Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

DISSERTATION

Erfassung der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Bodenfeuchtemustern in semiariden Gebieten mittels ERS-1/2 InSAR Zeitreihen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Wolfgang Wagner
E 122
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von

Dipl. Geogr. Stefan Knabe
Mat. Nr. 0127386
Tegernseer Landstr. 36
D-81541 München
Deutschland

Wien, am 1. April 2004

Stefan Knabe

Korrektoren:

Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Wolfgang Wagner
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Technischen Universität Wien

Univ. Prof. Dr. rer.nat. Friedrich Wieneke
Department für Geo- und Umweltwissenschaften
Sektion Geographie
Ludwig-Maximilians Universität München

Die Studie wurde am *Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)* des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)* in Oberpfaffenhofen (Deutschland) erstellt.
Die *European Space Agency (ESA)* unterstützte die Arbeit mit Daten der ERS-1/2 SAR Sensoren in Form eines Category-1 Projektes (ID: 1308) im Bereich *Hydrologie.*

Abstract

The impacts of climate change and the excessive population growth of the 21. century are strengthening the importance of the topic *"water management"*. Especially arid and semiarid regions are severely affected by the influence of the greenhouse effect due to a growing spatial and temporal variability of precipitation. In addition to an increasing frequency and intensity of drought situations the likeliness of severe flood events in autumn and winter is growing due to an enforcement of the cyclogenesis caused by high sea surface temperatures. The increasing global water problem underlines the growing importance of drought and flood warning systems which enable the detection of potential dangers and to react to these threats in time. The knowledge of the spatial soil moisture distribution in river drainage basins and its variation over time is one of the key parameters for these systems. As soil moisture is responsible for the runoff behaviour of a drainage basin it strongly influences all hydrological processes from ground water regeneration to flood generation.

Microwave remote sensing has a great potential to monitor the spatial and temporal distribution of soil moisture continuously due to its sensitivity to changes in the amount of soil moisture and its capability to acquire data independently of weather and daytime. As besides soil moisture other surface parameters also influence the backscattering behaviour, like vegetation cover, soil roughness and soil texture, numerous methods have been developed in the past to enable a qualitative or quantitative description of the soil moisture distribution by isolating its influence on the backscattered signal. Unfortunately these methods often were unsuitable for an area extended description of the soil moisture distribution over an entire river drainage basin. The dependence on in-situ measurements for model calibration, their complexity and high amounts of calculating time often limited their applicability to single test fields.

This study describes a simple and robust empirical method, which enables the area extended description of the spatial and temporal soil moisture variation in arid and semiarid regions on the basis of ERS-1/2 InSAR time series. As the coherence information of the InSAR data is used to minimize the influence of a vegetation cover or a change in surface roughness on the backscattered signal the proposed change detection method enables the description of the soil moisture distribution of an entire river drainage basin only with the help of remote sensing data.

By guaranteeing low amounts of biomass and the temporal stability of surface roughness with the help of the coherence information, the method enabled a sensitive description of the spatial distribution of soil moisture with small estimation errors of $3{,}4-4{,}3 vol.\%$. Because of the low need of calculating time, its simplicity and stability the proposed method has a great potential for an operational application to continuously generate soil moisture fields of a river drainage basin. The derived products therefore are suitable as basis for the calibration or validation of hydrological models and to offer effective spatial soil moisture information for drought and flood warning systems.

Zusammenfassung

Im Zuge des globalen Klimawandels sowie der Bevölkerungsexplosion des 21. Jahrhunderts gewinnt die Thematik *„Wassermanagement"* zunehmend an Bedeutung. Insbesondere aride und semiaride Regionen zeigen sich aufgrund einer wachsenden räumlichen und zeitlichen Variabilität der Niederschläge von einer steigenden Wasserproblematik stark betroffen. Zusätzlich zu einer zunehmenden Frequenz und Intensität von Dürresituationen wächst gleichzeitig die Gefahr extremer Hochwasserereignisse in den Herbst und Wintermonaten aufgrund einer mit den ansteigenden Meeresoberflächentemperaturen verstärkten Zyklonenaktivität. Das wachsende Ausmaß der globalen Wasserproblematik unterstreicht die zunehmende Bedeutung von Dürre- und Hochwasserwarnsystemen, um Gefahrenpotenziale bereits frühzeitig erkennen und darauf reagieren zu können. Die entscheidende Voraussetzung für derartige Systeme ist die Kenntnis der räumlichen Bodenfeuchteverteilung von Flusseinzugsgebieten sowie deren Änderung über die Zeit. Indem die Bodenfeuchtesituation das Abflussverhalten des Einzugsgebietes steuert, besitzt sie einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserbildung bis hin zum Entstehen von Flutkatastrophen.
Die Mikrowellenfernerkundung bietet aufgrund ihrer Sensibilität hinsichtlich einer Feuchteänderung sowie der wetter- und tageszeitenunabhängigen Aufnahmefähigkeit die Möglichkeit, die Bodenfeuchteverteilung eines Gebietes kontinuierlich und flächenhaft zu erfassen. Da neben der Bodenfeuchte weitere Oberflächenparameter, wie die Vegetationsbedeckung, die Bodenrauhigkeit und Bodentextur, das Rückstreusignal beeinflussen, wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Methoden entwickelt, um die Isolierung des Feuchteeinflusses zu ermöglichen und damit qualitative und quantitative Aussagen bezüglich des Bodenfeuchteaufkommens treffen zu können. Die Methoden erwiesen sich dabei jedoch in der Regel für eine großräumige Beschreibung der Bodenfeuchtesituation als ungeeignet. So beschränkte oftmals eine Abhängigkeit von in-situ Messungen sowie die hohe Komplexität und Rechenzeitintensivität die Feuchteerfassung auf einzelne Testflächen.

Die vorliegende Studie beschreibt ein einfaches und robustes empirisches Verfahren, das auf Basis von ERS-1/2 InSAR Zeitreihen die großräumige Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variation der Bodenfeuchte in ariden und semiariden Gebieten in Form eines Feuchte-Index ermöglicht. Indem die Kohärenz-Information der InSAR Daten dazu genutzt wird, eine mögliche Beeinflussung des Rückstreusignals durch eine biomassereiche Vegetationsbedeckung oder eine Änderung der Oberflächenrauhigkeit zu minimieren, ermöglicht der vorgestellte *Change Detection Ansatz* eine flächenhafte Bodenfeuchteerfassung über komplette Flusseinzugsgebiete ausschließlich auf Basis von Fernerkundungsdaten. Bei der kohärenzbasierten Gewährleistung der Verfahrensprämissen *Biomassearmut* und *Rauhigkeitsstabilität* ermöglichte das Verfahren die Beschreibung der räumlichen Bodenfeuchteverteilung mit geringen *Schätzfehlern* von $3{,}4 - 4{,}3 vol.\%$. Unterstützt durch die geringe Rechenzeit und hohe Stabilität begünstigen die Eigenschaften des Verfahrens eine Operationalisierung, um kontinuierlich Bodenfeuchtefelder eines Flusseinzugsgebietes zu generieren. Die gewonnenen Produkte eignen sich somit als Kalibrierungs- oder Validierungsgrundlage für die hydrologische Modellierung und für die Gewährleistung aktueller Flächeninformation für Dürre- und Hochwasserwarnsysteme.

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben, sehr herzlich bedanken.

Die vorliegende Arbeit entstand am *Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum* (DFD) *des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.* (*DLR*). Der Leitung des *DFD*, Prof. Dr. Stefan Dech, sowie der Abteilung *Umwelt und Geoinformation* (*UG*) Dr. Harald Mehl, gilt mein Dank für die Bereitstellung der Möglichkeiten und Ressourcen , diese Studie zu erstellen. Des weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Abteilung *DFD-UG* für die angenehme Atmosphäre, den steten fachlichen Rat und Beistand bedanken.

Ich danke Prof. Dr. Wolfgang Wagner für die engagierte Betreuung der Dissertation und die wertvollen Ratschläge, die maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Dr. Friedrich Wieneke für seine fachliche Unterstützung und seine stets konstruktive Kritik. Sein persönlicher Rat half mir in vielen Momenten mein Ziel vor Augen zu behalten.

Mein besonderer Dank gilt Anke Benjes für die unermüdliche und tatkräftige Unterstützung meiner Arbeit, die unzähligen höchst fruchtbaren Diskussionen und wertvollen und umsichtigen Ratschläge, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dank auch an Niels Ringelmann für die wissenschaftlichen Diskussionen, die hilfsbereite Unterstützung mit Rat und Tat und die freundschaftliche und nicht selten lustige Atmosphäre in unserem gemeinsamen Büro.

Für die freundliche Unterstützung meiner Arbeit, die stets große Hilfsbereitschaft und die herzliche Atmosphäre bedanke ich mich bei Achim Roth und Detlev Kosmann sowie dem gesamten Team *SAR Topo*, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass mir der Aufenthalt am *DFD* viel Freude bereitete. Im besonderen sei dabei Dr. Bernhard Rabus für die fruchtbaren wissenschaftlichen Diskussionen gedankt.

Auch danke ich sehr herzlich Ulla Benjes, Anke Benjes und Wilfried Knabe für die unzähligen Stunden, die sie aufopferungsvoll für die akribische Korrektur meiner Arbeit aufbrachten.

Mein Dank gebührt ebenfalls dem *Space Aplication Institute* (*SAI*) des *Joint Research Centre of the European Commission* (*JRC*), insbesondere Guido Lemoine, für die freundliche Unterstützung und Bereitstellung der wertvollen Daten des MARS-Projektes für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* und für den angenehmen Aufenthalt am *JRC*. Im weiteren danke ich dem *Geographischen Institut der Universität Salamanca*, insbesondere Dr. Antonio Ceballos, für die Bereitstellung der in-situ Bodenfeuchtemessungen und Referenzdaten des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"*. Dank auch an das Institut für *Photogrammetrie und Fernerkundung* der *TU Wien* für die Bereitstellung der ERS-Scatterometer Daten, der Feuchte-Index Messreihen und der Landsat 7 ETM+ Szene des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"*.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Christa und Wilfried Knabe, ohne deren stets tatkräftige Unterstützung ein Gelingen meiner Arbeit sicher nicht möglich gewesen wäre.

1. April 2004

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ____ iv
Tabellenverzeichnis ____ vii
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen ____ ix

1. Einleitung ____ 1
1.1. Wissenschaftliche Zielsetzung ____ 4
1.2. Aufbau der Arbeit ____ 5

2. Radar-basierte Bodenfeuchteerfassung - Stand der Forschung ____ 7
2.1. Berücksichtigung des Einflusses einer Vegetationsbedeckung ____ 16
2.2. Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität der Oberflächeneigenschaften ____ 20

3. Grundlagen der Radar-Fernerkundung ____ 22
3.1. Messprinzip des Radar-Systems ____ 22
3.2. Das Synthetic Aperture Radar (SAR) ____ 26
3.2.1. Das SAR-Signal ____ 27
3.2.2. Geometrie einer SAR-Aufnahme ____ 30
3.2.3. Das ERS-1/2 *Active Microwave Instrument (AMI)* ____ 31
3.3. Grundlagen der SAR-Interferometrie (InSAR) ____ 33
3.3.1. Interferometrisches Messprinzip ____ 33
3.3.2. Die Kohärenz ____ 35
3.3.2.1. Dekorrelationseffekte ____ 36
3.3.2.1.1. Aufnahmesystembedingte Dekorrelationseffekte ____ 36
3.3.2.1.2. Temporale Dekorrelationseffekte ____ 39
3.3.2.2. Die Kohärenz-Schätzung ____ 42

4. Streuprozesse an der Erdoberfläche ____ 44
4.1. Rückstreuverhalten von brachliegenden Böden ____ 44
4.1.1. Dielektrische Eigenschaften ____ 45
4.1.1.1. Vegetationsfreie Böden ____ 49
4.1.1.2. Die Vegetationsdecke ____ 53
4.1.2. Die Oberflächenrauhigkeit ____ 53
4.1.3. Elektromagnetische Rückstreumodelle – Das *Geometric Optics Model* ____ 57
4.2. Rückstreuverhalten von vegetationsbedeckten Flächen ____ 59

5. Die Untersuchungsgebiete 62
5.1. Das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* 62
5.1.1. Geomorphologie 62
5.1.2. Klima 63
5.1.3. Böden 64
5.1.4. Landwirtschaft 65
5.2. Das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* 66
5.2.1. Geomorphologie 66
5.2.2. Klima 67
5.2.3. Böden 68
5.2.4. Landwirtschaft 69

6. Datengrundlage und Referenzdaten 70
6.1. Das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* 70
6.1.1. Datengrundlage *„Sevilla"* – ERS-1/2 InSAR Zeitreihe 71
6.1.2. Referenzdaten *„Sevilla"* 72
6.1.2.1. Landsat 5 TM Szenen 73
6.1.2.2. ERS-1/2 Scatterometer-Intensitätsdaten – Bodenfeuchte-Index-Zeitreihe 73
6.1.2.3. Meteorologische Daten 74
6.1.2.4. Corine Landnutzungsklassifikation 75
6.1.2.5. Agrarwirtschaftliche Anbaukalender 76
6.2. Das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* 77
6.2.1. Datengrundlage *„La Guarena"* – ERS-1/2 InSAR Zeitreihe 77
6.2.2. Referenzdaten *„La Guarena"* 78
6.2.2.1. In-situ Bodenfeuchte Messreihe 78
6.2.2.2. Meteorologische Daten 79
6.2.2.3. ERS-1/2 Scatterometer-Intensitätsdaten – Bodenfeuchte-Index-Zeitreihe 81
6.2.2.4. Landnutzungsklassifikation 82
6.2.2.5. Landsat 7 ETM+ Szene 82

7. Datenaufbereitung 83
7.1. Prozessierung und Aufbereitung der InSAR-Zeitreihen 83
7.1.1. Amplituden-Daten 84
7.1.2. Kohärenz-Schätzung – Tandem- und Langzeit-Kohärenz 85
7.1.3. Digitale Höhenmodelle (DHM) 87
7.2. Aufbereitung der Landsat TM und ETM+ Daten 88

8. Erfassung eines Feuchte-Index auf Basis der ERS-1/2 InSAR Information 91
8.1. Physikalischer Hintergrund 92
8.2. Charakterisierung der Bodenrauhigkeit 96
8.3. Die Kohärenz – Gewährleistung der Prämissen 100
8.4. Der *Feuchte-Index* $m_{\%\,field}$ 102

9. Kohärenz- und Intensitätsanalysen im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* 107
9.1. Analysen hinsichtlich des Einflusses von Vegetation
9.2. auf das Kohärenz- und Intensitätsverhalten 108
9.1.1. Vorstratifizierung verfahrensrelevanter Flächen 114
9.1.2. Vegetationsbeeinflusstes Kohärenz- und Intensitätsverhalten 116
9.2. Kohärenz-Analyse hinsichtlich des Einflusses einer Rauhigkeitsänderung 125

10. Anwendung und Validierung des Verfahrens im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* 133
10.1. Beschreibung der Validierungsgrundlage 133
10.2. Feuchte-Index-Erfassung im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* 138
10.2.1. Charakterisierung der Rauhigkeit und Isolierung verfahrenskonformer Flächen 138
10.2.2. Erfassung des feuchtebedingten Signalwertebereiches mit Hilfe des *Geometric Optics Models* 140
10.2.3. Ableitung des Feuchte-Index $m_{\%sat}$ 146
10.3. Validierung des Verfahrens 148
10.3.1. Genauigkeit in der Beschreibung der zeitlichen Feuchtevariation 150
10.3.2. Genauigkeit in der Beschreibung der räumlichen Feuchteverteilung 158

11. Diskussion der Ergebnisse 164

12. Ausblick 169

Literaturverzeichnis 172

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Aufnahmegeometrie eines SAR-Systems 25

Abb. 3.2: Radar-Echo c einer Auflösungszelle in der komplexen Ebene 28

Abb. 3.3: Geometrische Verzerrungen der SAR-Aufnahme 30

Abb. 3.4: Mehrdeutigkeit der dreidimensionalen Lagebestimmung in Range-Richtung 34

Abb. 3.5: Interferometrisches Messprinzip: zweite Antenne erlaubt dreidimensionale Lagebestimmung aufgrund abweichender Aufnahmepositionen 34

Abb. 4.1: Eindringtiefe in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der Frequenz 48

Abb. 4.2: Zusammenhang zwischen ε_r', ε_r'' und m_v für verschiedene Böden 51

Abb. 4.3: Variation des Rückstreuquerschnitts in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und des Biomasseaufkommens 61

Abb. 5.1: Klimadiagramm von Sevilla 64

Abb. 5.2: Klimadiagramm von Zamora 68

Abb. 6.1: Zeitreihen des ERS-1/2 Scatterometer Bodenfeuchte-Index M_S für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* des Beobachtungszeitraumes *1995-1996* 74

Abb. 6.2: Niederschlagsverteilung für den Beobachtungszeitraum *1995-1996* im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* 75

Abb. 6.3: Niederschlagsverteilungen des Beobachtungszeitraumes *1999* im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*. 80

Abb. 6.4: Niederschlagsverteilungen des Beobachtungszeitraumes *2000* an der Station *La Boveda de Toro* 81

Abb. 6.5: Zeitreihen des ERS-1/2 Scatterometer Bodenfeuchte-Index M_S für das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* im Beobachtungszeitraum *1999 – 2000* 81

Abb. 9.1: Mittlerer Zusammenhang zwischen *NDVI* und *LAI* für Trockenanbauflächen im Gebiet *„Sevilla"*. 113

Abb. 9.2: Verhalten der Tandem-Kohärenz auf Flächen der Landnutzungsklassen *Prärie*, *brachliegende Flächen* und *Siedlung* im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* 115

Abb. 9.3: Abnahmeraten der Kohärenz der Landnutzungsklassen *Prärie*, *brachliegende Flächen* und *Siedlung* mit wachsendem Zeitintervall zwischen den Aufnahmezeitpunkten 115

Abb. 9.4: Zusammenhang zwischen *NDVI* und Tandem-Kohärenz im Gebiet *„Sevilla"* in den Beobachtungszeiträumen *5. - 9. / 10.6.95* und *11. - 27. / 28.10.95* 118

Abb. 9.5: Zusammenhang zwischen *NDVI* und *Rückstreuintensität* im Gebiet *„Sevilla"* in den Beobachtungszeiträumen *5. - 9.6.95* und *11. - 27.10.95.* 121

Abb. 9.6: Zusammenhang zwischen *Tandem-Kohärenz* und *Rückstreuintensität* im Gebiet *„Sevilla"* in den Beobachtungszeiträumen *5. – 9 / 10.6.95* und *11. - 27. / 28.10.95* 123

Abb. 9.7: Langzeit-Kohärenz-Verhalten in Abhängigkeit des Rauhigkeitsverhaltens im Zeitraum 25. März bis *19. April 1996* 126

Abb. 9.8: Abnahme der Kohärenz mit wachsenden Zeitintervallen zwischen den Aufnahmezeitpunkten über vegetationsfreien Böden und biomassearmen Flächen 128

Abb. 10.1: Dielektrische Eigenschaften ε_r' und ε_r'' der Messpunkte in Abhängigkeit der volumetrischen Feuchte m_v und der Korngrößenverteilung 142

Abb. 10.2: Fresnel'sche Reflektivität Γ_0 in Abhängigkeit der volumetrischen Feuchte m_v und der Korngrößenverteilung der Messpunkte 143

Abb. 10.3: Zusammenhang zwischen feuchtebedingtem Signalwertebereich und der maximalen Variation der volumetrischen Feuchte je physischer Einheit 145

Abb. 10.4: Abnahmerate des feuchtebedingten Signalanteils je physischer Einheit vom Zeitpunkt der Sättigung am *1. September 1999* bis zum *3. September 1999* 145

Abb. 10.5: Feuchte-Index Verteilung am *2. September 1999* im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* 147

Abb. 10.6: Feuchte-Index Verteilung am *3. September 1999* im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* 148

Abb. 10.7: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe* im System volumetrische Bodenfeuchte $m_v[cm^3cm^{-3}]$ an rauhigkeitsstabilen, biomassearmen Stationen. 151

Abb. 10.8: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe* *im System volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3cm^{-3}]$ an rauhigkeitsstabilen, biomassearmen Stationen 152

Abb. 10.9: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe* *im System volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3cm^{-3}]$ an Stationen mit veränderter Rauhigkeit und / oder Biomassereichtum 152

Abb. 10.10: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe* im System volumetrische Bodenfeuchte $m_v[cm^3cm^{-3}]$ an Stationen mit veränderter Rauhigkeit und / oder Biomassereichtum 153

Abb. 10.11: Zusammenhang zwischen *Feuchte-Index* und *in-situ Messung* *am 2. / 7. September 1999* und *3. / 7. September 1999* auf Basis der individuellen Signalwertebereiche der Messstationen 159

Abb. 10.12: Zusammenhang zwischen dem *Feuchte-Index* der Aufnahmezeitpunkte *2.* und *3. September 1999* und dem Feuchtegehalt der Feldkapazität auf Basis der individuellen Signalwertebereiche der Messstationen 161

Abb. 10.13: Zusammenhang zwischen *Feuchte-Index* und *in-situ Messung* *am 2. / 7. September 1999* und *3. / 7. September 1999, sowie* zwischen dem *Feuchte-Index* der Aufnahmezeitpunkte *2.*und *3. September 1999* und dem Feuchtegehalt der Feldkapazität auf Basis der mittleren feuchtebedingten Signalwertebereiche der physischen Einheiten 162

Anhang

Abb.1: RGB-Darstellung des ERS-1/2 InSAR Tandem-Datensatzes der Aufnahmezeitpunkte *9. / 10. Juni 1995 des Gebietes „Sevilla"* I

Abb. 2: Landsat 5 TM Szene des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* vom *5. Juni 1995* I

Abb. 3: *CORINE Landnutzungsklassifikation* für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* II

Abb. 4: RGB-Darstellung des ERS-1/2 InSAR Tandem-Datensatzes *der Aufnahme-*zeitpunkte 2. / 3. September 1999 im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* II

Abb. 5: Geomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* zuzüglich der räumlichen Verteilung der Bodentypen sowie der Bodenfeuchte-Messstationen und der meteorologischen Stationen. III

Abb. 6: *Landnutzungsklassifikation* des Untersuchungsgebietes *„La Guarena" aus dem Jahr 1999* zuzüglich der räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte-Messstationen und der meteorologischen Stationen III

Abb. 7: Landsat 7 ETM+ Szene des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* vom *10. Juni 2000* IV

Abb. 8: Digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"*, erstellt auf Basis der Phaseninformation des Tandem-Paares *9. / 10. Juni 1995* IV

Abb. 9: Digitales Höhenmodell des Gebietes *„La Guarena"* erstellt auf Basis der Phaseninformation des Tandem-Paares *2. / 3. September 1999* V

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Systemparameter des ERS-1/2 SAR-Systems 33
Tab. 4.1: Unterschiede in der Definition der amerikanischen und europäischen Korngrößenklassifikation 52
Tab. 5.1: Geomorphologische Untergliederung der physischen Einheiten im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*. 67
Tab. 6.1: Die ERS-1/2 InSAR Zeitreihe des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* 71
Tab. 6.2: Aufnahmezeitpunkte der *Landsat 5 TM Szenen* des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* 73
Tab. 6.3: Die Kanäle des Landsat 5 TM Sensors 73
Tab. 6.4: ERS-1/2 InSAR Zeitreihe des Untersuchungsgebietes *„La Guarena* 77
Tab. 6.5: Verknüpfung der Feuchtemessstationen mit den repräsentativen meteorologischen Stationen 79
Tab. 6.6: Spezifikation der Landsat 7 ETM+ Szene des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* 82
Tab. 6.7: Die Kanäle des Landsat 7 ETM + Sensors 82
Tab. 7.1: ERS 1/2 InSAR Datenprodukte der Untersuchungsgebiete *„Sevilla"* und *„La Guarena"* 84
Tab. 10.1: Messzeitpunkte der *ERS-1/2 InSAR Datenprodukte* im Vergleich zu den korrespondierenden in-situ Messungen 134
Tab. 10.2: Bodenhydraulische Eigenschaften der Bodenfeuchtemessstationen im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*, nebst der zu den Aufnahmezeitpunkten *1999* korrespondierenden in-situ Referenzfeuchtemessung 137
Tab. 10.3: Bodenphysikalische Eigenschaften der Messstationen im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* 138
Tab. 10.4: *Tandem-* und *Langzeit-Kohärenz-Information* der Feuchtemessstationen im Beobachtungsjahr *1999* 139
Tab. 10.5: Gemessener und modellierter (*GOM*) Rückstreuquerschnitt sowie *feuchtebedingter Signalwertebereich* der Messstationen $\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ und der *physischen Einheiten* $\langle\max(\Delta\sigma^0_{moist})\rangle$ im Beobachtungsjahr *1999* 144
Tab. 10.6: NDVI der Messstationen auf Basis der Landsat 7 ETM+ Szene des Aufnahmezeitpunktes *10. Juni 2000* 157
Tab. 10.7: Zusammenhang zwischen der räumlichen Verteilung von *Feuchte-Index* und *in-situ Messung* und Genauigkeit der Feuchtebeschreibung im System *volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3cm^{-3}]$. 163

Anhang

Tab. 1: MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* der Jahre *1995* und *1996* ___ V

Tab. 2: Detaillierter MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* des Jahres *1996* ___ VI

Tab. 3: Detaillierter MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* des Jahres *1996* ___ VII

Tab. 4: Detaillierter MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* des Jahres *1996* ___ VIII

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

α:	Inklinationswinkel [$Grad$];
α_{slope}:	Hangneigung [$Grad$];
A:	Rückstreufläche / Fläche [m^2];
A_{eff}:	effektive Antennenfläche [m^2];
b:	Breite des Aufnahmestreifens (Swath) [m];
B_a:	Bandbreite in Azimuth-Richtung [GHz];
B_{crit}:	kritische effektive, räumliche Basislinie [m];
B_{eff}:	effektive, räumliche Basislinie [m];
$BLAI$:	Brown Leaf Area Index;
B_r:	Bandbreite in Range-Richtung [GHz];
c:	Rückstreusignal;
Cl:	Tonanteil [%];
χ^2:	Parameter, der vegetationsbedingte Signalabschwächung beschreibt (Cloud Modell);
d:	Stengeldurchmesser [cm];
δx:	Kantenlänge der Rückstreufläche in Azimuth-Richtung [m];
δy:	Kantenlänge der Rückstreufläche in Range-Richtung [m];
δp:	Eindringtiefe [cm];
$\Delta\sigma^0{}_{moist}$:	feuchtebedingter Signalanteil [dB];
ε_r:	komplexe Dielektrizitätskonstante;
ε_r':	Permittivität, Realteil der komplexen Dielektrizitätskonstante;
ε_r'':	Abschwächungsfaktor, Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätskonstante;
$E\{\ \}$:	Erwartungswert;
f:	Frequenz [GHz];
f_o:	Trägerfrequenz [GHz];
ψ:	Phase des Radar-Signals;
$GLAI$:	Green Leaf Area Index;
γ:	Kohärenz;
$\gamma_{decorrel}$:	Gesamtdekorrelationsanteil;
$\gamma_{rotation}$	rotationsabhängiger Dekorrelationsanteil;
$\gamma_{spatial}$:	basislinienbedingter Dekorrelationsanteil;
γ_{SNR}	Dekorrelationsanteil durch Systemrauschen;

$\gamma_{temporal}$: temporaler Dekorrelationsanteil;

$\hat{\gamma}$: komplexer Korrelationskoeffizient;

$\hat{\gamma}_{long}$: Langzeit- Kohärenz;

$\hat{\gamma}_{rough}$: rauhigkeitsbedingter Kohärenz-Schwellwert;

$\hat{\gamma}_{tandem}$: Tandem-Kohärenz;

$\hat{\gamma}_{veg}$: vegetationsbedingter Kohärenz-Schwellwert;

h : Höhe [m];

k : Wellenzahl [cm^{-1}];

K : artenspezifische Konstante im Zusammenhang zwischen *NDVI* und *GLAI*;

l : Korrelationslänge [cm];

λ : Wellenlänge [m];

LAI : Leaf Area Index;

m : rms-Neigung;

$\max(\Delta\sigma^0_{moist})$: feuchtebedingter Signalwertebereich [dB];

m_v : volumetrischer Wassergehalt [$cm^2 cm^{-2}$];

$m_{\%field}$: Feuchte-Index mit der Einheit Feuchtegehalt in Prozent der Feuchte zum Zeitpunkt der Feldkapazität [$\%Feldkapazität$];

$m_{\%sat}$: Feuchte-Index mit der Einheit Feuchtegehalt in Prozent der Feuchte zum Zeitpunkt der Sättigung [$\%Sättigung$];

M : Abschwächungsfaktor aufgrund der optischen Dicke *(NDVI* und *GLAI)*;

M_S : scatterometerbasierter Feuchte-Index [%];

$NDVI$: *Normalized Difference Vegetation Index;*

NIR : Reflexion im nahen Infrarot;

NS : Niederschlagsmenge [mm];

θ : Einfallswinkel / Blickwinkel [$Grad$];

θ_{loc} : lokaler Einfallswinkel [$Grad$];

θ_0 nominaler Einfallswinkel [$Grad$];

pp : Polarisation;

P_r : empfangene Leistung [W];

PRF : Pulswiederholrate [GHz];

P_t : Sendeleistung [W];

r : Range-Entfernung [m];

$rmse$: rms-Fehler;

$\rho(x')$:	normalisierte Autokorrelationsfunktion;
R:	Korrelationskoeffizient;
R^2:	Bestimmtheitsmaß;
RED:	Reflexion im sichtbaren Rot;
s:	rms-Höhe [cm];
$stdev$:	Standardabweichung;
σ:	Rückstreuquerschnitt des Streuers [m^2];
σ_{area}:	Rückstreuquerschnitt eines Flächenstreuers [$m^2 m^{-2}$];
$\sigma^0{}_{dB}$:	logarithmierter, normierter Rückstreuquerschnitt dB;
σ^0:	(logarithmierter) normierter Rückstreuquerschnitt [$m^2 m^{-2}$] ([dB]);
$\sigma^0{}_{dry}$:	rauhigkeitsbedingter Signalanteil [dB];
$\sigma^0{}_{\mathrm{int}}$:	Rückstreuanteil aufgrund von Mehrfachstreuung zwischen Pflanzenkomponenten und der Bodenoberfläche [$m^2 m^{-2}$];
$\sigma^0{}_{soil}$:	Rückstreuanteil aufgrund von Oberflächenstreuung am Boden [$m^2 m^{-2}$] / [dB];
$\sigma^0{}_{veg}$:	rückgestreutes Signal einer vegetationsbedeckten Fläche [$m^2 m^{-2}$];
$\sigma^0{}_{vol}$:	Rückstreuanteil aufgrund von Volumenstreuung in der Vegetation [$m^2 m^{-2}$];
S:	Sensorposition;
Sa:	Sandanteil [%];
t:	Zeit [d];
T:	Temperatur [$Grad$];
$T_{\max}$:	Maximaltemperatur [$Grad$] / [K];
Γ_0:	Fresnel'sche Reflektivität im Nadir;
W:	Wertebereich;
z:	Rauhigkeitshöhe / Bodentiefe [cm].

1. Einleitung

Im Zuge des globalen Klimawandels sowie der Bevölkerungsexplosion des 21. Jahrhunderts gewinnt die Thematik *„Wassermanagement"* zunehmend an Bedeutung (vgl. IPCC; 2001). Insbesondere aride und semiaride Regionen zeigen sich dabei vom Problem der Wasserversorgung stark betroffen. So prognostiziert ein Grossteil der Klimaszenarien für diese labilen Regionen eine wachsende Frequenz und Intensität von Dürresituationen aufgrund einer höheren räumlichen und zeitlichen Variabilität der Niederschläge mit fortschreitendem Treibhauseffekt (vgl. IPCC; 2001). Die daraus resultierenden Probleme führen neben einem immensen volkswirtschaftlichen Schaden aufgrund von Ernteverlusten in der Landwirtschaft in labilen Regionen, wie z.B. dem Sahel, mitunter bis zu Engpässen in der Nahrungs- und Trinkwasserversorgung der Bevölkerung. Darüber hinaus bedingt die Zunahme der Häufigkeit von Dürresituationen eine Ausweitung des oftmals intensiv praktizierten Bewässerungsfeldbaus auf ursprünglich trockenfeldbaulich genutzten Flächen. Da die betroffenen Regionen eine geringe Grundwasserneubildungsrate aufweisen, führt die Intensivierung des Bewässerungsfeldbaus zu einer raschen Übernutzung der Grundwasseraquifäre, was die Wasserproblematik dieser Regionen weiter verschärft (vgl. IPCC; 2001). Um das Problem der Wasserversorgung zu lindern, ist die Entwicklung von Techniken nötig, die es ermöglichen zum einen Dürresituationen zu erfassen und zum anderen die Grundwassererneuerung abzuschätzen sowie den Erhalt der Grundwasserqualität zu gewährleisten. Die dadurch gewonnene Information ermöglicht somit die Steuerung einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung und ihre Anpassung an die veränderten Umweltbedingungen (vgl. IPCC; 2001).
Mit dem Fortschreiten des Klimawandels gewinnt jedoch das für aride und semiaride Gebiete typische Problem der Dürre auch für die ursprünglich gemäßigten Klimate der mittleren Breiten an Bedeutung, wie die langanhaltende Dürreperiode des Sommers *2003* in Mitteleuropa zeigte. Dies verdeutlicht, dass Lösungsansätze, die heute für die Linderung der Probleme von ariden und semiariden Gebieten konzipiert werden, in Zukunft auch in den mittleren Breiten relevant werden können.

Vergleichbar mit der Wasserknappheit steigt gleichfalls das Risiko verheerender Hochwasserereignisse nicht nur in den gemäßigten Breiten. So bewirkt der

klimawandelbedingte Anstieg der Meeresoberflächentemperaturen eine verstärkte Zyklonenaktivität in den Herbst- und Wintermonaten, wodurch die Häufigkeit und Intensität von Hochwasserereignissen auch in semiariden Gebieten zunimmt (vgl. IPCC; 2001).

Das wachsende Ausmaß der globalen Wasserproblematik unterstreicht die zunehmende Bedeutung von Dürre- und Hochwasserwarnsystemen, um Gefahrenpotenziale bereits frühzeitig zu erkennen und darauf reagieren zu können. Die entscheidende Voraussetzung für derartige Systeme ist die Kenntnis der räumlichen Bodenfeuchteverteilung von Flusseinzugsgebieten sowie deren Änderung über die Zeit. Indem die Bodenfeuchte das Abflussverhalten des Einzugsgebietes steuert besitzt sie einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserbildung bis hin zum Entstehen von Flutkatastrophen.

So ermöglicht die Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Bodenfeuchte die Abschätzung der rezenten Grundwasserneubildung, die als Informationsgrundlage für die Implementierung von reglementierenden Maßnahmen hinsichtlich der Grundwasserentnahme dienen kann.

Darüber hinaus gewährleistet die flächenhafte Bodenfeuchteinformation die Detektion von Gebieten, die aufgrund ihrer Bodeneigenschaften und der topographischen Lage effektiv zur Grundwasserneubildung beitragen. Beispielsweise signalisieren starke Abtrocknungsraten in Geländesenken eine hohe Infiltrationskapazität der Böden, die eine Grundvoraussetzung für die Grundwasserneubildung darstellt. Die gewonnene Information eignet sich damit als Grundlage für das Ausweisen von Wasserschutzzonen, um den Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln zu unterbinden und damit den Erhalt der Grundwasserqualität zu gewährleisten.

Darüber hinaus ist die Kenntnis der aktuellen Bodenfeuchteverteilung der grundlegende Parameter für eine Abschätzung potentieller Hochwasserrisiken.

Die Mikrowellenfernerkundung bietet aufgrund ihrer Sensibilität hinsichtlich einer Feuchteänderung sowie der wetter- und tageszeitenunabhängigen Aufnahmefähigkeit die Möglichkeit, die Bodenfeuchteverteilung eines Gebietes kontinuierlich und flächenhaft zu erfassen. Dabei weisen Fernerkundungsmethoden gegenüber konventionellen geostatistischen Methoden den deutlichen Vorteil auf, Parameterfelder direkt in einer zeit- und kostengünstigen Weise zu erfassen. Da

somit die Notwendigkeit einer generalisierenden Interpolation stichpunktartig erhobener in-situ Punktmessungen entfällt, ermöglicht die Fernerkundung die räumliche Beschreibung des Parameterfeldes. In Kombination mit der hydrologischen Modellierung besitzen daher Fernerkundungsmethoden ein hohes Potenzial, der Implementierung effektiver Dürre- und Hochwasserwarnsysteme zu dienen.

Trotz dieser Vorteile finden fernerkundungsbasierte Bodenfeuchteprodukte bis zum heutigen Tag nur in seltenen Fällen in der hydrologischen Modellierung als Input-Parameter, Kalibrierungs- oder Validierungsgrundlage Verwendung. Der Grund für das geringe Interesse seitens der Hydrologie ist die Tatsache, dass sich ein Großteil der bislang entwickelten Fernerkundungsverfahren zur Bodenfeuchtebeschreibung aufgrund ihrer hohen Komplexität und dem damit verbundenen hohen Aufwand an Rechenzeit für eine operationelle Nutzung als ungeeignet erwiesen.

Zudem führten stark limitierte Gültigkeitsbereiche und eine Abhängigkeit von in-situ Messungen für eine Modellkalibrierung dazu, dass oftmals ausschließlich Aussagen bezüglich einzelner Testflächen getroffen werden konnten. Auch verhinderte das Fehlen geeigneter satellitengestützter Sensorsysteme eine Operationalisierung vielversprechender, auf multipolarimetrischen und multifrequenten Daten basierender Methoden, sowie eine detaillierte Bodenfeuchteerfassung in einer hydrologisch sinnvollen zeitlichen Auflösung. Mauser et al. (1998) beziffern in diesem Zusammenhang eine für hydrologische Fragestellungen notwendige zeitliche Auflösung von einem Tag bis zu einer Woche. Die Systemkonfiguration bisher verfügbarer Sensoren beschränkte die SAR-basierte Feuchteerfassung jedoch auf sehr große Zeitintervalle, wie z.B. das ERS-1/2 SAR-System mit einem Intervall von 35 Tagen. Diese geringe zeitliche Auflösung gewährleistet somit nur eine stichpunktartige Beschreibung des hochdynamischen Verhaltens der zeitlichen Feuchtevariation.

Diese systembedingten Einschränkungen bedingen, dass nur in sehr wenigen Fällen eine Brücke zwischen Fernerkundung und Hydrologie geschlagen wurde. Unter den Ausnahmen sind in diesem Zusammenhang Entekhabi et al. (1994), Mauser et al. (1997), Bach et al. (1998) und Strasser et al. (1999) zu nennen, die Fernerkundungsdaten erfolgreich für die Parametrisierung und Validierung ihrer hydrologischen Modelle verwendeten.

Um diese Lücke zu schließen, besteht die Notwendigkeit, einfache und robuste Verfahren zu entwickeln, die für eine operationelle Nutzung geeignet sind und eine

flächenhafte Beschreibung der Bodenfeuchte im Skalenbereich von Flusseinzugsgebieten ermöglichen.

Die verbesserten Eigenschaften aktueller und geplanter satellitengestützter Sensorsysteme, welche die Fähigkeit besitzen, auf Basis breiter Aufnahmestreifen (*Wide Swath- & ScanSAR-Modi*) mit einer Aufnahmefrequenz von z.T. weniger als eine Aufnahme pro Woche eine deutlich höhere zeitliche Auflösung zu realisieren, (z.B. *ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR, RADARSAT-2*) bieten darüber hinaus die Möglichkeit, den limitierenden Faktor der geringen temporalen Auflösung bisheriger SAR-basierter Produkte zu überwinden und somit eine wertvolle Informationsquelle für die Hydrologie zu schaffen.

1.1. Wissenschaftliche Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Studie ist die Entwicklung eines Verfahrens, das auf Basis von InSAR Daten die großräumige Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variation von Bodenfeuchtemustern in ariden und semiariden Flusseinzugsgebieten ermöglicht. Grundlage für die Verfahrensentwicklung bildeten dabei InSAR-Daten des *ERS-1/2 SAR Systems*. Um als Kalibrierungs- oder Verifizierungsgrundlage für die Belange der hydrologischen Modellierung von Interesse zu sein, ist darauf zu achten, dass das Verfahren für die praktische Anwendung in Hinblick auf eine mögliche Operationalisierung geeignet ist, um eine kontinuierliche Generierung von Bodenfeuchtefeldern zu gewährleisten.

Die Zielsetzung einer flächenhaften Erfassung der Bodenfeuchteverteilung von kompletten Flusseinzugsgebieten erfordert eine Unabhängigkeit des Verfahrens von in-situ Messungen. Dies bedingt, dass die Erfassung zeitlich veränderlicher Input-Parameter ausschließlich auf Basis der Fernerkundung zu realisieren ist.

Um eine Operationalisierung zu ermöglichen, ist auf die Entwicklung eines rechenzeitgünstigen, stabilen Verfahrens zu achten. Dies erfordert eine einfache, robuste Methode, die auf Basis eines Minimums an Input-Information eine effektive Beschreibung der Bodenfeuchtevariation über lange Zeiträume gewährleistet.

Wie die Erläuterung zum Stand der Forschung in Kapitel 2. verdeutlicht, ist auf Basis der zur Verfügung stehenden singlefrequenten und singlepolarimetrischen Information des ERS-1/2 SAR-Systems die Realisierung der erläuterten Zielsetzung

ausschließlich mit Hilfe eines empirischen Change-Detection Ansatzes zu ermöglichen, der die räumliche und zeitliche Variation der Bodenfeuchteverteilung in Form eines Feuchte-Index qualitativ beschreibt.

Somit definieren sich die der Studie zugrundeliegenden Hypothesen wie folgt:

1) Die räumliche und zeitliche Verteilung der Bodenfeuchte von kompletten Flusseinzugsgebieten kann mit Hilfe von SAR-Systemen in einer hohen räumlichen Auflösung auf Basis eines einfachen Change-Detection Ansatzes sensibel beschrieben werden.
2) Es ist möglich, dies unabhängig von in-situ Messungen ausschließlich auf Basis von Fernerkundungsdaten zu realisieren.
3) Die Kohärenz-Information von C-Band InSAR-Daten eignet sich für die Erfassung geeigneter vegetationsfreier bzw. biomassearmer Flächen für eine einflussarme Feuchtebeschreibung sowie für die Überwachung der Stabilität der Oberflächeneigenschaften über die Zeit. Grundlage dafür ist eine Sensibilität der Kohärenz hinsichtlich des Biomasseaufkommens von Vegetation sowie einer Veränderung der Oberflächenrauhigkeit im Zentimeterbereich.

1.2. Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Studie gliedert sich wie folgt: Im Anschluss an die Einleitung und die Definition der wissenschaftlichen Zielsetzung in Kapitel 1. erfolgt in Kapitel 2. eine Beschreibung des Forschungstandes hinsichtlich der Bodenfeuchteerfassung mit Radar-Systemen. Dabei wird anhand der Vor- und Nachteile der bisherigen Verfahren ihre Eignung für die Realisierung der Zielsetzung der vorliegenden Studie diskutiert. Kapitel 3. erläutert neben den allgemeinen Radar-Grundlagen das interferometrische Messprinzip. Aufgrund der entscheidenden Bedeutung für die vorliegende Studie erfolgt dabei eine eingehende Betrachtung des Wesens der Kohärenz. Da die Kenntnis der Streuprozesse einer elektromagnetischen Welle an natürlichen Oberflächen die essentielle Grundlage für Fernerkundungsmethoden darstellt, beschreibt Kapitel 4. eingehend die physikalischen Prozesse und

Parameter, welche das Rückstreuverhalten bedingen. Dabei wird insbesondere Bezug auf die entscheidenden Einflussfaktoren für die Bodenfeuchteerfassung genommen. Während Kapitel 5. die physisch-geographischen Gegebenheiten der beiden semiariden Untersuchungsgebiete der Studie *„Sevilla"* und *„La Guarena"* beschreibt, erläutert Kapitel 6. gebietsspezifisch die Datengrundlage und Referenzdaten, die für die Kohärenz- und Intensitätsanalysen (*„Sevilla"*) sowie für die Anwendung und Validierung des Verfahrens (*„La Guarena"*) dienten. Kapitel 7. fasst die Datenprozessierung und -aufbereitungschritte bezüglich der InSAR- und optischen Daten zusammen, die nötig wurden, um eine gemeinsame Basis für eine unbeeinflusste Datenanalyse und -vergleich zu gewährleisten. Kapitel 8. beschreibt das in der Studie verwendete Verfahren zur Erfassung eines Feuchte-Index auf Basis der ERS-1/2 InSAR Daten. Die im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* durchgeführten Kohärenz- und Intensitätsanalysen, welche die Grundlage für die Feuchte-Index-Erfassung bilden, erfolgen Kapitel 9.. Kapitel 10. erläutert die Anwendung des Verfahrens auf das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* und beschreibt gleichzeitig die Validierung auf Basis eines Datenvergleichs zwischen fernerkundlich erfasstem Feuchte-Index und korrespondierenden in-situ Bodenfeuchtemessungen. Die Diskussion und Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt in Kapitel 11., während Kapitel 12. einen Ausblick hinsichtlich des Potenzials zukünftiger Sensorsysteme für die zeitlich hochaufgelöste Bodenfeuchteerfassung gibt.

2. Radar-basierte Bodenfeuchteerfassung - Stand der Forschung

Rasch nach dem Beginn der umweltbezogenen Mikrowellenfernerkundung in den 70er Jahren des 19. Jahrhunderts wurde die herausragende Bedeutung von *aktiven* und *passiven Mikrowellensensoren* für die *Erfassung der Bodenfeuchte* erkannt. Grundlage dafür bildet die starke Variation der *dielektrischen Eigenschaften* eines Bodens in Abhängigkeit seines Wassergehaltes ($2{,}5 \leq \varepsilon' \leq 25$), die sensibel mit Hilfe der Mikrowellensensoren gemessen werden kann.

Da zusätzlich zu den dielektrischen Eigenschaften des Materials weitere *sensor-* und *oberflächenspezifische Parameter*, wie *Aufnahmegeometrie, Wellenlänge, Polarisation, Topographie, Vegetationsbedeckung, Oberflächenrauhigkeit* und *Bodentextur,* das Rückstreuverhalten beeinflussen, verhindert eine Signalmehrdeutigkeit die direkte Erfassung des Feuchtegehaltes.

Aufgrund dieser Tatsache wurden bis zum heutigen Zeitpunkt eine Vielzahl von Ansätzen entwickelt, deren Ziel es war, die Isolierung des Feuchteeinflusses zu ermöglichen und damit qualitative und quantitative Aussagen bezüglich des Bodenfeuchteaufkommens treffen zu können.

Aufgrund einer fehlenden Relevanz für die Belange der vorliegenden Studie wird von einer Berücksichtigung von Verfahren auf Basis passiver Mikrowellensensoren abgesehen, so dass im Folgenden ausschließlich Ansätze für aktive Radar-Systeme Erläuterung finden. Diese Verfahren können in folgende Gruppen untergliedert werden:

a) **Theoretische Modelle**
b) **Semi-empirische Modelle**
c) **Empirische Verfahren**

Der folgende Abschnitt beschreibt die Eigenschaften der erwähnten Ansätze anhand ausgewählter Beispiele und diskutiert ihre Eignung für die Realisierung der in Kapitel 1.1. erläuterten Zielsetzung der Arbeit.

a) Theoretische Modelle

Theoretische Modelle, sog. *elektromagnetische Rückstreumodelle,* beschreiben das Rückstreuverhalten von Oberflächen in Abhängigkeit der bekannten *dielektrischen Eigenschaften,* der *Oberflächenrauhigkeit und* der *Sensorkonfiguration.* Indem sie die physikalischen Prozesse mathematisch formulieren, die beim Auftreffen einer elektromagnetischen Welle auf eine Oberfläche stattfinden, liefern diese Modelle einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Prozesses der Rückstreuung. Darüber hinaus gewährleistet ihre allgemein gültige Form einen uneingeschränkten Transfer auf unterschiedliche Untersuchungsgebiete.

Um auf Basis des gemessenen Rückstreuverhaltens eine Aussage bezüglich der Bodenfeuchte treffen zu können, bedarf es der Invertierung der Modelle. Jedoch behindert der nicht-lineare Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Rückstreuung und die zusätzliche Berücksichtigung des Rauhigkeitseinflusses die Invertierung der Modelle, so dass eine direkte analytische Lösung oftmals nicht möglich ist (vgl. Bindlish & Barros, 2000). Um trotzdem die Invertierung zu realisieren, finden sowohl numerische Verfahren Verwendung als auch die Parametrisierung einzelner Modellvariablen mit Hilfe von *in-situ Messungen* (z.B. Bodenrauhigkeit).

Eines der gebräuchlichsten *elektromagnetischen Rückstreumodelle* ist das bistatische *Kirchhoff'sche Modell* sowie dessen monostatische Approximationen *Geometric Optics Model (GOM)* und *Physical Optics Modell (POM)* (vgl. Ulaby et al., 1982). Die Modelle *GOM* und *POM* wurden als Skalar-Approximationen zur Vereinfachung der Anwendung aus dem komplexen bistatischen *Kirchhoff'schen Modell* abgeleitet. Sie beschreiben das Rückstreuverhalten von Oberflächen, deren Oberflächenhöhenvariation größer als die verwendete Wellenlänge ist und sind für die Beschreibung unterschiedlicher Rauhigkeitsbereiche geeignet: Während das *POM* die Streuprozesse an Oberflächen im *mittleren Rauhigkeitsbereich* nahe der Wellenlänge beschreibt, wurde das *GOM* für die Beschreibung von *rauen Oberflächen* entwickelt. Da die Oberflächenrauhigkeit natürlicher Böden im Mittel in einer Größenordnung von wenigen Zentimetern liegt, dienen beide Modelle hauptsächlich der fernerkundungsbasierten Feuchtebeschreibung auf Basis von kurzen Wellenlängen des X- und C-Bandes.

Die Beschreibung des Rückstreuverhaltens von Oberflächen mit geringer Rauhigkeit erfolgt häufig auf Basis des *Small Perturbation Models (SPM)* (vgl. Ulaby et al., 1982). Voraussetzung für die Anwendung des Modells ist, dass die Oberflächenhöhenvariation mit nur ca. 5% deutlich geringer als die verwendete Wellenlänge ist. Diese Prämisse führt im Fall natürlicher Oberflächen zu einer überwiegenden Anwendung im Bereich großer Wellenlängen des L- und P-Bandes.

Die eingeschränkte Gültigkeit der bisher genannten Modelle bedingt, dass in einem mittleren Rauhigkeitsbereich, den ein Großteil natürlicher Flächen aufweist, keine Aussage bezüglich des Rückstreuverhaltens getroffen werden kann (vgl. Oh et al., 1992). Um diese Lücke zu schließen und mit Hilfe nur eines Modells über einen breiten Rauhigkeitsbereich das Rückstreuverhalten beschreiben zu können, entwickelte Fung et al. (1992) das *Integral Equation Model (IEM)*. Es erlaubt die Verwendung verschiedener Autokorrelationsfunktionen (u.a. exponentiell und gauß-förmig), wodurch eine umfassende Beschreibung der Frequenzbereiche möglich ist. Aufgrund seiner geringen Beschränkungen bei einer gleichzeitig hohen Genauigkeit in der Feuchtebeschreibung fand das *IEM* breite Beachtung (vgl. Bastiaanssen et al.; 1994; LeToan et al., 1993; Su et al., 1995).
Trotz seiner Vorteile und diversen Versuchen, das Modell zu vereinfachen (siehe: Chen et. al, 2000; Hsieh et al., 1997; Wu et al., 2001), erweist sich auch das *IEM* für die praktische Anwendung auf Bilddaten augrund seiner Komplexität und der hohen Rechenzeit deutlich beschränkt (vgl. Narayanan & Hirsave, 2001). Auch konnte trotz der Verwendung verschiedener Autokorrelationsfunktionen das Problem der Rauhigkeitsbeschreibung von natürlichen Oberflächen nicht gänzlich gelöst werden.

Grundsätzlich erweist sich die Beschreibung des Rückstreuverhaltens von natürlichen Oberflächen in einem Modell als äußerst schwierig. Die große Variationsbreite der Eigenschaften von natürlichen Flächen erfordert die Definition von vereinfachenden Annahmen, welche den Gültigkeitsbereich der Modelle stark beschränken (vgl. Bindlish & Barros, 2000; Engman & Chauhan, 1995; Fung, 1994). So wurde bislang keine zufriedenstellende Lösung für die Parametrisierung des Rauhigkeitsverhaltens von natürlichen Oberflächen gefunden. Die häufig verwendeten *Autokorrelationsfunktionen*, welche die Variation der Oberflächenhöhe über die Parameter *rms-Höhe* s und *Korrelationslänge* l beschreiben, erwiesen sich

als nur beschränkt geeignet, um das Frequenzspektrum der Rauhigkeitsvariation von natürlichen Oberflächen zu beschreiben (vgl. Le Toan et al., 1998).

So besteht Uneinigkeit hinsichtlich der Frage, welche Form der *Autokorrelationsfunktion* für die Beschreibung der horizontalen Rauhigkeit am besten geeignet ist. *Gauß'sche* und *exponentielle Funktionen* wurden in diesem Zusammenhang diskutiert. Ogilvy & Foster (1989) wiesen darauf hin, dass viele Messergebnisse beide Verhaltensweisen gleichzeitig zeigen, indem nahe des Ursprungs oftmals ein exponentielles Verhalten zu beobachten ist, das sich mit wachsender Distanz einer gauß'schen Funktion annähert.

Auch bestehen hinsichtlich der optimalen Länge des Messprofils zur Messung der Oberflächenrauhigkeit im Feld unterschiedliche Meinungen. So zeigten Oh & Kay (1998), dass die Variabilität der Korrelationslänge l mit wachsender Profillänge zunimmt, jedoch kurze Profile zu einer Unterschätzung von l führen.

Darüber hinaus beobachteten Davidson et al. (2000) eine Korrelation zwischen der rms-Höhe s und der Korrelationslänge l, ein Verhalten, das nicht mit der zugrundeliegenden uniskalaren Rauhigkeitstheorie in Einklang zu bringen ist. Gemäß Beckmann & Spizzichino (1963) basiert diese auf einer Unabhängigkeit beider Parameter voneinander.

Um die Rauhigkeitsbeschreibung zu verbessern, wurden in jüngster Vergangenheit alternative Rauhigkeitsmodelle vorgeschlagen, die auf einer *multiskalaren Rauhigkeitsbeschreibung* basieren (siehe: Keller et al.; 1987; Shepard et al., 1995; Le Toan et al. 1998; Mattia & Le Toan; 1999). So empfahlen u.a. Davidson et al. (2000) das Frequenzspektrum natürlicher Oberflächen mit Hilfe fraktaler Oberflächen zu beschreiben. Jedoch zeigte sich auch hier eine Abhängigkeit der Rauhigkeitsparameter von der verwendeten Messlänge des Profils. Darüber hinaus erschwerte die Komplexität der Rauhigkeitsmodelle erneut die Invertierung der Rückstreumodelle (vgl. Zibri et al., 2002).

Gemäß Le Toan et al. (1998) erweist sich bis heute die Parametrisierung der Oberflächenrauhigkeit als begrenzender Faktor für die Genauigkeit der Feuchtigkeitsableitung mit Hilfe von physikalischen Rückstreumodellen.

Aufgrund der erläuterten Einschränkungen und der Abhängigkeit von in-situ Messungen erweisen sich theoretische Modelle für die Nutzung in der Praxis ungeeignet und blieben daher auf experimentelle Studien und einzelne Testflächen beschränkt.

b) Semi-empirische Modelle

Semi-empirische Modelle, sog. *physikalisch basierte Modelle*, sind Approximationen an *theoretische Modelle*, die mit Hilfe empirisch ermittelter Zusammenhänge vereinfacht oder erweitert wurden, um eine Invertierung zu ermöglichen und / oder für einen breiteren Einsatzbereich Gültigkeit zu erlangen. Die Vereinfachung erfolgt dabei oftmals durch eine Substitution von ursprünglich benötigten Modellparametern durch empirische Zusammenhänge. Oftmals werden semi-empirische, wie auch empirische Modelle auf Basis des beobachteten Rückstreuverhaltens bei einer bekannten Variation der Feuchte- und Rauhigkeitszustände mit Hilfe von bodengestützten Scatterometermessungen entwickelt (siehe: Oh et al., 1992; Dubois et al., 1995).

Die Parametrisierung der Erdoberfläche für die Bodenfeuchtemodellierung realisieren diese Verfahren auf unterschiedliche Weise: während eine Gruppe von Modellen *in-situ Messungen* für Beschreibung der Bodeneigenschaften benötigt und damit wiederum auf einzelne Testflächen beschränkt ist (siehe: Shi et al. 1997; van Oevelen & Hoekman, 1999), verwendet eine zweite Gruppe *multipolarimetrische* und / oder *multifrequente Daten*, um auf Basis der erweiterten Informationsquellen die Modellinvertierung zu ermöglichen und gleichzeitig eine Aussage bezüglich der Bodenfeuchte und der Bodenrauhigkeit treffen zu können (siehe: Oh et al., 1992; Bindlish & Barros, 2000).

Der Vorteil der letztgenannten Ansätze ist die Tatsache, dass die Modelle mitunter ausschließlich auf Basis von Fernerkundungsdaten angewendet werden können, wodurch eine Bodenfeuchtebeschreibung über große Gebiete möglich ist. Da bis zum Start von *ENVISAT ASAR* operationelle multipolarimetrische und / oder multi-frequente Sensorkonfigurationen fehlten, blieb die Anwendung dieser Modelle bislang auf experimentelle flugzeug- oder shuttlegestützte Systeme beschränkt. Mit der zukünftigen Verfügbarkeit geeigneter satellitengestützter Sensorsysteme, wie *ENVISAT ASAR*, sowie weiterer geplanter Sensorgenerationen, wie *ALOS PALSAR* , *RADARSAT-2* oder *TerraSAR-X* und *TerraSAR-L* ist anzunehmen, dass semi-empirische Verfahren in Hinblick auf eine operationelle Nutzung erheblich an Bedeutung gewinnen werden.

Zur Gruppe der *semi-empirschen Modelle,* deren Parametrisierung auf *in-situ Messungen* basiert, zählt die vereinfachte Form des *IEM* von Shi et al. (1997). Mit Hilfe der Erkenntnisse aus einer Sensitivitätsanalyse, die auf den Ergebnissen des *IEM* in der Vorwärtsmodellierung basierte, ermittelten Shi et al. (1997) sog. *„best fitting"* Funktionen, welche das beobachtete einfallswinkelabhängige Rückstreuverhalten in Beziehung zur Dielektrizitätskonstante und Oberflächenrauhigkeit setzen. Das Modell besitzt Gültigkeit für L-Band Daten und einen Einfallswinkelbereich von $30° \leq \theta \leq 60°$.

Dahingegen erweiterten Bindlish & Barros (2000) das *IEM* auf die Nutzung multifrequenter (L-, C-, X-Band) und multipolarimetrischer Daten (HH, VV) und erzielten damit eine Beschreibung der Bodenfeuchte von brachliegenden Flächen mit einem geringen rms-Fehler von $rmse = 0{,}034 cm^3 cm^{-3}$.

Auch das Modell von Oh et al. (1992) zählt zur Gruppe der semi-empirischen Modelle. Das *Oh-Modell* basiert auf dem *SPM* und ermöglicht über die Verwendung multipolarimetrischer Daten (HH, VV, HV) die zeitgleiche Beschreibung der Bodenfeuchte und Oberflächenrauhigkeit von brachliegenden Böden. Mit einem rms-Fehler von $rmse = 0{,}034 cm^3 cm^{-3}$ lieferte das Modell sehr gute Ergebnisse in der Bodenfeuchtebeschreibung (vgl. Oh et al., 1992).

Magagi & Kerr (2001) verwendeten eine vereinfachte Version des Oh-Modells für eine Bodenfeuchtebeschreibung im Sahelraum. Unter Berücksichtigung der Vegetationsbedeckung charakterisierten sie die Oberflächenrauhigkeit in der Trockenzeit empirisch auf Basis des Rückstreusignals des ERS-Scatterometers. Grundlage für diese Vorgehensweise ist die Annahme, dass während der Trockenzeit der fernerkundlich erfasste Oberflächenhorizont gänzlich austrocknet und damit räumliche Signalvariationen auf brachliegenden Flächen in erster Näherung ausschließlich durch eine Variation der Bodenrauhigkeit verursacht werden. Damit umgeht das Verfahren die problembehaftete Parametrisierung der Bodenrauhigkeit im Feld, wodurch der Fehler in der Feuchtebeschreibung reduziert wird. Dieser Ansatz wurde u.a. ebenfalls von Wagner et al. (1999a, b, c) und Moran et al. (2000) für die Charakterisierung der Rauhigkeit verwendet.

Aufgrund der empirischen Entwicklungskomponente sind semi-empirische Verfahren in ihrer Übertragbarkeit beschränkt (vgl. Dawson et al., 1997; Hajnsek et al. 1999). So ist der Transfer mit einem deutlichen Genauigkeitsverlust gekoppelt.

c) Empirische Verfahren

Empirische Modelle basieren auf einem beobachteten Zusammenhang zwischen einer bekannten Konstellation von Oberflächenparametern und dem daraus resultierenden Rückstreuverhalten. Voraussetzung für die Entwicklung dieser Verfahren sind umfangreiche Datensätze, bestehend aus in-situ Messungen (*Bodenfeuchte, Oberflächenrauhigkeit, Vegetationsbedeckung*) und räumlich und zeitlich korrespondierenden Messungen der Rückstreuintensität, um einen statistisch aussagekräftigen Zusammenhang zwischen den Variablen zu gewährleisten. Unter der Voraussetzung unveränderter Umweltbedingungen ermöglichen diese Verfahren die Erfassung der Bodenfeuchte für folgende Aufnahmezeitpunkte auf Basis des ermittelten Zusammenhanges.

Ein Vorteil vieler empirischer Verfahren ist, dass eine Parametrisierung der Oberflächenrauhigkeit umgangen wird, indem ein direkter Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit und Rückstreusignal Verwendung findet.

Neben einfachen *linearen* und *nicht-linearen Regressionsmodellen* (siehe: Demircan et al., 1993; Dobson et al., 1985; 1993; Mauser et al., 1994 & 1995; von Poncet et al., 1993; Rombach et al., 1993; Wang & Schmugge, 1980) wurden gleichfalls komplexe multivariate Ansätze entwickelt, die zusätzlich den Einfluss der Rauhigkeit und / oder Vegetationsbedeckung auf das rückgestreute Signal als Modellparameter mit berücksichtigen.

Das Modell von Dubois et al. (1995) ist ein *multivariates empirisches Modell*, das für einen Frequenzbereich von $1{,}5 \leq f \leq 11GHz$ entwickelt wurde. Die Verwendung multipolarimetrischer Daten der Ko-Polarisation in einem Einfallswinkelbereich zwischen $30° \leq \theta \leq 60°$ ermöglicht die zeitgleiche Ableitung der *Bodenfeuchte* und *Oberflächenrauhigkeit* auf vegetationsbedeckten Flächen bis zu einem *NDVI* von $NDVI \leq 0{,}4$. Der Gültigkeitsbereich ist auf ein Rauhigkeitsintervall von $0{,}3 \leq s \leq 3cm$ begrenzt. Der Vorteil des Modells ist seine einfache Handhabung sowie die Unabhängigkeit von in-situ Messungen. Mit einem rms-Fehler von weniger als $rmse = 0{,}042cm^3cm^{-3}$ erzielten Dubois et al. (1995) eine hohe Genauigkeit in der Bodenfeuchtebeschreibung. Nachteilig erweist sich die Tatsache, dass eine topographiebedingte Einfallswinkelvariation in der Modellentwicklung nicht berücksichtigt wurde, so dass eine großflächige Erfassung der Bodenfeuchte-

verteilung im Skalenbereich von Einzugsgebieten nicht möglich ist (vgl. Dubois et al., 1995).
Auch Zibri und Dechambre (2002) entwickelten ein lineares empirisches Modell um die Bodenfeuchte und Oberflächenrauhigkeit zeitgleich auf Basis von C_{HH} Radardaten beschreiben zu können. Im Gegensatz zu unterschiedlichen Polarisationszuständen ermöglichten sie dieses Vorhaben durch die Verwendung variierender Einfallswinkelbereiche ($\theta = 39°$ / $\theta = 23°$). Das auf die Sensorkonfiguration von *ESAR ASAR* und *RADARSAT-1 (2)* konzipierte Verfahren zeigte mit einem rms-Fehler von $rmse_{rough} = 0{,}8mm$ in der Rauhigkeitsbeschreibung auf Flächen mit geringer Rauhigkeit und einer Feuchtebeschreibung mit einem Fehler von $rmse = 0{,}04cm^3cm^{-3}$ gute Ergebnisse.

Auch Verfahren, die eine Bodenfeuchtebeschreibung mit Hilfe von *neuronalen Netzen* realisieren, zählen zur Gruppe der empirischen Verfahren.
Dawson et al. (1997) untersuchten diesbezüglich die Eignung neuronaler Netze und erzielten dabei eine Bodenfeuchtebeschreibung mit einer Genauigkeit von $rmse = 0{,}03 - 0{,}04cm^3cm^{-3}$. Auch Meade et al. (1999) verwendeten ein neuronales Netz für die Erfassung der räumlichen Bodenfeuchteverteilung. Sie ermittelten dahingegen eine geringe Übereinstimmung der resultierenden räumlichen Feuchteverteilung mit den Modellierungsergebnissen eines hydrologischen Modells, die sie mit einer unzureichenden Anzahl und Qualität der Trainingsparameter erklärten.

Die problemfreie Invertierung und die geringe Rechenzeit machen empirische Verfahren interessant für den Gebrauch in der Praxis. Jedoch bedingt die empirische Entstehungsgeschichte der Verfahren, dass ihre Übertragbarkeit auf andere Gebiete stark eingeschränkt ist und oftmals zu einem erheblichen Verlust der Genauigkeit führt. Dies verdeutlicht die Studie von Neusch and Sties (1999), welche bei der Übertragung des Modells von Dubois et al. (1995) nur mäßige Ergebnisse erzielten. Während die Rauhigkeitsbeschreibung im L- und C-Band mit hoher Genauigkeit erfolgte, ermittelten Neusch and Sties (1999) in der Bodenfeuchteerfassung eine starke Abweichung von den tatsächlichen Feuchtebedingungen. Dabei erwies sich

das L-Band mit einem rms-Fehler von $rmse = 0{,}140 cm^3 cm^{-3}$ als deutlich stärker beeinträchtigt, als das C-Band mit $rmse = 0{,}074 cm^3 cm^{-3}$.
Ein vergleichbares Ergebnis lieferte die Studie von Hajnsek et al. (1999) mit einer geringen Korrelation zwischen modellierter und gemessener Bodenfeuchte im Fall der Modellübertragung. Dahingegen ist im Fall der *univariaten Regressionsmodelle* sowie *trainierter neuronaler Netze* jeglicher Transfer gänzlich ausgeschlossen, da der ermittelte Zusammenhang ausschließlich für identische Umweltbedingungen Gültigkeit besitzt. Darüber hinaus ist ihre Anwendung aufgrund der Abhängigkeit von in-situ Messungen erneut auf einzelne Testflächen beschränkt.

Diese Beschränkungen entfallen im Fall von *Change-Detection Ansätzen*, die gleichfalls zu den empirischen Verfahren zählen. *Change-Detection Ansätze* basieren auf der Analyse von Zeitreihen der Rückstreuintensität und beschreiben die zeitliche Veränderung eines Oberflächenparameters über den Änderungsbetrag des beeinflussten Signals im bekannten Wertebereich. Somit erfolgt eine qualitative Beschreibung des beobachteten geophysikalischen Parameters in relativen Einheiten in Bezug auf seine Extremwerte. Der Vorteil dieser Verfahren ist die Unabhängigkeit von in-situ Messungen, die das Problem der Rauhigkeits-parametrisierung eliminiert und eine flächenhafte Aussage über große Gebiete gewährleistet. Darüber hinaus begünstigt die einfache Handhabung und geringe Rechenzeit die Nutzung der Verfahren in der Praxis.

Ein derartiges System wurde von Wagner et al. (1999a, b, c) entwickelt, das mit Hilfe eines auf ERS-Scatterometerdaten basierenden Change-Detection Ansatzes die Feuchtebeschreibung mit einer hohen zeitlichen Auflösung ermöglicht. Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass das Signalminimum einer mehrjährigen Intensitätszeitreihe die Rauhigkeitsverhältnisse eines Gebietes zu einem Trockenzeitpunkt charakterisiert und diese Information für die Erfassung der Oberflächenfeuchtevariation für folgende Aufnahmezeitpunkte verwendet werden kann. Die Beschreibung der Feuchtesituation erfolgt in Form des *Feuchte-Index* M_S in relativen Einheiten, in dem die gewonnene rauhigkeitskorrigierte Signalinformation in Beziehung zum *feuchtebedingten Signalwertebereich* der betrachteten Auflösungszelle gesetzt wird. Dieser resultiert aus der Differenz zwischen dem *Signalmaximum* und *-minimum* einer mehrjährigen Zeitreihe.

Das Verfahren nutzt den großen Einfallswinkelbereich das ERS Scatterometers ($18° \leq \theta \leq 59°$) als erweiterte Informationsquelle, um den Einfluss des saisonalen Vegetationswachstums auf das Rückstreuverhalten einer Auflösungszelle zu korrigieren, wodurch eine Feuchtebeschreibung für unterschiedlich mächtige Bodenhorizonte mit einem geringen mittleren Fehler von ca. $rmse = 0{,}05 cm^3 cm^{-3}$ ermöglicht wird. Die allgemeine Gültigkeit des Ansatzes konnte aufgrund einer hohen Übereinstimmung der fernerkundlich erfassten Bodenfeuchte mit Niederschlagsdaten und in-situ Messungen für diverse Klimazonen nachgewiesen werden (vgl. Wagner, 1999a, b, c; Wagner & Skipal, 2000).

Moran et al. (2000) nutzten die synergistischen Effekte zwischen optischen Sensoren und SAR-Systemen, um auf Basis eines *Change-Detection Ansatzes* die Bodenfeuchte in vegetationsbedeckten semiariden Gebieten zu erfassen. Ähnlich wie Wagner et al. (1999a, b, c) und Magagi & Kerr (2001) eliminierten sie den Einfluss der Rauhigkeit durch die Subtraktion der Rückstreuintensität eines Trockenzeitpunktes, um Aussagen hinsichtlich der Bodenfeuchte auf Basis der ERS-2 Rückstreuintensität treffen zu können. Den Einfluss biomasserreicher Vegetation auf den rauhigkeitskorrigierten Signalanteil berücksichtigten Moran et al. (2000) über einen statistischen Zusammenhang zwischen dem aus *Landsat TM Daten* abgeleiteten *Green Leaf Area Index (GLAI)* und dem rauhigkeitskorrigierten Signalanteil.

2.1. Berücksichtigung des Einflusses einer Vegetationsbedeckung

Auch der Einfluss der Vegetationsbedeckung auf die Bodenfeuchteerfassung wird in der Literatur auf unterschiedliche Weise berücksichtigt. Ähnlich der Verfahren zur Beschreibung der Bodenfeuchte gliedern sich auch hier die Verfahren zur Beschreibung des Rückstreuverhaltens von Vegetation in *theoretische, semi-empirische* und *empirische Modelle*.

a) Theoretische Vegetationsmodelle

Die komplexen physikalischen Vegetationsmodelle beschreiben die Vegetationsdecke meist als homogene Schicht mit einer spezifizierten Höhe, die in ihrem Volumen zufällig verteilte Streuer enthält. Zusätzlich zu diesen Einschicht-Modellen

wurden gleichfalls Zweischicht-Modelle entwickelt, welche die Vegetationsdecke in einen Stammraum und eine durch Blätter und Zweige charakterisierte Schicht unterteilen und getrennt behandeln. Da beide Modelltypen in der Regel eine Vielzahl von Pflanzenparameter für die Modellierung benötigen, ist ihre praktische Anwendbarkeit stark beschränkt (siehe: Eom & Fung, 1984; Karam et. al., 1992; Saatchi et al., 1994; Toure et al.; 1994; Ulaby et al., 1990).

Ein Beispiel für ein physikalisches Vegetationsmodell ist das *Michigan Microwave Canopy Scattering Model (MIMICS)*, das auf der Strahlungstransfertheorie basiert und als Zweischicht-Modell das Streuverhalten von Vegetation beschreibt (vgl. Ulaby et al., 1990).

Im Allgemeinen beschränken die restriktiven Annahmen hinsichtlich der Eigenschaften der Streuer, sowie die Komplexität der Invertierung die praktische Anwendbarkeit der theoretischen Modelle. Auch ist eine Beschreibung des vegetationsbedingten Rückstreuverhaltens nur für einzelne Testflächen möglich, da die benötigten Pflanzenparameter zu großen Teilen im Feld erfassten werden müssen.

Das in Kapitel 4.2. erläuterte *Cloud Model* von Attema & Ulaby (1978) bildet unter den physikalischen Modellen aufgrund seiner geringen Komplexität eine Ausnahme. Das gleichfalls auf der Strahlungstransfertheorie basierende Einschicht-Modell benötigt in erster Linie die Vegetationsdichte und Pflanzenhöhe, so dass es aufgrund der geringen Parameterzahl und der vergleichsweise einfachen Handhabung breite Aufmerksamkeit erntete.

b) Semi-empirische Vegetationsmodelle

Um die Anwendung der Modelle zu vereinfachen, wurden diverse semi-empirische Ansätze aus den physikalischen Modellen abgeleitet. Oftmals basieren diese Verfahren auf dem *Cloud Model* und ermöglichen eine Beschreibung des dichtebeschreibenden Vegetationsparameters über die Verwendung des *Leaf Area Index (LAI)* oder des Pflanzenwassergehaltes (siehe: Hoekman et al., 1982; Paris, 1986; Ulaby et. al, 1984; Bindlish & Barros, 2001). Aufgrund der einfachen Anwendbarkeit fanden semi-empirische Modelle häufig Verwendung für die Beschreibung des Vegetationseinflusses auf die Bodenfeuchteerfassung.

So erzielten Bindlish & Barros (2001) durch die ergänzende Verwendung einer modifizierten, semi-empirischen Form des *Cloud Models* in der Bodenfeuchtebeschreibung von Getreideflächen auf Basis multifrequenter und multipolarimetrischer Daten sehr gute Ergebnisse. Im Vergleich zu den Ergebnissen bei Nichtbeachtung des Vegetationseinflusses verringerte sich der rms-Fehler um 32%. Beide Untersuchungen basierten dabei auf einer modifizierten Form des *IEM* (siehe: Bindlish & Barros, 2000).

