTER FOR SUSTAINABILITY AND THE GLOBAL ENVIRONMENT 2012] CENTER FOR SUSTAINABILITY AND THE GLOBAL ENVIRONMENT, University of Wisconsin-Madison: *River Discharge Database*. 2012. – URL: <http://www.sage.wisc.edu/riverdata/>. – Stand: 05.03.2013
- [CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY 2012] CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY: *The World Factbook*. 2012. – URL: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ml.html>. – Stand: 08.12.2011
- [CONGALTON 1991] CONGALTON, Russell G.: A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 37 (1991), No. 1, pp. 35–46
- [CONGALTON & GREEN 2008] CONGALTON, Russell G. ; GREEN, Kass: *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data – Principles and Practices*. Second Edition, Taylor & Francis Group, 2008

- [COSTA 2004] COSTA, M. P. F.: Use of SAR satellites for mapping zonation of vegetation communities in the Amazon floodplain. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 25 (2004), May, No. 10, pp. 1817–1835
- [COSTA & TELMER 2006] COSTA, Maycira P. ; TELMER, Kevin H.: Utilizing SAR imagery and aquatic vegetation to map fresh and brackish lakes in the Brazilian Pantanal wetland. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 105 (2006), December, No. 3, pp. 204–213
- [CSAPLOVICS 1992] CSAPLOVICS, Elmar: *Methoden der regionalen Fernerkundung: Anwendungen im Sahel Afrikas*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1992
- [D-MAPS.COM 2007–2012] D-MAPS.COM: 2007-2012. – URL: <http://d-maps.com/index.php?lang=de>. – Stand: 24.03.2012
- [DEFINIENS 2009a] DEFINIENS: *eCognition Developer 8 - Reference Book*, 2009
- [DEFINIENS 2009b] DEFINIENS: *eCognition Developer 8 - User Guide*, 2009
- [DENNY 1993] DENNY, P.: Wetlands of Africa: Introduction. In: LIETH, Helmut (Hrsg.) ; WHIGHAM, Dennis F. (Hrsg.) ; DYKYJOVÁ, D. (Hrsg.) ; HEJNÝ, S. (Hrsg.): *Wetlands of the World I: Inventory, Ecology and Management (Handbook of Vegetation Science)* Bd. 15/2. Kluwer Academic Publishers, 1993, pp. 1–46
- [DEUTSCHER WETTERDIENST 1996–2012] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Wetterlexikon des Deutschen Wetterdienstes*. 1996-2012. – URL: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm>. – Stand: 26.03.2012
- [DIALLO 2000] DIALLO, Ousmane A.: *Contribution à l'étude de la dynamique des écosystèmes des mares dans le Delta Central du Niger, au Mali*, L'Universite Paris I, Dissertation, 2000
- [DIARRA et al. 2004] DIARRA, Samuel ; KUPER, Marcel ; MAHÉ, Gil: Mali: Flood Management – Niger River Inland Delta. In: *Integrated Flood Management, Case Study*. WMO/GWP Associated Programme on Flood Management, Edited by Technical Support Unit, January 2004
- [DIVA-GIS 2013] DIVA-GIS: 2013. – URL: <http://www.diva-gis.org>. – Stand: 17.10.2013
- [DOBSON & ULABY 1998] DOBSON, M. C. ; ULABY, Fawwaz T.: Mapping Soil Moisture Distribution with Imaging Radar. In: HENDERSON, Floyd M. (Hrsg.) ; LEWIS, Anthony J. (Hrsg.): *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 407–433
- [DOBSON et al. 1995] DOBSON, M. C. ; ULABY, Fawwaz T. ; PIERCE, Leland E. ; SHARIK, T. L. ; BERGEN, K. M. ; KELLNDORFER, J. ; KENDRA, J. R. ; LI, E. ; LIN, Y. C. ; NASHASHIBI, A. ; SARABANDI, Kamal ; SIQUEIRA, P.: Estimation of Forest Biophysical Characteristics in Northern Michigan with SIR-C/X-SAR. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 33 (1995), July, No. 4, pp. 877–895
- [DUBOIS et al. 1995] DUBOIS, Pascale C. ; VAN ZYL, Jakob ; ENGMAN, Ted: Measuring Soil Moisture with Imaging Radars. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 33 (1995), No. 4, pp. 915–926
- [ESA 2000–2012] ESA: *Earthnet Online*. 2000-2012. – URL: <https://earth.esa.int/>. – Stand: 22.01.2013

- [FAO GEONETWORK 2012] FAO GEONETWORK: 2012. – URL: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>. – Stand: 17.09.2012
- [FEKETE et al. 2012] FEKETE, Balázs M. ; VÖRÖSMARTY, Charles J. ; GRABS, Wolfgang: *UNH / GRDC Composite Runoff Fields V 1.0*. 2012. – URL: <http://www.grdc.sr.unh.edu/>. – Stand: 03.04.2012
- [FOODY 2002] FOODY, Giles M.: Status of land cover classification accuracy assessment. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 80 (2002), pp. 185–201
- [FRISON et al. 2013] FRISON, P.-L. ; MERCIER, G. ; FAYE, G. ; MOUGIN, E. ; HIERNAUX, P. ; LARDEUX, C. ; RUDANT, J.-P.: Analysis of L- and C-Band SAR Image Time Series Over a Sahelian Area. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* Vol. 10 (2013), September, No. 5, pp. 1016–1020
- [FROST et al. 1982] FROST, Victor S. ; STILES, Josephine A. ; SHANMUGAN, K. S. ; HOLTZMAN, Julian C.: A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. PAMI-4 (1982), March, No. 2, pp. 157–166
- [FUNG et al. 1992] FUNG, A. K. ; LI, Z. ; CHEN, K. S.: Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 30 (1992), No. 2, pp. 356–369
- [GAO 1996] GAO, Bo-Cai: NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. In: *Remote Sensing of Environmental Research* Vol. 58 (1996), pp. 257–266
- [VAN DE GIESEN 2000] GIESEN, Nick van de: Characterization of west African shallow flood plains with L- and C-band radar. In: *Remote Sensing and Hydrology* Vol. 267 (2000), pp. 365–367
- [GRINGS et al. 2006] GRINGS, Francisco M. ; FERRAZZOLI, Paolo ; JACOBO-BERLLES, Julio C. ; KARSZENBAUM, Haydee ; TIFFENBERG, Javier ; PRATOLONGO, Paula ; KANDUS, Patricia: Monitoring Flood Condition in Marshes Using EM Models and Envisat ASAR Observations. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 44 (2006), April, No. 4, pp. 936–942
- [HAGG 1998] HAGG, Wilhelm: Analyse fernerkundlicher Radardaten. In: BÄHR, Hans-Peter (Hrsg.) ; VÖGTLE, Thomas (Hrsg.): *Digitale Bildverarbeitung, Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung, 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage*. H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 1998
- [HALLIKAINEN et al. 1985] HALLIKAINEN, Martti T. ; ULABY, Fawwaz T. ; DOBSON, Myron C. ; EL-RAYES, Mohamed A. ; WU, Lil-Kun: Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. Ge-23 (1985), January, No. 1, pp. 25–34
- [HAMMER 2005] HAMMER, Thomas ; BLÜMEL, Wolf D. (Hrsg.) ; BORK, Hans-Rudolf (Hrsg.) ; FUCHS, Gerhard (Hrsg.) ; KRAAS, Frauke (Hrsg.) ; MÜLLER-MAHN, Detlef (Hrsg.) ; WIRTH, Eugen (Hrsg.): *Sahel*. Klett-Perthes Verlag, Gotha und Stuttgart, 2005
- [HANDELS 2009] HANDELS, Heinz: *Medizinische Bildverarbeitung : Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die computergestützte ärztliche Diagnostik und Therapie*. Bd. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009



