

Abschlussbericht



Gefördert durch das DLR
FK 50 EE 0802

– R. Knuth & C. Schmullius –

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie

Übersicht

I. Teil – Kurze Darstellung

II. Teil – Eingehende Darstellung

I. Teil

- Kurze Darstellung -

Abschlussbericht



Gefördert durch das DLR
FK 50 EE 0802

I. Kurze Darstellung

– R. Knuth & C. Schmullius –

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
1 Einleitung.....	5
1.1 Aufgabe von FRA-SAR 2010.....	5
1.2 Relevante Erfahrungen der FSU Jena vor dem Projektstart.....	5
1.3 Projektaktivitäten	7
1.3.1 Überblick über die Inhalte der Arbeitspakete	7
1.3.1.1 Projektkoordination (AP 1000).....	7
1.3.1.2 Aufbau der Projektdatenbank (AP 2000)	7
1.3.1.2.1 TerraSAR-X Testgebiets-Auswahl (AP 2100).....	8
1.3.1.2.2 X+C+L Radarkompositen-Auswahl (AP 2200).....	8
1.3.1.2.3 Geokodierte, ko-referenzierte Datenbasis (AP 2300)	8
1.3.1.3 Methodenentwicklung (AP 3000).....	8
1.3.1.3.1 TerraSAR-X Verarbeitung (AP 3100).....	8
1.3.1.3.2 X+C+L Radarkompositen-Auswertung (AP 3200)	9
1.3.1.4 Trainingshandbuch (AP 3300)	9
1.3.1.5 Validierung (AP 4000)	9
1.3.1.5.1 Validierung der TerraSAR-X Ergebnisse (AP 4100)	9
1.3.1.5.2 Validierung der X+C+L Auswertung (AP 4200)	9
1.3.1.5.3 Beschreibung der Fehlergrößen (AP 4300)	9
1.3.1.6 Methodenumsetzung innerhalb von FRA 2010 (AP 5000)	10
1.3.1.7 Transfermöglichkeiten der X+C+L Methodik (AP 6000)	10
1.4 Ausgangssituation, Wissenschaftlich-technischer Stand	10
1.4.1 Methodik der Radarauswertung	10
1.4.1.1 Visuelle Interpretation	10
1.4.1.2 Segmentierung	11
1.4.1.3 Verknüpfung mit ALOS PALSAR Daten und Perspektiven der Pauli-Klassifikation.....	12
1.4.1.4 Meteorologische Einflussfaktoren auf das X-Band	14
1.4.2 Stichprobenverfahren	14
2 Literaturverzeichnis.....	16

Abkürzungen

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
AP	Arbeitspaket
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de La Biodiversidad
DEM	Digital Elevation Model
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EC	European Commission
ERS-1/2	European Remote-Sensing Satellite 1 & 2
ESA	European Space Agency
ESAC	European Space Astronomy Centre
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FRA	Forest Resources Assessment
FRA-SAR 2010	Forest Resources Assessment with Synthetic Aperture Radar
FSU	Friedrich-Schiller-Universität
GEO	Group on Earth Observation
GIS	Geographisches Information System Geoinformationssystemen
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GOFC-GOLD	Global Observation of Forest Cover and Land Dynamics
GSE	GMES Services Element
IGARSS	International Geoscience and Remote Sensing Symposium
ISRSE	International Symposium on Remote Sensing of Environment
JAXA	Japan Aerospace Exploration Center
JERS	Japanese Earth Resources Satellite
JRC	Joint Research Center (EC)
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
Radar	Radio Detection And Ranging
REDD	Reducing Emissions from Deforestation and Degradation
ROI	Region of Interest
RSS	Remote Sensing Survey (ergänzende Fernerkundungsstudie zum FRA)
SAG	Space Advisory Group
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIR-C/X	Spaceborne Imaging Radar (C/X-band)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TSX	TerraSAR-X
UN	United Nations
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1-1: FRA-SAR 2010 Projektablaufplan.....</i>	<i>7</i>
--	----------

1 Einleitung

FRA-SAR 2010 (*Forest Resources Assessment with Synthetic Aperture Radar*) ist ein Projekt im Rahmen der Nutzungsvorbereitung von räumlich hoch aufgelösten TerraSAR-X Daten. Erstmals wurden diese Radardaten im Rahmen des gegenwärtigen globalen *Forest Resources Assessment* (FRA 2010) der Vereinten Nationen eingesetzt. Innerhalb der Tropen wurden 350 Gebiete ausgewählt, welche eine nahezu permanente Wolkenbedeckung aufweisen und somit nur bedingt großflächig kartiert werden können. Anhand der TerraSAR-X Daten sind Waldkarten nach Vorgaben der Welternährungsorganisation erstellt worden. Schließlich wurde das Synergiepotential von multifrequenten SAR-Daten für eine Ableitung von Waldstrukturparametern in fünf ausgewählten Gebieten untersucht.

1.1 Aufgabe von FRA-SAR 2010

Für den gegenwärtigen globalen Waldzustandsreport für das Jahr 2010 und auch alle zukünftigen globalen Waldzustandsberichte der Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen (UN FAO) werden unterstützend Fernerkundungsdaten systematisch ausgewertet. Durch diese Ergänzung werden sowohl nationale Kartierungen unterstützt, als auch die Erhebungsmöglichkeiten der Vereinten Nationen vorangetrieben. Optoelektronische Daten von Sensoren der Landsat Baureihe stehen dabei im Mittelpunkt der Fernerkundungsdatenauswertung. Wegen der großräumigen und nahezu permanenten Wolkenbedeckung etlicher tropischer Regionen reichen diese optischen Satellitenbilder jedoch keinesfalls aus, um daraus verlässliche, immer wiederkehrende Landbedeckungsklassifikationen abzuleiten. Damit die entsprechenden Informationslücken in diesen besonders artenreichen, natürlichen Urwaldregionen vermieden werden können war es die primäre Aufgabe des Projektes FRA-SAR 2010, Algorithmen zur Ableitung der Landbedeckung anhand von Radardaten zu entwickeln. Aktive Mikrowellen Sensoren sind weitestgehend von Witterungserscheinungen der Atmosphäre unbeeinflusst und können daher jederzeit verlässliche Informationen in den Tropen aufzeichnen. Deswegen war geplant auf Stichprobenflächen innerhalb der gesamten Tropen, Methoden auf Basis der räumlich hoch aufgelösten X-Band SAR-Daten zu entwickeln. Diese Methoden sollten dann in der Lage sein die Landbedeckung auf den insgesamt 350 X-Band Untersuchungsgebieten weitgehend automatisiert zu erfassen und mit den so abgeleiteten Waldkarten den Waldzustandsbericht der Vereinten Nationen für das Jahr 2010 zu vervollständigen. Eine zusätzliche Ableitung von Waldstrukturparametern aus multifrequenten Radardaten steht im direkten Zusammenhang mit diesen Untersuchungen und kennzeichnet die zweite Aufgabe des Projektes FRA-SAR 2010. Mit dem Ziel Waldstrukturparameter großflächig abzuleiten, stand dabei im Zentrum dieser zweiten Analyse eine synergetische Auswertung von X+C+L-Band SAR-Daten aus dem All in insgesamt fünf Gebieten mit tropischem Regenwald.