Quesney et al. (2000) verwendeten dahingegen das Vegetationsmodell von Karam et. al. (1992), das gleichfalls auf der Strahlungstransfertheorie basiert. Die Minimierung des Einflusses von Vegetation und Bodenrauhigkeit auf ihre sog. *„bodenfeuchtesensiblen Ziele"* ermöglichte eine großflächige Beschreibung der mittleren Feuchteverhältnisse eines Einzugsgebietes mit einem mittleren Fehler von $rmse = 0{,}04 - 0{,}05 cm^3 cm^{-3}$.

Aufgrund der notwendigen Parametrisierung der individuellen Pflanzeneigenschaften ist auch die Anwendung von semi-empirischen Vegetationsmodellen auf einzelne Testflächen beschränkt. Auch wenn die Vegetationsdichte fernerkundungsbasiert durch einen vegetationsspezifischen Zusammenhang zwischen *NDVI* und *Leaf Area Index (LAI)* ermittelt werden kann, so benötigt die Kalibrierung dieses Zusammenhanges feld- und fruchtspezifische in-situ Messungen des *LAI*. Gleichfalls ist die Erfassung der Pflanzenhöhe nur mit Hilfe von in-situ Messverfahren möglich.

Im Gegensatz zu den SAR-basierten Verfahren ermöglicht die geringe räumliche Auflösung der Scatterometer-Systeme eine flächenhafte Beschreibung der mittleren Feuchtesituation über große vegetationsbedeckte Gebiete, trotz variierendem Artenbestand. So entwickelten beispielsweise Wagner et al. (1999 a, b, c) ein Vegetationsmodell, das den wachstumsbedingten, saisonal variierenden Vegetationseinfluss auf das ERS-Scatterometersignal als sinusförmige Funktion beschreibt, um eine vegetationsunbeeinflusste Bodenfeuchteerfassung zu ermöglichen.

Zibri et al. (2003) nutzten dahingegen die synergistischen Effekte verschiedener Sensorsysteme für die Erfassung der mittleren Bodenfeuchtevariation von großen Gebieten mit räumlich variierender Vegetationsbedeckung. Während die eigentliche Bodenfeuchtebestimmung auf Basis von ERS-Scatterometersdaten mit Hilfe des *IEM* erfolgte, dienten Daten des ERS SAR-Systems dazu, die Flächenanteile

unterschiedlicher Landnutzungskategorien zu bestimmten, um ihren Einfluss auf das Scatterometersignal berücksichtigen zu können. Der vorgestellte Ansatz ermöglichte eine großflächige Bodenfeuchtebestimmung mit einem rms-Fehler von $rmse < 0{,}04 cm^3 cm^{-3}$.

c) Empirische Verfahren

Gleichfalls wurden einfache empirische Modelle entwickelt, um den Vegetationseinfluss zu minimieren. So kompensierten u.a. Taconet et al. (1996) im Zuge einer Feuchtebestimmung unter Weizenkulturen den vegetationsbedingten Abschwächungsbetrag durch einen empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen dem feuchtebedingten Rückstreuverhalten und dem Vegetationszustand.
Auch Rombach & Mauser (1998) ermittelten individuelle empirische Zusammenhänge zwischen dem Biomasseaufkommen von unterschiedlichen Feldfrüchten und dem resultierenden Rückstreuverhalten, um den Einfluss der Vegetation auf die Feuchtebeschreibung zu eliminieren. Neben der Abhängigkeit von in-situ Messungen ist erneut die Übertragbarkeit der empirischen Modelle beschränkt.

Im Gegensatz zu den bisher erwähnten Verfahren zur Charakterisierung des Vegetationseinflusses umging eine andere Gruppe von Autoren das Problem, indem sie stark signalbeeinflussende, biomassereiche Vegetation kategorisch aus den Verfahren zur Beschreibung der Bodenfeuchte ausschlossen. Als Grundlage für die Isolierung dienten biomassesensible Informationsträger, wie der *NDVI* oder *GLAI* (siehe: Moran et al., 1997 & 2000), der ERS-1/2 Kohärenz (siehe: Borgeaud & Wegmüller 1996; Wegmüller, 1998, Wegmüller et al., 2000, Moeremans & Dautrebande, 2000; Lu & Meyer, 2002) oder Ratios aus multipolarimetrischen SAR-Daten (siehe: Dubois et al., 1995; Shi et al., 1997; Tayler et al., 1996).
Auch wenn die räumliche Feuchteinformation aufgrund dichter Vegetationsbedeckung in den wachstumsintensiven Monaten des Jahres mitunter lückenhaft erscheint, bieten die Ansätze den Vorteil, aufgrund der Unabhängigkeit von in-situ Messungen eine Beschreibung der räumlichen Bodenfeuchteverteilung von großen Gebiete zu ermöglichen.

2.2. Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität der Oberflächeneigenschaften

Auch wenn die Isolierung des Feuchteeinflusses auf das Rückstreuverhalten mit Hilfe der diskutierten Verfahren gelingt, so stellt sich in Bezug auf die Beschreibung der Feuchtevariation über die Zeit ein weiteres Problem: Die ermittelte Konstellation der beeinflussenden Oberflächenparameter ist kein statischer Zustand. Rauhigkeit und Vegetationsbedeckung unterliegen einer starken zeitlichen Veränderung aufgrund von Wachstum, anthropogener Beeinflussung und Erosion. Insbesondere SAR-basierte Verfahren erweisen sich dabei bereits von einer geringen Veränderung der Oberflächeneigenschaften stark betroffen.

Um eine sensible Beschreibung der Feuchtevariation über die Zeit zu gewährleisten ist es daher nötig, gleichfalls die zeitliche Variation der Oberflächeneigenschaften mit zu berücksichtigen.

Während Verfahren, die auf multipolarimetrischen und / oder multifrequenten Daten basieren, durch die stetige Wiederholung der Parametrisierung nicht beeinträchtigt sind (siehe: Oh et al. 1992; Dubois et al. 1995; Bindlish & Barros, 2000), stützen sich andere Verfahren auf Annahmen, die zumindest einen Teil der Oberflächeneigenschaften als stabil über die Zeit betrachten. Während oftmals der wachstumsbedingte, saisonal variierende Vegetationseinfluss in der zeitlichen Feuchtebeschreibung auf Basis von Modellen Berücksichtigung findet, wird meist die Oberflächenrauhigkeit als stabil über die Zeit angenommen. Bei einer fehlenden Aktualisierung der Rauhigkeitsverhältnisse führt diese Annahme über längere Zeiträume jedoch zu einem erheblichen Fehler in der Feuchtebeschreibung. Im Gegensatz zu SAR-basierten Verfahren zeigen sich scatterometerbasierte Methoden weitgehend unbeeinträchtigt von einer Rauchigkeitsänderung. Dieses Verhalten resultiert aus der geringen räumlichen Auflösung von Scatterometer-Systemen, die dazu führt, dass individuelle *Rauhigkeitsänderungen* einzelner Felder durch die Mittelwertbildung über weite Gebiete keinen signifikanten Einfluss auf das Rückstreuerhalten besitzen.

Eine neue Technik stellt in diesem Zusammenhang die Verwendung der interferometrischen Kohärenz dar, die eine fernerkundliche Überwachung der Stabilität der Oberflächenparameter über die Zeit ermöglicht. Da sich eine

Rauhigkeitsänderung gleich dem Vegetationswachstum in einer Veränderung der geometrischen Lage der Streuelemente in einer Auflösungszelle äußert, spiegelt sich ihr Einfluss in einem Kohärenz-Verlust wider. So wiesen bereits Borgeaud & Wegmüller (1996) auf die vorteilhafte Verwendung der Kohärenz für die Gewährleistung biomassearmer Vegetation und stabiler Rauhigkeitsverhältnisse hin. Wegmüller (1998) nutzte die Kohärenz-Information erfolgreich für die Gewährleistung stabiler Rauhigkeitsverhältnisse über ein Zeitintervall von $\Delta t = 3d$ um eine unbeeinflusste Bodenfeuchteerfassung zu ermöglichen. Daran anschließende Untersuchungen zeigten gleichfalls für längere Zeitintervalle von $\Delta t = 35d$ einen starken linearen Zusammenhang zwischen der ERS-2 Langzeit-Kohärenz und einer erosionsbedingten Rauhigkeitsänderung (Wegmüller et al.; 2000). Auch Lu und Meyer (2002) überprüften die Stabilität der Rauhigkeit zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten auf Basis der Kohärenz, um die beobachtete Signaländerung auf biomassearmen Flächen eindeutig einer Bodenfeuchtevariation zuordnen zu können. Bemerkenswert an dieser Studie ist, dass eine aussagekräftige Kohärenz-Schätzung über ein extrem langes Zeitintervall von mehr als zwei Jahren durchgeführt werden konnte.

Während scatterometerbasierte Verfahren mitunter die Reife für eine Operationalisierung erreichten, blieb trotz der Vielzahl an erfolgversprechenden Ansätzen die räumlich hochaufgelöste Bodenfeuchteerfassung mit Hilfe von SAR-Systemen in der Regel auf experimentelle Studien beschränkt. So verhinderten oftmals die starken Beschränkungen der Verfahren, die Komplexität der Parametrisierung und Invertierung, die hohe Rechenzeit und die Beschränkung auf einzelne Testflächen eine operationelle Nutzung.

3. Grundlagen der Radar-Fernerkundung

Radar-Systeme (Radio Detection and Ranging) sind *aktive Sensoren*, welche aufgrund einer eigenständigen Beleuchtungsquelle eine tageszeitunabhängige Datenerfassung ermöglichen. Durch die verwendete *Wellenlänge* von ca. $1cm \leq \lambda \leq 100cm$ wird das Radar-System nur in geringem Maße (Wassertropfen) durch den Zustand der Atmosphäre beeinflusst. Aufgrund dieser Eigenschaften erweisen sich Radar-Systeme als hervorragend geeignet für die *stabile, kontinuierliche Datenerfassung,* wodurch eine nahezu lückenlose Beobachtung von Veränderungen eines geowissenschaftlichen Parameters auf Basis von *Zeitreihenanalysen* ermöglicht wird.

Das Grundprinzip eines *Radar-Systems* ist das Aussenden elektromagnetischer Wellen, um auf Basis des *Rückstreuechos* Informationen über die Erdoberfläche zu gewinnen. Da das Signal durch *Streu- und Absorptionsprozesse* eine objekt-spezifische Veränderung erfährt, ermöglicht die *Amplitudenmessung* Aussagen über *Art und Zustand der Streuer.*

Darüber hinaus besitzen *SAR-Systeme* die Fähigkeit, gleichfalls die *Phase* der rückgestreuten Signale zu messen. Diese Information gewährleistet mit Hilfe der Technik der *SAR-Interferometrie (InSAR)* Aussagen über die Lage einer Rückstreufläche im dreidimensionalen Raum zu treffen. Die abgeleitete Information bezüglich der Höhenvariation kann für die Beschreibung der Topographie eines Gebietes auf Basis von *digitalen Höhenmodellen (DHM)* genutzt werden.

3.1. Messprinzip des Radar-Systems

Die *Stärke des Rückstreusignals eines Radar-Systems (Amplitude)* ist eine Funktion der *Sensor-* und *Streueigenschaften* des *beleuchteten Objektes.* Mathematisch beschreiben lässt sich der Zusammenhang beider Einflussfaktoren auf das Rückstreuergebnis durch die *Radar-Gleichung* (vgl. Ulaby et al., 1982):

$$P_r = \frac{P_t \cdot A_{eff}^{\ 2}}{4\pi \cdot \lambda^2 \cdot r^4} \cdot \sigma \tag{3.1}$$

mit:

P_r :	empfangene Leistung [W];
P_t :	Sendeleistung [W];
A_{eff} :	effektive Antennenfläche [m^2];
λ :	Wellenlänge [m];
r :	Range-Entfernung [m];
σ :	Rückstreuquerschnitt des Streuers [m^2].

Gleichung (3.1) beschreibt das Rückstreuverhalten eines *einzelnen Streuers* bei Verwendung eines *monostatischen Systems*. Dies ist ein Messsystem, das die Signalemission und die Messung des Rückstreuechos mit einer identischen Antenne realisiert. Während die Parameter *Sendeleistung* P_t, *effektive Antennenfläche* A_{eff}, *Wellenlänge* λ und *Range-Entfernung* r *Sensor-eigenschaften* darstellen, ist der *Rückstreuquerschnitt des Streuers* σ eine Funktion der *Streueigenschaften des Zielobjektes* an der Erdoberfläche. Da beide Eigenschaften das Rückstreuverhalten entscheidend beeinflussen, erfolgt eine kurze einleitende Diskussion der wichtigsten Parameter.

Einfluss der Sensoreigenschaften:

a) ***Wellenlänge*** λ ***(Frequenz*** f***):*** Sie beeinflusst die *Eindringtiefe* einer elektromagnetischen Welle in ein Medium. So wächst die Eindringtiefe mit zunehmender Wellenlänge (sinkender *Frequenz*). Darüber hinaus steuert die *Wellenlänge* die Stärke der Teilnahme von Streuelementen am Prozess der Rückstreuung. So erweisen sich die Objekte als *streueffektiv*, welche eine vergleichbare Größe zur Wellenlänge λ aufweisen.

b) ***Polarisation*** pp***:*** *Obwohl sie nicht explizit in der Radar-Gleichung* (3.1) *Erwähnung findet, sei ihr Einfluss auf das Rückstreuverhalten erwähnt. Polarimetrische Radar-Systeme* besitzen die Möglichkeit, elektromagnetische Wellen in verschiedenen *Polarisationsebenen* zu senden bzw. zu empfangen. Dabei beschränken sich die Systeme oftmals auf die *linearen Polarisationsebenen* der *Gleichpolarisation* (*HH, VV*) *und Kreuzpolarisation* (*HV, VH*). Die Kodierung „*H*" steht für *horizontal*, „*V*" für *vertikal polarisiert*. Der erste Buchstabe beschreibt die Polarisationsebene

der emittierten, der zweite die der empfangenen Welle. Da eine parallele Ausrichtung eines zylinderförmigen Streuers zur Polarisationsebene zu einer verstärkten Interaktion führt, erlaubt die Verwendung unterschiedlicher Polarisationsebenen einen Informationsgewinn bezüglich *Ausrichtung* und *Form der Streuelemente*. Mit zunehmender Anzahl der Streuereignisse wächst darüber hinaus die Wahrscheinlichkeit der *Depolarisation*, wodurch die *Volumenstreuung* einen hohen *depolarisierten Streuanteil* aufweist, der in der *Kreuzpolarisation* messbar ist.

Einfluss der Objekteigenschaften:

a) ***Lokaler Einfallswinkel*** θ_{loc}: Gemäß der in Abbildung 3.1 dargestellten *Aufnahmegeometrie eines Radar-Systems* ist der *lokale Einfallswinkel* θ_{loc} der Winkel zwischen der Flächennormalen einer beleuchteten Oberfläche und der Richtung des einfallenden Signals. Der *lokale Einfallswinkel* θ_{loc} nimmt eine Zwischenstellung zwischen *Sensor-* und *Objekteigenschaften* ein, da er neben dem *Blickwinkel* des Sensors abhängig von der *Ground-Range-Entfernung* und der *Hangneigung* und *Orientierung des Geländes* ist. Die *Ground-Range-Entfernung* beschreibt dabei die Distanz zwischen Nadirpunkt und Position der Rückstreufläche orthogonal zur Flugrichtung an der Erdoberfläche. Im Gegensatz zum *lokalen Einfallswinkel* θ_{loc} vernachlässigt der *Einfallswinkel* θ den Einfluss der Topographie. Beide Winkel steuern neben der *geometrischen Abbildung der Messwerte im zweidimensionalen Raum* direkt das *Rückstreuverhalten der Erdoberfläche* über die Beeinflussung der *Streugeometrie der Objekte* als auch der *Eindringtiefe* in das Medium aufgrund *winkelabhängiger Weglängen*.

b) ***Dielektrische Eigenschaften***: Sie werden hauptsächlich durch den Wassergehalt eines Mediums bestimmt und definieren die Stärke des rückgestreuten Signals über das *Verhältnis* von *Absorption* zu *Streuung* (siehe: Kapitel 4.1.1.).

c) ***Streuergeometrie (z.B. Oberflächenrauhigkeit):*** Sie steuert die *Richtungsverteilung* der *Oberflächenrückstreuung* (siehe: Kapitel 4.1.2.)

Aufgrund der elementaren Bedeutung der aufgezeigten Einflüsse auf das Rückstreuverhalten für das Thema der vorliegenden Studie erfolgt getrennt eine eingehende Diskussion ihres Einflusses in Kapitel 4. *„Betrachtung der Streuprozesse an der Erdoberfläche“*.

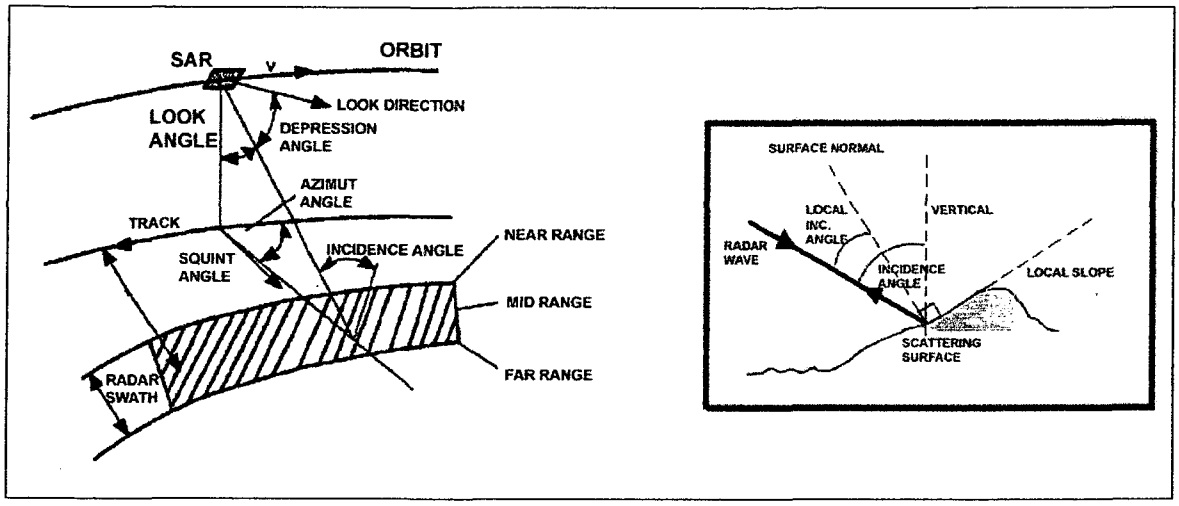

Abb. 3.1: Aufnahmegeometrie eines SAR-Systems (Quelle: Schreier, 1993, verändert)

Um eine Aussage bezüglich des *Rückstreuverhaltens eines Flächenstreuers* treffen zu können, erfolgt die Darstellung des Rückstreuquerschnitts auf die Fläche bezogen. Ein *Flächenstreuer* ist somit eine Rückstreufläche, in der anstatt eines einzelnen starken Streuers (z.B. Corner-Reflektor), eine *Vielzahl von Einzelstreuern* das Rückstreusignal als Summe individueller Rückstreukomponenten verursacht. Die räumliche Verteilung der Einzelstreuer über die Fläche wird dabei als zufällig angenommen. Mit der Annahme, dass sich dieser *Flächenstreuer* aus einer *unendlichen Zahl von Einzelstreuern* mit variierenden Rückstreuquerschnitten zusammensetzt, die in integrierter Form das Rückstreusignal der Fläche ergeben, lässt sich der *Rückstreuquerschnitt eines Flächenstreuers* σ_{area} durch folgende Differentialgleichung beschreiben:

$$\sigma_{area} = \frac{d\sigma}{dA} \tag{3.2}$$

mit:

σ_{area} : Rückstreuquerschnitt $[m^2 m^{-2}]$;

A : Rückstreufläche $[m^2]$.

In der Darstellung der räumlichen Verteilung der Messwerte über ein beobachtetes Gebiet ist zu beachten, dass die Größe der in einer Auflösungszelle dargestellten Fläche in Abhängigkeit des *lokalen Einfallswinkels* θ_{loc} variiert. So nimmt die

Kantenlänge einer Rückstreufläche in *Range-Richtung* mit wachsendem *lokalem Einfallswinkel* θ_{loc} ab. Da der *Rückstreuquerschnitt eines Flächenstreuers* σ_{area} abhängig von der Größe der Rückstreufläche ist, erfolgt die *Normierung des Rückstreuquerschnitts auf eine Einheitsfläche*:

$$\sigma^0 = \sigma_{area} \cdot \sin\theta_{loc} \tag{3.3}$$

mit:

σ^0 : normierter Rückstreuquerschnitt $[m^2 m^{-2}]$;

θ_{loc} : lokaler Einfallswinkel.

Diese Normierung gewährleistet die räumliche Vergleichbarkeit der Messwerte. Da der *normierte Rückstreuquerschnitt* σ^0 einen *hohen Dynamikbereich* aufweist, erfolgt seine Darstellung oftmals in einer logarithmierten Form im Maß *Dezibel* $[dB]$ (vgl., ESA, 1998):

$$\sigma^0{}_{dB} = 10\log\sigma^0 \tag{3.4}$$

mit:

$\sigma^0{}_{dB}$: logarithmierter, normierter Rückstreuquerschnitt $[dB]$.

Aus Gründen der Vereinfachung wird der *logarithmierte, normierte Rückstreuquerschnitt* $\sigma^0{}_{dB}$ im Folgenden als *Rückstreuquerschnitt* σ^0 $[dB]$ bezeichnet. Sofern eine Darstellung in *natürlichen Einheiten* $[m^2 m^{-2}]$ erfolgt, wird dies explizit erwähnt. Das erläuterte Messprinzip gilt für alle Arten von *aktiven Radar-Systemen* gleichermaßen.

3.2. Das Synthetic Aperture Radar (SAR)

Radar-Systeme gliedern sich in die Gruppe der *Systeme mit realer Apertur (RAR)* (*Scatterometer*) und in die Gruppe der *Systeme mit synthetischer Apertur (SAR)*. Neben der Eigenschaft, eine deutlich höhere *räumliche Auflösung* als *RAR-System* zu erreichen, unterscheidet sich das *SAR-System* durch seine Fähigkeit, zusätzlich zur *Amplitude* auch die *Phase* des Rückstreusignals zu messen.

Dabei wird die räumliche Auflösung in *Azimuth-Richtung* (Flugrichtung) und *Range-Richtung* (Orthogonal zur Flugrichtung) durch unterschiedliche Faktoren definiert.

Hinsichtlich der räumlichen Auflösung in *Azimuth-Richtung* erweisen sich *RAR-Systeme* durch eine Abhängigkeit von *Flughöhe* und *Antennenlänge* stark beschränkt. Diese limitierenden Faktoren umgehen *SAR-Systeme*, indem sie die Bewegung der Trägerplattform nutzen, um eine kurze reale Antenne synthetisch zu verlängern (*synthetische Apertur*). Entlang der Flugbahn wird ein Objekt mehrmals beleuchtet und seine Rückstreuinformation, bestehend aus *Amplitude* und *Phase*, gespeichert. Das *kohärente Integrieren* der Signale in *Azimuth-Richtung* in der *Prozessierung* ermöglicht die *Synthetisierung* einer *virtuellen Antenne*, deren *räumliche Azimuth-Auflösung* der einer mehrere hundert Meter langen realen Antenne entspricht. Die Länge dieser *virtuellen Antenne* ist damit ausschließlich von der *maximalen Flugstrecke* abhängig, in der die ausgesendeten Signale das Zielobjekt erfassen.

Die *räumliche Auflösung in Range-Richtung* ist unabhängig von den erwähnten Parametern und in der Grundform des *Puls-Radar-Systems* für beide Sensortypen *RAR* und *SAR* gleich. Um zwei eng nebeneinander platzierte Objekte in *Range-Richtung* unterscheiden zu können, müssen die spezifischen Radar-Echos zeitlich getrennt am Sensor erfasst werden. Gemäß Schreier (1993) ist die *räumliche Range-Auflösung* in etwa gleich der *halben Signallänge* und wächst mit dieser umgekehrt proportional an. Die Reduktion der *Signallänge* ist dabei durch die Gewährleistung einer benötigten Signalstärke für ein ausreichendes Signal / Rausch - Verhältnisses begrenzt, da sie neben der *Amplitude* die *Stärke der emittierten Energie* definiert.

3.2.1. Das SAR-Signal

Die grundlegenden Informationsträger des *SAR-Signals* sind dessen *Amplitude* und *Phase*. Während die *Amplitude* die *Streueigenschaften der Erdoberfläche* widerspiegelt, ist die *Phase* der entscheidende Informationsträger für *interferometrische Messmethoden*.

Die Speicherung der gemessenen *Amplituden-* und *Phaseninformation* erfolgt in einer komplexen Darstellungsweise. Das *Rückstreusignal* c einer Auflösungszelle ist das Gesamtergebnis von einer Vielzahl von Rückstreuprozessen, die an den *einzelnen Streuzentren* des *Flächenstreuers* stattfinden. Wie Abbildung 3.2 anhand einer Vektordarstellung in der komplexen Ebene verdeutlicht, kann das

rückgestreute Signal c einer Auflösungszelle als Vektorsumme aus der kohärenten Addition der rückgestreuten Einzelsignale modelliert werden. Während der *Betrag des Zeigers* die *Amplitude* des Signals repräsentiert, erfolgt die Extraktion der *Phase* durch die *Winkelmessung des Zeigers* in der komplexen Ebene.

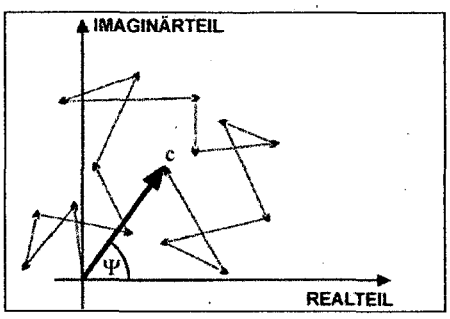

Abb. 3.2: Radar-Echo c einer Auflösungs-Zelle in der komplexen Ebene

Da die Größe einer Auflösungszelle einem Vielfachen der verwendeten Wellenlänge entspricht und die Positionen der *Einzelstreuer* als zufällig über den Flächenstreuer verteilt angenommen werden kann, ist auch die aus den Streuprozessen resultierende Phase zufälliger Natur. Als *kohärente Summe* der Einzelsignale weist das komplexe *Radar-Echo* c einer Auflösungszelle eine *gauß'sche Normalverteilung* auf, mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 0$ und einer Varianz, die sich proportional zum mittleren Rückstreuquerschnitt verhält (vgl. Zebker & Villasenor, 1992).

Voraussetzung für eine aussagekräftige *Phasenmessung* ist ein *monochromatischer Charakter* des *SAR-Signals*, der im Fall von SAR Systemen aufgrund einer geringen *Bandbreite in Range-Richtung* B_r im Verhältnis zur *Trägerfrequenz* f_o mit $B_r / f_o = 3{,}5 \cdot 10^{-3}$ in erster Näherung gegeben ist (vgl. Schwäbisch, 1995). Gleichzeitig erfüllen SAR-Systeme mit dem Aussenden *kohärenter Signale* eine weitere Forderung der Phasenmessung.

Der Speckle-Effekt

Die Entstehung des radar-charakteristischen *Speckle-Effektes* lässt sich ebenfalls anhand von Abbildung 3.2 erläutern, der sich als starke kleinräumige *Variation der Rückstreuintensität innerhalb homogener Flächen* äußert. Dabei ist zu beachten, dass der *Speckle-Effekt* unabhängig von der *Textur* einer Aufnahme ist, welche die *räumliche Variabilität der Messwerte aufgrund der natürlichen Heterogenität der Rückstreuflächen* beschreibt (vgl. Lillesand & Kiefer, 1987).

Durch die Interaktion des kohärent ausgesendeten Signals mit den zufällig über die Auflösungszelle verteilten Streuelementen besitzen die rückgestreuten Signalteile veränderte *Amplituden* und *Phasen*. Während die *Amplitude* durch das objektspezifische Streuverhalten der Streuelemente beeinflusst wird, führen die

unterschiedlichen Positionen der Streuelemente innerhalb der Auflösungszelle zu variierenden Weglängen und individuellen Phasen der rückgestreuten Signalteile (vgl. Elachi, 1988). Diese *Objektphasen* weisen in einer homogenen Auflösungszelle einen Wertebereich von $\psi = [-\pi;\pi]$ auf und sind im Gegensatz zur Amplitude nicht signifikant mit den Rückstreueigenschaften des Objektes verknüpft (vgl. Ulaby et al., 1982).

Die Phasenunterschiede ermöglichen *positive* und *negative Interferenzen* zwischen den rückgestreuten Signalteilen, die den *Speckle-Effekt* induzieren. Die kohärente Addition dieser Signalteile führt trotz homogener Flächen an der Erdoberfläche zu variierenden Rückstreusignalen je Auflösungszelle, da die *Richtung der einzelnen Vektoren* (*Objektphase*) durch die Interferenzen zufällig entsteht.

Da der *Speckle-Effekt* eine Beeinträchtigung der *radiometrischen Auflösung* darstellt, gibt es u.a. folgende Verfahren, um seine Intensität zu mindern:

Spatial Domain Multi-Looking: Die Speckle-Reduktion erfolgt über eine räumliche Mittelung benachbarter Auflösungszellen mit einer Matrix (Fenster) der Größe $N \times M$ Pixel (vgl. Schwäbisch, 1995). Da im Fall des ERS-1/2 SAR-Systems eine Auflösungszelle fünffach in Azimuth-Richtung abgebildet wird, erfolgt in der Multilook-Bildung ein Zusammenfassen dieser Auflösungszellen zu einer Zelle mit Hilfe eines asymmetrischen Fensters mit dem Größenverhältnis 5×1. Dies ermöglicht zusätzlich zur Generierung einer ground-range-spezifischen Größe der Auflösungszellen (Geometrie der Erdoberfläche) eine Reduktion der Datenmenge.

Adaptive Filterverfahren: Diese Verfahren werden ergänzend zum *Multi-Look Processing* angewendet, um *die Speckle-Variation* weiterführend zu glätten. Die Rechenoperationen berücksichtigen die *lokale Bildstatistik* und verändern die Auflösungszellen über ihr Verhältnis zur Umgebung (vgl. Löffler, 1994). Dazu wird ein *Fenster* der Größe $N \times M$ über die umliegenden Pixel gelegt und über einen Filteralgorithmus der Wert des zentralen Pixels neu bestimmt. Ein Großteil der Verfahren basiert auf dem *Variationskoeffizienten* als Maß der Bildhomogenität. Um ein Minimum an Informationsverlust zu gewährleisten, wird auf den *Erhalt von linearen Strukturen und scharfen Grenzen* geachtet.

3.2.2. Geometrie einer SAR-Aufnahme

SAR-Systeme sind *abbildende Radar-Systeme*. Im Gegensatz zu *Scatterometern (nichtabbildende Systeme)* erfassen sie flächenhaft die *räumliche Verteilung der Rückstreuinformation*. Um die Messwerte der entsprechenden Position in einer zweidimensionalen Abbildung zuordnen zu können, muss die Lage der Rückstreuflächen in *Azimuth-* und *Range-Richtung* eindeutig bestimmt werden.

Während sich das *SAR-System* an einer mehrfach beleuchteten Rückstreufläche vorbeibewegt, werden zusätzlich zur *Amplitude* und *Phase* die *Frequenz* und *Laufzeit* der Rückstreusignale erfasst. Die Relativbewegung des Sensors zur Rückstreufläche bedingt die *Dopplerverschiebung* zwischen *gesendeter und empfangener Frequenz* (vgl. Meier et al., 1993). Da die *Frequenz* des emittierten Signals als *Systemkonstante* bekannt ist, kann durch die Berücksichtigung der *Dopplerfrequenz* die *Lage der Rückstreufläche in Azimuth-Richtung* eindeutig bestimmt werden.

Die *Lagebestimmung einer Rückstreufläche in Range-Richtung* erfolgt dagegen über die *Laufzeit*, die sich proportional zur *Range-Entfernung* verhält. Sie ermöglicht die eindeutige Lokalisierung der Rückstreufläche in der Ebene.

Im Fall von reliefiertem Gelände führt diese Vorgehensweise zu einer Lagemehrdeutigkeit, da sich die Rückstreufläche auf einem Kreisbogen mit der *Range-Entfernung* als Radius befinden kann. Eine Auflösung dieser Mehrdeutigkeit ist mit Hilfe der *SAR-Interferometrie (InSAR)* möglich, die in Abschnitt 3.3. erläutert wird.

Die laufzeitbasierte Lagebestimmung der Rückstreuflächen führt zur räumlichen Abbildung der Messwerte in der *Slant-Range-Darstellung*. Diese weist in reliefiertem Gelände die in Abbildung 3.3 aufgezeigten Verzerrungen der Bildgeometrie auf.

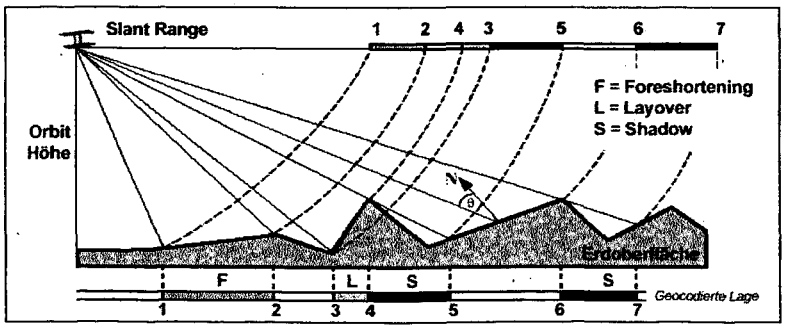

Abb. 3.3: Geometrische Verzerrungen der SAR-Aufnahme (Quelle: Schreier, 1993, überarbeitet)

Die Formen der geometrischen Verzerrungen gliedern sich wie folgt (vgl. Schreier, 1993):

a) ***Foreshortening (F):*** Die dem Sensor zugeneigten Hänge erscheinen in der *Slant-Range-Darstellung* verkürzt, da die zeitliche Differenz zwischen den Rückstreusignalen von Hangfuß und Bergkuppe kürzer als ihr realer Horizontalabstand ist.

b) ***Layover (L):*** Übersteigt der *lokale Einfallswinkel* die Neigung der dem Sensor zugewandten Hänge, so trifft das Rückstreusignal der Bergkuppe vor dem des Hangfußes am Sensor ein.

c) ***Radar-Schatten (S):*** Er ist unabhängig von der Laufzeit und entsteht, wenn die Neigung eines sensorabgewandten Hanges größer als der *lokale Einfallswinkel* ist.

Nach der Transformation in die *Ground-Range-Geometrie* (Geometrie der Rückstreuflächen an der Erdoberfläche) können die Effekte *Foreshortening* und *Layover* im Prozess der *Geokodierung* kompensiert werden. Dabei erfolgt eine Entzerrung der flächenhaften Rückstreuinformation auf ein *Ellipsoid (GEC)* oder auf ein *digitales Geländemodell (GTC)*. Da keine Rückstreuinformation über die Bereiche im *Radar-Schatten* vorliegt, ist eine Kompensierung dieses Effektes nicht auf Basis eines Datensatzes möglich. Die betroffenen Flächen werden ausmaskiert.

3.2.3. Das ERS-1/2 *Active Microwave Instrument (AMI)*

Mit *ERS-1* startete *1991* der erste europäische Radar-Satellit. Der für die *wissenschaftliche Umweltbeobachtung* konzipierte Satellit diente in erster Linie der Erörterung *ozeanischer Fragestellungen*, erwies sich jedoch auch für *terrestrische* Anwendungsgebiete als geeignet, wie der Überwachung von *Bodenfeuchte, Vegetation* und *Landnutzung*.

Der Satellit befindet sich auf einem *sonnensynchronen Orbit* in einer *mittleren Höhe* von $h = 785 km$. Die *Flugbahn* ist mit einer *Inklination* (*Winkel zur Erdachse*) von $\alpha = 8{,}5°$ fast *polar*. Um ein Gebiet erneut aus einer identischen Aufnahmeposition zu erfassen (*Repetitionsrate*) benötigt ERS-1 ein Zeitintervall von $\Delta t = 35 d$.

1995 startete der annähernd baugleiche Satellit *ERS-2*, um die Nachfolge des auf eine Betriebsdauer von vier Jahren konzipierten *ERS-1* zu übernehmen. Da *ERS-1* zu diesem Zeitpunkt jedoch immer noch annähernd störungsfrei arbeitete, erwies sich die gleichzeitige Verwendung beider Satelliten als vorteilhaft für *Fragestellungen* der *Repeat-Pass-Interferometrie*. In den sog. *Tandem-Missionen* (*1995-1997, 1998-2000*) wurden die Bahnen so konfiguriert, dass beide Satelliten mit einem Zeitintervall von $\Delta t = 24h$ ein Gebiet aus einer geringfügig abweichenden Aufnahmeposition erfassen. Aufgrund der *geringen Veränderung* an der Eroberfläche in diesem kurzen Zeitraum eignet sich diese Systemkonfiguration hervorragend für die Erstellung von *interferometrischen Produkten* (siehe Kapitel 3.3.). Die *Tandem-Missionen* endeten im Jahr *2000* mit dem Ausfall der Systeme von *ERS-1*.

Neben einem *passiven Mikrowellen- und thermischen Infrarot-Radiometer (Along Track Scanning Radiometer ATSR)* sowie diversen *Sensorsystemen zur präzisen Entfernungs- und Bahnvermessung* (*Radio Altimeter RA, Precise Range and Range-Rate Equipment PRARE, Laser Retroreflector)* tragen die *ERS-1/2 Satelliten-Systeme* das *Active Microwave Instrument (AMI).*

Das *AMI* arbeitet im *C-Band* mit einer *Wellenenlänge von* $\lambda = 5{,}6cm$ (*Trägerfrequenz* $f_0 = 5.3GHz$) in der *VV-Polarisation.* Aufgrund seiner Fähigkeit, in drei unterschiedlichen Betriebsmodi zu arbeiten, verbindet das *AMI* die Funktionalität eines *SAR-Systems* (*Image-Mode*) mit der eines *Scatterometers (Wind- und Wave-Mode).* Während die Messung im *Wind-* und *Wave-Mode* zeitgleich erfolgen kann (*Wind / Wave-Mode*), ist die Verwendung des *Image-Mode* nur getrennt möglich.

Die im *Image-Mode* (*SAR-System*) erfassten Daten erreichen nach der Prozessierung eine *räumliche Ground-Range Auflösung* von $25x25m$ und decken einen Streifen von ca. $b = 100km$ Breite ab. Der *Einfallswinkel* variiert dabei zwischen ca. $19° \leq \theta \leq 26°$, mit einem mittleren (*nominellen*) *Einfallswinkel* von $\theta_0 = 23°$. Die geringe Streifenbreite bedingt eine *Repetitionsrate* von $\Delta t = 35d$.

Tabelle 3.1 zeigt die *Systemparameter des ERS-1/2 SAR-Systems* im Überblick.

Die *Scatterometerfunktion* beleuchtet die Erdoberfläche dahingegen in einem $b = 500km$ breiten Streifen und erreicht bei Nichtverwendung des *Image-Mode* einen *Wiederholungszyklus* von $3 \leq \Delta t \leq 4d$ in den mittleren Breiten. Bei der

zeitgleichen Verwendung beider Satellitensysteme *ERS-1/2* ist eine Steigerung auf $\Delta t = 2{,}2d$ möglich. Der breite Aufnahmestreifen bedingt eine starke *Einfallswinkelvariation* von $18° \leq \theta \leq 59°$. Die Messdaten des Scatterometers besitzen nach der Prozessierung eine *räumliche Auflösung* von ca. $50x50km$.

Systemparameter des ERS-1/2 SAR-Systems (AMI - Image-Mode)	
Trägerfrequenz f_0 (Wellenlänge λ / Band)	$f_0 = 5.3GHz$ ($\lambda = 5{,}6cm$ / *C-Band*)
Polarisation pp	*VV*
Bandbreite in Range- B_r / Azimuth-Richtung B_a	$B_r = 15{,}55MHz$ / $B_a = 1410Hz$
mittlere Flughöhe $\bar{h}$ / mittlere Schrägentfernung $\bar{r}$	$\bar{h} = 785km$ / $\bar{r} = 845km$
Einfallswinkelbereich θ / nominaler Einfallswinkel θ_0	$19° \leq \theta \leq 26°$ / $\theta_0 = 23°$
räumliche Auflösung in Azimuth- δx / Range Richtung δy bei Datenerfassung	$\delta x \leq 5m$ / $\delta y \leq 9{,}4m$

Tab. 3.1: Systemparameter des ERS-1/2 SAR-Systems

3.3. Grundlagen der SAR-Interferometrie (InSAR)

Die *SAR-Interferometrie (InSAR)* ist ein Verfahren, das mit Hilfe der Information von *Phasendifferenzmessungen* Aussagen über die Höhenvariation der Erdoberfläche gewährleistet. Aufgrund der Proportionalität zum *Weglängenunterschied* zwischen zwei räumlich voneinander getrennten Sensoren und einer betrachteten Rückstreufläche ermöglichen sie eine Lagebeschreibung dieser Fläche im dreidimensionalen Raum. Die Beschreibung der abgeleiteten Geländehöhen über einer Bezugsfläche erfolgt in Form sog. *digitaler Höhenmodelle (DHM)*, welche die Topographie zuzüglich der Höhe von Objekten auf der beleuchteten Oberfläche beschreiben.

Die *Kohärenz-Information*, ein Nebenprodukt der *interferometrischen Prozessierung*, dient als sensibles *Maß für den Grad der Veränderung* der Rückstreueigenschaften innerhalb einer Auflösungszelle und eignet sich daher als ergänzende Informationsquelle für die Erfassung der Landnutzung.

3.3.1. Interferometrisches Messprinzip

Interferometrische Methoden verwenden *Phasendifferenzmessungen*, um über die Information des *Weglängenunterschiedes* eine sensible *Range-Entfernungs-*

messung im Bereich eines Bruchteils der verwendeten Wellenlänge zu ermöglichen.

Wie Abbildung 3.4 verdeutlicht, reicht die Kenntnis der *Range-Entfernung r* zwischen einem Sensor und der Rückstreufläche nicht aus, um eine eindeutige Lokalisierung der Rückstreufläche im dreidimensionalen Raum zu gewährleisten. Die Fläche kann sich an jedem *Punkt* P eines Kreisbogens mit *Radius r* um die *Position des Sensors* S befinden. Somit ist keine Aussage über die *Geländehöhe* h des Punktes möglich.

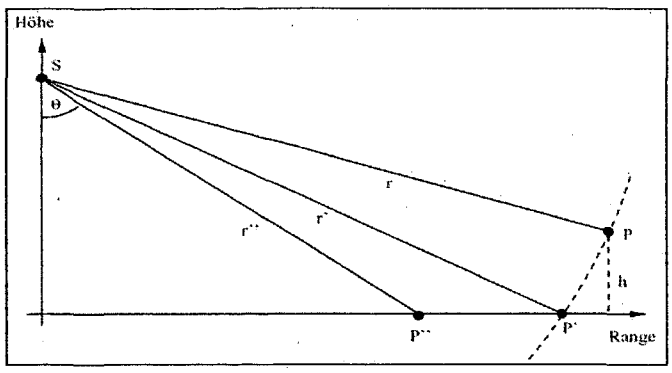

Abb. 3.4: Mehrdeutigkeit der dreidimensionalen Lagebestimmung in Range-Richtung (Quelle: Schwäbisch, 1995)

Um die dreidimensionale Lagebestimmung zu ermöglichen, verwendet die *SAR-Interferometrie* eine zweite Antenne, welche die Rückstreufläche aus einer räumlich abweichenden Aufnahmeposition betrachtet. Die *Sensorpositionen* S_1 und S_2 sind dabei um die räumliche Distanz B_{eff}, der sog. *effektiven Basislinie*, räumlich voneinander getrennt. Die in der vorliegenden Studie verwendete *Repeat-Pass-Interferometrie* besitzt darüber hinaus eine *zeitliche Basislinie,* da die Signalerfassung für die Phasendifferenzmessung in einem zeitlichen Abstand zueinander erfolgt.

Die variierenden *Range-Entfernungen* r_1 und $r_2 = r_1 + \Delta r$ zwischen den *Sensorpositionen* S_1 und S_2 der betrachteten Rückstreufläche an *Punkt* P ermöglichen eine dreidimensionale Positionsbestimmung.

Wie Abbildung 3.5 verdeutlicht, befindet sich der gesuchte *Punkt* P am Schnittpunkt der beiden Kreisbögen um die *Sensorpositionen* S_1 und S_2. Unter der Voraussetzung, dass beide Signale eine *feste Phasenbeziehung* aufweisen und damit *kohärent*

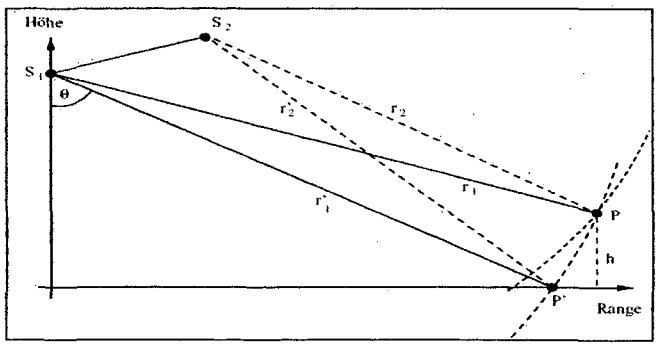

Abb. 3.5: Interferometrisches Messprinzip: zweite Antenne erlaubt dreidimensionale Lagebestimmung aufgrund abweichender Aufnahmepositionen. (Quelle: Schwäbisch, 1995)

sind, kann der *Weglängenunterschied* Δr zwischen den Sensoren und dem Zielpunkt über die Differenzbildung zwischen beiden *Phasenmessungen* ψ_1 und ψ_2 bestimmt werden. Die Kenntnis der *Phasendifferenz* $\Delta\psi$ und der *interferometrischen Aufnahmegeometrie* ermöglicht die Erfassung der *Geländehöhe* h des beobachteten Punktes über einer Bezugsfläche.

Grundvoraussetzung für die *Phasenmessung* ist die *Kohärenz* zwischen beiden Datensätzen, deren Entstehen u.a. abhängig ist von der Genauigkeit der *Ko-Registrierung* der komplexen Daten. Da die Bildgeometrie der Datenpaare aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmepositionen der Sensoren voneinander abweicht, ist die *Ko-Registrierung* ein wichtiger Schritt, der zu Beginn der interferometrischen Prozessierung erfolgt. So ermöglichen *Kreuz-Korrelationsanalysen* in der sog. *Feinreferenzierung* eine subpixelgenaue Anpassung des Bildpaares in der *Slant-Range-Geometrie*. Zu diesem Zweck wird jeweils nach einer pixelweisen Verschiebung beider Szenen zueinander der *komplexe Korrelationskoeffizient* für mehrere Szenenbereiche ermittelt. Die Lage, aus der das *Maximum der Korrelationskoeffizienten* resultiert, stellt die optimale Anpassung dar. Der maximale *Korrelationskoeffizient* beschreibt damit den *Grad der Kohärenz* zwischen beiden Signalen.
Das Ko-Registrierungsverfahren basiert dabei auf der Verwendung des *Speckle-Musters*, das bei ähnlicher Aufnahmekonfiguration und einer unveränderten Verteilung der Einzelstreuer zu beiden Aufnahmezeitpunkten eine identische Verteilung aufweist.
Nach einer geometrischen Passpunktentzerrung beider Szenen aufeinander erfolgt die Erstellung des sog. *Interferogramms*, das über die dargestellte Phasendifferenz (*Fringes*) das Relief widerspiegelt und die Grundlage für die Erstellung eines digitalen Höhenmodells bildet (siehe: Zebker & Goldstein, 1986).

3.3.2. Die Kohärenz

Die *Kohärenz* ist ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen zwei (zeitlich) getrennt voneinander gemessenen SAR-Signalen des gleichen Gebietes. Besteht eine *feste Phasenbeziehung* zwischen den Signalen, so sind diese vollständig *kohärent*. Voraussetzung für das Entstehen von *Kohärenz* ist eine identische

Verteilung der *Einzelstreuer* zu beiden Aufnahmezeitpunkten, um gleiche *Objektphasen* zu erzeugen. Aufgrund dieser Tatsache weisen *kohärente Signale* ein *identisches Speckle-Muster* auf (vgl. Zebker & Villasenor, 1992). Der Messparameter *Kohärenz* γ ist wie folgt definiert:

$$\gamma = \frac{E\{c_1 \cdot c_2^*\}}{\sqrt{E\{|c_1|^2\} \cdot E\{|c_2|^2\}}} \tag{3.5}$$

mit:

γ: Kohärenz;

$E\{\ \}$: Erwartungswert.

Der Betrag $|\gamma|$ beschreibt den *Grad der Kohärenz* in einem Wertebereich von $|\gamma| = [0;1]$. Demzufolge ergibt sich der *Dekorrelationsanteil* durch $|\gamma_{decorrel}| = (1 - |\gamma|)$.

Die Erfassung der Kohärenz ist in der Theorie über ein beliebig langes Intervall zwischen den Aufnahmezeitpunkten möglich. Werden längere Intervalle als $\Delta t = 24h$ betrachtet, so wird das Produkt der Kohärenz-Schätzung im Fall der *ERS-1/2 InSAR Daten* als *Langzeit-Kohärenz* bezeichnet, andernfalls als *Tandem-Kohärenz*. In der praktischen Anwendung zeigt sich jedoch die Erfassung der Kohärenz als zeitlich begrenzt, da eine *Zunahme des Dekorrelationsanteils mit wachsendem Zeitintervall* zu beobachten ist.

3.3.2.1. Dekorrelationseffekte

Grundvoraussetzung für das Entstehen von Kohärenz ist eine fehlerfreie Datenerfassung und -verarbeitung, um eine *phasentreue Prozessierung* der Daten zu gewährleisten. Neben dieser potentiellen Fehlerquelle gibt es diverse Störfaktoren, die individuelle Dekorrelationsanteile induzieren und damit das Entstehen von vollständig kohärenten SAR-Signalen in der Realität verhindern (vgl. Schwäbisch, 1995). Zu unterscheiden sind *aufnahmesystembedingte* und *temporale Dekorrelationseffekte*.

3.3.2.1.1. Aufnahmesystembedingte Dekorrelationseffekte

Der Begriff *aufnahmesystembedingte Störeinflüsse* beschreibt Dekorrelationseffekte, die aufgrund des *thermischen Rauschens* des Systems sowie durch veränderte *Aufnahmegeometrien* hervorgerufen werden.

Der *dekorrelierende Einfluss des Systemrauschens* γ_{SNR} tritt besonders wirkungsvoll in Erscheinung, wenn ein geringes Signal / Rausch - Verhältnis aufgrund eines schwachen Rückstreusignals herrscht und damit die Phaseninformation stark beeinträchtigt ist.

Der aufnahmegeometriebedingte Dekorrelationsanteil wird durch die abweichenden *Blickwinkel* der Sensoren aufgrund unterschiedlicher Orbitpositionen verursacht, die zu einer Variation der *Objektphasen* führen. In diesem Zusammenhang sind zwei Mechanismen zu unterscheiden: die scheinbare *Rotation der Streuelemente* aufgrund veränderter Orbitpositionen (divergierende bzw. konvergierende Orbits) sowie stark voneinander *abweichende Blickwinkel* aufgrund einer großen *effektiven Basislinie* zwischen den Sensoren.
Weicht die Lage eines Sensors nur geringfügig von der *Azimuth-Richtung* des zweiten Sensors ab, so führt dies zu einer scheinbaren *Rotation der Streuelemente* in Bezug auf die Blickrichtung. Durch die *Rotation* der Streuelemente verändern sich die Streueigenschaften der Objekte, wodurch ein *rotationsabhängiger Dekorrelationsanteil* $\gamma_{rotation}$ hervorgerufen wird.
Untersuchungen von Zebker & Villasenor (1992) zeigen, dass für die *Wellenlänge* des *ERS-1/2 SAR-Systems* mit $\lambda = 5{,}6cm$ bereits eine *Abweichung* der Orbits beider Satelliten voneinander um einen Rotationswinkelwinkel von $\Phi = 0{,}7°$ ausreicht, um eine völlige Signaldekorrelation zu verursachen. Trotz der Effektivität dieses Störeinflusses ist die tatsächliche Beeinträchtigung aufgrund der hohen Lagestabilität des ERS-1/2 SAR Systems über die Zeit als unbedeutend einzustufen.

Einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Signaldekorrelation verursachen dahingegen große *effektive Basislinien zwischen den Sensoren.* So wächst der Dekorrelationsanteil aufgrund unterschiedlicher Blickwinkel linear mit der Zunahme der *effektiven Basislinie* B_{eff}. Zebker & Villasenor (1992) beziffern diesen Effekt als den am stärksten kohärenzbeeinflussenden Faktor. Quantifizieren lässt sich der *basislinienbedingte Dekorrelationsanteil* $\gamma_{spatial}$ folgendermaßen:

$$\gamma_{spatial} = \frac{2 \cdot |B| \cdot \delta y \cdot \cos^2 \overline{\theta}}{\lambda \cdot r} \tag{3.6}$$

mit:

$\gamma_{spatial}$: basislinienbedingter Dekorrelationsanteil;

B_{eff} : Basislinie [m];

δy : räumliche Auflösung in Range-Richtung [m];

Gleichung (3.6) ermöglicht eine Abschätzung der *kritischen Basislinie* B_{crit} für ein *interferometrisches System*, welche die *Inkohärenz* ($\gamma = 0$) der Signale bedingt. Sie beträgt im Fall des *ERS-1/2 SAR-Systems* ca. $|B_{crit}| \approx 1100m$.

Aufgrund der mitunter sehr großen effektiven Basislinie (z.T. $|B_{eff}| = 800m$) weisen in der Praxis Langzeit-Kohärenz-Schätzungen oftmals eine starke Beeinträchtigung auf. Da die geometrische Lage der Aufnahmesysteme zueinander für die interferometrische Datenerfassung in den *Tandem-Missionen* ($\Delta t = 1d$) konfiguriert wurde, nimmt die *effektive Basislinie* bei größeren Zeitintervallen mitunter ungünstige Ausmaße an. Trotz der Anwendung von Korrekturverfahren, um den *basislinienbedingten Dekorrelationseinfluss* auf die Langzeit-Kohärenz zu kompensieren, zeigen insbesondere reliefierte Gebiete mitunter stark beeinträchtigte Ergebnisse. Der Störeinfluss äußert sich in einem hohen Rauschanteil.

Die Ursache für die starke Dekorrelation in reliefiertem Gelände ist die Tatsache, dass die in einer Auflösungszelle abgebildete Rückstreufläche mit abnehmendem *lokalen Einfallswinkel* θ_{loc} zunimmt, wodurch die räumliche Auflösung der Daten sinkt. Da in reliefiertem Gelände die Hangneigung von sensorzugeneigten Hängen geringe lokale Einfallswinkel besitzen, resultiert in diesen Bereichen eine geringere räumliche Auflösung als in der Ebene. Unter Berücksichtigung von Gleichung (3.6) erklärt diese Erkenntnis den verstärkten Dekorrelationsanteil in reliefierten Gebieten.

Da die *aufnahmesystembedingten Dekorrelationseffekte* bekannt sind und ihr Einfluss auf die Kohärenz abgeschätzt werden kann, lässt sich der resultierende Dekorrelationsanteil in den Daten weitgehend korrigieren.

3.3.2.1.2. Temporale Dekorrelationseffekte

Im Gegensatz zu den *aufnahmebedingten Störeinflüssen* ist die Möglichkeit einer Parametrisierung der *temporalen Dekorrelationseffekte* stark beschränkt. Die *temporale Signaldekorrelation* $\gamma_{temporal}$ wird durch Prozesse verursacht, die zu einer *zeitlichen Veränderung der Streuverhältnisse* in den Auflösungszellen führen.

Neben variierenden *Streugeometrien* oder *dielektrischen Eigenschaften* beeinträchtigen auch die *atmosphärischen Bedingungen* zu den Aufnahmezeitpunkten die Kohärenz. Grund hierfür sind variierende *optische Dicken* der Atmosphäre (Wassertropfen), welche die Transmission der elektromagnetischen Welle beeinflussen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Beeinträchtigung wird der *atmosphärische Einfluss* in der vorliegenden Studie vernachlässigt.

Die *Veränderungen der Streueigenschaften* treten je nach Landnutzungstyp und Ursache in *unterschiedlicher Stärke* und *Rate* auf. Folgende Ursachen können unterschieden werden:

Veränderungen der Streugeometrie

Die *Streugeometrie* natürlicher Flächen weist mitunter eine hohe Veränderlichkeit über die Zeit auf, die in ihrer Stärke und Rate in Abhängigkeit der Landnutzung und des einwirkenden Prozesses variiert. Ursachen für diese Veränderung sind dabei u.a. *atmosphärische Einflüsse*, wie Wind, Niederschlag und Temperatur, sowie *anthropogene Einflüsse* durch ackerbauliche Bearbeitungsmethoden.

Die Variation der *Veränderungsintensität* reicht von einer geringfügigen *Veränderung der Ausrichtung von Einzelstreuern* bis hin zu einer vollständigen, flächenhaften *Umgestaltung der Oberflächen* (z.B. Pflügen). Die somit veränderten *Objektphasen* führen zu einer Beeinträchtigung der Kohärenz.

Zwei konträre Beispiele für die unterschiedliche Veränderlichkeit der Streugeometrie sind *brachliegende* und *vegetationsbedeckte Flächen*, die stark voneinander abweichende Änderungsraten aufweisen:

So zeigen *vegetationsbedeckte Flächen* in Abhängigkeit der *Pflanzenarchitektur* und ihres *Biomasseaufkommens* sowie der Intensität des einwirkenden Prozesses eine *hohe Veränderlichkeit der Streugeometrie* über die Zeit. Die Pflanzen-

komponenten (Blätter, Zweige) reagieren sensibel auf den Einfluss der Atmosphäre.

Im Gegensatz dazu weisen *brachliegende Flächen* im allgemeinen eine *hohe Stabilität ihrer Streugeometrie* auf. Jedoch führen auch auf diesen Flächen diverse Prozesse zu Veränderungen, die hinsichtlich ihrer *Intensität, Rate* und *Häufigkeit* differenziert werden können:

Zum einen bedingen *kontinuierlich stattfindende Erosionsprozesse* eine stetige *Veränderung der Oberflächenrauhigkeit im Millimeterbereich.* Ihr Einfluss auf die Kohärenz ist in Abhängigkeit der *Länge des Zeitintervalls* zwischen den Aufnahmezeitpunkten unterschiedlich zu bewerten: Während die Beeinträchtigung der *Tandem-Kohärenz* in erster Näherung zu vernachlässigen ist, weisen *Langzeit-Kohärenz-Schätzungen* mit einem Zeitintervall von $\Delta t = 35d$ bereits eine deutliche Signaldekorrelation auf, die mit wachsender Intervalllänge weiter ansteigt. Verursacht wird dieses Verhalten durch die *Akkumulation des Veränderungsbetrages* über die Zeit. Dieser Prozess bedingt eine annähernd *lineare Kohärenzabnahme* mit wachsendem Zeitintervall (vgl. Zebker & Villasenor, 1992). Aufgrund der geringen Abnahmerate tritt eine völlige Signaldekorrelation erst nach sehr langen Zeitintervallen auf.

Überlagert wird die kontinuierliche Rauhigkeitsänderung durch *intensive, singuläre Ereignisse mit Rauhigkeitsänderungen im Zentimeterbereich*, die in kurzer Zeit zu einer vollständigen Signaldekorrelation führen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang *agrarwirtschaftliche Bearbeitungsmethoden,* wie das Pflügen, die zu einer starken Umgestaltung der Oberflächengeometrie führen. Im Gegensatz zu den *kontinuierlichen Erosionsprozessen* treten die *singulären Ereignisse* selten innerhalb großer Zeiträume auf.

Neben der Eigenschaft, die Erstellung digitaler Höhenmodelle negativ zu beeinflussen, kann die Sensibilität der Kohärenz hinsichtlich der Veränderung von Streugeometrien auch vorteilhaft als *Informationsquelle* genutzt werden. Da unterschiedliche *Landnutzungsklassen* spezifische Veränderungsraten aufweisen, eignet sich die Kohärenz für ihre Differenzierung in *Landnutzungsklassifikationen.* Insbesondere der stark ausgeprägte Unterschied in der Veränderungsrate *vegetationsbedeckter* und *vegetationsfreier Flächen* ermöglicht die Differenzierung

beider Klassen auf Basis der Kohärenz mit hoher Genauigkeit (vgl. Borgeaud & Wegmüller, 1996; Zebker & Villasenor, 1992).

Veränderung der dielektrischen Eigenschaften

Neben der *Variation der Streugeometrie* beeinflussen veränderte *dielektrische Eigenschaften* der Erdoberfläche das Kohärenz-Verhalten. Hervorgerufen werden diese Variationen durch eine Veränderung des *Wassergehaltes* des Bodens oder der Vegetationsdecke sowie durch *Frostwechsel* oder *Schneebedeckung*.
Nesti et al. (1995 & 1998) und Rudant et al. (1996) untersuchten die bodenphysikalischen Prozesse, die zu einer Verschiebung der absoluten Phase bei veränderten Feuchteverhältnissen führen, sowie deren Einfluss auf die Kohärenz. Dabei konnten drei interagierende Prozesse ermittelt werden:

a) Zum einen bewirken veränderte *dielektrische Eigenschaften* aufgrund der Feuchtevariation eine Phasenverschiebung, deren Ausmaß über den *Fresnel'schen Rückstreukoeffizienten* (Gleichung (4.3)) abgeschätzt werden kann.
b) Eine weitere Beeinflussung erfährt die Phase aufgrund einer veränderten Form des *Feuchteprofils*, wodurch eine Höhenänderung der *effektiven Streuschicht* im Boden und damit eine Veränderung der *Eindringtiefe* der elektromagnetischen Welle stattfindet. Dieser Effekt entspricht einer fiktiven Änderung der Geländehöhe.
c) Darüber hinaus führt die Feuchtevariation zu einer Veränderung der *geometrischen Struktur* der Böden. So bedingen *Schrumpfungs-* oder *Quellprozesse* eine *reale Veränderung der Geländehöhe*, deren Betrag und Richtung in Abhängigkeit der Bodenart variiert. Bei einer Feuchtezunahme führt so beispielsweise ein hoher Tonanteil zum Aufquellen des Bodens, während ein hoher Humusanteil bei gleichem Einfluss Sackungsprozesse auslöst.

Der Grad der Dekorrelation ist dabei abhängig von der *Stärke des Feuchtegradienten* zwischen beiden Aufnahmezeitpunkten. So zeigten Nesti et al. (1998), dass C-Band-Signale, die zu Zeitpunkten ähnlicher Feuchteverhältnisse

aufgenommen wurden, eine Korrelation von $\hat{\gamma} \geq 0{,}9$ aufweisen, während starke Feuchtegradienten zu einer Abnahme der Korrelation auf $\hat{\gamma} \geq 0{,}8$ führen.

Eine Korrektur dieses Effektes erweist sich angesichts der Vielzahl an beeinflussenden Parametern, wie *Frequenz, Rauhigkeit, Feuchtebetrag, Feuchtegradient* und *Form des Feuchteprofils,* als schwierig.

3.3.2.2. Die Kohärenz-Schätzung

Die diskutierten individuellen Dekorrelationsanteile führen multiplikativ zu einem *Gesamtdekorrelationsfaktor* $\gamma_{decorrel}$ (vgl. Zebker & Villasenor, 1992). Im Anschluss an die Korrektur der Daten hinsichtlich der bekannten *aufnahmesystembedingten Dekorrelationsteile* $\gamma_{SNR}, \gamma_{rotation}$ und $\gamma_{spatial}$, kann die Kohärenz ausschließlich in Abhängigkeit der nicht zu kompensierenden *temporalen Dekorrelationsanteile* $\gamma_{temporal}$ erfasst werden. Damit ist die *Kohärenz* ein *Maß für die Intensität und Rate einer zeitlichen Veränderung der Streuverhältnisse* in den Auflösungszellen.

In der Praxis ist die Kohärenz von *InSAR-Daten* nicht direkt gemäß Gleichung (3.5) messbar, sondern wird mit Hilfe eines geeigneten Parameters geschätzt. Als Schätzparameter dient der *komplexe Korrelationskoeffizient* $\hat{\gamma}$ (vgl. Schwäbisch, 1995):

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{n=1}^{N} c_1^{(n)} \cdot c_2^{*(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left|c_1^{(n)}\right|^2 \cdot \sum_{n=1}^{N} \left|c_2^{(n)}\right|^2}} \tag{3.7}$$

mit:

$\hat{\gamma}$: komplexer Korrelationskoeffizient;

n : Größe des Schätzfensters.

Gleich der Kohärenzmessung beziffert auch im Fall des *komplexen Korrelationskoeffizienten* der Betrag $|\hat{\gamma}|$ den *Schätzwert der Kohärenz*, während der *Winkel des Zeigers* in der komplexen Ebene den *Mittelwert der interferometrischen Phase* des Schätzfensters widerspiegelt.

Um die Varianz in der Kohärenzschätzung zu minimieren und damit eine hohe Genauigkeit des Produktes zu gewährleisten, findet eine räumliche Mittelung der Kohärenz über mehrere Auflösungszellen statt. Die Genauigkeit wächst dabei mit

der Größe des verwendeten Schätzfensters, während im gleichen Maße die räumliche Auflösung abnimmt.

Ähnlich dem Phasenrauschen aufgrund einer gestörten Phasenbeziehung, erhöht auch die *topographiebedingte Phasenvariation* innerhalb eines Schätzfensters die *Varianz der Kohärenzschätzung*. Dieses Verhalten führt somit zu einer Unterschätzung der Kohärenz in reliefiertem Gelände (vgl. Schwäbisch, 1995). Um diesen Störeinfluss zu kompensieren, erfolgt in der Kohärenzschätzung eine *Eliminierung der topographiebedingten Phaseninformation* aus dem Interferogramm, durch die *Subtraktion der absoluten Phase*. Diese entstammt der aktuellen interferometrischen Prozessierung. Diese Vorgehensweise führt dazu, dass die Langzeit-Kohärenzschätzung eine eingeschränkte Genauigkeit im Vergleich zur Tandem-Kohärenz aufweist. Da die Langzeit-Kohärenz-Schätzung aufgrund der Länge der Intervalle zwischen den Aufnahmezeitpunkten oftmals eine schwache Phasenbeziehung beschreibt, weist auch die interferometrische Phase der betreffenden Prozessierung nur eine eingeschränkte Genauigkeit auf.

4. Streuprozesse an der Erdoberfläche

Der vorliegende Abschnitt beleuchtet das Rückstreuverhalten von elektromagnetischen Wellen an der Erdoberfläche und veranschaulicht damit das Prinzip der radar-basierten Bodenfeuchteerfassung.
Der erste Teil verdeutlicht das Rückstreuverhalten von *brachliegenden Böden*. An ihrem Beispiel werden die *Einflussfaktoren* und *physikalischen Prozesse der Rückstreuung* aufgezeigt. Im Anschluss daran erfolgt die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse, um das komplexe *Streuverhalten von vegetationsbedeckten Flächen* zu erläutern.

4.1. Rückstreuverhalten von brachliegenden Böden

Das Rückstreuverhalten von brachliegenden Böden ist eine Funktion der Sensor- und Objekteigenschaften. Neben den *systembedingten Abbildungsparametern (Frequenz, Polarisation, Blickwinkel)* sowie dem *lokalen Einfallswinkel* wird die Stärke und räumliche Verteilung der Rückstreuung durch die *dielektrischen Eigenschaften* und die *geometrische Oberflächenstruktur* der Böden beeinflusst.
Die *dielektrischen Eigenschaften* beeinflussen dabei die Stärke des rückgestreuten Signals, indem sie das *Transmissionsverhalten* eines Mediums bestimmen. Demgegenüber steuert die *geometrische Struktur der Oberfläche* die *Richtungsverteilung der Rückstreuung* und damit das *Verhältnis von gespiegelter Reflexion zu diffuser Streuung* (vgl. Dobson & Ulaby, 1986a).
Neben dem direkt an der Grenzschicht rückgestreuten Anteil wird zusätzlich ein Teil der in das Medium transmittierten Energie am Sensor empfangen. Dieser Anteil wird an Inhomogenitäten im Medium zurückgestreut und verlässt dieses in stark abgeschwächter Form. Ulaby et al. (1982a) stufen den Volumenstreuanteil der Böden im Vergleich zum Betrag der Oberflächenstreuung als vernachlässigbar ein.
Im allgemeinen lässt sich der Zusammenhang zwischen *physikalischen Material- und geometrischen Oberflächeneigenschaften* und dem daraus *resultierenden*

Rückstreuverhalten von Böden folgendermaßen beschreiben (vgl. Ulaby et al., 1982a):

$$\sigma^0{}_{pp}(f,\theta) = D(f,pp,\theta) \cdot S(f,\theta) \tag{4.1}$$

In diesem Zusammenhang beschreibt die Funktion $D(f,pp,\theta)$ das *Rückstreuverhalten aufgrund der dielektrischen Eigenschaften* der Böden in Abhängigkeit von der verwendeten *Frequenz* f, des *Einfallswinkels* θ sowie der *Polarisationszustände* der gesendeten und empfangenen elektromagnetischen Welle pp. Die Funktion $S(f,\theta)$ beschreibt die *Rückstreuung aufgrund der Oberflächenrauhigkeit*. Sie wird gleichfalls durch die *Frequenz* f und den *Einfallswinkel* θ beeinflusst. Eine derartige *Funktion aus dielektrischen Eigenschaften und geometrischer Oberflächenstruktur* nutzen ein Großteil der *elektromagnetischen Rückstreumodelle*, um den Feuchtegehalt von Böden mit Hilfe der Mikrowellenfernerkundung zu beschreiben.

4.1.1. Dielektrische Eigenschaften

Die *Dielektrizität* beschreibt das Verhalten eines nichtleitenden Stoffes beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes und wurde von M. Faraday (1791 - 1867) erstmalig untersucht. Die *dielektrischen Eigenschaften* eines Stoffes entstehen dadurch, dass die ursprünglich ungeordneten Ladungsträger innerhalb eines neutralen Mediums beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes aus ihrer ursprünglichen Position gezwungen werden. Die positiven und negativen Ladungen richten sich gemäß der Feldrichtung in gegenüberliegende Positionen aus. Dieses Verhalten der Ladungsträger (Elektronen, Atomkerne, Ionen, Moleküle) wird als *Polarisation* bezeichnet und bedingt das Entstehen von *elektrischen Dipolen* (Marshall et al., 1999).

Unter den verschiedenen möglichen Formen der Polarisation ist die *dielektrische Polarisation* von Wasser der entscheidende Prozess für die Belange der Mikrowellenfernerkundung. Das H_2O Molekül weist aufgrund seiner dreieckigen Struktur und der ungleichen Atompartner eine asymmetrische Ladungsverteilung auf, die ein *permanentes Dipolmoment* induziert. Da sich das Elektron der Wasserstoffatome zum Zweck der Atombindung zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffatomen befindet, ist der Schwerpunkt der negativen Ladung zum

Sauerstoffatom verschoben. Damit weist die Seite der Wasserstoffatome eine positive Ladung auf. Das *permanente Dipolmoment* ermöglicht eine Polarisation der Ladungsträger bereits bei geringem Energieaufwand. Diese charakteristische Eigenschaft von flüssigem Wasser bedingt die starke Beeinflussung des Streuverhaltens im Mikrowellenbereich und damit seine entscheidende Rolle in der Radar-Fernerkundung (vgl. Shanda, 1986).

Der Parameter, der das Verhalten der *Dielektrizität* von Stoffen beschreibt, ist die *komplexe Dielektrizitätskonstante* (*relative Permeabilität)* ε_r (vgl. Shanda, 1986):

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \tag{4.2}$$

mit:

ε_r : komplexe Dielektrizitätskonstante;

ε_r': Permittivität;

ε_r'': Abschwächungsfaktor.

Der *Realteil der Dielektrizitätskonstante* ε_r', die sog. *Permittivität*, beschreibt die dielektrischen Eigenschaften eines Stoffes im Fall, dass keine Abschwächung stattfindet. Damit quantifiziert sie die *Reflexionseigenschaften* des Materials. Dahingegen gibt der *Imaginärteil* ε_r'' Auskunft über die Fähigkeit des Stoffes, Energie zu absorbieren und diese in eine andere Energieform (Wärmeenergie) umzuwandeln. Für die meisten natürlichen Stoffe gilt $\varepsilon_r'' << \varepsilon_r'$. Neben seiner Polarisationsfähigkeit sind die *dielektrischen Eigenschaften* eines Mediums abhängig von der *Frequenz*, der *Temperatur*, der *Salinität* sowie dem *Gehalt* an ferromagnetischen Substanzen.

Trifft eine elektromagnetische Welle (elektrisches Feld) auf ein Medium, so zeigt sich folgendes Verhalten: Während ein Teil der Energie direkt an der Grenzschicht reflektiert wird, dringt der restliche Teil in das Medium ein und wird dort mit zunehmender Tiefe aufgrund von Absorption und Streuung abgeschwächt. Gesteuert wird dieses Verhalten durch die dielektrischen Eigenschaften des Stoffes, welche die reflektierten und transmittierten Energieanteile definieren und die Stärke der Extinktion bestimmen.

Der Energiebetrag, der an Reflexion oder Absorption teilnimmt, kann über die *Reflexionseigenschaften* des Körpers quantifiziert werden, welche direkt mit seinen dielektrischen Eigenschaften gekoppelt sind. So beschreibt *die Fresnel'sche Reflektivität* die Reflexionseigenschaften einer glatten Oberfläche in Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften der beteiligten Medien Luft und Boden sowie des

Einfallswinkels θ der elektromagnetischen Welle. Aufgrund der Tatsache, dass die *Reflektivität* eines Körpers *(Verhältnis reflektierte Energie zu einfallender Energie)* in Abhängigkeit der *Polarisation* der einfallenden Welle variiert, ist bei Einfallswinkeln $\theta > 0$ eine getrennte Betrachtung von *horizontal polarisierten* und *vertikal polarisierten Wellen* nötig (vgl. Shanda, 1986). Im Nadir ($\theta = 0$) ist diese Differenzierung nicht nötig, so dass folgende vereinfachte Form der *Fresnel'schen Reflektivität* Γ_0 gültig ist:

$$\Gamma_0 = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon_r} - 1}{\sqrt{\varepsilon_r} + 1} \right|^2 \tag{4.3}$$

mit:

Γ_0: Fresnel'sche Reflektivität für $\theta = 0$.