- [HARALICK et al. 1973] HARALICK, D. A. M. ; SHANMUGAM, K. ; DINSTEIN, I.: Textural Features for Image Classification. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* Vol. 3 (1973), November, No. 6, pp. 610–621
- [HARALICK & SHAPIRO 1985] HARALICK, Robert M. ; SHAPIRO, Linda G.: Image segmentation techniques. In: *Machine Vision International* Vol. 29 (1985), January, No. 1, pp. 100–132
- [HENDERSON 1995] HENDERSON, F. M.: Environmental factors and the detection of open surface water areas with X-band radar imagery. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 16 (1995), No. 13, pp. 2423–2437
- [HENDERSON & LEWIS 2008] HENDERSON, Floyd M. ; LEWIS, Anthony J.: Radar detection of wetland ecosystems: a review. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 29 (2008), October, No. 20, pp. 5809–5835
- [HOLECZ 1993] HOLECZ, Francesco: *Postprocessing von SAR – Satellitenbilddaten*. Remote Sensing Series Vol. 23, Department of Geography, University of Zurich, 1993. – Dissertation
- [HUGHES et al. 1992] HUGHES, R. H. ; HUGHES, J. S. ; With a chapter on Madagascar by G. BERNACSEK: *A Directory of African Wetlands*. IUCN (The World Conservation Union), UNEP (The United Nations Environment Programme), WCMC (The World Conservation Monitoring Centre), 1992
- [HUTCHINSON 1982] HUTCHINSON, Charles F.: Techniques for Combining Landsat and Ancillary Data for Digital Classification Improvement. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 48 (1982), No. 1, pp. 123–130
- [INDIAN SPACE RESEARCH ORGANISATION 2008] INDIAN SPACE RESEARCH ORGANISATION: 2008. – URL: <http://www.isro.gov.in>. – Stand: 03.04.2013
- [INSTITUT D'ECONOMIE RURALE ] INSTITUT D'ECONOMIE RURALE: *tägliche Pegelstände der Stationen Mopti und Akka für die Jahre 1992, 1993, 1995, 1996, 2003 und 2004*
- [ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS 2009] ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS: *ENVI Help*. 2009
- [JÄHNE 1997] JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung*. Bd. 4., völlig neubearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997
- [JOHN et al. 1993] JOHN, D. M. ; LÉVÉQUE, C. ; NEWTON, L. E.: Western Africa. In: LIETH, Helmut (Hrsg.) ; WHIGHAM, Dennis F. (Hrsg.) ; DYKYJOVÁ, D. (Hrsg.) ; HEJNÝ, S. (Hrsg.): *Wetlands of the World I: Inventory, Ecology and Management (Handbook of Vegetation Science)* Bd. 15/2. Kluwer Academic Publishers, 1993, pp. 47–78
- [KANDUS et al. 2001] KANDUS, P. ; KARSZENBAUM, H. ; PULTZ, T. ; PARMUCHI, G. ; BAVA, J.: Influence of Flood Conditions and Vegetation Status on the Radar Backscatter of Wetland Ecosystems. In: *Canadian Journal of Remote Sensing* Vol. 27 (2001), December, No. 6, pp. 651–662
- [KARSZENBAUM et al. 2000] KARSZENBAUM, H. ; KANDUS, P. ; MARTINEZ, J. M. ; LE TOAN, T. ; TIFFENBERG, J. ; PARMUCHI, G.: ERS-2, RADARSAT SAR backscattering characteristics of the Paraná River delta wetlands, Argentina. In: *ERS-Envisat Symposium ESA-SP-461* (2000)

- [KASISCHKE & BOURGEOU CHAVEZ 1997] KASISCHKE, Eric S. ; CHAVEZ, Laura L. Bourgeau: Monitoring South Florida Wetlands Using ERS-1 SAR Imagery. In: *Environmental Research* Vol. 63 (1997), pp. 281–291
- [KASISCHKE et al. 2003] KASISCHKE, Eric S. ; SMITH, Kevin B. ; BOURGEOU-CHAVEZ, Laura L. ; ROMANOWICZ, Edwin A. ; BRUNZELL, Suzy ; RICHARDSON, Curtis J.: Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 88 (2003), No. 4, pp. 423–441
- [KLAUSING & HOLPP 2000] KLAUSING, Helmut (Hrsg.) ; HOLPP, Wolfgang (Hrsg.): *Radar mit realer und synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung*. Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2000
- [KONE et al. 2002] KONE, Bakary ; WYMENGA, E. E. ; DIALLO, Mori: Brève Description du Delta. In: WYMENGA, Eddy (Hrsg.) ; KONE, Bakary (Hrsg.) ; KAMP, Jan van der (Hrsg.) ; ZWARTS, Leo (Hrsg.): *Delta Intérieur du fleuve Niger*. URL: <http://www.altwym.nl/en.php/docs/publicaties/>, 2002. – Stand: 04.05.2012
- [KOTTEK et al. 2006] KOTTEK, Markus ; GRIESER, Jürgen ; BECK, Christoph ; RUDOLF, Bruno ; RUBEL, Franz: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. In: *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 15 (2006), June, No. 3, pp. 259–263
- [KRAUS 1990] KRAUS, Karl: *Fernerkundung Band 2 – Auswertung photographischer und digitaler Bilder*. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1990
- [KRAUS & SCHNEIDER 1988] KRAUS, Karl ; SCHNEIDER, Werner: *Fernerkundung Band 1 – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1988
- [KRINGS 1985] KRINGS, Thomas: Periodische Seespiegelschwankungen und ihre Auswirkungen auf die Agrarwirtschaft im Faguibine-See (Republik Mali). In: *Erdkunde* Vol. 39 (1985), pp. 116–1128
- [KRINGS 2006] KRINGS, Thomas: *Sahelländer: Mauretanien, Senegal, Gambia, Mali, Burkina Faso, Nigeria*. WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt, 2006
- [KUAN et al. 1985] KUAN, Darwin T. ; SAWCHUK, Alexander A. ; STRAND, C. ; CHAVEL, Pierre: Adaptive Noise Smoothing Filter for Images with Signal-Dependent Noise. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-7 (1985), March, No. 2, pp. 165–177
- [KUAN et al. 1987] KUAN, Darwin T. ; SAWCHUK, Alexander A. ; STRAND, C. ; CHAVEL, Pierre: Adaptive restoration of images with speckle. In: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing* Vol. 35 (1987), March, No. 3, pp. 373–383
- [KUSSEROW 1994] KUSSEROW, Hannelore: *Einsatz von Fernerkundungsdaten zur Vegetationsklassifizierung im Südsahel Malis: ein multitemporaler Vergleich zur Erfassung der Dynamik von Trockengehölzen*, Universität Bayreuth, Dissertation, 1994
- [LACAUX et al. 2007] LACAUX, J. P. ; TOURRE, Y. M. ; VIGNOLLES, C. ; NDIONE, J. A. ; LAFAYE, M.: Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 106 (2007), pp. 66–74