1.2 Relevante Erfahrungen der FSU Jena vor dem Projektstart

Die Professur für die Fernerkundung am Institut für Geographie der Friedrich-Schiller-Universität Jena wird seit Januar 2000 von Frau Prof. Christiane Schmullius geleitet. Sie verfügt durch ihre 10 jährige

Tätigkeit beim DLR über umfangreiche Projekterfahrung, ist insbesondere auf dem Gebiet der Radarfernerkundung eine ausgewiesene Expertin und ist Mitglied in verschiedenen nationalen und internationalen Gutachtergremien (SAG, ESAC, EC FP4, 5, 6, 7 und 8, Helmolz Gemeinschaft). Der Lehrstuhl für Fernerkundung ist demzufolge spezialisiert auf die wissenschaftliche Erderforschung mit Satellitendaten und Geoinformationssystemen (GIS). Im Zentrum der interdisziplinären Forschungsprojekte am Lehrstuhl steht die anspruchsvolle Methodenentwicklung zur Erfassung dynamischer Landoberflächenparameter für eine ganzheitliche Landschaftssystemanalyse.

Durch die Koordination des EC Projekts "*SIBERIA - SAR Imaging for Boreal Ecology and Radar Interferometry Applications*" (1998-2000) und des "*GMES-RUSSIA*" Projekts (2002-2003), sowie der Teilnahme an den ESA Projekten "*GSE Forest Monitoring*", kann der Lehrstuhl auf ausgezeichnete Expertise für die Analyse von Radaraufnahmen im Bereich der borealen Wälder verweisen. Von 2002-2005 koordinierte der Lehrstuhl das Projekt "*SIBERIA-II: Multisensor Concepts for Greenhouse Gas Accounting of Northern Eurasia*". In Zusammenarbeit mit 14 weiteren Institutionen wurden bei diesem Vorhaben alle verfügbaren geowissenschaftlichen Satellitendaten genutzt, um Landoberflächenparameter für Klimamodelle abzuleiten. Einer Beteiligung an den zwei deutschen Projekten "*Phymo*" (DFG, 2002-2003) und "*TerraDew*" für die TerraSAR-X Vorbereitung (BMBF/DLR, 2002-2004), die sich mit der Analyse geometrisch hoch aufgelöster SAR-Daten beschäftigten, folgte die Erforschung von Skalierungseffekten im Projekt "*ENVILAND*" (BMBF/DLR 2005-2008). Besonders wertvoll für das Projekt FRA-SAR 2010 war die Ernennung von Frau Prof. Schmullius zum Co-chair des Land Cover Implementation Teams für GOFC-GOLD (*Global Observation of Forest Cover and Land Dynamics*, ein Gremium der FAO Initiative: *Global Terrestrial Observation System* (GTOS)). Dieses internationale Expertenteam setzt sich für die Weiterentwicklung und weltweite Umsetzung von Harmonisierungs- und Standardisierungs-Prozeduren ein. Ziel der Arbeiten dieser Gruppe ist es, die Erfüllung der Anforderungen des UNFCCC, GMES und der Group on Earth Observation (GEO) insbesondere im Bereich der Landbedeckungserhebungen umzusetzen. In diesem Kontext hat Frau Prof. Schmullius auch direkt die Entwicklung der Fernerkundungsstudie der FAO (*Remote Sensing Survey* (RSS)) für den globalen Waldzustandsbericht 2010 (FRA 2010) begleitet und die UN Behörde von einer Kooperation und dem Einsatz von Radardaten im Rahmen von FRA-SAR 2010 überzeugt.

Die Forschungs- und Lehrschwerpunkte der Professur für Fernerkundung zum Zeitpunkt der Antragstellung lagen insbesondere in den Bereichen der

- angewandten Fernerkundung für die Landnutzungskartierung (Landwirtschaft, Waldgebiete), und der Ableitung von Oberflächenparametern für hydrologische sowie für Vegetations- und Klimamodelle (Bedeckungsgrad, Biomasse, Pflanzenphänologie, Bodenfeuchte);
- Forschung im Bereich der Fernerkundung: Signalanalysen hinsichtlich des Gehalts an geophysikalischen Informationen, Radarinterferometrie, Bildprozessierung, Vorbereitung zukünftiger Missionen.

Deshalb konnte im Rahmen des hier vorgestellten Vorhabens somit auf umfassende Erfahrungen im Bereich der wissenschaftlichen Auswertung von SAR-Daten unterschiedlicher Frequenzen und

1.3 Projektaktivitäten

[illegible]

1.3.1 Überblick über die Inhalte der Arbeitspakete

1.3.1.1 Projektkoordination (AP 1000)

1.3.1.2 Aufbau der Projektdatenbank (AP 2000)

- Auswahl der Testregionen für die Methodenentwicklung;

- Bestimmung und Aufnahme der notwendigen TerraSAR-X Radardaten (Envisat ASAR und ALOS PALSAR Akquisition erfolgt in AP 2200);
- Erstellung eines Datenbankkonzeptes, das Geländeinformationen der nationalen Experten einschließt;
- Integration mit Landsat-Daten aus der FRA 2010 Projektdatenbank;
- Koordination der SAR-Datenakquise während der gesamten Projektlaufzeit, Bedarfsanpassung;
- Erstellung einer Projektdatenbank.

1.3.1.2.1 TerraSAR-X Testgebiets-Auswahl (AP 2100)

Insgesamt wurden 350 repräsentative TerraSAR-X Stichprobenflächen für die Methodenentwicklung und die Umsetzung Algorithmen zur Waldkartierung ausgewählt.

1.3.1.2.2 X+C+L Radarkompositen-Auswahl (AP 2200)

Von den in AP 2100 ausgewählten Testgebieten wurden fünf Untersuchungsflächen für die Multifrequenzanalyse zur Waldstrukturkartierung bestimmt.

1.3.1.2.3 Geokodierte, ko-referenzierte Datenbasis (AP 2300)

Aufbau einer geokodierten und ko-referenzierten Projektdatenbasis für die methodologische Entwicklung in AP 3000.

1.3.1.3 Methodenentwicklung (AP 3000)

Innerhalb dieses APs wurden Methoden auf Basis von 20 repräsentativen hoch aufgelösten TerraSAR-X Daten entwickelt, um mit diesen Methoden dann den globalen Waldzustandsbericht der Welternährungsorganisation für das Jahr 2010 auf allen 350 X-Banduntersuchungsflächen zu unterstützen. Darüber hinaus schließt dieses AP die Methodenentwicklung anhand der X+C+L-Kompositen für eine Waldstrukturfassung mit ein.

1.3.1.3.1 TerraSAR-X Verarbeitung (AP 3100)

Auswertung von 20 hoch aufgelösten TerraSAR-X *High Resolution Spotlight* Szenen mit Methoden der Bildverbesserung und Bildinterpretation. Untersuchung des Informationsgehalts für die Kartierung der FRA-Waldklassen.