Der aufgezeigte Zusammenhang gilt für die vereinfachenden Annahmen, dass in beiden Medien keine Absorption stattfindet ($\varepsilon_r'' = 0$), das Medium Luft die Eigenschaft von Vakuum besitzt und das betrachtete Material nicht magnetisch ist.

Für die Belange der Fernerkundung eignet sich die *Fresnel'sche Reflektivität* ausschließlich als Indikator, da im Gegensatz zu den vereinfachenden Annahmen natürliche Flächen grundsätzlich *raue Oberflächenverhältnisse* aufweisen, die eine Modifikation der Rückstreuprozesse bedingen.

Wie bereits erwähnt wurde, bestimmen die *dielektrischen Eigenschaften* eines Materials neben seiner *Dichte*, der *Wellenlänge* und *Polarisation* die *Eindringtiefe* einer elektromagnetischen Welle in ein Medium. Die Abschwächung der Energie aufgrund von Absorption und Streuung erfolgt hierbei exponentiell mit wachsender Tiefe. Die sog. *Eindringtiefe* δp einer elektromagnetischen Welle ist erreicht, wenn die verbleibende Energie auf das e^{-1}-fache ihres ursprünglichen Wertes abgeschwächt wurde. Die *Eindringtiefe* δp lässt sich folgendermaßen bestimmen (vgl. Ulaby, et al., 1986; Shanda, 1986):

$$\delta p = \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''} \tag{4.4}$$

mit:

δp: Eindringtiefe [cm];

Gleichung (4.4) ist zu entnehmen, dass die *Eindringtiefe* δp mit sinkender Absorption ε_r'' und wachsender Wellenlänge λ zunimmt. Bei fehlender Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften eines Bodens bietet die Literatur eine Reihe von Schätz-

formeln, die eine Abschätzung der Eindringtiefe in Abhängigkeit der verwendeten Frequenz erlauben. So beziffert Wilheit (1978) die Eindringtiefe δp einer elektromagnetischen Welle in einen Boden mit einem Zehntel der Wellenlänge. Mo (1980) schlägt dahingegen vor, die *Eindringtiefe* δp über den empirisch bestimmten Zusammenhang $\delta p = 0{,}06 - 0{,}1 \cdot \lambda$ abzuschätzen.

Aufgrund der Abhängigkeit von den dielektrischen Eigenschaften eines Mediums wird die Eindringtiefe von Mikrowellen in Böden stark von deren Wassergehalt bestimmt (siehe Abschnitt 4.1.1.1.). Abbildung 4.1 zeigt die Abnahme der Eindringtiefe δp mit wachsendem *volumetrischen Wassergehalt* m_v in einen idealisierten Lehmboden für verschiedene Frequenzbereiche und verdeutlicht die geringe Mächtigkeit des Oberflächenhorizontes, der in Abhängigkeit seines Feuchtegehaltes mit Hilfe des C-Bandes ($f = 4GHz$) fernerkundlich erfasst werden kann. So führt eine volumetrische Bodenfeuchte von nur $m_v = 0{,}2cm^3cm^{-3}$ bereits bei einer Tiefe von $\delta p = 2cm$ zum Erreichen der Eindringtiefe. Neben den dielektrischen Eigenschaften beeinflussen zusätzlich der *Homogenitätsgrad des Bodens* sowie die *Form des Feuchteprofils* (z.B. Sprungschicht) die Eindringtiefe einer elektromagnetischen Welle in einen natürlichen Boden. Obwohl theoretisch Eindringtiefen bis zu $\delta p = 10cm$ in trockene, sandige Böden im C-Band möglich sind, zeigen diverse Studien, dass in einer Vielzahl der Fälle nur Eindringtiefen zwischen $0{,}5 < \delta p < 2cm$ erreicht werden (vgl. Boisvert et al., 1997; Schmugge, 1983; Ulaby et al.,1978; Wilheit, 1978).

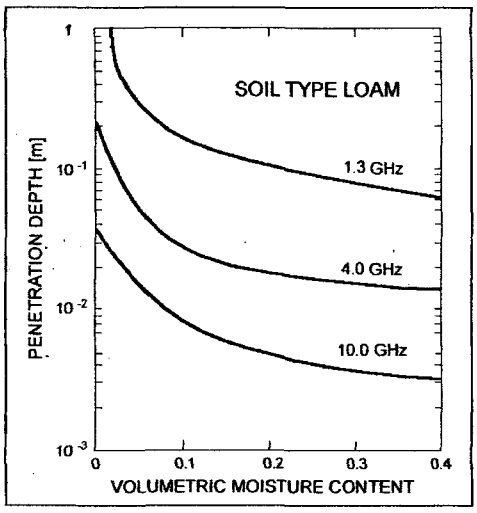

Abb. 4.1: Eindringtiefe in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der Frequenz. (Quelle: Ulaby et al., 1982, überarbeitet)

Da mit Hilfe der Fernerkundung unterschiedliche Objektklassen mit charakteristischen Rückstreueigenschaften erfasst werden, ist die Kenntnis der *dielektrischen Eigenschaften* der beobachteten Objekte für die Interpretation des rückgestreuten Signals notwendig. Dementsprechend erläutern die folgenden Abschnitte die dielektrischen Eigenschaften von *vegetationsfreien Böden* und *Flächen mit Vegetationsbedeckung*.

4.1.1.1. Vegetationsfreie Böden

Das Medium *Boden* ist ein *Dreiphasensystem*, bestehend aus einer *Bodenmatrix*, der *Bodenluft* und der *Bodenlösung* . Somit beschreibt der Begriff *„Boden"* eine Mixtur aus unterschiedlichen Stoffen, wodurch auch die dielektrischen Eigenschaften des Bodens von den jeweiligen Dielektrizitätskonstanten der beteiligten Komponenten sowie deren relativen Anteilen am Gesamtsystem abhängen.

Da trockene Böden bei niedrigen Frequenzen ($f < 5GHz$) nur einen Realteil der Dielektrizitätskonstante von $2 \leq \varepsilon_r' \leq 4$ aufweisen ($\varepsilon_r'' < 0{,}05$), während flüssiges Wasser einen Wert von $\varepsilon_r' = 80$ besitzt, werden die dielektrischen Eigenschaften eines feuchten Bodens hauptsächlich durch dessen Wassergehalt bestimmt (vgl. Ulaby, 1986). Aufgrund dieses starken Einflusses erreicht ein feuchter Boden einen Realteil der Dielektrizitätskonstante von bis zu $\varepsilon_r' \leq 20$ (vgl. Schmugge, 1983).
Im Vergleich zur Bodenfeuchte ist der Einfluss der Temperatur, der chemischen Zusammensetzung des Bodens (ferromagnetische Substanzen) und des Bodenwassers (Salzgehalt) auf die dielektrischen Eigenschaften zu vernachlässigen. Der exponentielle Anstieg des Realteils der Dielektrizitätskonstante ε_r' mit dem Wassergehalt eines Bodens ermöglicht die sensible Erfassung des Bodenfeuchteverhaltens mit Hilfe der Mikrowellenfernerkundung.
Die unterschiedlichen Charakteristika der Böden führen zu variierenden dielektrischen Eigenschaften trotz äquivalentem Wassergehalt. Bedingt wird dieses Verhalten durch unterschiedliche *Textureigenschaften (Korngrößenverteilung)* und die *mineralische Zusammensetzung* der Böden, die zu einer variierenden Stärke der Bindungskräfte führt, mit denen das Bodenwasser an den Bodenpartikeln gehalten wird. Diese Eigenschaft ermöglicht es flüssigem Bodenwasser, in zwei unterschiedlichen Zustandsformen in Erscheinung zu treten, deren jeweiliger Anteil am Gesamtaufkommen für die Radar-Fernerkundung von Bedeutung ist (vgl. Hallikainen et al., 1985):

a) ***Gebundenes Wasser* (Haftwasser):** Dieser Begriff bezeichnet eine feine Wasserschicht, welche durch das *Matrix*- und das *osmotische Potential* stark an die Oberfläche der Bodenpartikel gebunden ist. Die Menge an gebundenem Wasser ist direkt proportional zur spezifischen Oberfläche der

Bodenpartikel im Einheitsvolumen und damit eine Funktion der Korngrößenverteilung (Textur) und der mineralischen Eigenschaften.

b) ***Freies Wasser* (Gravitationswasser):** Da das Matrixpotential mit zunehmender Entfernung von den Bodenpartikeln sehr rasch abnimmt, kann sich das Bodenwasser bereits nach einigen Molekülschichten relativ frei in der Bodenmatrix bewegen. Gemäß Mitchel (1976) erfolgt eine exponentielle Abnahme der Bindungskräfte mit wachsendem Abstand eines Wassermoleküls zur Bodenpartikeloberfläche.

Aufgrund der unterschiedlichen Bewegungsfreiheit der Wasserdipole besitzt das Verhältnis von gebundenem zu freiem Bodenwasser Einfluss auf die Stärke der Dielektrizitätskonstante. So wird für die Polarisierung der Dipole von Haftwasser aufgrund der starken Bindungskräfte ein höherer Energieaufwand benötigt als für freies Bodenwasser. Dies bedingt einen Anstieg des Realteils der Dielektrizitätskonstante ε_r' mit wachsendem Anteil an freiem Bodenwasser.

Ausschlaggebend für die Größe der Anteile an freiem und gebundenem Bodenwasser ist dabei die *Lagerungsdichte* des Bodens (*Verhältnis von Trockenmasse zu Gesamtvolumen der drei Phasen eines ungestörten Bodens*), dessen mineralische Zusammensetzung sowie dessen *Gefüge* (*Korngrößenverteilung, Porenvolumen und -verteilung*).

Um eine räumliche Vergleichbarkeit der fernerkundlich erfassten Bodenfeuchte über große Gebiete mit unterschiedlichen Bodenarten zu gewährleisten, muss dieses bodenartenspezifische Verhalten berücksichtigt werden.

Abbildung 4.2 zeigt das feuchtebedingte Verhalten der dielektrischen Eigenschaften verschiedener Bodenarten im C-Band. Während die Textur eines trockenen Bodens in erster Näherung keinen Einfluss auf dessen dielektrische Eigenschaften besitzt, wächst der Realteil der Dielektrizitätskonstante ε_r' eines feuchten Bodens bei einer gegebenen Menge an Bodenwasser annähernd proportional mit steigendem Sandanteil (vgl. Hallikainen et al., 1985). Darüber hinaus zeigten Ulaby et al. (1978 & 1979), dass sich die Sensibilität des Rückstreuquerschnittes hinsichtlich einer Feuchteänderung $d\sigma^0/dm_v$ umgekehrt proportional zum Tongehalt des beobachteten Bodens verhält. Der Einfluss der Textur auf die dielektrischen Eigenschaften eines feuchten Bodens weist eine Abhängigkeit von der Frequenz auf. Trotz der Ähnlichkeit der Kurvenverläufe sowie der Achsenschnittpunkte von ε_r' und

ε_r'' nimmt die texturbedingte Variabilität der dielektrischen Eigenschaften eines feuchten Bodens mit wachsender Frequenz ab. So konnten Hallikainen et al. (1985) nachweisen, dass in einem betrachteten Frequenzbereich zwischen $1{,}4GHz \leq f \leq 18GHz$ der stärkste Textureinfluss auf die dielektrischen Eigenschaften eines feuchten Bodens bei einer Frequenz von $f \leq 5GHz$ stattfindet.

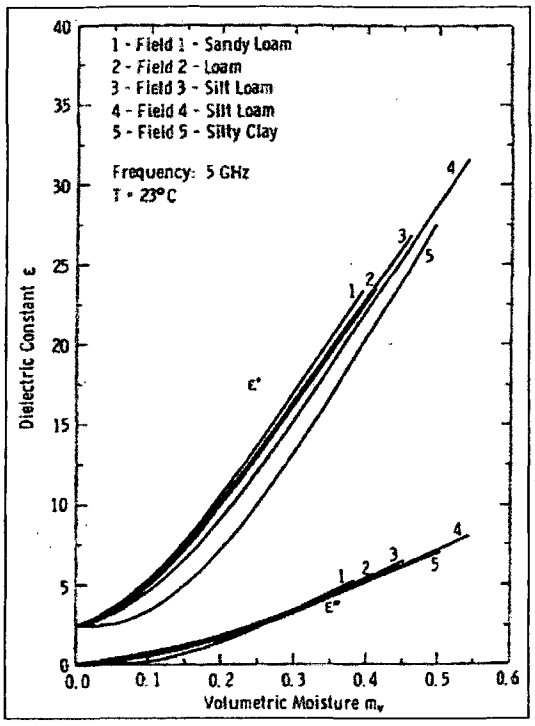

Abb. 4.2: Zusammenhang zwischen ε_r', ε_r'' und m_v für verschiedene Böden (Quelle: Hallikainen et al., 1985)

Zusammenfassend ergibt sich die komplexe Dielektrizitätskonstante eines feuchten Bodens als Funktion folgender Parameter (vgl. Hallikainen, et al., 1985):

a) Frequenz der einfallenden elektromagnetischen Welle;
b) volumetrischer Wassergehalt;
c) Bodentextur und Lagerungsdichte (gebundenes / freies Bodenwasser);
d) Salinität der Bodenlösung;
e) Temperatur der Bodenlösung;
f) Form der Wassereinschlüsse;
g) Gehalt an ferromagnetischen Substanzen.

Die Literatur bietet diverse Modelle, um mit Hilfe der dielektrischen Eigenschaften der Komponenten die Dielektrizitzätskonstante eines feuchten Bodens zu beschreiben (siehe: Dobson et al., 1985; Hallikainen et al., 1985; Wang, 1980; Wobschall, 1977). Dabei handelt es sich großteils um empirische Modelle, welche das beobachtete Verhalten in Abhängigkeit der Frequenz unter Einbeziehung des Bodenwassergehaltes und der Korngrößenverteilung mit Hilfe polynomischer Funktionen nachzeichnen. So ermittelten Hallikainen et al. (1985) folgende Gleichungen für die Abschätzung von ε_r' und ε_r'' bei einer Frequenz von $f = 6GHz$:

$$\varepsilon_r' = (1{,}993 + 0{,}002 \cdot Sa + 0{,}015 \cdot Cl) + (38{,}086 - 0{,}176 \cdot Sa - 0{,}633 \cdot Cl) \cdot m_v + (10{,}72 + 1{,}256 \cdot Sa + 1{,}522 \cdot Cl) \cdot m_v^2 \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_r'' = (-0{,}123 + 0{,}002 \cdot Sa + 0{,}003 \cdot Cl) + (7{,}502 - 0{,}058 \cdot Sa - 0{,}116 \cdot Cl) \cdot m_v + (2{,}942 + 0{,}452 \cdot Sa + 0{,}543 \cdot Cl) \cdot m_v^2 \quad (4.6)$$

mit:

Sa: Sandanteil [%];

Cl: Tonanteil [%].

Aufgrund ihrer empirischen Entstehungsgeschichte weisen die Modelle eine eingeschränkte Genauigkeit hinsichtlich der Vorhersage der dielektrischen Eigenschaften auf. Zu beachten ist darüber hinaus, dass gleich dem Modell von Hallikainen et al. (1985) ein Großteil der Modelle auf der amerikanischen Korngrößenklassifikation des *U.S. Department of Agriculture* basiert. Wie Tabelle 4.1 verdeutlicht, sind die Unterschiede zur europäischen Korngrößenklassifikation dabei jedoch gering.

Korngrößen-klassen	Amerikanische Korngrößenklassifikation	Europäische Korngrößenklassifikation
Sand	$d > 0{,}05mm$	$2mm \geq d > 0{,}063mm$
Schluff	$0{,}002 \leq d \leq 0{,}05mm$	$0{,}002mm \leq d \leq 0{,}063mm$
Ton	$d \leq 0{,}002mm$	$d < 0{,}002mm$

Tab. 4.1: Unterschiede in der Definition der amerikanischen und europäischen Korngrößenklassifikation

Um den Einfluss der Bodentextur auf das feuchtebedingte Signal zu minimieren, schlagen Hallikainen et al. (1985) und Dobson et al. (1984) vor, den *volumetrischen Wassergehalt* m_v für die Feuchtebeschreibung zu verwenden, da die komplexe Dielektrizitätskonstante eines Bodens eine Funktion des Wasservolumenanteils ist, der sich direkt proportional zur Anzahl der Wasserdipole im Einheitsvolumen verhält. Damit konnten die Studien nachweisen, dass sich die Rückstreusensibilität bezüglich einer Änderung der volumetrischen Bodenfeuchte $d\sigma^0/dm_v$ annähernd unabhängig von der Bodentextur verhält.

Eine häufig in der Fernerkundung verwendete Größe, die gleichfalls als weitgehend unbeeinflusst von Textureffekten gilt, ist der *Prozent-Feldkapazität-Index* $m_{\%\,field}$ (vgl. Dobson et al., 1984). Er quantifiziert die *volumetrische Feuchtigkeit in Prozent des Feuchtegehaltes zum Zeitpunkt der Feldkapazität* eines Bodens. So verwenden insbesondere Change-Detection-Ansätze den *Prozent-Feldkapazität-Index* $m_{\%\,field}$,

da diese Verfahren die Bodenfeuchte in bezug auf beobachtete Feuchteextremzeitpunkte beschreiben und das messbare Feuchtemaximum in einem Großteil der Fälle die Feldkapazität darstellt.

4.1.1.2. Die Vegetationsdecke

Auf dem Weg durch eine Vegetationsdecke wird das Radar-Signal aufgrund von Absorptions- und Streuprozessen an den Pflanzenkomponenten modifiziert. Gleich dem brachliegenden Boden wird dabei die Stärke dieser Prozesse durch die dielektrischen Eigenschaften der Pflanzen bedingt. Da trockene Vegetationskomponenten einen Realteil der Dielektrizitätskonstante zwischen $1{,}5 \leq \varepsilon_r' \leq 2$ aufweisen ($\varepsilon_r'' < 0{,}1$), werden die dielektrischen Eigenschaften von Pflanzen hauptsächlich durch ihren Wassergehalt bedingt. Der hohe Wassergehalt von grüner Vegetation von $80\% \leq m_v \leq 90\%$ induziert intensive Streu- und Absorptionsprozesse. Selbst verholzte Komponenten weisen noch einen Wasserhalt von $m_v \leq 50\%$ auf. Bei starkem Biomasseaufkommen, hoher Frequenz und großen Einfallswinkeln resultiert daher das Signal oftmals ausschließlich aus den Rückstreuprozessen an Vegetationskomponenten.

4.1.2. Die Oberflächenrauhigkeit

Neben den dielektrischen Eigenschaften des Materials beeinflusst die *Rauhigkeit der Bodenoberfläche* das Rückstreuverhalten von elektromagnetischen Wellen. Während die dielektrischen Eigenschaften die Stärke der Rückstreuung über den Anteil an gestreuter und absorbierter Energie bestimmen, steuert die *geometrische Struktur der Oberfläche* die *Richtungsverteilung der Oberflächenstreuung* und damit das *Verhältnis von gerichteter Reflexion zu diffuser Streuung* (vgl. Dobson & Ulaby, 1986a). Zu beachten ist dabei, dass die Rauhigkeit einer Oberfläche ein relatives Maß ist, da ihre Stärke in Relation zur Wellenlänge der einfallenden elektromagnetischen Welle nebst deren Einfallswinkel zu bewerten ist.
Um das Streuverhalten elektromagnetischer Wellen an Oberflächen zu beschreiben, setzte Lord Rayleigh 1877 die Wellenlänge λ und den Einfallswinkel θ mit der mittleren Höhe der Rauhigkeitselemente z in Beziehung und definierte darüber eine

Grenzwertfunktion, die Oberflächen in die Kategorien *„glatt"* und *„rau"* einteilt. Überschreitet die *Höhe der Rauhigkeitselemente* z den Grenzwert des *Rayleigh-Kriteriums* (Gleichung (4.7)), so gilt die Oberfläche als *„rau"*:

$$z > \frac{\lambda}{8\cos\theta} \tag{4.7}$$

mit:
z : Rauhigkeitshöhe [cm];

Für die Charakterisierung der Rauhigkeit im Bereich des Mikrowellenspektrums erwies sich das strengere *Fraunhofer-Kriterium* (4.8) als besser geeignet (vgl. Ulaby et al., 1981). Verglichen mit dem *Rayleigh-Kriterium* (4.7) stuft die Grenzwertfunktion des *Fraunhofer-Kriteriums* eine Fläche bereits bei einer geringeren *Höhe der Rauhigkeitselemente* z als *„rau"* ein:

$$z > \frac{\lambda}{32\cos\theta} \tag{4.8}$$

In Abhängigkeit von der Stärke der Oberflächenrauhigkeit sind folgende Formen des Streuverhaltens möglich: Erweist sich eine Oberfläche im Vergleich zur Wellenlänge als *„glatt"*, so überwiegt die *gespiegelte Reflexion* im Verhältnis *Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel*. Da im Fall der Reflexion die Phase der Welle erhalten bleibt, spricht man vom *kohärenten Streuanteil*. Mit zunehmender Oberflächenrauhigkeit sinkt der in die Gegenrichtung des Sensors reflektierte Energieanteil zu Gunsten des *diffusen Streuanteils*. Die Energie der elektromagnetischen Welle wird dabei gleichmäßig in alle Richtungen des Halbraumes verteilt, wodurch das am Sensor messbare Rückstreusignal zunimmt (Ulaby et al., 1982). Der diffuse Anteil wird als *nichtkohärenter Streuanteil* bezeichnet, da im Gegensatz zum reflektierten Anteil die Phasenbeziehung beim Prozess der diffusen Streuung zerstört wird.
Allgemein lassen sich aufgrund ihrer Erscheinungsform zwei unterschiedliche Kategorien der Oberflächenrauhigkeit unterscheiden:

a) ***Deterministische Oberflächenrauhigkeit***: Die Oberflächen weisen eine periodische Variation der Oberflächenhöhen über einem gegebenen Profil auf.
b) ***Zufällige Oberflächenrauhigkeit:*** Die Oberflächen zeigen eine zufällige Rauhigkeitsverteilung über einer Referenzhöhe.

Darüber hinaus tritt die Oberflächenrauhigkeit in unterschiedlichen Skalenbereichen in Erscheinung. Diese weisen gemäss der erwähnten Kategorien jeweils ein

spezifisches Rauhigkeitsverhalten auf. Von Interesse für die Radarfernerkundung sind dabei (vgl. Römkens & Wang, 1984):

a) ***Kleinskalige Oberflächenrauhigkeit:*** Zufällige Verteilung der Oberflächenhöhen über einer Referenzhöhe (Pflügen) ($2 \leq s < 100\ mm$);
b) ***Mesoskalige Oberflächenrauhigkeit:*** Azimuthabhängige und meist periodische Rauhigkeitsmuster (Ackerfurchen, Wälle) ($100 \leq s \leq 200\ mm$);
c) ***Großskalige Oberflächenrauhigkeit:*** Reliefbedingte Geländeondulationen, die aufgrund ihrer Neigung und Exposition den lokalen Einfallswinkel entscheidend mitbestimmen. Sie werden der deterministischen Rauhigkeit zugeordnet ($s > 200\ mm$).

In Bezug auf die *kleinskalige Oberflächenrauhigkeit* sind im internationalen Vergleich grundsätzlich drei unterschiedliche Methoden des Ackerbaus zu unterscheiden, die hinsichtlich der Stärke der resultierenden Oberflächenhöhenvariation absteigend geordnet sind: *Pflügen, Eggen* und *Saatbeetbereitung*. Während das *Pflügen* einen tiefgründigen Eingriff in die Bodenkrume darstellt, der mitunter in einer vertikalen Drehung der obersten Bodenschicht um 180° gipfelt, weist ein *geeggtes Feld*, ähnlich eines mit einer Harke bearbeiteten Bodens, eine oberflächige Rippelung auf. Im Gegensatz zu den Erstgenannten führt die *Saatbeetbereitung* mit dem Entstehen von seichten, parallel zueinander verlaufenden Rillen eher zu einer Glättung der Bodenoberfläche. Als vorbereitende Maßnahmen vor der Getreidesaat werden die Methoden in der genannten Reihenfolge nacheinander durchgeführt, um eine optimale Nährstoffzusammensetzung des Bodens für das Saatwachstum zu gewährleisten.

Die mathematische Beschreibung der *zufallsverteilten Oberflächenrauhigkeit* erfolgt im allgemeinen über die Betrachtung der *Höhenvariation über einer glatten Referenzfläche* und ihrer *räumlichen Veränderung entlang der Oberfläche*. In diesem Zusammenhang finden auch die Begriffe *vertikale* und *horizontale Rauhigkeit* Verwendung.

Als Parameter zur Beschreibung der *vertikalen Rauhigkeit* dient häufig die *Standardabweichung der Höhenvariation über der mittleren Oberflächenhöhe*, die sog. *rms-Höhe* s (*root-mean-square-hight*). Für die Charakterisierung der *horizontalen Rauhigkeit* findet die *Korrelationslänge* l Verwendung. Sie wird mit Hilfe der *Autokorrelationsfunktion der Oberflächenhöhe* ermittelt und beschreibt die

Distanz auf einer horizontalen Ebene, nach der zwei Punkte sich statistisch unabhängig voneinander verhalten.

Ist die *Oberflächenhöhe* $z(x,y)$ statistisch unabhängig vom Azimuthwinkel, so kann die Rauhigkeitsbeschreibung, anstatt bezogen auf die Fläche $(z(x,y))$, eindimensional entlang eines Profils $(z(x))$ erfolgen. Für die praktische Anwendung eignet sich die diskrete Darstellungsweise, indem das Profil in n einzelne *Abschnitte* der *Länge* Δx zerlegt wird, für welche die jeweilige *Oberflächenhöhe* z_i bestimmt wird. Bei der Wahl der Länge der Profilabschnitte Δx ist der Zusammenhang $\Delta x < 0{,}1 \cdot \lambda$ zu beachten. Die *rms-Höhe* s ergibt sich somit in der diskreten Darstellungsweise wie folgt (vgl. Fung, 1994):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \tag{4.9}$$

mit:

s :	rms-Höhe $[cm]$;
z_i :	Oberflächenhöhe des Profilabschnittes i $[cm]$;
$\bar{z}$:	mittlere Oberflächenhöhe des gesamten Profils $[cm]$;
n :	Anzahl der Profilabschnitte.

Die Bestimmung der *Korrelationslänge* l erfolgt über die Betrachtung der *Autokorrelationsfunktion*, welche die Ähnlichkeit zwischen den *Oberflächenhöhen* z an zwei *Punkten* i und $j+i-1$ beschreibt. Sie sind durch die Strecke $x' = (j-1)\Delta x$ voneinander getrennt. Gleichung (4.10) zeigt den diskreten Fall der *normalisierten Autokorrelationsfunktion* $\rho(x')$ für den eindimensionalen Fall (vgl. Fung, 1994):

$$\rho(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i \cdot z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^{N} z_i^{\,2}} \tag{4.10}$$

mit:

$\rho(x')$:	normalisierte Autokorrelationsfunktion;
z_i :	Oberflächenhöhe am Punkt i $[cm]$;
z_{j+i-1} :	Oberflächenhöhe am Punkt $j+i-1$ $[cm]$;
x':	Strecke zwischen beiden Punkten der Länge $x' = (j-1)\Delta x$ $[cm]$.

Die *Korrelationslänge* l ist nun die Profillänge x', bei der die *Autokorrelationsfunktion* den Wert $\rho(l) = e^{-1}$ erreicht (vgl. Fung, 1994). Die Ober-

flächenhöhen der *Punkte* $j + i - 1$ entlang des Profils, die um eine *Strecke* x' größer oder gleich der *Korrelationslänge* l vom *Ausgangspunkt* i entfernt liegen, weisen eine statistische Unabhängigkeit voneinander auf. Im Fall einer *glatten Oberfläche* gilt somit $l = \infty$.

4.1.3. Elektromagnetische Rückstreumodelle – Das *Geometric Optics Model*

Wie bereits in Kapitel 2. Erläuterung fand, beschreiben elektromagnetische Rückstreumodelle das Rückstreuverhalten von vegetationsfreien Flächen in Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften und der Oberflächenrauhigkeit. Da in der vorliegenden Studie das *Geometric Optics Model (GOM)* (Beckmann & Spizzichino, 1963) Anwendung fand (siehe: Kapitel 10.2.2.), erfolgt im weiteren die Beschreibung dieses theoretischen Modells.

Das monostatische elektromagnetische Rückstreumodell *GOM* ist eine Skalar-Approximation an das *Kirchhoff'sche Modell* und ermöglicht auf Basis der *Oberflächenrauhigkeit* und der *dielektrischen Eigenschaften* die Beschreibung des nichtkohärenten Rückstreuterms einer elektromagnetischen Welle an *rauen Oberflächen*. Der kohärente Streuterm findet aufgrund seiner untergeordneten Bedeutung bei größeren Einfallswinkeln keine Beachtung (vgl. Ulaby et al., 1986). Im Gegensatz zum bistatischen *Kirchhoff'schen Modell* ist die Beschreibung des Rückstreuverhaltens dabei auf einen Blickwinkel beschränkt, der dem Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle entspricht. Da SAR-Systeme in der Regel monostatische Systeme sind, ist diese Beschränkung des *GOMs* unerheblich für die Belange der Radar-Fernerkundung.

Gleich dem *Kirchhoff'schen Modell* wurde auch das *GOM* für die Quantifizierung der *Einfachstreuung* an Oberflächen entwickelt und beschreibt daher ausschließlich das Rückstreuverhalten ko-polarisierter Wellen (*HH, VV*). Multiple Streuprozesse und Volumenstreuung, welche den depolarisierten Anteil des Rückstreusignals erhöhen, werden aufgrund ihrer untergeordneten Stellung im Prozess der Rückstreuung an vegetationsfreien Böden nicht berücksichtigt (vgl. Ulaby et al., 1986).

Die Beschreibung der Oberflächen, die als wellenförmig angenommen werden, erfolgt mit Hilfe eines skalaren Facettenmodells, das Tangenten an die Rundungen annähert. Die Streuung findet an diesen als glatt angenommenen Facetten statt, deren *Neigungen, der sog. rms-Neigung* m, in Abhängigkeit der Oberflächen-

rauhigkeit variiert. Die Beschreibung der Oberflächenrauhigkeit erfolgt wahlweise über die Verwendung einer *gauß'schen* (Gleichung (4.11)) oder *exponentiellen* (Gleichung (4.12)) *Autokorrelationsfunktion*, für welche jeweils eine individuelle Definition der *rms-Neigung* m gegeben ist (vgl. Ulaby et al., 1986):

$$m = \sqrt{2}\frac{s}{l} \tag{4.11}$$

$$m = \frac{s}{l} \tag{4.12}$$

mit:
m: rms-Neigung;

Gemäß Gleichung (4.11) und (4.12) steigt die *rms-Neigung* m mit wachsender *vertikaler* und sinkender *horizontaler Rauhigkeitskomponente*.

Das *Geometrical Optics Model* ist eine Funktion der *Fresnel'schen Reflektivität im Nadir* Γ_0 (4.3), der rms-*Neigung* m und des *Einfallswinkels* θ (vgl. Ulaby et al., 1986):

$$\sigma^0(\theta) = \frac{\Gamma_0 \exp(\frac{-\tan^2\theta}{2m^2})}{2m^2 \cdot \cos^4\theta} \tag{4.13}$$

mit:
σ^0: Rückstreuquerschnitt [$m^2 m^{-2}$];
Γ_0: Fresnel'sche Reflektivität im Nadir;

Aufgrund der Tatsache, dass das *GOM* auf einer Reihe vereinfachender Annahmen basiert, ist sein Gültigkeitsbereich beschränkt. Für seine Anwendung müssen daher folgende Prämissen in Bezug auf die Oberflächenrauhigkeit erfüllt sein (vgl. Ulaby et al., 1986):

a) ***horizontale Rauhigkeit:*** die *Korrelationslänge* l muss größer als die verwendete *Wellenlänge* λ sein, so dass das Kriterium $kl > 6$ erfüllt ist, wobei $k = 2\pi \cdot \lambda^{-1}$ die *Wellenzahl* ist.

b) ***vertikale Rauhigkeit:*** das Kriterium $(2ks \cdot \cos\theta)^2 > 10$ beschränkt das Modell auf *raue Oberflächen* mit großer *rms-Höhe* s.

c) ***Zusammenhang zwischen horizontaler und vertikaler Rauhigkeit:*** Zwischen der *Korrelationslänge* l und der *rms-Höhe* s muss die Beziehung $l^2 > 2{,}76s \cdot \lambda$ erfüllt sein.

4.2. Rückstreuverhalten von vegetationsbedeckten Flächen

Auf dem Weg einer elektromagnetischen Welle durch die Vegetationsdecke kommt es an den *Pflanzenkomponenten* (Blätter, Äste, Stämme) zu *Absorptions- und Streuprozessen*. Diese Interaktion bedingt einerseits eine *Abschwächung des transmittierten Signalteils* und induziert andererseits einen eigenständigen *vegetationsbedingten Rückstreuanteil*. Wie im Fall der Bodenrauhigkeit erweisen sich die Pflanzenkomponenten als streuwirksam, welche eine der Wellenlänge vergleichbare Größe besitzen. Die Stärke der Streu- und Absorptionsprozesse wird maßgeblich durch den Wassergehalt der Pflanzenkomponenten bestimmt.

Aufgrund der unterschiedlichen Dimensionen, Anordnungen und dielektrischen Eigenschaften der Pflanzenkomponenten sowie deren unregelmäßiger Verteilung im Volumen finden neben der Einzelstreuung an der Oberfläche der Vegetationsdecke Streuprozesse im Medium Vegetation in Form der *Volumenstreuung* statt. Dabei wird ein Teil des Signals an den Pflanzenkomponenten mehrfach gestreut und abgeschwächt, bevor es den Boden unter der Vegetationsdecke oder den Sensor erreicht. Die *Stärke des rückgestreuten Signals* ergibt sich somit als *Funktion der Pflanzendichte und –höhe* (*Biomasseaufkommen*) und der Unterschiede in den *dielektrischen Eigenschaften* innerhalb der Vegetationsdecke. Die Steuerung der *Richtungsverteilung* der Rückstreuung erfolgt dahingegen über die *geometrische Struktur und räumliche Ausrichtung* (*Architektur*) der rückstreurelevanten Pflanzenkomponenten.

Zusätzlich zu den Pflanzeneigenschaften beeinflussen gleichfalls die Sensoreigenschaften *Frequenz*, *lokaler Einfallswinkel* und *Polarisation* der elektromagnetischen Welle das Streuverhalten von Pflanzen (siehe Kapitel 3.1). Da laut Attema & Ulaby (1978) nur maximal ein Prozent des Volumens des Mediums Vegetation aus Biomasse besteht, sind Eindringtiefen von mehreren Metern möglich. Dies führt im Fall von biomassearmer oder trockener Vegetation zu einem hohen Rückstreuanteil des Bodens unterhalb der Vegetationsdecke.

In der Vergangenheit wurden diverse Modelle zur Beschreibung des Rückstreuverhaltens von vegetationsbedeckten Flächen entwickelt (siehe. Kapitel 2.1.). So stellten Attema & Ulaby (1978) das vergleichsweise einfache *Cloud Model* vor, das die Rückstreuung von vegetationsbedeckten Flächen auf Basis der *Strahlungstransfertheorie* beschreibt. Das *Cloud Model* behandelt die Vegetationsdecke als

homogene Wasserwolke, deren gleichförmig im Raum verteilte Wassertröpfchen die Streukomponenten der Vegetation darstellen.

Da die Energie des in der Strahlungstransfertheorie berücksichtigten *Interaktionsterms Pflanze - Boden* σ^0_{int} im allgemeinen sehr klein ist im Vergleich zur *Volumenstreuung in der Vegetation* σ^0_{vol} und der *Oberflächenstreuung am Boden* σ^0_{soil} (Ausnahme: hohe Bodenfeuchte, großer Einfallswinkel), wird sein Beitrag im *Cloud Model* vernachlässigt.

Auf dem Weg der transmittierten Strahlung zur Bodenoberfläche und zurück zum Sensor wird ein Teil des Signals im Medium Vegetation durch Absorption und Streuung ausgelöscht. Damit erfährt das *Bodensignal* σ^0_{soil} eine doppelte *Abschwächung*, die durch den Parameter χ^2 in Gleichung (4.14) Berücksichtigung findet (Ulaby et al., 1979):

$$\sigma^0_{veg} = \sigma^0_{vol} + \sigma^0_{soil} \cdot \chi^2 \tag{4.14}$$

mit:

χ^2: Parameter, der die doppelte Signalabschwächung beschreibt.

Somit ist das *rückgestreute Signal eines vegetationsbedeckten Bodens* eine *Funktion der Streueigenschaften des Bodens* und der *Vegetationseigenschaften Pflanzenhöhe und –dichte* (*Biomasseaufkommen*), *Wassergehalt* und *Architektur*.

Da die *Weglänge* durch das Medium Vegetation mit wachsendem Einfallswinkel zunimmt, wird ihr Einfluss auf die verstärkte Extinktion im *Abschwächungsfaktor* χ^2 berücksichtigt.

Auf Flächen mit hohem Biomasseaufkommen, wie z.B. Wald im C-Band, verschwindet aufgrund der starken Extinktion der Term der *Oberflächenstreuung* σ^0_{soil} mitunter gänzlich, so dass das rückgestreute Signal ausschließlich durch *Volumenstreuung* verursacht wird. Dabei wächst die rückgestreute Energie der Volumenstreuung mit steigendem Biomasseaufkommen bis zu einem Punkt, an dem die Abschwächung innerhalb der Vegetation einen weiteren Anstieg der rückgestreuten Energie trotz weiter ansteigendem Biomasseaufkommens verhindert. Diese Signalsättigung ist ein häufig zu beobachtendes Phänomen in der Erfassung forstlicher Parameter mit Hilfe der Mikrowellenfernerkundung.

Wie Abbildung 4.3 verdeutlicht, führt eine Zunahme des Biomasseaufkommens zu einem sinkenden Einfluss der Bodenfeuchte auf das Rückstreusignal, bis dieser gänzlich maskiert wird. Dieses Verhalten beschränkt eine Erfassung der

Bodenfeuchte unter einer Vegetationsdecke auf Flächen, deren Biomasseaufkommen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit und Rückstreusignal in Abhängigkeit der Frequenz erkennen lässt. Darüber hinaus zeigt sich, dass der Einfluss der Vegetation auf das Rückstreusignal, insbesondere im Bereich von geringem Biomasseaufkommen, mit steigender Bodenfeuchte abnimmt. Dies bedingt, dass auf Flächen mit spärlicher Vegetationsbedeckung, die Genauigkeit der radar-basierten Bodenfeuchtebeschreibung mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt.

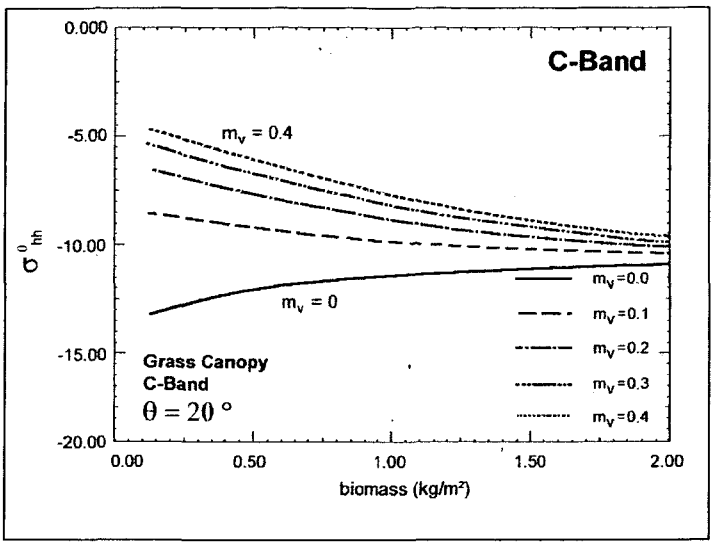

Abb. 4.3: Variation des Rückstreuquerschnitts in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und des Biomasseaufkommens (Quelle: Ulaby et al., 1996, überarbeitet)

5. Die Untersuchungsgebiete

In der vorliegenden Studie fanden zwei unterschiedliche semiaride Untersuchungsgebiete in Spanien Verwendung. Es handelt sich zum einen um den Mündungsbereich der Flüsse *Guadiamar* und *Guadalquivir* in Südspanien („*Sevilla*") und zum anderen um einen Teilbereich des Einzugsgebietes des Flusses *Duero* in Zentralspanien („*La Guarena*"). Das vorliegende Kapitel beschreibt die physisch-geographischen Gegebenheiten beider Untersuchungsgebiete

5.1. Das Untersuchungsgebiet „*Sevilla*"

Das Untersuchungsgebiet „*Sevilla*", das als Grundlage für die Kohärenz- und Intensitätsanalysen diente, befindet sich in der Region *Andalusien*. Es umfasst mündungsnahe Teilbereiche der Einzugsgebiete der Flüsse *Guadalquivir* und *Guadiamar*. Das Zentrum des Gebietes bildet die Hauptstadt Andalusiens, *Sevilla*. Bedingt durch die Größe einer *ERS-1/2 SAR Szene* umfasst das Untersuchungsgebiet eine Fläche von $A = 10.000 km^2$ und befindet sich im fruchtbaren Becken des *Guadalquivir*, dem Kernbereich der andalusischen Landwirtschaft (vgl. Lautensach, 1964).

5.1.1. Geomorphologie

Andalusien gliedert sich in drei geomorphologische Teilbereiche: *Sierra Morena*, *andalusisches Hochland* und *andalusisches Tiefland*. Der Großteil der Fläche des Untersuchungsgebietes „*Sevilla*" befindet sich im Bereich des *andalusischen Tieflandes*, dessen Landschaft entscheidend durch den Einfluss des *Guadalquivir* geprägt wurde. In seinem Becken sammelten sich im Eozän und Miozän feinkörnige maritime Sedimente (graugrüner Mergel) an, die eine Mächtigkeit bis zu $z = 1000m$ aufweisen. Nach der Bildung des *Guadalquivir* in Pliozän schnitt sich dieser in Folge mehrerer Hebungsprozesse im Spätpliozän und Quartär in die Sedimente ein, so dass heute vier fossile Terrassenstufen anzutreffen sind (vgl. Lautensach, 1964). Die Talsohle, die sog. *Campina*, weist ein sanft gewelltes Hügelland auf, über das

einzelne aus härteren Gesteinen (z.B. Kalkgestein) bestehende Erhebungen aufragen. Eine dieser Erhebungen stellt die westlich von *Sevilla* aufragende Rumpffläche der *Aljarafe* ($h = 187m$) dar, welche durch den *Guadiamar* zerschnitten wird und markant in Form einer schiefen Ebene im digitalen Höhenmodell in Abbildung 8 im Anhang in Erscheinung tritt. In den nördlichen und nordwestlichen Teilen des Untersuchungsgebietes treten im Bereich des Anstieges zur *Sierra Morena* stärkere Reliefunterschiede entlang der Flussläufe auf.

Aufgrund der akkumulierenden Tätigkeit im gefällearmen Mündungsgebiet schütteten der *Guadalquivir* und *Guadiamar* einen ebenen Schwemmlandbereich in der breiten Talsohle auf und entwickelten ein gemeinsames Delta, in dessen Bereich sich eine großflächige Sumpflandschaft bildete, die durch einen Dünenwall gegen das Meer abgegrenzt ist (vgl. Lautensach, 1964). Diese dient einer großen Artenvielfalt von Flora und Fauna als Lebensraum und steht in Form des *Donana Nationalparks* unter Naturschutz. Zwischen der Mündung im Süden des Untersuchungsgebietes und dem Zentrum *Sevilla* erstrecken sich ausgedehnte Flussmarschflächen, die sog. *Marismas*, welche aufgrund der einfach zu gewährleistenden Wasserversorgung, der Ebenheit der Schwemmlandflächen und der Fruchtbarkeit des Marschbodens für den *Nassreisanbau* genutzt werden.

5.1.2. Klima

Andalusien weist mit seinen trockenen, heißen Sommern und milden Wintern sowie einer Niederschlagsverteilung, die ein sommerliches Niederschlagsminimum und ein Maximum im Herbst und Frühjahr besitzt, ein typisches *mediterranes Klima* auf (vgl. Lautensach, 1964). Ursache dafür ist die südliche geographische Lage, die geringe Meereshöhe und der Abschluss des kontinentalen Einflusses des Binnenlandes durch die *Sierra Morena*.

Im Mündungsbereich des *Guadalquivir* beträgt die mittlere Temperatur im August $\overline{T} = 28°C$, mit Maximaltemperaturen bis zu $T_{max} = 52°C$ (vgl. Lautensach, 1964). Auch die mittlere Monatstemperatur im Januar ist mit $\overline{T} = 12{,}4°C$ (*Cadiz*) außergewöhnlich hoch, weshalb Frost in den Küstenbereichen sehr selten auftritt. Mit zunehmender Meereshöhe und Kontinentalität nimmt die Januar-Mitteltemperatur entlang des *Guadalquivir* flussaufwärts ab und die Frosthäufigkeit zu. Entsprechend verhält sich die auf Meeresniveau reduzierte mittlere Jahres-Temperaturamplitude,

die im Küstenbereich $\Delta\overline{T} = 12{,}7K$ (*Cadiz*) beträgt und Richtung Nordost stark zunimmt (vgl. Lautensach, 1964).

Die mittlere Jahresniederschlagsmenge im Mündungsbereich des *Guadalquivir* beträgt ca. $NS = 500mm$ (*Sevilla:* $NS = 564mm$). Die Niederschläge treten in einem Zeitraum von *Oktober* bis *April* auf, und es besteht neben einem primären Niederschlagsmaximum im November ein sekundäres Maximum im Februar. Beide Maxima sind durch ein sekundäres Niederschlagsminimum im Januar (*Huelva:* $NS = 37mm$) getrennt (vgl. Lautensach, 1964). Die Anzahl der ariden Sommermonate im Jahr, in denen eine monatliche Niederschlagsmenge von $NS = 30mm$ unterschritten wird, wächst entlang einer Transekte von drei Monaten im Nordosten bis hin zu fünf Monaten (*Mai - September*) im Mündungsgebiet des *Guadalquivir* (vgl. Lautensach, 1964). Dies verdeutlicht den stark semiariden Charakter des Untersuchungsgebietes. Wie das Klimadiagramm von *Sevilla* in Abbildung 5.1 zeigt, herrscht aufgrund der hohen Temperaturen in den Sommermonaten *Mai* bis *September* ein starker Überschuss an potentieller Verdunstung, der zu einen Aufbrauchen des im Boden gespeicherten Wasservorrates führt.

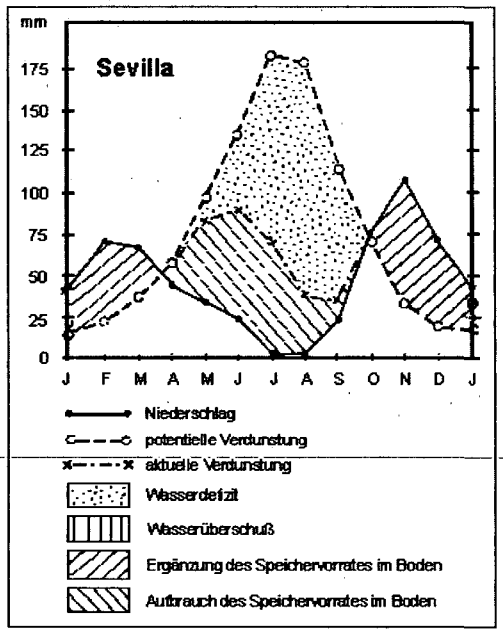

Abb. 5.1: Klimadiagramm von Sevilla (Quelle: Lautensach, 1964; verändert)

5.1.3. Böden

Die Böden im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* weisen eine hohe räumliche Variabilität auf. Gemäß Lautensach (1964) finden sich folgende Bodentypen im Untersuchungsgebiet:

1) *Tirsböden* im südlichen Teil,
2) *Marschböden* im Bereich der *Marismas,*
3) *Kalkrohböden* und *Xerorendsinen* im Südosten,
4) *Relikte von Terra Rossa Böden* mit *Lehm-* und *Marl-Einmengungen* auf den Terrassenflächen im West- und Nordwestteil des Gebietes.

5.1.4. Landwirtschaft

Der landwirtschaftliche Anbau im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* weist eine Anpassung an die einschränkenden Bedingungen des semiariden Klimas auf. So beschränkt sich der *traditionelle Anbau temporärer Kulturen* auf den *Trockenfeldbau* von *Weizen, Roggen, Mais und Bohnen*. (vgl. Kattenborn et al., 1996). Der *Trockenfeldbau* erfolgt dabei im Fruchtwechselverfahren und wird durch eine ausgedehnte Periode der Brache unterbrochen (vgl. Narisco et al., 1992). Die Anbaukalender in Tabelle 1 bis 4 im Anhang veranschaulichen das Anbauverhalten im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* sowie die Zeitpunkte signifikanter Phänologiestadien der kultivierten Feldfrüchte.

Wie die Landnutzungsklassifikation in Abbildung 3 im Anhang verdeutlicht, findet zusätzlich zum traditionellen *Trockenfeldbau* v.a. entlang der Flüsse *Bewässerungsfeldbau* von *Reis, Baumwolle, Zuckerrübe, Kartoffel* und *bewässerungsintensiven Gemüsesorten*, wie *Tomaten* und *Zucchini,* statt. Aufgrund von EU-Subventionen werden neuerdings auch *Sonnenblume*, *Soya* und *Sago* im Bewässerungsfeldbau kultiviert (vgl. Kattenborn et al., 1996). Der Anteil der Bewässerungsflächen an der agrarwirtschaftlich genutzten Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes nahm in den vergangenen Jahren drastisch zu Lasten des *Trockenfeldbaus* zu (vgl. Kattenborn et al., 1996). Gleich dem *Trockenfeldbau* findet auch der *Bewässerungsfeldbau* im Fruchtwechselverfahren statt, um die einseitige Nährstoffentnahme aus den Böden zu verhindern.

Flächenmäßig dominiert im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* der *Trockenfeldbau* von *Weizen* den agrarwirtschaftlichen Anbau (vgl. Kattenborn et al., 1996). Wie die Landnutzungskarte in Abbildung 3 im Anhang verdeutlicht, findet der Trockenfeldbau in größerer Distanz zum Flussverlauf des *Guadalquivir* statt, da die günstigen Standorteigenschaften entlang der Flüsse für einen intensiven Bewässerungsfeldbau genutzt werden.

Neben diesen *temporären Kulturen* wird die Landschaft *Andalusiens* durch *permanente Kulturen*, wie *Olivenkulturen*, *Weintrauben* und *Zitrusfrüchte,* geprägt (Narisco et al., 1992). Aufgrund der Frostsensibilität beschränkt sich der *Olivenanbau* hauptsächlich auf das *andalusische Tiefland*, so dass diese Form der Landwirtschaft im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* weit verbreitet ist. Die Kultivierung von Olivenbäumen erfolgt dabei hauptsächlich auf Xerorendsina und Tirsböden in

Form von *Monokulturen* oder als *agroforstliche Kulturen,* vergesellschaftet mit Feldfrüchten des Trockenfeldbaus (vgl. Lautensach, 1964).
Die natürliche Vegetation setzt sich aus ausgedehnten Pinienwäldern in den Küstenbereichen und Stein- und Korkeichegesellschaften am Rande des Beckens des *Guadalquivir* zusammen. Auf tonigen Böden finden sich darüber hinaus mitunter *Macchien*, bestehend aus Ladanstrauch, Myrte, Pistazie und Erdbeerbaum, während sandige Böden mit sog. *Tomillares* (Thymian, Salbei, Lavendel, Rosmarin, Zwiebelgewächse) bedeckt sind (vgl. Lautensach, 1964). Aufgrund der intensiven Bewirtschaftung der Region treten jedoch natürliche Flächen nur vereinzelt im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* in Erscheinung.

5.2. Das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*

Die Anwendung und Validierung des Verfahrens erfolgt auf Basis eines Teilbereiches des Einzugsgebietes des Flusses *La Guarena* im westlichen Zentralteil Spaniens (*Kastilien)*. Das Untersuchungsgebiet liegt in der *Nordmeseta,* südwestlich der Stadt *Zamora* und umfasst eine Fläche von $A = 1300 km^2$. Folgende Städte bilden grob die Eckpunkte des Gebietes: *Toro* im Norden, *Nova del Ray* im Osten, *Cantalpino* im Süden und *Corrales* im Westen. Da das Untersuchungsgebiet die Mündung des Flusses *La Guarena* in den *Duero* abdeckt und dieser einen Großteil des Gebietes im Nordosten begrenzt, kann das Gebiet direkt dem Einzugsgebiet des *Duero* zugerechnet werden. Das Untersuchungsgebiet wird im folgenden als *„La Guarena"* bezeichnet.

5.2.1. Geomorphologie

Die *Nordmeseta* ist eine ausgedehnte Hochfläche, die sich aus drei Rumpfflächen zusammensetzt und eine mittlere Höhe von $h \approx 800 - 850m$ ü. NN aufweist. Begrenzt wird sie durch die *Gebirge Asturiens* und *Kantabriens* im Norden, dem *Iberischen Randgebirge* im Osten, dem *Kastilischen Hauptscheidegebirge* im Südosten und dem *östlichen Hochportugal* im Westen. Die *Nordmeseta* senkt sich von den nördlichen, östlichen und südlichen Randgebirgen zu einer Mittellinie, die der ost-westlich verlaufende *Duero* kennzeichnet (vgl. Lautensach, 1964). Der im

Iberischen Randgebirge entspringende *Duero* tritt im Osten in der Nähe von *Alnazan* bei einer Höhe von ca. $h = 1000m$ ü. NN in die *Nordmeseta* ein und verlässt diese westlich von *Zamora* in einer Höhe von ca. $h = 600m$ ü. NN. Auf seinem Weg über die *Nordmeseta* hat sich der *Duero* tief in die Hochfläche eingeschnitten. Im Bereich des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* bei *Zamora* bis zu einer Tiefe von $\Delta h \leq 80m$.

Das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* liegt in einer mittleren Höhe von $\overline{h} = 750m$ ü. NN. und setzt sich in weiten Teilen aus Flussterrassen und -talböden zusammen. Es befindet sich in der sog. Ton-Geröll-Mesta, die von einer pliozänen Rumpffläche überspannt wird (vgl. Lautensach, 1964). Das geologische Substrat besteht aus Sandstein, Konglomerat und Kalkstein und entstammt hauptsächlich dem Eozän. Darüber hinaus finden sich weit verbreitete fluviale und äolische Ablagerungen, wie verschiedene Kies- und v.a. Sandformationen (vgl. Ceballos et al., 2002).
Die in der geomorphologischen Karte in Abbildung 5 im Anhang dargestellten Klassen können gemäß Tabelle 5.1 drei *physischen Einheiten* zugewiesen werden: *Sandstein*, *fluviale Terrassen* und *Kalkstein*.

Physische Einheiten	Geomorphologische Klassen
Sandstein	1. Alte, glatte Oberflächen bestehend aus Konglomeraten und Quarzsanden
	2a. / 2b. Gewellte Ebenen aus tonig sandigen Quarzsanden und Kiesen
	5. Ebenen aus äolischen Sanden
Fluviale Terrassen	4. Fluviale Terrassen
Kalkgestein	3. Muschelkalk und kalkhaltige Sande
	6. Schwemmlandebenen mit alluvialen Ablagerungen
	7. Talböden der kleineren Flüsse mit alluvialen Ablagerungen

Tab. 5.1: Geomorphologische Untergliederung der physischen Einheiten im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*.

5.2.2. Klima

Die abgeschlossene Lage der *Nordmeseta* zwischen den umschließenden Randgebirgen bedingt eine starke Kontinentalität des Klimas, die durch die Höhe des Gebietes über dem Meeresspiegel unterstützt wird. Dies bedingt den semiariden Charakter des *mediterranen Klimas* des Untersuchungsgebietes (vgl. Ceballos et al., 2002). Die starke Kontinentalität äußert sich in der großen Jahres-Temperaturamplitude, die in der *Nordmeseta* bis zu $\Delta\overline{T} = 20°C$ beträgt (vgl. Lautensach, 1964). So variiert die Monatsmitteltemperatur im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* von $\overline{T} = 3{,}7°C$ im Januar bis zu $\overline{T} = 21{,}1°C$ im August (*Zamora*), wobei ein mittleres

tägliches Temperaturmaximum von ca. $\overline{T}_{max} \doteq 29°C$ im August herrscht. Die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur beträgt $\overline{T} = 12{,}1°C$ (vgl. Ceballos et al., 2002). Die große Höhe spiegelt sich in der hohen Anzahl an Frosttagen von $n = 61$ im Jahr wider, an denen die Tagesmitteltemperatur $\overline{T} = 0°C$ nicht übersteigt

Der *semiaride Charakter* des Klimas äußert sich in den geringen mittleren jährlichen Niederschlagsmengen von $NS \geq 400mm$ (*Zamora* $NS = 286mm$) und einer Anzahl von vier bis fünf ariden Monaten im Jahresverlauf (vgl. Lautensach, 1964). So weisen die im Untersuchungsgebiet liegenden meteorologischen Stationen *Boveda de Toro* und *Castronuno* mittlere jährliche Niederschlagsmengen von nur $NS = 357mm$ und $NS = 390mm$ auf (vgl. Ceballos et al., 2002). Wie das Klimadiagramm der dem Untersuchungsgebiet naheliegenden Stadt *Zamora* in Abbildung 5.2 verdeutlicht, weist der Jahresgang der Niederschläge neben der *sommerlichen Trockenzeit* ein Wintermaximum der Niederschläge auf (vgl. Lautensach, 1964).

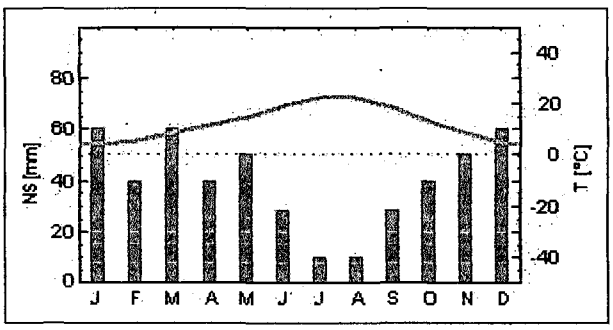

Abb. 5.2: Klimadiagramm von Zamora

5.2.3. Böden

Die dominanten Bodentypen in der *Nordmeseta* sind *Xerorendsinen* und trockene, kalkreiche *Terra Fusca* Böden sowie vereinzelte *Kalkrohböden*. Die semiariden Bedingungen führten im Zentralbereich des *Duero-Beckens* zu einem hohen Sandanteil der Böden aufgrund fluvialer und äolischer Ablagerungen. Wie die geomorphologische Karte, die zusätzlich zu den geomorphologischen Klassen die zugehörigen Bodentypen gemäß der FAO Nomenklatur (1998) beschreibt, in Abbildung 5 im Anhang verdeutlicht, sind die vorherrschenden Böden im Untersuchungsgebiet *„La Guarena" Luvisole, wie Parabraunerde – Terra Fusca Böden* (vgl. Ceballos et al., 2002). Sie sind durch eine große Sandfraktion im Oberbodenbereich gekennzeichnet. Sie bestimmen mit den gleichfalls weit verbreiteten *Cambisolen* und *Regosolen* die Bodentypen der flächendominierenden *physischen Einheiten Sandstein und fluviale Terrassen*. Eine geringere Verbreitung

weisen *Alisole* auf, welche in den physischen Einheiten *Kalkstein* und *fluviale Terrassen* auftreten. In flussnahen Bereichen finden sich zudem vereinzelt *Gleysole*. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung weisen die sandigen Böden des Untersuchungsgebietes eine hohe Homogenität auf. Eine Ausnahme bilden die geringen Flächenanteile der Einheit *Kalkgestein*, deren oftmals feinmaterialreiche Böden eine stärkere Variabilität der Eigenschaften zeigen.

5.2.4. Landwirtschaft

Wie die Landnutzungskarte des Gebietes *„La Guarena"* in Abbildung 6 im Anhang verdeutlicht, ist der *Trockenfeldbau* die vorherrschende landwirtschaftliche Anbaumethode *im Untersuchungsgebiet „La Guarena"*. Dabei nehmen *Winterweizenkulturen* mit deutlichem Abstand den größten Flächenanteil ein, gefolgt von *Roggen* und *Gerste*, die im Fruchtwechsel mit dem *Winterweizen* kultiviert werden. Alternativ zu *Roggen* werden auch *Sommerweizen* und *Hülsenfrüchte*, wie *Kichererbsen* und *Wicken,* angebaut. Die Aktualität des von Lautensach (1964) beschriebenen Anbauverhaltens wird durch Diskussionen des Autors mit Antonio Ceballos (Geographisches Institut der Universität Salamanca) sowie durch die Publikation Ceballos et al. (2002) bestätigt.

Der *Bewässerungsfeldbau* beschränkt sich auf die schmalen Flussauen und nimmt eine deutlich untergeordnete Stellung ein (siehe: Abbildung 6 im Anhang). Neben der dominierenden *Zuckerrübenkultivierung* findet der Anbau von *Mais, Sonnenblumen, Kohl, Melonen, Kartoffeln* und *Bohnen* statt (vgl. Lautensach, 1964; Ceballos et al., 2002).

Unter den *permanenten Kulturen* dominiert der *Weinanbau*, der in Spanien bis zu einer Seehöhe von $h = 950m$ ü. NN erfolgt. Die üblicherweise weit verbreiteten *Olivenkulturen* fehlen dahingegen weitgehend aufgrund ihrer Frostsensibilität (vgl. Lautensach, 1964).

Die natürliche Vegetation besteht zum Großteil aus lichten *Macchien und spärlichen Gariguen* (filzblättrige Eiche, Rosmarinstrauch, gestielter Lavendel, Heidekraut, Baumerika). Jedoch finden sich auch ausgedehnte *Kiefern- und Pinienwälder*, die aufgrund ihrer wirtschaftlichen Nutzung für die *Holz-* und *Harzproduktion* die ursprünglichen *Stein-* und *Korkeichengesellschaften* verdrängt haben (vgl. Lautensach, 1964).

6. Datengrundlage und Referenzdaten

Der folgende Abschnitt beschreibt die Datengrundlage sowie die Referenzdaten der vorliegenden Studie. Da zwei unterschiedliche Untersuchungsgebiete Verwendung fanden, erfolgt eine getrennte Betrachtung der Datensätze je Untersuchungsgebiet.

6.1. Das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"*

Die Kohärenz- und Intensitätsanalysen für die Verfahrensentwicklung erfolgten auf Basis von *ERS-1/2 InSAR-Daten* des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"*. Grund für die Wahl dieser Region bildete die Tatsache, dass das Gebiet als Testgebiet im Projekt *Monitoring Agriculture with Remote Sensing (MARS)* des *Space Applications Institute (SAI)* des *Joint Research Center of the European Commission (JRC)* dient. Damit stand eine umfangreiche Grundlage an Referenzdaten zur Verfügung.

Ziel des *MARS-Projektes* ist die Erstellung einer *europaweiten Flächenstatistik* für die *agrarwirtschaftliche Produktion von Feldfrüchten* auf Basis von Wachstumsmodellen und Fernerkundungsdaten. Im Vordergrund des Interesses stehen dabei v.a. *europaweite Ernteertragsabschätzungen* (vgl. Meyer-Roux & Vossen, 1994).

Da eine Dateninterpretation für die Gesamtfläche Europas im Rahmen des Projektes nicht möglich ist, wurden für diese Aufgabe mehr als 50 über Europa verteilte *Testgebiete* definiert, die als repräsentativ für großflächige *landwirtschaftliche Einheiten* gelten. Die auf Basis der lokalen Analysen erzielten Ergebnisse werden im Anschluss auf die Gesamtfläche des repräsentierten Gebietes extrapoliert, so dass *großflächige Aussagen* ermöglicht werden.

Mit einer jeweiligen Fläche von $A = 40x40km$ decken die Testgebiete ca. 6% der agrarwirtschaftlich genutzten Fläche Europas ab, wodurch eine hohe Genauigkeit der Flächenstatistik gewährleistet wird (vgl. Sharman, 1994).

Die Erfassung der Flächenanteile je Feldfrucht eines Testgebietes sowie deren Veränderung über die Zeit erfolgt über Landnutzungsklassifikationen auf Basis von *Landsat TM* und *SPOT Daten*. Als Trainings- und Verifizierungsflächen für die

Landnutzungsklassifikation und Wachstumsmodellierung dienen 16 systematisch ausgewiesene Testflächen innerhalb der Testgebiete mit einer Flächengröße von $A = 700x700m$. Die kontinuierliche Überwachung der Landnutzung dieser sog. *MARS-Segmente* erfolgt mit Hilfe von Geländebegehungen. Gleichzeitig findet dabei die Dokumentation der *fruchtspezifischen Wachstumsphasen* und *agrarwirtschaftlichen Tätigkeiten* in sog. *Anbaukalendern* statt. Diese wertvolle Referenzinformation wurde dem Autor freundlicherweise vom *SAI* zur Verfügung gestellt.

6.1.1. Datengrundlage „*Sevilla*" – ERS-1/2 InSAR Zeitreihe

Als Datengrundlage für die Kohärenz- und Intensitätsanalysen dienten sieben komplexe *ERS-1/2 SAR Tandem-Daten* aus dem Zeitraum *1995* bis *1996*. Die SAR-Daten lagen im Format *Slant-Range Complex* (*SLC*) vor. Dieses Datenformat beinhaltet neben der *Amplitudeninformation* die *Phase* des SAR-Signals als komplexen 32-bit Datensatz. Tabelle 6.1 zeigt die Spezifikationen der *SLC* Daten. Die Erstellung einer lückenlosen *InSAR Zeitreihe* wurde durch eine *geringe Aufnahmendichte* verhindert.

Die *SLC Daten* dienten als Grundlage für die Generierung der *InSAR-Produkte Amplitude*, *Kohärenz* und *digitales Höhenmodell (DHM)*. Nach der *interferometrischen Prozessierung* der Daten besitzen die resultierenden Produkte eine räumliche Auflösung von $25x25m$, während die Darstellung der Höheninformation des *digitales Höhenmodells* in $\Delta z = 1m$ Schritten erfolgt. Der in den Szenen abgebildete Ausschnitt der Erdoberfläche beträgt ca. $100x100km$.

Satellit	Datum	Orbit	Frame	Track	NW Lat.	NW Long.	SE Lat.	SE Long.	Flug-phase
ERS-1	*9. Juni 1995*	20394	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-2	*10. Juni 1995*	00721	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-1	*14. Juli 1995*	20895	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-2	*15. Juli 1995*	01222	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-1	*18. August 1995*	21396	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-2	*19. August 1995*	01723	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-1	*27. Oktober 1995*	22398	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-2	*28. Oktober 1995*	02725	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-1	*15. März 1996*	24402	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-2	*16. März 1996*	04729	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-1	*19. April 1996*	24903	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-2	*20. April 1996*	05230	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-1	*24. Mai 1996*	25404	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.
ERS-2	*25. Mai 1996*	05731	2853	366	37°55'	-6°43'	36°51'	-5°51'	desc.

Tab. 6.1: Die ERS-1/2 InSAR Zeitreihe des Untersuchungsgebietes „*Sevilla*".

Bei der Datenakquisition wurde auf eine identische Aufnahmegeometrie der Tandem-Paare geachtet. Dies ist ein entscheidendes Kriterium für das Entstehen der *Kohärenz* zwischen zwei Signalen, die eine entscheidende Bedeutung in der vorliegenden Studie einnimmt. Neben der Wahl identischer *Flugstreifen* (*Tracks*) und *Streifenabschnitte* (*Frames*) wurde auf eine ausschließliche Verwendung der *absteigenden* (*descending*) Flugphase geachtet, um eine identische Blickrichtung zu gewährleisten. Bei der Verwendung beider Flugphasen ist die zeitliche Vergleichbarkeit der Messwerte eingeschränkt, da die Zielobjekte aus gegensätzlichen Richtungen beleuchtet werden. Dies führt mitunter zu einem stark veränderten Rückstreuverhalten der beobachteten Objekte.

Diese restriktive Datenakquisition minimiert die aufnahmesystembedingte Beeinflussung der Messergebnisse. Indem somit eine Signalvariation in erster Näherung ausschließlich aufgrund einer Veränderung der Streuprozesse an der Erdoberfläche verursacht wird, ist eine entscheidende Prämisse der Zeitreihenanalyse erfüllt.

Neben den abweichenden Witterungsverhältnissen zu den Aufnahmezeitpunkten verbleibt der Störeinfluss aufgrund der *räumlichen Basislinie* zwischen den Aufnahmepositionen der Sensoren. Diese nimmt trotz identischer *Tracks* und *Frames* mitunter eine Distanz von bis zu mehreren hundert Metern ein. Ihr Einfluss wird in der Prozessierung zu einem Großteil korrigiert. Abbildung 1 im Anhang zeigt als Beispiel für die InSAR-Produkte eine dreikanalige RGB-Darstellung des InSAR-Tandem-Datensatzes *9. / 10. Juni 1995*. Die abgebildeten Intensitätsdaten liegen bereits als kalibrierte und adaptiv gefilterte Produkte vor.

6.1.2. Referenzdaten „*Sevilla*"

Zur Erfassung der sog. „*Ground Truth*", konnte eine umfangreiche Referenzdatengrundlage akquiriert werden, welche Einblicke in die physischen Verhältnisse des Untersuchungsgebietes sowie des atmosphärischen Zustandes zum Zeitpunkt der ERS-1/2 SAR Aufnahmen ermöglichte.

6.1.2.1. Landsat 5 TM Szenen

Um die Analysen hinsichtlich des Einflusses von Vegetation auf die Kohärenz und Intensität zu ermöglichen, wurden drei optische *Landsat 5 TM Szenen* akquiriert, die zeitlich zu den ERS-*1/2* SAR Aufnahmezeitpunkten korrespondierten. So erlauben die reflektiven Kanäle des *Landsat 5 TM* eine sensible Beschreibung der Eigenschaften einer Vegetationsbedeckung (Art, Zustand, Biomasseaufkommen). Tabelle 6.2 zeigt die Spezifikation der *Landsat 5 TM Szenen* des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"*.

Satellit	Sensor	Datum	Track	Frame	Zentrum Long.	Zentrum Lat.
Landsat 5	TM	*5. Juni 1995*	202	34	-6° 17'	37° 20'
Landsat 5	TM	*11. Oktober 1995*	202	34	-6° 17'	37° 20'
Landsat 5	TM	*22. März 1996*	202	34	-6° 17'	37° 20'

Tab. 6.2: Aufnahmezeitpunkte der *Landsat 5 TM Szenen* des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"*.

Die sieben Kanäle des *Thematic Mapper (TM)* messen die elektromagnetische Strahlung im Spektralbereich des *sichtbaren Lichts* über das *nahe* und *mittlere Infrarot* bis hin zum *thermalen Infrarot*. Die Spektralbanden der TM Kanäle sind in Tabelle 6.3 aufgelistet. Die räumliche Auflösung der reflektiven Kanäle des *Thematic Mapper (TM)* beträgt $30x30m$. Die Ähnlichkeit der räumlichen Auflösung begünstigt den Vergleich der *optischen Daten* mit den *ERS-1/2 InSAR-Daten*. Als Beispiel für eine atmosphären- und terrainkorrigierte *Landsat 5 TM Szene* dient der in einer dreikanaligen RGB-Darstellung repräsentierte Datensatz des Aufnahmezeitpunktes *5. Juni 1995* in Abbildung 2 im Anhang.

Kanal	radiometrische Auflösung [µm]	Spektral-bereich	räumliche Auflösung [m]
TM 1	0,45 - 0,52	VIS (blau)	30
TM 2	0,52 - 0,60	VIS (grün)	30
TM 3	0,63 – 0,69	VIS (rot)	30
TM 4	0,76 – 0,90	NIR	30
TM 5	1,55 – 1,75	MIR	30
TM 6	10,40 – 12,50	TIR	120
TM 7	2,08 – 2,35	MIR	30

Tab. 6.3: Die Kanäle des *Landsat 5 TM Sensors*

6.1.2.2. ERS-1/2 Scatterometer-Intensitätsdaten - Bodenfeuchte-Index-Zeitreihe

Die temporal hochaufgelöste Rückstreuinformation des ERS-1/2 Scatterometers diente in der vorliegenden Studie der Beschreibung der großräumigen hoch dynamischen Feuchtevariabilität. Die Eignung des Scatterometersystems für diese

Aufgabenstellung wurde durch diverse Studien bestätigt (siehe: Frison et al., 1998; Magagi & Kerr, 1997; Pulliainen et al., 1998; Wagner et al., 1999a, b, c; Wagner & Scipal, 2000).

Die großräumige oberflächige Feuchtebeschreibung auf Basis der *ERS-1/2* Scatterometer-Intensität erfolgte mit Hilfe des von Wagner et al. (1999a, b, c) entwickelten Feuchte-Index M_s, der in Kapitel 2. Erläuterung fand. Die in Abbildung 6.1 dargestellte Feuchte-Index Zeitreihe für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* im Beobachtungszeitraum *1995* und *1996* wurde dem Autor freundlicherweise vom *Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung an der Technischen Universität (TU) Wien* zur Verfügung gestellt. Die Aufnahmezeitpunkte der ERS-1/2 SAR Tandem-Aufnahmezeitpunkte sind durch vertikale Balken gekennzeichnet.

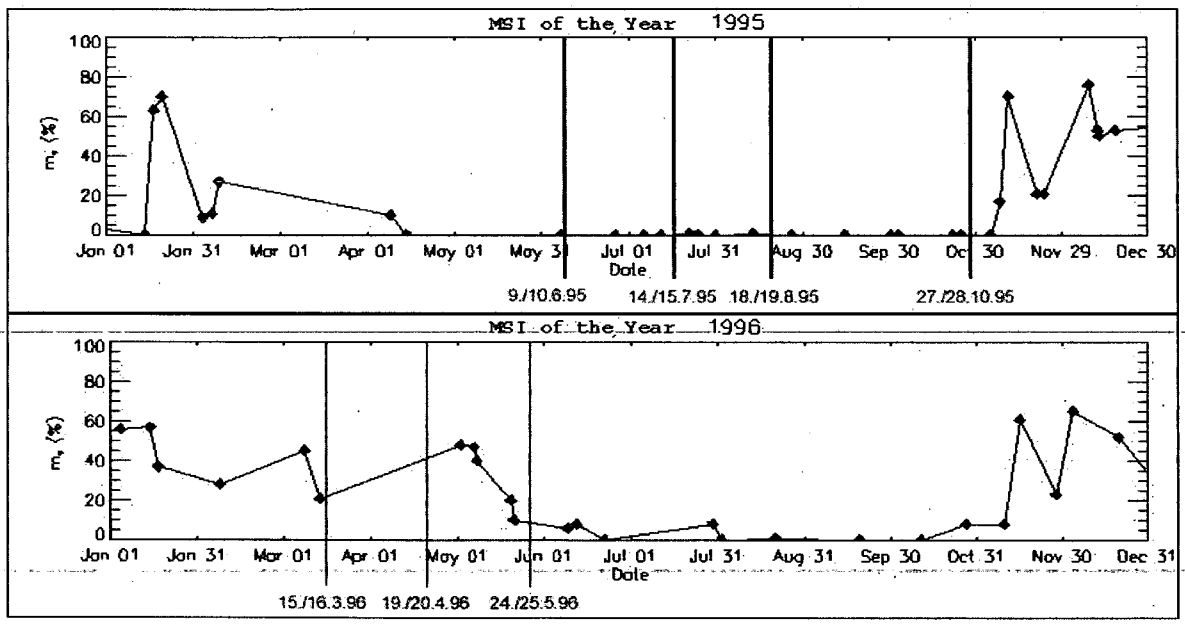

Abb. 6.1: Zeitreihen des ERS-1/2 Scatterometer Bodenfeuchte-Index M_S für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* des Beobachtungszeitraumes *1995-1996*.