- [LANG et al. 2008] LANG, Megan W. ; TOWNSEND, Philip A. ; KASISCHKE, Eric S.: Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 112 (2008), pp. 3898–3907
- [LAUR et al. 2004] LAUR, H. ; BALLY, P. ; MEADOWS, P. ; SANCHEZ, J. ; SCHAETTLER, B. ; LOPINTO, E. ; ESTEBAN, D.: Derivation of the backscattering coefficient  $\sigma^{\circ}$  in ESA ERS SAR PRI products / ESA Document No: ES-TN-RS-PM-HL09 Issue 2, Rev. 5f. 2004. – Forschungsbericht
- [LE HOUÉROU 1989] LE HOUÉROU, Henry N.: *The grazing land ecosystems of the African Sahel, Ecological studies* Vol. 75. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989
- [LECKIE & RANSON 1998] LECKIE, Donald G. ; RANSON, K. Jon: Forestry Applications using Imaging Radar. In: HENDERSON, Floyd M. (Hrsg.) ; LEWIS, Anthony J. (Hrsg.): *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 435–509
- [LEE et al. 1994] LEE, J. S. ; JURKEVICH, L. ; DEWAELE, P. ; WAMBACQ, P. ; OOSTERLINCK, A.: Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. In: *Remote Sensing Reviews* Vol. 8 (1994), No. 4, pp. 313–340
- [LEE 1980] LEE, Jong-Sen: Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-2 (1980), No. 2, pp. 165–168
- [LEE 1981] LEE, Jong-Sen: Refined filtering of image noise using local statistics. In: *Computer Graphics and Image Processing* Vol. 15 (1981), April, No. 4, pp. 380–389
- [LEICA GEOSYSTEMS GIS & MAPPING 2003] LEICA GEOSYSTEMS GIS & MAPPING: *Erdas Field Guide*. Seventh Edition, 2003
- [LESER 2010] LESER, Hartmut: *Diercke-Wörterbuch Allgemeine Geographie*. Aktualisierte Neuauflage. Deutscher Taschenbuch Verlag, 2010
- [LEUKERT 2002] LEUKERT, Kristin: *Untersuchungen zur Segmentierung von Satellitenbilddaten für die Extraktion von GIS-Objekten*. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (Band 11), 2002
- [LEWIS 1998] LEWIS, Anthony J.: Geomorphic and Hydrologic Applications of Active Microwave Remote Sensing. In: HENDERSON, Floyd M. (Hrsg.) ; LEWIS, Anthony J. (Hrsg.): *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 567–629
- [LEWIS & HENDERSON 1998] LEWIS, Anthony J. ; HENDERSON, Floyd M.: Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: HENDERSON, Floyd M. (Hrsg.) ; LEWIS, Anthony J. (Hrsg.): *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 131–181
- [LILLESAND et al. 2004] LILLESAND, Thomas M. ; KIEFER, Ralph W. ; CHIPMAN, Jonathan W.: *Remote sensing and image interpretation*. Fifth Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2004
- [LINARES 2002] LINARES, Olga F.: African rice (*Oryza glaberrima*): History and future potential. In: *PNAS – Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* Vol. 99 (2002), No. 25, pp. 16360–16365

- [LOPES et al. 1990a] LOPES, A. ; NEZRY, E. ; TOUZI, R. ; LAUR, H.: Maximum A Posteriori Speckle Filtering And First Order Texture Models In Sar Images. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing Science for the Nineties', 10th Annual International* (1990), pp. 2409–2412
- [LOPES et al. 1990b] LOPES, Armand ; TOUZI, Ridha ; NEZRY, E.: Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 28 (1990), November, No. 6, pp. 992–1000
- [LU et al. 2004] LU, D. ; MAUSEL, P. ; BRONDÍZIO, E. ; MORAN, E.: Change detection techniques. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 25 (2004), No. 12, pp. 2365–2407
- [LUDLOFF 2002] LUDLOFF, Albrecht: *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg Verlag, 2002
- [MAHÉ et al. 2009] MAHÉ, G. ; BAMBA, F. ; SOUMAGUEL, A. ; ORANGE, D. ; OLIVRY, J. C.: Water losses in the inner delta of the River Niger: water balance and flooded area. In: *Hydrological Processes* 23 (2009), pp. 3157–3160
- [MASON et al. 2007] MASON, David C. ; HORRITT, Matthew S. ; DALL'AMICO, Johanna T. ; SCOTT, Tania R. ; BATES, Paul D.: Improving River Flood Extent Delineation From Synthetic Aperture Radar Using Airborne Laser Altimetry. In: *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 45 (2007), December, No. 12, pp. 3932–3943
- [MAYAUX et al. 2003] MAYAUX, P. ; BARTHOLOMÉ, E. ; MASSART, M. ; VAN CUTSEM, C. ; CABRAL, A. ; NONGUIERMA, A. ; DIALLO, O. ; PRETORIUS, C. ; THOMPSON, M. ; CHERLET, M. ; PEKEL, J-F. ; DEFOURNY, P. ; VASCONCELOS, M. ; DI GREGORIO, A. ; FRITZ, S. ; DE GRANDI, G. ; ELVIDGE, C. ; VOGT, P. ; BELWARD, A.: A Land Cover Map of Africa – Carte de l'occupation du sol de l'Afrique / European Commission, Joint Research Centre. URL: <http://www-gem.jrc.it/glc2000>, 2003. – Forschungsbericht. Stand: 23.01.2012
- [MAYAUX et al. 2004] MAYAUX, Philippe ; BARTHOLOMÉ, Etienne ; FRITZ, Steffen ; BELWARD, Alan: A new land-cover map of Africa for the year 2000. In: *Journal of Biogeography* Vol. 31 (2004), pp. 861–877
- [MCCARTHY 1993] MCCARTHY, T. S.: The great inland deltas of Africa. In: *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)* Vol. 17 (1993), No. 3, pp. 275–291
- [MCFEETERS 1996] MCFEETERS, S. K.: The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 17 (1996), No. 7, pp. 1425–1432
- [MCINTOSH 1983] MCINTOSH, Roderick J.: Floodplain Geomorphology and Human Occupation of the Upper Inland Delta of the Niger. In: *The Geographical Journal* Vol. 149 (1983), July, No. 2, pp. 182–201
- [MEADOWS et al. 1998] MEADOWS, Peter ; LAUR, Henry ; SCHÄTTLER, Birgit: The Calibration of ERS SAR Imagery for Land Applications. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Retrieval of Bio- & Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, Noordwijk, 21 - 23 October* (1998), pp. 43–50