- AP 3110 Visuelle Bildinterpretation: Detektion der FRA-Waldklassen mit herkömmlicher visueller Bildinterpretation unter Berücksichtigung von Textur, Grauton und Kontextinformation.
- AP 3120 Radiometrie und Radarfilter: Zur radiometrischen Aufbereitung wurden verschiedene Kontraststreckungsverfahren untersucht sowie spezielle Radarfilter.
- AP 3130 Untersuchung von Haralick-Texturen: Auf Grund der hohen geometrischen Auflösung ist die Auswertung von Texturparametern ein bedeutendes Werkzeug zur Oberflächenerkennung.

- AP 3140 Segmentierung: Segmentierungsverfahren die die Textur- und Grauwertinformationen kombinieren, um Oberflächeneinheiten zu erfassen.

1.3.1.3.2 X+C+L Radarkompositen-Auswertung (AP 3200)

Die Auswertung der X+C+L-Radarkompositen.

- AP 3210 Bildinterpretation: Anwendung herkömmlicher visueller Bildinterpretation unter Berücksichtigung von Textur, Farbton in den Radarkompositen und Kontextinformation zur erweiterten Waldstrukturkartierung.
- AP 3220 Ratios: Untersuchung einfacher Bildebenen-Verschneidungen (z.B. HH/VV) zur unterstützten Interpretation bekannter Streu-Zusammenhänge (z.B. mit Biomasse) und ggf. Entwicklung neuer Algorithmen unter Nutzung der Multi-Frequenz.
- AP 3230 Hauptkomponententransformationen: Auswertung multivariater, statistischer Verfahren zur möglichen Informations-extraktion neuartiger Zusammenhänge.
- AP 3240 Polarimetrische Modellanwendung: Anwendung bekannter Modelle (gemäß der ESA POLSARPO-Software) zur Unterscheidung der Streuvorgänge und Nutzung dieser Parameter für eine verbesserte Waldstrukturkartierung.
- AP 3250 Interferometrische Modellanwendung: Untersuchung der Radar-Höhenmodelle und interferometrischen Kohärenz hinsichtlich einer erweiterten Waldstrukturerkennung.

1.3.1.4 Trainingshandbuch (AP 3300)

Dokumentation der SAR-Algorithmen Entwicklung für die Welternährungsorganisation zur Verwendung in Trainingslehrgängen mit nationalen Forstexperten.

1.3.1.5 Validierung (AP 4000)

Diese Arbeiten umfassten die Quantifizierung der Genauigkeit und Fehlerbeschreibung nach international anerkannten Methoden der Verarbeitungsschritte in AP 3100 und AP 3200.

1.3.1.5.1 Validierung der TerraSAR-X Ergebnisse (AP 4100)

Überprüfung der TerraSAR-X Kartierungsmethodik anhand einer repräsentativ ausgewählten Stichprobe mit optischen Vergleichsdaten und Klassifikationsergebnissen des Joint Research Center der EU.

1.3.1.5.2 Validierung der X+C+L Auswertung (AP 4200)

Wie sich erst während der methodischen Auswertung der X+C+L-Band Daten gezeigt hat, konnte kein sinnvoller Zusammenhang zwischen den untersuchten Waldstrukturparametern (Biomasse) und den SAR-Daten gefunden werden. Deswegen konnten keine verlässlichen Modelle zur Extraktion von Waldstrukturparametern entwickelt werden.

1.3.1.5.3 Beschreibung der Fehlergrößen (AP 4300)

Beschreibung der Ursachen der Fehlererzeugung und darauf basierend Vorschläge sowie Empfehlungen für zukünftige Verbesserungen.

1.3.1.6 Methodenumsetzung innerhalb von FRA 2010 (AP 5000)

Erläuterung und Schulung von Experten der Welternährungsorganisation hinsichtlich der erarbeiteten TerraSAR-X Auswertemethodik und Anwendung der Verarbeitungskette auf alle verfügbaren Umsetzungsflächen.

1.3.1.7 Transfermöglichkeiten der X+C+L Methodik (AP 6000)

Vergleich mit existierenden Landoberflächenkarten aus der Fernerkundung (GLOBCOVER und Vegetation Continuous Fields).

1.4 Ausgangssituation, Wissenschaftlich-technischer Stand

1.4.1 Methodik der Radarauswertung

1.4.1.1 Visuelle Interpretation

Die visuelle Interpretation stellt eine Standard-Methode bei der Auswertung optischer Satellitendaten dar und kann auch bei SAR-Kompositen effektiv eingesetzt werden. Im Gegensatz zu automatischen Klassifikationsmethoden, die im Wesentlichen auf der Analyse der spektralen Eigenschaften der einzelnen Pixel beruht, bezieht der Bearbeiter bei der visuellen Interpretation neben den Grauwertunterschieden auch Form, Größe, Textur und Schattierungen sowie den räumlichen Kontext der einzelnen Oberflächen und Muster mit ein. Die Interpretation erfolgt dabei in zwei Schritten: der Erkennung von Information und deren Identifikation. Im ersten Schritt werden Bildinhalte mehr oder weniger objektiv und präzise erfasst, während sie im zweiten bestimmten Objekten und Objektqualitäten zugeordnet werden. Ein wesentlicher Vorteil der Methode besteht darin, dass nicht nur einzelne Landbedeckungen erfasst und klassifiziert werden, sondern durch die Einbeziehung räumlicher Zusatzinformation Landnutzungstypen direkt erkannt werden können. Die visuelle Interpretation erfordert erfahrene Interpreten mit möglichst umfassenden Gebietskenntnissen (vgl. ALBERTZ 2001: 123ff.).

Durch ihre hohe räumliche Auflösung von etwa 1 m (Spotlight Mode) sind TerraSAR-X Daten für diese Auswertemethode hervorragend geeignet. Die einzelnen Polarisationskanäle ermöglichen die Darstellung als Farbkomposite und unterstützen die Auswertung dadurch zusätzlich. Zu diesem Ergebnis kommen auch VAN DEN BROEK et al. (2004) in ihrer vergleichenden Studie zum Einsatz visueller Interpretation für die Landnutzungsklassifikation polarimetrischer SAR-Daten.