6.1.2.3. Meteorologische Daten

Die meteorologischen Daten des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* entstammen der *Meteorological Database* des *SAI* und wurden freundlicherweise dem Autor zur Verfügung gestellt. Die Datenbank erfährt seit *1975* eine kontinuierliche Aktualisierung und wurde zur Unterstützung des *MARS-Projektes* implementiert.

Die tägliche Übermittlung der an ca. 1500 meteorologischen Stationen gemessenen Daten erfolgt mit Hilfe des *Global Telecommunication Systems (GTS)* der *World*

Meteorological Organization (WMO). Die Daten werden auf ein Gitter mit einer Maschenweite von $50x50km$ räumlich interpoliert, das *Europa*, die *Türkei* und die *Maghreb-Staaten* flächenhaft abdeckt (vgl. JRC, 2002).

Die räumliche Interpolationsmethode erfasst für jede Zelle das gewichtete Mittel der meteorologischen Daten der umgebenden Stationen. Die Gewichtung erfolgt über die Kriterien *räumliche Distanz der Station zur Zelle, Entfernung zur nächstgelegenen Küste, Höhendifferenz* und *klimatische Barrieren zwischen Zelle und Station.* Die Erfassung des Parameters *Niederschlag* weicht von der beschriebenen Methode ab, da die Bestimmung der jeweils repräsentativen meteorologischen Station interaktiv erfolgt.

Abbildung 6.2 zeigt die Niederschlagsverteilung des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* für die Beobachtungsjahre *1995* und *1996*. Die Aufnahmezeitpunkte der ERS-1/2 InSAR Tandem-Daten sind durch schwarze Balken gekennzeichnet.

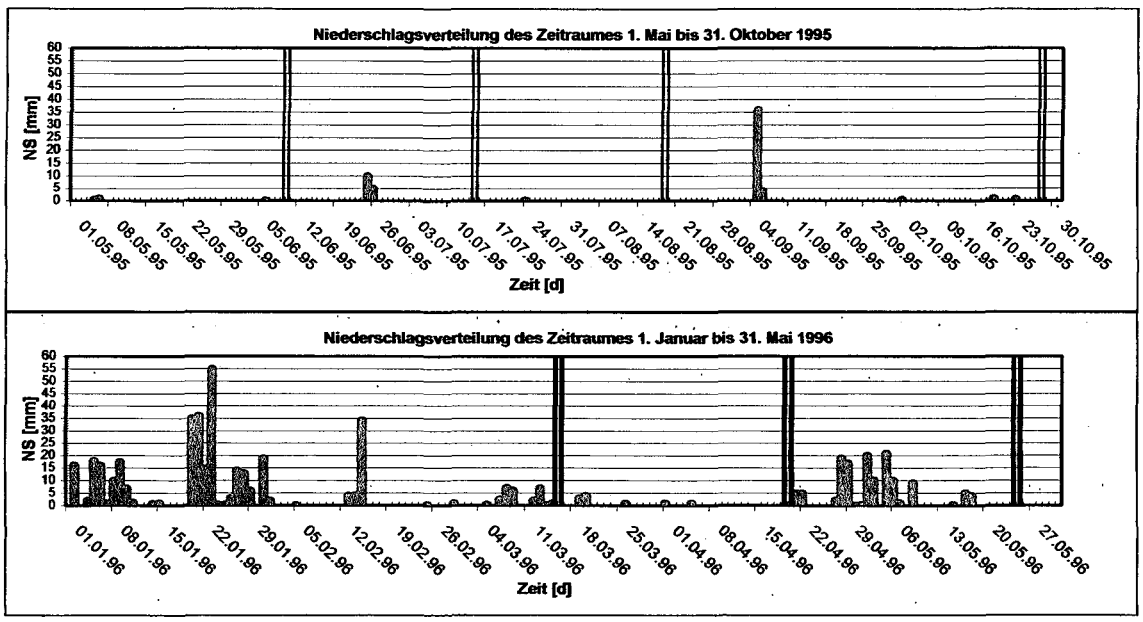

Abb. 6.2: Niederschlagsverteilung für den Beobachtungszeitraum *1995-1996* im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"*. **Grau**: Niederschlagsmengen, **Schwarz**: InSAR Aufnahmezeitpunkte (Quelle: Meteorological Database, SAI / JRC)

6.1.2.4. *CORINE* Landnutzungsklassifikation

Das *CORINE* Programm (*Coordination of Information on the Environment*) wurde *1985* bis *1990* von der *Commission of the European Environment* durchgeführt und hatte u.a. das Ziel, eine *Landnutzungsklassifikation für die gesamte Fläche Europas* aus Fernerkundungsdaten zu erstellen (vgl. European Environment Agency, 1994).

Die Nomenklatur der *CORINE* Landnutzungsklassifikation setzt sich aus *44 Klassen* zusammen. Die Klassenzuweisung erfolgte über die visuelle Interpretation optischer Fernerkundungsdaten der Satellitensysteme *Landsat* und *Spot*.
Die *CORINE* Landnutzungsklassifikation liefert wichtige Einblicke in die vorherrschende Landnutzung eines Gebietes und kann damit unterstützend in der Interpretation oder Validierung von Fernerkundungsdaten eingesetzt werden.
Die räumliche Auflösung der in der Studie verwendeten Version der *CORINE* Landnutzungsklassifikation beträgt $250x250m$. Abbildung 3 im Anhang zeigt den Ausschnitt der *CORINE Landnutzungsklassifikation* für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"*.

6.1.2.5. Agrarwirtschaftliche Anbaukalender

Die *agrarwirtschaftlichen Anbaukalender* des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* entstammen ebenfalls dem *MARS-Projekt* des *SAI*. Sie wurden für diverse Untersuchungsgebiete in Europa erstellt und beschreiben den zeitlichen Ablauf der landwirtschaftlichen Bearbeitungsmethoden sowie charakteristischer Wachstumsphasen je Feldfrucht im Jahresverlauf. Das *SAI* stellte dem Autor freundlicherweise *Anbaukalender* des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* aus dem Zeitraum *1994* bis *1996* zur Verfügung. Die Beschreibung des agrarwirtschaftlichen Jahresverlaufes erfolgt in Form von zwei unterschiedlichen Skalenbereichen: Zum einen beinhaltet der Datensatz detaillierte Information bezüglich des agrarwirtschaftlichen Jahresverlaufs auf Basis einzelner *Testpunkte* innerhalb der *MARS-Segmente*. Diese hochaufgelöste Informationsquelle ist in den Tabellen 2 bis 4 im Anhang abgebildet und liegt ausschließlich für das Jahr *1996* vor. Zum anderen erfolgt eine allgemeine Beschreibung für das gesamte Untersuchungsgebiet. Diese großflächige, detailarme Informationsquelle dokumentiert das Auftreten der fruchtspezifischen Ereignisse im Untersuchungsgebiet in Form von Zeitintervallen, die den Beginn und das Ende eines Ereignisses beschreiben. Diese großflächige Information ist in Tabelle 1 im Anhang abgebildet und liegt für den Gesamtzeitraum *1995* bis *1996* vor. Folgende verfahrensrelevante Information konnte den Anbaukalendern als Unterstützung für die Verfahrensentwicklung entnommen werden: *aktuelle Feldfrucht*, *Saatzeitpunkt*, *Zeitpunkt der Fruchtblüte*, *Erntezeitpunkt*, *folgende Feldfrucht bei Fruchtwechsel*.

6.2. Das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*

Die Anwendung und Validierung des vorgestellten *Verfahrens* erfolgte auf Basis eines Teilbereiches des Einzugsgebiet des Flusses *„Duero"* in Zentral-Spanien. Der Grund für diese Wahl ist die Tatsache, dass das *Geographische Institut der Universität Salamanca* im besagten Gebiet das *hydrologische Studiengebiet „La Guarena"* unterhält, dessen räumliche und zeitliche Bodenfeuchteverteilung mit Hilfe eines Netzwerkes aus Messstationen kontinuierlich erfasst wird. Dieser umfangreiche Datensatz diente der Validierung des Verfahrens.

6.2.1. Datengrundlage *„La Guarena"* - ERS-1/2 InSAR Zeitreihe

Die Grundlage für die Validierung bilden fünf komplexe *ERS-1/2 SAR SLC Datensätze* aus dem Beobachtungszeitraum *1999* bis *2000.* Aufgrund der geringen Datendichte für das Gebiet konnte für den gesamten Beobachtungszeitraum nur ein Tandem-Paar (*2. / 3. September 1999)* akquiriert werden. Darüber hinaus erwies sich eine Szene des Aufnahmezeitpunktes *29. Juli 1999* aufgrund von Datenfehlern als nicht erhältlich, wodurch die ursprünglich angedachte *ERS-1/2 InSAR Zeitreihe* des Beobachtungsjahres *1999* nicht komplettiert werden konnte. So zeigen sich mitunter große Datenlücken, die in einem Zeitintervall von $\Delta t = 210d$ zwischen den Aufnahmezeitpunkten *3. September 1999* und *31. März 2000* gipfeln. Die Aufnahmezeitpunkte und Spezifikationen der *ERS-1/2 SLC Daten* sind in Tabelle 6.4 aufgetragen.

Satellit	Datum	Orbit	Frame	Track	NW Lat.	NW Long.	SE Lat.	SE Long.	Flug-phase
ERS-2	*25. Juni 1999*	21856	819	459	41°33'	-5°55'	40°51'	-4°31'	desc.
ERS-1	*2. Sept. 1999*	42531	819	459	41°33'	-5°55'	40°51'	-4°31'	desc.
ERS-2	*3. Sept. 1999*	22858	819	459	41°33'	-5°55'	40°51'	-4°31'	desc.
ERS-2	*31. März 2000*	25864	819	459	41°33'	-5°55'	40°51'	-4°31'	desc.
ERS-2	*9. Juni 2000*	26866	819	459	41°33'	-5°55'	40°51'	-4°31'	desc.

Tab. 6.4: ERS-1/2 InSAR Zeitreihe des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"*.

Auch im Fall der Daten des Gebietes *„La Guarena"* wurde auf eine identische Aufnahmegeometrie geachtet, um eine unbeeinflusste Zeitreihenanalyse zu gewährleisten. Die räumliche Auflösung der prozessierten *ERS-1/2 InSAR-Produkte* beträgt $25x25m$. Abbildung 4 im Anhang zeigt als Beispiel für die *ERS-1/2 InSAR Produkte* des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* eine RGB-Darstellung des InSAR-Tandem-Datensatzes der Aufnahmezeitpunkte *2. / 3. September 1999.* Die

abgebildeten Intensitätsdaten liegen als kalibrierte und adaptiv gefilterte Produkte vor. Die Umrisse des hydrologischen Studiengebietes *„La Guarena"* sind durch ein schwarzes Polygon gekennzeichnet.

6.2.2. Referenzdaten *„La Guarena"*

Neben der *Bodenfeuchteinformation* der *in-situ Messreihen* wurde die Verfahrensanwendung und Validierung durch *ERS-1/2 Scatterometerdaten, meteorologische Stationsdaten*, eine *Landsat 7 ETM+ Szene* sowie die Information *einer hochaufgelösten Landnutzungsklassifikation* unterstützt. Darüber hinaus stellte das *Geographische Institut der Universität Salamanca* freundlicherweise Daten bezüglich der *bodenhydraulischen und bodenphysikalischen Eigenschaften* der Messstationen zur Verfügung (siehe: Tabellen 10.3 und 10.4).

6.2.2.1. In-situ Bodenfeuchte-Messreihe

Die in-situ Bodenfeuchte-Messreihen, die für die Validierung des Verfahrens Verwendung fanden, entstammen dem *hydrologischen Studiengebiet „La Guarena"* des *Geographischen Instituts der Universität Salamanca*. Auf Basis eines festinstallierten Netzwerks aus Messstationen erfolgt seit *1999* die Erfassung der Feuchteverhältnisse von diversen Horizonten unterschiedlicher Bodentiefe und Mächtigkeit in einem 15-tägigen Turnus. Folgende Horizonte werden dabei kontinuierlich mit Hilfe von *Time-Domain-Reflectance (TDR) Sonden* bemessen: Horizont 1: $z = 0 - 25cm$, Horizont 2: $z = 0 - 50cm$, Horizont 3: $z = 50 - 100cm$, Horizont 4: $z = 0 - 100cm$. Für die Validierung des Verfahrens finden aufgrund der geringen Eindringtiefe des C-Bandes in feuchte Böden ausschließlich Messdaten des Oberflächenhorizontes (Horizont 1) Verwendung.

Das Messprinzip der *TDR-Sonde* beruht ähnlich der Radar-Messung auf den variierenden dielektrischen Eigenschaften von trockenen und feuchten Böden. Im Gegensatz zur Radar-Messung verwendet das Verfahren jedoch nicht die Feldstärke, sondern die Laufzeit der elektromagnetischen Welle als Messgröße für den Feuchtegehalt eines Bodens. Diese wird gleichfalls über den Wassergehalt eines Materials beeinflusst, indem sich die Laufzeit mit steigendem Wassergehalt

verlängert. Die Feuchtemessdaten liegen im System *volumetrische Bodenfeuchte* m_v vor. Dank seiner Eigenschaft als intensiv untersuchtes hydrologisches Studiengebiet konnte auf eine umfangreiche Informationsbasis zurückgegriffen werden. Diese gewährleistet u.a. die Kenntnis der *Verteilung* der Bodentypen des Gebietes *„La Guarena"*, inklusive der individuellen *Bodenverhältnisse* je Messstation. Abbildungen 5 und 6 im Anhang zeigen auf Basis einer geomorphologischen Karte und einer Landnutzungskarte des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte-Messstationen im Vergleich zur Lage der *meteorologischen Stationen*.

6.2.2.2. Meteorologische Daten

Die Rekonstruktion der atmosphärischen Bedingungen im Zeitraum der fernerkundlichen Datenerfassung ist auf Basis von *meteorologischen Messdaten* aus dem Untersuchungsgebiet möglich. Die Messung erfolgte an *fünf meteorologischen Stationen*, die sich gleichmäßig über die Fläche des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* verteilen. Die Visualisierung der räumlichen Verteilung erfolgt in den Abbildungen 5 und 6 im Anhang. Abbildung 6.3 zeigt die Niederschlagsverteilungen der Messstationen im Beobachtungszeitraum *1999*.

Wie die Messwerte signalisieren, zeigen sich mitunter deutliche Abweichungen hinsichtlich der Niederschlagszeitpunkte und –mengen zwischen den einzelnen Stationen. Um repräsentative Witterungsverhältnisse an den Bodenfeuchtemessstationen für die Interpretation des Feuchteverhaltens zu gewährleisten, erfolgte gemäß der Lagebeziehungen eine individuelle Zuordnung zu den meteorologischen Stationen. Aufgrund der geringen Fläche und Höhenvariation des Untersuchungsgebietes sowie des Fehlens signifikanter orographischer Hindernisse wurde auf aufwendige räumliche

Meteorologische Station	Feuchtemessstation	Räumliche Distanz [km]
1. Alaejos	6. Caramed	4,7 km
	14. Vacas	2,6 km
	16. Concejo	1,7 km
	18. Cruz	6,4 km
	22. Guarena	11,4 km
2. Argujillo	1. Tres Ray	3,8 km
	12. Arenas	5,6 km
3. Castronuño	4. Llanos	6,3 km
	7. Brozas	10,4 km
	11. Periles	3,9 km
4. Fuentesauco	2. Zamarron	4,0 km
	8. Atalaya	11,4 km
	20. Gorrizo	2,9 km
	21. Eritas	7,3 km
	23. Bodegas	5,4 km
5. La Bóveda de Toro	3. Torresan	14,1 km
	5. Coto	4,7 km
	9. Paredina	10,7 km
	10. Victoria	8,3 km
	13. Tomillar	13,2 km
	15. Granja G	5,3 km
	17. Guarrati	6,3 km
	19. Carretor	8,0 km

Tab. 6.5: Verknüpfung der Feuchtemessstationen mit den repräsentativen meteorologischen Stationen

Interpolationsverfahren verzichtet. Die in Tabelle 6.5 dargestellte Zuordnung der Bodenfeuchtemessstationen zu den jeweiligen meteorologischen Stationen erfolgte über die minimale räumliche Distanz zwischen beiden Stationstypen.

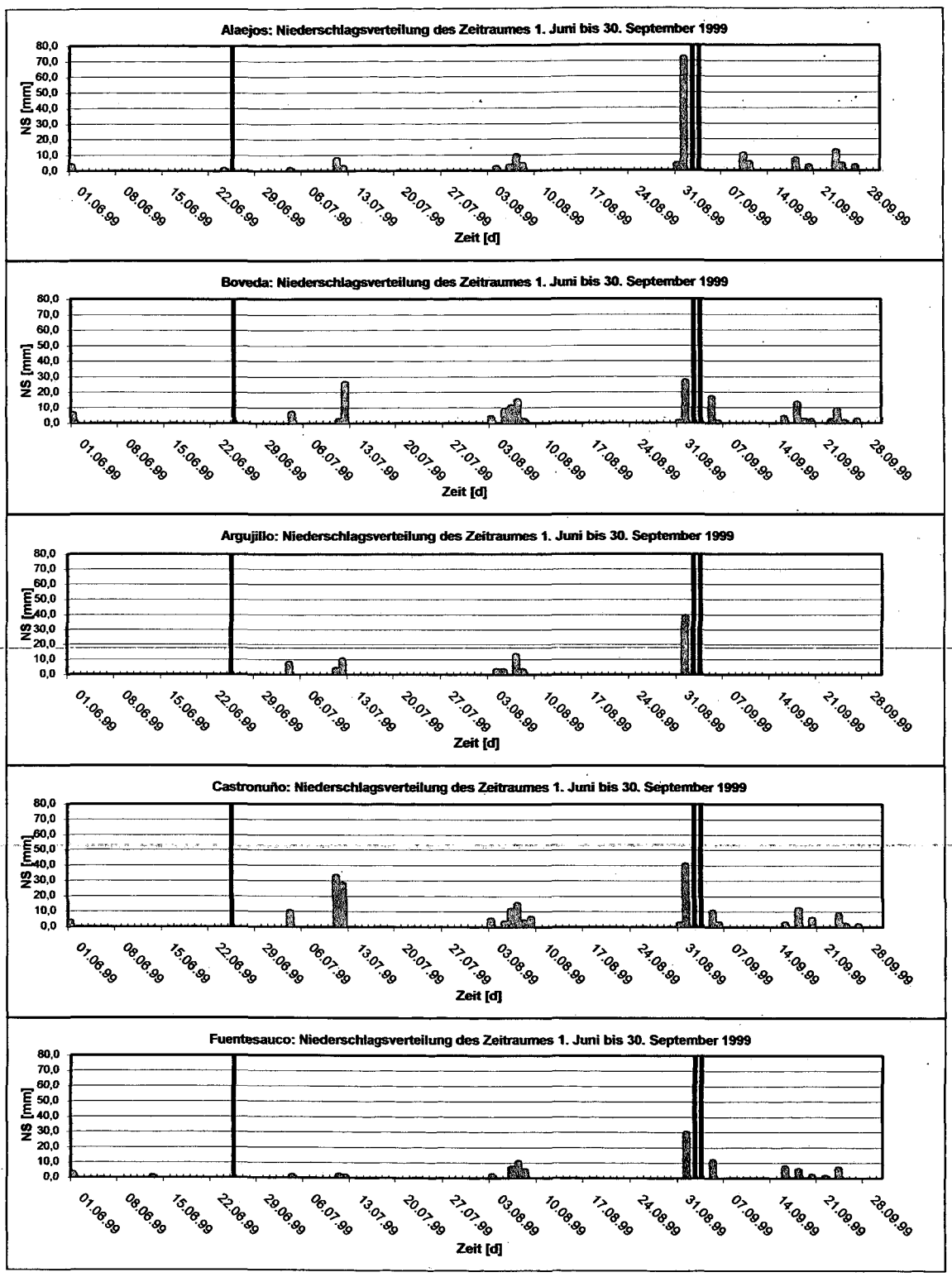

Abb. 6.3: Niederschlagsverteilungen des Beobachtungszeitraumes *1999* im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*.
Grau: Niederschlagsmenge [mm]; **Schwarz:** ERS-1/2 SAR Aufnahmezeitpunkte
(Quelle: Geographisches Institut der Universität Salamanca)

Da die ERS-1/2 InSAR Daten des Beobachtungszeitraumes *2000* nicht für die Anwendung und Validierung des Verfahrens verwendet werden konnten (siehe: Kapitel 10.2.) zeigt Abbildung 6.4 die korrespondierende Niederschlagsverteilung ausschließlich am Beispiel der Station *La Boveda de Toro.*

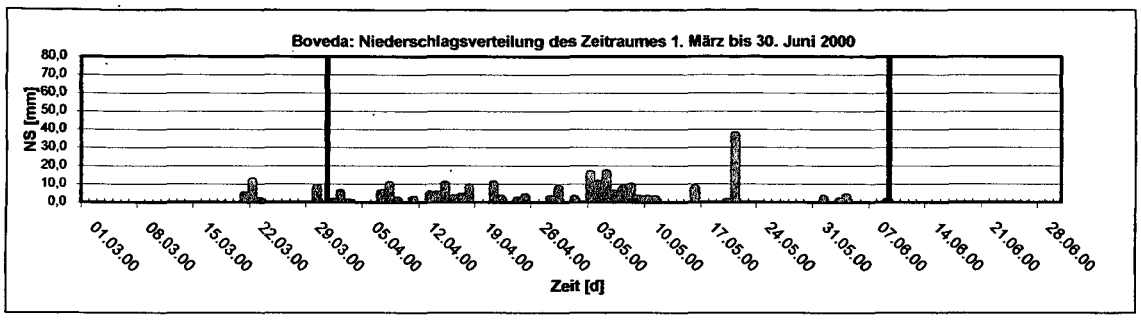

Abb. 6.4: Niederschlagsverteilungen des Beobachtungszeitraumes 2000 an der Station *La Boveda de Toro.*
Grau: Niederschlagsmenge [mm]; **Schwarz:** ERS-1/2 SAR Aufnahmezeitpunkte
(Quelle: Geographisches Institut der Universität Salamanca)

Die meteorologischen Daten wurden dem Autor vom Geographischen Institut der Universität Salamanca freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

6.2.2.3. ERS-1/2 Scatterometer-Intensitätsdaten – Bodenfeuchte-Index-Zeitreihe

Das *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung* der *TU Wien stellte* dem Autor auch für das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* freundlicherweise *ERS-1/2 Scatterometer-Intensitätsdaten* und daraus abgeleitete *Bodenfeuchte-Index Zeitreihen* zur Verfügung. Abbildung 6.5 zeigt die Bodenfeuchte-Index Zeitreihe für das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* im Beobachtungszeitraum *1999* bis *2000.* Die Aufnahmezeitpunkte der ERS-1/2 SAR Tandem-Aufnahmezeitpunkte sind durch vertikale Balken gekennzeichnet.

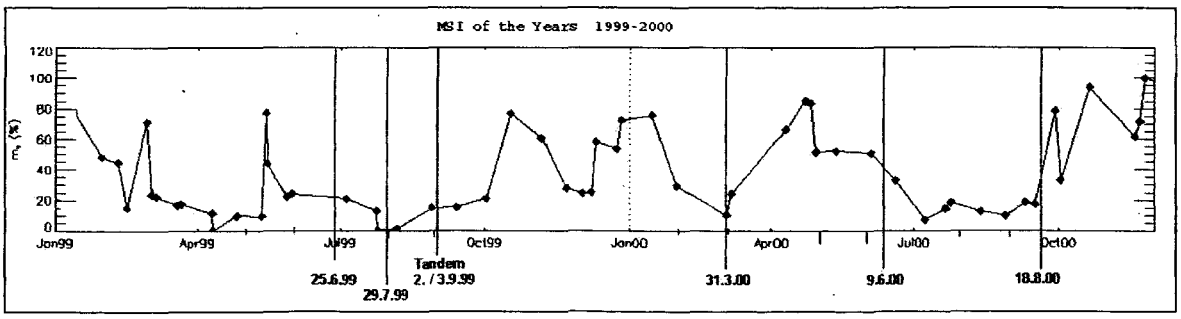

Abb. 6.5: Zeitreihen des ERS-1/2 Scatterometer Bodenfeuchte-Index M_S
für das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* im Beobachtungszeitraum *1999 – 2000*
Blau: ERS-1 Scatterometer; **Grün:** ERS-2 Scatterometer;

6.2.2.4. Landnutzungsklassifikation

Das *Geographische Institut der Universität Salamanca* stellte dem Autor freundlicherweise eine *hochaufgelöste Landnutzungsklassifikation* des Gebietes *„La Guarena"* zur Verfügung, die auf Basis einer visuellen Interpretation von *Orthofotos* und *Landsat 5 TM Daten* aus dem Jahr *1999* erstellt wurde. Diese in Abbildung 6 im Anhang dargestellte wertvolle Informationsquelle beschreibt somit den aktuellen Landnutzungszustand im Zeitraum des Verfahrenlaufes in einer räumlichen Auflösung von $30x30m$.

6.2.2.5. Landsat 7 ETM+ Szene

Auch für das Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* konnten optische Fernerkundungsdaten in Form einer Landsat 7 ETM+ Szene für die Informationsgewinnung bezüglich der Vegetationsbedeckung im Beobachtungsjahr *2000* herangezogen werden. Die Daten wurden dem Autor freundlicherweise vom *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung* der *TU Wien* zur Verfügung gestellt. Tabelle 6.6 zeigt die Spezifikation der Landsat 7 ETM+ *Szene* des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"*.

Satellit	Sensor	Datum	Track	Frame	Zentrum Long.	Zentrum Lat.
Landsat 7	ETM+	*10. Juni 2000*	202	31	-4° 56'	41° 45'

Tab. 6.6: Spezifikation der Landsat 7 ETM+ Szene des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"*.

Der Sensor ETM+ besitzt im Vergleich zum TM einen zusätzlichen Kanal im mittleren Infrarot sowie einen räumlich hochauflösenden panchromatischen Kanal ($15x15m$). Tabelle 6.7 zeigt die Kanäle des ETM+ im Überblick. Abbildung 7 im Anhang repräsentiert den Ausschnitt des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* aus der atmosphären- und terrainkorrigierten *Landsat 7 ETM+ Szene* des Aufnahmezeitpunktes *10. Juni 2000* in einer dreikanaligen RGB-Darstellung.

Kanal	radiometrische Auflösung [µm]	Spektral-bereich	räumliche Auflösung [m]
TM 1	0,45-0,52	VIS (blau)	30
TM 2	0,53-0,61	VIS (grün)	30
TM 3	0,63-0,69	VIS (rot)	30
TM 4	0,78-0,90	NIR	30
TM 5	1,55-1,75	MIR	30
TM 6	10,40-12,50	TIR	60
TM 7	2,09-2,35	MIR	30
TM 8	0,52-0,90	Panchrom.	15

Tab. 6.7: Die Kanäle des Landsat 7 ETM + Sensors

7. Datenaufbereitung

Um eine einheitliche Grundlage für die Datenanalyse zu gewährleisten, wurden im Rahmen der vorliegenden Studie diverse Datenaufbereitungsschritte nötig. Mit Hilfe der *interferometrischen Prozessierung* erfolgte der Aufbau einer *InSAR Zeitreihe* für die Untersuchungsgebiete *„Sevilla"* und *„La Guarena"*. Die *Normierung* und *adaptive Filterung* der *Amplitudendaten* komplettierte die InSAR-bezogenen Arbeitsschritte.

Um die räumliche und zeitliche Vergleichbarkeit der optischen *Landsat TM und ETM+ Daten* zu ermöglichen, erfolgte nach einer einleitenden *Ko-Registrierung* auf die georeferenzierten InSAR-Datenprodukte eine *Atmosphären- und Terrainkorrektur* der optischen Daten. Abschließend erfolgte die Ableitung des *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* aus der Information der *reflektiven TM und ETM+ Kanäle.*

7.1. Prozessierung und Aufbereitung der InSAR - Zeitreihen

Mit Hilfe der operationellen, *interferometrischen Prozessierungskette* des *DFD*, dem *Genesis Prozessor*, erfolgte die Prozessierung der *ERS-1/2 SAR SLC-Daten.* Tabelle 7.1 zeigt die Spezifikationen der resultierenden *InSAR-Produkte Amplitude* und *Kohärenz* der Untersuchungsgebiete *„Sevilla"* und *„La Guarena".* Darüber hinaus ist die Information der *effektiven Basislinien* für die Belange der Kohärenz-Schätzungen dargestellt.

Ergänzend zu den in Tabelle 7.1 dargestellten InSAR-Datenprodukten erfolgte im Zuge der *InSAR-Prozessierung* die Ableitung von *digitalen Höhenmodellen (DHM)* der Untersuchungsgebiete aus der Phaseninformation der Tandem-Paare (siehe Kapitel 7.1.3.). Unter Berücksichtigung der Aufnahmegeometrie der Sensoren diente die Reliefinformation u.a. zur Generierung einer *lokalen Einfallswinkelmaske*, deren Information für die Ausmaskierung der *Radar-Schattenbereiche* Verwendung fand.

Untersuchungs-gebiet	Amplitude	Tandem-Kohärenz	Basislinie Tandem [m]	Langzeit-Kohärenz	Langzeit-Intervall [d]l	Basislinie Langzeit [m]
„Sevilla"	*9. Juni 95*	*9.-10. Juni 95*	158 m			
	10. Juni 95			*10. Juni – 14. Juli 95*	35 d	184 m
	14. Juli 95	*14.–15. Juli 95*	31 m			
	15. Juli 95			*15. Juli – 18. August 95*	35 d	368 m
	18. August 95	*18.–19. August 95*	89 m			
	19. August 95			*19. August – 27. Oktober 95*	70 d	797 m
	27. Oktober 95	*27.-28. Oktober 95*	38 m			
	28. Oktober 95			*28. Oktober 95- 15. März 96*	140 d	609 m
	15. März 96	*15.-16. März 96*	59 m			
	16. März 96			*16. März – 19. April 96*	35 d	397 m
	19. April 96	*19.-20. April 96*	102 m			
	20. April 96			*20. April – 24. Mai 96*	35 d	675 m
	24. Mai 96	*24.–25. Mai 96*	114 m			
	25. Mai 96					
„La Guarena"	*25. Juni 99*			25. Juni - 2. Sept. 99	70 d	544 m
	2. Sept. 99	*2. / 3. September 99*	200 m			
	3. Sept. 99			3. Sept. 99 - 31. März 00	210 d	574 m
	31. März 00					
				31. März - 9. Juni 00	71 d	701 m
	9. Juni 00					

Tab. 7.1: *ERS 1/2 InSAR Datenprodukte* der Untersuchungsgebiete *„Sevilla" und „La Guarena"*

Alle Datenprodukte eines Untersuchungsgebietes wurden auf Basis eines identischen Höhenmodells geometrisch entzerrt und auf das System *UTM. Zonen 29 (Sevilla) und 30 („La Guarena"), geodätisches Datum und Bezugsellipsoid WGS 84* referenziert. Aufgrund der dreidimensionalen Geo-Referenzierung liegen die InSAR-Daten als *geokodierte, terrainkorrigierte* Datenprodukte (*GTC*) vor. Das *GTC*-Format gewährleistet eine hohe Lagegenauigkeit der Bildelemente und eine weitgehende Eliminierung der reliefbedingten Abbildungsfehler *Layover* und Foreshortening (siehe Kapitel 3.2.2.).

Das in der Prozessierung durchgeführte *Spatial Domain Multi-Look Verfahren* (siehe Kapitel 3.2.1.) verwendete eine Fenstergröße von $5x1$ Pixel in *Azimuth x Range-Richtung*, woraus eine *räumliche Auflösung* der *InSAR-Datenprodukte* von $25x25m$ resultiert. Die Szenen decken ein quadratisches Gebiet mit einer *Kantenlänge* von $l \approx 100km$ an der Erdoberfläche ab.

7.1.1. Amplituden-Daten

Der *interferometrischen Prozessierung* folgten mehrere *Aufbereitungsschritte*, um die *räumliche und zeitliche Vergleichbarkeit der Rückstreuinformation* zu gewährleisten.

Unter Berücksichtigung des lokalen Einfallswinkels erfolgte die Konvertierung der *Amplitudeninformation* in die Messgröße *normierter Rückstreuquerschnitt* σ^0 gemäß Kapitel 3.1..
Von einer *radiometrischen Korrektur* hinsichtlich des Einflusses des *lokalen Einfallswinkels* auf das *Rückstreuverhalten* wurde abgesehen, da das vorgestellte Verfahren der Feuchte-Index-Erfassung auf einer Ratiobildung basiert, die den Einfluss des *lokalen Einfallswinkel* auf das Messergebnis eliminiert. Darüber hinaus bedingten die geringen Hangneigungen der verwendeten Rückstreuflächen in beiden Untersuchungsgebieten („*Sevilla*": $\overline{\alpha}_{slope} = 1{,}57°$, $stabw = 2{,}01°$; „*La Guarena*": $\overline{\alpha}_{slope} = 2{,}31°$, $stabw = 2{,}03°$) nur eine geringe Variation der *lokalen Einfallswinkel*. Wie der Vergleich der *Reliefinformation* in Abbildung 8 und 9 im Anhang mit der *Landnutzungsinformation* in Abbildung 3 und 6 im Anhang bestätigt, befinden sich die *landwirtschaftlichen Flächen des Trockenfeldbaus*, die als Grundlage für die Feuchtebeschreibung dienen, in beiden Untersuchungsgebieten im nahezu ebenem Gelände der Flusstalböden.

Um das Speckle-Verhalten weiter zu reduzieren, erfolgte die Anwendung des *modellbasierten Filters* von Walessa (1999). Dieses *adaptive Filterverfahren* ist ein *bayes'scher Ansatz* und basiert auf der *Maximum a posteriori (MAP) Annahme* der Rückstreuquerschnitte. Das Ziel dieses Filtertyps ist die Schätzung des Grauwertes des unbeeinflussten Pixels innerhalb des Filterfensters über die lokale Statistik, indem die *a Posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* unter der Berücksichtigung des beeinträchtigten Eingangsdatensatzes maximiert wird. Das Speckle-Verhalten wird dabei als *multiplikatives Rauschen* modelliert und im Filterprozess berücksichtigt. Näheres zu diesem Verfahren ist der Publikation „*Texture Preserving Despeckling of SAR Images Using GMRFs*" von Walessa (1999) zu entnehmen. Abbildungen 4 und 1 im Anhang zeigen Beispiele für *einfallswinkelkorrigierte* und *adaptiv gefilterte* Datensätze der *Rückstreuintensität*.

7.1.2. Kohärenz-Schätzung - Tandem- und Langzeit-Kohärenz

Für die Belange der vorliegenden Studie wurden *Kohärenz-Schätzungen* über zwei unterschiedliche *Zeitintervall-Kategorien* erstellt: In einem *primären Prozessierungs-*

lauf erfolgte die Erfassung der *ERS-1/2 InSAR Tandem-Kohärenz* ($\Delta t = 24h$). Aus einem *sekundären Prozessierungslauf* resultierten *Langzeit-Kohärenz-Schätzungen*, welche die Phasenbeziehungen im Zeitraum zwischen den jeweiligen Tandem-Paar-Aufnahmezeitpunkten widerspiegeln. Wie Tabelle 7.1 verdeutlicht, variiert die Länge der *Langzeit-Kohärenz-Zeitintervalle* zwischen $35d \leq \Delta t \leq 210d$. Die Erfassung beider Kohärenz-Kategorien ermöglicht die Beschreibung der Signalähnlichkeit über den gesamten Beobachtungszeitraum der Zeitreihe.
Um einen Kompromiss zwischen *hoher räumlichen Auflösung* und *aussagekräftiger Kohärenz-Schätzung* zu erreichen, wurde in der interferometrischen Prozessierung eine Fenstergröße von $21x5$ Pixel (*Azimuth x Range*) für die *Tandem-* und *Langzeit-Kohärenz-Schätzung* gewählt.

Wie bereits in Kapitel 6. erläutert wurde, sind die *InSAR-Zeitreihen* beider Untersuchungsgebiete aufgrund einer geringen Aufnahmedichte durch große *Datenlücken* gekennzeichnet. Im Fall der *Langzeit-Kohärenz-Schätzung* erwies sich mitunter die *Länge der Zeitintervalle* zwischen den Aufnahmen als begrenzender Faktor und verdeutlicht die Forderung einer kontinuierlichen Datenerfassung in einem Intervall von $\Delta t = 35d$. Verstärkt wurde die Signaldekorrelation durch sehr große *effektive Basislinien* zwischen den Aufnahmepositionen der Sensoren.
Die Kombination der *temporalen* und *aufnahmegeometriebedingten Dekorrelationseffekte* führte in vier Fällen zu einer vollständigen *Signaldekorrelation der Langzeit-Kohärenz-Schätzung:*

a) **Untersuchungsgebiet *„Sevilla“*:**
   1) *28. Oktober 1995 / 15. März 1996:* $\Delta t = 140d$, $B = 609m$;
   2) *19. April 1996 / 24. Mai 1996:* $\Delta t = 35d$, $B = 675m$.
b) **Untersuchungsgebiet *„La Guarena“*:**
   1) *3. September 1999 / 31. März 2000:* $\Delta t = 210d$, $B = 574m$;
   2) *31. März 2000: / 9. Juni 2000:* $\Delta t = 71d$, $B = 701m$.

Auffällig erweist sich die Tatsache, dass alle aufgeführten *Inkohärenzen* entweder über sehr *lange Zeitintervalle* in der *winterlichen Regenzeit* oder innerhalb *kurzer Zeiträume* ($\Delta t = 35d$) zu den *Saatzeitpunkten im Frühjahr* auftreten. Beide Perioden sind durch hohe Veränderungsraten aufgrund des *erosiven Einflusses der winterlichen Niederschläge* oder durch *intensive ackerbauliche Aktivitäten*

gekennzeichnet. Darüber hinaus weisen alle dekorrelierten Langzeit-Kohärenz-Schätzungen sehr große *effektive Basislinien* $B \geq 574m$ zwischen den Aufnahmepositionen der Sensoren auf.

Ein Gegenbeispiel zeigt, dass eine hohe Veränderungsrate in einem Zeitintervall von $\Delta t = 35d$ nicht als alleinige Ursache für einen vollständigen Kohärenz-Verlust ausreicht. So beschreibt die aussagekräftige Langzeit-Kohärenz-Schätzung der Aufnahmezeitpunkte *16. März 1996 / 18. April 1996* gleichfalls die ackerbaulich intensiv geprägte Frühjahrsperiode, ohne dadurch eine signifikante, gebietsweite Signaldekorrelation aufzuweisen. Im Vergleich zu den inkohärenten Szenenpaaren ($B \geq 574m$) erfolgte diese Kohärenz-Schätzung jedoch auf Basis einer deutlich geringeren *effektiven Basislinie* ($B = 397m$).

Dies impliziert, dass die *aufnahmegeometriebedingte Dekorrelation* besonders intensiv in Erscheinung tritt, wenn zusätzlich eine starke *Veränderung der Streuverhältnisse* zwischen den Aufnahmezeitpunkten stattgefunden hat. Diese veränderten Streugeometrien resultierten in der vorliegenden Studie gemäß den Erkenntnissen aus Kapitel 3.3.2.1.2.. So führte einerseits die Akkumulation des Betrages der niederschlagsinduzierten Erosionsprozesse über den langen Zeitraum der winterlichen Regenzeit zu einer veränderten Oberflächenrauhigkeit. Andererseits bedingten die ackerbaulichen Maßnahmen vor der Saatbeetbereitung als singuläre Ereignisse die starke Umgestaltung der Oberflächengeometrie in kurzer Zeit.

Von entscheidender Bedeutung für das vorgestellte Verfahren ist daher die Gewährleistung einer *kontinuierlichen Zeitreihe mit hoher Datendichte* und, im Fall der Langzeit-Kohärenz-Schätzung auf Basis von *Tandem-Paaren*, die Auswahl der Datensätze, welche die minimale *effektive Basislinie* aufweisen. Abbildungen 1 und 4 im Anhang zeigen Beispiele für Tandem-Kohärenz-Schätzungen.

7.1.3. Digitale Höhenmodelle (DHM)

Mit Hilfe der Technik der SAR-Interferometrie erfolgte die Erstellung von *digitalen Höhenmodellen* (*DHM*) für die Untersuchungsgebiete *„Sevilla“* und *„La Guarena“* aus der Phaseninformation der *ERS-1/2 SAR Tandem-Daten*. Die *horizontale räumliche Auflösung* der *digitalen Höhenmodelle* beträgt gleich den *Amplituden- und Kohärenz-Daten* $25x25m$, während die Darstellung der *Höheninformation*

(*vertikale Auflösung*) in $\Delta h = 1m$ *Schritten* erfolgt. Neben dem Einsatz der Reliefinformation für die *Georeferenzierung* und *Einfallswinkelkorrektur* der InSAR-Daten fand die Reliefinformation in der Datenanalyse Verwendung (siehe Kapitel 10.2.2.).

Um eine hohe Genauigkeit der Höheninformation zu gewährleisten, erfolgte für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* die Ableitung von sieben individuellen Höhenmodellen auf Basis der zur Verfügung stehenden Tandem-Daten. Durch die pixelbasierte Mittelwertbildung über die Höheninformationen sollten zufällige Höhenvariationen aufgrund eines unberücksichtigten Phasenrauschens geglättet und damit ein hochwertiges digitales Höhenmodell erstellt werden.

Aufgrund der Ergebnisse des Vergleiches der Höhenmodelle mit dem *digitalen Geländemodell* (*DGM*) *GLOBE (Global Land One-Kilometer Base Elevation)*, welche die mitunter mangelhafte Güte der Modelle aufzeigten, wurde dieses Vorhaben verworfen. Dahingegen favorisierte der Vergleich die direkte Verwendung des Höhenmodells der Aufnahmezeitpunkte *9. / 10. Juni 1995* aufgrund der geringen Abweichung der Höheninformationen. Nähere Informationen zum *GLOBE DGM* sind der Publikation *„Development & Assessment of the Global Land One-Km Base Elevation Digital Elevation Model (GLOBE)"* von Hastings & Dunbar (1998) zu entnehmen.

Im Gegensatz zu *„Sevilla"* erlaubte die eingeschränkte Datengrundlage des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* nur die Ableitung eines *digitalen Höhenmodells.* Als Basis diente die Phaseninformation des Tandem-Paares der Aufnahmezeitpunkte *2. / 3. September 1999.*

Abbildungen 8 und 9 im Anhang zeigen die nach Höhenschichten eingefärbten, künstlich beleuchteten Reliefdarstellungen der digitalen Höhenmodelle der Untersuchungsgebiete *„Sevilla"* und *„La Guarena"*.

7.2. Aufbereitung der *Landsat TM und ETM+ Daten*

Die *Landsat 5 TM Szene* des Untersuchungsgebiete *„Sevilla"* wurde auf die *InSAR GTC Datenprodukte* der Aufnahmezeitpunkte *9. / 10. Juni 1995* ko-registriert. Die Passpunktentzerrung erfolgte jeweils auf Basis einer Transformationsfunktion

zweiten Grades mit Hilfe von $n = 30$ Passpunkten. Die *Landsat 7 ETM+ Szene* des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* lag bereits in geokodierter Form vor.
Aufgrund der *Streumechanismen an Luftmolekülen* und *Aerosolen* sowie der *Absorption an Ozon und Wasserdampf*, wird die Stärke der einfallenden und reflektierten Strahlung des optischen Bereiches des elektromagnetischen Spektrums auf ihrem Weg durch die Atmosphäre verändert und gemindert. Die variierende Intensität der Abschwächung in Abhängigkeit des jeweiligen Atmosphärezustandes beschränkt die zeitliche Vergleichbarkeit von optischen Daten.
Um diese Beeinflussung zu eliminieren, erfolgte eine Atmosphärenkorrektur der *Landsat TM und ETM+ Daten* mit Hilfe der von Richter (2001) entwickelten *Atmosphärenkorrektur ATCOR 3*. Zusätzlich zum Atmosphäreneinfluss berücksichtigt *ATCOR 3* die Beeinflussung der reflektierten Strahlung einer Auflösungszelle durch reliefbedingte Streukomponenten aus benachbarten Auflösungszellen in einer *Terrainkorrektur.* Als Reliefinformation für die *Terrainkorrektur* dienten die interferometrisch abgeleiteten *ERS-1/2 InSAR DHM* der Untersuchungsgebiete. Nähere Informationen zu ATCOR 3 ist der Publikation *„Atmospheric Correction for Flat and Rugged Terrain - The ATCOR Models"* von Richter (2001) zu entnehmen. Beispiele für die *atmosphären- und terrainkorrigierten Landsat TM und ETM+ Szenen* sind die RGB-Darstellungen der Landsat 5 TM Szene des Aufnahmezeitpunktes *5. Juni 1999 („Sevilla")* in Abbildung 2 im Anhang und der Landsat 7 ETM+ Szene des Aufnahmezeitpunktes *10. Juni 2000 („La Guarena")* in Abbildung 7 im Anhang.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Das Ziel von *Vegetationsindizes* ist es, mit Hilfe einer Messvariablen eine *quantitative Aussage* über den *Zustand der Vegetationsbedeckung* auf Basis der gemessenen Reflexstrahlung zu ermöglichen. Da das spezifische *Verhältnis der Absorption* im Bereich des *sichtbaren Rot (RED) zur Reflexion des nahen Infrarots (NIR)* die entscheidende Informationsquelle für die Charakterisierung von Vegetation ist, basieren Vegetationsindizes auf der Bündelung dieser Information. Damit ist ein zusätzlicher Vorteil dieser Verfahren die Reduktion der Datenmenge.

Wie bereits am Beispiel der Radar-Rückstreuintensität erläutert wurde, begünstigt die *Ratiobildung* auch im Fall von optischen Daten die räumliche und zeitliche Vergleichbarkeit der Reflexionswerte, indem sie den Einfluss *von reliefbedingten Beleuchtungsunterschieden*, variierenden Sonnenständen oder Bewölkungssituationen minimiert.

In der vorliegenden Studie fand der häufig verwendete Vegetationsindex *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* Verwendung, der von Rouse et al. (1974) vorgestellt wurde:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \tag{7.1}$$

mit:

$NDVI$: *Normalized Difference Vegetation Index;*
NIR: Reflexion im nahen Infrarot;
RED: Reflexion im sichtbaren Rot.

Der *NDVI* ermöglicht die quantitative Beschreibung des Vegetationszustandes auf Basis einer *linearen Messskala* in einem *Wertebereich* von $W = [-1;1]$. Während Werte von $NDVI \leq 0$ *vegetationsfreie oder pflanzenwasserarme Flächen* repräsentieren, signalisiert ein Wert von $NDVI > 0$ die Anwesenheit von aktiver Vegetation. Somit wächst der *NDVI* mit steigendem *Wassergehalt* und *Biomasseaufkommen* der Vegetationsdecke.

Der *NDVI* wurde für alle *Landsat TM und ETM+ Szenen* des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* und *„La Guarena"* abgeleitet und diente in der Kohärenz-Analyse in Kapitel 9.1. als auch in der Dateninterpretation in Kapitel 10. als Indikator für das Biomasseaufkommen der vegetationsbedeckten, biomassearmen Flächen.

8. Erfassung eines Feuchte-Index auf Basis der ERS-1/2 InSAR Information

Das vorliegende Kapitel beschreibt das *Verfahren zur Erfassung der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Bodenfeuchtemustern in semiariden Gebieten mittels ERS-1/2 InSAR Zeitreihen.* Ziel des Verfahrens ist die räumlich hochaufgelöste, großräumige Erfassung der Bodenfeuchtesituation im Skalenbereich von Flusseinzugsgebieten ausschließlich mit Hilfe der Fernerkundung.

Wie Kapitel 2. anhand der Eigenschaften der diversen Ansätze zur Erfassung der Bodenfeuchte mit Radar-Systemen verdeutlicht, ist auf Basis *single-frequenter* und *single-polarimetrischer SAR Daten* eine derartige Zielsetzung am effektivsten durch die Verwendung eines einfachen Change-Detection-Verfahrens zu erfüllen, weshalb diese Methode in der vorliegenden Studie Verwendung fand. Die Nutzung der *synergistischen Effekte* zwischen *Scatterometer-* und *SAR-System* ermöglicht die fernerkundungsbasierte Parametrisierung der Oberflächenrauhigkeit und besitzt darüber hinaus ein großes Potential, um eine kontinuierliche, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bodenfeuchteerfassung zu ermöglichen, die als Grundlage für die Implementierung effektiver *Dürre-* und *Hochwasserwarnsysteme* dienen kann.

Da auf eine Unabhängigkeit von in-situ Messungen geachtet wurde, erfolgt der Ausschluss stark signalbeeinflussender Vegetation in der Beschreibung der räumlichen Feuchteverteilung auf Basis der *ERS-1/2 InSAR Kohärenz*. Diese Informationsquelle wird darüber hinaus dazu genutzt, die Stabilität der beeinflussenden Oberflächenparameter *Oberflächenrauhigkeit* und *Vegetationsbedeckung* über die Zeit zu gewährleisten und damit eine hohe Genauigkeit der Beschreibung der zeitlichen Feuchtevariation zu ermöglichen.

Der vorgestellte Ansatz erlaubt eine effektive Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Feuchteverteilung von großen Gebieten auf Basis *eines Minimums an Input-Information.* Hierdurch werden ein hohes Maß an *Stabilität* sowie eine *geringe Rechenzeit* erreicht. Beide Eigenschaften sind entscheidende Kriterien in Hinblick auf eine *Operationalisierung.*

8.1. Physikalischer Hintergrund

Die folgende physikalische Begründung des Verfahrensprinzips basiert auf der Anwendung der Erkenntnisse von Kapitel 4. *„Betrachtung der Streuprozesse an der Erdoberfläche"*. Gemäß dieser Diskussion wird das Rückstreuverhalten von elektromagnetischen Wellen an der Erdoberfläche neben den *systembedingten Abbildungsparametern* und dem *lokalen Einfallswinkel* durch die *Vegetationsbedeckung* und *Bodeneigenschaften* beeinflusst.

Im Fall eines *brachliegenden Bodens* zeigt sich eine Abhängigkeit des *Rückstreusignals* $\sigma^0{}_{soil}$ von den *dielektrischen Eigenschaften* der *Bodenkomponenten* (Dreiphasensystem), dessen *Oberflächenrauhigkeit* und *Textur*. Dabei bestimmt maßgeblich der Anteil des Bodenwassers die Stärke des Rückstreusignals über einen nicht-linearen Zusammenhang. Während im Bereich geringer Bodenfeuchte das Signal in Abhängigkeit der Frequenz sensibel auf eine Feuchteänderung reagiert, zeigt sich im zunehmend feuchten Bereich eine Signalsättigung. Diverse Studien belegen jedoch, dass das feuchtebedingte Signalverhalten im C-Band bis zu einer *volumetrischen Bodenfeuchte* von ca. $m_v \leq 0{,}35\text{–}0{,}40 \cdot cm^3 cm^{-3}$ als lineare Funktion beschrieben werden kann, da die Signalsättigung erst jenseits dieses Bereiches signifikant in Erscheinung tritt (vgl. Quesney et al., 2000; Zibri & Dechambre, 2002). In einer linearen Näherungsform lässt sich somit das *rückgestreute Bodensignal* $\sigma^0{}_{soil}$ durch folgende Gleichung mit dem *volumetrischen Wassergehalt* m_v des Bodens in Beziehung setzen (vgl. Attema & Ulaby, 1978; Ulaby et al., 1984; Bouman, 1991; Champion & Faivre, 1997):

$$\sigma^0{}_{soil} = \sigma^0{}_{dry} + \frac{d\sigma^0}{dm_v} \cdot m_v \qquad (8.1)$$

mit:

$\sigma^0{}_{dry}$: Signalanteil aufgrund von Streuung am / im trockenen Boden [dB];

$d\sigma^0/dm_v$: Signalsensibilität hinsichtlich einer Feuchteänderung [$dB \cdot cm^3 cm^{-3}$];

m_v : volumetrische Bodenfeuchte [$cm^3 cm^{-3}$].

Dabei setzt sich der Streuterm $\sigma^0{}_{dry}$ aus den Signalanteilen zusammen, welche durch die *Oberflächen-* und *Volumenstreuung* an der Oberfläche und im trockenen Bodenvolumen verursacht werden. Folglich weist der Term $\sigma^0{}_{dry}$ eine Abhängigkeit von der *Oberflächenrauhigkeit* und den *Textureigenschaften* des beobachteten

Bodens auf. Aufgrund der deutlich untergeordneten Stellung der *Volumenstreuung* wird der Streuterm $\sigma^0{}_{dry}$ zur Vereinfachung im weiteren als *rauhigkeitsbedingter Rückstreuanteil* $\sigma^0{}_{dry}$ bezeichnet. Der Term $d\sigma^0/dm_v$ beschreibt die *Sensibilität des Signals hinsichtlich einer Feuchteänderung* und ist abhängig von der Sensorkonfiguration (vgl. Champion & Faivre, 1997; Ulaby, et al., 1978; Ulaby, et al., 1986). Gemäß Gleichung (8.1) beeinflusst die Oberflächenrauhigkeit nicht die Feuchtesensibilität des Radar-Signals, sondern induziert ihrerseits einen feuchteunabhängigen Signalbeitrag $\sigma^0{}_{dry}$, der zusammen mit dem *feuchtebedingten Signalanteil* $\Delta\sigma^0{}_{moist}$ das *Rückstreusignal eines brachliegenden Bodens* $\sigma^0{}_{soil}$ definiert:

$$\Delta\sigma^0{}_{moist} = \frac{d\sigma^0}{dm_v} \cdot m_v \tag{8.2}$$

mit:

$\Delta\sigma^0{}_{moist}$: feuchtebedingter Signalanteil [dB].

Wie in Kapitel 4.1.1.1. erläutert wurde, erweist sich der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und *feuchtebedingtem Signalanteil* $\Delta\sigma^0{}_{moist}$ abhängig von der Bodentextur. Dieses standortspezifische Verhalten muss in der fernerkundungsbasierten Beschreibung der Feuchteverteilung eines Einzugsgebietes Berücksichtigung finden, um die räumliche Vergleichbarkeit der mikrowellenbasierten Feuchtebeschreibung zu gewährleisten. Dahingegen ist im Fall eines trockenen Bodens der Textureinfluss weitgehend zu vernachlässigen (vgl. Dobson et al., 1984).

Im Fall einer *Vegetationsbedeckung* erfolgt eine Abschwächung des transmittierten Bodensignalanteils $\sigma^0{}_{soil}$, während gleichzeitig ein eigenständiger vegetationsbedingter Rückstreuanteil zum Rückstreusignal beiträgt. Die Stärke der Interaktion wird dabei neben dem Einfluss der *systembedingten Abbildungsparameter* und dem *lokalen Einfallswinkel* über das *Biomasseaufkommen*, die *Architektur* und den *Pflanzenwassergehalt* gesteuert. Der Vegetationseinfluss auf das rückgestreute Signal variiert arten- und phänologiespezifisch und wird über das Verhältnis des Betrages der Signalabschwächung zur Intensität des vegetationsspezifischen Rückstreuanteils gesteuert.

Dabei erweist sich das in der Studie verwendete C-Band Signal mit einer Wellenlänge von $\lambda = 5{,}6cm$ aufgrund der Größenähnlichkeit mit den *Bestandeskomponenten* (Blätter, Zweige) stark durch Vegetation beeinflusst. Insbesondere

vitale, biomassereiche Vegetation, wie *Wald, Busch-* und *Strauchvegetation,* führt zu einer starken Signalabschwächung, so dass das Rückstreusignal dieser Flächen oftmals ausschließlich Information bezüglich der Vegetationsdecke trägt.

Aufgrund dieser starken Beeinträchtigung bleiben Verfahren zur Bodenfeuchte-erfassung mittels C-Band-Radar auf Flächen mit geringem Biomasseaufkommen beschränkt. So weisen u.a. Dobson & Ulaby (1981) auf die oftmals geringe optische Dicke von ackerbaulichen Kulturpflanzen im Bereich des C-Bandes hin. Trotz eines großen Variationsbereiches an Pflanzenhöhen, und -dichtezuständen sowie Bodenrauhigkeitsverhältnissen konnten sie für verschiedene Getreidearten und Hackfrüchte mit *Korrelationskoeffizienten* von bis zu $R = 0{,}92$ starke lineare *Zusammenhänge zwischen Rückstreuquerschnitt und volumetrischer Bodenfeuchte* der $z = 5cm$ mächtigen Oberflächenhorizonte ermitteln. Begünstigt wurde dabei das Transmissionsverhalten durch geringe Einfallswinkel von $7° \leq \theta \leq 17°$.

Ulaby et al. (1984) benennen in diesem Zusammenhang mit einem *Green Leaf Area Index* von $GLAI < 2{,}0$ einen maximalen Biomassegrenzwert, der noch einen Zusammenhang zwischen dem Rückstreusignal des C-Bandes und der Boden-feuchte unter diversen Feldfrüchten erkennen lässt.

Aufgrund spezifischer Architekturmerkmale und Pflanzenwassergehalte zeigt der Vegetationseinfluss eine starke Abhängigkeit von der *Art* und dem *phänologischen Zustand.* Im Fall von *Kartoffel-* und *Zuckerrübenkulturen* weist beispielsweise das C_{VV}-Rückstreuverhalten bei einem Einfallswinkel von $\theta = 23°$ über den gesamten Wachstumszyklus eine deutliche Abhängigkeit von der Bodenfeuchte auf, während ihr Einfluss bei *Winterweizen* und *Sommergerste* sowohl während der *vegetativen* als auch zu Beginn der *generativen Wachstumsphase* durch den Vegetationseinfluss maskiert wird (vgl. van Leeuwen & Borgeaud, 1997; Schmullius et al., 1993; Schmullius & Nithack, 1995).

Diese Beobachtung bestätigen Quesney et al. (2000), die anhand der Wachstumsphasen des *Winterweizens* aufzeigen, dass in den beiden Monaten vor der *Reife*, in denen die Pflanzen ein starkes Biomasseaufkommen bei gleichzeitig hohem Pflanzenwassergehalt aufweisen, das feuchtebeeinflusste C_{VV}-Bodensignal ($\theta = 23°$) so stark durch die Vegetationsbedeckung abgeschwächt wird, dass die Signalinformation bezüglich der Bodeneigenschaften unter der radiometrischen Auflösung des ERS-1/2 SAR Systems von ca. 1dB liegt.

Dies impliziert, dass im wachstumsintensiven Zeitraum *spätes Frühjahr* bis *Frühsommer* weite Teile der ackerbaulich genutzten Flächen nicht für eine Bodenfeuchteerfassung auf Basis des C-Band Signals genutzt werden können.

Wie Kapitel 2.1. erläutert, ermöglicht die Verwendung von Vegetationsmodellen die Charakterisierung des Vegetationseinflusses auf das Bodensignal. Dabei bleibt ihre Anwendung in Bezug auf die räumlich hochaufgelösten SAR-Daten aufgrund der Notwendigkeit der individuellen Parametrisierung der Pflanzeneigenschaften jedoch auf einzelne Flächen beschränkt. Da eine flächenhafte Bodenfeuchtebeschreibung über große Gebiete nicht über eine Abhängigkeit von in-situ Messungen zu realisieren ist, muss für diese Zielsetzung das Biomasseaufkommen der beobachteten Flächen soweit begrenzt werden, dass ihr Einfluss auf das Bodensignal in erster Näherung zu vernachlässigen ist und das Rückstreuverhalten ausschließlich als Resultat aus den dielektrischen Eigenschaften des Bodens und dessen Oberflächenrauhigkeit angesehen werden kann.
Im Fall von geringem Biomasseaufkommen oder geringer Wassergehalte ist die Voraussetzung für eine weitgehend unbeeinflusste Bodenfeuchteerfassung gegeben. So weisen u.a. Dobson et al. (1992) auf den dominanten Einfluss einer Feuchte- und Rauhigkeitsvariation auf das C_{VV}-Rückstreusignal ($\theta=23°$) im Fall einer *spärlichen Vegetationsbedeckung,* wie beispielsweise *Grasbewuchs,* hin und beziffern eine damit verbundene maximale Signalabschwächung mit $\Delta\sigma^0 = 0{,}2dB$. Damit erweist sich die Signalmodifikation in diesem Biomassebereich gering im Vergleich zum Einfluss durch veränderte Feuchteverhältnisse, die gemäß Schmugge (1983) und Dobson & Ulaby (1986b) zu einer Signalvariation von bis zu $\Delta\sigma^0 \approx 10dB$ für Wellenlängen von $\lambda > 5cm$ führen können.
Die Gewährleistung eines weitgehend fehlenden Vegetationseinflusses erlaubt die näherungsweise Beschreibung des Rückstreuverhaltens biomassearmer Flächen ausschließlich über die Parametrisierung des Einflusses der *Bodenrauhigkeit* und *Bodenfeuchte* auf Basis von Gleichung (8.1). Diesen Zusammenhang nutzt das im folgenden vorgestellte Verfahren, um mit Hilfe eines *empirischen Change-Detection-Ansatzes* die Feuchteverteilung von *semiariden Einzugsgebieten* zu beschreiben.

8.2. Charakterisierung der Bodenrauhigkeit

Das *Verfahren zur Erfassung der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Bodenfeuchtemustern mittels ERS-1/2 InSAR Zeitreihen* wurde speziell für die Bodenfeuchtebeschreibung in *semiariden Gebieten* entwickelt. Für diese Aufgabe nutzt das Verfahren die besonderen klimatischen Eigenschaften dieser Regionen, um mit Hilfe eines einfachen *empirischen Change-Detection-Ansatzes,* unter Ausschluss einer möglichen Signalbeeinflussung durch Vegetation oder einer zwischenzeitlichen Rauhigkeitsänderung, die räumliche und zeitliche Bodenfeuchte-variation auf Basis eines *Feuchte-Index* zu erfassen.

Den Kernpunkt des Ansatzes bilden dabei die charakteristischen *Trockenzeiten* semiarider Gebiete, die aufgrund der hohen Einstrahlung und des Fehlens von Niederschlägen über mehrere Monate eine großräumige Trockenheit garantieren. So weist der fernerkundlich erfasste Oberflächenhorizont bereits nach einer Abtrocknungsphase von nur wenigen Tagen nach einem Niederschlagsereignis vollständig trockene Verhältnisse auf ($m_v = 0cm^3cm^{-3}$). Bedingt wird die rasche Reaktion des Bodens durch die Stärke des atmosphärischen Einflusses auf die Grenzschicht und deren geringe Pufferwirkung aufgrund der geringen Mächtigkeit des beobachteten Horizontes. So beträgt die Mächtigkeit der mit Hilfe des C_{VV}-Signals erfassten Schicht im Fall des trockenen Bodens bis zu $z \approx 10cm$, wobei die Anwesenheit von Bodenfeuchte den Informationsgewinn auf eine mittlere Mächtigkeit von nur ca. $z = 2cm$ begrenzt (vgl. Schmugge, 1983).

Da räumliche Rückstreuvariationen auf trockenen, vegetationsfreien Böden gemäß Gleichung (8.1) in erster Näherung ausschließlich durch Unterschiede in der Rauhigkeitsverteilung verursacht werden, besteht die Möglichkeit, den *rauhigkeitsbedingten Signalanteil* σ^0_{dry} in den Trockenphasen zu erfassen.

Indem die Rauhigkeit indirekt über das resultierende Rückstreuverhalten charakterisiert wird, umgeht das vorgestellte Verfahren die in Kapitel 2. erläuterte problembehaftete Beschreibung der Oberflächenrauhigkeit auf Basis von Rauhigkeitsparametern, wie der *rms-Höhe* r und *Korrelationslänge* l. Auch bietet der Ansatz die Möglichkeit, den Einfluss individueller Standorteigenschaften, wie aufliegende Steine, Wälle, usw., auf das Rückstreuverhalten mit zu berücksichtigen.

Unter der Voraussetzung der *Stabilität der erfassten Rauhigkeitsverhältnisse über die Zeit* erlaubt die gewonnene Information gemäß Gleichung (8.1) die Ermittlung des *feuchtebedingten Signalanteils* $\Delta\sigma^0_{moist}$ der folgenden Aufnahmezeitpunkte. Die Unabhängigkeit von in-situ Messungen ermöglicht somit eine räumlich hochaufgelöste Beschreibung der Bodenfeuchtesituation im Skalenbereich von Einzugsgebieten auf Basis eines Feuchte-Index.

Ein ähnlicher Ansatz zur Bestimmung des *feuchtebedingten Signalanteils* $\Delta\sigma^0_{moist}$ wurde u.a. von Wagner et al. (1999a, b, c), Moran et al. (2000) und Magagi & Kerr (2001) erfolgreich angewendet (siehe Kapitel 2.). Trotz der Tatsache, dass Moran et al. (2000) den Einfluss einer möglichen Rauhigkeitsänderung auf die SAR-basierte Feuchtebeschreibung nicht berücksichtigten, konnten sie mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}93$ eine starke Korrelation zwischen dem feuchtebedingten C_{VV}-Signalanteil und in-situ Messungen der volumetrischen Bodenfeuchte nachweisen. Der vergleichsweise schwache Zusammenhang bei Verwendung der nicht korrigierten Rückstreuintensität von $R^2 = 0{,}27$ unterstreicht die Effektivität dieser einfachen Rauhigkeitskorrektur.

Aufgrund der geringen Beeinflussung des Rückstreuverhaltens durch *biomassearme* oder *trockene Vegetation* finden entsprechende Flächen neben vegetationsfreien Böden gleichfalls in der Feuchtebeschreibung Berücksichtigung. Vorteilhaft erweist sich dabei, dass semiaride Gebiete oftmals durch eine spärliche natürliche Vegetationsdecke gekennzeichnet sind. Jedoch weisen auch *landwirtschaftliche Flächen des Trockenfeldbaus* in den Sommermonaten eine geringe Signalbeeinflussung durch Vegetation auf, da in diesem Zeitraum aufgrund der Trockenheit der Anbau entweder gänzlich ruht oder die verbleibenden *Feldfrüchte* nur einen geringen Pflanzenwassergehalt aufweisen. Ein möglicher verbleibender Resteinfluss der trockenen Vegetation auf das Rückstreuverhalten findet in Form einer zusätzlichen Rauhigkeitskomponente Berücksichtigung. Bereits Moran et al. (2000) weisen darauf hin, dass der Einfluss trockener dichter Vegetation auf das Rückstreusignal bis zu einem *Brown Leaf Area Index* von $BLAI < 1{,}5$ zu vernachlässigen ist. Die daraus resultierende hohe Dichte an geeigneten Flächen für die Rauhigkeitsbeschreibung begünstigt die Aussagekraft der räumlichen Feuchtebeschreibung.

Die Detektion des *Trockenzeitpunktes*, der eine feuchteunbeeinflusste Rauhigkeitscharakterisierung gewährleistet, erfolgt unter Nutzung der *synergistischen Effekte* zwischen *SAR-* und *Scatterometer-System* auf Basis der Information des *ERS-1/2 Scatterometers.* So ermöglicht die Systemkonfiguration des Scatterometers die temporal hochaufgelöste, kontinuierliche Überwachung der hoch dynamischen zeitlichen Feuchtevariation eines großen Gebietes und gewährleistet damit das Erkennen von Trockenperioden.

Dabei ist zu beachten, dass die stark abweichende räumliche Auflösung von SAR- und Scatterometer-System dazu führt, dass die jeweils erfasste Feuchtevariation in unterschiedlichen Skalenbereichen stattfindet:

So bedingt die geringe räumliche Auflösung, dass die Scatterometer-Information die von Vinnikov et al. (1996) bezeichnete *atmosphärisch bedingte Komponente der Bodenfeuchtevariation* beschreibt, die in einem *großen räumlichen* wie auch *zeitlichen Skalenbereich* stattfindet (vgl. Wagner, 1998). Im Gegensatz dazu erfassen SAR-Systeme den *räumlichen Anteil* der *kleinskaligen, erdoberflächenbedingten Variationskomponente der Bodenfeuchte*, welche laut Vinnikov et al. (1996) eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aufweist und über das jeweilige *Relief*, die *Bodenartenverteilung* und die *Vegetationsbedeckungen* gesteuert wird. Eine Beschreibung der zeitlichen Komponente dieser kleinskaligen Feuchtevariation ist aufgrund der stichpunktartigen Datenerfassung von SAR-Systemen nicht möglich, weshalb die zeitlich hochaufgelöste Scatterometer-Information vorteilhaft dazu verwendet werden kann, diese Einschränkung zu kompensieren.

Da in den Trockenzeiten jegliche Feuchtevariation unabhängig des Skalenbereiches fehlt, ist bei Ausschluss des Vegetationseinflusses auf das Rückstreusignal die Information beider Systeme bezüglich des Feuchteverhaltens identisch. Aufgrund dieser Eigenschaft findet die hohe zeitliche Auflösung des ERS-1/2 Scatterometer-Systems im vorgestellten Verfahren Verwendung, um zu Beginn eines Verfahrenslaufes geeignete Trockenzeitpunkte für die Erfassung des rauhigkeitsbedingten Signals σ^0_{dry} im Jahresverlauf zu detektieren. Signalisiert die Scatterometer-Information trockene Verhältnisse über mehrere Aufnahmezeitpunkte, so erfolgt die räumlich hochaufgelöste Erfassung der räumlichen Verteilung des rauhigkeitsbedingten Signals σ^0_{dry} mit Hilfe des SAR-Systems. Unterstützt wird die Scatterometer-Information durch die ergänzende Analyse von meteorologischen

Daten, die insbesondere im Fall fehlender zeitlich korrespondierender Scatterometer-Aufnahmezeitpunkte ersatzweise Verwendung finden.
Die Kenntnis der räumlichen Rauhigkeitsverteilung, repräsentiert durch den rauhigkeitsbedingten Signalanteil σ^0_{dry} erlaubt unter der Voraussetzung der zeitlichen Rauhigkeitsstabilität sowie einer zu vernachlässigenden Beeinflussung des Signals durch biomassearme oder trockene Vegetation die Ableitung der räumlichen und zeitlichen Feuchteverteilung des Oberflächenhorizontes für dem Trocken-zeitpunkt folgende Aufnahmezeitpunkte.

Die Nutzung der synergistischen Effekte zwischen SAR- und Scatterometer-System eignet sich darüber hinaus dazu, eine großflächige zeitlich wie auch räumlich hochaufgelöste Feuchtebeschreibung zu ermöglichen und damit die entscheidende Forderung seitens der Hydrologie zu erfüllen.
Im Fall des Ausschlusses der Vegetation ändert sich gemäß der Definition von Vinnikov et al. (1996) das Verhältnis der relativen räumlichen Feuchteverteilung nur geringfügig, da Relief und Bodenartenverteilung in erster Näherung keine Veränderung über die Zeit aufweisen. Dieses Verhalten bedingt das Entstehen von *stabilen räumlichen Feuchtemustern* auf vegetationsfreien Flächen, deren absoluter Feuchtebetrag in Abhängigkeit der Topographie sowie der lokalen Infiltrationskapazität der Böden in einer Größenordung von wenigen Tagen individuell variiert.
Die kombinierte Nutzung von Scatterometer- und SAR-System ermöglicht, das zeitliche Verhalten dieser stabilen Feuchtemuster näherungsweise zu beschreiben und darüber eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Abschätzung der Feuchteverteilung innerhalb eines Beobachtungsgebietes zu treffen.
So gewährleistet die hohe *räumliche Auflösung* des *SAR-Systems* die sensible Beschreibung der Bodenfeuchtemuster sowie ihr individuelles Feuchteverhalten auf eine atmosphärische Beeinflussung. Um die Einschränkung der geringen temporalen Auflösung des SAR-Systems zu kompensieren, erfolgt die Aktualisierung des *absoluten* Feuchtebetrages der räumlichen Muster unter Berücksichtigung ihres individuellen Feuchteverhaltens über die zeitlich hochaufgelöste Information des Scatterometers. Unter der Voraussetzung, dass der Vegetationseinfluss auf das Rückstreusignal eliminiert wird, kann die Feuchteinformation des Scatterometers mit der Information des SAR-Systems in Beziehung gesetzt werden. Auf Basis eines

empirisch ermittelten Zusammenhanges zwischen beiden Messgrößen, die zu Zeitpunkten mit variierenden Zuständen der Bodenfeuchtemuster erfasst wurden, kann somit eine eingeschränkte Aussage über die herrschende Bodenfeuchteverteilung im Zeitraum zwischen den SAR-Aufnahmezeitpunkten getroffen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die großräumige Scatterometer-Information mitunter stark von der kleinräumigen Feuchtevariabilität abweicht und die Abnahmeraten der Feuchtemuster in Abhängigkeit der atmosphärischen Bedingungen stark variieren können, eignet sich die abgeleitete Feuchteinformation nur als *Indikator* für das räumliche und zeitliche Verhalten der *kleinskaligen Variationskomponente der Bodenfeuchte*. Da jedoch trotz ihrer eingeschränkten Aussagekraft eine derartig detaillierte, flächenhafte Information über die räumliche und zeitliche Bodenfeuchteverteilung in großen Gebieten nur in den seltensten Fällen zur Verfügung steht, ermöglicht dieser Ansatz eine deutliche Verbesserung der Informationslage. Insbesondere in der Kombination mit *hydrologischen Modellen* kann die fernerkundlich erfasste Bodenfeuchteinformation vorteilhaft als *Input-Parameter* oder *Kalibrierungsgrundlage* für *Dürre- oder Hochwasserwarnsysteme* eingesetzt werden. Aufgrund der unzureichenden InSAR-Datengrundlage war es innerhalb der vorliegenden Studie nicht möglich, die Nutzbarkeit dieses Ansatzes zu überprüfen.