- [MERING et al. 2000] MERING, Catherine ; PONCET, Yveline ; HESS, Siegfried ; CSAPLOVICS, Elmar: The use of ERS data for monitoring landcover change in Sahelian regions – the example of the delta of the Niger river (Mali). In: *Proceedings ERS-Envisat Symposium Gothenburg, Sweden* (2000)
- [MOORE 1980] MOORE, Gerald K.: Satellite remote sensing of water turbidity. In: *Hydrological Sciences Bulletin* Vol. 25 (1980), No. 4, pp. 407–421
- [MOREIRA 2000] MOREIRA, Alberto: *Radar mit synthetischer Apertur – Grundlagen und Signalverarbeitung*, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Habilitationsschrift, 2000
- [NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION 2012] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: *The Landsat Program*. 2012. – URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>. – Stand: 05.12.2012
- [NEUBERT 2005] NEUBERT, Marco: *Bewertung, Verarbeitung und segmentbasierte Auswertung sehr hoch auflösender Satellitenbilddaten vor dem Hintergrund landschaftsplanerischer und landschaftsökologischer Anwendungen*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2005
- [NISCHWITZ et al. 2007] NISCHWITZ, Alfred ; FISCHER, Max ; HABERÄCKER, Peter: *Computergrafik und Bildverarbeitung : alles für Studium und Praxis ; Bildverarbeitungswerkzeuge, Beispiel-Software und interaktive Vorlesungen online verfügbar*. Bd. 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg, 2007
- [OH et al. 1992] OH, Yisok ; SARABANDI, Kamal ; ULABY, Fawwaz T.: An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 30 (1992), No. 2, pp. 370–381
- [OLIVRY 1995] OLIVRY, Jean-Claude: Fonctionnement hydrologique de la Cuvette Lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du Delta intérieur. In: BOULÈGUE J. (ED.), Olivry Jean-Claude (. (Hrsg.): *Grands bassins fluviaux périatlantiques: Congo, Niger, Amazone*. Paris : ORSTOM, 1995, pp. 267–280
- [PONCET & TROUBAT 1994a] PONCET, Yveline ; TROUBAT, Jean Jacques: *Carte I: Delta Central du Niger (Mali) à l'échelle de 1:500 000 - L'eau 1980-1990*. ORSTOM Éditions. 1994. – URL: [http://www.cartographie.ird.fr/sphaera/liste\\_cartes.php?iso=MLI&nom=MALI](http://www.cartographie.ird.fr/sphaera/liste_cartes.php?iso=MLI&nom=MALI). – Stand: 02.01.2013
- [PONCET & TROUBAT 1994b] PONCET, Yveline ; TROUBAT, Jean-Jacques: Carte II: croquis morpho-pédologique. In: QUENSIÈRE, Jacques (Hrsg.): *La pêche dans le delta central du Niger : approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique*. Paris : ORSTOM ; Karthala, 1994, 1 carte, 1994
- [POPE et al. 1997] POPE, Kevin O. ; REJMANKOVA, Eliska ; PARIS, Jack F. ; WOODRUFF, Robert: Detecting Seasonal Flooding Cycles in Marshes of the Yucatan Peninsula with SIR-C Polarimetric Radar Imagery. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 59 (1997), No. 59, pp. 157–166
- [RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT 2004] RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT: *Fact sheet - Inner Niger Delta / Delta Intérieur du Niger (Mali)*. January 2004. – URL: [www.ramsar.org](http://www.ramsar.org). – Stand: 04.05.2006

- [RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT 2006] RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT: *The Ramsar Convention Manual – A Guide to the Convention on Wetlands*. 4th edition, 2006
- [RANEY 1998] RANEY, R. K.: Radar Fundamentals: Technical Perspective. In: HENDERSON, Floyd M. (Hrsg.) ; LEWIS, Anthony J. (Hrsg.): *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 9–130
- [RESEARCH SYSTEMS INC. 2003] RESEARCH SYSTEMS INC.: *ENVI User's Guide*. ENVI Version 4.0, September 2003
- [ROHLING ] ROHLING, H.: *Skriptum zur Vorlesung „Radartechnik und -signalverarbeitung“*. Institut für Nachrichtentechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg. – Stand: 20.09.2012
- [ROSICH & MEADOWS 2004] ROSICH, B. ; MEADOWS, P.: Absolute Calibration of ASAR Level 1 Products Generated with PF-ASAR / European Space Agency. 2004. – Forschungsbericht
- [ROUSE JR. et al. 1974] ROUSE JR., J. W. ; HAAS, R. H. ; SCHELL, J. A. ; DEERING, D. W.: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp.* Vol. 1 (1974), pp. 309–317
- [VAN DER SANDEN & THOMAS 2004] SANDEN, J. J. van der ; THOMAS, S. J.: Applications Potential of RADARSAT-2 - Supplement One - / Canada Centre for Remote Sensing. URL: [ftp://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/ess\\_pubs/220/220108/13421.pdf](ftp://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/ess_pubs/220/220108/13421.pdf), August 2004. – Forschungsbericht
- [SARMAP SA 2009] SARMAP SA: *The SAR-Guidebook Examples based on SARscape*, August 2009
- [SCHOWENGERDT 2006] SCHOWENGERDT, Robert A.: *Remote Sensing : Models and Methods for Image Processing*. 3. Auflage. Elsevier Science, 2006
- [SCHRÖDER 2004] SCHRÖDER, Thomas: *Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen in Küstengewässern mit MERIS unter Anwendung expliziter und impliziter Atmosphärenkorrekturverfahren*, Freie Universität Berlin, Dissertation, 2004
- [SCRAMUZZA et al. 2004] SCRAMUZZA, Pat ; MICIJEVIC, Esad ; CHANDER, Gyanesh: SLC gap-filled products: Phase one methodology. URL: [http://landsat.usgs.gov/documents/SLC\\_Gap\\_Fill\\_Methodology.pdf](http://landsat.usgs.gov/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf), 2004. – Forschungsbericht
- [SIVAKUMAR 1989] SIVAKUMAR, M. V. K.: Agroclimatic Aspects of Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone. In: *Soil, Crop and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian zone: proceedings of an International Workshop, 7-11 January 1987* (1989), pp. 17–38
- [SMITH et al. 1996] SMITH, Laurence C. ; ISACKS, Bryan L. ; BLOOM, Arthur L. ; MURRAY, A. B.: Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery: Potential application to ungaged basins. In: *Water Resources Research* Vol. 32 (1996), No. 7, pp. 2021–2034
- [SMITH et al. 1995] SMITH, Laurence C. ; ISACKS, Bryan L. ; FORSTER, Richard R. ; BLOOM, Arthur L. ; PREUSS, I.: Estimation of Discharge From Braided Glacial Rivers Using ERS 1 Synthetic Aperture Radar: First Results. In: *Water Resources Research* Vol. 31 (1995), May, No. 5, pp. 1325–1329