Im Unterschied zur Interpretation optischer Daten muss bei Radarbildern beachtet werden, dass die Signale im Radarbild (und somit die Wiedergabe der Erdoberfläche) sowohl von der Geländecharakteristik (dielektrische Eigenschaften und Oberflächenrauigkeit) als auch von spezifischen Sensorparametern (Wellenlänge, Polarisation, Einfallswinkel) abhängig sind. Bei der Interaktion von Mikrowellen mit der Erdoberfläche werden zwei Streuprozesse unterschieden. Einerseits tritt die auch im optischen Spektralbereich typische Oberflächenstreuung auf, bei der die auftreffende Strahlung je nach Materialeigenschaft teils absorbiert, reflektiert oder diffus gestreut wird. Dringen die Mikrowellen in vielfach inhomogene Oberflächen ein, erfolgt Volumenstreuung, wobei die Strahlung vielfältig innerhalb des Mediums gestreut wird. Dieser Streuvorgang ist insbesondere für Vegetationsbestände

typisch. Die Wellenlänge bzw. Frequenz des Radars hat wesentlichen Einfluss auf die Art der Streumechanismen und die Eindringtiefe. Mikrowellen mit größeren Wellenlängen (z. B. L-Band, 15-30 cm) dringen in das Kronendach ein und reagieren intensiv mit dessen strukturellen Elementen, wie Ästen und Baumstämmen, und ggf. mit dem Untergrund. Mikrowellen mit relativ kurzen Wellenlängen (z. B. X-Band, 2-4 cm) dringen nicht durch die Vegetationsoberflächen hindurch. In Waldbeständen interagieren die Mikrowellen des X-Bandes daher direkt an der Kronenoberfläche und werden dort gestreut (HENDERSON & LEWIS 1998). SCHMULLIUS & EVANS (1997) listen die Synergie-Effekte von X-, C- und L-Band-Daten der SIR-C/X-SAR Shuttlemissionen auf, die sich bei einer synergetischen Auswertung von TerraSAR-X Daten zusammen mit Envisat C-Band und ALOS L-Band Daten anbieten. Für die Charakterisierung von Wäldern bieten sich Radaraufnahmen in unterschiedlichen Wellenlängen an. L-Band-Szenen ermöglichen eine einfache Schwellwert-Trennung von Wald zu Nicht-Wald, während X-Band-Aufnahmen mit einer hohen räumlichen Auflösung Oberflächentexturen des Kronendachs aufzeigen (THIEL 2004). Polarimetrische L-Band-Szenen, wie sie ALOS PALSAR aufzeichnet, erlauben gute Schätzungen des Kronenvolumens.

Radarbilder zeichnen sich durch eine spezielle Bildeigenschaft aus, die eine visuelle Interpretation oft erschwert. So treten in den Intensitätsbildern auch bei homogenen Flächen Bildstrukturen auf, die als „Speckle“ bezeichnet werden. Sie entstehen, da die vom Sensor kohärent ausgesandte Strahlung auf der Erdoberfläche innerhalb eines Pixels auf unterschiedliche Streuer trifft und dadurch phasen-diffus zurückgestreut wird. Die Überlagerung der Phasen führt zu Interferenzen, die zu kleinräumigen Helligkeitsvariationen im Radarbild führen. Durch spezielle Methoden im Rahmen der Vorverarbeitung kann dieser Speckle-Effekt reduziert werden (BÄHR & VÖGTLE 1998).

1.4.1.2 Segmentierung

Um die Vorteile räumlicher Kontextinformation, insbesondere bei der Auswertung hoch auflösender Fernerkundungsdaten auszunutzen, wurden objektorientierte Klassifikationsalgorithmen entwickelt. Grundlage der Klassifikation bilden dabei nicht die einzelnen Bildpixel, sondern räumlich begrenzte Objekte im Satellitenbild, sog. Segmente die je nach Untersuchungszweck homogene Landschaftselemente repräsentieren (BLASCHKE & STROBL 2001). Vor der Klassifikation erfolgt eine Bildsegmentierung, bei der ausgehend von einzelnen Startpixeln sukzessiv benachbarte Pixel zu immer größeren Segmenten aggregiert werden. Diese Aggregation basiert auf der spektralen Information der Pixel, schließt aber auch Texturmerkmale, d. h. die lokalen Unterschiede der spektralen Werte in der Umgebung der Pixel mit ein (BENZ et al. 2004). Die resultierenden Objekte geben dadurch die Heterogenität der Erdoberfläche realistisch wieder. Eine Besonderheit des Verfahrens besteht darin, dass die Segmente hierarchisch in unterschiedlichen Maßstäben bzw. Levels generiert werden. Die Bildobjekte liegen dadurch in unterschiedlicher Detailliertheit vor und sind über die verschiedenen Level miteinander vernetzt (BAATZ & SCHÄPE 1999). Ein bewährter Segmentierungsalgorithmus ist in der Bildverarbeitungssoftware eCognition implementiert und ermöglicht durch die hierarchische Klassifikation der zuvor erzeugten Bildsegmente eine objektorientierte Klassifikation. Der wesentliche Vorteil gegenüber klassischen, pixelbasierten Methoden besteht darin, dass explizit räumliche Informationen verwendet werden können, um die gewünschten Klassen gegeneinander abzugrenzen, denn die einzelnen Bildsegmente besitzen neben ihrer spektralen Charakteristik weitere Attribute, wie

Textur, Form und Größe. Objektorientierte Klassifikationsansätze setzen somit Aspekte der menschlichen Musterwahrnehmung um. Objektorientierte Klassifikationen werden erfolgreich bei der Auswertung von SAR-Daten eingesetzt. THIEL et al. (2004) demonstrierten die Eignung dieses Ansatzes zur Erfassung von Waldgebieten und Waldflächenveränderungen anhand von JERS L-Band-Daten in verschiedenen Testgebieten Europas und Asiens, mit der eCognition Software.

1.4.1.3 Verknüpfung mit ALOS PALSAR Daten und Perspektiven der Pauli-Klassifikation

Ein SAR zeichnet den Amplituden- und Phasenverlauf des reflektierten Radar-Signals auf. Die Amplitude ist ein Maß dafür, wie stark das Radarsignal von einem Streuer Richtung Sensor reflektiert wird. Vor allem bei langen Wellenlängen wie P- oder L-Band (ALOS) ist ein ausgedehnter Wertebereich an Rückstreuintensitäten (Amplitudenwerten) zu verzeichnen. Daraus resultiert eine sehr gute Trennbarkeit unterschiedlicher Landbedeckungsklassen allein anhand der Grauwerte. Wald beispielsweise ist stets durch hohe Rückstreuwerte gekennzeichnet. Zudem besteht bis zu einem bestimmten Sättigungsniveau ein Zusammenhang zwischen Waldbiomasse und Amplitude. Die Phase ist im Gegensatz zur Amplitude unabhängig von der rückgestreuten Energiemenge. Sie beschreibt den Zustand des elektrischen Feldvektors der reflektierten elektromagnetischen Welle am Sensor. Sie gibt also an, in welcher Phase der Sinusschwingung sich der elektrische Feldvektor beim Auftreffen der Welle auf die Antenne befindet. Die Phase setzt sich aus einer Entfernungskomponente und der so genannten Objektphase zusammen. Beide Phasenkomponenten sind unabhängig voneinander. Bei der Polarimetrie wird die Objektphase herausgearbeitet. Da Streuprozesse in der Regel stark polarisationsabhängig sind, unterscheidet sich die Objektphase für die unterschiedlichen Polarisationen. Anhand dieser Unterschiede können physikalische Oberflächenparameter abgeleitet werden. Diese Oberflächenparameter liefern zusätzlich wertvolle Informationen für die Walddetektion und bieten zudem die Möglichkeit, bestimmte Waldtypen voneinander zu unterscheiden. Die Idee der polarimetrischen Dekomposition von Radardaten anhand der Phaseninformation ist die Zerlegung des komplexen Rückstreusignals in Einzelkomponenten unterschiedlicher Herkunft bzw. Charakteristik. Es findet demnach eine Entmischung des Signals statt. Die einzelnen Komponenten des Rückstreusignals können auf diese Art und Weise bestimmten Streuprozessen zugeordnet werden. Die Dekomposition der Rückstreuinformation setzt in der Regel auf der mathematischen Beschreibung des Streuobjektes in Form einer Matrix auf. Prinzipiell ist die Zerlegung jeder Matrix in Einzelkomponenten möglich (CLOUDE 1992, CLOUDE & POTTIER 1996, BÖRNER et al. 1998).