8.3. Die Kohärenz - Gewährleistung der Prämissen

Aufgrund der Mehrdeutigkeit des Rückstreusignals basiert das vorgestellte Verfahren auf zwei *Prämissen*, die eine Reduzierung der signalbeeinflussenden Faktoren gewährleisten und darüber eine isolierte Betrachtung der feuchte- und rauhigkeitsbedingten Signalanteile ermöglichen.

Die *primäre Prämisse* fordert den *Ausschluss von Flächen mit biomassereicher oder stark signalbeeinflussender Vegetation*. Wie Kapitel 2.1. entnommen werden kann, ist im Fall von SAR-Systemen eine flächendeckende, rückstreumodellbasierte Beschreibung ihres Einflusses auf das feuchtebedingte Rückstreusignal über ein größeres Gebiet mit variierender Vegetationsbedeckung aufgrund einer Abhängigkeit von in-situ Messungen nicht möglich.

Die *sekundäre Prämisse* ist die *Stabilität der Oberflächenrauhigkeit* während eines Verfahrenslaufes, um den Einfluss einer Rauhigkeitsänderung auf das feuchte-

bedingte Signal auszuschließen. So suggeriert eine Änderung der Rauhigkeitssituation zwischen dem Aufnahmezeitpunkt der Rauhigkeitscharakterisierung und dem der Feuchtebestimmung eine nicht existente Feuchtevariation im Rückstreusignal. Wie Wang et al. (1986) zeigten, führt im C-Band bei einem Einfallswinkel von $\theta = 30°$ bereits eine Veränderung der Oberflächenrauhigkeit um $\Delta z = 1cm$ zu einer Zunahme des Rückstreuquerschnittes von ca. $\Delta\sigma^0 \approx 8dB$. Der Vergleich mit der maximalen Signalvariation aufgrund einer Feuchteänderung von $\Delta\sigma^0 \approx 10dB$ (vgl. Schmugge, 1983; Dobson & Ulaby; 1986b) weist auf die Stärke des Einflusses einer Rauhigkeitsänderung hin. Mit weiter anwachsender Rauhigkeit sinkt der Betrag wieder ab, bis bei einer vertikalen Rauhigkeitshöhe, die der Größenordnung der Wellenlänge entspricht oder diese übersteigt, sich das Rückstreuverhalten bei einem Einfallswinkel von $\theta = 30°$ dem einer glatten horizontalen Fläche annähert.
Bezüglich des beschriebenen Verhaltens ist zu beachten, dass die Beobachtung von Wang et al. (1986) bei einem Einfallswinkel von $\theta = 30°$ erfolgte, weshalb aufgrund der starken Einfallswinkelabhängigkeit des Rauhigkeitseinflusses ein geringfügig schwächer ausgeprägtes rauhigkeitsbedingtes Rückstreuverhalten im Einfallswinkelbereich des ERS-1/2 SAR Systems zu erwarten ist.

Da sich beide Störeinflüsse in einer starken zeitlichen Veränderung der Streugeometrie eines Flächenstreuers äußern, erweist sich die Kohärenz-Information als hervorragend geeignet, um ihr Auftreten zu detektieren und damit die Erfüllung der Prämissen zu gewährleisten. So ermöglichen *biomassespezifische Veränderungsraten* eine sensible *Isolierung biomassearmer Flächen*. (siehe: Zebker & Villasenor, 1992; Borgeaud & Wegmüller, 1996; Wegmüller, 1998; Wegmüller et al., 2000; Moeremans & Dautrebande, 2000; Lu & Meyer, 2002). Aufgrund dieser Sensibilität findet auch in der vorliegenden Studie die *Isolierung der vegetationsfreien bzw. biomassearmen Flächen* für die Rauhigkeitserfassung auf Basis der *Tandem-Kohärenz* statt.
Darüber hinaus eignet sich die Betrachtung der Langzeit-Kohärenz im C-Band für die sensible Erfassung einer *Veränderung der Rauhigkeitsverhältnisse im Zentimeterbereich* (vgl. Wegmüller, 1998; Wegmüller et al., 2000; Lu & Meyer, 2002). Dies ermöglicht eine Überwachung der geforderten *Rauhigkeitsstabilität* auf den isolierten biomassearmen Flächen von einem Tandem-Aufnahmezeitpunkt zum folgenden.

Zu beachten ist, dass der erläuterte Kohärenz-Ansatz nur dann effektiv verwendet werden kann, wenn der Dekorrelationsanteil aufgrund einer Änderung der Bodenfeuchte gering ist im Vergleich zu den Einflüssen einer signifikanten Rauhigkeitsänderung oder der Anwesenheit von Vegetation mit einem stark signalbeeinflussenden Biomasseaufkommen.

Wie in Kapitel 3.3.3.1.2. erläutert wurde, äußert sich eine Änderung der Bodenfeuchte gemäß Nesti et al. (1998) in einem maximalen Kohärenz-Verlust von ca. $\Delta\hat{\gamma} = 0{,}1$. Im Gegensatz zu den Labormessungen von Nesti et al. (1998) beobachteten Srivastava & Jayaraman (2001) in einem neuntägigen Zeitintervall einen Kohärenz-Verlust von ca. $\Delta\hat{\gamma} = 0{,}2$ auf vegetationsfreien Flächen bei einer gleichzeitigen Änderung der Rückstreuintensität von $\Delta\sigma^0 = 4dB$. Da keine weiteren Einflussfaktoren ersichtlich waren, bezogen sie das beobachtete Verhalten auf eine Änderung der Bodenfeuchte.

Die Gültigkeit der Annahme einer untergeordneten Bedeutung des *feuchtevariations-bedingten Dekorrelationsanteils* ist zu überprüfen. Um diese Frage zu klären und die Hypothese einer Eignung der Kohärenz für die Gewährleistung der Biomassearmut und Rauhigkeitsstabilität zu überprüfen, erfolgen in Kapitel 9. umfangreiche Kohärenz- und Intensitätsanalysen hinsichtlich dieser Thematik.

8.4. Der Feuchte-Index $m_{\%\,field}$

Der in der vorliegenden Studie verwendete *Feuchte-Index* $m_{\%field}$, der für die Beschreibung der oberflächigen Feuchteverteilung auf Basis von ERS-1/2 InSAR Daten unter Gewährleistung der Biomassearmut und Rauhigkeitsstabilität Verwendung findet, entspricht dem zugrundeliegenden Prinzip des *scatterometer-basierten Feuchte-Index* M_s von Wagner et al. (1999a,b,c). Dabei entfällt jedoch in der vorliegenden Version eine Berücksichtigung des zeitlich variierenden, wachstumsbedingten Vegetationseinflusses auf die eingehenden Rückstreusignale zu den Zeitpunkten der Rauhigkeits- und Feuchtebeschreibung aufgrund des beschriebenen Ausschlusses entsprechender Flächen. Der *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ ist wie folgt definiert:

$$m_{\%field}(t) = \frac{\sigma^0(t) - \sigma^0{}_{dry}(t_0)}{\max(\sigma^0(t_h) - \sigma^0{}_{dry}(t_{h_0}))} \cdot 100\% \tag{8.3}$$

mit:

$m_{\%field}(t)$: Feuchte-Index zum Zeitpunkt t [$\%Feldkapzität$];

$\sigma^0(t)$: Rückstreuquerschnitt zum Zeitpunkt t [dB];

$\sigma^0{}_{dry}(t_0)$: rauhigkeitsbedingter Signalanteil des Trockenzeitpunktes t_0 [dB];

$\sigma^0(t_h)$: Rückstreusignal der betrachteten Auflösungszelle aus historischer Zeitreihe [dB];

$\sigma^0{}_{dry}(t_{h_0})$: rauhigkeitsbedingter Signalanteil aus identischem Verfahrenslauf wie $\sigma^0(t_h)$ [dB].

Gemäß der Zusammenhänge von Gleichung (8.1) und (8.2) erfolgt in Gleichung (8.3) die Bestimmung des *feuchtebedingten Signalanteils* zum *Zeitpunkt* t mit $\Delta\sigma^0{}_{moist}(t) = \sigma^0(t) - \sigma^0{}_{dry}(t_0)$ aus der Differenz zwischen dem *aktuell gemessenen Rückstreuquerschnitt* $\sigma^0(t)$ und dem zum *Trockenzeitpunkt* t_0 erfassten *rauhigkeitsbedingten Signalanteil* $\sigma^0{}_{dry}$. Beide Messwerte entstammen dabei einem identischen Verfahrenslauf, um die Repräsentativität der Rauhigkeitsbeschreibung zu gewährleisten.

Der *feuchtigkeitsbedingte Signalwertebereich* $\max(\Delta\sigma^0{}_{moist}) = \max(\sigma^0(t_h) - \sigma^0{}_{dry}(t_{h_0}))$, welcher der Normierung des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ dient, resultiert aus der Analyse einer Intensitätszeitreihe des Untersuchungsgebietes und stellt das beobachtete *Maximum des feuchtebedingten Signals* $\Delta\sigma^0{}_{moist}$ je Auflösungszelle dar.

Bei der Erfassung des *feuchtebedingten Signalwertebereiches* $\max(\Delta\sigma^0{}_{moist})$ wird die Verwendung einer mehrjährigen Zeitreihe bevorzugt, um die fernerkundliche Charakterisierung des Feuchtewertebereiches eines betrachteten Bodens mit hoher Genauigkeit zu gewährleisten. Aufgrund der erforderlichen Repräsentativität der Rauhigkeitsverhältnisse ist erneut auf die Verwendung eines identischen Verfahrenslaufes zu achten.

Als maximale Feuchteausprägung wird der Zustand der *Feldkapazität* anstatt der *Wassersättigung eines Bodens* angenommen, da die hohen *Evapotranspirationsraten* in *semiariden Gebieten* eine rasche Abtrocknung der Böden im Anschluss an ein Niederschlagsereignis bedingen. Aufgrund der geringen Repetitionsrate des *ERS-1/2 SAR-Systems* ist somit die Wahrscheinlichkeit einer Beobachtung wassergesättigter Verhältnisse gering.

Um den *Einfluss variierender Textureigenschaften* zu eliminieren und damit die räumliche Vergleichbarkeit des feuchtebedingten Signalanteils über größere Gebiete mit variierenden Bodenarten zu gewährleisten, erfolgt eine *Normierung* des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ hinsichtlich des Einflusses der Bodeneigenschaften. Ermöglicht wird diese Normierung durch die pixelbasierte Erfassung des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$. Indem der *aktuelle feuchtebedingte Signalanteil* $\Delta\sigma^0_{moist}(t)$ in Beziehung zum möglichen *feuchtebedingten Signalwertebereich* $\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ der betrachteten Auflösungszelle gesetzt wird, verlieren die räumlich variierenden Bodeneigenschaften ihren Einfluss auf die Beschreibung der räumlichen Bodenfeuchteverteilung. Diese *maximale feuchtebedingte Signalvariation* ist unabhängig von der herrschenden Rauhigkeitssituation und wird in erster Linie über die Poreneigenschaften (Volumen, Verteilung, Form) des Bodens gesteuert. Damit ist der Feuchtegehalt eines Bodens zu den Zeitpunkten *Welkepunkt, Feldkapazität* und *Sättigung* eine *bodentypische Eigenschaft*, die sich über die Zeit annähernd konstant verhält. Dies ermöglicht die Extraktion des *feuchtebedingten Signalwertebereiches* aus Zeitreihen mit historischen Messungen.

Der normierte *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ beschreibt somit den Wassergehalt eines Bodens als Anteil am möglichen Gesamtaufkommen je Auflösungszelle. Die Einheit des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ lautet daher *Feuchtegehalt in Prozent des Feuchtegehaltes zum Zeitpunkt der Feldkapazität [%Feldkapaztät]*. Somit erfolgt die Feuchtebeschreibung auf Basis des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ in Form einer *relativen Einheit*. Durch eine individuelle Eichung des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ je Auflösungszelle auf Basis von in-situ Messungen des *volumetrischen Feuchtegehaltes* m_v bei Feldkapazität besteht die Möglichkeit, eine *absolute Aussage* hinsichtlich des *volumetrischen Feuchtegehaltes* m_v der beobachteten Böden mit Hilfe des Verfahrens zu treffen. So erfolgt im Abschnitt der Verfahrensanwendung und Validierung in Kapitel 10. die Eichung des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ auf Basis von in-situ Messungen, um eine absolute Aussage hinsichtlich der Genauigkeit des vorgestellten Verfahrens in der Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Feuchteverteilung treffen zu können.

Die räumliche Vergleichbarkeit des *Feuchte-Index* $m_{\%field}$ wird zusätzlich zur Normierung des Einflusses der Bodeneigenschaften auf den Messwert durch die *Ratiobildung* in der *Feuchte-Index-Erfassung* unterstützt. So ist eine typische Eigenschaft der Ratiobildung, Beeinträchtigungen der Messwerte aufgrund des Einflusses des *lokalen Einfallswinkels* auf das Rückstreuverhalten zu minimieren. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer Einfallswinkelkorrektur.

Wie in Kapitel 3.3.2.1.2. erwähnt wurde und in der Kohärenz-Analyse im folgenden Kapitel Bestätigung findet, wächst der Fehler in der Rauhigkeitsbeschreibung zwischen der initialen Rauhigkeitscharakterisierung und dem aktuell herrschenden Rauhigkeitszustand zum Zeitpunkt der *Feuchte-Index-Ableitung* linear mit der Länge eines Verfahrenslaufes. Erklärt wurde dieses Verhalten durch die Akkumulation des Betrages der erosionsbedingten Rauhigkeitsänderung im Millimeterbereich.
Um trotz dieses Verhaltens eine *zuverlässige Rauhigkeitsbeschreibung* für die Feuchteerfassung über lange Zeiträume zu gewährleisten, überwacht das Verfahren kontinuierlich die Aktualität der Rauhigkeitsbeschreibung. Im Fall einer nicht erkannten Restfeuchte zum initialen Trockenzeitpunkt gewährleistet darüber hinaus ein Lernprozess eine sukzessive Erhöhung der Genauigkeit der Rauhigkeitscharakterisierung von einem Aufnahmezeitpunkt zum folgenden.
Dieser Lernprozess wird realisiert, indem zu jedem Aufnahmezeitpunkt in einem Verfahrenslauf das lokale Minimum je Auflösungszelle zwischen aktuell gemessener Intensität $\sigma^0(t)$ und der Rauhigkeitscharakterisierung $\sigma^0{}_{dry}(t_0)$ ermittelt wird. Weist die aktuelle Intensitätsdarstellung in einer Auflösungszelle einen geringeren Rückstreuquerschnitt $\sigma^0(t)$ als die Rauhigkeitscharakterisierung $\sigma^0{}_{dry}(t_0)$ auf, so erfolgt die Substitution des rauhigkeitsbedingten Signals $\sigma^0{}_{dry}(t_0)$ durch das lokale Minimum. Die Differenz zwischen beiden Intensitäten wird in Form eines zusätzlichen Feuchtebeitrages behandelt.

Mit wachsender Länge des Verfahrenslaufes sinkt die Dichte der biomassearmen und rauhigkeitsstabilen Flächen. Um trotzdem eine aussagekräftige, flächenhafte Beschreibung der Feuchtesituation im Flusseinzugsgebiet über das Jahr hinweg zu gewährleisten, erfolgt auch während eines Verfahrenslaufes eine stetige Aktualisierung der räumlichen Verteilung der biomassearmen Flächen und eine

erneute Rauhigkeitscharakterisierung. Grundlage für diese Vorgehensweise ist wiederum die kontinuierlich erfasste Information des ERS-1/2 Scatterometers, um das Auftreten von *Trockenzeitpunkten* zu detektieren und damit eine erneute flächenhafte Rauhigkeitscharakterisierung zu ermöglichen.

9. Kohärenz- und Intensitätsanalysen im Untersuchungsgebiet „*Sevilla*“

Kernpunkt des vorgestellten Verfahrens zur Erfassung eines Feuchte-Index $m_{\%field}$ auf Basis von ERS-1/2 InSAR Daten in semiariden Gebieten ist die Nutzung der *Kohärenz-Information* für die Gewährleistung der *Biomassearmut* und *Rauhigkeits-stabilität* der beobachteten Flächen. Um die zugrundliegenden Hypothesen zu überprüfen und die Definition von Schwellwerten zu ermöglichen, die in erster Näherung eine einflussfreie Feuchtebeschreibung gewährleisten, finden im vorliegenden Abschnitt Kohärenz- und Intensitätsanalysen hinsichtlich der erwähnten Einflussfaktoren statt.

Die Kohärenz- und Intensitätsanalysen basieren auf ERS-1/2 InSAR Daten der Beobachtungsjahre *1995 / 1996* aus dem Untersuchungsgebiet „*Sevilla*“. Das Gebiet wurde für diese Zwecke gewählt, da es bereits als Untersuchungsgebiet im *MARS-Projekt* des *Joint Research Center of the European Commission* (*JRC*) diente und damit eine umfangreiche „*ground truth*“ Datengrundlage vorlag (siehe: Kapitel 6.1.). Dabei bildeten insbesondere die zeitlich zu den ERS-1/2 SAR-Aufnahmen korrespondierenden *agrarwirtschaftlichen Anbaukalender* eine wertvolle Informationsquelle, um eine Aussage bezüglich des ackerbaulich beeinflussten Rauhigkeitsverhaltens und der herrschenden Vegetationsbedeckung treffen zu können und damit als Grundlage für die Kohärenz-Analysen zu dienen.

Ein weiterer Grund für die Gebietswahl war die Tatsache, dass die Region in den Sommermonaten des Jahres *1995* von einer ausgedehnten Dürreperiode betroffen wurde, deren Auswirkungen vorteilhaft für die Analysen genutzt werden konnten. So bedingte das langanhaltende Trockenereignis ein weitgehendes Aussetzen ackerbaulicher Aktivitäten im Trockenfeldbau im Anschluss an den ersten Fruchtzyklus. Da die Ernte von *Winterweizen, Raps* und *Kartoffel* zum Grossteil bereits Anfang *Juni* abgeschlossen war, führte dies im Anschluss zu einer hohen Dichte an brachliegenden Flächen, die vorteilhaft für die Analysen hinsichtlich des Rauhigkeitseinflusses auf das Kohärenz-Verhalten genutzt werden konnten.

Darüber hinaus garantierte die Trockenperiode absolut trockene Verhältnisse auf agrarwirtschaftlichen Nutzflächen des Trockenfeldbaus, wodurch das beobachtete

Intensitätsverhalten ausschließlich in Beziehung zum Biomasseaufkommen und der Oberflächenrauhigkeit gesetzt werden konnte. Die Dürreperiode spiegelt sich im *scatterometerbasierten Feuchte-Index* M_S in Abbildung 6.1 und in der korrespondierenden Niederschlagsverteilung in Abbildung 6.2 wider.

Um eine kohärenzbasierte Isolierung biomassearmer und rauhigkeitsstabiler Flächen für die Feuchte-Index-Erfassung zu gewährleisten, erfolgt in den folgenden Abschnitten eine Betrachtung des Einflusses des Biomasseaufkommens von vegetationsbedeckten Flächen auf das Tandem-Kohärenz-Verhalten und die Rückstreuintensität sowie eine Analyse des Einflusses einer zwischenzeitlichen Rauhigkeitsänderung auf vegetationsfreien Flächen auf das Langzeit-Kohärenz-Verhalten.

9.1. Analysen hinsichtlich des Einflusses von Vegetation auf das Kohärenz- und Intensitätsverhalten

Das stark artenspezifische Rückstreuverhalten von Pflanzen verhindert eine allgemein gültige Aussage hinsichtlich des Einflusses des Biomasseaufkommens auf die Rückstreuintensität und verhindert damit die artenunabhängige Definition eines Biomassebereiches, der eine unbeeinflusste Signaltransmission in einem spezifischen Einfallswinkelbereich ermöglicht. Ursache dafür sind die stark mit der Art und dem Phänologiestadium variierenden Architekturen und Wassergehalte der Pflanzen. Während eine Gruppe von Pflanzen zu einer Signalabschwächung mit wachsendem Biomasseaufkommen tendiert, bewirkt dieser Einfluss bei einer anderen Gruppe eine Zunahme der Rückstreuintensität.

Wie diverse Studien zeigen, führen großflächige Blätter, dicke Stämme und ein hoher Pflanzenwassergehalt (z.B. *Sonnenblume, Mais, Zuckerrübe*) zu einem verstärkten Rückstreuverhalten mit wachsendem Biomasseaufkommen in Bezug auf das in der Studie verwendete C_{VV}-Rückstreusignal in einem Einfallswinkelbereich von $\theta = 23°$. Grund dafür ist die starke direkte Rückstreuung (Einfachstreuung) an den streueffektiven Blättern, deren Ausmaße oftmals die Dimension der Wellenlänge übersteigen, sowie Doppelstreuprozesse zwischen den dicken Stämmen und dem Boden. Der Einfluss großer wasserreicher Blätter auf das C_{VV}-Rückstreuvehalten

($\theta = 23°$) konnten bereits u.a. von Bouman & Hoekman (1993), als auch von Schmullius & Nithack (1995) am Beispiel der *Zuckerrübe* beobachtet werden.
Dahingegen überwiegt in einer Vegetationsdecke mit dünnen Halmen und kleinen Blättern (z.B. *Getreide, Gras*) die Abnahme der C_{VV}-Rückstreuintensität ($\theta = 23°$) mit wachsendem Biomasseaufkommen, sofern die Pflanzen nicht einen sehr geringen Wassergehalt aufweisen (z.B. Abreifstadium). Ursache dafür ist, mit Ausnahme der Ähren, das weitgehende Fehlen der Einfachstreuung an den Pflanzenkomponenten und eine starke Abschwächung des Bodensignals durch die Extinktion im Pflanzenvolumen.
Dieses artenspezifische Rückstreuverhalten unterschiedlicher Feldfrüchte bestätigen Schotten et al. (1995). Sie zeigten, dass das Wachstum von *Winterweizen* zu einer deutlichen Abnahme des C_{VV}-Rückstreusignals ($\theta = 23°$) führt, während das Signal von *Kartoffel-* und *Zuckerrübenkulturen* im selben Zeitraum annähernd konstant verweilte. Auch Keithley und Roberts (1996) beobachteten eine Abnahme des C_{VV}-Rückstreusignals ($\theta = 23°$) mit zunehmendem Biomasseaufkommen auf Flächen mit *Winterweizen* und *Sommergerste*, im Gegensatz zu einem Anstieg der Rückstreuintensität auf Flächen mit *Zuckerrüben-* und *Kartoffelkulturen*.
Um das artenspezifische Rückstreuverhalten zu kategorisieren differenzierten Matthaeis et al. (1995), als auch Amodeo et al. (1996) Feldfrüchte in zwei unterschiedliche Gruppen: Während sie *Sonnenblumen-* und *Maiskulturen* in eine Gruppe mit großflächigen, wasserreichen Blättern ($10 \leq A \leq 40cm^2$), großem Stengeldurchmesser ($1 \leq d \leq 3cm$) und einer geringen Flächendichte ($< 10 Pflanzen/m^2$) zusammenfassten, bildeten *Raps, Luzerne* und *Weizen* eine zweite Gruppe, welche durch kleine Blätter ($A < 1cm^2$), geringe Stengeldurchmesser ($0{,}2 \leq d \leq 1{,}2cm$) und eine hohe Flächendichte ($80 - 500 Pflanzen/m^2$) gekennzeichnet ist. Auch Mauser et al. (1997) definierten in ihrer Studie aufgrund des vergleichbaren Rückstreuverhaltens des C_{VV}-Signals ($\theta = 23°$) zwei ähnliche Feldfruchtklassen. Während sie *Weizen* und *Gerste* zu einer Klasse zählten, bildeten *Zuckerrübe* und *Kartoffel* eine weitere Klasse.

Ähnlich dem artenspezifischen Rückstreuverhalten bei einer Veränderung des Biomasseaufkommens zeigt sich gleichfalls eine Abhängigkeit von den charakteristischen Wachstumsphasen der Feldfrüchte. Während *Getreideflächen* bis

kurz vor das Abreifstadium einen Rückgang der C_{VV}-Rückstreuintensität ($\theta = 23°$) bis zu einer Signaldifferenz von $\Delta\sigma^0 \approx 8dB$ aufweisen, zeigt sich während der Abreife aufgrund des Pflanzenwasserverlustes eine Zunahme der Rückstreuintensität bis das Verhalten brachliegender Böden erreicht wird oder sogar ein stärkeres Rückstreuverhalten resultiert. Dahingegen weisen *Sonnenblume*, *Mais* und *Zuckerrübe* eine kontinuierliche Zunahme der Rückstreuintensität über die gesamte Wachstumsperiode auf. Im Fall von *Zuckerrübenkulturen* beobachteten Borgeaud et al. (1995) beispielsweise eine maximale C_{VV}-Signaldifferenz ($\theta = 23°$) von $\Delta\sigma^0 \approx 7dB$ aufgrund des Pflanzenwachstums.
Die Möglichkeit, dass der Einfluss einer zwischenzeitlichen Feuchteänderung das beobachtete Rückstreuverhalten in manchen Studien zusätzlich beeinflusst hat, ist jedoch oftmals schwer abzuschätzen.

Trotz dieses stark artenspezifischen Rückstreuverhaltens herrscht in der Literatur weitgehend Einigkeit in Bezug auf NDVI- und Kohärenz-Grenzwerte, die unabhängig von der Pflanzenart eine näherungsweise Charakterisierung des Biomassebereiches erlauben, in dem eine nahezu ungehinderte frequenz- und einfallswinkelabhängige Signaltransmission möglich ist.
So quantifizierten Dubois et al. (1995) den Biomassebereich, der eine vergleichsweise schwache Signalbeeinflussung im L-Band verursacht, mit einem NDVI von $NDVI \leq 0{,}4$. Eine gänzlich einflussfreie Transmission des L-Band Signals ermittelten Dubois et al. (1995) bis zu einem NDVI von $NDVI = 0{,}2$. Goyal et al. (1999), die ebenfalls Untersuchungen hinsichtlich des Vegetationseinflusses auf das Rückstreuverhalten im L-Band durchführten, bestätigten beide Grenzwerte von Dubois et al. (1995).
Moran et al. (2000) bezifferten den Bereich einer schwachen Beeinflussung des C_{VV}-Signals ($\theta = 23°$) durch Vegetation auf *Prärieflächen* auf Basis des *GLAI* mit $GLAI < 0{,}35$. Das biomassebedingte Rückstreuverhalten dieser Flächen charakterisierten Moran et al. (2000) mit einer linearen Zunahme mit wachsendem Biomasseaufkommen.
Fellah et al. (1998) untersuchten in Ihrer Studie das C_{VV}-Rückstreuverhalten ($\theta = 23°$) von *Getreidekulturen* und *Grasflächen* in Abhängigkeit des *NDVI* und ermittelten jeweils einen starken Zusammenhang zwischen beiden Variablen

($R^2 \geq 0{,}92$). Während sich in einem Bereich von $0{,}30 < NDVI \leq 0{,}55$ eine lineare Abnahme der Rückstreuintensität mit wachsendem *NDVI* von ca. $\Delta\sigma^0 \approx 2dB$ zeigte, wurde das Rückstreuverhalten bis zu einem *NDVI* von $NDVI \leq 0{,}3$ nur geringfügig beeinflusst.

Anstatt des *NDVI* verwendete eine weitere Gruppe von Autoren die *Kohärenz* als vegetationscharakterisierenden Parameter, um den Einfluss des Biomasseaufkommens auf die Signaltransmission zu quantifizieren. So ermittelte Wegmüller (1998) einen Kohärenz-Grenzwert von $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}70$ für vegetationsfreie bzw. spärlich vegetationsbedeckte Gebiete. Die Kohärenz-Schätzung erfolgte dabei über ein Zeitintervall von $\Delta t = 3d$.

Auch Moeremans & Dautrebande (2000) verwendeten in ihrer Studie einen Kohärenz-Grenzwert von $\hat{\gamma}_{\tan dem} = 0{,}70$, um auf Basis der Tandem-Kohärenz eine einflussarme Bodenfeuchteerfassung zu gewährleisten. Der Grenzwert basierte dabei auf einer Untersuchung hinsichtlich des ERS-1/2 Tandem-Kohärenz-Verhaltens in Abhängigkeit des Größenwachstums von diversen Feldfrüchten. Im Fall von *Winterweizenkulturen* führte bereits eine Höhe von ca. $h \approx 10cm$ zu einem Kohärenz-Verlust von ca. $\Delta\hat{\gamma}_{veg} \approx 0{,}22$, der weiter linear mit dem Pflanzenwachstum anstieg. Der genannte Tandem-Kohärenz-Schwellwert von $\hat{\gamma}_{\tan dem} = 0{,}70$ begrenzt damit die einflussarme Signaltransmission auf ein *Winterweizenfeld*, dessen Pflanzen eine Höhe von $h \approx 20cm$ aufweisen.

Die Studie von Blaes et al. (1999 & 2003) zeigte ein vergleichbares Ergebnis. So resultiert gemäß ihrer Untersuchung gleichfalls auf Flächen mit *Winterweizen* eine Tandem-Kohärenz von $\hat{\gamma}_{\tan dem} = 0{,}70$ aus einer Pflanzenhöhe von $h \approx 20cm$ oder einem *Bodenbedeckungsgrad* von 80%. *Mais* und *Zuckerrübe* zeigen dahingegen bereits in einem sehr jungen Stadium eine stärkere Abnahmerate, so dass bereits im Höhenstadium von $h < 10cm$ eine Tandem-Kohärenz zwischen $0{,}70 \leq \hat{\gamma}_{\tan dem} \leq 0{,}80$ resultiert. Das höhen- und bedeckungsgradbedingte Kohärenz-Minimum, das während des phänologischen Zyklusses beobachtet werden konnte, betrug in der Regel $\hat{\gamma}_{\tan dem} \approx 0{,}30$ und wurde nur durch die *Kartoffel* mit $\hat{\gamma}_{\tan dem} \approx 0{,}23$ unterschritten. Die Ergebnisse von Blaes et al. (1999 & 2003) unterstützen somit die Annahme, dass in der wachstumsintensiven Frühjahrs- und Frühsommerperiode in

ackerbaulich intensiv genutzten Gebieten eine geringe Dichte an geeigneten Flächen für die Bodenfeuchtebeschreibung resultiert.

Um die *primäre Prämisse der Vegetationsfreiheit bzw. Biomassearmut der Flächen* über die Definition eines *Tandem-Kohärenz-Schwellwertes* zu gewährleisten, erfolgen im weiteren Signaturanalysen hinsichtlich des Tandem-Kohärenz-Verhaltens in Abhängigkeit des Biomasseaufkommens.
Für die Charakterisierung der Vegetation zu den *ERS-1/2 SAR Aufnahmezeitpunkten* fand der *NDVI* Verwendung. Dieser Vegetationsparameter wurde aus der Information der zeitlich korrespondierenden *Landsat 5 TM Daten* abgeleitet und gibt Auskunft über Vegetationseigenschaften, wie den Bodenbedeckungsgrad mit grüner Blattfläche sowie die Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen.
Ermöglicht wird die Verwendung des *NDVI* als Biomasseparameter durch einen artenspezifischen, logarithmischen Zusammenhang zwischen *NDVI* und den Biomasseparametern *Leaf Area Index (LAI)* und *Green Leaf Area Index (GLAI)* (vgl. Eklundh et al., 2001; Price & Bausch, 1995; Moran et al., 1997).
Im Gegensatz zu *LAI und GLAI,* die als *„echte"* Biomasseparameter die *gesamte mehrschichtige Blattfläche einer Vegetationsdecke pro Gesamtfläche* quantifizieren, charakterisiert der *NDVI* den Bedeckungsgrad von nur wenigen Blattschichten. Die starke Extinktion im kurzwelligen *sichtbaren* und *nahen infraroten Bereich* des elektromagnetischen Spektrums verhindert einen Informationsgewinn bezüglich tieferer Bereiche innerhalb der Vegetationsdecke. Der logarithmische Funktionsverlauf zwischen *NDVI* und *GLAI bzw. LAI* resultiert somit aus der Sättigung der Reflexionsintensität trotz weiter anwachsenden Biomasseaufkommens. Dieses Verhalten beschränkt die *NDVI*-basierte Biomassebeschreibung auf biomassearme Flächen. Die limitierte Aussagekraft des *NDVI* ist jedoch innerhalb der vorliegenden Studie unerheblich, da die Anwendung des Verfahrens aufgrund der vegetationsbedingten Signalbeeinflussung im C-Band gleichfalls auf das Vorhandensein biomassearmer Flächen angewiesen ist.

Unter anderem verwendeten bereits Dubois et al. (1995), Moran et al. (1997), Goyal et al. (1999) und Bindlish & Barros (2001) erfolgreich den *NDVI* als Biomasseparameter für die Analyse der vegetationsbeeinflussten Rückstreuung.

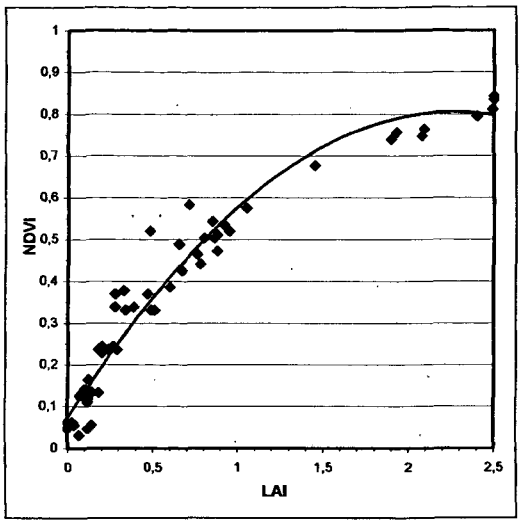

Abb. 9.1: Mittlerer Zusammenhang zwischen *NDVI* und *LAI* für Trockenanbauflächen im Gebiet „*Sevilla*".

Abbildung 9.1 zeigt den über mehrere Vegetationsklassen gemittelten Zusammenhang zwischen *NDVI* und *LAI*. Die dargestellte Ausgleichsfunktion findet in der Atmosphärenkorrektur *ATCOR3* von Richter (2001) Verwendung, um eine mittlere *LAI–Bestimmung* für die gesamte vegetationsbedeckte Fläche einer *Landsat-Szene* zu ermöglichen. Da der Zusammenhang zwischen *NDVI und LAI* bzw. *GLAI* in Abhängigkeit der Landnutzungsklasse variiert, ist eine artenspezifische Kalibrierung mit Hilfe von *Bodenmessungen* für exakte Aussagen hinsichtlich des Biomasseaufkommens einzelner Flächen nötig. Aufgrund der Tatsache, dass der *LAI* die gesamte Blattfläche ohne eine Unterscheidung bezüglich des Wassergehaltes der Blätter charakterisiert, der einen entscheidenden Einfluss auf das Transmissionsverhalten von Mikrowellen besitzt (siehe Kapitel 4.), wird für die Charakterisierung des Vegetationseinflusses auf das Rückstreuverhalten eine Verwendung des *GLAI* in der Literatur favorisiert (siehe: Ulaby et al., 1984; Moran et al., 1997 & 2000).

Moran et al. (1997) beschreiben den artenspezifischen Zusammenhang zwischen *NDVI* und *GLAI* durch folgende semi-empirische Funktion, die eine modifizierte Version der Gleichung von Price (1992) darstellt:

$$NDVI = 1 - e^{-(2M \cdot GLAI + K)} \tag{9.1}$$

mit:

$NDVI$:	Normalized Difference Vegetation Index;
$GLAI$:	Green Leaf Area Index;
M:	Abschwächungsfaktor aufgrund der optischen Dicke;
K:	artenspezifische Konstante.

Während der Koeffizient M die *Abschwächung des Signals* aufgrund der *optischen Dicke der Vegetation* beschreibt, gewährleistet die *artenspezifische Kontante* K die Kalibrierung des Verhaltens auf unterschiedliche Pflanzenarten. Für Baumwolle ermittelten Moran et al (1997) beispielsweise folgende empirisch kalibrierte Version:

$$NDVI = 1 - e^{((GLAI + 0{,}6989)/-2{,}7290))} \tag{9.2}$$

Aufgrund fehlender in-situ Messungen hinsichtlich der Pflanzeneigenschaften, beschränkt sich die Kohärenzanalyse in der vorliegenden Studie auf die Verwendung des *NDVI* als Parameter zur Charakterisierung der Biomasse. Die Beschreibung der Pflanzeneigenschaften auf Basis des *NDVI* besitzt ähnlich dem *GLAI* den Vorteil, dass aufgrund seiner Sensibilität hinsichtlich des Pflanzenwassergehaltes dieser rückstreubeeinflussende Faktor gleichfalls in der Definition des *Kohärenz-Schwellwertes* berücksichtigt wird.

9.1.1. Vorstratifizierung verfahrensrelevanter Flächen

Um mögliche Fehler aufgrund der limitierten Aussagekraft des *NDVI* bezüglich des Biomasseaufkommens auszuschließen und eine hohe Qualität der Bodenfeuchtebeschreibung zu gewährleisten, erfolgte sowohl vor der Signaturanalyse, als auch vor jedem Verfahrenslauf, eine Vorstratifizierung geeigneter Flächen für die Beschreibung der Feuchteverteilung.

Zusätzlich zu Flächen mit starkem Biomasseaufkommen, wie *Wälder* sowie *busch- und strauchvegetationsbedeckte natürliche Flächen*, beeinflussen weitere Störfaktoren die Genauigkeit des Verfahrens. So erweisen sich trotz ihrer Biomassearmut auch *landwirtschaftliche Flächen des Bewässerungsfeldbaus* als ungeeignet. Die künstliche Bewässerung dieser Flächen verhindert das Auftreten eines Trockenzeitpunktes und damit eine unbeeinflusste Erfassung des rauhigkeitsbedingten Signals. Selbst bei Kenntnis der Rauhigkeitssituation beeinträchtigt die Einbeziehung der Feuchteinformation der künstlich bewässerten Flächen die Genauigkeit der räumlichen Feuchtebeschreibung, da dies zu einer Fehleinschätzung der natürlichen Feuchtesituation des beobachteten Gebietes führt.

Eine ähnlich irreführende Feuchteinformation suggerieren *Siedlungs- und infrastrukturell genutzte Flächen*. Der hohe Versiegelungsgrad dieser Flächen führt zu einer hohen Stabilität des Rückstreuverhaltens über die Zeit. Die resultierende Trockenheit, die in keinem Bezug zu den realen Feuchteverhältnissen des restlichen Beobachtungsgebietes steht, beeinträchtigt gleichfalls die Aussagekraft der Feuchtebeschreibung.

Das anfängliche Vorhaben, die ungeeigneten Flächen ausschließlich auf Basis der Kohärenz-Information zu identifizieren, wurde aufgrund einer starken Über-

schneidung mit dem Kohärenz-Verhalten von *brachliegenden bzw. biomassearmen Flächen* verworfen. Wie Abbildung 9.2 verdeutlicht, zeigen *Siedlungsflächen, versteppte Flächen mit Grasvegetation* und *brachliegende Böden* ein sehr ähnliches Tandem-Kohärenz-Verhalten, das eine Differenzierung dieser Klassen verhindert.

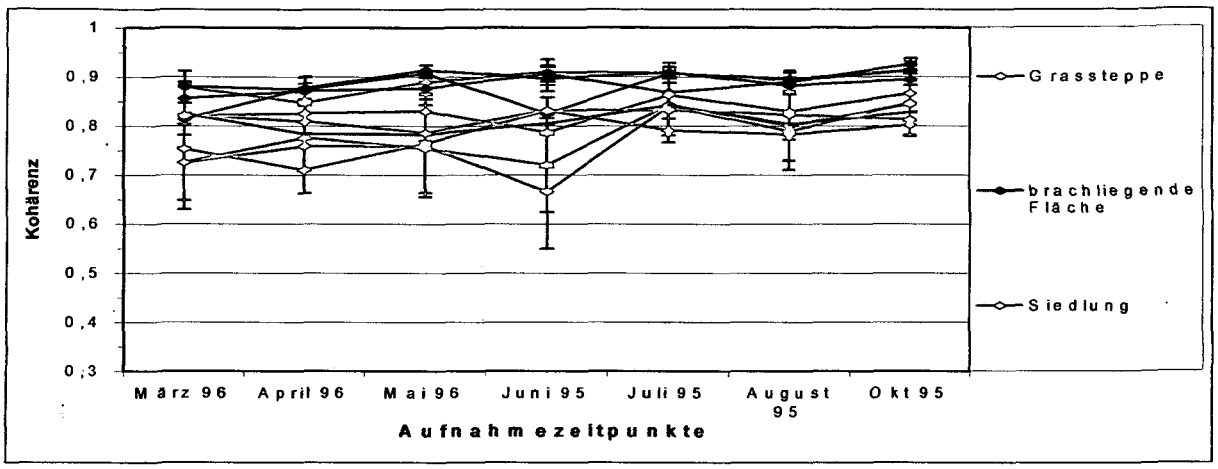

Abb. 9.2: Verhalten der Tandem-Kohärenz auf Flächen der Landnutzungsklassen *Grassteppe*, *brachliegende Flächen* und *Siedlung* im Untersuchungsgebiet „*Sevilla*".

Auch die in Abbildung 9.3 dargestellte klassenspezifische Kohärenz-Abnahme mit wachsendem Zeitintervall zwischen den Aufnahmezeitpunkten zeigt ein sich stark überschneidendes Verhalten, wodurch auch auf Basis der Langzeit-Kohärenz-Information keine Klassentrennung möglich ist.

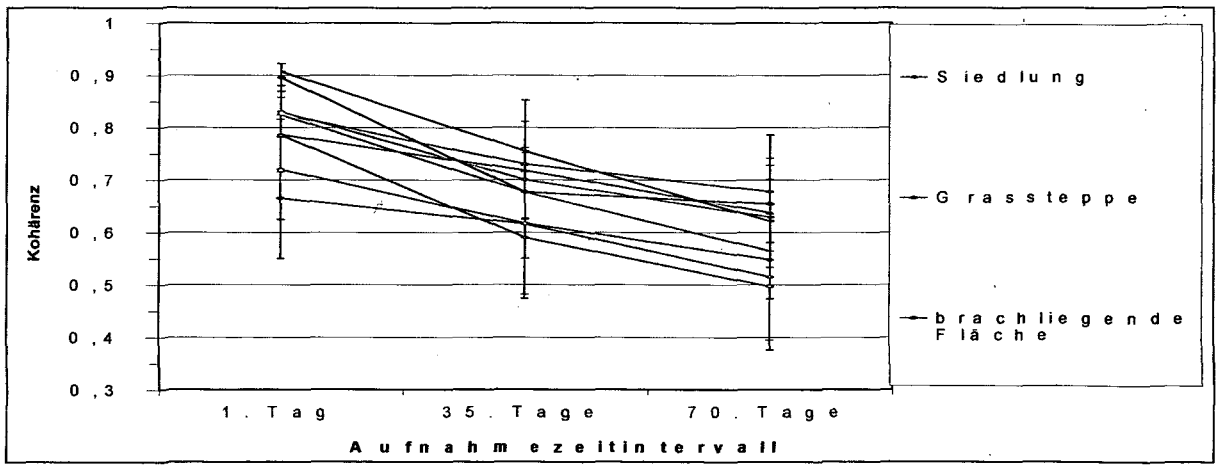

Abb. 9.3: Abnahmeraten der Kohärenz der Landnutzungsklassen *Grassteppe*, *brachliegende Flächen* und *Siedlung* mit wachsendem Zeitintervall zwischen den Aufnahmezeitpunkten

Gleichfalls wurde das Vorhaben verworfen, *versiegelte Flächen* auf Basis der charakteristischen Stabilität der Rückstreuintensität über die Zeit zu identifizieren, da brachliegende Flächen in der Trockenzeit ein ähnlich stabiles Verhalten aufweisen.

Aufgrund der fehlenden Differenzierungsmöglichkeit von *geeigneten* und *beeinträchtigten Klassen* auf Basis der ERS-1/2 InSAR-Information, erfolgt eine *initiale Vorstratifizierung* potentiell geeigneter Flächen mit Hilfe der *CORINE Landnutzungsklassifikation*.

Im Fall der Kohärenz-Analysen wurde darauf geachtet, dass ausschließlich Flächen der Klassen *brachliegende* und *vegetationsfreie natürliche Flächen, versteppte Flächen mit Grasbedeckung, landwirtschaftliche Flächen des Trockenfeldbaus* sowie *Nassreisanbauflächen* in die Untersuchung eingingen. Grund für die Einbeziehung der *Nassreisanbauflächen* in die Kohärenzanalyse bildete die Dürreperiode *1995*, die zu einer hohen Dichte an brachliegenden *Reisanbauflächen* führte. Auch die vegetationsbedeckten Reisanbauflächen erwiesen sich für die Belange der Kohärenz-Analyse als geeignet, da die charakteristische Flutung eine Eignung für nur ca. zwei Monate verhindert, während das anschließende, fernerkundlich beobachtete Reifen des Reises unter trockenfeldbaulichen Bedingungen stattfindet.

Der Ausschluss von Flächen mit *Sonnenblumen-* und *Maiskulturen* war trotz der Zugehörigkeit zur Gruppe des Bewässerungsfeldbaus nicht möglich, da entsprechende Flächen in der *Corine Landnutzungsklassifikation* nicht gesondert differenziert werden und gemäß der Anbaukalender auch im Bereich der Klasse *Trockenfeldbau* häufig vorkommen.

Somit wurde die Qualität der Vorstratifizierung geeigneter Flächen für die folgenden Kohärenz- und Intensitätsanalysen durch die geringe räumliche Auflösung und die fehlende Aktualität der *CORINE Landnutzungsklassifikation* beeinträchtigt. Für eine exakte Isolierung geeigneter Flächen zu Beginn eines Verfahrenslaufes ist daher eine aktuelle Landnutzungsklassifikation auf Basis von optischen Fernerkundungsdaten zu bevorzugen. Da ein derartiges Unterfangen Trainingsgebiete benötigt, die aufgrund einer fehlenden Feldkampagne im Untersuchungsgebiet *„Sevilla"* nicht zur Verfügung standen, beschränkte sich die Vorstratifizierung des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* auf die eingeschränkte Information der *CORINE Landnutzungsdaten*.

9.1.2. Vegetationsbeeinflusstes Kohärenz- und Intensitätsverhalten

Da die folgenden Regressionsanalysen hinsichtlich des biomassebeeinflussten Kohärenz- und Intensitätsverhaltens Momentaufnahmen aus zwei unterschiedlichen

Aufnahmezeiträumen darstellen (*Juni 1995* und *Oktober 1995*) und daher je Feldfrucht nur ein einheitliches Wachstumsstadium beobachtet werden konnte, wurde für die Beschreibung eines breiten Biomassebereiches das Kohärenz- und Intensitätsverhalten verschiedener Feldfrüchte mit variierendem Biomasseaufkommen verwendet. Diese Vorgehensweise ist konform mit dem Verfahrensansatz, der gleichfalls eine Isolierung biomassearmer Flächen ohne Berücksichtigung der Vegetationsarten auf Basis eines allgemein gültigen Kohärenz-Schwellwertes vorsieht.

Um relevante Vegetationsflächen für die Analysen zu selektieren, fand ergänzend zum eingeschränkten Informationsgehalt der Vorstratifizierung die Information der *agrarwirtschaftlichen Anbaukalender* des *MARS-Projektes* Verwendung. Dabei ermöglichte die Information des Anbaukalenders des Jahres *1995* nur eine grobe Charakterisierung der beobachteten Anbauflächen. Wie in Kapitel 6.1.2.5. erwähnt wurde, findet in Bezug auf das Jahr *1995* nur eine Beschreibung des durchschnittlichen Auftretens der fruchtspezifischen Wachstumsphasen und agrarwirtschaftlichen Tätigkeiten in Form von Zeitintervallen statt. Zudem fehlt eine Lokalisierung entsprechender Anbauflächen im Untersuchungsgebiet.

Gemäß dieser Information zeigt der Aufnahmezeitraum *Juni 1995* unter Berücksichtigung der Feldfrüchte des Bewässerungsfeldbaus das biomassebeeinflusste Kohärenz-Verhalten von *Winterweizen* (Saat: *15. November - 15. Dezember 1994*, Ernte: *15. Mai - 25. Juni 1995*), *Raps* (Saat: *25. Februar 1995*, Ernte: *5. Juli 1995*), *Sonnenblume* (Saat: *5. Februar – 15. April 1995*, Ernte: *25. Juni – 5. September 1995*), *Baumwolle* (Saat: *5. - 15. März 1995*, Ernte: *25. September 1995 - 5. Oktober 1995*) und *Mais* (Saat: *25. Februar 1995*, Ernte: k.A. – Referenzinformation 1996: Ernte: *25. August 1995*).

Der Aufnahmezeitraum Oktober *1995* spiegelt insbesondere das Verhalten von *Reis* (Saat: *20. Mai*, Ernte: *15. Oktober*) wider. Aufgrund der dürrebedingten geringen Anzahl an vegetationsbedeckten Reisanbauflächen sind die Wachstumsphasen im Erntekalender *1995* nicht aufgeführt, so dass der Erntekalender *1996* als Referenzinformation verwendet wurde. Dieser signalisiert darüber hinaus die Anwesenheit von *Sonnenblumen-* (Saat: *5. Februar*, Ernte: *21. Oktober*) und möglichen Restflächen noch nicht abgeernteter *Baumwollkulturen* (Saat: *5. - 15. März 1995*, Ernte: *25. September 1995 – 5. Oktober 1995*). Dabei ist zu beachten, dass die Information des

Anbaukalenders 1996 nur stichpunktartig für die *MARS-Segmente* vorliegt, wodurch eine abweichende Situation im restlichen Untersuchungsgebiet denkbar ist.

Die Erfassung der Stichproben für die folgenden Regressionsanalysen erfolgte auf Basis eines virtuellen, das Untersuchungsgebiet überspannenden Rasters. Damit wurde darauf geachtet, dass die Stichproben in einem ähnlichen Abstand zueinander entnommen wurden und dem Zentrum von Flächen entstammen, die sich aus einer umfangreichen Anzahl an Auflösungszellen in x- und y-Richtung zusammensetzen ($n_{x,y} \geq 5$). Diese Vorgehensweise gewährleistet die ausschließliche Erfassung der gewünschten Information hinsichtlich des Vegetationseinflusses ohne durch Störeinflüsse, wie Mischpixel oder feldumrahmende Wälle (siehe: Nassreisanbau), beeinträchtigt zu sein.

Abbildung 9.4 zeigt Regressionsanalysen bezüglich des Zusammenhanges zwischen dem *Tandem-Kohärenz-Verhalten* und dem *NDVI* im Untersuchungsgebiet „*Sevilla*" in den Aufnahmezeiträumen *Juni* und *Oktober 1995*. Dabei ist zu beachten, dass im Zeitraum *Juni 1995* die dem *NDVI* zugrundeliegende Landsat 5 TM Szene am *5. Juni 1995* aufgenommen wurde, während die Messung der zu vergleichenden ERS-1/2 SAR Information am *9. / 10. Juni 1995* stattfand. Im Zeitraum *Oktober 1995* erfolgte die Landsat 5 TM Aufnahme am *11. Oktober 1995* und die korrespondierenden ERS-1/2 SAR Aufnahmen am *27. / 28. Oktober 1995*.

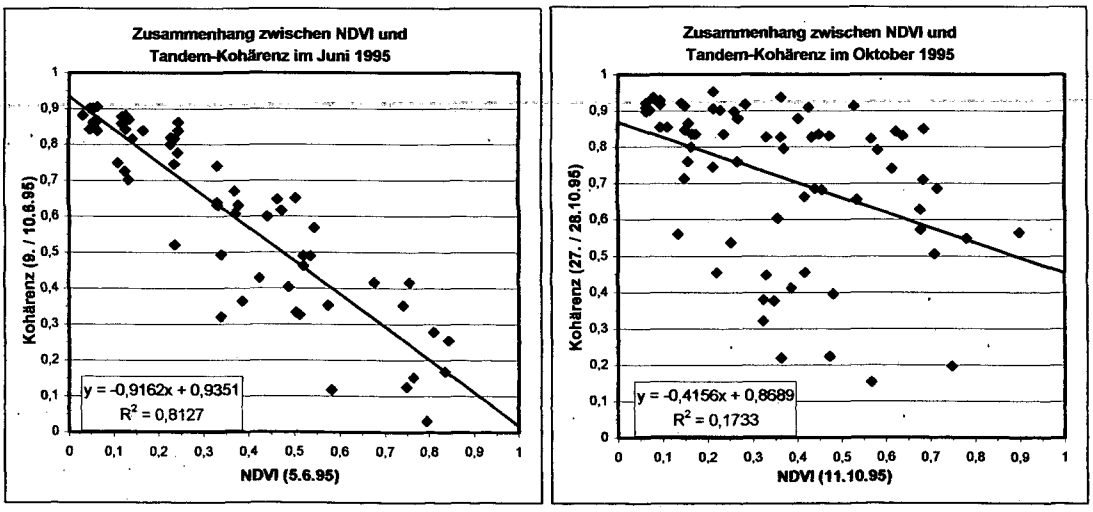

Abb. 9.4: Zusammenhang zwischen *NDVI* und Tandem-Kohärenz im Gebiet „*Sevilla*" in den Beobachtungszeiträumen *5. - 9. / 10.6.95* und *11. - 27. / 28.10.95*

Der Vergleich des *Tandem-Kohärenz-Verhaltens* mit dem zeitlich korrespondierenden *NDVI* der Flächen signalisiert im Aufnahmezeitraum *Juni 1995* mit einem *Bestimmtheitsmaß* von $R^2_{Juni}=0{,}81$ einen starken Zusammenhang zwischen beiden

Variablen. Die lineare Abnahme der Kohärenz mit zunehmendem *NDVI* wird durch die wachsende Wahrscheinlichkeit und Intensität einer Veränderung zwischen den Aufnahmezeitpunkten aufgrund der steigenden Anzahl an beweglichen Streuern verursacht.

Diese Beobachtung erweist sich konform mit der Studie von Wegmüller et al. (2000), die gleichfalls eine lineare Abnahme der ERS-1/2 Tandem-Kohärenz mit zunehmendem Biomasseaufkommen auf Flächen mit spärlicher Vegetationsbedeckung ermittelten. Als Biomasseparameter diente an Stelle des *NDVI* der Bodenbedeckungsgrad. Auch Borgeaud & Wegmüller (1996) beobachteten ein ähnliches lineares Verhalten zwischen ERS Tandem-Kohärenz und dem Bodenbedeckungsgrad von Rapsfeldern.

Diverse Studien belegen darüber hinaus, dass unterschiedliche Pflanzenarten ein spezifisches biomassebedingtes Kohärenz-Verhalten aufweisen, das sich insbesondere in einer Variation der Veränderungsrate der Kohärenz äußert. So untersuchten Blaes et al. (1999 & 2003) das Tandem-Kohärenz-Verhalten von unterschiedlichen Feldfrüchten in Abhängigkeit der Pflanzenhöhe sowie des Bodenbedeckungsgrades. Dabei zeigte sich jeweils ein starker Zusammenhang zwischen einem artenspezifischen Kohärenz-Verhalten und den pflanzenbeschreibenden Parametern auf Flächen mit *Winterweizen* ($R^2_{Höhe}=0{,}92$, $R^2_{Bedeckung}=k.A.$), *Zuckerrüben* ($R^2_{Höhe}=0{,}79$, $R^2_{Bedeckung}=0{,}72$), *Kartoffeln* ($R^2_{Höhe}=0{,}82$, $R^2_{Bedeckung}=0{,}87$) und *Mais* ($R^2_{Höhe}=0{,}72$, $R^2_{Bedeckung}=0{,}64$). Mit Ausnahme der *Zuckerrübe* zeigten alle Feldfrüchte eine lineare Abnahme der Tandem-Kohärenz mit zunehmender Pflanzenhöhe, deren Abnahmerate artenspezifisch variierte. Auch in Abhängigkeit des Bodenbedeckungsgrades zeigte sich in der Regel eine lineare Tandem-Kohärenz-Abnahme mit fruchtspezifischen Raten. Eine Ausnahme bildeten dabei Flächen mit *Winterweizen*, die eine sehr geringe Abnahmerate bis zu einem Bodenbedeckungsgrad von 80% aufwiesen ($\hat{\gamma}_{\tan dem} \approx 0{,}70$) und erst ab diesem Zeitpunkt eine verstärkte Kohärenz-Abnahmerate zeigten. Blaes et al. (1999 & 2003) erklärten dieses abweichende Verhalten durch die spezifischen Entwicklungseigenschaften des *Winterweizens*, der in einem geringen Höhenstadium erst den Pflanzenschluss anstrebt, bevor er signifikant mit dem Höhenwachstum beginnt. Moeremans & Dautrebande (2000) bestätigten das von Blaes et al. (1999 & 2003) beobachtete pflanzenhöhenabhängige Kohärenz-Verhalten des *Winterweizens*.

Auch Wegmüller & Werner (1997), Wegmüller et al. (1997) und Engdahl & Borgeaud (1998) ermittelten ein ähnliches lineares Verhalten zwischen der Tandem-Kohärenz und der Pflanzenhöhe der Feldfrüchte *Winterweizen, Kartoffel, Zuckerrübe, Raps* und *Luzerne*.

Im Gegensatz zum Beobachtungszeitraum *Juni 1995* weist die Regressionsanalyse der *Oktober*-Aufnahmezeitpunkte mit einem *Bestimmtheitsmaß* von $R^2_{Oktober}=0{,}17$ nur einen schwachen Zusammenhang auf. Es ist anzunehmen, dass diese Diskrepanz durch die unterschiedliche Länge der Zeitintervalle zwischen der Datenerfassung der Landsat 5 TM Daten und der zu vergleichenden ERS-1/2 SAR-Daten verursacht wird: während die Datenerfassung im *Juni 1995* innerhalb von fünf Tagen erfolgte (*5. Juni – 9. / 10. Juni 1995*), betrug das Zeitintervall im *Oktober 1995* 17 Tage (*11. Oktober – 27. / 28. Oktober 1995*). Da die Ernte der bis dahin verbliebenen Feldfrüchte *Reis, Sonnenblume und Baumwolle* gemäß des Anbaukalenders *Mitte Oktober* stattfand, ist davon auszugehen, dass zumindest ein Teil der landwirtschaftlich genutzten Flächen ihr Erscheinungsbild zwischen den Aufnahmezeitpunkten stark veränderte. Diese Annahme wird durch das zu beobachtende Verhalten in Abbildung 9.4 gestützt: So weist ein Großteil der Datenpunkte eine sehr hohe Tandem-Kohärenz trotz hoher *NDVI-Werte* auf. Auffällig erweist sich auch die Zweiteilung des biomassebedingten Kohärenz-Verhaltens der Datenpunkte. Während sich im Bereich hoher Kohärenz nur eine geringe biomassebedingte Abnahmerate erkennen lässt, zeigt sich im Tandem-Kohärenz-Bereich von $\hat{\gamma}_{tandem} \leq 0{,}50$ eine starke lineare Kohärenz-Abnahme mit wachsendem Biomasseaufkommen. Es ist daher anzunehmen, dass in diesem Bereich niedriger Kohärenz die beobachteten Flächen auch zu den SAR-Aufnahmezeitpunkten am *27. / 28. Oktober 1995* noch eine Vegetationsbedeckung aufwiesen. Gemäß der Information des Anbaukalenders ist anzunehmen, dass es sich bei der beobachteten Feldfrucht um *Sonnenblumen* handelt, deren durchschnittlicher Erntezeitpunkt im Referenzjahr 1996 als letzte Feldfrucht am *21. Oktober 1996* stattfand.

Ziel der folgenden Analyse ist die Ermittlung des Biomassebereiches, indem eine nahezu ungehinderte Transmission des C_{VV}-Signals in einem mittleren Einfallswinkelbereich von $\theta = 23°$ stattfindet. Dazu erfolgt eine Betrachtung des Rückstreuverhaltens in Abhängigkeit des Biomasseaufkommens, das einerseits

durch den *NDVI* und andererseits, gemäß der gewonnen Erkenntnisse aus Abbildung 9.4, durch das Kohärenz-Verhalten repräsentiert wird.

Als Datengrundlage dienten erneut die Flächen aus der Analyse hinsichtlich des biomassebedingten Kohärenz-Verhaltens. Somit erfolgt auch in der vorliegenden Untersuchung keine differenzierte Betrachtung des biomassebeeinflussten Intensitätsverhaltens hinsichtlich individueller Feldfrüchte.

Die in Abbildung 9.5 dargestellte Regressionsanalyse hinsichtlich des Intensitätsverhaltens in Abhängigkeit des *NDVI* signalisiert im Beobachtungszeitraum *Juni 1995* mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2_{Juni} = 0{,}62$ einen starken Zusammenhang zwischen Rückstreuintensität und Biomasseaufkommen. Die polynomische Ausgleichsfunktion zeigt eine annähernd exponentielle Zunahme der Rückstreuintensität mit wachsendem Biomasseaufkommen. Eine nur geringfügig beeinflusste Signaltransmission des C_{VV}-Signals erscheint bis zu einem *NDVI* von $NDVI \leq 0{,}35$ möglich. Erst jenseits dieses Grenzwertes zeigt sich ein starker Anstieg der Rückstreuintensität mit weiter anwachsendem Biomasseaufkommen um einen mittleren Betrag von $\Delta\overline{\sigma}^0 \approx 3{,}5dB$. Es ist daher anzunehmen, dass in einem Bereich von $0 < NDVI \leq 0{,}35$ das Rückstreusignal in erster Linie aus dem Oberflächenstreuterm des Bodens resultiert.

Im Bereich starken Biomasseaufkommen bei $NDVI > 0{,}70$ zeichnet sich eine Signalsättigung mit weiter anwachsendem Biomasseaufkommen ab.

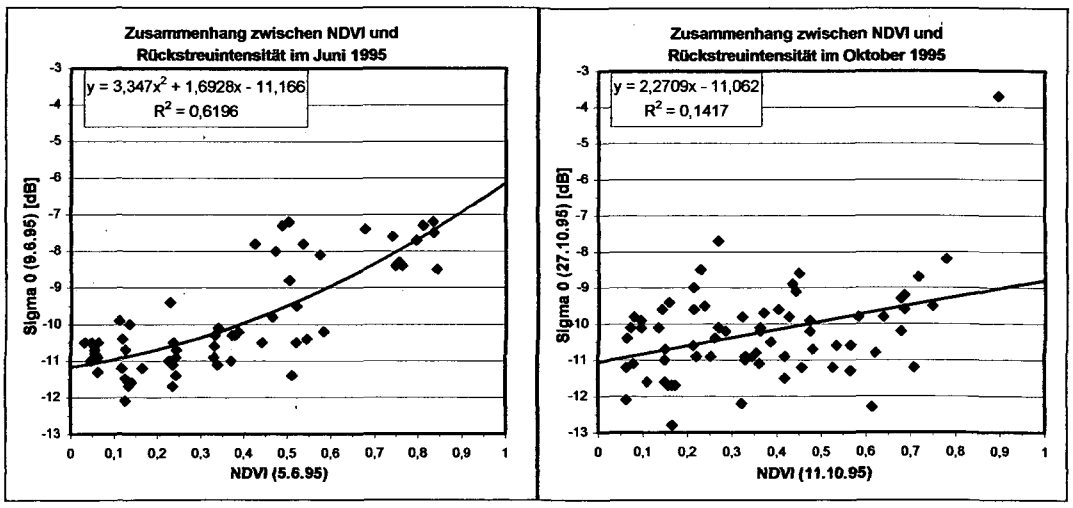

Abb. 9.5: Zusammenhang zwischen *NDVI* und *Rückstreuintensität* im Gebiet „*Sevilla*" in den Beobachtungszeiträumen *5. - 9.6.95* und *11. - 27.10.95*.

Neben einem möglichen Bodenfeuchteeinfluss resultiert die Streuung der Datenpunkte um die Ausgleichsfunktion in erster Linie aus dem Einfluss unterschiedlicher Rauhigkeitsverhältnisse und Pflanzenarchitekturen auf den betrachteten Flächen.

Das Ergebnis zeigt sich konform mit den eingangs erwähnten Erkenntnissen von Dubois et al. (1995) und Goyal et al. (1999), die eine schwache Signalbeeinflussung des L-Band Signals bis zu einem *NDVI* von $NDVI \leq 0{,}4$ ermittelten. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass das L-Band eine geringere Beeinträchtigung durch Vegetation als das C-Band Signal aufweist, wodurch der vergleichsweise größere *NDVI*-Bereich resultiert.

Auch die Studie von Moran et al. (2000) weist mit ihrem ermittelten *GLAI-Grenzwert* von $GLAI < 0{,}35$ für das C_{VV}-Signal ($\theta = 23°$) ein vergleichbares Ergebnis auf. Unter Verwendung von Gleichung (9.2) ergibt sich daraus näherungsweise ein *NDVI* von $NDVI \approx 0{,}3$. Dabei ist darauf zu achten, dass Gleichung (9.2) den empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen *NDVI* und *GLAI* von *Baumwollflächen* beschreibt (vgl. Moran et al., 1997), so dass die Anwendung des Zusammenhanges auf andere Feldfrüchte eine mehr oder minder starke Abweichung vom tatsächlichen Zustand produziert.

Auch Fellah et al. (1998) unterstützen die Erkenntnisse der vorliegenden Studie indem sie gleichfalls einen NDVI-Grenzwert für eine einflussarme C_{VV}-Signaltransmission ($\theta = 23°$) von $NDVI \leq 3{,}0$ ermittelten.

Unter Verwendung der Ausgleichsfunktion zwischen NDVI und Tandem-Kohärenz-Verhalten aus Abbildung 9.4 resultiert daraus ein Kohärenz-Bereich von $\hat{\gamma}_{tandem} \geq 0{,}61$, der eine schwachbeeinflusste Signaltransmission gewährleistet.

Bei Betrachtung des Intensitätsverhaltens in Abhängigkeit der Tandem-Kohärenz in Abbildung 9.6 zeigt sich im Beobachtungszeitraum *Juni 1995* im Vergleich zum Intensitätsverhalten in Abhängigkeit des *NDVI* ein geringfügig höherer Schwellwert. In dieser Regressionsanalyse, die mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2_{Juni} = 0{,}49$ einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Rückstreuintensität und dem biomassebeeinflussten Kohärenz-Verhalten aufweist, erscheint eine einflussarme Signaltransmission nur in einem Kohärenz-Bereich von $\hat{\gamma}_{tandem} \geq 0{,}65$ möglich. Dieses Verhalten weist auf den eingeschränkten Informationsgehalt des *NDVI* hinsichtlich

des Biomasseaufkommens hin und favorisiert die Kohärenz-Information als Biomasseparameter aufgrund der höheren Eindringtiefe der Mikrowellen in den Pflanzenbestand. Ähnlich dem Intensitätsverhalten in Abhängigkeit des NDVI ist auch in dieser Darstellungsform eine Signalsättigung im Bereich starken Biomasseaufkommens bei einer Kohärenz von $\hat{\gamma}_{\tan dem} < 0{,}25$ zu erkennen.

Im Kohärenz-Bereich von $0{,}65 \leq \hat{\gamma}_{\tan dem} \leq 1$ lässt sich ein maximaler Vegetationseinfluss auf das Rückstreusignal von ca. $\Delta\sigma^0 = 1dB$ erkennen, wobei die Einflussnahme unterschiedlicher Rauhigkeitssituationen, Pflanzenarchitekturen oder Feuchteeinflüsse auf das beobachtete Verhalten nicht abzuschätzen sind. Im Vergleich zu einer maximalen Signalvariation aufgrund einer Bodenfeuchteänderung von $\Delta\sigma^0 = 10dB$ erscheint der mögliche Einfluss als gering.

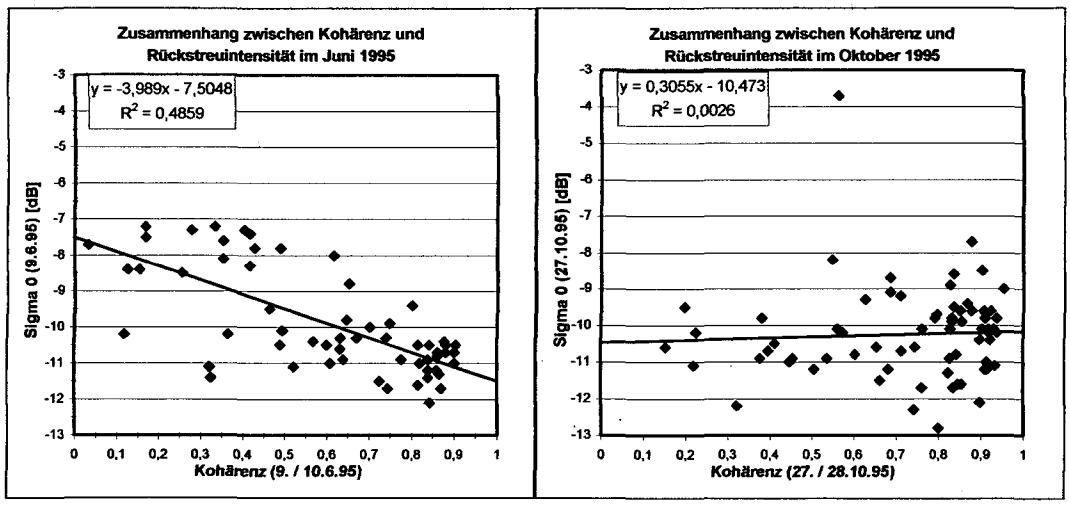

Abb. 9.6: Zusammenhang zwischen *Tandem-Kohärenz* und *Rückstreuintensität* im Gebiet „*Sevilla*" in den Beobachtungszeiträumen *5. – 9 / 10.6.95* und *11. - 27. / 28.10.95.*

Damit zeigen die gewonnen Erkenntnisse erneut eine weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen der eingangs erwähnten Studien. So ermittelten neben Wegmüller (1998) auch Moeremans & Dautrebande (2000) einen Kohärenz-Grenzwert von $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}70$ für vegetationsfreie bzw. spärlich vegetationsbedeckte Gebiete.

Der Einfluss der zwischenzeitlichen Ernte zwischen der Landsat 5 TM Aufnahme am *11. Oktober 1995* und den SAR-Aufnahmen am *27. / 28. Oktober 1995* spiegelt sich erneut in den Regressionsanalysen hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Rückstreuintensität und zeitlich korrespondierendem *NDVI* in Abbildung 9.5 und zwischen Rückstreuintensität und Kohärenz-Verhalten in Abbildung 9.6 wider. Während Abbildung 9.5 keine Veränderung der Rückstreuintensität trotz

wachsendem *NDVI* aufweist, zeigt Abbildung 9.6 neben einer fehlenden Zunahme der Rückstreuintensität eine starke Häufung der Datenpunkte im Bereich hoher Kohärenz. Beide Verhaltensweisen deuten somit erneut darauf hin, dass zum Zeitpunkt der SAR-Aufnahmen am *27. / 28. Oktober 1995* ein Grossteil der Flächen bereits vegetationsfrei vorlag. Aufgrund dieser Beeinträchtigung des Beobachtungszeitraumes *Oktober 1995* finden ausschließlich die Erkenntnisse aus der Regressionsanalyse des Aufnahmezeitraumes *Juni 1995* für die Definition des *biomassebeschränkenden Kohärenz-Schwellwertes* Verwendung.

Wie die eingangs erfolgte Diskussion zeigt, bestätigen die Erkenntnisse der erwähnten Studien mit hoher Übereinstimmung das in der vorliegenden Arbeit beobachtete biomassebedingte Kohärenz- und Intensitätsverhalten. Wie gezeigt werden konnte ist im Bereich der Tandem-Kohärenz von $0{,}65 \leq \hat{\gamma}_{\tan dem} \leq 1$ eine nahezu ungehinderte Transmission des C_{VV}-Signals in einem mittleren Einfallswinkelbereich von $\theta = 23°$ möglich. Aufgrund dieser Tatsache erfolgt die Definition eines artenunabhängigen *Tandem-Kohärenz-Grenzwertes für die Gewährleistung biomassearmer Flächen* mit $\hat{\gamma}_{veg} = 0{,}65$.

Der Vergleich des Einflusses von Vegetation mit stark signalbeeinflussendem Biomasseaufkommen mit der Beeinträchtigung der Kohärenz aufgrund einer Bodenfeuchteänderung deutet darauf hin, dass der *feuchtevariationsbedingte Dekorrelationsanteil* die Isolierung biomassearmer Flächen nicht beeinträchtigt. Es ist sogar davon auszugehen, dass sich die Tandem-Kohärenz-Information weitgehend unbeeinflusst von diesem Dekorrelationseinfluss zeigt, da in einem Zeitintervall von $\Delta t = 1d$ nur eine vergleichsweise geringe Feuchtevariation auftritt, sofern kein zwischenzeitliches intensives Niederschlagsereignis stattfindet. Diese Meinung wird auch von Blaes et al. (1999 & 2003) geteilt, deren Studie auf einer entsprechenden Annahme basiert. Somit ist die Isolierung biomassearmer Flächen auf Basis der Tandem-Kohärenz ohne Einschränkung möglich.

Die Tatsache, dass der Systemausfall von *ERS-1* die Möglichkeit weiterer Tandem-Missionen in naher Zukunft ausschließt, verhindert die Verwendung der *Tandem-Kohärenz* als Datengrundlage für die Isolierung *brachliegender bzw. biomassearmer Flächen.* Dieser Verlust beeinträchtigt grundsätzlich nicht den Verfahrensansatz, da die Aufgabe der Tandem-Kohärenz durch die Verwendung optischer Fernerkundungsdaten substituiert werden kann. Nachteilig erweist sich dabei jedoch die eingeschränkte Eignung optischer Daten für Zeitreihenanalysen aufgrund des

starken Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die Datenverfügbarkeit und -qualität.

9.2. Kohärenz-Analyse hinsichtlich des Einflusses einer Rauhigkeitsänderung

Für eine sensible Erfassung der Bodenfeuchte auf Basis der ERS-1/2 InSAR-Daten ist die Stabilität der zum Trockenzeitpunkt erfassten Rauhigkeitssituation über die Zeit als grundlegende Voraussetzung zu gewährleisten. Die Überwachung dieser *sekundären Prämisse* erfolgt über die Verwendung der *Langzeit-Kohärenz-Schätzungen*, die gemäß der ERS-1/2 SAR Repetitionsrate über Zeitintervalle von $\Delta t = 35d$ erfolgt. Da sich jede rückstreueffektive Rauhigkeitsvariation im Bereich von mehreren Millimetern aufgrund der veränderten Streugeometrie in der Kohärenz-Information widerspiegelt, ermöglicht sie die Aktualisierung der rauhigkeitsstabilen Flächen von einem Zeitpunkt der Feuchteerfassung zum folgenden.

Um die Definition eines *Langzeit-Kohärenz-Grenzwertes* $\hat{\gamma}_{rough}$ zu ermöglichen, der die Rauhigkeitsstabilität biomassearmer Flächen gewährleistet, erfolgt im weiteren eine Signaturanalyse hinsichtlich des Langzeit-Kohärenz-Verhaltens in Abhängigkeit einer Rauhigkeitsänderung.