- [SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH 2012] SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH: *wissenschaft-online*. 2012. – URL: <http://www.wissenschaft-online.de>. – Stand: 10.04.2012
- [SPIRKOVSKA 1993] SPIRKOVSKA, Lilly: A Summary of Image Segmentation Techniques / National Aeronautics and Space Administration. June 1993. – Forschungsbericht
- [SREENIVAS et al. 1995] SREENIVAS, K. ; VENKATARATNAM, L. ; NARASIMHA RAO, P. V.: Dielectric properties of salt-affected soils. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 16 (1995), No. 4, pp. 641–649
- [STROOSNIJDER 1979] STROOSNIJDER, L.: *Carte des Sols du Mali. Bassée sur l'interprétation des Images Satellite 1972-1975 avec Observations du Terrain en 1976-1979*. 1979
- [SWART et al. 2006] SWART, L. M. T. ; DE VALK, C. F. ; SMITH, A. J. E.: Land/water detection with polarimetric SAR / Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 2006. – Forschungsbericht
- [TAYLOR et al. 1996] TAYLOR, G. R. ; MAH, A. H. ; KRUSE, F. A. ; KIEREIN-YOUNG, K. S. ; HEWSON, R. D. ; BENNETT, B. A.: The extraction of soil dielectric properties from AIRSAR data. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 17 (1996), No. 3, pp. 501–512
- [TINER 1999] TINER, Ralph W.: *Wetland Indicators - A Guide to Wetland Identification, Delineation, Classification, and Mapping*. Lewis Publishers, 1999
- [TORRES et al. 2012] TORRES, Ramon ; SNOEIJ, Paul ; GEUDTNER, Dirk ; BIBBY, David ; DAVIDSON, Malcolm ; ATTEMA, Evert ; POTIN, Pierre ; ROMMEN, Björn ; FLOURY, Nicolas ; BROWN, Mike ; NAVAS TRAVER, Ignacio ; DEGAYE, Patrick ; DUESMANN, Berthyl ; ROSICH, Betlem ; MIRANDA, Nuno ; BRUNO, Claudio ; L'ABBATE, Michelangelo ; CROCI, Renato ; PIETROPAOLO, Andrea ; HUCHLER, Markus ; ROSTAN, Friedhelm: GMES Sentinel-1 mission. In: *Remote Sensing of Environment* Vol. 120 (2012), pp. 9–24
- [TUCKER 1979] TUCKER, Compton J.: Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. In: *Remote Sensing of the Environment* Vol. 8 (1979), pp. 127–150
- [TURNER & CONGALTON 1998] TURNER, M. D. ; CONGALTON, R. G.: Classification of multi-temporal SPOT-XS satellite data for mapping rice fields on a West African floodplain. In: *International Journal of Remote Sensing* Vol. 19 (1998), No. 1, pp. 21–41
- [ULABY et al. 1986] ULABY, F. T. ; MOORE, R. K. ; FUNG, A. K.: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive Volume III: From Theory to Applications*. Artech House, Inc., 1986
- [ULABY et al. 1982] ULABY, Fawwaz T. ; MOORE, Richard K. ; FUNG, Adrian K.: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Artech House, Inc., 1982
- [UNESCO 1996] UNESCO: *Übereinkommen über Feuchtgebiete, insbesondere als Lebensraum für Wasser- und Watvögel, von internationaler Bedeutung*, 1996. – URL: <http://www.ramsar.org>. – Stand: 07.06.2010
- [UNESCO 1997] UNESCO, FAO: *Soil Map of the world*. World Soil Resources Report 60, reprinted with updates as Technical Paper 20, ISRIC. 1997

- [UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME 2006] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME: 2006. – URL: <http://geodata.grid.unep.ch/results.php>. – Stand: 28.03.2012
- [UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY 2012] UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY, Argentina: *GeoDZ.com Das Lexikon der Erde*. 2012. – URL: <http://www.geodz.com>. – Stand: 17.09.2012
- [UNIVERSITY OF MARYLAND 1997–2010] UNIVERSITY OF MARYLAND: *Earth Science Data Interface*. 1997-2010. – URL: <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/>. – Stand: 11.12.2012
- [UNIVERSITY OF VETERINARY MEDICINE VIENNA 2011] UNIVERSITY OF VETERINARY MEDICINE VIENNA, Institute for Veterinary Public Health: *World Maps of Köppen-Geiger Climate Classification*. 2011. – URL: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>. – Stand: 24.03.2012
- [U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2012] U.S. GEOLOGICAL SURVEY: *EarthExplorer*. 2012. – URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. – Stand: 11.12.2012
- [WHITE 1983] WHITE, Frank: *The Vegetation of Africa: A descriptive memoir to accompany the Unesco/AETFAT/UNSO vegetation map of Africa*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, 1983
- [WORLDCLIMATE 1996–2012] WORLDCLIMATE: 1996-2012. – URL: <http://worldclimate.com>. – Stand: 16.02.2012
- [ZINK 2002] ZINK, Manfred: Introduction to the ASAR Calibration/Validation Project. In: *Proceedings of the Envisat Calibration Review, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 9-13 September (2002)*
- [ZWARTS 2010] ZWARTS, Leo: Will the Inner Niger Delta shrivel up due to climate change and water use upstream? / Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Wetlands International. 2010. – A&W rapport 1537
- [ZWARTS et al. 2005a] ZWARTS, Leo ; BEUKERING, Pieter van ; KONE, Bakary ; WYMENGA, Eddy: *The Niger, a lifeline. Economic and ecological interests in effective water management in the Upper Niger Basin; an executive summary*. 2005. – URL: [www.wetlands.org](http://www.wetlands.org). – Stand: 17.10.2005
- [ZWARTS et al. 2007] ZWARTS, Leo ; BEUKERING, Pieter van ; KONE, Bakary ; WYMENGA, Eddy: *Impact of dams on the people of Mali*. Wetlands International, 2007
- [ZWARTS et al. 2005b] ZWARTS, Leo ; CISSÉ, Navon ; DIALLO, Mori: Hydrology of the upper Niger. In: ZWARTS, Leo (Hrsg.) ; BEUKERING, Pieter van (Hrsg.) ; KONE, Bakary (Hrsg.) ; WYMENGA, Eddy (Hrsg.): *The Niger, a lifeline. Effective water management in the Upper Niger Basin*. RIZA-Rijkswaterstaat / Wetlands International / Institute for Environmental studies (IVM) / A&W ecological consultants bv., 2005
- [ZWARTS et al. 2005c] ZWARTS, Leo ; GRIGORAS, Ian ; HANGANU, Jenica: Vegetation of the lower inundation zone of the Inner Delta. In: ZWARTS, Leo (Hrsg.) ; BEUKERING, Pieter van (Hrsg.) ; KONE, Bakary (Hrsg.) ; WYMENGA, Eddy (Hrsg.): *The Niger, a lifeline. Effective water management in the Upper Niger Basin*. RIZA-Rijkswaterstaat / Wetlands International / Institute for Environmental studies (IVM) / A&W ecological consultants bv., 2005