Die Pauli-Dekomposition stellt eine einfache Möglichkeit der polarimetrischen Auswertung von SAR- Daten dar. Die drei Elemente des Streuvektors in der Pauli Basis lassen sich hinsichtlich ihres Rückstreutyps interpretieren. Das erste Element steht für Streuer mit isotroper ungerader Rückstreuung. Hierzu zählt u. a. die Einfachstreuung an einer glatten Oberfläche oder die Dreifachstreuung an einem dreiflächigen Winkelreflektor. Das zweite Element bezeichnet Streuer mit isotroper gerader Rückstreuung. In der Realität fällt vor allem die Zweifachstreuung (*Double Bounce*) an zweiflächigen Reflektoren in dieses Schema. Der Rückstreutypus des dritten Elements des Paulivektors ist ebenfalls isotrop und gerade. Die zweiflächigen Reflektoren sind allerdings mit einem Winkel von 45° zur Horizontalen angeordnet. Diese Form der Rückstreuung wird in der Regel als Volumenstreuung aufgefasst. Jede Landbedeckungsklasse ist hier durch bestimmte Rückstreuanteile der drei Elemente des

Streuvektors charakterisiert. Die jeweiligen Anteile sind überdies von der verwendeten Wellenlänge abhängig. Hieraus ergeben sich bei der Verwendung multisensoraler Daten wie beispielsweise TerraSAR-X plus ALOS PALSAR Vorteile – die Dimensionen des Merkmalsraumes einer bestimmten Landbedeckungsklasse können so gewinnbringend erweitert werden, die Klassifikationsqualität wird verbessert. Charakteristisch für Wald im L-Band ist ein hoher Anteil an Volumenstreuung sowie an Double Bounce. Im X-Band hingegen spielt Double Bounce im Normalfall keine Rolle, dafür ist ein gewisser Anteil an Oberflächenstreuung an den Baumkronen zu erwarten. CLOUDE (1992) entwickelte ein Dekompositionsverfahren auf Basis der Kohärenzmatrix. Dieser liegt dem Streuvektor in der Paulibasis zugrunde, welcher eine Interpretation der Streumechanismen ermöglicht. Aus dieser Dekomposition wurden von CLOUDE & POTTIER (1997) zwei wichtige Parameter mit physikalischer Bedeutung hergeleitet. Dies sind die Entropie H und die Anisotropie A . Beide Parameter geben Auskunft über den Anteil und die Verteilung von Streumechanismen. Beide Parameter können Werte zwischen Null und Eins annehmen. Die Entropie ist ein Maß für das Vorhandensein und den Anteil aller drei Eigenwerte. Bei $H = 0$ wird die gesamte Rückstreuung durch einen Streumechanismus generiert. Die anderen beiden Eigenwerte sind Null. Wenn $H = 1$ besitzen alle Eigenwerte denselben Wert. Erreicht die Entropie mittlere Werte, kann die Anisotropie A , welche das Verhältnis zwischen dem zweiten und dritten Eigenwert darstellt, zusätzliche Information enthalten. Entropie und Anisotropie werden herangezogen, um die Verteilung der Streumechanismen darzustellen. Die Art der Rückstreuung geht aus ihnen jedoch nicht hervor. Diese Information bietet der Parameter Alpha. Alpha kann Werte zwischen 0 und 90 annehmen. Ein Vorteil von Alpha ist die Möglichkeit, auch nicht-isotrope Streumechanismen darstellen zu können – die meisten natürlichen Objekte sind nicht-isotrope Streuer. Im Merkmalsraum ‚Entropie – Anisotropie – Alpha‘ besitzen alle Landbedeckungsklassen ihre charakteristische Position, die, analog zur Pauli-Dekomposition, mit der Wellenlänge variiert. Diese Gegebenheit hat man sich bereits erfolgreich für die Klassifikation zu Nutze gemacht (CLOUDE & POTTIER 1997). Beispielsweise (L-Band) ist bekannt, dass die Klasse „Offener Boden“ hauptsächlich durch Oberflächenstreuung gekennzeichnet ist. Demzufolge ist mit niedrigen Entropie- und Alpha-Werten zu rechnen. Im Gegensatz dazu steht die Klasse Wald. Hier sind alle Streuprozesse, jedoch in erster Linie Volumenstreuung und *Double Bounce*, gegenwärtig. Hohe Werte für Entropie und Alpha sind die Folge (HELLMANN 2000). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Walddetektion mittels Rückstreuintensitäten sowie auf Basis der polarimetrischen Information im L-Band mit sehr hohen Genauigkeiten möglich ist. Die Kombination beider Ansätze besitzt das Potential für eine weitere Steigerung der Exaktheit sowie die Erweiterung des Produktes „Waldmaske“. So ist es beispielsweise möglich, Waldareale unterschiedlichen Charakters (Baumdichte, Biomasse, etc.) zu separieren. Die Ausweisung weiterer Waldtypen ist etwa mit vollpolarimetrischen X-Band Daten (TerraSAR-X) zu realisieren, da für die Rückstreuung der Mikrowellen im X-Band Strukturen in der Größenordnung von Blättern und Zweigen relevant sind. Blattform, Stellung und Wassergehalt des Blattes sind hier maßgebliche Einflussfaktoren für Amplitude und Objektphase. Diese Informationen werden noch ergänzt durch die (aufgrund der hohen geometrischen Auflösung von TerraSAR-X) verwertbare Texturinformation.