Die Information bezüglich des Auftretens von Rauhigkeitsänderungen konnte den *Anbaukalendern* des *MARS-Projektes* entnommen werden, die für das Beobachtungsjahr *1996* eine lagespezifizierte Auskunft über den zeitlichen Verlauf von ackerbaulichen Bearbeitungsmethoden im Untersuchungsgebiet „*Sevilla*" geben (siehe: Kapitel 6.1.2.5.). Diese detaillierte Information diente der Identifizierung von geeigneten Flächen für die Analyse des rauhigkeitsbedingten Kohärenz-Verhaltens. Der Bereich der dargestellten Rauhigkeitsänderung erstreckt sich von *stabilen Rauhigkeitsverhältnissen* bis hin zu einer *starken Umgestaltung der Oberfläche* aufgrund der ackerbaulichen Maßnahmen im Zuge der Saatbeetbereitung der Feldfrüchte *Sonnenblume*, *Mais* und *Baumwolle* im Frühjahr *1996*.

Zu beachten ist, dass die Saat auf den rauhigkeitsstabilen Flächen bereits vor dem Aufnahmezeitpunkt *24. März 1996* stattfand und damit eine biomassearme Vegetationsbedeckung im Beobachtungszeitraum vorlag. Dies gilt insbesondere für *Winterweizenkulturen*, deren Saat bereits im November bis Dezember des Vorjahres stattfand. Die Wahl biomassearmer vegetationsbedeckter Flächen erfolgte aufgrund

der Annahme, dass ein Auftreten undokumentierter ackerbaulicher Maßnahmen durch die Anwesenheit von Jungpflanzen ausgeschlossen werden kann. Auf die Einhaltung des biomassebedingten Kohärenz-Kriteriums konnte nicht geachtet werden, da in den betrachteten *MARS-Segmenten*, für welche ausschließlich die Information der Anbaukalender *1996* vorliegt, nur wenige Flächen den geforderten Biomassebereich erfüllten. Dies bestätigt die Annahme, dass in ackerbaulich intensiv genutzten Gebieten im Zeitraum Frühjahr bis Frühsommer nur ein geringer Flächenanteil für die Bodenfeuchtebeschreibung verwendet werden kann.

Abbildung 9.7 zeigt die Signaturanalyse hinsichtlich des Langzeit-Kohärenz-Verhaltens in Abhängigkeit des Rauhigkeitsverhaltens im Zeitintervall *25. März 1996* bis *19. April 1996*. Die Langzeit-Kohärenz ist dabei in einem Streudiagramm gegenüber der zeitlich korrespondierenden Tandem-Kohärenz zu Beginn des $\Delta t = 35d$ Beobachtungsintervalls (*24. / 25. März 1996*) aufgetragen. Auffällig erweist sich das geringe Niveau der Langzeit-Kohärenz unabhängig vom Rauhigkeitsverhalten der beobachteten landwirtschaftlichen Flächen. So zeigt ein Großteil der Flächen trotz stabiler Rauhigkeitsverhältnisse nur eine *Langzeit-Kohärenz* von $\hat{\gamma}_{long} < 0{,}3$. Es ist anzunehmen, dass dieses Verhalten durch die Kombination der dekorrelierenden Einflüsse des zwischenzeitlichen Vegetationswachstums sowie der Bodenfeuchteänderung verursacht wird. So signalisiert der *scatterometerbasierte Bodenfeuchte-Index* M_s von Wagner et al. (1999a, b, c) in Abbildung 6.1 einen deutlichen Anstieg der Feuchtesituation im betrachteten Zeitintervall.

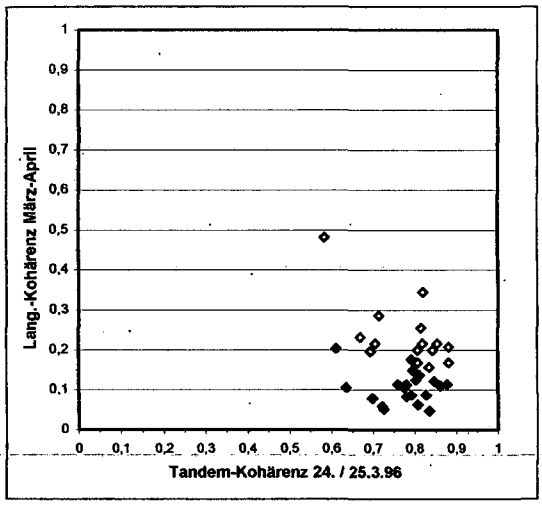

Abb. 9.7: Langzeit-Kohärenz-Verhalten in Abhängigkeit des Rauhigkeitsverhaltens im Zeitraum 25. März bis *19. April 1996*.
Weiß: rauhigkeitsstabile Flächen;
Schwarz: rauhigkeitsveränderte Flächen (Saatbeetbereitung)

Trotz des geringen Kohärenz-Unterschiedes zwischen den stabilen und rauhigkeitsveränderten Flächen zeigt sich eine unscharfe Trennlinie bei einer *Langzeit-Kohärenz* von ca. $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}15$, die eine Differenzierung beider Verhaltensweisen erlaubt.

Diese Beobachtung entspricht weitgehend den Erkenntnissen von Wegmüller et al. (2000), die für rauhigkeitsveränderte Oberflächen aufgrund von Erosionsprozessen eine Langzeit-Kohärenz von $0 \leq \hat{\gamma}_{long} \leq 0{,}20$ über ein Zeitintervall von $\Delta t = 35d$ ermittelten. Auch Borgeaud & Wegmüller (1996) beobachteten im Fall von Pflugaktivitäten einen Verlust der Tandem-Kohärenz von $\Delta\hat{\gamma}_{\tan dem} > 0{,}80$ auf Flächen mit *Winterweizen-* und *Kartoffelkulturen*. Moeremans & Dautrebande (2000) berichteten dahingegen nur von einer Abnahme der Tandem-Kohärenz um einen Betrag von $\Delta\hat{\gamma}_{\tan dem} = 0{,}55$ aufgrund ackerbaulicher Aktivitäten auf *Zuckerrübenflächen*. In der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass die Beobachtung auf Tandem-Kohärenz-Daten basiert. Es ist daher anzunehmen, dass diese vergleichsweise geringe Kohärenz-Abnahme zum Teil aus dem fehlenden Einfluss einer zwischenzeitlichen signifikanten Feuchteänderung in dem kurzen Zeitintervall von $\Delta t = 1d$ zwischen den Aufnahmen resultierte. Auch variiert die Stärke der Veränderung der Oberflächenrauhigkeit mitunter erheblich mit der Art der ackerbaulichen Maßnahme.

Insgesamt ist anzumerken, dass die Literatur nur wenige Studien aufweist, die sich eingehend mit dem rauhigkeitsbeeinflussten Kohärenz-Verhalten beschäftigen, so dass für ein besseres Verständnis weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich dieser Thematik besteht.

Da aufgrund der geringen Aufnahmedichte ein Teil der Zeitintervalle zwischen den verwendeten Aufnahmen den $\Delta t = 35d$ Zyklus übersteigt, erfolgt im weiteren eine Analyse des temporalen Kohärenz-Verhaltens mit einem Zeitintervall von $\Delta t > 35d$ zwischen den Aufnahmezeitpunkten. Abbildung 9.8 zeigt die klassenspezifischen Abnahmeraten der Kohärenz mit wachsendem Zeitintervall zwischen den Aufnahmezeitpunkten in den Sommermonaten des Jahres *1995*. Die Analyse beleuchtet den Dekorrelationseinfluss unterschiedlicher Faktoren auf das *temporale Kohärenz-Verhalten*, welche durch folgende Klassen und Farbcodierungen repräsentiert werden:

a) *Hellblau*: vegetationsfreie und rauhigkeitsstabile Flächen;
b) *Schwarz*: rauhigkeitsstabile Flächen mit biomassearmer Vegetation;
c) *Blau / Rot*: rauhigkeitsveränderte Flächen.

Das Kohärenz-Verhalten ist dabei für folgende Beobachtungszeitintervalle dargestellt:

1) $\Delta t = 1d$: *9. / 10. Juni 1995*
2) $\Delta t = 35d$: *10. Juni – 14. Juli 1995*
3) $\Delta t = 70d$: *10. Juni – 18. August 1995.*

Während die Information bezüglich der Vegetationsbedeckung über die *NDVI-Information* des Landsat 5 TM Aufnahmezeitpunktes *5. Juni 1995* und die ERS-1/2 Tandem-Kohärenz der Aufnahmezeitpunkte *9. / 10. Juni 1995*, *14. / 15. Juli 1995* und *18. / 19. August 1995* erfasst wurde, erfolgte die Charakterisierung des Rauhigkeitsverhaltens der Felder indirekt, da der Anbaukalender *1995* keine lagespezifizierte Information hinsichtlich der ackerbaulichen Maßnahmen beinhaltet. Dabei begünstigte die langanhaltende Trockenperiode die Erfassung der rauhigkeitsveränderten Flächen, die den Einfluss einer Feuchteänderung auf das beobachtete Kohärenz-Verhalten ausschließt. Dies lässt annehmen, dass gemäß der Erkenntnisse von Moeremans & Dautrebande (2000) eine Abnahme der Langzeit-Kohärenz von $\Delta\hat{\gamma}_{long} \geq 0{,}45$ auf brachliegenden Flächen aus einer Rauhigkeitsveränderung aufgrund ackerbaulicher Maßnahmen resultiert. Eine wahrscheinliche Ursache für die beobachtete Rauhigkeitsänderung ist das Unterpflügen der nach der Ernte verbliebenen Stoppeln (*Mulchen*), das der Verbesserung des Nährstoffhaushaltes der Böden dient.

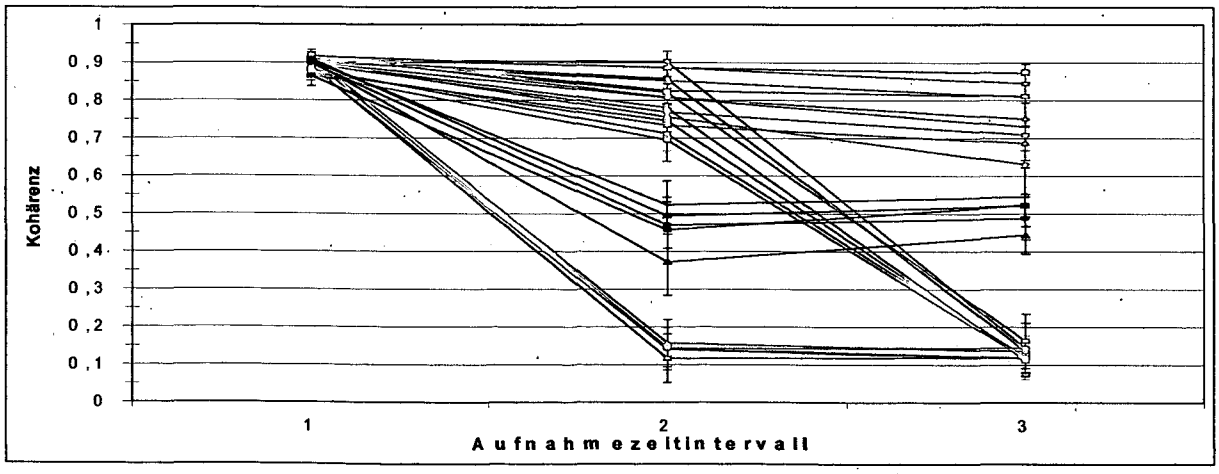

Abb. 9.8: Abnahme der Kohärenz mit wachsenden Zeitintervallen zwischen den Aufnahmezeitpunkten über vegetationsfreien Böden (hellblau, rot, blau) und biomassearmen Flächen (schwarz).
Dargestellte Intervalllängen: 1: $\Delta t = 1d$; 2: $\Delta t = 35d$; 3: $\Delta t = 70d$

Wie Abbildung 9.8 zu entnehmen ist, zeigen die Flächen in Abhängigkeit ihres Rauhigkeitsverhaltens und der Vegetationsbedeckung ein stark differenziertes temporales Kohärenz-Verhalten. So weist die *blaue* und *rote Kurvenschar* aufgrund der ackerbaulich bedingten *Rauhigkeitsänderung* einen starken Abfall der Kohärenz bis zu einem mittleren Niveau von ca. $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}13$ auf. Diese Beobachtung bestätigt die Erkenntnis der vorangegangenen Kohärenz-Analyse des Untersuchungszeitraumes *25. März 1996* bis *19. April 1996*, die eine mittlere Langzeit-Kohärenz von $\hat{\gamma} \approx 0{,}10$ über ein Zeitintervall von $\Delta t = 35d$ als Resultat einer Rauhigkeitsänderung zeigte. Wie die Kurvenverläufe signalisieren, erfolgte die ackerbauliche Bearbeitung im Fall der Felder der *blauen Kurvenschar* innerhalb des ersten $\Delta t = 35d$ Intervalls, während die *rote Schar* erst nach $\Delta t > 35d$ im $\Delta t = 70d$ Intervall eine Rauhigkeitsänderung aufweist.

Auffällig zeigt sich das temporale Kohärenz-Verhalten der *Flächen mit biomassearmer Vegetationsbedeckung*. Wie Abbildung 9.8 zu entnehmen ist, beeinträchtigt ihre Anwesenheit das Kohärenz-Verhalten deutlich schwächer als eine signifikante Rauhigkeitsänderung. Dabei zeigt die vorliegende Untersuchung mit einer *mittleren vegetationsbeeinflussten Kohärenz* von ca. $\hat{\gamma}_{long} \approx 0{,}48$ ein deutlich höheres Niveau als die Kohärenz-Analyse des Beobachtungszeitraumes *25. März 1996* bis *19. April 1996* mit $\hat{\gamma}_{long} \approx 0{,}23$. Es ist anzunehmen, dass diese Diskrepanz durch die fehlenden Einflüsse einer ausgeprägten Bodenfeuchtevariation in den trockenen Sommermonaten des Jahres *1995* sowie des größtenteils geringen phänologiebedingten Pflanzenwassergehaltes in dieser Periode verursacht wird.

Wegmüller et al. (2000) beobachteten in einem Zeitintervall von $\Delta t = 35d$ auf Flächen mit geringer Vegetationsbedeckung ein ähnliches Kohärenz-Verhalten: Dabei zeigte sich, dass die Langzeit-Kohärenz im Fall einer spärlichen Vegetationsbedeckung selbst bei hohen Bodenbedeckungsgraden von 90% nicht unter einen Schwellwert von $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}35$ absinkt. Die Pflanzenart und das Bodenfeuchteverhalten wurde dabei jedoch nicht näher spezifiziert.

Wie dem Kohärenz-Verhalten in Abbildung 9.8 entnommen werden kann, führt im Fall einer Rauhigkeitsänderung in einem Zeitintervall von $\Delta t \leq 70d$ die Erhöhung des Zeitintervalls von $\Delta t = 35d$ auf $\Delta t = 70d$ nicht zu einer signifikanten Zunahme des Kohärenz-Verlustes, wodurch keine individuelle Schwellwertdefinition nötig wird. Auch im Fall einer biomassearmen Vegetationsbedeckung zeigt sich keine weitere

Kohärenz-Abnahme. Wie diverse Studien zeigen (siehe: Zebker & Villasenor, 1992; Lu & Freymüller, 1998; Lu & Meyer, 2000), ist in längeren Zeitintervallen dahingegen durchaus ein gegenteiliges Verhalten zu erwarten.

Auffällig erweist sich demgegenüber die annähernd lineare Kohärenz-Abnahme der *vegetationsfreien und rauhigkeitsstabilen Flächen (hellblau)* mit wachsendem Aufnahmezeitintervall. Dieses Verhalten wird bereits von Zebker & Villasenor (1992) und Lu & Freymüller (1998) diskutiert. Es ist anzunehmen, dass der kontinuierlich einwirkende Einfluss der Atmosphäre auf die brachliegenden Böden die Kohärenz-Abnahme verursacht. So führen *äolische* und *niederschlagsbedingte Erosionsprozesse* zu einer stetigen Veränderung der Oberflächenrauhigkeit im Bereich von wenigen Millimetern. Ihr Betrag ist für eine unmaskierte Detektion über kurze Zeitintervalle zu gering und wird erst in akkumulierter Form im Langzeit-Kohärenz-Verhalten ersichtlich. Da der Betrag der Kohärenz-Abnahme in den betrachteten Zeiträumen das Langzeit-Kohärenz-Kriterium nicht verletzt, erfolgt im vorgestellten Verfahren keine individuelle Berücksichtigung dieses Einflusses.

Dieses zeitintervallabhängige Kohärenz-Verhalten von brachliegenden Flächen wird u.a. von Lu & Meyer (2000) bestätigt. Während sie auf brachliegenden Flächen nach einem Zeitintervall von $\Delta t = 1d$ eine sehr hohe Tandem-Kohärenz von $\hat{\gamma}_{tandem} = 0{,}90$ beobachteten, zeigte sich eine Langzeit-Kohärenz von $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}80$ über ein Zeitintervall von $\Delta t = 35d$ und $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}60$ nach einem Jahr.

Aufgrund des beobachteten Verhaltens sowie der größtenteils übereinstimmenden Erkenntnisse der aufgeführten Studien erfolgt die Definition des *Langzeit-Kohärenz-Schwellwertes* für die Gewährleistung rauhigkeitsstabiler Flächen mit $\hat{\gamma}_{rough} = 0{,}15$ für ein Aufnahmezeitintervall von $\Delta t \leq 70d$. Aufgrund der erwähnten Eigenschaften der analysierten Flächen berücksichtigt der Grenzwert $\hat{\gamma}_{rough}$ die Dekorrelationseinflüsse einer biomassearmen Vegetationsbedeckung sowie einer zwischenzeitlichen Bodenfeuchtevariation.

Der niedrige Schwellwert bedingt, dass der Erhalt der initial über die Tandem-Kohärenz-Information erfassten Biomassearmut über die Zeit nicht auf Basis der Langzeit-Kohärenz gewährleistet werden kann. Somit ist eine stetige Aktualisierung der Flächeneignung über die Verwendung der Tandem-Kohärenz oder von optischen Daten nötig.

Die gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen die zu vernachlässigende Bedeutung des feuchtevariationsbedingten Dekorrelationsanteils im Vergleich zum Einfluss einer Rauhigkeitsänderung auf das Kohärenz-Verhalten. Damit ist die Nutzung der erläuterten Methode ohne Einschränkung möglich.

Eine Anwendung des erläuterten Verfahrens auf das Untersuchungsgebiet „*Sevilla*" konnte aufgrund der eingeschränkten InSAR-Datengrundlage nicht durchgeführt werden. Grund dafür ist die Tatsache, dass zu keinem ERS-1/2 SAR Aufnahmezeitpunkt der Feuchtezustand der Feldkapazität auftrat. Wie die Betrachtung der *scatterometerbasierten Feuchte-Index-Zeitreihe* in Abbildung 6.1 und der *Niederschlagsverteilung* in Abbildung 6.2 zeigt, konnte im Beobachtungszeitraum *1995 / 1996* nur ein kleiner Teil der maximal möglichen Feuchtevariation beobachtet werden. So weist der *scatterometerbasierte Feuchte-Index* M_s darauf hin, dass zum Aufnahmezeitpunkt *16. März 1996* der maximale mittlere Feuchtegehalt der Böden im Untersuchungsgebiet „*Sevilla*" mit $M_s \approx 20\%$ stark unter dem Zustand der Feldkapazität lag. Die fehlende Information hinsichtlich des feuchtebedingten Signalwertebereiches verhinderte somit die Verfahrensanwendung. Die Studie beschränkt sich deshalb auf eine Anwendung des Verfahrens auf das Untersuchungsgebiet „*La Guarena*", *dessen Datengrundlage* gleichfalls der Validierung dient.

Zusammenfassung der Erkenntnisse der Kohärenz- und Intensitätsanalysen:

a) Zwischen der *ERS-1/2 Tandem-Kohärenz* und dem *Biomasseaufkommen landwirtschaftlicher Nutzflächen des Trockenfeldbaus* konnte ein starker linearer Zusammenhang von $B_{Juni} = 0{,}81$ beobachtet werden.

b) Zwischen dem *Biomasseaufkommen landwirtschaftlicher Nutzflächen des Trockenfeldbaus* und der *C_{VV}-Rückstreuintensität* ($\theta = 23°$) zeigte sich ein starker Zusammenhang (*NDVI:* $R^2{}_{Juni} = 0{,}62$, Kohärenz: $R^2{}_{Juni} = 0{,}49$).

c) Der Einfluss *biomassearmer landwirtschaftlicher Nutzpflanzen des Trockenfeldbaus* auf die *C_{VV}-Rückstreuintensität* ($\theta = 23°$) ist bis zu einem *NDVI-Grenzwert* von ca. $NDVI \approx 0{,}35$ und einer Kohärenz von $\hat{\gamma}_{tandem} \approx 0{,}65$ gering.

d) Die Verwendung der Tandem-Kohärenz ermöglicht die Isolierung vegetationsfreier bzw. biomassearmer Flächen auf Basis eines *Schwellwertes* von $\hat{\gamma}_{veg} = 0{,}65$.

e) Eine starke *ackerbaulich bedingte Rauhigkeitsänderung* im Zentimeterbereich bewirkt eine *Abnahme der Kohärenz* auf ein Niveau von $\hat{\gamma}_{long} < 0{,}15$ in einem Zeitintervall von $\Delta t \leq 70d$. Die Erkenntnis berücksichtigt den Einfluss einer zwischenzeitlichen Feuchteänderung.

f) Die Verwendung der *Langzeit-Kohärenz* ermöglicht die *Isolierung rauhigkeitsstabiler Flächen* mit einem *Schwellwert* von $\hat{\gamma}_{rough} = 0{,}15$ in einem Zeitintervall von $\Delta t \leq 70d$.

g) Das Kohärenz-Verhalten aufgrund einer starken ackerbaulich bedingten Rauhigkeitsänderung ist unabhängig von der Länge des Betrachtungsintervalls innerhalb eines Zeitraumes von $\Delta t \leq 70d$. Über längere Zeitintervalle kann aufgrund fehlender Daten keine Aussage getroffen werden.

h) Der Einfluss einer Feuchteänderung beeinträchtigt aufgrund einer untergeordneten Stellung nicht die Isolierung biomassearmer und rauhigkeitsstabiler Flächen auf Basis der Kohärenz-Information.

10. Anwendung und Validierung des Verfahrens im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*"

Die Anwendung und Validierung des vorgestellten *Verfahrens zur Erfassung der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Bodenfeuchtemustern in semiariden Gebieten mittels ERS-1/2 InSAR Zeitreihen* erfolgte auf Basis eines Teilbereiches des Einzugsgebietes des Flusses „*Duero*" in *Zentral-Spanien*. Im hydrologischen Studiengebiet „*La Guarena*" betreibt das *Geographische Institut der Universität Salamanca* seit *Juni 1999* ein festinstalliertes *Netzwerk aus Bodenfeuchtemess-stationen*, welche in einem 15-tägigen Turnus die Feuchteverhältnisse in diversen Horizonten unterschiedlicher Bodentiefe und Mächtigkeit erfassen (siehe: Kapitel 6.2.2.1.). Diese detaillierte Bodenfeuchteinformation diente als Grundlage für die Validierung des Verfahrens. Ziel der Validierung war die Erfassung der *Güte des Verfahrens* über den räumlichen und zeitlichen Vergleich des fernerkundlich erfassten *Feuchte-Index* $m_{\%\,field}$ mit den korrespondierenden in-situ Messreihen des $z = 25cm$ mächtigen Oberflächenhorizontes.

10.1. Beschreibung der Validierungsgrundlage

Die Feuchte-Index-Erfassung im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*" erwies sich aufgrund einer eingeschränkten Datengrundlage als beeinträchtigt, wodurch Modifikationen des ursprünglichen Verfahrensprinzips nötig wurden, um die Validierung des Verfahrens zu ermöglichen. Der folgende Abschnitt erläutert die einschränkenden Faktoren und Verfahrensmodifikationen.

Die Grundlage für den Datenvergleich im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*" bildeten fünf *komplexe ERS-1/2 SAR SLC Datensätze* aus den Jahren *1999* und *2000*, darunter ein Tandempaar der Aufnahmezeitpunkte *2. / 3. September 1999* (siehe: Kapitel 6.2.1.). Tabelle 10.1 zeigt die Aufnahmezeitpunkte der ERS-1/2 InSAR Datenprodukte im Vergleich zu den korrespondierenden in-situ Messzeitpunkten sowie die Zeitintervalle zwischen den Vergleichsmessungen.

	Messzeitpunkt				
Intensität	25. Juni 1999	2. Sept. 1999	3. Sept. 1999	31. März 2000	9. Juni 2000
Kohärenz	25.Juni / 2. Sept. 1999	2./3. Sept. 1999	3. Sept. 99 / 31. März 2000	31. März / 9. Juni 2000	
in-situ Messung	29. Juni 1999	7. Sept. 1999	7. Sept. 1999	4. April 2000	13. Juni 2000
Δt [d]	4	5	4	4	4

Tab. 10.1: Messzeitpunkte der *ERS-1/2 InSAR Datenprodukte* im Vergleich zu den korrespondierenden *in-situ Messungen.*

Wie Kapitel 7.1.2. erläutert, führten große effektive Basislinien und lange Zeitintervalle zwischen den Aufnahmezeitpunkten in Perioden mit starken Veränderungsraten zu einem vollständigen Verlust der Phasenbeziehungen zwischen den Aufnahmezeitpunkten *a) 3. September 1999 / 31. März 2000* und *b) 31. März 2000 / 9. Juni 2000.* Da somit keine Aussage bezüglich des Rauhigkeitsverhaltens im Beobachtungsjahr *2000* getroffen werden konnte, blieb sowohl die Feuchte-Index-Erfassung sowie deren Validierung auf die Daten des Jahres *1999* beschränkt.

Tabelle 10.1 zeigt, dass in der Regel ein viertägiges Zeitintervall die Zeitpunkte der zu vergleichenden ERS-1/2 SAR-Aufnahmen und in-situ Messungen trennt. Um zusätzlich zur infiltrations- und evapotranspirationsbedingten Feuchtevariation den Einfluss zwischenzeitlicher Niederschläge auf die beobachtete Feuchtesituation berücksichtigen zu können, erfolgte in der Interpretation des Datenvergleiches eine begleitende Betrachtung der in Abbildung 6.3 dargestellten Niederschlagsdaten aus dem Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*. Tabelle 6.3 zeigt die differenzierte Zuordnung der Bodenfeuchtemessstationen zu den fünf meteorologischen Stationen des Untersuchungsgebietes auf Basis der minimalen räumlichen Distanz. Abbildungen 5 und 6 im Anhang visualisieren die Standorte der Bodenfeuchtemessstationen im Vergleich zu den meteorologischen Stationen.

Aufgrund des unterschiedlichen Messprinzips besitzen die zu vergleichenden Feuchtemesswerte eine voneinander abweichende räumliche Aussagekraft, die in der Interpretation des Datenvergleichs Berücksichtigung fand:

Variierende vertikale Aussagekraft:

Die *vertikale Aussagekraft* beider Messmethoden unterscheidet sich aufgrund variierender Mächtigkeiten der Messhorizonte. Während der in-situ Messwert die mittlere Feuchtesituation eines $z = 25cm$ mächtigen Horizontes widerspiegelt, beschreibt der fernerkundlich erfasste *Feuchte-Index* $m_{\%\,field}$ im Mittel den Zustand

einer ca. $z \approx 2cm$ mächtigen Schicht (vgl. Schmugge, 1983). Aufgrund der mit der Horizontmächtigkeit zunehmenden Dämpfung des atmosphärischen Einflusses auf die zeitliche Feuchtevariation zeigen beide Messreihen ein unterschiedliches Verhalten. Dies äußert sich in einer geringeren Variabilität der *in-situ Messreihe* im Vergleich zum fernerkundlich erfassten Feuchte-Index-Verlauf. So treten im Gegensatz zur fernerkundungsrelevanten Oberflächenschicht im in-situ Messhorizont in der Regel keine absolut trockenen Verhältnisse auf, so dass in einem Großteil der Fälle der Feuchtezustand des *Welkepunktes* das mögliche Feuchteminimum beschreibt. Diese horizontspezifische Eigenschaft spiegelt die in-situ Messreihe *1999* bis *2001* mit einem *mittleren minimalen Feuchtegehalt* von $\overline{m}_v = 0{,}09cm^3cm^{-3}$ ($stdev = 0{,}04cm^3cm^{-3}$) in Tabelle 10.2 wider. So wird in der gesamten Zeitreihe nur an fünf Stationen der Feuchtegehalt des Welkepunktes geringfügig unterschritten. Andererseits erreicht nur ein Teil der gesamten Niederschlagsmenge den in-situ Messhorizont, da in der fernerkundungsrelevanten Oberflächenschicht zusätzlich zum Prozess der *Infiltration* Verluste durch *Evapotranspiration*, *Oberflächen-* und *Zwischenabfluss* auftreten. Da dieses methodenspezifische Verhalten einen stark systematischen Charakter aufweist, ist eine Berücksichtigung in der Interpretation des Datenvergleichs möglich.

Variierende horizontale Aussagekraft:

Darüber hinaus besitzen beide Messungen eine unterschiedliche *horizontale Aussagekraft*. Während der *Feuchte-Index* $m_{\%\,field}$ die mittleren Feuchteverhältnisse einer Fläche von $A = 625m^2$ beschreibt, spiegelt die in-situ Messung den Zustand eines Punktes von ca. $A \approx 1cm^2$ wider. *Kleinskalige Reliefunterschiede* sowie Einflüsse des Mikroklimas führen zu standortspezifischen Feuchteausprägungen, die mitunter stark von der mittleren Feuchtesituation der Parzelle abweichen. Da keine Information bezüglich der abweichenden Standorteigenschaften von der physischen Gesamtsituation der Parzelle vorlag, konnte Art und Betrag dieses Fehlers auf das Messergebnis nicht abgeschätzt werden.

Gemäß der Definition in Kapitel 8.4. beschreibt der *Feuchte-Index* $m_{\%\,field}$ die Bodenfeuchtesituation im System $\%Feldkapazität$. Der Vergleich des in Tabelle 10.2 dargestellten Feuchtegehaltes des in-situ Referenzmesszeitpunktes

7. September 1999 mit dem *Feuchtegehalt der Feldkapazität* zeigt, dass obwohl beide Messwerte eine geringe mittlere Abweichung von $\Delta\overline{m}_v = 0{,}023 cm^3 cm^{-3}$ ($stdev = 0{,}068 cm^3 cm^{-3}$) aufweisen, an einem Teil der Stationen deutlich höhere Feuchtegehalte als die der Feldkapazität herrschten. Dies verhinderte die Verwendung des Feuchtegehaltes zum Zeitpunkt der Feldkapazität, so dass für die Belange des Untersuchungsgebietes „*La Guarena*" der Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Wassersättigung für die Normierung des Feuchte-Index diente. Dies führte zur modifizierten Form des *Feuchte-Index* $m_{\%sat}$ mit der Einheit *Feuchtegehalt in Prozent der Feuchte zum Zeitpunkt der Sättigung* [$\%Sättigung$].

Wie die in-situ Referenzmessungen in Tabelle 10.2 verdeutlichen, verhinderte die eingeschränkte Datengrundlage eine direkte fernerkundliche Beobachtung des Sättigungszeitpunktes, so dass das resultierende Rückstreuverhalten ersatzweise mit Hilfe eines elektromagnetischen Rückstreumodells ermittelt wurde (siehe: Kapitel 10.2.). Basis für die Modellierung bildete die in Tabelle 10.2 dargestellte *Wasserspeicherkapazität* der Böden, die den Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Sättigung repräsentiert. Da diese Information für die Stationen *Granja G.*, *Guaratti* und *Guarena* nicht vorlag, wurde die Annahme getroffen, dass die mittlere Wasserspeicherkapazität $\overline{m}_{v(sat)}$ der jeweils übergeordneten *physischen Einheit* die bodenhydraulischen Eigenschaften der Stationen in guter Näherung beschreibt. Als Basis für diese Annahme diente die in Tabelle 10.3 aufgezeigte Ähnlichkeit der Korngrößenverteilung der Messstationen innerhalb einer *physischen Einheit*, die aufgrund eines vergleichbaren Porenvolumens ähnliche Wassergehalte zum Zeitpunkt der Sättigung garantiert. Da im Fall der Station *Guarena* das absolute Feuchtemaximum der Zeitreihe *1999* bis *2001* den Mittelwert $\overline{m}_{v(sat)}$ der korrespondierenden *physischen Einheit Kalkgestein* überstieg, fand für diese Station das Feuchtemaximum der Zeitreihe als Feuchtegehalt des Sättigungszeitpunktes Verwendung.

physische Einheit	Stations-name	Welke-punkt [$cm^3\ cm^{-3}$]	Feld-kapazität [$cm^3\ cm^{-3}$]	Feuchte-max. 1999-2001 [$cm^3\ cm^{-3}$]	Wasser-speicher-kapazität [$cm^3\ cm^{-3}$]	Referenz-Feuchte 29.6.99 [$cm^3\ cm^{-3}$]	Referenz-Feuchte 7.9.99 [$cm^3\ cm^{-3}$]	$\overline{m}_{v(sat)}$ (*stdev*) [$cm^3\ cm^{-3}$]
Sand-stein	TRES RAY	0,02	0,11	0,32	0,41	0,10	0,12	0,44 (0,07)
	GORRIZO	0,05	0,13	0,23	0,40	0,09	0,13	
	ATALAYA	0,04	0,10	0,24	0,54	0,13	0,14	
	ERITAS	0,10	0,17	0,34	0,48	0,21	0,34	
	ZAMARRON	0,02	0,09	0,17	0,41	0,08	0,13	
	CARRAMED	0,03	0,11	0,38	0,52	0,14	0,31	
	GRANJA G.	0,14	0,19	0,32	k.A.	0,12	0,11	
	BODEGAS	0,07	0,16	0,22	0,42	0,09	0,16	
	ARENAS	0,11	0,15	0,30	0,32	0,22	0,20	
fluvial Terrassen	TOMILLAR	0,02	0,10	0,13	0,42	0,07	0,10	0,38 (0,06)
	TORRESAN	0,01	0,07	0,22	0,33	0,10	0,12	
	COTO	0,02	0,08	0,18	0,32	0,08	0,14	
	BROZAS	0,04	0,12	0,17	0,43	0,08	0,11	
	CARRETOR	0,02	0,08	0,19	0,39	0,09	0,17	
	PERILES	0,05	0,12	0,17	0,36	0,08	0,14	
	VACAS	0,03	0,09	0,14	0,51	0,08	0,10	
	VICTORIA	0,01	0,07	0,11	0,33	0,10	0,10	
	PAREDINA	0,01	0,08	0,15	0,36	0,11	0,09	
Kalk-gestein	CONCEJO	0,09	0,18	0,27	0,56	0,09	0,16	0,54 (0,02)
	GUARENA	0,27	0,33	0,55	k.A.	0,25	0,37	
	LLANOS	0,16	0,26	0,31	0,54	0,17	0,26	
	GUARRATI	0,21	0,26	0,42	k.A.	0,21	0,19	
	CRUZ	0,13	0,21	0,27	0,52	0,10	0,10	

Tab. 10.2: Bodenhydraulische Eigenschaften der Bodenfeuchtemessstationen im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*", nebst der zu den Aufnahmezeitpunkten *1999* korrespondierenden in-situ Referenzfeuchtemessung.

Tabelle 10.3 verdeutlicht die Dominanz der *Sandfraktion* (physische Einheiten *Sandstein* und *fluviale Terrassen*) im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*", die hohe Infiltrationsraten ermöglicht und sich u.a. im geringen Feuchtegehalt bei Feldkapazität in Tabelle 10.2 äußert. Ein davon abweichendes Verhalten zeigt die *physische Einheit Kalkgestein* deren hoher Feinmaterialanteil einen deutlich höheren Wassergehalt gegen die Schwerkraft zu halten vermag und geringe Infiltrationsraten aufweist. Abbildung 5 im Anhang verdeutlicht jedoch den geringen Anteil der Einheit *Kalkgestein* an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes „*La Guarena*".

Bezüglich der in Tabelle 10.3 dargestellten Bodeneigenschaften ist anzumerken, dass die Stationen *Zamarron, Carramed (Sandstein), Vacas (fluviale Terrassen)* und *Concejo (Kalkgestein)* geringfügig von den Klassengrenzen der Sandanteil-Intervalle abweichen.

Die bodenhydraulischen und bodenphysikalischen Eigenschaften der Stationen wurden auf Basis von Labormessungen durch das Geographische Institut der Universität Salamanca für die Böden an den Messstationen bestimmt und dem Autor freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

physische Einheit	Stations-name	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	mittlerer Sandanteil [%]	Sandanteil-Intervall [%]
Sand-stein	TRES_RAY	75,11	16,35	8,54	73,56	$60 < Sa < 80\%$
	GORRIZO	79,70	10,16	10,14		
	ATALAYA	66,81	20,98	12,21		
	ERITAS	60,94	16,85	22,21		
	ZAMARRON	81,52	11,97	6,51		
	CARRAMED	86,07	5,68	8,25		
	GRANJA G.	74,36	15,00	10,64		
	BODEGAS	70,36	11,45	18,19		
	ARENAS	67,19	13,7	19,11		
fluvial Terrassen	TOMILLAR	85,10	9,64	5,26	85,68	$Sa \geq 80\%$
	TORRESAN	90,22	6,31	3,47		
	COTO	89,81	5,93	4,26		
	BROZAS	82,25	6,44	11,31		
	CARRETOR	91,16	5,71	3,13		
	PERILES	81,64	8,31	10,05		
	VACAS	78,84	13,47	7,69		
	VICTORIA	87,09	9,27	3,64		
	PAREDINA	85,05	11,26	3,69		
Kalk-gestein	CONCEJO	62,46	16,78	20,76	36,49	$Sa \leq 60\%$
	GUARENA	3,57	32,04	64,39		
	LLANOS	46,80	20,78	32,42		
	GUARRATI	19,78	44,99	35,23		
	CRUZ	49,83	24,89	25,28		

Tab. 10.3: Bodenphysikalische Eigenschaften der Messstationen im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*".

10.2. Feuchte-Index-Erfassung im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*"

Der vorliegende Abschnitt erläutert die Feuchte-Index-Erfassung im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*" auf Basis einer modifizierten Form des in Kapitel 8. erläuterten Verfahrensprinzips. So erfolgte die Beschreibung des feuchtebedingten Signalwertebereiches auf Basis des in Kapitel 4.1.3. erläuterten elektromagnetischen Rückstreumodells *Geometric Optics Model*.

10.2.1. Charakterisierung der Rauhigkeit und Isolierung verfahrenskonformer Flächen

Die einleitende Detektion eines Trockenzeitpunktes für die Erfassung des *rauhigkeitsbedingten Signals* σ^0_{dry} erfolgte auf Basis der Niederschlagsverteilung in Abbildung 6.3. Für die Rauhigkeitsbeschreibung fand die Rückstreuintensität des Aufnahmezeitpunktes *25. Juni 1999* Verwendung, da die meteorologischen Daten vor diesem Zeitpunkt eine ausgedehnte Trockenperiode von annähernd 28 Tagen signalisierten (Ausnahme: Station *Alajeos*, $NS = 0{,}7mm$, *24. Juni 1999*). Die ausgedehnte Trockenperiode im Juni *1999* wird durch die Beschreibung des

agrometeorologischen Zustandes im *MARS Bulletin Juni 1999* (vgl. JRC, 1999) bestätigt, das auf die dadurch bedingten geringen Erntebeträge in Bezug auf den Winterweizen in Spanien hinweist. Wie Abbildung 6.5 verdeutlicht, verhinderte das Fehlen einer zeitlich korrespondierenden Scatterometer-Aufnahme die Bestätigung der trockenen Oberflächenverhältnisse durch den *Feuchte-Index* M_S.

Wie Kapitel 5.2.4. und die Landnutzungsklassifikation in Abbildung 6 im Anhang verdeutlichen, dominiert im Beobachtungsgebiet *„La Guarena"* der Anbau von *Winterweizen*, dessen Ernte im Mittel Anfang *Juli* stattfindet (vgl. Lautensach, 1964). Aufgrund der im *MARS Bulletin Juni 1999* (vgl. JRC, 1999) erwähnten Trockenperiode bei hohen Temperaturen ist anzunehmen, dass ein Grossteil der beobachteten Flächen zum Zeitpunkt der Rauhigkeitscharakterisierung bereits vegetationsfrei vorlag. Im Fall von noch nicht abgeernteten Flächen ist aufgrund der sehr geringen Pflanzenwassergehalte im Abreifstadium des *Winterweizens* der Einfluss auf das Rückstreuverhalten im Betrachtungszeitraum gering. Eine direkte Beobachtung der Biomassearmut auf Basis der Tandem-Kohärenz war indes aufgrund eines fehlenden Tandem-Aufnahmezeitpunktes zum Trockenzeitpunkt *25. Juni 1999* nicht möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass etwaige Erntemaßnahmen im Zeitraum zwischen Trockenzeitpunkt und Feuchte-Index-Erfassung aufgrund einer Veränderung der Oberflächenrauhigkeit sich signifikant im Langzeit-Kohärenz-Verhalten äußerten.

Nach dem Ausschluss der verfahrensbeeinträchtigenden Landnutzungsklassen *Wald- und verbuschte Flächen*, *landwirtschaftliche Flächen des Bewässerungsfeldbaus*, *Gewässer* und *versiegelte Flächen* auf Basis der räumlich hochaufgelösten aktuellen *Landnutzungsklassifikation* in Abbildung 6 im Anhang erfolgte in einem weiteren

physische Einheit	Stations-name	Langzeit-Kohärenz $\hat{\gamma}_{long}$ 29. Juni - 2. Sept. 99	Tandem-Kohärenz $\hat{\gamma}_{tandem}$ 2. / 3. Sept. 99
Sand-stein	TRES_RAY	0,29	0,65
	GORRIZO	0,12	0,85
	ATALAYA	0,24	0,85
	ERITAS	0,14	0,83
	ZAMARRON	0,09	0,87
	CARRAMED	0,33	0,83
	GRANJA_G	0,14	0,88
	BODEGAS	0,21	0,73
	ARENAS	0,15	0,65
fluviale Terrassen	TOMILLAR	0,12	0,76
	TORRESAN	0,29	0,73
	COTO	0,30	0,77
	BROZAS	0,33	0,85
	CARRETOR	0,11	0,73
	PERILES	0,18	0,73
	VACAS	0,10	0,50
	VICTORIA	0,14	0,84
	PAREDINA	0,16	0,78
Kalk-gestein	CONCEJO	0,11	0,87
	GUARENA	0,18	0,65
	LLANOS	0,16	0,86
	GUARRATI	0,07	0,80
	CRUZ	0,13	0,84

Tab. 10.4: *Tandem-* und *Langzeit-Kohärenz-Information* der Feuchtemessstationen im Beobachtungsjahr *1999*.

Schritt die *Isolierung der biomassearmen und rauhigkeitsstabilen Flächen* auf Basis der *Langzeit-* und *Tandem-Kohärenz-Schätzung der Aufnahmezeitpunkte 2. / 3. September 1999.* Tabelle 10.4 zeigt beide Informationsquellen für die Rückstreuflächen der Messstationen im Beobachtungsjahr *1999.* Die grau hervorgehobenen Messstationen erfüllen beide *Kohärenz-Kriterien* $\hat{\gamma}_{rough}$ und $\hat{\gamma}_{veg}$ und fanden als Referenzpunkte für die Validierung des Verfahrens Verwendung. In Bezug auf die Unterschreitung des Langzeit-Kohärenz-Schwellwertes ist anzunehmen, dass die beobachtete Rauhigkeitsänderung aus der *Ernte* der Feldfrüchte sowie aus dem mitunter anschließenden Mulchverfahren resultierte.
Tabelle 10.4 verdeutlicht, dass die Station *Vacas* zusätzlich zum Auftreten einer Rauhigkeitsänderung aufgrund einer Verletzung des Biomassegrenzwertes ausgeschlossen wurde.

10.2.2. Erfassung des feuchtebedingten Signalwertebereiches mit Hilfe des *Geometric Optics Models*

Die fehlende Beobachtung des Sättigungszeitpunktes im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*" verhinderte die Erfassung des feuchtebedingten Signalwertebereiches $\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ für die Normierung des Feuchte-Index gemäß dem in Kapitel 8.4. erläuterten Verfahrensprinzip. Obwohl das Starkregenereignis des *1. September 1999* mit Niederschlagsmengen bis zu $NS \leq 71{,}5mm$ („*Alajeos*") mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer vollständigen Wassersättigung der Böden führte, bedingte die starke Infiltrationskapazität der großteils sandigen Böden eine rasche Abnahme des Feuchtegehaltes, so dass die ERS-1/2 SAR Aufnahme des folgenden Tages *(2. September 1999)* Feuchteverhältnisse deutlich unter dem Zustand der Sättigung erfasste.
Aus diesem Grund erfolgte die Erfassung des feuchtebedingten Signalwertebereiches auf Basis des in Kapitel 4.1.3. beschriebenen *elektromagnetischen Rückstreumodells Geometric Optics Model* (*GOM*). Für die Aufgabe wurde ein *theoretisches Modell* gewählt, um den Einfluss eines Fehlers des unterstützenden Modells auf die Validierungsergebnisse zu minimieren und damit in erster Näherung ausschließlich eine Aussage hinsichtlich der Güte des in der vorliegenden Studie vorgestellten Verfahrens zu ermöglichen. Gemäß der Diskussion in Kapitel 2. ist eine uneingeschränkte Übertragung auf andere Untersuchungsgebiete ausschließlich für

theoretische Modelle gegeben, da *semi-empirische* und *empirische Modelle* dabei einen deutlichen Genauigkeitsverlust aufweisen.

Da angenommen wurde, dass die beobachteten landwirtschaftlichen Flächen nach vollzogener Ernte eine vergleichsweise starke Oberflächenrauhigkeit im Vergleich zur verwendeten Wellenlänge von $\lambda = 5{,}6\,cm$ aufweisen (Spurrillen, untergepflügte Stoppeln), fand das für raue Oberflächen entwickelte *GOM* für die Erfassung des feuchtebedingten Signalwertebereiches Verwendung. So beschränken die in Kapitel 4.1.3. erläuterten Prämissen seine Anwendung in Bezug auf die Systemkonfiguration des ERS-1/2 SAR Systems auf Oberflächen, deren Rauhigkeit eine *rms-Höhe* von $s > 1{,}5cm$ und eine *Korrelationslänge* von $l > 5{,}3\,cm$ aufweisen.

In Anlehnung an Gleichung (4.13) beschreibt das *GOM* den Rückstreuquerschnitt σ^0 $[m^3m^{-3}]$ von brachliegenden Flächen als Funktion der *dielektrischen Eigenschaften* des Bodens, repräsentiert durch die *Fresnel'sche Reflektivität im Nadir* Γ_0 (Gleichung (4.3)), der *Oberflächenrauhigkeit* $S(\theta,s,l)$ und des Einfallswinkels $W(\theta)$:

$$\sigma^0 = \Gamma_0 \cdot S(\theta, s, l) \cdot W(\theta) \tag{10.1}$$

Die Prämisse des vorgestellten pixelbasierten Change-Detection-Ansatzes, dass keine Änderung der Rauhigkeitssituation zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Feuchtebeschreibung stattfindet $(S_1(\theta,s,l) = S_2(\theta,s,l))$, ermöglicht das auf Basis von Gleichung (10.1) beschriebene Rückstreuverhalten von zwei Aufnahmezeitpunkten zueinander in Beziehung zu setzen. Nach Eliminierung der gleichfalls unveränderten Funktion des Einfallswinkels $(W_1(\theta) = W_2(\theta))$ gilt somit folgende lineare Beziehung zwischen den *Rückstreusignalen* $\sigma^0{}_1$ und $\sigma^0{}_2$ in natürlichen Einheiten $[m^3m^{-3}]$ und den *Fresnel'schen Reflektivitäten im Nadir* Γ_{01} und Γ_{02} beider Aufnahmezeitpunkte:

$$\frac{\sigma^0{}_1}{\Gamma_{01}} = \frac{\sigma^0{}_2}{\Gamma_{02}} \tag{10.2}$$

Bei Kenntnis des Rückstreusignals eines Aufnahmezeitpunktes $\sigma^0{}_1$ und der beeinflussenden Bodeneigenschaften zu beiden Zeitpunkten Γ_{01} und Γ_{02} ist somit eine Aussage hinsichtlich des Rückstreuverhaltens des zweiten Zeitpunktes $\sigma^0{}_2$ möglich. In ähnlicher Form wurde dieser Ansatz bereits von Lu & Meyer (2002) erfolgreich für die Erfassung einer Bodenfeuchteänderung zwischen zwei ERS-1/2

SAR Aufnahmezeitpunkten verwendet. Da die Rückstreuintensität des Trockenzeitpunktes *25. Juni 1999* bekannt war und die dielektrischen Eigenschaften aus der Kenntnis der Bodenfeuchtesituation zu den Zeitpunkten der Trockenheit und Sättigung (Wasserspeicherkapazität) ermittelt werden konnten, ermöglichte der erläuterte Ansatz die Quantifizierung des Rückstreusignals zum Zeitpunkt der Bodensättigung. Es ist anzunehmen, dass der Sättigungszustand am *1. September 1999* erreicht wurde, so dass dieser Zeitpunkt im weiteren als virtueller Sättigungszeitpunkt Verwendung findet. Die Kenntnis des *Rückstreusignals zum Sättigungszeitpunkt* $\sigma^0{}_{1.9.99}$ ermöglichte somit die Beschreibung des *feuchtebedingten Signalwertebereiches* $\max(\Delta\sigma^0{}_{moist}) = \sigma^0{}_{1.9.99} - \sigma^0{}_{25.6.99}$ $[dB]$ je Messstation.

Die Ermittlung der *dielektrischen Eigenschaften* ε_r' und ε_r'' zu beiden Aufnahmezeitpunkten erfolgte unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung auf Basis der in Gleichung (4.5) und (4.6) aufgezeigten empirischen Zusammenhänge nach Hallikainen et al. (1985) für eine Frequenz von $f = 6GHz$, die bereits von diversen Autoren erfolgreich verwendet wurden (siehe: Dubois et al., 1995; Zibri et al., 1997; Neusch & Sties, 1999). Der im Vergleich zur Frequenz des ERS-1/2 SAR Systems erhöhte Frequenzbereich musste ersatzweise Verwendung finden, da Hallikainen et al. (1985) die Frequenz von $f = 5{,}3GHz$ nicht individuell berücksichtigten. Ein Vergleich der ermittelten dielektrischen Eigenschaften mit denen der nächstgelegenen von Hallikainen et al. (1985) berücksichtigten Frequenzstufe von $f = 4GHz$ zeigte jedoch nur geringfügig abweichende Ergebnisse. Abbildung 10.1 zeigt das Verhalten der ermittelten *dielektrischen Eigenschaften* ε_r' und ε_r'' in Abhängigkeit der volumetrischen Bodenfeuchte m_v zum Zeitpunkt der Trockenheit und der Sättigung der Messstationen. Um den Einfluss der Korngrößenverteilung zu verdeutlichen, erfolgt eine farblich differenzierte Darstellung der physischen Einheiten hinsichtlich der repräsentativen Sandgehalt-Intervalle. So beschreiben die *weißen Datenpunkte* das Verhalten von Stationen der physischen Einheit *fluviale*

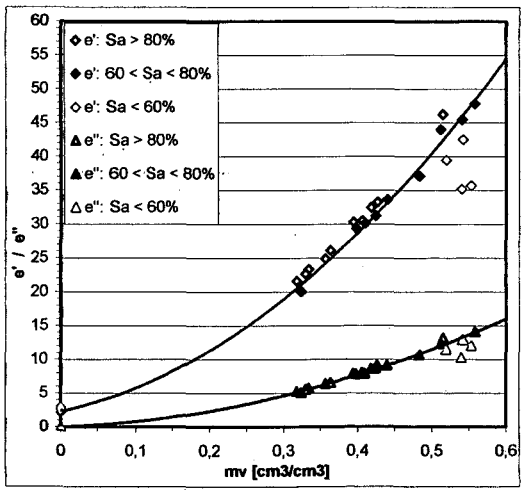

Abb. 10.1: Dielektrische Eigenschaften ε_r' und ε_r'' der Messpunkte in Abhängigkeit der volumetrischen Feuchte m_v und der Korngrößenverteilung.

Terrassen mit einem *Sandgehalt* von $Sa \geq 80\%$, die *schwarzen Datenpunkte* Stationen der Einheit *Sandstein* mit $60 \leq Sa < 80\%$ und die *roten Datenpunkte* Stationen der Einheit *Kalkgestein* mit $Sa \leq 60\%$.

Gemäß den Erkenntnissen von Hallikainen et al. (1985) zeigt sich eine Zunahme der dielektrischen Eigenschaften mit wachsender Korngröße aufgrund des sinkenden relativen Anteils an gebundenem Bodenwasser. Insbesondere die feinmaterialreiche Einheit *Kalkgestein* weist ein deutlich abweichendes Verhalten von den Einheiten *Sandstein* und *fluviale Terrassen* auf, die aufgrund einer ähnlichen Korngrößenverteilung ein vergleichbares Verhalten zeigen. Dieser Zusammenhang spiegelt sich gleichfalls im Verhalten der in Abbildung 10.2 dargestellten *Fresnel'schen Reflektivität im Nadir* Γ_0 in Abhängigkeit der *volumetrischen Feuchte* m_v wider. Beide Darstellungen verdeutlichen damit die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Korngrößenverteilung in der Beschreibung der räumlichen Feuchteverteilung mit Hilfe der Mikrowellenfernerkundung.

Tabelle 10.5 zeigt neben den gemessenen Rückstreusignalen der zu den Stationen korrespondierenden Auflösungszellen des *Beobachtungsjahres 1999* den auf Basis von Gleichung (10.2) ermittelten Rückstreuquerschnitt des Sättigungszeitpunktes *1. September 1999* $\sigma^0_{1.9.99}$ *sowie den feuchtebedingten Signalwertebereich* $\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ je Messstation. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung des *mittleren feuchtebedingten Signalwertebereiches* $\langle \max(\Delta\sigma^0) \rangle$ der *physischen Einheiten* nebst *Standardabweichung* $stdev$. Die Mittelwertbildung erfolgte über alle Messstationen ohne Berücksichtigung der Verfahrensprämissen, da diese nicht von Belang für die GOM-Modellierung sind. Die verfahrenskonformen Messstationen sind erneut grau hervorgehoben.

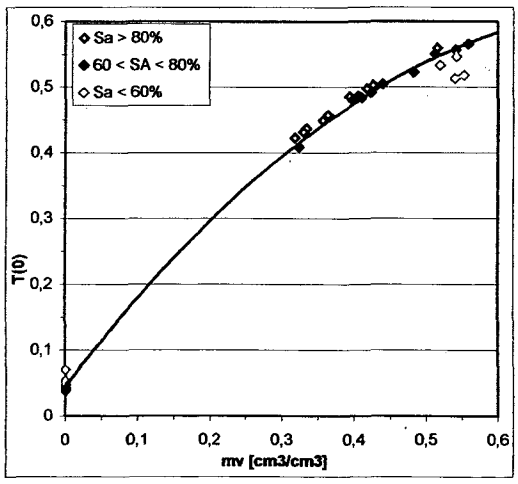

Abb. 10.2: Fresnel'sche Reflektivität Γ_0 in Abhängigkeit der volumetrischen Feuchte m_v und der Korngrößenverteilung der Messpunkte.

		Gemessener Rückstreuquerschnitt			GOM modellierter Rückstreuquerschnitt		
Phys. Einheit	**Name der Station**	$\sigma^0_{25.6.99}$ [dB]	$\sigma^0_{2.9.99}$ [dB]	$\sigma^0_{3.9.99}$ [dB]	$\sigma^0_{1.9.99}$ [dB]	$\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ [dB]	$\langle\max(\Delta\sigma^0_{moist})\rangle$ (stdev) [dB]
Sand stein	**TRES_RAY**	-11,3	-8,1	-10,2	-0,6	10,7	10,6 (0,6)
	GORRIZO	-10,7	-7,7	-7,0	-0,2	10,5	
	ATALAYA	-10,2	-7,4	-8,3	1,0	11,2	
	ERITAS	-11,2	-5,8	-8,2	-0,9	10,3	
	ZAMARRON	-13,3	-8,4	-8,8	-2,5	10,8	
	CARRAMED	-13,6	-8,7	-9,8	-2,3	11,3	
	GRANJA G.	-13,8	-10,6	-10,7	-3,0	10,8	
	BODEGAS	-11,8	-7,2	-8,0	-1,6	10,2	
	ARENAS	-9,8	-5,0	-6,2	-0,4	9,4	
fluviale Terrassen	TOMILLAR	-11,4	-8,8	-10,0	-0,4	11,0	10,7 (0,3)
	TORRESAN	-11,4	-8,3	-9,0	-0,9	10,5	
	COTO	-8,9	-3,7	-3,6	1,4	10,3	
	BROZAS	-9,7	-5,0	-6,4	0,9	10,6	
	CARRETOR	-13,1	-8,3	-9,1	-2,1	11,0	
	PERILES	-14,8	-10,6	-11,7	-4,5	10,3	
	VACAS	-11,0	-7,8	-7,4	0,3	11,3	
	VICTORIA	-11,0	-3,0	-5,0	-0,5	10,5	
	PAREDINA	-11,6	-7,6	-9,0	-0,9	10,7	
Kalk-gestein	CONCEJO	-10,6	-6,6	-6,7	0,1	10,7	9,9 (0,8)
	GUARENA	-13,7	-8,0	-8,3	-5,0	8,7	
	LLANOS	-12,4	-8,2	-9,2	-2,3	10,1	
	GUARRATI	-12,7	-6,6	-8,9	-2,9	9,8	
	CRUZ	-10,4	-6,7	-8,3	-0,1	10,3	

Tab. 10.5: Gemessener und modellierter (*GOM*) Rückstreuquerschnitt sowie *feuchtebedingter Signalwertebereich* der Messstationen $\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ und der *physischen Einheiten* $\langle\max(\Delta\sigma^0_{moist})\rangle$ im Beobachtungsjahr *1999*.

Die Tatsache, dass die Modellierung des Rückstreusignals zum Zeitpunkt der Sättigung am *1. September 1999* auf Basis des GOM z.T. positive Rückstreuquerschnitte in der Einheit Dezibel als Ergebnis liefert, deutet darauf hin, dass die betroffenen Feuchtemessstationen *Atalaya*, *Coto*, *Brozas*, *Vacas* und *Conjeco* zum Zeitpunkt der Rauhigkeitserfassung ein höheres Rückstreuverhalten aufwiesen, als das von trockenen brachliegenden Böden. Diese Annahme wird durch die hohen Rückstreuquerschnitte der Stationen zum Trockenzeitpunkt *25. Juni 1999* im Vergleich zu den übrigen Stationen unterstützt. Mögliche Ursachen für dieses Verhalten ist die Anwesenheit von Bodenfeuchte oder von einer signalverstärkendenden Vegetationsbedeckung zum Zeitpunkt der Rauhigkeitscharakterisierung. Gemäß Schmullius et al. (1993) tritt mitunter im späten Abreifstadium des *Winterweizens* ein verstärktes Rückstreuverhalten aufgrund direkter Rückstreuprozesse an den ausgereiften Ähren auf. Aufgrund der langanhaltenden Trockenheit im Zeitraum vor der Rauhigkeitscharakterisierung erscheint die letztgenannte Möglichkeit als wahrscheinlichste Ursache für das hohe Rückstreuverhalten der betroffenen Stationen zum Aufnahmezeitpunkt *25. Juni 1999*. Dieser Fehler besitzt keinen Einfluss auf die Abschätzung des feuchtebedingten Signalwertebereiches, jedoch führt er zu einer Ungenauigkeit in der anschlies-

senden Feuchtebeschreibung auf Basis des Feuchte-Index aufgrund einer Überschätzung der realen Rauhigkeitssituation.

Abbildung 10.3 zeigt das *maximale feuchtebedingte Rückstreuverhalten* $\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ der Messstationen je *physischer Einheit*. Wie Abbildung 10.3 entnommen werden kann, weisen die Stationen mit hohem Tongehalt, insbesondere die Station *Guarena* ($Cl = 64\%$, $m_v = 0{,}55 cm^3 cm^{-3}$, $\max(\Delta\sigma^0_{moist}) = 8{,}67 dB$), erneut ein deutlich abweichendes feuchtebedingtes Rückstreuverhalten im Vergleich zu Stationen mit geringem Tongehalt auf.

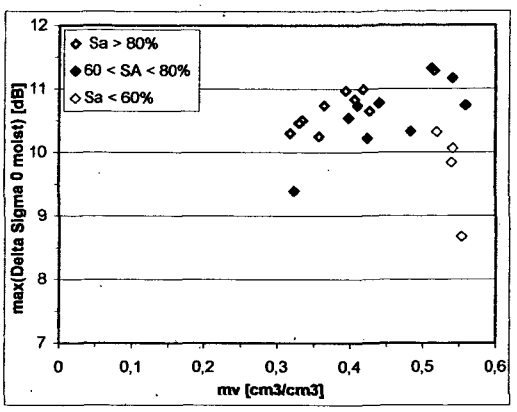

Abb. 10.3: Zusammenhang zwischen der maximalen Variation der volumetrischen Feuchte m_v und dem feuchtebedingtem Signalwertebereich $\max(\Delta\sigma^0_{moist})$ je physischer Einheit

Dies verdeutlicht gleichsam Abbildung 10.4, welche die mittlere Abnahme des feuchtebedingten Signals $\Delta\sigma^0_{moist}$ pro Tag vom Zeitpunkt der Sättigung am *1. September 1999* **(0)** bis zum *3. September 1999* **(2)** an den rauhigkeitsstabilen und biomassearmen Messstationen je *physischer Einheit* beschreibt. Während die Kurvenverläufe der *physischen Einheiten Sandstein (schwarz)* und *fluviale Terrassen (gerissen)* erneut sehr ähnliche Verläufe aufweisen, zeigt sowohl das mittlere Maximum des feuchtebedingten Signals als auch die Abnahmerate der Einheit *Kalkgestein* (rot) eine deutlich schwächere Ausprägung.

Die Tatsache, dass die Information bezüglich der Korngrößenverteilung der Böden ausschließlich für die Position der Feuchtemessstationen vorlag, verhinderte eine direkte flächenhafte Erfassung der räumlichen Verteilung des feuchtebedingten Signalwertebereiches auf Basis des *GOM*. Um trotz dieser fehlenden Information die Beschreibung der räumlichen Bodenfeuchteverteilung für das gesamte Untersuchungsgebiet zu ermöglichen, fand die Information des in Tabelle 10.5 dargestellten *mittleren feuchtebedingten Signalwertebereiches* $\langle\max(\Delta\sigma^0_{moist})\rangle$ je *physischer Einheit* für die flächenhafte Feuchte-Index-Erfassung

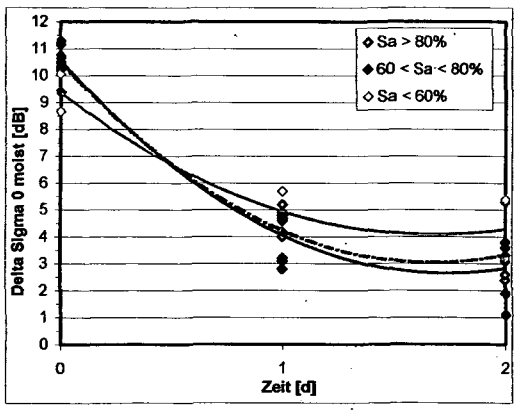

Abb. 10.4: Abnahmerate des feuchtebedingten Signalanteils je physischer Einheit vom Zeitpunkt der Sättigung am *1. September 1999* **(0)** bis zum *3. September 1999* **(2)**.

Verwendung. Die Basis für diese Vorgehensweise bildete die Tatsache, das gemäß Tabelle 10.3 die *physischen Einheiten* jeweils Gebiete mit ähnlichen Bodeneigenschaften (Korngrößenverteilung) beschreiben, weshalb die Annahme erfolgte, dass das mittlere modellierte Verhalten der zugehörigen Messstationen repräsentativ für die gesamte physische Einheit ist. Die Homogenität der Bodeneigenschaften innerhalb der physischen Einheiten *Sandstein* und *fluviale Terrassen* wird durch die geringen Standardabweichungen in Tabelle 10.3 bestätigt. Die Einheit Kalkstein ist dahingegen durch stärker von einander abweichende Bodeneigenschaften gekennzeichnet.

Für die Bestimmung des mittleren feuchtebedingten Signalwertebereiches je *physischer Einheit* fanden alle Messstationen unabhängig ihres Kohärenz-Verhaltens Verwendung, da eine zwischenzeitliche Änderung der Rauhigkeit oder die Anwesenheit oder Änderung der Vegetationsbedeckung keinen Einfluss auf das modellierte Ergebnis besitzt und die Genauigkeit des Schätzwertes mit der Anzahl der Stichproben zunimmt.

10.2.3. Ableitung des Feuchte-Index $m_{\%sat}$

Auf Basis der ermittelten feuchtebedingten Signalwertebereiche je Messstation und je *physischer Einheit* erfolgte sowohl die punktuelle als auch die flächenhafte Ableitung des Feuchte-Index $m_{\%sat}$ im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*" für die Aufnahmezeitpunkte des Beobachtungsjahres *1999*. Abbildungen 10.5 und 10.6 zeigen die räumliche Verteilung des *Feuchte-Index* $m_{\%sat}$ zu den Aufnahmezeitpunkten *2.* und *3. September 1999*. Deutlich spiegeln die Feuchte-Index-Karten den Abtrocknungsprozess aufgrund von Infiltration und Evapotranspiration im Anschluss an das Starkregenereignis des *1. September 1999* wider.

Ein Vergleich der räumlichen Feuchte-Index-Verteilung zu den Aufnahmezeitpunkten *2. und 3. September 1999* mit einer Darstellung der lokalen Hangneigung des Gebietes ließ kein topographiebeeinflusstes Feuchteverhalten erkennen. Auch diesbezüglich durchgeführte Regressions- und Korrelationsanalysen zeigten keinen Zusammenhang zwischen der Feuchte-Index-Ausprägung und der Hangneigung.

Die Ursache für den fehlenden Topographieeinfluss wird in der in Abschnitt 10.3.2. aufgezeigten Tatsache vermutet, dass zu den Aufnahmezeitpunkten *2.* und

3. September 1999 näherungsweise der Zustand der Feldkapazität herrschte, wodurch der Einfluss der Schwerkraft auf die Bewegung des Bodenwassers entfällt. Zudem weist das Untersuchungsgebiet zum Großteil sehr geringe Hangneigungen auf (siehe: Kapitel 7.1.1.).

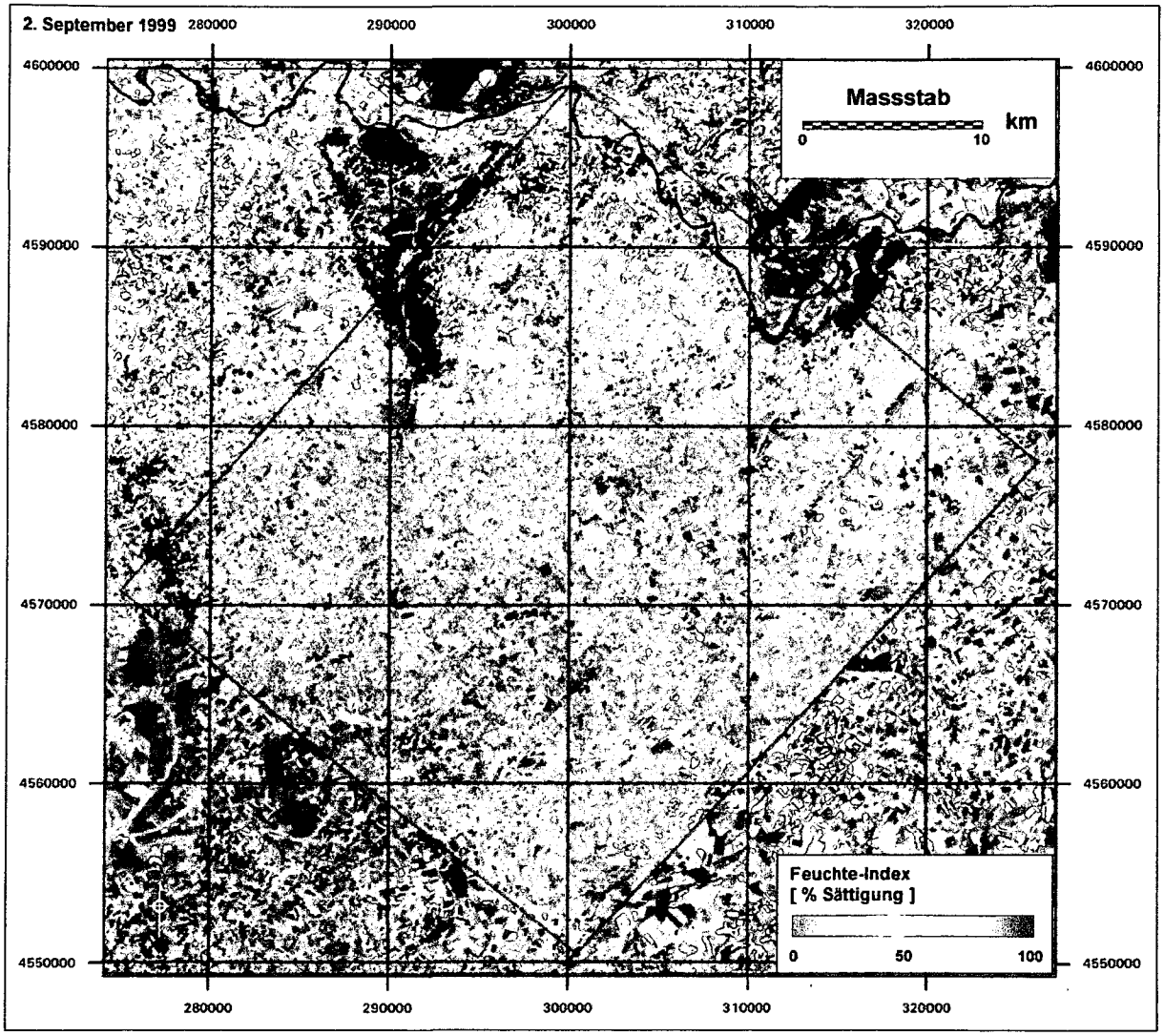

Abb. 10.5: Feuchte-Index Verteilung am *2. September 1999* im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*". Hintergrund: Landsat TM 7; Panchromatischer Kanal, Aufnahmezeitpunkt: *10. Juni 2000*

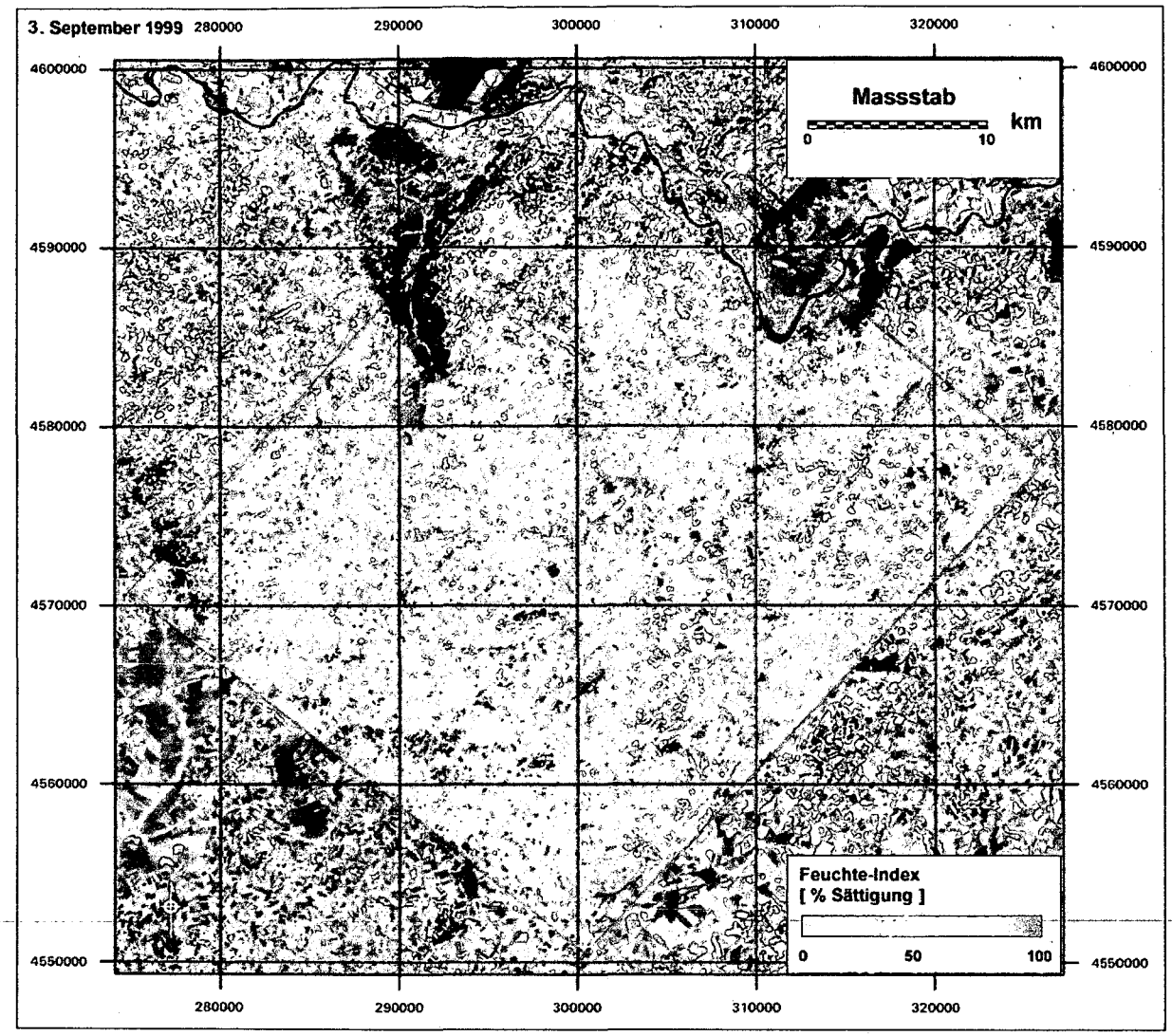

Abb. 10.6: Feuchte-Index Verteilung am *3. September 1999* im Untersuchungsgebiet „*La Guarena*". Hintergrund: Landsat TM 7; Panchromatischer Kanal, Aufnahmezeitpunkt: *10. Juni 2000*.