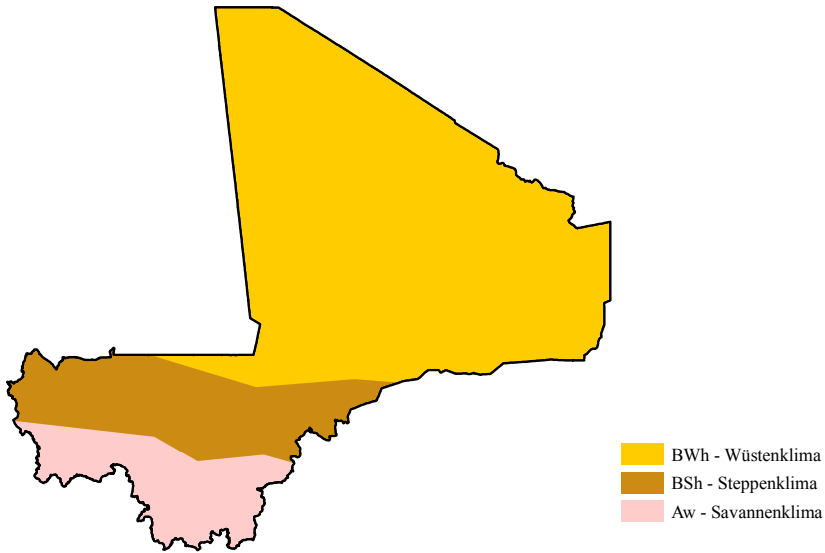


[ZWARTS & GRIGORAS 2005] ZWARTS, Leo ; GRIGORAS, Ion: Flooding of the Inner Niger Delta. In: ZWARTS, Leo (Hrsg.) ; BEUKERING, Pieter van (Hrsg.) ; KONE, Bakary (Hrsg.) ; WYMENGA, Eddy (Hrsg.): *The Niger, a lifeline. Effective water management in the Upper Niger Basin*. RIZA-Rijkswaterstaat / Wetlands International / Institute for Environmental studies (IVM) / A&W ecological consultants bv., 2005

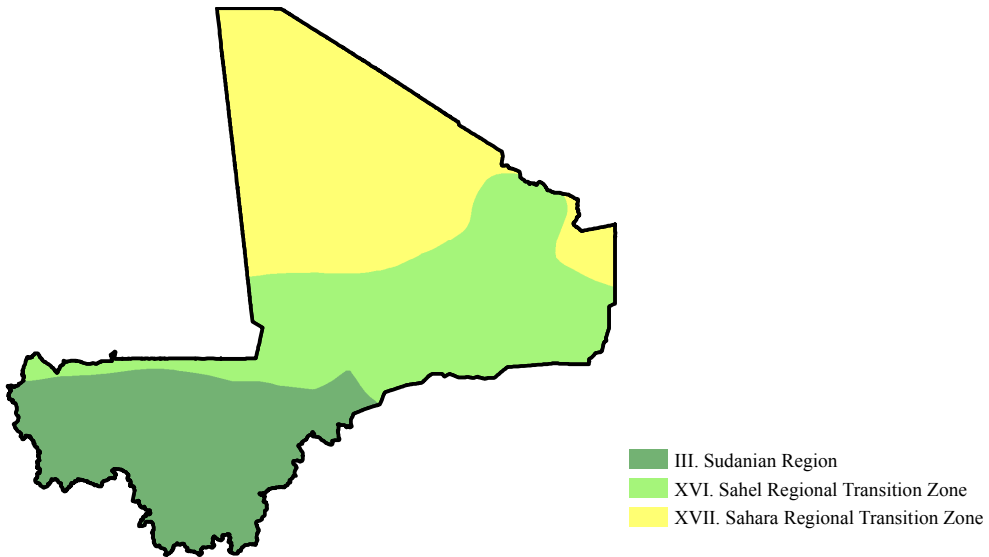
[ZWARTS & KONE 2005] ZWARTS, Leo ; KONE, Bakary: Rice Production in the Inner Niger Delta. In: ZWARTS, Leo (Hrsg.) ; BEUKERING, Pieter van (Hrsg.) ; KONE, Bakary (Hrsg.) ; WYMENGA, Eddy (Hrsg.): *The Niger, a lifeline. Effective water management in the Upper Niger Basin*. RIZA-Rijkswaterstaat / Wetlands International / Institute for Environmental studies (IVM) / A&W ecological consultants bv., 2005



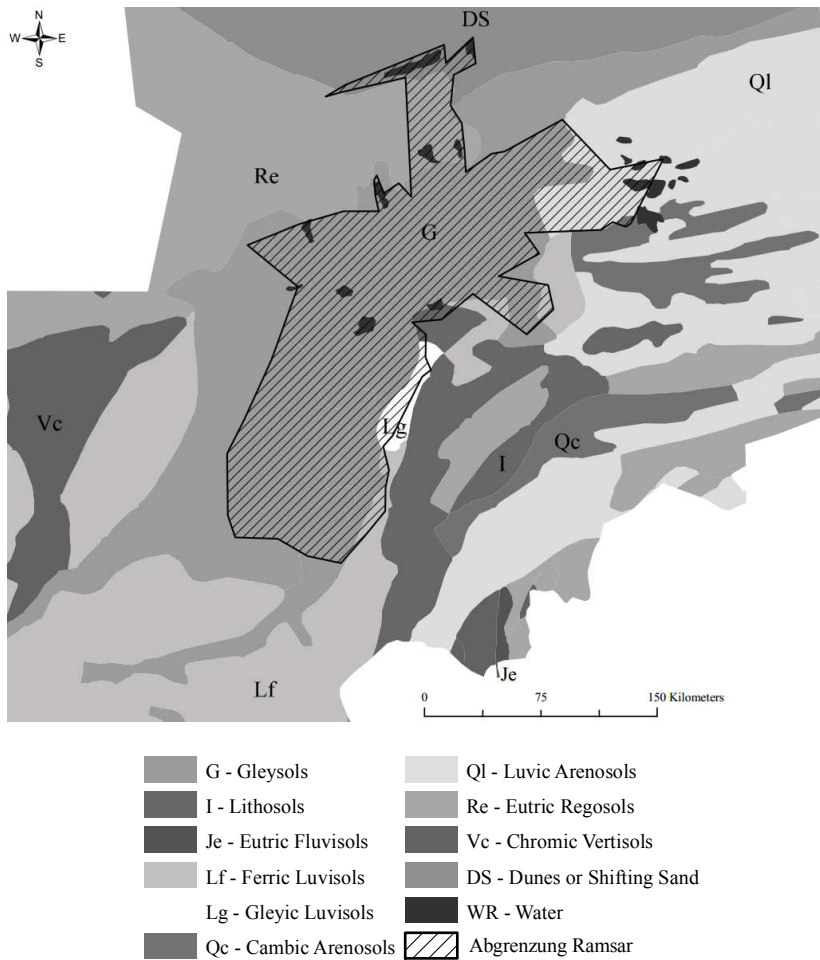
# A Anhang



**Abbildung A.1:** Klimaklassifikation Malis nach Köppen und Geiger, Quelle der Daten von Köppen und Geiger: UNIVERSITY OF VETERINARY MEDICINE VIENNA (2011), <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>