1.4.1.4 Meteorologische Einflussfaktoren auf das X-Band

Meteorologische Faktoren wie Niederschlag und Tau können das Radarsignal signifikant beeinflussen, was im Hinblick auf die Analyse multitemporaler Zeitreihen und die Ableitung von Vegetationsparametern besonders zu berücksichtigen ist. Der Einfluss variiert dabei in Abhängigkeit von systemeigenen und objektspezifischen Aufnahmeparametern. Die meisten Studien dokumentieren einen Anstieg der Radarrückstreuung um 1-4 dB für benetzte Pflanzenbestände, wobei für Waldflächen geringere Variationen des Radarsignals im Vergleich zu landwirtschaftlichen Nutzflächen festgestellt wurden (DOBSON et al. 1991, KLAASSEN et al. 1997 und de JONG et al. 2002). Die Sensitivität der Radarrückstreuung von Wäldern zur Menge des gespeicherten Niederschlages steigt mit der Frequenz. DOBSON et al. (1991) haben beispielsweise für Mischwälder in Nord-Michigan kurz nach einem Niederschlagsereignis eine Zunahme des Radarsignals um 0 dB im P-Band, 1-2 dB im L-Band und 2-3 dB im C-Band beobachtet. Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Polarisationen derselben Wellenlänge wurden dabei nicht festgestellt. Im Rahmen eines Experimentes mit dem deutschen Bodenradar FM-CW wurde für eine einzelne Esche ein Anstieg der Radarrückstreuung um 2 dB im X-Band dokumentiert (de JONG et al. 2002). Eine weitere entscheidende Einflussgröße neben der Frequenz stellt die Waldstruktur dar. Die stärksten Variationen des Radarsignals nach einem Niederschlagsereignis wurden für Laubwälder dokumentiert. Nadelwälder zeigten eine deutlich geringere Beeinflussung durch die Präsenz von Interzeptionswasser. Weiterhin wurden für dichte Waldbestände stärkere Variationen der Radarrückstreuung beobachtet. Für die Präsenz von Tau ist keine signifikante Beeinflussung des Radarsignals von Wäldern dokumentiert. Die täglichen Variationen der Radarrückstreuung von tropischen Regenwäldern im Amazonas lagen beispielsweise im Ku-Band zwischen 0.6 und 0.9 dB (SATAKE & HANADO 1994). Zusammenfassend ist festzustellen, dass Tau und Niederschlag die X-Band-Rückstreuwerte beeinflussen, aber in unproblematischen Größenordnungen für die Aufgaben von FRA-SAR 2010.

1.4.2 Stichprobenverfahren

Einzelne Stichproben aus einer Grundgesamtheit zu analysieren ist eine allgemein akzeptierte Methode bei Forstinventuren. In der Fernerkundung gibt es unterschiedliche Meinungen über die Verwendbarkeit von Stichproben im Vergleich zur flächendeckenden Erfassung von *Land Use* und *Land Cover Change* (LULC). GALLEGO (2004) und STEHMAN et al. (2003, 2005) geben Literaturübersichten über dieses Thema. Im Folgenden wird die internationale Diskussion kurz zusammengefasst.

Im Allgemeinen reduzieren Stichproben die Kosten im Gegensatz zu flächendeckenden Auswertungen, weil sie weniger Zeit für Interpretationen und Klassifizierungen der Landnutzung oder -bedeckung in Anspruch nehmen. Wenn man nur einzelne Teilgebiete als Stichproben zu interpretieren hat, erlaubt dies eine intensivere Auseinandersetzung mit diesen kleineren Gebieten, deshalb reduzieren sich Messfehler in den Daten. Die im Vergleich zur gesamten Fläche geringe Flächengröße von Stichproben benötigt weniger Speicherplatz und ermöglicht die Verwendung von hoch auflösenden Daten. Ist eine ausdrückliche räumliche Repräsentation der Ergebnisse notwendig, kann das statistische Stichprobenverfahren die flächendeckende Erfassung nicht ersetzen. Wenn das Ziel eine brutto LULC Veränderungsabschätzung sein soll, ist im Gegensatz zu einer flächendeckenden Datenerfassung ein

Stichprobenansatz wahrscheinlich kosteneffektiver, praktikabler und mit weniger Messfehlern behaftet (STEHMANN et al. 2003).

Zahlreiche, auf Stichproben basierende Abholzungsstudien wurden bereits mit hoch aufgelösten Fernerkundungsaufnahmen auf regionalem (multi-nationalem) Maßstab durchgeführt (FAO 1996, FAO 2001, ACHARD et al. 2002), jedoch ohne präzise Methoden zur gezielten Erhebung und Identifizierung von wahrscheinlichen LULC Flächen vorzuschlagen. Einige Wissenschaftler bezweifeln, dass mit hoch auflösenden Stichprobenaufnahmen effiziente Abschätzungen über die Abholzungsraten möglich sind (HUNSAKER et al. 1994, SANCHEZ-AZOFEIFA et al. 1997, TUCKER & TOWNSHEND 2000). Die Einzigartigkeit von Landbedeckungstypen und deren Veränderungen, sowie Sonderfälle innerhalb der Population sind die Hauptfaktoren, welche zur geringen Präzision der stichprobenartig abgeschätzten Landbedeckungszusammensetzung und –veränderung führen (STEHMAN et al., 2003). Dies hat zur verstärkten Nutzung flächendeckender, regionaler Kartierungsstrategien geführt (SKOLE & TUCKER 1993; TOWNSHEND et al. 1995). Trotzdem konnte CZAPLEWSKI (2003) zeigen, dass auf Stichproben basierende Abschätzungen leistungsfähig sind, wenn die Region ausreichend groß ist, beispielsweise im globalen Maßstab und wenn die Veränderungen ausreichend gut durch die Stichproben repräsentiert werden. STEHMAN et al. (2005) weisen darauf hin, dass die von TUCKER & TOWNSHEND (2000) ermittelte hohe Varianz für durch Stichproben ermittelte Schätzungen zum Teil darin begründet sind, dass eine einzelne Stichprobe ein sehr hohen Entwaldungsgrad aufweist. Obwohl die Ergebnisse von TUCKER & TOWNSHEND (2000) wichtige Erkenntnisse über den Einfluss von Sonderformen im Zusammenhang mit Präzision liefern, vertreten STEHMAN et al. (2006) die Meinung, dass eine Stichprobenstrategie, basierend auf kleineren Untersuchungsgebietseinheiten kombiniert mit einer geschätzten Regression, präzisere Schätzungen einer Veränderung liefern kann, als eine Methode, die darauf angelegt ist Untersuchungsgebiete großflächig (z.B. komplette Landsat-Szenen) zu analysieren, unter der Annahme, dass beide Ansätze die gleichen Gesamtkosten verursachen.