10.3. Validierung des Verfahrens

Der folgende Abschnitt beschreibt die *Validierung des vorgestellten Verfahrens* auf Basis eines Datenvergleiches zwischen fernerkundlich erfasstem *Feuchte-Index* $m_{\%sat}$ und den in-situ Messungen im Beobachtungsjahr *1999*. Im Zuge der Validierung fand eine getrennte Betrachtung der Genauigkeit des Verfahrens in Bezug auf die *räumliche* und *zeitliche Erfassung* der Bodenfeuchte statt:

So erfolgte zum Einen eine quantitative Ermittlung der Genauigkeit des Verfahrens in der Erfassung der *räumlichen Feuchteverteilung* je Aufnahmezeitpunkt auf Basis von Regressions- und Korrelationsanalysen.

Zum Anderen wurde die Genauigkeit des Verfahrens in der Erfassung der *zeitlichen Feuchtevariation* auf Basis der individuellen Messstationen abgeschätzt. Dabei verhinderte die Tatsache, dass aufgrund der geringen Messfrequenz ausschließlich ein korrespondierender in-situ Messzeitpunkt (*7. September 1999*) für den Datenvergleich mit dem Feuchte-Index-Verhalten von zwei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (*2. / 3. September 1999*) zur Verfügung stand, eine quantitative Erfassung der Genauigkeit des Verfahrens in der Beschreibung der zeitlichen Feuchtevariation. Aufgrund dieser Limitierung erfolgt ausschließlich eine qualitative Beurteilung der Güte auf Basis des beobachteten und zu erwartenden zeitlichen Feuchte-Index-Verhaltens, weshalb die Aussagekraft der Validierung in Bezug auf die zeitliche Komponente stark eingeschränkt ist.

Da die flächenhafte Feuchte-Index-Erfassung über das gesamte Untersuchungsgebiet nicht auf Basis individueller Signalwertebereiche je Auflösungszelle erfolgen konnte und mit Hilfe der mittleren Signalwertebereiche der übergeordneten physischen Einheiten realisiert wurde, fand eine differenzierte Betrachtung bezüglich der resultierenden Verhaltensweisen des Feuchte-Index in der Validierung statt. Dies ermöglicht neben der Beschreibung der Güte des Verfahrens eine Aussage hinsichtlich der Genauigkeit der Feuchtebeschreibung in den Bodenfeuchtekarten.

Der Datenvergleich erfolgte auf Basis der Rückstreuinformation der jeweils zu den Messstationen korrespondierenden Auflösungszellen. Der Einfluss des Speckles auf die Feuchteerfassung wurde aufgrund der Multi-Look-Bildung und einer starken Filterung als gering erachtet. Dadurch bedingte mögliche Einbussen hinsichtlich der Repräsentativität der gefilterten Rückstreuquerschnitte in Bezug auf die tatsächliche Feuchtesituation wurden in Kauf genommen, da der Fehler aufgrund der Filterung im Vergleich zum Einfluss des Speckle-Verhaltens als gering erachtet wurde. So ist anzunehmen, dass die mittlere Feuchtesituation der im verwendeten Filterfenster der Größe 5 x 5 Pixel erfassten benachbarten Auflösungszellen mit identischen Boden- und Topographieeigenschaften nur geringfügig variieren, während durch das Speckle-Verhalten stark unterschiedliche Messwerte verursacht werden können.

Um eine gemeinsame Basis für den Datenvergleich zu gewährleisten, fand auf Basis der in Tabelle 10.2 dargestellten *Wasserspeicherkapazität* der Böden eine Transformation des *Feuchte-Index* $m_{\%sat}[\%Sättigung]$ in die Messgröße *volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3cm^{-3}]$ statt.

10.3.1. Genauigkeit in der Beschreibung der zeitlichen Feuchtevariation

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt ein Vergleich des *zeitlichen Feuchte-Index-Verhaltens* mit den korrespondierenden *in-situ Messreihen* auf Basis der individuellen Messstationen. Aufgrund der eingangs erwähnten limitierten Validierungsgrundlage beschränkt sich die Erfassung der Güte der zeitlichen Feuchtebeschreibung auf eine qualitative Beurteilung des beobachteten Verhaltens.

Abbildungen 10.7 und 10.8 zeigen das zeitliche Feuchte-Index-Verhalten auf Basis der individuellen feuchtebedingten Signalwertebereiche der Messstationen *(rot)* und des mittleren feuchtebedingten Signalwertebereiches je physischer Einheit *(blau)* im Vergleich zur korrespondierenden in-situ Messreihe *(schwarz)* der biomassearmen und rauhigkeitsstabilen Messstation. Um den Einfluss einer zwischenzeitlichen Rauhigkeitsänderung und / oder der Anwesenheit signalbeeinflussender Vegetation zu untersuchen, zeigen Abbildungen 10.9 und 10.10 das zeitliche Verhalten der aus dem Verfahren ausgeschlossenen *Stationen.* Obwohl die Datengrundlage des Beobachtungsjahres *2000* aus der Validierung ausgeschlossen wurde, ist das Feuchte-Index-Verhalten in den Darstellungen mit abgebildet, um die Ursache des Kohärenzverlustes in diesem Zeitraum zu erörtern. Des weiteren erfolgt ergänzend zu den relevanten Vergleichsmesszeitpunkten *2. / 7. September 1999* und *3. / 7. September 1999* eine Darstellung des Feuchtegehaltes zum Zeitpunkt der Trockenheit am *25. / 29. Juni 1999* und der Sättigung am *1. September 1999.*

Wie der Vergleich der *Feuchte-Index-Zeitreihen* mit den korrespondierenden in-situ Messreihen zeigt, weisen die Feuchte-Index-Verläufe auf Basis der individuellen feuchtebedingten Signalwertbereiche der Messstationen und des mittleren Wertebereiches je physischer Einheit ein sehr ähnliches Verhalten auf. Eine Ausnahme bildet dabei die Station *Guarena*, deren differierende Feuchte-Index-Verläufe aus der stark vom Mittel der übergeordneten *physischen Einheit Kalkgestein* abweichenden Korngrößenverteilung (hoher Tonanteil) resultieren.

Die im Abschnitt 10.2.2. angesprochene Überschätzung der realen Rauhigkeitssituation zum Trockenzeitpunkt *25. Juni 1999* an den Stationen *Atalaya*, *Coto*, *Brozas*, *Vacas* und *Concejo* zeigt wider Erwarten keine Unterschätzung der tatsächlichen Feuchtesituation. Dies verdeutlicht, dass die beobachtete Beeinträchtigung der Rauhigkeitscharakterisierung zu gering war, um einen signifikanten Einfluss auf die Feuchtebeschreibung zu besitzen.

Biomassearme und rauhigkeitsstabile Flächen

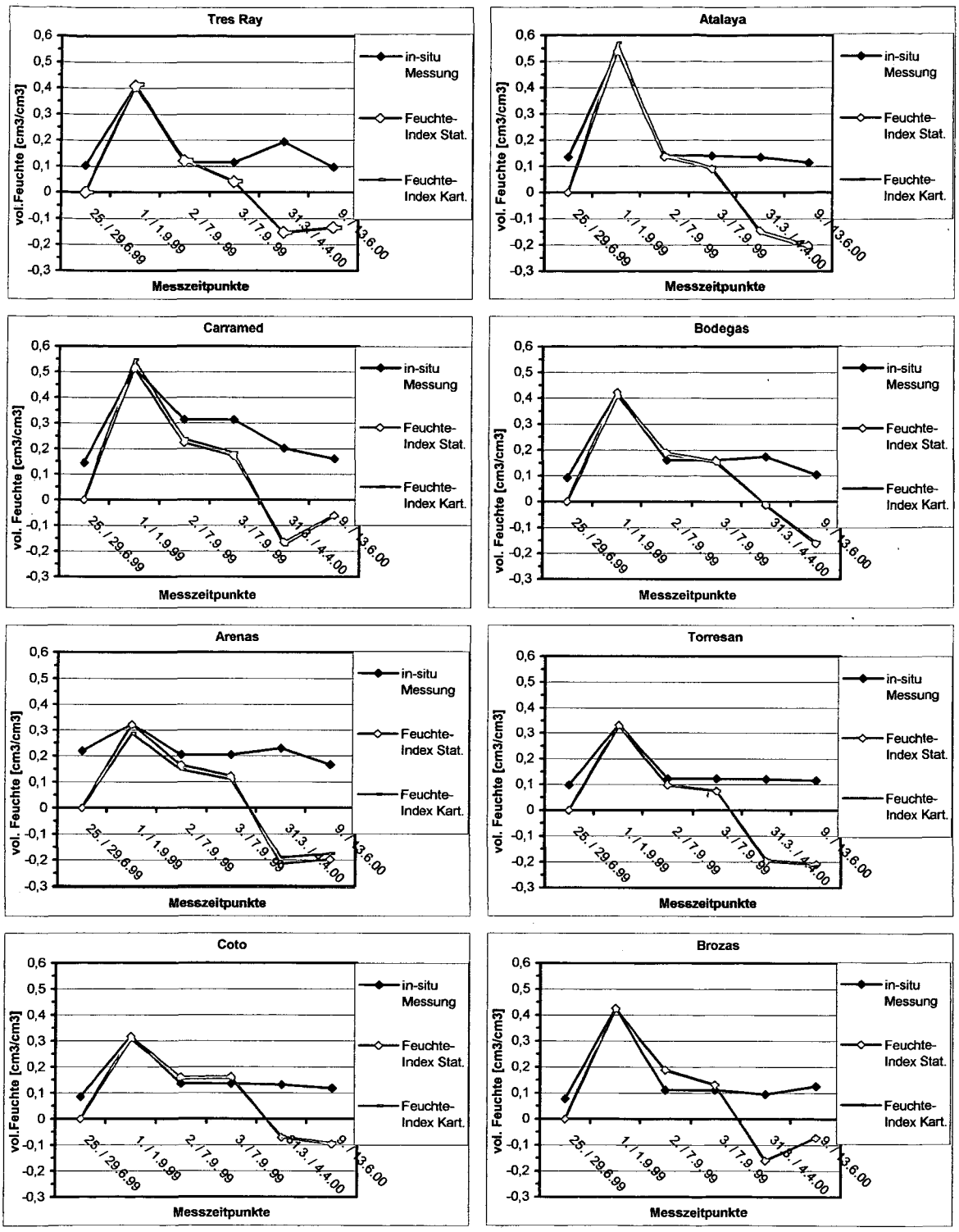

Abb. 10.7: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe im System volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3cm^{-3}]$ *an rauhigkeitsstabilen, biomassearmen Stationen.*

Schwarz: *in-situ Messreihe;* **Rot**: *Feuchte-Index auf Stationsbasis;* **Blau**: *Feuchte-Index in der Karte*

Biomassearme und rauhigkeitsstabile Flächen

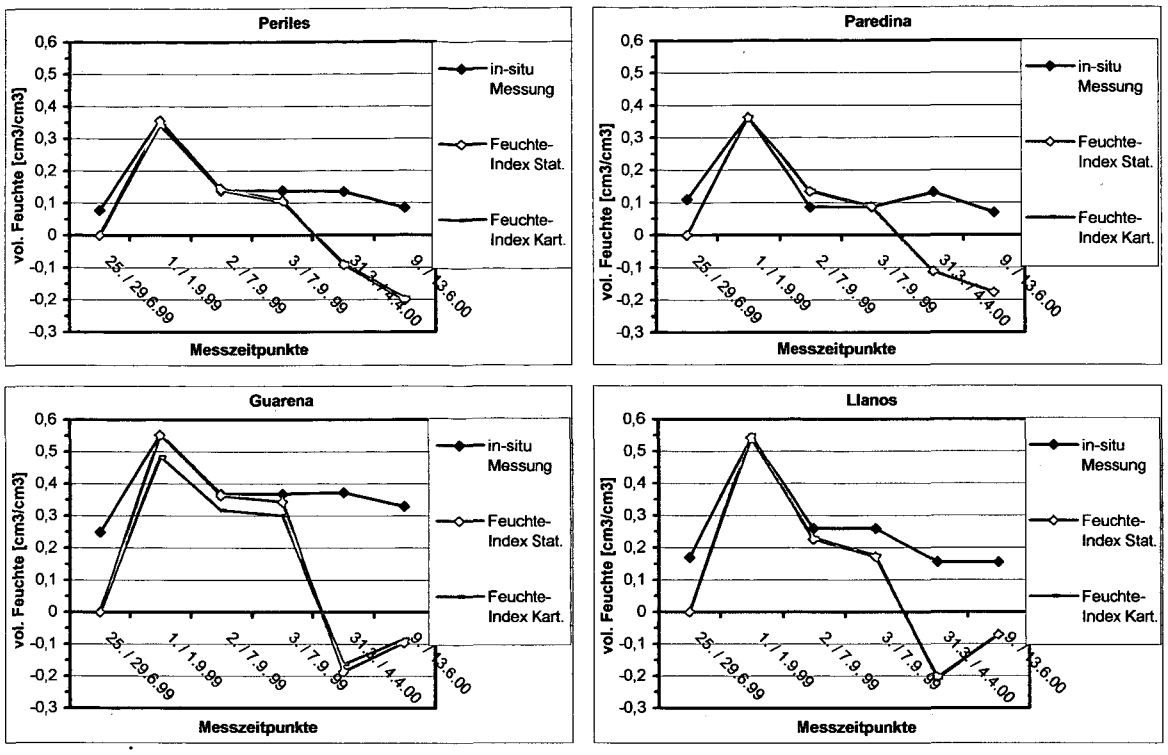

Abb. 10.8: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe im System volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3 cm^{-3}]$ *an rauhigkeitsstabilen, biomassearmen Stationen.*

Schwarz: *in-situ Messreihe;* **Rot**: *Feuchte-Index auf Stationsbasis;* **Blau**: *Feuchte-Index in der Karte*

Biomassereiche und / oder rauhigkeitsveränderte Flächen

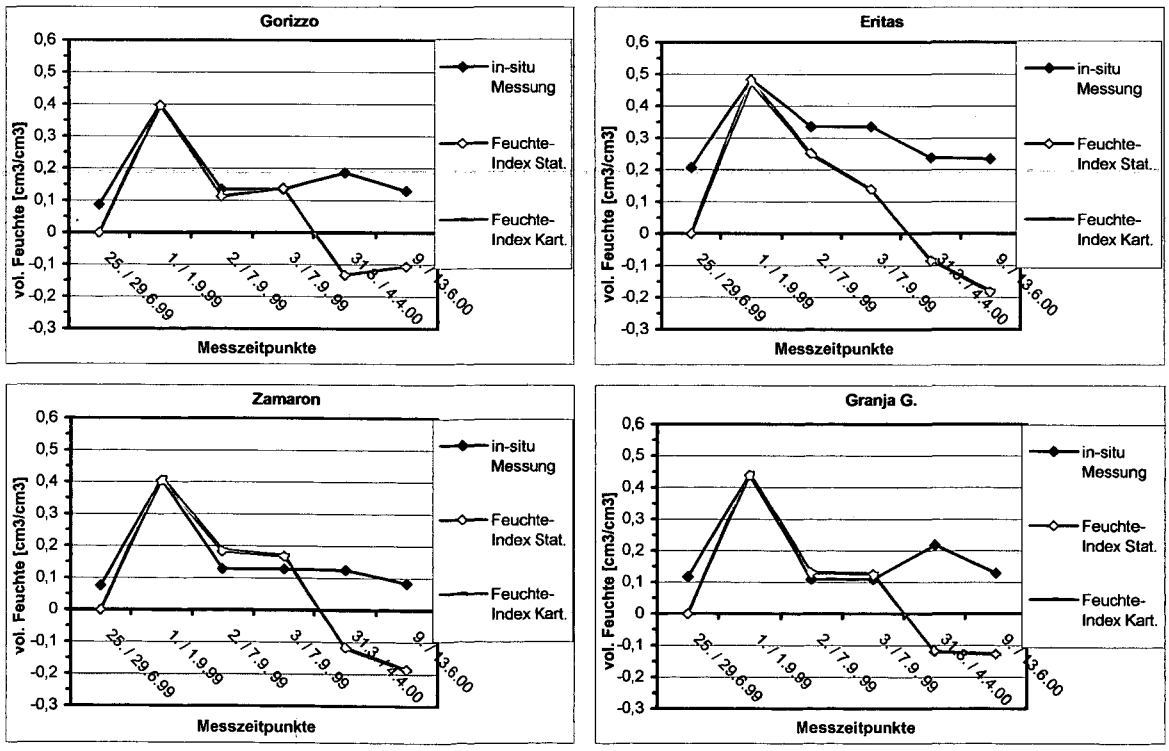

Abb. 10.9: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe im System volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3 cm^{-3}]$ an *Stationen mit veränderter Rauhigkeit und / oder Biomassereichtum.*

Schwarz: *in-situ Messreihe;* **Rot**: *Feuchte-Index auf Stationsbasis;* **Blau**: *Feuchte-Index in der Karte*

Biomassereiche und / oder rauhigkeitsveränderte Flächen

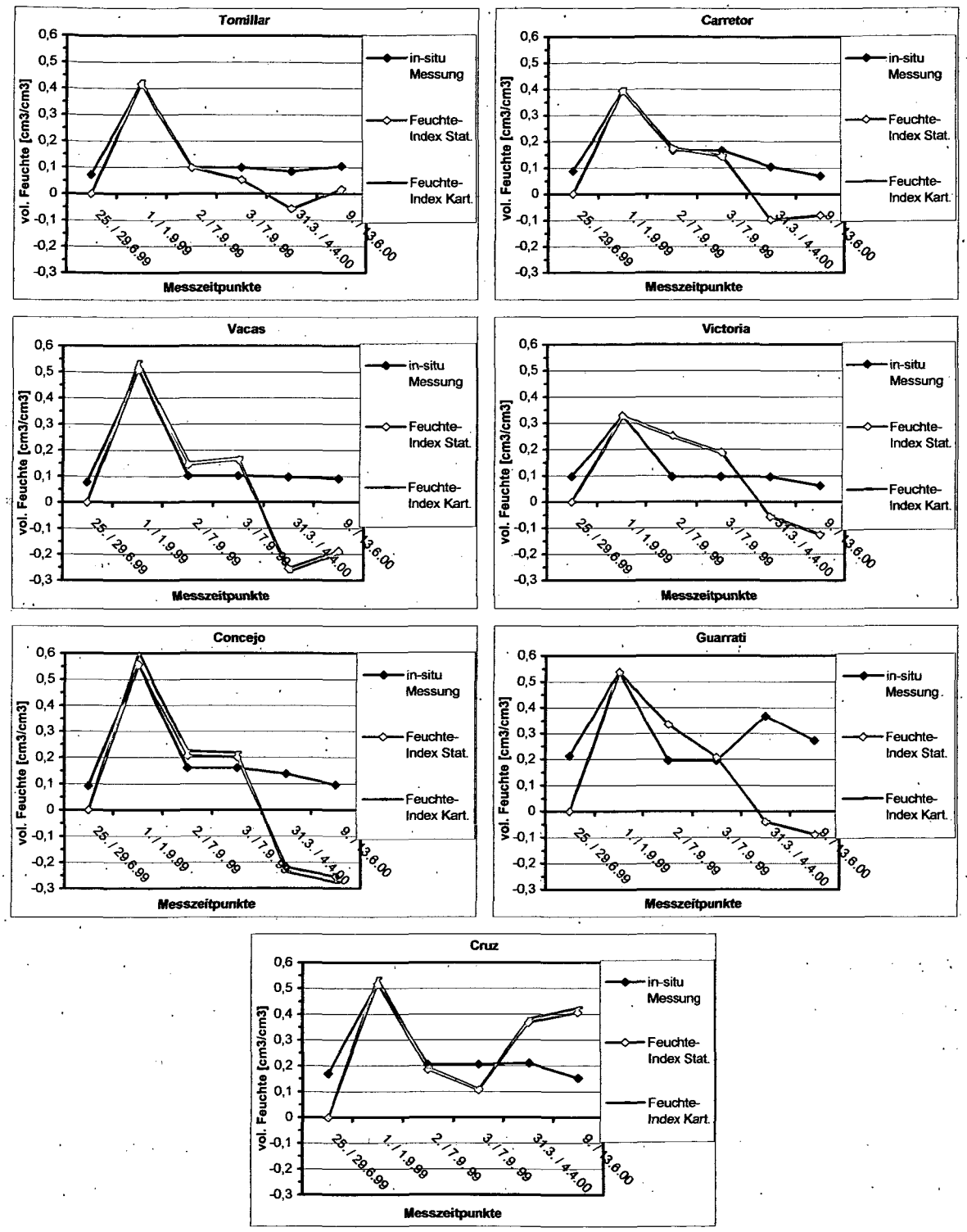

Abb. 10.10: Vergleich zwischen *zeitlicher Feuchte-Index-Variation* und *in-situ Messreihe im System volumetrische Bodenfeuchte* $m_v[cm^3cm^{-3}]$ an *Stationen mit veränderter Rauhigkeit und / oder Biomassereichtum.*
Schwarz: *in-situ Messreihe;* **Rot**: *Feuchte-Index auf Stationsbasis;* **Blau**: *Feuchte-Index in der Karte*

Insgesamt zeigt sich, dass an einem Großteil der rauhigkeitsstabilen und vegetationsfreien bzw. biomassearmen Messstationen der Feuchte-Index-Verlauf die realen Feuchteverhältnisse des in-situ Referenzmesszeitpunktes *7. September 1999*

mit hoher Genauigkeit widerspiegelt. Dabei beschreibt häufig insbesondere der Aufnahmezeitpunkt *2. September 1999* die Feuchtesituation des in-situ Messzeitpunktes, während der *3. September 1999* oftmals bereits geringere Feuchteverhältnisse signalisiert. Als Ursache für dieses Verhalten ist die unterschiedliche Mächtigkeit der Messhorizonte und die damit variierende Pufferkapazität hinsichtlich des atmosphärischen Einflusses anzunehmen. Die Diskrepanz ermöglichte, dass trotz eines Zeitintervalls von fünf Tagen eine vergleichbare Feuchtesituation in der $z \approx 2cm$ mächtigen fernerkundungsrelevanten Oberflächenschicht und dem $z = 25cm$ mächtigen in-situ Messhorizont herrschte. Unterstützt wurde das Verhalten durch die im folgenden Abschnitt veranschaulichte Tatsache, dass am *2. September 1999* bereits näherungsweise der Zustand der Feldkapazität erreicht war, der, unterstützt durch die Mächtigkeit des Horizontes, annähernd konstante Feuchteverhältnisse im in-situ Messhorizont über mehrere Tage ermöglichte. Ursache für die geringen Feuchteverluste bei Feldkapazität ist die Fähigkeit des Bodens, ab diesem Zustand das Bodenwasser in den Poren gegen die Schwerkraft zu halten, wodurch eine weitere Abnahme der Bodenfeuchte in erster Linie durch den Einfluss der Evapotranspiration stattfindet. Darüber hinaus traten am *5. September 1999* in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes (meteorologische Stationen: *Castronuno*, *Fuentesauco*, *La Boveda de Toro*) zusätzliche Niederschläge auf, die entstandene Feuchteverluste zum Teil kompensierten. Da die Bodenfeuchtemessstationen, deren korrespondierende meteorologische Stationen das Fehlen weiterer Niederschläge signalisieren, kein signifikant abweichendes Verhalten zeigen, ist dieser Effekt jedoch als gering einzustufen. Somit unterstützte in erster Linie die unterschiedliche Mächtigkeit der Messhorizonte die Validierung des Verfahrens.

Die starke Pufferkapazität des in-situ Messhorizontes zeigt sich gleichfalls in der stark erhöhten Feuchtesituation zum Trockenzeitpunkt *29. Juni 1999*. Trotz des Fehlens nennenswerter Niederschläge über einen Zeitraum von 28 Tagen vor der Messung überstieg die Bodenfeuchte des in-situ Messhorizontes in der Regel deutlich den Welkepunkt der Böden. Die zeitgleiche Trockenheit der fernerkundungsrelevanten Oberflächenschicht ist dahingegen aufgrund der langanhaltenden Trockenheit mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit gegeben.

Auffällig erweist sich die Tatsache, dass die detektierte Rauhigkeitsänderung des Beobachtungsjahres *1999* an einem Teil der ausgeschlossenen Stationen keinen signifikanten Einfluss auf die Feuchtebeschreibung besaß. Eine möglich Ursache für dieses Verhalten ist, dass die Stationen trotz einer Stabilität der Rauhigkeit den Kohärenz-Schwellwert unterschritten und damit fälschlicherweise aus dem Verfahren ausgeschlossen wurden. Wie die Kohärenz-Analyse in Kapitel 9.2. zeigt, besteht ein unscharfer Übergang zwischen rauhigkeitsstabilen und –veränderten Rückstreuflächen, der eine Fehlzuweisung ermöglicht. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass tatsächlich eine Änderung der Streugeometrie stattfand, deren Einfluss auf das Rückstreuverhalten jedoch im Vergleich zum Einfluss der Feuchtevariation zu gering war, um signifikant in Erscheinung zu treten. Mögliche Ursachen dafür sind die Ernte des Winterweizens oder eine Veränderung der Oberflächenrauhigkeit aufgrund des erosiven Einflusses des Starkregenereignisses am *1. September 1999*.

Im Gegensatz dazu zeigen die Stationen *Eritas*, *Zamarron*, *Vacas*, *Victoria* und *Concejo* ein stark abweichendes Verhalten des Feuchte-Index vom in-situ Messwert. Dies weist darauf hin, dass, obwohl eine eingeschränkte Beschreibung der Feuchteverhältnisse auch ohne die Beachtung der Rauhigkeitsverhältnisse über weite Teile des Jahres möglich ist, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Feuchtebeschreibung durch die Gewährleistung der Prämissen des Verfahrens erhöht wird.

Die detektierte Anwesenheit von Vegetation an der Messstation *Vacas* zeigt keinen signifikanten Einfluss auf das Verhalten des Feuchte-Index. So weist die Station *Vacas* ($\hat{\gamma}_{tandem} = 0{,}50$) zwar eine deutliche Überschätzung der realen Feuchte-Verhältnisse auf, jedoch weicht das Verhalten damit nicht vom Feuchte-Index-Verlauf anderer rauhigkeitsveränderter Messstationen ab, so dass die Ursache für die überschätzten Feuchteverhältnisse nicht isoliert werden konnte.

Demgegenüber zeigt der Feuchte-Index-Verlauf der Messstation *Caramed* eine starke Unterschätzung der Feuchteverhältnisse, obwohl das Kohärenz-Verhalten Rauhigkeitsstabilität und Vegetationsfreiheit signalisiert. Aufgrund der hohen Langzeit-Kohärenz von $\hat{\gamma}_{long} = 0{,}33$ ist dieses Verhalten nicht mit der Unschärfe des Langzeit-Kohärenz-Schwellwertes zu begründen. Die Ursache für das stark abweichende Verhalten konnte nicht ermittelt werden.

Um die Ursache für den Kohärenz-Verlust und den dadurch bedingten Ausschluss aus der Validierung zu erörtern, findet eine Betrachtung des Feuchte-Index-Verhaltens des Beobachtungsjahres *2000* statt. Auffällig erweist sich die massive Unterschätzung der Feuchteverhältnisse an allen Messstationen, mit Ausnahme der Station *Cruz*. Dabei übersteigt das *rauhigkeitsbedingte Signal* σ^0_{dry} des Trockenzeitpunktes *25. Juni 1999* mit einer mittleren Signaldifferenz von $\Delta\bar{\sigma}^0 = 3{,}2dB$ bei Nichtbeachtung der Station *Cruz* deutlich die Rückstreuintensität der Aufnahmezeitpunkte des Jahres *2000*, woraus ein negativer Feuchte-Index-Wert resultiert. Eine mögliche Ursache für die geringe Rückstreuintensität zum Aufnahmezeitpunkt *31. März 2000* trotz oftmals stark erhöhter Bodenfeuchteverhältnisse ist, dass die im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* dominierende Feldfrucht *Winterweizen* (siehe: Kapitel 5.2.4. und Abbildung 6 im Anhang) eine Abschwächung des Rückstreusignals verursachte. Wie in Kapitel 9.1. erläutert wurde, tritt dieser Einfluss insbesondere im Zeitraum Frühjahr bis Frühsommer aufgrund der spezifischen Architektur des *Winterweizens*, des hohen Biomasseaufkommens und Pflanzenwassergehaltes stark im Verhalten der C_{VV}-Rückstreuintensität ($\theta = 23°$) in Erscheinung. Dies verdeutlicht u.a. die Studie von Hamacher (2000), die den Einfluss des Winterweizens auf die C_{VV}-Rückstreuintensität ($\theta = 23°$) während seines Wachstumszyklusses auf Testfeldern in Deutschland untersuchte. Als Ergebnis zeigte sich, dass bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens Anfang Juni eine kontinuierliche Abnahme des Rückstreusignals stattfindet, während ab diesem Zeitpunkt die Rückstreuintensität aufgrund sinkender Pflanzenwassergehalte und einer sich damit ändernden Architektur bis zum Erntezeitpunkt im August wieder ansteigt. Da das Auftreten der artenspezifischen Phänologiestadien in der klimatisch begünstigten *Nordmeseta* in Abhängigkeit der Witterungsverhältnisse bereits ein bis zwei Monate früher im Jahresverlauf eintritt (vgl. Lautensach, 1964), erklärt dies die Tatsache, dass zum Aufnahmezeitpunkt *9. Juni 2000* an einem Großteil der Messstationen ein höherer Feuchte-Index gemessen wurde, trotz der Tatsache, dass an diesem Zeitpunkt in der Regel eine deutlich geringere reale Feuchtesituation als am *31. März 2000* herrschte.

Die Veränderung der Oberflächeneigenschaften aufgrund des Vegetationswachstums bei gleichzeitig großen effektiven Basislinien ist somit eine wahrscheinliche Ursache für den vollständigen Verlust der Langzeit-Kohärenz im Beobachtungsjahr *2000*.

Im Gegensatz zum *31. März 2000* erklärt der Vegetationseinfluss jedoch nicht das geringe Rückstreuverhalten des Aufnahmezeitpunktes *9. Juni 2000*. Wie der in Tabelle 10.6 abgebildete *NDVI* auf Basis der Landsat 7 ETM+ Daten des Aufnahmezeitpunktes *10. Juni 2000* verdeutlicht, befand sich der Winterweizen bereits Anfang Juni in einem fortgeschrittenen Stadium der Abreife. So spiegelt sich der geringe Pflanzenwassergehalt, der ein Einrollen der Blätter und damit ein Dominieren des Bodeneinflusses bedingt (vgl. Ulaby & Bush, 1976) in den geringen NDVI Werten wider. Das frühe Einsetzen des Abreifstadiums im Beobachtungsjahr *2000* wird durch das *MARS Bulletin Juni 2000* (vgl. JRC, 2000) bestätigt, das als Ursache außergewöhnlich hohe Temperaturen im Frühsommer nennt.

Name der Station	NDVI
TRES_RAY	0,14
GORRIZO	0,09
ATALAYA	-0,28
ERITAS	0,01
ZAMARRON	0,50
CARRAMED	0,20
GRANJA G.	0,25
BODEGAS	0,13
ARENAS	-0,10
TOMILLAR	-0,22
TORRESAN	-0,06
COTO	-0,09
BROZAS	-0,25
CARRETOR	-0,05
PERILES	0,05
VACAS	0,10
VICTORIA	-0,09
PAREDINA	-0,22
CONCEJO	-0,07
GUARENA	0,14
LLANOS	-0,03
GUARRATI	0,18
CRUZ	0,19

Tab. 10.6: NDVI der Messstationen auf Basis der Landsat 7 ETM+ Szene des Aufnahmezeitpunktes *10. Juni 2000*.

Da der Einfluss der Vegetation landwirtschaftlicher Nutzflächen auf das Rückstreusignal somit gemäß der Diskussion in Kapitel 9.1. als gering einzustufen ist, kann das beobachtete Verhalten nur durch eine zusätzliche Verminderung der Oberflächenrauhigkeit zwischen dem Zeitpunkt der Rauhigkeitscharakterisierung am *25. Juni 1999* und der Feuchte-Index-Erfassung im Beobachtungsjahr *2000* erklärt werden. Eine mögliche Ursache dafür ist die Tatsache, dass der Trockenzeitpunkt im Anschluss an die Weizenernte aufgrund von Spurrillen (Erntemaschinen) oder dem oftmals praktizierten Unterpflügen der verbliebenen Stoppeln im Mulchverfahren eine starke Oberflächenrauhigkeit aufwies. Demgegenüber hinterlässt das maschinelle Einbringen der Saat im Frühjahr eine vergleichsweise glatte Fläche mit seichten Rillen, welche die Signaldifferenz zwischen den Beobachtungsjahren *1999* und *2000* erklärt. Die Tatsache, dass trotz der Trockenheit der Vegetation ein Teil der Messstationen zum Aufnahmezeitpunkt *9. Juni 2000* ein geringeres Rückstreuverhalten als zum Aufnahmezeitpunkt *31. März 2000* mit vitaler Vegetationsbedeckung aufweist, ist zum einen mit der deutlich erhöhten Feuchtesituation Ende März zu begründen, deutet jedoch gleichzeitig auf die Dominanz des Einflusses der Rauhigkeitsänderung an diesen Stationen hin.

Eine Ausnahme bildet das Feuchte-Index-Verhalten der Station *Cruz*, die als einzigste Messstation hohe Bodenfeuchteverhältnisse im Beobachtungsjahr *2000* signalisiert. Ursache für dieses Verhalten ist möglicherweise die Anwesenheit einer Vegetationsbedeckung mit großflächigen wasserreichen Blättern und großen Stengeldurchmessern, wie z.B. *Mais* oder *Sonnenblume*, die gemäß der Diskussion in Kapitel 9.1. eine Verstärkung des Rückstreuverhaltens bedingt. Darüber hinaus weist die Landnutzungskarte in Abbildung 6 im Anhang darauf hin, dass sich die Station *Cruz* am Rande einer bewässerungswirtschaftlich genutzten Fläche befindet, wodurch möglicherweise ein Teil der Auflösungszelle (Mischpixel) durch die künstlich erhöhte Bodenfeuchte dieser Fläche beeinflusst ist.

Während ein Teil der Messstationen (*Atalaya, Bodegas, Torresan, Coto, Periles, Paredina, Zamaron, Victoria, Concejo, Guarrati)* trotz des Vegetationseinflusses einen Zusammenhang zwischen Bodenfeuchtevariation und Feuchte-Index-Verhalten im Jahr *2000* erahnen lässt, ist der Feuchteinfluss auf das Rückstreuverhalten bei einem ähnlich großen Anteil der Stationen maskiert. Insgesamt bestätigt das beobachtete Verhalten die in Kapitel 8.1. geäußerte Annahme, dass im Zeitraum Frühjahr bis Frühsommer die Aussagekraft der Bodenfeuchtebeschreibung auf Basis der C_{VV}-Rückstreuintensität bei einem Einfallswinkel von $\theta = 23°$ aufgrund einer geringen Dichte an geeigneten biomassearmen und rauhigkeitsstabilen Flächen mitunter stark beeinträchtigt wird. Von dieser Einschränkung sind insbesondere ackerbaulich intensiv genutzte Regionen betroffen.

10.3.2. Genauigkeit in der Beschreibung der räumlichen Feuchteverteilung

Die Beschreibung der *Genauigkeit* des *Verfahrens* in der Erfassung der *räumlichen Feuchteverteilung* erfolgt auf Basis von Regressions- und Korrelationsanalysen zwischen der Feuchte-Index-Verteilung und den in-situ Messungen der Messstationen je Aufnahmezeitpunkt. Erneut fand dabei eine getrennte Betrachtung der Genauigkeit der Feuchtebeschreibung auf Basis der individuellen Signalwertebereiche der Messstationen und der mittleren Signalwertebereiche der übergeordneten physischen Einheiten statt.

Ergänzend zur Analyse der *biomassearmen und rauhigkeitsstabilen Stationen* (*schwarze Datenpunkte und Regressionsgerade*) erfolgt die Betrachtung des

Zusammenhanges bei *Nichtbeachtung der Prämissen* (*weiße und schwarze Datenpunkte, gerissene Regressionsgerade*), um die Notwendigkeit der Erfüllung der Verfahrensprämissen zu demonstrieren.

Abbildung 10.11 beschreibt den *Zusammenhang* zwischen *Feuchte-Index* $m_{\%sat}$ und in-situ Messung auf Basis der individuellen Signalwertebereiche der Messstationen zu den Vergleichsmesszeitpunkten *2. / 7. September 1999* und *3. / 7. September* 1999 im System volumetrische Bodenfeuchte $m_v[cm^3cm^{-3}]$.

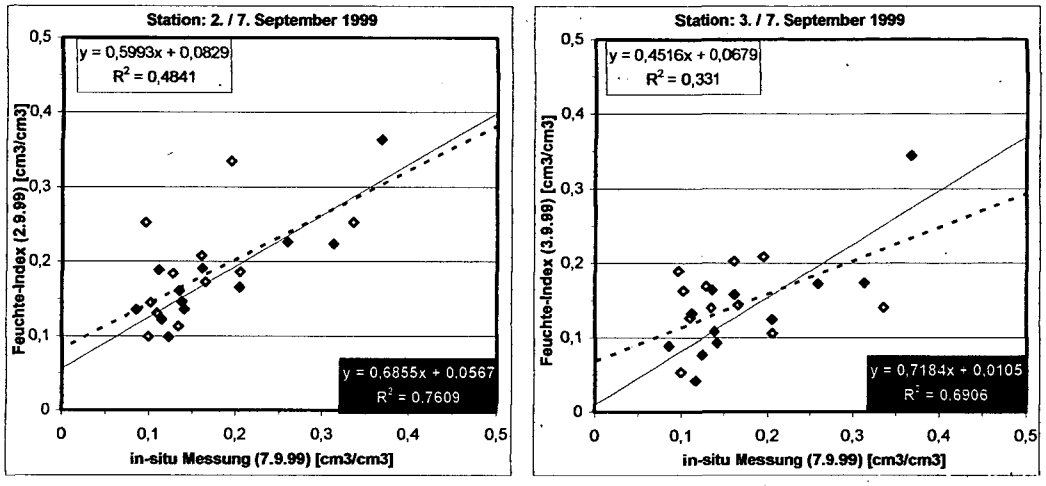

Abb. 10.11: Zusammenhang zwischen *Feuchte-Index* und *in-situ Messung am 2. / 7. September 1999* und *3. / 7. September 1999* auf Basis der individuellen Signalwertebereiche der Messstationen. **schwarze Datenpunkte und Regressionsgerade**: rauhigkeitsstabile, biomassearme Flächen; **weiße und schwarze Datenpunkte, gerissene Regressionsgerade**: alle Messstationen.

Wie Abbildung 10.11 verdeutlicht, spiegelt das Feuchte-Index-Verhalten des *2.* und *3. September 1999* die Feuchteabnahme im Anschluss an das Starkregenereignis des *1. September 1999* wider. Während der Feuchte-Index des *2. September 1999* bei Gewährleistung der Verfahrensprämissen eine hohe Ähnlichkeit mit den in-situ Messwerten des Vergleichsmesszeitpunktes *7. September 1999* aufweist, signalisiert das Verhalten des Feuchte-Index des Aufnahmezeitpunktes *3. September 1999* bereits geringere Feuchteverhältnisse. Der vergangene Abschnitt erklärte dieses Verhalten mit der unterschiedlichen Mächtigkeit der Messhorizonte.

Der starke Zusammenhang zwischen Feuchte-Index-Verteilung und in-situ Messung wird in beiden Datenvergleichen durch hohe *Bestimmtheitsmaße* von $R^2_{2./7.9.99} = 0{,}76$ und $R^2_{3./7.9.99} = 0{,}69$ verdeutlicht. Die Güte der Feuchtebeschreibung zeigt sich in der geringen Streuung der Datenpunkte um die Regressionsgerade, die sich in den geringen rms-Fehlern von $rmse_{2./7.9.99} = 0{,}034 cm^3cm^{-3}$ und $rmse_{3./7.9.99} = 0{,}043 cm^3cm^{-3}$ äußert.

Die Beobachtung des letzten Abschnittes, dass trotz Missachtung der Verfahrensprämissen der Feuchte-Index an einem Teil der als rauhigkeitsverändert erkannten Messstationen die realen Feuchteverhältnisse treffend beschreibt, wird durch den räumlichen Vergleich bestätigt. So signalisiert der Datenvergleich *2. / 7. September 1999* mit einem *Bestimmtheitsmaß* von $R^2_{2./7.9.99} = 0{,}48$ einen deutlichen Zusammenhang zwischen Feuchte-Index-Verteilung und in-situ Messwerten, während jedoch der Datenvergleich *3. / 7. September 1999* mit $R^2_{3./7.9.99} = 0{,}33$ nur noch einen geringen Zusammenhang aufweist. Der Genauigkeitsverlust der Feuchtebeschreibung bei Nichtbeachtung der Verfahrensprämissen zeigt sich im größeren Streuverhalten der Datenpunkte mit rms-Fehlern von $rmse_{2./7.9.99} = 0{,}049 cm^3 cm^{-3}$ und $rmse_{3./7.9.99} = 0{,}051 cm^3 cm^{-3}$. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die aufgezeigten rms-Fehler immer noch einen Bereich vergleichsweise geringer Streuung beschreiben.

Abbildung 10.12 zeigt einen Vergleich der Feuchte-Index-Verteilung der Aufnahmezeitpunkte *2. und 3. September 1999* mit dem Feuchtegehalt des Zustandes der Feldkapazität. Die stationsspezifischen Feuchtegehalte entstammen den Labormessungen der Universität Salamanca und sind in Tabelle 10.3 ersichtlich. Wie die starken Zusammenhänge im Fall der rauhigkeitsstabilen und biomassearmen Messstation zwischen Feuchte-Index-Verteilung und Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Feldkapazität mit *Bestimmtheitsmassen* von $R^2_{2.9.99} = 0{,}76$ und $R^2_{3.9.99} = 0{,}66$ verdeutlichen, beschreibt insbesondere das Feuchte-Index-Verhalten des Aufnahmezeitpunktes *3. September 1999* die Feuchteverteilung bei Feldkapazität mit hoher Genauigkeit, während der Feuchte-Index des Aufnahmezeitpunktes *2. September 1999* eine leicht erhöhte Feuchtesituation aufweist. Bestätigt wird diese Beobachtung durch die geringen rms-Fehler von $rmse_{2.9.99} = 0{,}034 cm^3 cm^{-3}$ und $rmse_{3.9.99} = 0{,}045 cm^3 cm^{-3}$. Wie bereits im vergangenen Abschnitt Erläuterung fand, erklärt diese Beobachtung die Ursache dafür, warum der Feuchte-Index des *2. und 3. September 1999* eine sehr ähnliche Feuchtesituation wie die in-situ Referenzmessungen des *7. September 1999* beschreiben, trotz des viertägigen Zeitintervalls zwischen den Vergleichsmessungen.

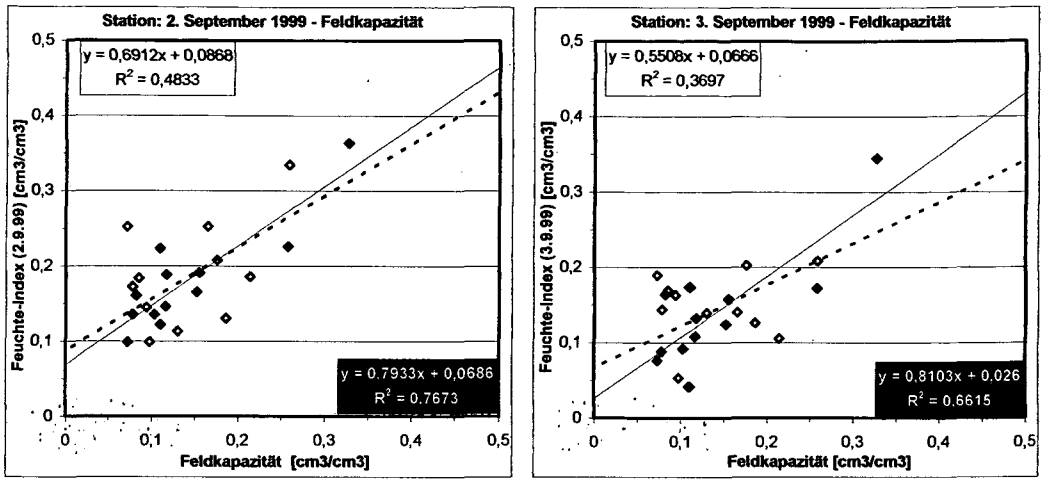

Abb. 10.12: Zusammenhang zwischen dem *Feuchte-Index* der Aufnahmezeitpunkte *2.* und *3. September 1999* und dem Feuchtegehalt der Feldkapazität auf Basis der individuellen Signalwertebereiche der Messstationen **schwarze Datenpunkte und Regressionsgerade**: rauhigkeitsstabile, biomassearme Flächen; **weiße und schwarze Datenpunkte, gerissene Regressionsgerade**: alle Messstationen.

Abbildung 10.13 zeigt den Zusammenhang zwischen der räumlichen Verteilung des Feuchte-Index auf Basis der mittleren feuchtebedingten Signalwertebereiche der physischen Einheiten (Bodenfeuchtekarte) der Aufnahmezeitpunkte *2.* und *3. September 1999* und der in-situ Referenzmessung des *7. September 1999*, sowie dem Feuchtegehalt bei Feldkapazität. Die *Bestimmtheitsmaße* von $R^2_{2./7.9.99} = 0{,}78$ und $R^2_{3./7.9.99} = 0{,}72$ weisen bei Gewährleistung der Verfahrensprämissen auf einen starken Zusammenhang zwischen der Feuchte-Index-Verteilung der Aufnahmezeitpunkte *2.* und *3. September 1999* und den in-situ Messwerten des *7. September 1999* hin. Auch zeigt sich wiederum ein starker Zusammenhang ($R^2_{2.9.99} = 0{,}69$, $R^2_{3.9.99} = 0{,}62$) zwischen Feuchte-Index-Verteilung und dem Zustand der Feldkapazität. Die hohe Genauigkeit der flächenhaften Feuchtebeschreibung bezüglich der in-situ Messung, trotz Vernachlässigung der individuellen Textureigenschaften je Messstation, wird durch die geringen rms-Fehler von $rmse_{2./7.9.99} = 0{,}029 cm^3 cm^{-3}$ und $rmse_{3./7.9.99} = 0{,}035 cm^3 cm^{-3}$ bestätigt. Im Fall des Datenvergleiches auf Basis der Feldkapazität betragen die rms-Fehler $rmse_{2.9.99} = 0{,}034 cm^3 cm^{-3}$ und $rmse_{3.9.99} = 0{,}042 cm^3 cm^{-3}$. Dieses Verhalten verdeutlicht den hohen Homogenitätsgrad der Bodeneigenschaften, der insbesondere innerhalb der physischen Einheiten *Sandstein* und *fluviale Terrassen* gegeben ist. Auch deuten die Ergebnisse auf den geringen Einfluss eines möglichen Fehlers in der Modellierung des feuchtebedingten Signalwertebereiches auf Basis des GOM auf die Feuchte-Index-Erfassung hin.

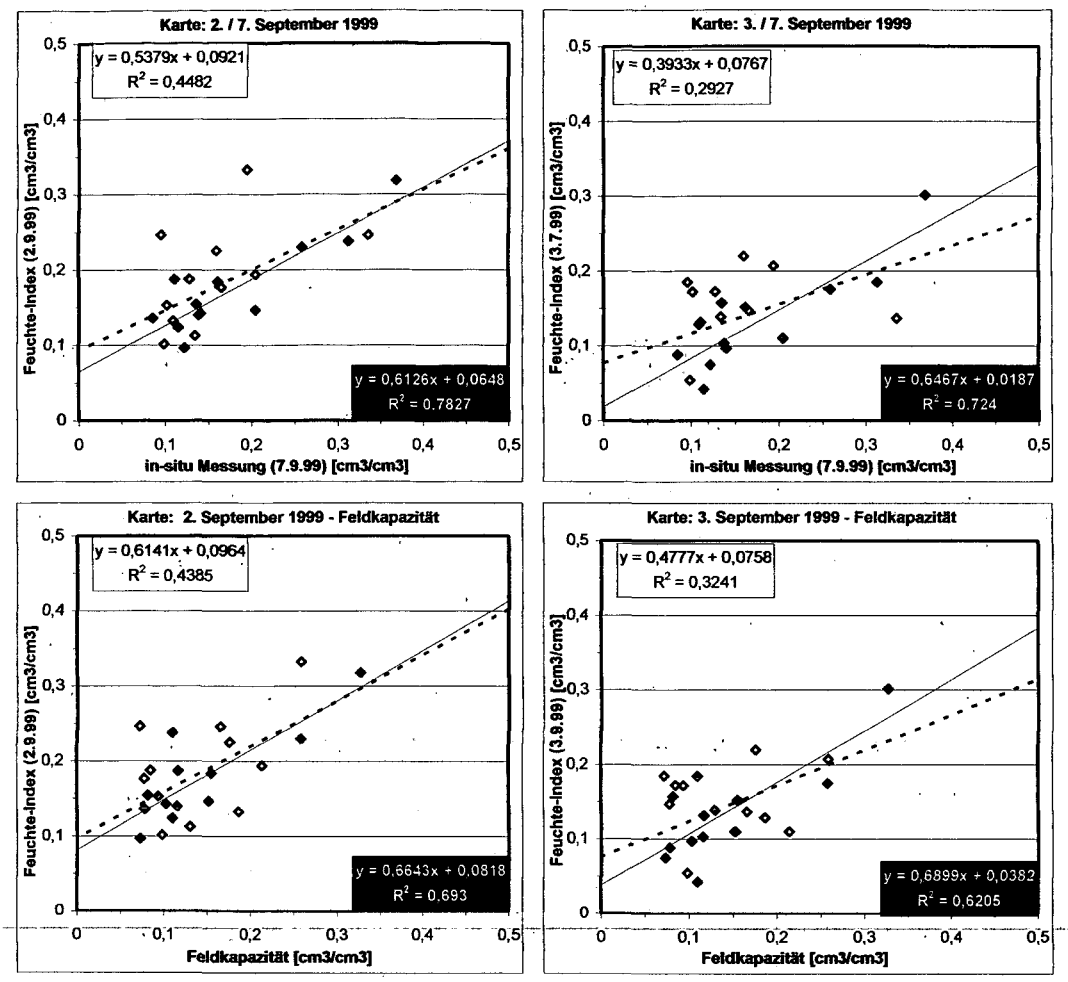

Abb. 10.13: Zusammenhang zwischen *Feuchte-Index* und *in-situ Messung am 2. / 7. September 1999* und *3. / 7. September 1999, sowie* zwischen dem *Feuchte-Index* der Aufnahmezeitpunkte *2.* und *3. September 1999* und dem Feuchtegehalt der Feldkapazität auf Basis der mittleren feuchtebedingten Signalwertebereiche der physischen Einheiten.
schwarze Datenpunkte und Regressionsgerade: rauhigkeitsstabile, biomassearme Flächen;
***weiße und schwarze Datenpunkte, gerissene Regressionsgerade**: alle Messstationen.*

Tabelle 10.7 zeigt abschließend die Validierungsergebnisse in einer Zusammenschau.

Messzeitpunkte	Bezug	Stations- / Flächeneigenschaften	R^2	rms-Fehler $[cm^3 cm^{-3}]$
2. / 7. September 1999	Station	**Verfahrenskonforme Stationen**	**0,76**	**0,034**
		Alle Stationen	0,48	0,049
	Karte	**Verfahrenskonforme Flächen**	**0,78**	**0,029**
		Alle landwirtschaftlichen Flächen	0,45	0,047
3. / 7. September 1999	Station	**Verfahrenskonforme Stationen**	**0,69**	**0,043**
		Alle Stationen	0,33	0,051
	Karte	**Verfahrenskonforme Flächen**	**0,72**	**0,035**
		Alle landwirtschaftlichen Flächen	0,29	0,049
2. September 1999 / Feldkapazität	Station	**Verfahrenskonforme Stationen**	**0,77**	**0,034**
		Alle Stationen	0,48	0,049
	Karte	**Verfahrenskonforme Flächen**	**0,69**	**0,034**
		Alle landwirtschaftlichen Flächen	0,44	0,048
3. September 1999 / Feldkapazität	Station	**Verfahrenskonforme Stationen**	**0,66**	**0,045**
		Alle Stationen	0,37	0,050
	Karte	**Verfahrenskonforme Flächen**	**0,62**	**0,042**
		Alle landwirtschaftlichen Flächen	0,32	0,048

Tab. 10.7: Zusammenhang zwischen der räumlichen Verteilung von *Feuchte-Index* und *in-situ Messung* und Genauigkeit der Feuchtebeschreibung im System *volumetrische Bodenfeuchte* $m_v [cm^3 cm^{-3}]$.

11. Diskussion der Ergebnisse

Wie in der vorliegenden Studie gezeigt werden konnte, ermöglicht das vorgestellte *Verfahren zur Erfassung der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Bodenfeuchtemustern mittels ERS-1/2 InSAR Zeitreihen* eine sensible Erfassung der räumlichen Bodenfeuchteverteilung in semiariden Einzugsgebieten. Bei Gewährleistung der Verfahrensprämissen *Biomassearmut* und *Rauhigkeitsstabilität* ermöglichte das Verfahren die Beschreibung der räumlichen Bodenfeuchteverteilung mit geringen *rms-Fehlern* von $rmse_{2./7.9.99} = 0{,}034 cm^3 cm^{-3}$ und $rmse_{3./7.9.99} = 0{,}043 cm^3 cm^{-3}$. Dabei zeigte sich zu den beiden validierungsrelevanten ERS-1/2 SAR Aufnahmezeitpunkten *2. und 3. September 1999* mit *Bestimmtheitsmaßen* von $R^2_{2./7.9.99} = 0{,}76$ und $R^2_{3./7.9.99} = 0{,}69$ jeweils ein starker Zusammenhang zwischen der Feuchte-Index-Verteilung und den in-situ Messungen des Referenzzeitpunktes *7. September 1999.*

Ein Vergleich des Feuchte-Index-Verhaltens beider Aufnahmezeitpunkte mit dem Feuchtegehalt bei Feldkapazität der Böden signalisierte mit *Bestimmtheitsmaßen* von $R^2_{2.9.99} = 0{,}77$ und $R^2_{3.9.99} = 0{,}66$ ($rmse_{2.9.99} = 0{,}034 cm^3 cm^{-3}$ und $rmse_{3.9.99} = 0{,}045 cm^3 cm^{-3}$) gleichfalls einen starken Zusammenhang. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Mächtigkeiten der Messhorizonte begründete diese Erkenntnis die Vergleichbarkeit der Messungen, trotz des Zeitintervalls zwischen den Messzeitpunkten.

Aufgrund der eingeschränkten Datengrundlage konnte die Güte des Verfahrens in der Beschreibung der zeitlichen Feuchtevariabilität nur qualitativ erfasst werden. Jedoch wies das beobachtete Feuchte-Index-Verhalten im Anschluss an das Starkregenereignis des *1. September 1999* auf eine realistische Beschreibung der zeitlichen Komponente der Feuchtevariation hin. Eine statistisch aussagekräftige Bestätigung dieser Beobachtung erfordert weitere Analysen.

Der Einfluss einer zwischenzeitlichen Änderung der Oberflächenrauhigkeit auf die Feuchtebeschreibung erwies sich in der vorliegenden Studie an einem Teil der ausgeschlossenen Messstationen als vernachlässigbar. Da ein ähnlich großer Anteil

jedoch ein deutlich abweichendes Feuchte-Index-Verhalten aufwies, resultierte im Datenvergleich mit *Bestimmtheitsmaßen* von $R^2_{2./7.9.99} = 0{,}48$ und $R^2_{3./7.9.99} = 0{,}33$ ein deutlich geringerer Zusammenhang zwischen Feuchte-Index-Verteilung und in-situ Messung als bei Gewährleistung der Prämissen. Der resultierende Genauigkeitsverlust in der räumlichen Feuchtebeschreibung bei Vernachlässigung der Prämissen zeigte sich gleichfalls im erhöhten Streuverhalten der Datenpunkte, repräsentiert durch rms-Fehler von $rmse_{2./7.9.99} = 0{,}049 cm^3 cm^{-3}$ und $rmse_{3./7.9.99} = 0{,}051 cm^3 cm^{-3}$.

Demgegenüber konnte der Einfluss einer biomassereichen Vegetationsbedeckung auf die Feuchtebeschreibung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Validierung nicht isoliert werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Feuchtebeschreibung durch die Gewährleistung der Prämissen erhöht wird, auch wenn eine eingeschränkte Beschreibung der Feuchteverhältnisse von landwirtschaftlichen Nutzflächen über weite Teile des Jahres auch ohne die Beachtung der Rauhigkeitsverhältnisse oder des Biomasseaufkommens möglich ist.

Eine Ausnahme bezüglich dieser Aussage stellt der ackerbaulich und wachstumsintensiv geprägte Zeitraum Frühjahr bis Frühsommer dar, in dem die starke Umgestaltung der Oberfläche, das hohe Biomasseaufkommen und der Pflanzenwassergehalt die Feuchtebeschreibung mitunter stark beeinträchtigen. Es ist anzunehmen, dass, unterstützt durch sehr große effektive Basislinien und Aufnahmezeitintervalle, dieser Einfluss in der vorliegenden Studie die Ursache für einen vollständigen Verlust der Langzeit-Kohärenz über den gesamten Beobachtungszeitraum Frühjahr bis Frühsommer *2000* war.

Bei Vernachlässigung der Verfahrensprämissen zeigte sich die Feuchte-Index-Beschreibung zu den Aufnahmezeitpunkten *2000* durch eine massive Unterschätzung der realen Feuchteverhältnisse beeinträchtigt. Als Ursache für dieses Verhalten wurde die kombinierte Wirkung von zwei unterschiedlichen Einflüssen angenommen: So führte zum einen der im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"* dominierende Winterweizen aufgrund seines hohen Biomasseaufkommens bei hohem Wassergehalt zu einer Abschwächung des Rückstreusignals im Frühjahr *2000*. Zum anderen ist anzunehmen, dass zusätzlich eine Abnahme der Oberflächenrauhigkeit zwischen dem Zeitpunkt der Rauhigkeitscharakterisierung im Sommer *1999* und der Feuchte-Index-Erfassung im Beobachtungsjahr *2000* im Zuge

der Saatbeetbereitung stattfand und ein geringeres Rückstreuverhalten verursachte. Obwohl die genaue Ursache nicht eindeutig ermittelt werden konnte, unterstützt das beobachtete Verhalten die Erkenntnis von Quesney et al. (2000), dass im Zeitraum Frühjahr bis Frühsommer die flächenhafte Feuchtebeschreibung auf Basis des C_{VV}-Signals ($\theta = 23°$) durch die Vegetationsbedeckung landwirtschaftlicher Nutzflächen beeinträchtigt wird. Davon betroffen zeigen sich insbesondere ackerbaulich intensiv genutzte Gebiete.

Die Gültigkeit der in Kapitel 1.1. aufgestellten Hypothese, dass eine radar-basierte Feuchtebeschreibung über große Gebiete ausschließlich auf Basis von Fernerkungsdaten realisiert werden kann, ist auf Basis einer umfangreichen Intensitätszeitreihe zu erwarten. Dennoch verhinderte die unzureichende Datengrundlage des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* die direkte Bestätigung dieser Hypothese.

Aufgrund der Tatsache, dass die eingeschränkte Datengrundlage und die geringe Anzahl an Vergleichsmessungen die statistische Aussagekraft der Validierung mindert, ist eine ergänzende Validierung auf Basis einer umfangreichen Datengrundlage angestrebt. Dabei bedarf es insbesondere hinsichtlich der Genauigkeit des Verfahrens in der Erfassung der zeitlichen Feuchtevariation weiterer intensiver Untersuchungen.

Die Studie verdeutlichte das hohe Potenzial der C-Band Kohärenz-Information für die Erfassung des Biomasseaufkommens und die Detektion von Änderungen der Oberflächenrauhigkeit im Zentimeterbereich. So zeigte sich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2_{Juni} = 0{,}81$ ein starker linearer Zusammenhang zwischen der *ERS-1/2 Tandem-Kohärenz* und dem *NDVI* auf landwirtschaftlichen Nutzflächen des Trockenfeldbaus. Eine weitere Erkenntnis der Kohärenz- und Intensitätsanalyse ergab sich aus der Beobachtung, dass bis zu einem *NDVI* von $NDVI \leq 0{,}35$ und einer Tandem-Kohärenz von $\hat{\gamma}_{\tan dem} \geq 0{,}65$ auf vegetationsbedeckten biomassearmen landwirtschaftlichen Nutzflächen eine weitgehend unbeeinflusste Signaltransmission des C_{VV}-Signals bei einem mittleren Einfallswinkel von $\theta = 23°$ stattfindet. Dies ermöglichte die Definition eines *Tandem–Kohärenz-Schwellwertes* von $\hat{\gamma}_{veg} = 0{,}65$, der eine Isolierung *vegetationsfreier bzw. biomassearmer Flächen* für die weitgehend unbeeinflusste Feuchtebeschreibung gewährleistet.

Darüber hinaus zeigten die Kohärenz-Analysen, dass sich eine ackerbaulich bedingte Rauhigkeitsänderung im Zentimeterbereich in einer starken Abnahme der C-Band Langzeit-Kohärenz ($\Delta t \leq 70d$) bis auf ein Niveau von $\hat{\gamma}_{long} \leq 0{,}15$ äußert. Trotz einer Beeinträchtigung der Kohärenz durch biomassearme Vegetationsbedeckung und eine zwischenzeitliche Feuchtevariation verharrten dahingegen rauhigkeitsstabile Flächen über diesem Grenzwert. Diese Erkenntnis erlaubt die Überwachung der Rauhigkeitsstabilität im Zeitraum der Feuchtebeschreibung und ermöglicht den Ausschluss rauhigkeitsveränderter Flächen auf Basis eines *Langzeit-Kohärenz-Schwellwertes von* $\hat{\gamma}_{rough} \leq 0{,}15$ ($\Delta t \leq 70d$).

Die Tatsache, dass der Systemausfall von *ERS-1* die Möglichkeit weiterer ERS-1/2 SAR *Tandem-Missionen* ausschließt, verhindert eine Verwendung von *Tandem-Kohärenzen* in naher Zukunft als Datengrundlage für die Isolierung brachliegender bzw. biomassearmer Flächen. Die Substitution der *Tandem-Kohärenz* durch *optische Fernerkundungsdaten*, wie z.B. Landsat 7 ETM+ Daten, die aufgrund des langsamen Pflanzenwachstums in größeren zeitlichen Abständen erfasst werden können, gewährleistet jedoch auch weiterhin die Anwendbarkeit des Verfahrens auf Basis des verbliebenen ERS-2 SAR-Systems. Negativ wirkt sich dabei jedoch die eingeschränkte Eignung optischer Daten für die Belange von Zeitreihen-Analysen aus, aufgrund ihrer Sensibilität hinsichtlich atmosphärischer Störeinflüsse.
Aufgrund der Tatsache, dass die *Langzeit-Kohärenz* auf Basis nur eines Sensorsystems erfasst werden kann, wird die Überwachung der Rauhigkeitsstabilität dahingegen nicht durch das Fehlen weiterer Tandem-Missionen beeinträchtigt.

Wie bereits in der Einleitung Erläuterung fand, ist grundsätzlich anzumerken, dass eine Feuchteerfassung auf Basis der ERS-1/2 SAR Konfiguration aufgrund der geringen Aufnahmefrequenz von $f = 1/35d$ für die Belange hydrologischer Fragestellungen ungeeignet ist. Diesbezüglich besitzt die im Ausblick (Kapitel 12.) näher beleuchtete neue SAR-System-Generation ein hohes Potenzial, da sie Aufnahmen mit einer hydrologisch sinnvollen zeitlichen Auflösung von ca. einer Aufnahme pro Woche liefert. Unter der Voraussetzung sensorspezifischer Modifikationen erlaubt die Einfachheit des vorgestellten Verfahrens seine Anwendung auf Daten der neuen Sensorgeneration ohne größeren Aufwand. Aufgrund der hohen Aufnahmefrequenz der Sensoren, welche die Wahrscheinlichkeit

und Intensität zwischenzeitlich veränderter Streuverhältnisse stark reduziert, ist zu erwarten, dass die Definition eines restriktiveren Kohärenz-Kriteriums für die Gewährleistung der Rauhigkeitsstabilität möglich wird. Da das Zeitintervall von $\Delta t \approx 7d$ eine höhere Ähnlichkeit mit dem Zeitintervall der ursprünglichen Tandem-Kohärenz ($\Delta t = 2d$) als mit der ERS-1/2 InSAR Langzeit-Kohärenz von $\Delta t = 35d$ aufweist, ist die Detektion rauhigkeitsstabiler und biomassearmer Flächen möglicherweise über einen identischen Langzeit-Kohärenz-Schwellwert zu realisieren. Dies würde die Verwendung optischer Fernerkundungsdaten unnötig machen. Um derartige Fragen zu klären und eine Übertragung des Verfahrens auf Daten der neuen und kommenden Sensorsysteme zu ermöglichen, besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die vorliegende Studie bildet somit die Grundlage für weitere Forschungen, indem sie am Beispiel des ERS-1/2 SAR-Systems zeigte, dass auf Basis des vorgestellten Verfahrens eine Verbesserung der Informationsgrundlage bezüglich des räumlichen Feuchteverhaltens großer Gebiete mit relativ einfachen und kostengünstigen Mitteln möglich ist. Es ist zu hoffen, dass das Verfahren damit einen Beitrag zur Vermeidung von Dürre- und Hochwasserkatastrophen leisten kann.

12. Ausblick

Mit dem Start von *ENVISAT ASAR* wurde *2002* erstmals ein satellitengestütztes multipolarimetrisches SAR-System in den operationellen Betrieb genommen (vgl. ESA, 2003). Das in den Ko-Polarisationen (*HH, VV*) arbeitende C-Band SAR-System bildete den Auftakt zu einer ganzen Serie weiterer geplanter multipolarimetrischer und zum Teil multifrequenter SAR-Systeme, wie *ALOS PALSAR*, *RADASAT-2* sowie *TerraSAR-X1* und *TerraSAR-L1*.

So besitzt das für 2004 geplante japanische L-Band SAR-System *PALSAR* zusätzlich zur Ko-Polarisation die Fähigkeit, optional in der Kreuz-Polarisation (HV, VH) zu messen (vgl. NASDA, 2001).

Gleiches gilt für den kanadischen C-Band Sensor *RADARSAT-2*, der ebenfalls in der Ko- und Kreuz-Polarisation arbeitet und dessen Start für *2004* geplant ist (vgl. RSI, 2003). Da beide RADARSAT-1/2 Satelliten eine identische Bahnkonfiguration und Trägerfrequenz aufweisen, wird die Durchführung von Tandem-Missionen diskutiert, so dass in Hinblick auf die *Repeat Pass Interferometrie* möglicherweise ein Ersatz für die Funktionalität der ERS-1/2 SAR-Syteme verfügbar wird.

Auch die Ende *2005* geplanten, sich ergänzenden Sensor-Systeme *TerraSAR-X1* und *TerraSAR-L1* ermöglichen eine multipolarimetrische und darüber hinaus multifrequente Datenerfassung im X- und L-Band (vgl. Infoterra, 2003). Während das X-Band SAR-System ausschließlich in den Zuständen der Ko-Polarisation misst, besitzt das L-Band SAR-System die Fähigkeit, vollpolarimetrisch zu arbeiten. Die multifrequente Datenerfassung wird dadurch ermöglicht, dass obwohl beide Sensor-Systeme auf individuellen Trägerplattformen operieren, die Bahnkonfiguration so gewählt wurde, dass mit einer Verzögerung von nur $\Delta t \approx 12\,\mathrm{min}$ eine nahezu simultane Datenerfassung in identischen Aufnahmestreifen stattfinden kann. Um eine kontinuierliche Datenerfassung auf Basis einer Sensorkonfiguration über lange Zeiträume zu gewährleisten, sind mit *TerraSAR-2* (2010) und *TerraSAR-3* (2015) bereits nachfolgende Sensorgenerationen im Gespräch (vgl. RSI, 2003).

Diese neuartigen Sensor-Systeme bieten somit die Möglichkeit, vielversprechende, auf multipolarimetrische Daten basierende Verfahren, wie u.a. die Modelle von Oh et al. (1992) und Bindlish & Barrows (2000), operationell zu nutzen und damit gemäß

Kapitel 2. eine von in-situ Messungen unabhängige, kontinuierliche Bodenfeuchtebeschreibung über große Gebiete zu ermöglichen. Da die Limitierung der Datenerfassung auf kostenintensive Flugzeugkampagnen entfällt, ist gleichzeitig anzunehmen, dass Forschung und Verfahrensentwicklung auf Basis multifrequenter und multipolarimetrischer Daten aufgrund der steigenden Nutzergemeinde erheblich an Bedeutung gewinnen wird.

Ein vielversprechender Forschungsbereich ist in diesem Zusammenhang neben der konventionellen *SAR-Polarimetrie* die *polarimetrische Interferometrie* (siehe: Cloude & Papathanassiou, 1998). So wiesen u.a. bereits Oh et al. (2002) auf das große Potenzial der polarimetrischen Phase als ergänzende Informationsquelle in der Charakterisierung der Bodenrauhigkeit, Bodenfeuchte und Vegetationsbedeckung hin.

Darüber hinaus bieten die *Wide Swath-* und *ScanSAR-Modi* der Sensor-Systeme *ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR* und *RADARSAT-2* die Möglichkeit, eine zeitlich hochaufgelöste Datenerfassung in einer Größenordnung von fünf bis zehn Tagen zu gewährleisten und damit die Forderung seitens der Hydrologie zu erfüllen (siehe Kapitel 1.). Die dabei resultierende räumliche Auflösung von ca. $\delta x = \delta y = 100 - 150m$ erweist sich dabei als ausreichend, um die kleinskalige, zeitlich hoch variable Bodenfeuchtevariation zu beschreiben.

Ein Problem in der Bodenfeuchteerfassung auf Basis der *Wide Swath-* und *ScanSAR-Modi* ist die starke Variation des Einfallswinkelbereiches (*ASAR*: $22 \leq \theta \leq 45°$, *PALSAR*: $18 \leq \theta \leq 48°$), der mitunter sehr große Einfallswinkel erreicht. Da in diesem Fall der Einfluss der Rauhigkeit sehr stark in Erscheinung tritt (vgl. Benallegue et al., 1995), werden neue Verfahren und Parameter zur Beschreibung und Kompensation dieses Einflusses nötig.

Neben den Innovationen im SAR-Sektor sind gleichfalls weitere Scatterometer Missionen geplant. Zusätzlich zu dem seit *1999* im Ku-Band arbeitenden *QuickSCAT Seawinds* Scatterometer findet eine Weiterentwicklung des ERS Scatterometers auf der geplanten Satellitenserie *METOP (1-3)* Verwendung. Das im C-Band arbeitende *ASCAT* Scatterometer, dessen Start (*METOP-1*) für 2005 anvisiert ist, könnte damit die Funktionalität des ERS-Scatterometers übernehmen und weiterhin eine zeitlich hochaufgelöste Bodenfeuchteerfassung ermöglichen.

Aufgrund der verbesserten Eigenschaften der erwähnten Sensorsysteme, welche die bisher limitierenden Faktoren weitgehend eliminieren, ist anzunehmen, dass die Radar-Fernerkundung in den kommenden Jahren für hydrologische Fragestellungen erheblich an Bedeutung gewinnt.

Literaturverzeichnis:

ALTESE, E.; BOLOGNANI, E.; MANCINI, M.; TROCH, P. (1996): Retrieving Soil Moisture over Bare Soil from ERS-1 SAR Data, Sensitivity Analysis Based on a Theoretical Surface Scattering Model and Field Data. In: Water Resources Research, Vol. 32.

AMODEO, G.; MATTHAIS DE, P.; FERRAZOLLI. P.; PALOSCIA, S; PAMPALONI, P.; SCHIAVON, G.; SIGISMONDI, S.; SOLIMINI, D. (1996): Monitoring Vegetation Features with Multi-temporal SAR Data. In: Proceedings IGARSS, Lincoln, Nebrasca.

ATTEMA, E.P.W.; ULABY, F.T. (1978): Vegetation Modelled as a Water Cloud. In: Radio Science, Vol. 13.

BACH, H.; LAMPART, G.; RIEGLER, G.; MAUSER, W. (1998): First Results of an Integrated Flood Forecast System Based on Remote Sensing Data. Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications Workshop. ESTEC. Internet: http://www.estec.esa.nl/conferences/98c07/papers/P078.PDF (entnommen 21. Juli 2003)

BASTIAANSSEN, W.G.M.; HOEKMAN, D.H.; ROEBELING, R.A. (1994): A Methodology for the Assessment of Surface Resistance and Soil Water Storage Variability at Mesoscale Based on Remote Sensing Measurements. IAHS Special Publications, Nr.2, IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire.

BECKMANN, P.; SPIZZICHINO, A. (1963): The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Pergamon Press. New York.

BENALLEGUE, M.; TACONET, O.; VIDAL-MADJAR, D; NORMAND, M. (1995): The Use of Radar Backscattering Signals for Measuring Soil Moisture and Surface Roughness. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 53.

BINDLISH, R.; BARROS, A. (2000): Multi-frequency Soil Moisture Inversion from SAR Measurements Using IEM. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 71.

BINDLISH, R.; BARROS, A. (2001): Parameterization of Vegetation Backscatter in Radar-based, Soil Moisture Estimation. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 76.

BIRKELAND, B.W. (1974): Pedology, Weathering and Geomorphological Research. Oxford University Press, New York.

BLAES, X.; DEFOURNY, P.; DERAUW, D.; BARBIER, C. (1999): InSAR Coherence for Crop Parameters Monitoring. In: Proceedings Fringe'99, Liege, Belgium.
BLAES, X.; DEFOURNY, P. (2003): Retrieving Crop Parameters Based on Tandem ERS 1/2 Interferometric Coherence Image. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 88.

BOISVERT, J.B.; GWYN, Q.H.J.; CHANZY, A.; MAJOR, D.J.; BRISCO, B. (1997): Effect of Surface Soil Moisture Gradients on Modelling Radar Backscatter from Bare Fields. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18.

BORGEAUD, M.; NOLL, J., BELLINI, A. (1995): On the Use of ERS-1 Multi-Temporal SAR Data for Agricultural Applications. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33.

BORGEAUD, M.; WEGMÜLLER, U. (1996): On the Use of SAR Interferometry for the Retrieval of Geo- and Bio-Physical Information. Internet: http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/borgeaud-wegmuller (entnommen 25. Oktober 2001)

BOUMAN, B.A.M. (1991): The Linking of Crop Growth Models and Multisensor Remote Sensing Data. In: Proc. Int. Symp. Microwave Signatures and Remote Sensing, Europ. Space Agency, Courchevel, France, Vol: ESA SP-319.