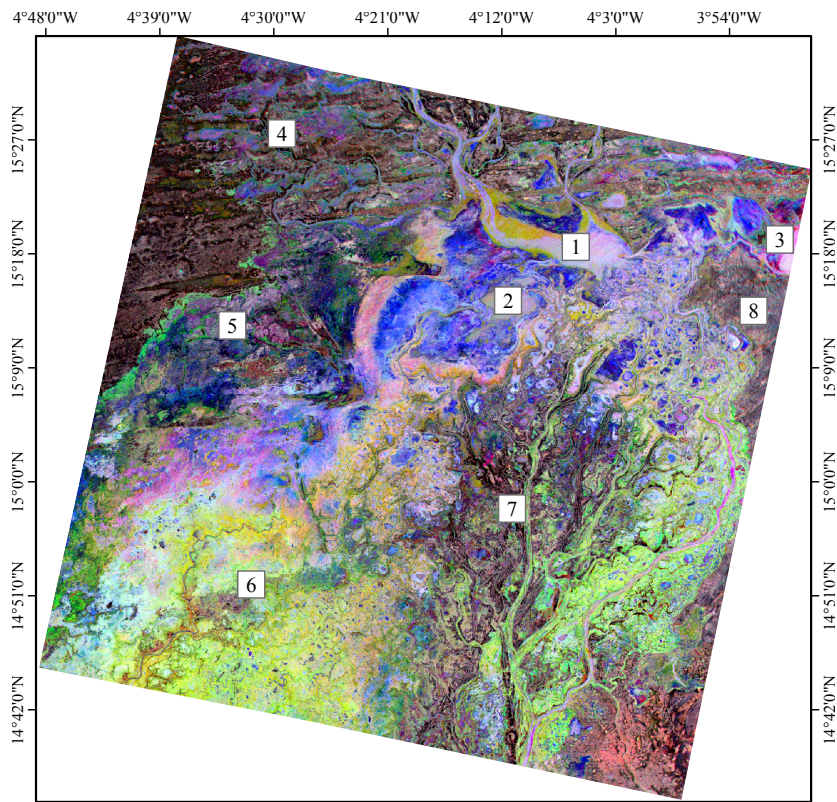
**Abbildung A.2:** Florenregionen Malis nach WHITE (1983), Quelle der Shape-datei: UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2006), <http://geodata.grid.unep.ch/results.php>



**Abbildung A.3:** Bodenklassen der „Soil Map of the World“ der FAO für das Ramsar-Gebiet und dessen angrenzende Bereiche, Quelle der Daten: FAO GEONETWORK (2012) <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>

Tree layer [%]	Shrub layer [%]	Grass layer [%]	Phenology	Agriculture [%]	Other attributes [%]	Class name
<b>Woodlands and Shrublands</b>						
15-40	>15	>15	Deciduous			Deciduous woodland
<15	>15	>40	Deciduous			Deciduous shrubland with sparse trees
<5	>15	>40	Deciduous			Open deciduous shrubland
<b>Grasslands</b>						
<20	<20	>40	Mixed			Closed grassland
	<20	15-40	Deciduous			Open grassland with sparse shrubs
		5-15	Deciduous			Open grassland
		1-5	Deciduous			Sparse grassland
5-15	>15	>40			Regularly flooded (fresh)	Swamp bushlands and grasslands
<b>Agriculture</b>						
			Mixed	>50		Croplands
	>15		Mixed	15-40		Croplands with open woody vegetation
			Mixed	>50	Irrigation	Irrigated croplands
	>15		Mixed	>50		Tree crops
<b>Bare soil</b>						
		<1			Sands	Sandy desert and dunes
		<1			Disaggregated stones	Stony desert
		<1			Aggregated rocks	Bare rock
		<1				Salt hardpans
<b>Other</b>						
						Inland waters
						Cities

**Tabelle A.1:** Auszug aus der GLC2000 (Quelle: MAYAUX et al., 2004, S. 866, geändert)



**Abbildung A.4:** Übersicht über die Lage einiger geographischer Objekte im Binnendelta

- mit
- 1 ... Lac Débo
  - 2 ... Lac Walado
  - 3 ... Lac Korientzé
  - 4 ... überschwemmte Flächen im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes
  - 5 ... Übergangsbereich am westlichen Rand des Überschwemmungsgebietes
  - 6 ... Übergangsbereich entlang eines Nebenflusses des Diaka
  - 7 ... zentraler Bereich des Untersuchungsgebietes mit den Nebenflüssen Mayo Dembé und Mayo Ranéo
  - 8 ... Ausläufer des Bandiagara-Plateaus

	Row 049/050	Row 050
Landsat MSS	26.12.1978	
Landsat TM		13.12.1990
	16.12.2000	28.11.1999
Landsat ETM+	16.10.2001	29.10.2000
	12.03.2003	
	22.10.2003	

**Tabelle A.2:** Überblick über die Landsat-Aufnahmen, mit Row 049/050 = Abdeckung des gesamten Untersuchungsgebietes, Row 050 = mittleres Delta (inkl. Lac Walado)

Landsat MSS Kanal	Bandbreite [ $\mu m$ ]
Band 1 (4) (Visible)	0,5 bis 0,6
Band 2 (5) (Visible)	0,6 bis 0,7
Band 3 (6) (Near-Infrared)	0,7 bis 0,8
Band 4 (7) (Near-Infrared)	0,8 bis 1,1

**Tabelle A.3:** Kanaldefinitionen von Landsat MSS (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2012)

Landsat TM Kanal	Bandbreite [ $\mu m$ ]
Band 1 (Visible)	0,45 bis 0,52
Band 2 (Visible)	0,52 bis 0,60
Band 3 (Visible)	0,63 bis 0,69
Band 4 (Near-Infrared)	0,76 bis 0,90
Band 5 (SWIR)	1,55 bis 1,75
Band 6 (Thermal)	10,40 bis 12,50
Band 7 (SWIR)	2,08 bis 2,35

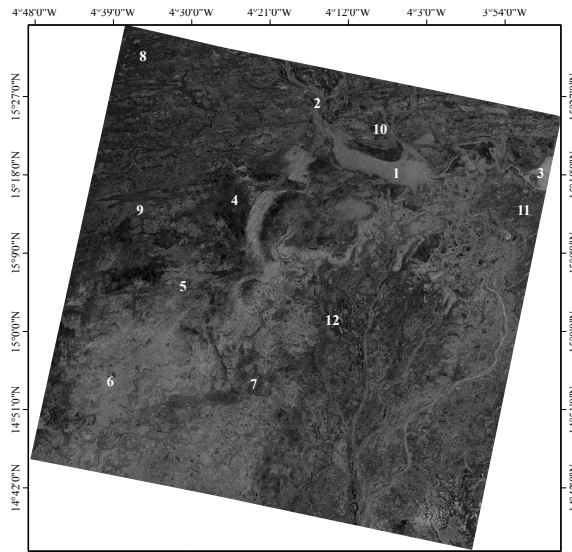
**Tabelle A.4:** Kanaldefinitionen von Landsat TM (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2012)