2 Literaturverzeichnis

- Achard, F., Stibig H.-J., Eva H. & P. Mayaux (2002): Tropical Forest cover monitoring in the humid Tropics – the TREES project. – *International Journal for Tropical Ecology*, 43 (1), 9-20.
- Albertz, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt.
- Baatz, M. & A. Schäpe (1999): Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks. In: *Proceedings of 2nd International Symposium: Operationalization of Remote Sensing*, 16-20 August, ITC, NL.
- Bähr, H.-P. & T. Vögtle (Eds.) (1998): *Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*, Wichmann: Heidelberg.
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I. & M. Heyen (2004): Multiresolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. – *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, 239-258.
- Blaschke, T. & J. Strobl (2001): What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. – *GeoBIT: Geoinformationstechnologie für die Praxis*, 6/01, 12-17.
- Börner, W.-M., Mott, H., Lüneburg, E., Livingstone, C., Brisco, B., Brown, R. J. & J. S. Paterson (1998): Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts. In: Henderson, F.M. & A.J. Lewis (eds.) (1998): *Principles and applications of imaging radar*, Wiley: New York.
- Cloude, S. R. (1992): Uniqueness of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry. In: Börner, W.-M. & H. Brand (1992): *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry. Part 1*, 266-296, Kluwer: Dordrecht.
- Cloude, S. R. & Pottier, E. (1996): A Review of Target Decomposition in Radar Polarimetry. – *IEEE Transactions in Geosciences & Remote Sensing*, 34 (2), 498-518.
- Cloude, S. R. & Pottier, E. (1997): An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR. – *IEEE Transactions in Geosciences & Remote Sensing*, 35 (1), 68-78.
- Czaplewski, R. L. (2003): Can a sample of Landsat sensor scenes reliably estimate the global extent of tropical deforestation? – *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1409-1412.
- de Jong, J. J. M., Klaassen, W. & P. J. C. Kuiper (2001): Monitoring of rain water storage in forests
- Dobson, M. C., L. Pierce, K. McDonald & T. Sharik (1991): Seasonal change in radar backscatter from mixed conifer and hardwood forest in Northern Michigan. In: *Proceedings IGARSS '91*, 1121 - 1124.
- ESA (2011): TropiSAR final Report: Technical Assistance for the Development of Airborne SAR and Geophysical Measurements during the TropiSAR 2009 Experiment, available from https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=21020&name=DLFE-899.pdf.
- GlobCover Land Cover v2 (2008): Database. European Space Agency, European Space Agency GlobCover Project, led by MEDIAS-France, available from <http://ionia1.esrin.esa.int/index.asp>.

- FAO (1996): FRA1990 - survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO forestry paper 130, ISSN 0258-6150, FAO, Rome.
- FAO (2001): FRA2000 - global forest cover mapping. Final report. FRA working paper 50, FAO, Rome.
- Gallego, F. J. (2004): Remote sensing and land cover area estimation. – *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3019-3047.
- Hahmann T., S. Martinis, M. Twele, A. Roth & M. Buchroithner (2008): Extraction of water and flood areas from SAR data. Proceedings of EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany.
- Hansen, M., DeFries, R.S., Townshend, J.R.G., Carroll, M., Dimiceli, C. & R.A. Sohlberg (2003): Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. - *Earth Interactions*, Vol 7, No 10, pp 1-15.
- Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., Loveland, T.R., Townshend, J.R.G., DeFries, R.S., Pittman, K.W., Stolle, F., Steininger, M.K., Carroll, M. & C. Dimiceli(2008): Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified using multi-temporal and multi-resolution remotely sensed data. *PNAS*, 105(27), 9439-9444.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K. & I. Dinstein (1973): Textural Features for Image Classification. – *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 3, 6, 610-621.
- Hellmann, M. (2000): Classification of Fully Polarimetric SAR-Data for Cartographic Applications. Doctoral Thesis TU Dresden, DLR-Forschungsbericht, 2000, 19.
- Henderson, F. M. & A. J. Lewis (1998) (Eds.): Principles & Applications of Imaging radar. Manual of Remote Sensing - Volume 2. John Wiley: New York.
- Hunsaker, C. T., O'Neill, R. V., Jackson, B. L., Timmins, S. P. & D. A. Levine (1994): Sampling to characterize landscape pattern. – *Landscape Ecology*, 9, 207-226.
- Jarvis A., Reuter, H.I., Nelson, A. & E. Guevara (2008): Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Klaassen, W., van der Linden, M. & Ballast, A. (1997): SAR sensing of vegetation wetness -the first results. In: Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment, Florence, Italy, 17-21 March 1997, ESA-SP-141.
- Sanchez-Azofeifa, G. A., Skole, D. L. & W. Chomentowski (1997): Sampling global deforestation databases: the role of persistence. – *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2, 177-189.
- Satake, M. & H. hanado (2004): Diurnal change of Amazon rain forest σ_0 observed by Kuband spaceborne radar. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42 (6), 1127-1134.
- Schmullius, C. C. & D. L. Evans (1997): Review article: Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR. – *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2713-2722.

- Skole, D. & C. Tucker (1993): Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. – *Science* 260, 1905-1910.
- Stehmann, S. V., Sohl, T. L. & T. R. Loveland (2003): Statistical sampling to characterize land cover change. – *Remote Sensing of Environment*, 86, 517-529.
- Stehmann, S. V., Sohl, T. L. & T. R. Loveland (2005): An evaluation of sampling strategies to improve precision of estimates of gross change in land use and land cover. – *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4941-4957.
- Thiel, C. (2004): Extrahierung hydrologisch relevanter Parameter aus hoch aufgelösten polarimetrischen L-Band sowie interferometrischen X-Band SAR-Daten. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität, Jena.
- Thiel, C., Weise, C. & C. Schmullius (2004): Object-based detection of forest cover changes with JERS SAR-data - the TerraSAR-L Project. – *Proceedings of the 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, 16-19 September, Innsbruck, Austria.
- Townshend, J. R. G., Bell, V., Desch, A. C., Havlicek, C., Justice, C. O., Lawrence, W. E., Skole, D., Chomentowski, W. W., ET AL. (1995): The NASA Landsat Pathfinder Humid Tropical Deforestation Project. *Land Satellite Information in the next decade*. Tyson's Corner, Virginia: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, IV76-IV87.
- Tucker, C. J. & J. R. G. Townshend (2000): Identifying land cover change from satellite data – Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. – *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1461-1472.
- van den Broek, A. C., Smith, A. J. E. & A. Toet (2004): Land use classification of polarimetric SAR data by visual interpretation and comparison with an automatic procedure. – *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3573-3591.

II. Teil

- Eingehende Darstellung -

Abschlussbericht



Gefördert durch das DLR
FK 50 EE 0802

II. Eingehende Darstellung

– R. Knuth & C. Schmullius –

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis	6
1 Ergebnisse.....	7
1.1 Untersuchungsgebiete (AP 2000).....	7
1.1.1 Auswahl der 350 X-Band Stichprobenflächen (AP 2100)	7
1.1.2 Auswahl der fünf X+C+L-Band Untersuchungsgebiete (AP 2200)	10
1.1.3 Fernerkundungsdaten (AP 2300)	12
1.1.4 Referenzdaten (AP 2300)	14
1.1.4.1 Kamerun	15
1.1.4.2 Französisch-Guyana.....	16
1.1.4.3 Mexiko	18
1.1.4.4 Brasilien & Indonesien.....	19
1.2 Datenverarbeitung (AP 3000).....	20
1.2.1 SAR-Daten Prozessierung	20
1.2.2 X-Band Datenauswertung (AP 3100).....	22
1.2.2.1 Visuelle Interpretation	22
1.2.2.2 Auswertung der Rückstreuintensitäten	23
1.2.2.3 Radiometrie und Radarfilter	26
1.2.2.4 Textur Untersuchung nach Haralick	29
1.2.2.5 Segmentierung/Klassifizierung.....	31
1.2.2.6 Validierung der X-Band Ergebnisse (AP 4100).....	32
1.2.3 X+C+L Band Datenauswertung (AP 3200 & AP 4200).....	36
1.2.3.1.1 Bildinterpretation	36
1.2.3.1.2 Intensitäten & Ratios.....	38
1.2.3.1.3 Hauptkomponententransformation.....	42
1.2.3.1.4 Polarimetrische Modellanwendung	45
1.2.3.1.5 Interferometrische Modellanwendung.....	48
1.3 Beschreibung von Fehlergrößen (AP 4300).....	51
1.3.1 Fehlergrößen der Landoberflächenkartierung mit TerraSAR-X	51
1.3.2 Fehlergrößen bei der X+C+L Methodik.....	53
1.4 Zusammenfassung.....	54