BOUMAN, B.A.M.; HOEKMAN, D. (1993): 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.

CEBALLOS, A.; MARTINEZ-FERNANDEZ, J.; SANTOS, F.; PILAR, A. (2002): Soil Water Behaviour of Sandy Soils under Semi-arid Conditions in the Duero Basin (Spain). In: Journal of Arid Environments, Vol. 51.

CHAMPION, I.; FAIVRE, R. (1997): Sensitivity of the Radar Signal to Soil Moisture: Variation with Incidence Angle, Frequency, and Polarization. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35.

CHAUHAN, N.S. (1997): Soil Moisture Estimation under a Vegetation Cover: Combined Active Passive Mivrowave Remote Sensing Approach. In: International Journal of Remote Sensing, Vol.18.

CHEN, K.S.; WU, T.D., TSAY, M.K.; FUNG, A.K. (2000): A Note on the Multiple Scattering in an IEM Model. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, Nr. 1.

CLOUDE, S.R.; PAPATHANASSIOU, K.P. (1986): Polarimetric SAR Interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36.

DAVIDSON, M. W. J.; LE TOAN, T.; MATTIA, F.; SATALINO, G.; MANNINEN, T.; BORGEAUD, M. (2000): On the Characterisation of Agricultural Soil Roughness for Radar Remote Sensing Studies. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38.

DAWSON, M.S.; FUNG, A.K., MANRY, M.T. (1997): A Robust Statistical-based Estimator for Soil Moisture Retrieval from Radar Measurements. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 35.

DEMIRCAN, A; ROMBACH, M; MAUSER, W. (1993): Extraction of Soil Moisture from multitemporal ERS-1 SLC-Data of the Freiburg Testsite. In: Proceedings First ERS-1 Symposium, Cannes, 1992, ESA SP-359, Vol. II.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T. (1981): Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture: Part III – Soil Tension. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-19.

DOBSON, M.C.; KOUYATE, F.; ULABY, F.T. (1984): A Reexamination of Soil Textural Effects on Microwave Emission and Backscattering.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-22.

DOBSON, M.C.; ULABY, F.T.; HALLIKAINEN, M. T.; EL-RAYES, M. A. (1985): Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil. Part II: Dielectric Mixing Models. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. Vol: GE-23.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T. (1986a): Active Microwave Soil Moisture Research.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-24.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T. (1986b): Preliminary Evaluation of the SIR-B Response to Soil Moisture, Surface Roughness, and Crop Canopy Cover. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-24.

DOBSON, M. C.; PIERCE, L.; SARABANDI, K.; ULABY, F.T.; SHARIK, T. (1992): Preliminary Analysis of ERS-1 SAR for Forest Ecosystem Studies.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T. (1998): Mapping Soil Moisture Distributions with Imaging Radar.
In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. (Eds): Principles and Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing. John Wiley, New York.

DUBOIS, P.; VAN ZYL, J.; ENGMAN, T. (1995): Measuring Soil Moisture with Imaging Radars.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33.

EKLUNDH, L.; HARRIE, L.; KUUSK, A. (2001): Investigating Relationships between Landsat ETM+ Sensor Data and Leaf Area Index in a Boreal Conifer Forest. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 78.

ENGDAHL, E.; BORGEAUD, M. (1998): ERS-1/2 Tandem Interferometric Coherence and Agricultural Crop Height. In: Proceedings on Second International Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands.

ENGMAN, E.T.; CHAUHAN, N. (1995): Status of Soil Moisture Measurements with Remote Sensing.
In: Remote Sensing of Environment, Vol. 51.

ELACHI, C. (1988): Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques.
IEEE Press, New York.

ENTEKHABI, D.; NAKAMURA, H.; NJOKU, E. (1994): Solving the Inverse Problem for Soil Moisture and Temperature Profiles by Sequentional Assimilation of Multifrequency Remotly Sensed Observations.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 32.

ESA (1998): ERS SAR Calibration: Derivation of the Backscattering Coeffifient σ^0 in ESA ERS SAR PRI Products. Dok.Nr.: ES-TN-RS-PM-HI09, Issue 2.

ESA (2003): ENVISAT Instruments: ASAR.
Internet: http://envisat.esa.int/instruments/asar/ (entnommen 20. November 2003)

EOM, H; FUNG A.K. (1984): A Scatter Model for Vegetation up to Ku-Band.
In: Remote Sensig of Environment, Vol. 19.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY /1994): CORINE Information System, Summary Data Directory, EEA/15/94

FELLAH, K.; MEYER, C.; LAUGIER, O.; CLANDILLON, S.; DE FRAIPONT, P. (1998): Potential and Limitations of Multi-Temporal SAR Data in a Quantitative Approach for Multi-Scalar Hydrological Applications. Synthesis of ERS Alsace / Camargue Pilot Project.
Internet: http://earth.esa.int/symposia/papers/fellah1/ (entnommen 21.November 03)

FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) (1993):
Radar Imagery: Theory and Interpretation. RSC Series No 67, Rom.

FRISON, P. L.; MOUGIN, E.; HIERNAUX, P. (1998): Observations and Interpretation of Seasonal ERS-1 Wind Scatterometer Data over Northern Sahel (Mali). In: Remote Sens. Environ., Vol. 63.

FUNG, A.K.; ZONGQIAN, L.; CHEN, K.S. (1992): Backscatter from a Randomly Rough Dielektric Surface.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 30.

FUNG, A. K. (1994): Microwave Scattering and Emission Models and their Applications.
Artech House Inc., Norwood, Great Britain.

FUNG, A. K. (1994): Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications.
Artech House Inc., Norwood, Great Britain.

GEUDTNER, D. (1995): Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1.
DLR-Forschungsbericht 95-28, Oberpfaffenhofen.

GOYAL, S.K.; SEYFRIED, M.S.; O'NEILL, P.E. (1999): Correction of Surface Roughness and Topographic Effects on Airborne SAR in Mountainous Rangeland Areas.
In: Remote Sensing of Environment, Vol. 67.

HAJNSEK, I.; BUSCHE, T.; SCHMULLIUS, C.; ERGENZINGER, P. (1999): Determination of Hydrological Parameters Using Airborne-Radar Data. In: Proceedings IGARSS, Hamburg.

HALLIKAINEN, M. T.; ULABY, F. T.; DOBSON, M. C.; EL-RAYES, M. A.; WU, L.-K. (1985):
Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – PartI: Empirical Models and Experimental Observations.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-23.

HAMACHER, M. (2000): Zustandserfassung von Wintergetreide und Zuckerrüben während des Wachstums mit Hilfe des C-Band Radars der ERS-1 und ERS-2 Satelliten. Dissertation, Hohe Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn. Internet: http://hss.ulb.uni-bonn.de:90/ulb_bonn/diss_online/landw_fak/2000/hamacher_maria/0018.pdf (entnommen 3.September 2003)

HASTINGS, D.; DUNBAR, P. (1998): Development & Assessment of the Global Land One-Km Base Elevation Digital Elevation Model (GLOBE). In: Proc. ISPRS Commission IV Symposium, Stuttgart, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32.

HOEKMAN, D.; KRUL, L.; ATTEMA, E. (1982): A Multi- Layer Model for Radar Backscattering by Vegetation Canopies. In: Proceedings IGARSS, Munich.

HSIEH, C.-Y.; FUNG, A.K.; NESTI, G.; SIEBER, J.; COPPO, P. (1997): A Further Study of the IEM Surface Scattering Model. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35.

HUETTE, A.R. (1988): A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). In: Remote Sensing of Environment, Vol. 25.

INFOTERRA (2003): InfoTerra/TerraSAR Satellites.
Internet: (http://www.infoterra-global.com/terrasar2.htm (entnommen 20. November 2003)

IPCC (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability.
Internet: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm (entnommen: 15. Januar 2004)

JRC (1999): MARS Bulletin, Situation at the End of June 1999. Vol. 7. Nr. 4.
Internet: http://mars.jrc.it/documents/stats/bulletin/mars-04-1999.pdf (entnommen: 3. November 2003)

JRC (2000): MARS Bulletin, Situation at the End of June 2000. Internet:
http://mars.jrc.it/documents/stats/bulletin/mars-fax04-2000.pdf (entnommen: 3. November 2003

JRC (2002): Meteorological Database. Internet: http://www.aris.sai.jrc.it/en/data-dist/meteo.html (entnommen 14. März 2003)

KARAM, M.A.; FUNG, A.K.; LANG, R.H.; CHAUHAN, N.S. (1992): A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30.

KATTENBORN, G.; KLAEDTKE, H.-G.; GÜTH, S.; REICH, M. (1996): Potential of ERS-1 SAR for Agricultural Statistics. SAI, JRC. Contract Nr. 10161-94-04 F1ED ISP D Internet:
http://mars.jrc.it/documents/nsam/sar/UoS_1995_Final.pdf (entnommen 3. Februar 2001)

KEITHLEY, C.; ROBERTS, M. (1996): Examination of Multi-temporal ERS-1 Radar Over the Rainwater Basin. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34.

KELLER, J.M.; CROWNOVER, R.; CHEN, R. (1987): Characteristics of Natural Sciences Related to the Fractal Dimension. In: IEEE Transactions on Pattern Anal. And Mach. Intell.. Vol. 9.

LAUTENSACH, H. (1964): Iberische Halbinsel. Geographische Handbücher, Keysersche Verlagsbuchhandlung, München.

LAYMON, C.; BELISLE, W.; COLEMAN, T.; CROSSON, W.; FAHSI, A.; HOOD, R.; JACKSON, T.; LUVALL, J.; MANU, A.; O'NEILL, P.; SENWO, Z.; TSEGAYE, T.; WU, S. (1997): Huntsville '96 Microwave Remote Sensing of Soil Moisture Experiment: Overview and Preliminary Results. In: Proceedings of the Conference on Hydrology, Annual Meeting, American Meteorological Society.

LEE, J. S.; GRUNES, M. R.; MANGO, S. A. (1991): Speckle Reduction in Multipolarization, Multifrequenzy SAR Images. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29.

LEE, H.; LIU, J.G. (2001): Analysis of Topographic Decorrelation in SAR Interferometry-Using Ratio Coherence Imagery. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39.

LETOAN, T.; SMACCHIA, P.; SOUYRIS, J.C.; BEAUOIN, A.; MERDAS, M.; WOODING, M.; LICHTENEGER, J. (1993): The Retrieval of Soil Moisture from ERS-1 Data. In: Proceedings Second ERS-1 Symposium, Hamburg.

LETOAN, T.; DAVIDSON, M.; BORDERIES, P.; CHENERIE, I.; MATTIA, F.; MANNINEN, T.; BORGEAUD, M. (1998): Improved Observation and Modelling of Bare Soil Surfaces for Moisture Retrieval. Internet: http://www.estec.esa.nl/conferences/98c07/papers/P016.PDF (entnommen 18. Januar 2003)

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. M. (1987): Remote Sensing and Image Interpretation. 2. Auflage, Wiley and Sons, New York.

LÖFFLER, E. (1994): Geographie und Fernerkundung. Teubner Studienbücher der Geographie, Stuttgart.

LU, Z.; FREYMÜLLER, J. (1998): Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferomtery Coherence Analysis over Katmai Volcano Group, Alaska: Radar Observation. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 103.

LU, Z.; MEYER, D.J. (2002): Study of High SAR Backscattering Caused by an Increase of Soil Moisture Over a Sparsely Vegetated Area: Implications for Characteristics of Backscattering. In:International Journal of Remote Sensing, Vol. 23.

MAGAGI, R.D.; KERR, Y.H. (2001): Estimating Surface Soil Moisture and Soil Roughness over Semiarid Areas from the Use of the Copolarization Ratio. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 75.

MARSHALL, T.J.; HOLMES, J.W.; ROSE, C.W. (1999): Soil Physics. Cambridge University Press, 1999.

MATTHAEIS DE, P.; FERRAZOLLI. P.; SCHIAVON, G.; SOLIMINI, D. (1995): Crop Type Identification and Biomass Estimation by SAR. In: Proceedings IGARSS, Florence.

MATTIA, F.; LE TOAN, T. (1999): Backscattering Properties of Multi Scale Rough Surfaces. In: Journ. Electromagn. Waves Applicat.. Vol. 13.

MAUSER, W.; ROMBACH, M.; BACH, H.; STOLZ, R.; DEMIRCAN, A.; KELLNDORFER, J. (1994): The Use of ERS-1 Data for Spatial Surface-Moisture Determination. In: First Workshop on ERS-1 Pilot Projects, Toledo, ESA.

MAUSER, W., ROMBACH, M., BACH, H., DEMIRCAN, A., KELLNDORFER, J. (1995): Determination of Spatial and Temporal Soil Moisture Development Using Multi-Temporal ERS-1 Data. SPIE Vol. 2314.

MAUSER, W.; BACH, H.; DEMIRCAN; A.; EIBL, B.; RIEGLER, G.; SCHNEIDER, K. (1997): The Contribution of Microwave Data to Distributed Hydrologic Modelling. In: Proceedings Third ERS Symposium, Florence.

MEADE, N.G.; HINZMAN, L.D.; KANE, D.L. (1999): Spatial Estimation of Soil Moisture Using Synthetic Aperture Radar in Alaska. In: Advanced Space Research, Vol. 24.

MEIER, E. (1989): Geometrische Korrektur von Bildern orbitgestützter SAR-Systeme. Remote Sensing Series, Vol. 15, Zürich.

MEYER-ROUX, J.; VOSSEN, P. (1994): The first Phase of the MARS Project, 1988-1993: Overview, Methodes and Results. In: Proc. Conference on the MARS Project: Overview and Perspectives. Belgirate, Italy.

MITCHEL, J.K. (1976): Fundamentals of Soil Behavior. Wiley, New York.

MO, T. (1980): Incoherent Scattering of Microwave Radiation from Rough Soil Surfaces. In: Computer Science Corp., Silver Spring, MD, USA, Agristars SM-G2-04291.

MOEREMANS, B.; DAUTREBANDE, S. (2000): Soil Moisture Evaluation by Means of Multi-temporal ERS SAR PRI Images and Interferometric Coherence. In: Journal of Hydrology, Vol. 234.

MORAN, S. M.; VIDAL, A.; TROUFLEAU, D.; QI, J.; CLARKE, T.R.; PINTER, P.J.,JR; MITCHELL, T.A.; INOUE, Y.; NEALE, C.M.U. (1997): Combining Multifrequency Microwave and Optical Data for Crop Management. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 61.

MORAN, S. M.; HYMER, D. C.; QI, J.; SANO, E. E. (2000): Soil Moisture Evaluation Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar (SAR) in Semiarid Rangeland. In: Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 105.

NARAYANAN, R.M.; HIRSAVE, P.P. (2001): Soil Moisture Estimation Models Using SIR-C SAR Data: A Case Studie in New Hampshire, USA. In: Remote Sensing of Envrionment, Vol. 75.

NARISCO, G.; RAGNI, P.; VENTURI, A. (1992): Agrometrological Aspects of Crops in Italy, Spain and Greece. An Agricultural Information System for the European Community. JRC EUR 14124.

NASA (1987): SAR Synthetic Aperture Radar. Earth Observing System. Instrument Panel Report. Vol. IIf, Amherst.

NASDA (2001): ALOS Kyoto & Carbon Initiative. In: First Science Advisory Panel Meeting. NASDA EORC, Tokyo. Internet: http://www.eorc.nasda.go.jp/ALOS/kyoto/nov2001/data/KC-Panel-1_minutes.pdf (entnommen 20. November 2003)

NESTI, G.; TARCHI, D.; DESPAN, D.; RUDANT, J.-P. (1995): Decorrelation of Backscatter Signal Due to Soil Moisture Changes. In: Proceedings IGARSS, Florence.

NESTI, G.; TARCHI, D.; DESPAN, D.; RUDANT, J.-P.; BEDIDI, A.; BORDERIES, P; BACHELIER, E. (1998): Phase Shift and Decorrelation of Radar Signal Related to Soil Moisture Chages. Internet: http://www.estec.esa.nl/conferences/98c07/themes.html (entnommen 18. Januar 2003)

NEUSCH, T.; STIES, M. (1999): Application of the Dubois-model Using Experimental Synthetic Aperture Radar for the Determination of Soil Moisture and Surface Roughness. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54.

OEVELEN, P.J. VAN; HOEKMAN, D.H. (1999): Radar Backscatter Inversion Techniques for Estimation of Surface Soil Moisture: EFEDA-Spain and HAPEX-Sahel Case Studies. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37.

OGILVY, J.A.; FOSTER, J.R. (1989): Rough Surfaces: Gaussian or Exponential Statistics? Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 22.

OH, Y.; KAY, Y.C. (1998): Conditions for Precise Measurement of Soil Surface Roughness. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36.

OH, Y.; SARABANDI, K.; ULABY, F.T. (1992): An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Soil Surfaces. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 30.

OH, Y.; SARABANDI, K.; ULABY, F.T. (2002): Semi-Empirical Model of the Ensemble-Averaged Differential Mueller Matrix for Microwave Backscattering from Bare Soil Surfaces. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40.

OLIVER, S.; QUEGAN, S. (1998): Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Artech House, Boston.

VON PONCET, F.; HANNEMANN. J.; PRIETZSCH, C.; TAPKENHINRICHS, M. (1993): Regionalization of Soil Physical Parameters Using ERS-1 SAR Data. In: Space at the Service of Our Environment, In: Proceedings Second ERS-1 Symposium, Hamburg.

PARIS, J. (1986): The Effect of Leaf Size on the Microowave Backscattering by Corn. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 19.

PRICE, J.C. (1992): Estimating Vegetation Amount from Visible and Near Infrared Reflectances. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 41.

PRICE, J.C. (1993): Estimating Leaf Area Index from Satellite Data. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31.

PRICE, J.C.; BAUSCH, W. (1995): Leaf Area Index Estimation from Visible and Near-Infrared Reflectance Data. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 52.

PULLIAINEN, J. T., T. MANNINEN, M. T. HALLIKAINEN (1998): Application of ERS-1 Wind Scatterometer Data to Soil Frost and Soil Moisture Monitoring in Boreal Forest Zone. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36.

QUESNEY, A.; LE HEGARAT-MASCLE, S.; TACONET, O.; VIDAL-MADJAR, D.; WIHNERON, J.P.; LOUMAGNE, C.; NORMAND, M. (2000): Estimation of Watershed Soil Moisture Index from ERS/SAR Data. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 72.

RAYLEIGH, LORD (1877): The Theory of Sound. Scientific Papers, vol. 6 in 3, New York: 1964, first edition 1877.

RICHTER, R. (2001): Atmospheric Correction for Flat and Rugged Terrain - The ATCOR Models. Internet:: http://www.op.dlr.de/atcor (entnommen 12. März 2003)

RODRIGUEZ, E.; MARTIN, J.M. (1992):Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars. In: IEEE Proceedings-F, Vol. 139.

ROMBACH, M.; DEMIRCAN, A.; MAUSER, W. (1993): Correlation Between Soil Moisture and Backscattering Coefficient of ERS-1 Data. In: Proceedings Second ERS-1 Symposium, Hamburg.

ROMBACH, M.; MAUSER, W. (1998): Multi-annual Analysis of ERS Surface Soil Moisture Measurements of Different Landuses. Internet: http://earth.esa.int/symposia/papers/rombach/ (entnommen 11.2.2001)

RÖMKENS, M.J.M.; WANG, J.Y. (1984): The Effect of Tillage on Surface Roughness. ASAE, Paper 84.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. (1973): Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt.

RSI (2003): RADARSAT-2: Innovation in Earth observation. Internet: http://www.rsi.ca/products/radarsat2/rs2_overview.pdf (entnommen 20. November 2003).

RUDANT, J.-P.; BEDIDI, A.; CALONNE, R.; MASSONNET, D.; NESTI, G.; TARCHI, D. (1996): Laboratory Experiments for the Interpretation of Phase Shift in SAR Interferograms. Internet: http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/rudant-et-al (entnommen 17.5.2002)

SAATCHI, S.S.; LE VINE, D.M.; LANG, R.H. (1994): Microwave Backscattering and Emission Model for Grass Canopy. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32.

SANCER, M.I. (1968): An Analysis of the Vector Kirchhoff Equations and the Associated Boundary Line Charge. In: Radio Science, Vol. 3.

SANCER, M.I. (1969): Shadow-Corrected Electromagnetic Scattering from a Randomly Rough Surface. In: IEEE Trans. Ant. and Prop. Vol. 17.

SCHMUGGE, T. J.; WILHEIT, T.; WEBSTER, W.; GLOERSEN, P. (1976): Remote Sensing of Soil Moisture with Microwave Radiometers – II. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, M. D., NASA Tech. Note, TN-D-8321.

SCHMUGGE, T.J. (1980): Effects of Texture on Microwave Emission from Soils In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-18.

SCHMUGGE, T. J. (1983): Remote Sensing of Soil Moisture: Recent Advances. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21.

SCHMULLIUS, C.; NITHACK, J.; KERN, M. (1993): Comparison of Multi-temporal ERS-1 and Airborne DLR E-SAR Image Data for Crop Monitoring. In: Proceedings Second ERS-1 Symposium, Hamburg.

SCHMULLIUS, C.; NITHACK, J. (1997): Temporal Multiparameter Airborne DLR E-SAR Images for Crop Monitoring – Summary of the CLEOPATRA Campaigne 1992. In: Proceedings of Remote Sensing of Vegetation and Sea, Vol. 2959.

SCHNEIDER, K.; OPPELT; N.; MAUSER, W. (1998): Entwicklung eines Bodenfeuchte-Index für hydrologische Modelle aus ERS Daten im Weser-Einzugsgebiet. Forschungsbericht. Internet: http://www.utoledo.edu/colleges/as/geography-and-planning/giscert/newfac/Schneider/pdf/ERS98bericht.PDF (entnommen 11.3.03)

SCHOTTEN, C.G.J.; VAN ROOY, W.W.L.; JANSSEN, L.L.F. (1995): Assessment of the Capabilities of Multi-temporal ERS-1 SAR Data to Discriminate Between Agricultural Crops. In: Internation Journal of Remote Sensing, Vol. 16.

SCHREIER, G. (1993): Geometrical Properties of SAR Images. In: Schreier,. G. (Ed.) (1993): SAR Geocoding: Data and Systems. Wichmann, Karlsruhe.
SCHWÄBISCH, M. (1997): SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. DLR Forschungsbericht 95-25, Oberpfaffenhofen.

SHANDA, E. (1986): Physical Fundamentals of Remote Sensing. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

SHARMAN, M. (1994): Monitoring Agriculture with Remote Sensing. In: Proc. Conference on the MARS Project: Overview and Perspectives. Belgirate, Italy.

SHEPARD, M.K.; BRACKETT, R.A.; ARVIDSON, E. (1995): Self-affine (Fractal) Topography: Surface Parametrization and Radar Scattering. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 100..

SHI, J.; WANG, J.; HSU, A.Y.; O'NEIL, P.E.; ENGMAN, E. (1997): Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameters Using L-Band SAR Image Data. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 35.

SMALL, D.; WERNER, C.; NÜESCH, D. (1993): Baseline Modelling for ERS-1 SAR Interferometry. In: Proceedings IGARSS, Tokyo.

SRIVASTAVA, S.K.; JAYARAMAN, V. (2001): Relating Interferometric Signature of Repeat Pass ERS-1 SAR Signals to Dynamic Land Cover Changes. In: Acta Astronautica, Vol. 48.

STRASSER, G.; SCHNEIDER, K.; MAUSER W. (1999): The Use of ERS SAR Data derived Soil Moisture Distributions for SVAT-Model Validation. In: Proceedings IGARSS, Hamburg.

SU, Z.; TORCH, P.A.; DE TORCH, F.P.; NACHTERGALE, L.; BART, C.; LIN, D.S. (1995): Preliminary Analysis Results of Various Remote Sensing Experiments in the Zwalm Catchment. In: Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Toulouse, CNES / IEEE.

TACONET, O.; VIDAL-MAJAR, D.; EMBLANCH, C.; NORMAND, M. (1996): Taking into Account Vegetation Effects to Estimate Soil Moisture from C-Band Radar Measurements. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 56.

TAYLER, G.R.; MAH, A.H.; KRUSE, F.H.; KIEREIN-YOUNG, K.S.; HEWSON, R.D.; BENNETT, B.A. (1996): The Extraction of Soil Dielectric Properties from AIRSAR Data. In: Internation Journal of Remote Sensing, Vol. 17.

TOURE, A.; THOMSON, K.P.B.; EDWARDS, G.; BROWN, R.J.; BRISCO, B.G. (1994): Adaption of the MIMICS Backscattering Model to the Agricultural Context – Wheat and Canola at L and C Band. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32,.

ULABY, F. T.; BUSH, T. F. (1976): Monitoring Wheat Growth with Radar. In: Photogram. Eng. Rem. Sens., Vol. 42, Nr.4.

ULABY, F. T.; BATLIVALA, P. P.; DOBSON, M. C. (1978): Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture.: Part I, Bare Soil. In: IEEE Transactions on Geoscience Electronics, Vol. GE-16.

ULABY, F. T.; BARE, J.E. (1979a): Look Direction Modulation Function of the Radar Backscattering Coefficient of Agricultural Fields. In: Photogr. Eng. Rem. Sens., Vol. 45.

ULABY, F.; BRADLEY, G.A.; DOBSON, M.C. (1979b): Microwave Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture: Part II – Vegetation Covered Soil. In: IEEE Trans. Geosci. Electron. Vol. GE-17.

ULABY, F.T.; MOORE, K.M.; FUNG, K.A. (1981): Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. I, Fundamentals and Radiometry. Artech House, Norwood.

ULABY, F.T.; MOORE, K.M.; FUNG, K.A. (1982a): Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. II, Radar Remote Sensing and Surface, Scattering and Emission Theory. Artech House, Norwood.

ULABY, F.T.; ASLAM, A.; DOBSON, M. C. (1982b): Effects of Vegetation Cover on the Radar Sensitivity to Soil Moisture. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-20.

ULABY, F.; DOBSON, M. C.; BRUNFELDT, D.C. (1983): Improvement of Moisture Estimation Accuracy of Vegetation-Covered Soil by Combined Active / Passive Microwave Sensing.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21.

ULABY, F. T.; ALLEN, C.T.; EGER III, G.; KANEMASU, E, (1984): Relating the Microwave Backscattering Coefficient to Leaf Area Index. In: Remote Sensing of Environment; Vol. 14.

ULABY, F.T.; MOORE, K.M.; FUNG, K.A. (1986): Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. III, From Theory to Applications. Artech House, Norwood.

ULABY, F. T.; SARABANDI, K.; MCDONALD, K.; WHITT; M.; DOBSON, M.C. (1990): Michigan Microwave Canopy Scattering Model. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 11.

Ulaby, F.T.; Dubois, P.C.; Van Zyl, J. (1996): Radar Mapping of Surface Soil Moisture.
In: Journal of Hydrology, Vol. 184.

VAN LEEUWEN, H.; BORGEAUD, M. (1997): Regional Application of ERS-1/2 in the Flevoland Agricultural Area in the Netherlands.In: Procceding Third ERS Symposium, Florence.

VAN OEVELEN, P. J.; HOEKMAN, D. H. (1999): Radar Backscatter Inversion Techniques for Estimation of Surface Soil Moisture: EFEDA-Spain and HAPEX-Sahel Case Studies.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37.

VINNIKOV, K.Y.; ROBOCK, A.; SPERANSKYA, N.A.; SCHLOSSER, C.A. (1996): Scales of Temporal and Spatial Variability of Midlatitude Soil Moisture. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 101.

WAGNER, W. (1998): A Comparison of ERS Scatterometer Retrieved Soil Moisture Data with Field Observations in the Ukraine. In: Proc. of a Joint ESA-Eumetsat Workshop on Emerging Scatterometer Applications – From Research to Operations. Noordwijk, The Netherlands.

WAGNER, W.; NOLL, J.; BORGEAUD, M; ROTT, H. (1999a):Monitoring Soil Moisture over the Canadian Prairies with the ERS Scatterometer.
In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37.

WAGNER, W.; LEMOINE, G.; BORGEAUD, M; ROTT, H. (1999b): A Study of Vegetation Cover Effects on ERS Scatterometer Data. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37.

WAGNER, W.; LEMOINE, G; ROTT, H. (1999c): A Method for Estimating Soil Moisture from ERS Scatterometer and Soil Data. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 70.

WAGNER, W.; SCIPAL, C. (2000): Large Scale Soil Moisture Mapping in Western Africa Using the ERS Scatterometer. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38.

WALESSA, M. (1999): Texture Preserving Despeckeling of SAR Images Using GMRFs.
In: Proceedings IGARSS, Hamburg.

WANG, J.R.; SCHMUGGE, T.J. (1980): An Empirical Model for the Complex Dielectric Permitivity of Soil as a Function of Water Content. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 18.

WANG, J.R (1980): The Dielectric Propertiers of Soil-Water Mixtures at Microwave Frequencies. In: Radio Science, Vol. 15.

WANG, J.R.; ENGMAN, E.T.; SHIUE, J.C.; RUSEK, M.; STEINMEIER, C. (1986): Microwave Backscatter from Agricultural Fields Observed By Shuttle Imaging Radar. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 24.

WANG, J.R.; HSU, A.; SHI, J.C.; O'NEILL, P.E.; ENGMAN, E.T. (1997): A Comparison of Soil Moisture Retrieval Models Using SIR-C Measurements Over the Little Washita River Watershed. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 59.

WEGMÜLLER, U.; WERNER, C. (1997): Retrieval of Vegetation Parameters with SAR Interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35.

WEGMÜLLER, U. STROZZI, T.; WEISE, T.; WERNER, C.L. (1997): ERS SAR Interferometry for Land Applications. Gamma Remote Sensing AG, Switzerland, Final Report ESTEC / Contract 11740/95/NL/PB(SC).

WEGMÜLLER, U. (1998): Soil Moisture Monitoring with ERS SAR Interferometry. Internet: http://earth.esa.int:80/florence/papers/wegmuller3/index.html (entnommen 23. August 2001)

WEGMÜLLER, U. STROZZI, T. FARR, T.; WERNER, C.L. (2000): Arid Land Surface Characterization with Repeat-Pass SAR Interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38.

WEIMANN, A. (1998): Inverting a Microwave Backscattering Model by the Use of a Neural Network for the Estimation of Soil Moisture. In: Proceedings IGARSS, Seattle.

WILHEIT, T.T. (1978): Radiative Transfer in a Plane Stratified Dielectric. In: IEEE Trans. Geosci. Electron. Vol. GE-16.

WOBSCHALL, D. (1977): A Theory of the Complex Dielectric Permittivity of Soil Containing Soil Water, the Semidisperse Model. In: IEEE Trans. Geosci. Electron. Vol. GE-15.

WU, S.T., FUNG, A.K. (1972): A Noncoherent Model for Microwave Emissions and Backscattering from the Sea Surface. Journal of Geophysical Research, Vol. 77.

WU, T.D.; CHEN, K.S.; SHI, J.; FUNG, A.K. (2001): A Transition Model for the reflection Coefficient in Surface Scattering. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. (1992): Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30.

ZEBKER, H.A.; GOLDSTEIN, R.M. (1986): Topographic Mapping from ERS-1 and SEASAT Radar Interferometry. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 91.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. (1992): Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30.

ZIBRI, M.; TACONET, O.; LE HEGARAT-MASCLE, S.; VIDAL-MADJAR, D.; EMBLANCH, C.; LOUMAGNE, C.; NORMAND, M. (1997): Backscattering Behaviour and Simulation Comparison over Bare Soils Using SIR-C/X-SAR abd ERASME 1994 Data over Orgeval. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 59.

ZIBRI, M.; DECHAMBRE, M. (2002): A New Empirical Model to Retrieve Soil Moisture And Roughness from C-Band Radar Data. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 84.

ZIBRI, M.; LE HEGARAT-MASCLE, S.; OTTLE, C.; KAMMOUN, B.; GUERIN, C. (2003): Surface Soil Moisture Estimation from the Synergistic Use of the (Multi-incidence and Multi-resolution) Active Microwave ERS Wind Scatterometer and SAR Data. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 86.

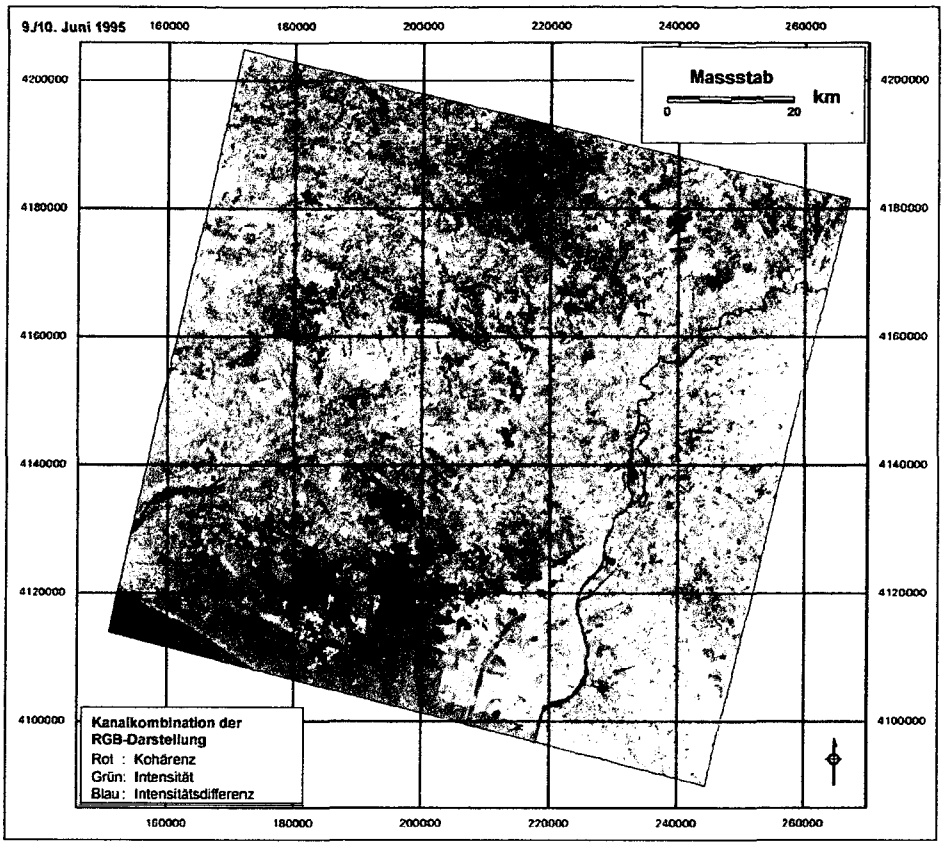

Abb.1: RGB-Darstellung des ERS-1/2 InSAR Tandem-Datensatzes der Aufnahmezeitpunkte *9. / 10. Juni 1995 des Gebietes „Sevilla"*.

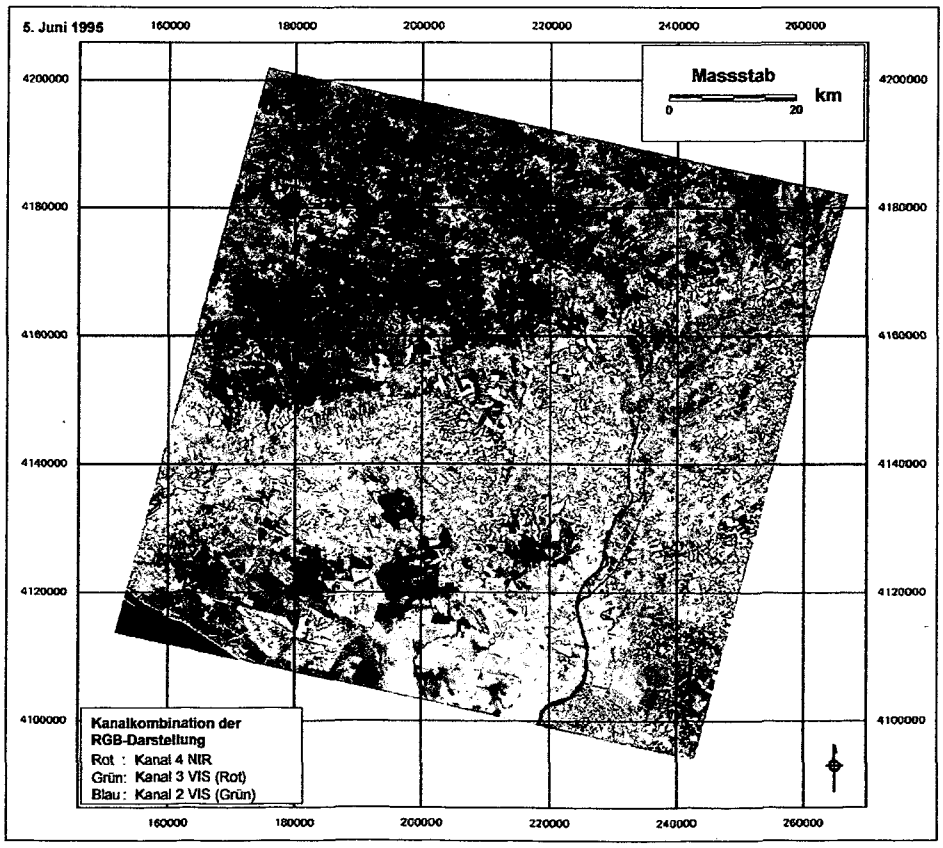

Abb. 2: Landsat 5 TM Szene des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* vom *5. Juni 1995*.

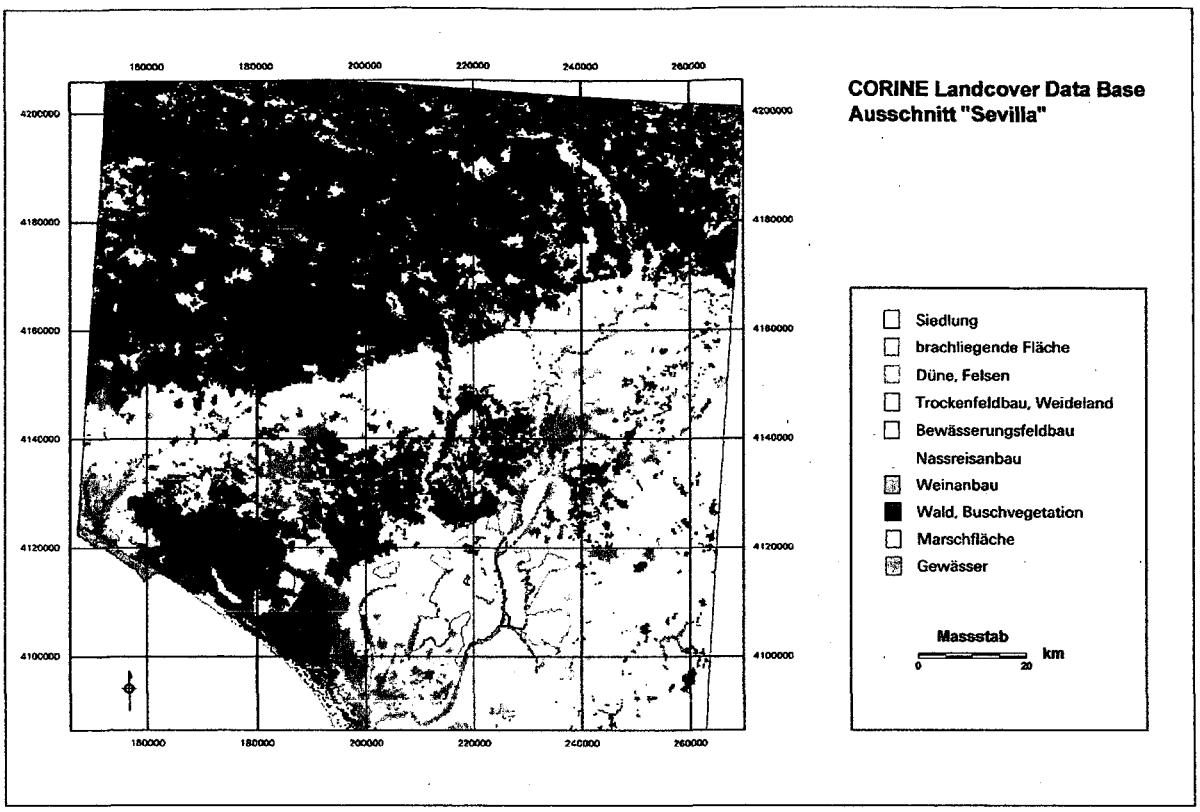

Abb. 3: *CORINE Landnutzungsklassifikation* für das Untersuchungsgebiet *„Sevilla"*.

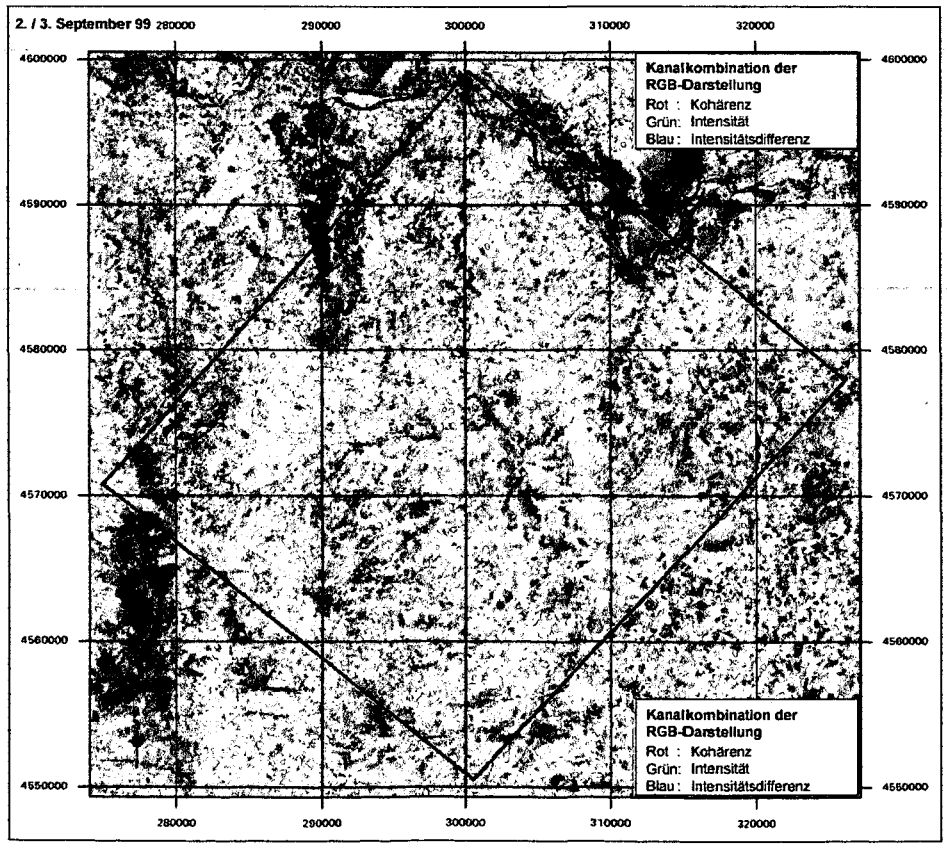

Abb. 4: RGB-Darstellung des ERS-1/2 InSAR Tandem-Datensatzes
der Aufnahmezeitpunkte 2. / 3. September 1999 im Untersuchungsgebiet *„La Guarena"*.

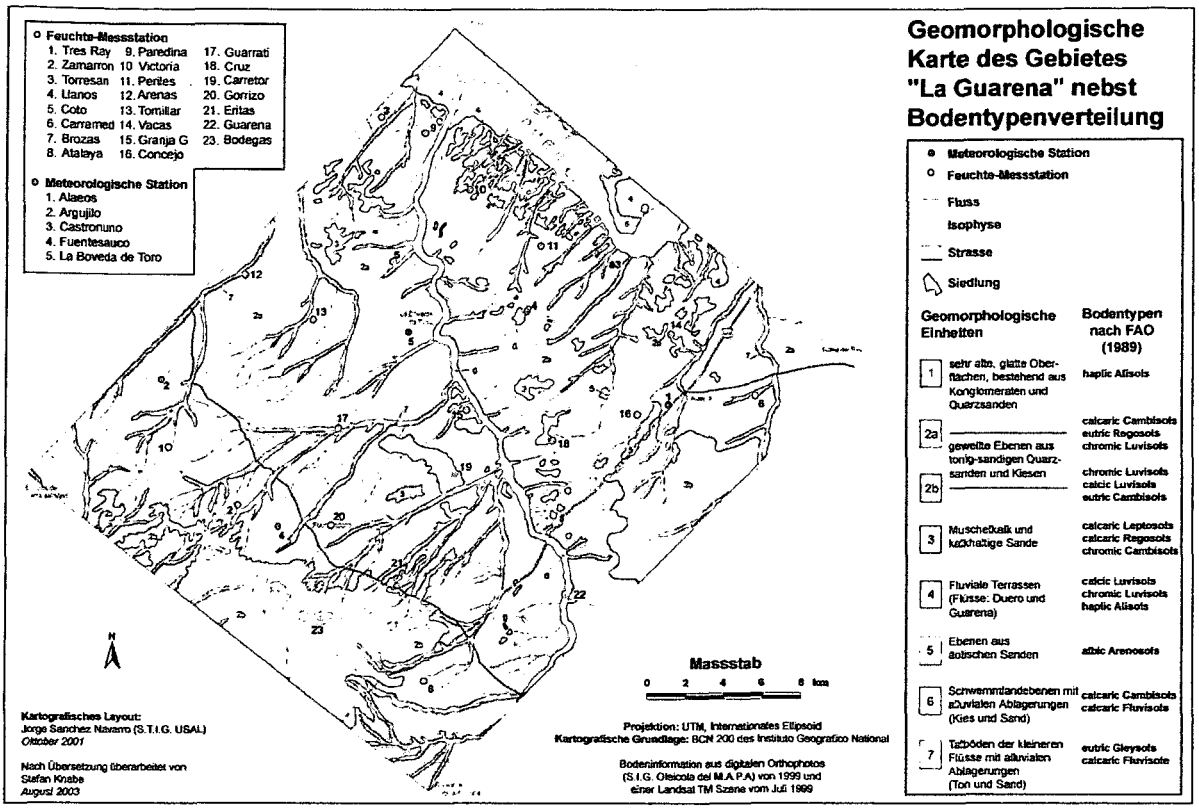

Abb. 5: Geomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* zuzüglich der räumlichen Verteilung der Bodentypen sowie der Bodenfeuchte-Messstationen (**Rot**) und der meteorologischen Stationen (**Blau**).
(Quelle: Geographisches Institut der Universität Salamanca)

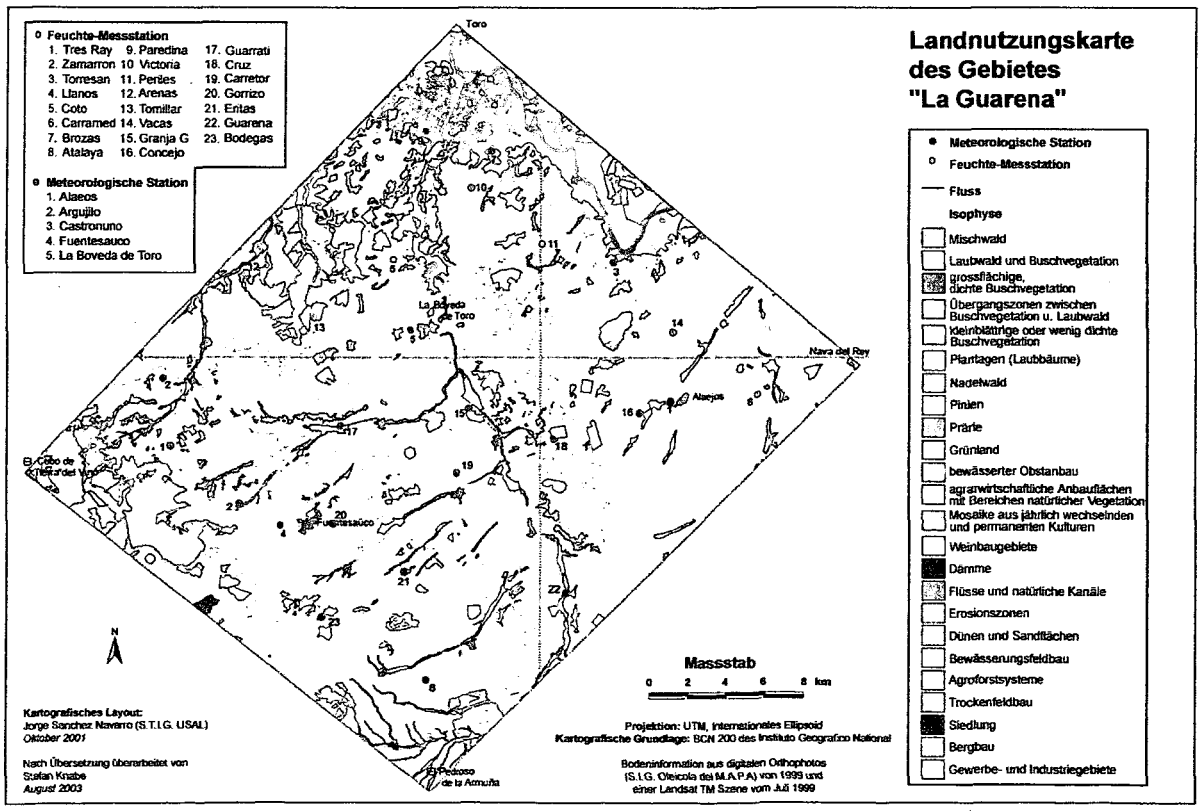

Abb. 6: *Landnutzungsklassifikation* des Untersuchungsgebietes *„La Guarena" aus dem Jahr 1999* zuzüglich der räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte-Messstationen (**Rot**) und der meteorologischen Stationen (**Blau**).
(Quelle: Geographisches Institut der Universität Salamanca)

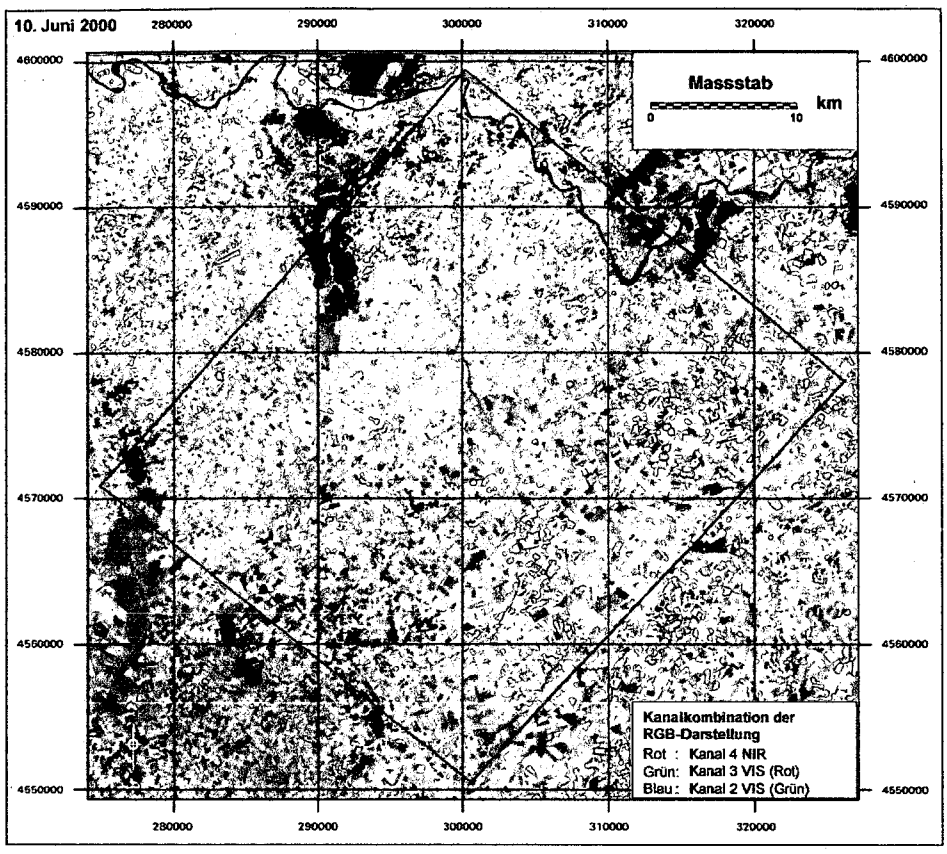

Abb. 7: Landsat 7 ETM+ Szene des Untersuchungsgebietes *„La Guarena"* vom *10. Juni 2000*

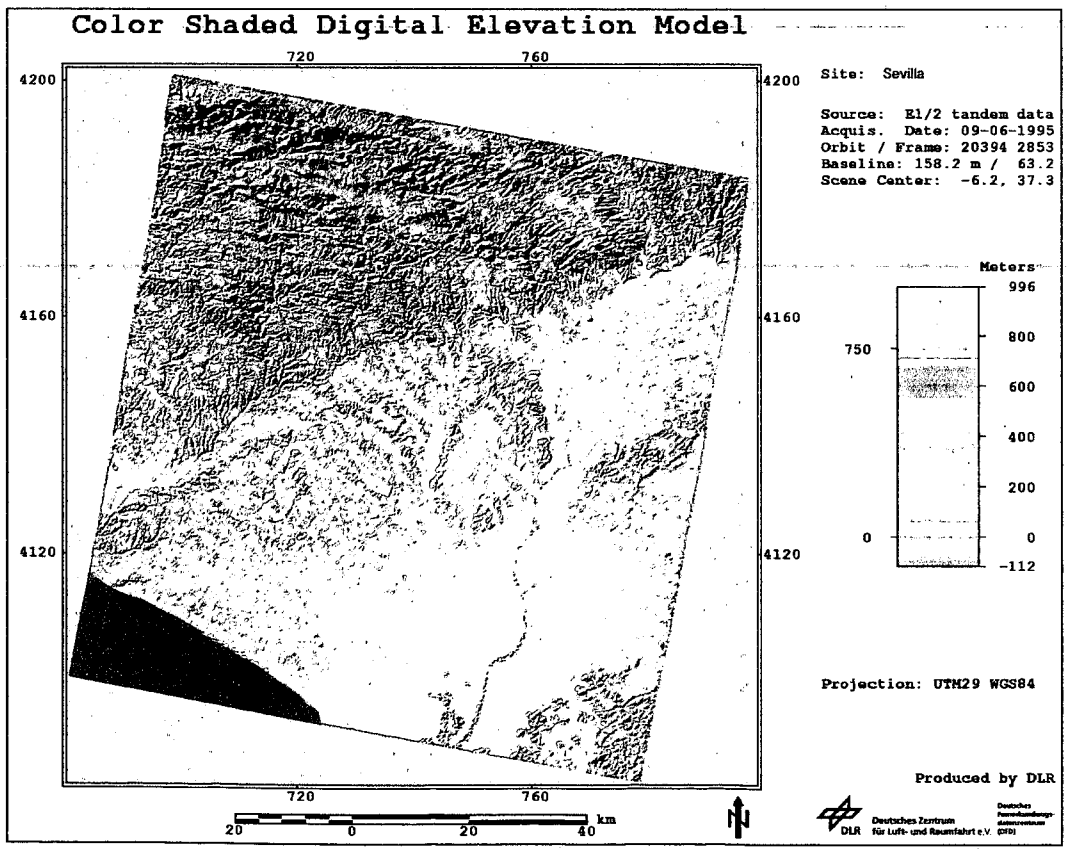

Abb. 8: Digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"*,
erstellt auf Basis der Phaseninformation des Tandem-Paares *9. / 10. Juni 1995.*

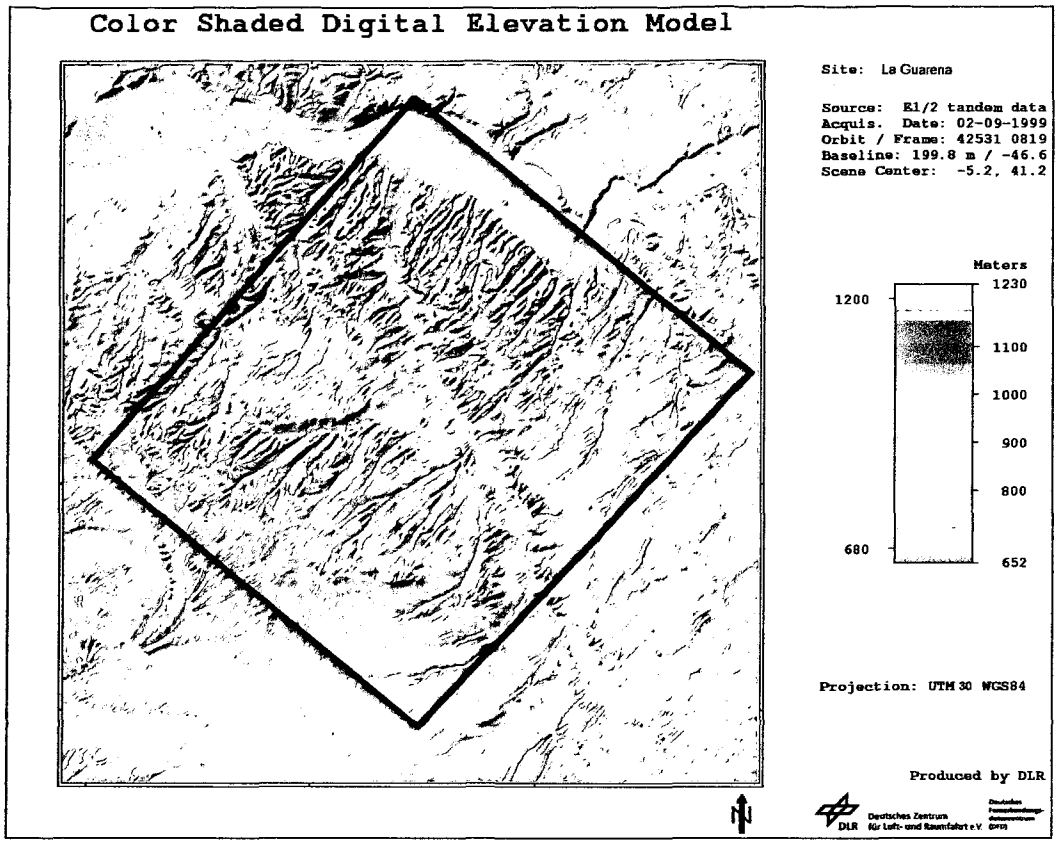

Abb. 9: Digitales Höhenmodell des Gebietes *„La Guarena"*
erstellt auf Basis der Phaseninformation des Tandem-Paares *2. / 3. September 1999.*

Year	Crop Type	Minimum Sowing Date	Maximum Sowing Date	Minimum Flowering Date	Maximum Flowering Date	Minimum Harvest Date	Maximum Harvest Date
1995	Common Winter Wheat	15/11/94	25/12/94	05/02/95	25/04/95	25/05/95	25/06/95
1995	Winter Durum Wheat	25/11/94	15/12/94	15/02/95	25/03/95	15/05/95	25/06/95
1995	Winter Barley	25/11/94	25/11/94	05/03/95	05/03/95	15/05/95	15/05/95
1995	Grain Maize	25/02/95	25/02/95	15/07/95	15/07/95	k.A.	K.A.
1995	Potatoes	10/12/94	15/01/95	05/03/95	25/04/95	25/04/95	25/05/95
1995	Winter Rape	25/10/94	25/11/94	25/01/95	15/04/95	15/05/95	05/07/95
1995	Summer Rape	25/02/95	25/02/95	05/04/95	05/04/95	05/07/95	05/07/95
1995	Sunflower Seed	05/02/95	15/04/95	05/04/95	05/06/95	25/06/95	05/09/95
1995	Cotton	05/03/95	15/03/95	25/05/95	05/08/95	25/09/95	05/10/95
1995	Green Maize	25/02/95	25/02/95	25/04/95	25/04/95	15/06/95	15/06/95
1996	Common Winter Wheat	05/12/95	05/02/96	05/04/96	01/05/96	05/06/96	25/06/96
1996	Common Spring Wheat	15/02/96	15/02/96	05/04/96	05/04/96	25/06/96	25/06/96
1996	Winter Durum Wheat	15/11/95	05/12/95	05/03/96	15/04/96	15/05/96	05/07/96
1996	Oats	25/02/96	25/02/96	15/04/96	15/04/96	25/06/96	25/06/96
1996	Green Maize	25/03/96	15/04/96	05/05/96	05/06/96	25/08/96	25/08/96
1996	Rice	20/05/96	01/06/96	15/08/96	30/08/96	15/10/96	30/10/96
1996	Potatoes	25/01/96	15/02/96	25/03/96	15/05/96	05/05/96	25/06/96
1996	Sunflower Seed	15/02/96	15/05/96	25/04/96	01/08/96	28/07/96	05/10/96
1996	Cotton	05/03/96	01/05/96	15/07/96	01/08/96	25/09/96	05/10/96
1996	Temporary Grasses	20/02/96	20/02/96	k.A.	k.A.	20/06/96	20/06/96

Tab. 1: MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* der Jahre *1995* und *1996.*

Segment number	Point number	Crop type	Sowing date	Flowering date	Harvest date	X (UTM 29) WGS 84	Y (UTM 29) WGS 84
2	2	Sunflower seed	12-Apr-96	05-Jun-96	25-Aug-96	752810	4153640,1
2	4	Sunflower seed	12-Apr-96	05-Jun-96	25-Aug-96	753164	4153574,5
2	8	Sunflower seed	12-Apr-96	05-Jun-96	25-Aug-96	753131,2	4153397,5
2	10	Common winter wheat	25-Jan-96	05-Apr-96	25-Jun-96	752744,4	4153286,2
2	12	Common winter wheat	25-Jan-96	05-Apr-96	25-Jun-96	753098,4	4153220,6
2	18	Sunflower seed	05-Mrz-96	05-Jun-96	25-Aug-96	752875,6	4153994,1
2	20	Sunflower seed	05-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	753583,6	4153862,9
2	24	Sunflower seed	05-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	753373,8	4153718,7
2	26	Sunflower seed	05-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	753518	4153508,9
2	32	Common winter wheat	25-Jan-96	05-Apr-96	25-Jun-96	753242,6	4153010,8
2	34	Common winter wheat	25-Jan-96	05-Apr-96	25-Jun-96	752678,8	4152932,2
2	40	Common winter wheat	25-Jan-96	05-Apr-96	25-Jun-96	753177	4152656,8
3	2	Cotton	25-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	762622,9	4151821,4
3	18	Grain maize	15-Apr-96	05-Jun-96	25-Aug-96	762688,5	4152175,4
3	22	Cotton	25-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	762478,7	4152031,2
3	30	Grain maize	25-Mrz-96	05-Mai-96	25-Aug-96	763265,2	4151336,2
4	2	Sunflower seed	15-Mai-96	25-Jun-96	05-Sep-96	772455,5	4149999,1
4	4	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	25-Aug-96	772809,4	4149933,5
4	10	Cotton	05-Apr-96	25-Jul-96	25-Sep-96	772389,9	4149645,2
4	12	Sunflower seed	05-Mai-96	15-Jul-96	05-Sep-96	772743,8	4149579,6
4	18	Cotton	05-Apr-96	25-Jul-96	25-Sep-96	772521,1	4150353,1
4	20	Potatoes	15-Feb-96	25-Mrz-96	25-Jun-96	773229	4150221,9
4	22	Cotton	05-Apr-96	25-Jul-96	25-Sep-96	772311,3	4150208,9
4	24	Grain maize	15-Apr-96	05-Jun-96	25-Aug-96	773019,2	4150077,7
4	26	Grain maize	15-Apr-96	05-Jun-96	25-Aug-96	773163,4	4149867,9
4	28	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	25-Aug-96	772953,6	4149723,7
4	30	Sunflower seed	05-Mai-96	15-Jul-96	05-Sep-96	773097,8	4149513,9
4	32	Sunflower seed	05-Mai-96	15-Jul-96	05-Sep-96	772888	4149369,8
4	34	Cotton	15-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	772324,2	4149291,2
4	36	Potatoes	05-Feb-96	25-Mrz-96	15-Jun-96	773032,2	4149160
4	38	Cotton	05-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	772114,5	4149147
4	40	Cotton	15-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	772822,4	4149015,8
5	2	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	741135,5	4145633,6
5	4	Sunflower seed	15-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	741489,4	4145568
5	10	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	741069,9	4145279,7
5	12	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	741423,8	4145214,1
5	18	Common winter wheat	05-Dez-95	15-Apr-96	15-Jun-96	741201,1	4145987,6
5	20	Sunflower seed	15-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	741909	4145856,4
5	24	Sunflower seed	15-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	741699,2	4145712,2
5	26	Sunflower seed	15-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	741843,4	4145502,4
5	28	Sunflower seed	15-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	741633,6	4145358,2
5	30	Sunflower seed	15-Mrz-96	05-Jun-96	15-Aug-96	741777,8	4145148,4
5	32	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	741568	4145004,3
5	34	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	741004,2	4144925,7
5	36	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	741712,2	4144794,5
5	38	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	740794,5	4144781,5
5	40	Sunflower seed	10-Mrz-96	01-Jun-96	10-Aug-96	741502,4	4144650,3
6	20	Potatoes	12-Feb-96	15-Apr-96	15-Jun-96	751741,6	4144033,9
6	24	Potatoes	25-Jan-96	k.A.	05-Mai-96	751531,8	4143889,7
6	32	Potatoes	12-Feb-96	15-Apr-96	15-Jun-96	751400,6	4143181,8
7	18	Sunflower seed	15-Feb-96	25-Mai-96	15-Aug-96	749230,9	4134328,9

Tab. 2: Detaillierter MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* des Jahres *1996*.

Segment number	Point number	Crop type	Sowing date	Flowering date	Harvest date	X (UTM 29) WGS 84	Y (UTM 29) WGS 84
7	36	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	25-Aug-96	749742	4133135,7
7	38	Sunflower seed	25-Mrz-96	15-Mai-96	25-Aug-96	748824,3	4133122,8
8	4	Potatoes	05-Feb-96	15-Apr-96	05-Jun-96	759332,2	4132090,8
8	18	Sunflower seed	01-Mai-96	01-Aug-96	05-Okt-96	759043,8	4132510,4
8	22	Cotton	01-Mai-96	01-Aug-96	05-Okt-96	758834	4132366,2
8	30	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	759620,5	4131671,2
8	32	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	759410,8	4131527
8	36	Temporary grasses	20-Feb-96	k.A.	20-Jun-96	759554,9	4131317,2
9	2	Common winter wheat	05-Feb-96	15-Apr-96	20-Jun-96	768810,7	4130333,9
9	4	Common winter wheat	05-Feb-96	15-Apr-96	20-Jun-96	769164,7	4130268,3
9	10	Potatoes	15-Feb-96	05-Apr-96	15-Jun-96	768745,1	4129979,9
9	12	Cotton	01-Mai-96	01-Aug-96	05-Okt-96	769099,1	4129914,3
9	20	Common winter wheat	05-Feb-96	15-Apr-96	20-Jun-96	769584,3	4130556,6
9	24	Common winter wheat	05-Feb-96	15-Apr-96	20-Jun-96	769374,5	4130412,5
9	26	Sunflower seed	15-Mrz-96	20-Jun-96	15-Aug-96	769518,7	4130202,7
9	28	Sunflower seed	10-Mrz-96	15-Jun-96	15-Aug-96	769308,9	4130058,5
9	30	Sunflower seed	10-Mrz-96	15-Jun-96	15-Aug-96	769453	4129848,7
9	32	Potatoes	15-Feb-96	05-Apr-96	15-Jun-96	769243,3	4129704,5
9	38	Potatoes	05-Feb-96	15-Mai-96	25-Jun-96	768469,7	4129481,8
9	39	Sunflower seed	10-Mrz-96	15-Jun-96	15-Aug-96	768823,7	4129416,1
9	40	Sunflower seed	10-Mrz-96	15-Jun-96	15-Aug-96	769177,7	4129350,5
10	30	Common winter wheat	05-Feb-96	01-Mai-96	15-Jun-96	738133	4125483,2
10	36	Winter durum wheat	25-Nov-95	15-Apr-96	05-Jul-96	738067,4	4125129,2
10	40	Oats	25-Feb-96	15-Apr-96	25-Jun-96	737857,7	4124985
11	2	Rice	25-Mai-96	28-Aug-96	15-Okt-96	757155,8	4122323,6
11	4	Rice	24-Mai-96	15-Aug-96	15-Okt-96	757509,8	4122258
11	10	Rice	25-Mai-96	28-Aug-96	15-Okt-96	757090,2	4121969,7
11	18	Rice	24-Mai-96	15-Aug-96	15-Okt-96	757221,4	4122677,6
11	20	Rice	24-Mai-96	15-Aug-96	15-Okt-96	757929,4	4122546,4
11	22	Rice	20-Mai-96	15-Aug-96	15-Okt-96	757011,6	4122533,4
11	24	Rice	30-Mai-96	30-Aug-96	15-Okt-96	757719,6	4122402,2
11	28	Rice	24-Mai-96	15-Aug-96	15-Okt-96	757654	4122048,2
11	30	Rice	01-Jun-96	15-Aug-96	30-Okt-96	757798,2	4121838,4
11	32	Rice	01-Jun-96	15-Aug-96	30-Okt-96	757588,4	4121694,3
11	34	Rice	25-Mai-96	25-Aug-96	15-Okt-96	757024,6	4121615,7
11	36	Rice	30-Mai-96	30-Aug-96	15-Okt-96	757732,6	4121484,5
11	38	Rice	25-Mai-96	28-Aug-96	15-Okt-96	756814,8	4121471,5
11	40	Rice	25-Mai-96	25-Aug-96	15-Okt-96	757522,8	4121340,3
12	2	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	766988,4	4120501,4
12	4	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767342,4	4120435,8
12	10	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	766922,8	4120147,4
12	18	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767054	4120855,4
12	20	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767761,9	4120724,1
12	22	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	766844,2	4120711,2
12	26	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767696,3	4120370,2
12	28	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767486,5	4120226
12	32	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767420,9	4119872
12	36	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767565,1	4119662,2
12	38	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	766647,4	4119649,3
12	40	Sunflower seed	05-Apr-96	15-Jun-96	05-Sep-96	767355,3	4119518
13	30	Common winter wheat	25-Dez-95	05-Apr-96	05-Jun-96	750773,3	4157027,9

Tab. 3: Detaillierter MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* des Jahres *1996*.

Segment number	Point number	Crop type	Sowing date	Flowering date	Harvest date	X (UTM 29) WGS 84	Y (UTM 29) WGS 84
13	40	Common winter wheat	25-Jan-96	05-Apr-96	25-Jun-96	750497,9	4156529,8
14	20	Potatoes	05-Feb-96	05-Apr-96	15-Jun-96	770553,6	4154114,4
14	24	Potatoes	05-Feb-96	05-Apr-96	15-Jun-96	770343,8	4153970,2
15	2	Sunflower seed	15-Apr-96	05-Jun-96	15-Aug-96	738479,7	4149522,6
15	10	Sunflower seed	15-Apr-96	05-Jun-96	15-Aug-96	738414,1	4149168,7
15	12	Sunflower seed	15-Apr-96	05-Jun-96	15-Aug-96	738768,1	4149103,1
15	20	Sunflower seed	25-Mrz-96	05-Jun-96	28-Jul-96	739253,3	4149745,4
15	22	Sunflower seed	22-Feb-96	25-Mai-96	15-Aug-96	738335,5	4149732,4
15	24	Sunflower seed	25-Mrz-96	05-Jun-96	28-Jul-96	739043,5	4149601,2
15	26	Sunflower seed	15-Feb-96	25-Apr-96	15-Aug-96	739187,7	4149391,4
15	32	Cotton	15-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	738912,3	4148893,3
15	34	Cotton	15-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	738348,5	4148814,7
15	36	Winter durum wheat	05-Dez-95	05-Apr-96	05-Jun-96	739056,4	4148683,5
15	38	Sunflower seed	15-Mrz-96	25-Mai-96	15-Aug-96	738138,7	4148670,5
15	40	Cotton	15-Mrz-96	15-Jul-96	25-Sep-96	738846,7	4148539,3
16	2	Common spring wheat	15-Feb-96	05-Apr-96	25-Jun-96	758148,5	4145897,6
16	12	Common winter wheat	25-Jan-96	25-Apr-96	05-Jun-96	758436,8	4145478,1
16	18	Sunflower seed	15-Mrz-96	15-Jun-96	15-Aug-96	758214,1	4146251,6
16	22	Winter durum wheat	15-Nov-95	15-Apr-96	05-Jun-96	758004,3	4146107,4
16	24	Sunflower seed	15-Mrz-96	15-Jun-96	15-Aug-96	758712,2	4145976,2
16	28	Common winter wheat	25-Jan-96	25-Apr-96	05-Jun-96	758646,6	4145622,2
16	38	Winter durum wheat	15-Nov-95	05-Mrz-96	15-Mai-96	757807,5	4145045,5
17	39	Cotton	01-Mai-96	01-Aug-96	k.A.	766148,3	4133308,9
17	40	Cotton	01-Mai-96	01-Aug-96	25-Sep-96	766502,3	4133243,3

Tab. 4: Detaillierter MARS Erntekalender des Untersuchungsgebietes *„Sevilla"* des Jahres *1996*.

Lebenslauf

Der Autor Stefan Knabe, geboren am 4.Januar 1972, besuchte im Anschluss an das Abitur am *Gymnasium Miesbach* im Frühjahr *1992* und dem Ableisten des Zivildienstes die *Technische Universität München (1993 – 1995).* Nach dem Vordiplom im Studienfach *Geographie wechselte er zum Sommersemester 1995 an* die *Ludwig-Maximilians-Universität München*, an der er im Hauptstudium *Physische Geographie* belegte *(1995 – 2000).*

Während des Studiums absolvierte Stefan Knabe mehrmonatige Praktika, u.a. am *Fraunhofer Institut für atmosphärische Umweltforschung* in Garmisch-Partenkirchen und am *Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)* des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)* in Oberpfaffenhofen, an dem er anschließend auch seine Diplomarbeit anfertigte. Das Thema der Arbeit lautete „*Vergleichende Untersuchungen zur Waldkartierung und Erfassung forstlicher Parameter mittels hochauflösender, polarimetrischer E-SAR Radar-Daten sowie SIR-C / X-SAR und Hyperspektraldaten im östlichen Erzgebirge*".

Nach dem Erlangen des *Diploms in Physischer Geographie* im Frühjahr *2000* arbeite er am *DFD* des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)* als Doktorand *(2000 – 2003).*

Stefan Knabe ist Doktoratsstudent der Naturwissenschaften am *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung* der *Technischen Universität Wien* im Fachbereich *Vermessung und Geoinformation.* Das Rigorosum erfolgt voraussichtlich am 20. April 2004.

Stefan Knabe

Wien, den 1. April.2004