---

Landsat ETM+ Kanal	Bandbreite [ $\mu\text{m}$ ]
Band 1 (Visible)	0,45 bis 0,515
Band 2 (Visible)	0,525 bis 0,605
Band 3 (Visible)	0,63 bis 0,69
Band 4 (Near-Infrared)	0,75 bis 0,90
Band 5 (SWIR)	1,55 bis 1,75
Band 6 (Thermal)	10,40 bis 12,50
Band 7 (SWIR)	2,09 bis 2,35
Band 8 (Pan)	0,52 bis 0,90

**Tabelle A.5:** Kanaldefinitionen von Landsat ETM+ (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2012)



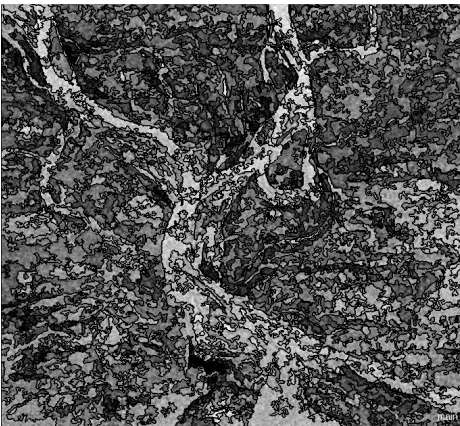
**Abbildung A.5:** Lage der Testbereiche zur Berechnung der Jeffries-Matusita-Distanzen (vgl. Tab. A.6) in der ASAR-Aufnahme vom 31.10.2003

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1072	1188	1414	891	691	1409	1414	1369	1356	1365	1414
2		0	1397	1412	473	1306	1254	1407	860	796	859	1414
3			0	1414	1269	741	1414	1414	1414	1413	1413	1414
4				0	1336	1414	121	369	1382	1387	1376	633
5					0	1097	984	1291	693	657	683	1382
6						0	1414	1414	1406	1403	1405	1414
7							0	1035	768	821	739	1354
8								0	1338	1347	1326	912
9									0	82	36	1409
10										0	100	1409
11											0	1407
12												0

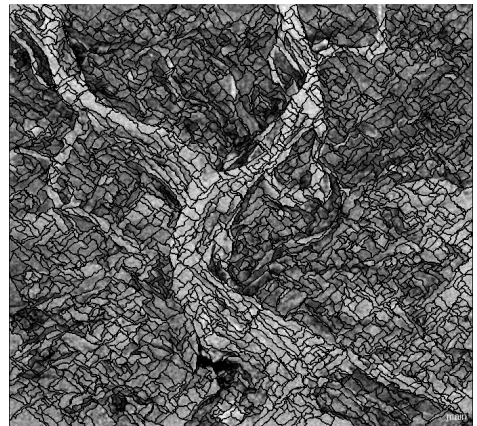
**Tabelle A.6:** Jeffries-Matusita-Distanzen für folgende Klassen: 1 = Gewässer - Lac Débo, 2 = Gewässer - Niger, 3 = Gewässer - Lac Korientzé, 4 = überschwemmte Flächen (dunkle Wasserflächen), 5 = Vegetation (mit größerem Anteil Wasser), 6 = Vegetation (mit größerem Anteil Vegetation), 7 = überschwemmte Flächen, 8 = sandige Böden, 9 = Boden mit alluvialen Ablagerungen, 10 = Düne, 11 = Bandiagara-Anstieg, 12 = entwässerte Erhebungen entlang der Ufer; ein Wert von 1414 entspricht einer sehr hohen Klassentrennbarkeit, der Wert 0 steht für Nicht-Trennbarkeit (LEICA GEOSYSTEMS GIS & MAPPING, 2003); grau unterlegt sind Klassenpaare mit einer geringen Trennbarkeit



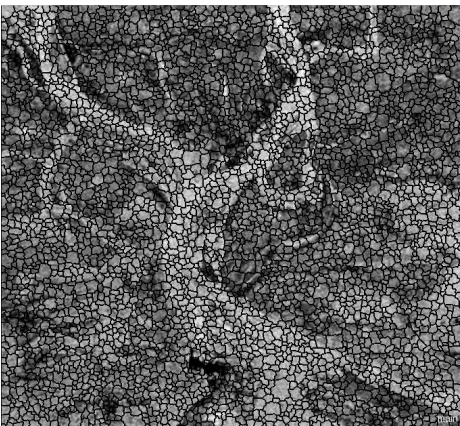
(a) Original ERS-Szene



(b) Shape: 0, Compactness: 0



(c) Shape: 0,9, Compactness: 0



(d) Shape: 0,9, Compactness: 1

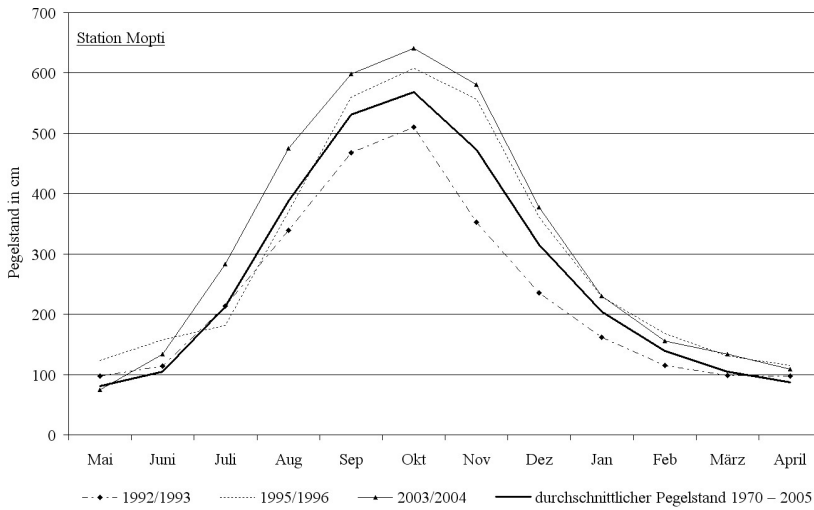


(e) Shape: 0,3, Compactness: 0,1

**Abbildung A.6:** Segmentierung mit verschiedenen Gewichtungen von Shape und Compactness bei einem Scale-Parameter von 20

	Überflutet	Nicht überflutet	Nutzergenauigkeit [% ]
Überflutet	809	135	85,70
Nicht überflutet	605	496	45,05
Herstellergenauigkeit [% ]	57,21	78,61	

**Tabelle A.7:** Fehlermatrix der ASAR Oktober-Aufnahme für die Kategorien *Überflutet* und *Nicht überflutet*, basierend auf dem Maximum-Likelihood Klassifikationsergebnis, die Gesamtgenauigkeit beträgt 64 %



**Abbildung A.7:** Pegelstände der Station Mopti der hydrologischen Jahre 1992/1993, 1995/1996 und 2003/2004 sowie der durchschnittliche Monatspegel zwischen 1970 und 2005 (basierend auf Daten des INSTITUT D'ECONOMIE RURALE)