1.5	Ausblick.....	55
2	Nutzen des Vorhabens	56
3	Bekannt gewordener Fortschritt an anderer Stelle	56
4	Veröffentlichungen.....	56
5	Literaturverzeichnis.....	57

Abkürzungen

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
AP	Arbeitspaket
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de La Biodiversidad
DEM	Digital Elevation Model
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EC	European Commission
ERS-1/2	European Remote-Sensing Satellite 1 & 2
ESA	European Space Agency
ESAC	European Space Astronomy Centre
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FRA	Forest Resources Assessment
FRA-SAR 2010	Forest Resources Assessment with Synthetic Aperture Radar
FSU	Friedrich-Schiller-Universität
GEO	Group on Earth Observation
GIS	Geographisches Information System Geoinformationssystemen
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GOFC-GOLD	Global Observation of Forest Cover and Land Dynamics
GSE	GMES Services Element
IGARSS	International Geoscience and Remote Sensing Symposium
ISRSE	International Symposium on Remote Sensing of Environment
JAXA	Japan Aerospace Exploration Center
JERS	Japanese Earth Resources Satellite
JRC	Joint Research Center (EC)
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
Radar	Radio Detection And Ranging
REDD	Reducing Emissions from Deforestation and Degradation
ROI	Region of Interest
RSS	Remote Sensing Survey (ergänzende Fernerkundungsstudie zum FRA)
SAG	Space Advisory Group
SAR	Synthetic Aperture Radar
SIR-C/X	Spaceborne Imaging Radar (C/X-band)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TSX	TerraSAR-X
UN	United Nations
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Globale Wolkenbedeckung und FRA-SAR 2010 X-Band Untersuchungsgebiete.....	10
Abb. 1-2: FRA-SAR 2010 X+C+L-Band Untersuchungsgebiete.	11
Abb. 1-3: Geographische Verteilung der Referenz- und SAR-Daten in Kamerun.	15
Abb. 1-4: Übersicht über die X+C+L-Band Datengrundlage und Referenzplots für die nördliche Untersuchungsregion in Kamerun.	16
Abb. 1-5: Geographische Lage der Untersuchungsplots in Französisch-Guyana.	17
Abb. 1-6: Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Variabilität der Biomasse.	18
Abb. 1-7: Geographische Verteilung der Referenz- und SAR-Daten in Mexiko.	19
Abb. 1-8: Geographische Verteilung der Referenz- u. SAR-Daten in Brasilien u. Indonesien (unten). .	20
Abb. 1-9: Schema der SAR-Daten Prozessierung.	21
Abb. 1-10: Vergleich der räumlichen Auflösung von TerraSAR-X u. SRTM DEM).	21
Abb. 1-11: Boxplotauswertung der TerraSAR-X Intensitäten.	24
Abb. 1-12: PDFs für eine einzelne TerraSAR-X Szene.	25
Abb. 1-13: Gemittelte PDFs für insgesamt 10 TerraSAR-X Szenen.	26
Abb. 1-14: Ergebnisse der ENL-Auswertung.	29
Abb. 1-15: Variogrammanalyse für Wald- und Nichtwaldflächen.	30
Abb. 1-16: Geogr. Übersicht d. FRA-SAR 2010 TerraSAR-X Kartierungs- & Validerungsflächen.	33
Abb. 1-17: Ergebnis der Gesamtgenauigkeit für alle 81 Validierungsregionen.	34
Abb. 1-18: Visueller Vergleich der X+C+L-Band Daten.	37
Abb. 1-19: Polarimetrische Streumatrix-Dekompositionen.	38
Abb. 1-20: Korrelationsmatrizen für alle untersuchten X+C+L-Band Ratios.	42
Abb. 1-21: Korrelationsmatrizen für alle untersuchten X+C+L-Band Frequenzen, dem VCF Produkt und der Biomasse.	43
Abb. 1-22: Hauptkomponentenanalyse der X-Band Daten.	43
Abb. 1-23: Korrelationsmatrizen für die X-Band Frequenz.	44
Abb. 1-24: X+C+L Band und VCF Hauptkomponentenanalyse.	45
Abb. 1-25: Ergebnisse aller gerechneten pol. Dekompositionen für die Region Paracou.	47
Abb. 1-26: Ergebnisse aller gerechneten pol. Dekompositionen für die Region Nouragues.	47
Abb. 1-27: Korrelationsmatrizen für alle untersuchten polarimetrischen Streumatrix-Dekompositionen und der Biomasse.	48
Abb. 1-28: Ergebnisse der interferometrischen Kohärenzberechnung.	49
Abb. 1-29: Vergleich zweier ENVISAT ASAR VV-Intensitätsbilder von Mexiko.	50

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1-1: Für in-situ Daten kontaktierte Institutionen u. Anzahl d. angefr. Untersuchungsgebiete. ...</i>	<i>12</i>
<i>Tab. 1-2: SAR-Datengrundlage für die X+C+L-Band Untersuchungsgebiete.</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 1-3: Überblick über die Trainingsgebiete von 20 X-Band Untersuchungsgebieten.</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 1-4: Übersicht über die Speckle-Filter Analyseergebnisse.</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 1-5: Ergebnisse d. Validierung d. FRA-SAR 2010 Klassifikation.</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 1-6: Vergleich Biomasse ($t\ ha^{-1}$) vs. X+C+L-Band (dB) für verschiedene räumliche Auflösungen (alle Plots Paracou).</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 1-7: Vergleich Biomasse ($t\ ha^{-1}$) vs. X+C+L-Band (dB) für verschiedene räumliche Auflösungen (alle Plots Nouragues).</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 1-8: Streumatrix-Dekompositionen und deren jeweiligen Elemente.</i>	<i>46</i>

1 Ergebnisse

1.1 Untersuchungsgebiete (AP 2000)

1.1.1 Auswahl der 350 X-Band Stichprobenflächen (AP 2100)

Vor dem Hintergrund zukünftige Waldzustandsberichte effizient, operationell und einheitlich zu gestalten, beabsichtigt die FAO Fernerkundungsmethoden ab 2010 systematisch für ihre globalen Waldzustandsberichte begleitend hinzuzuziehen. Fernerkundungsdaten bieten die Möglichkeit forstwirtschaftlich relevante Informationen großräumig, standardisiert und kontinuierlich abzuleiten. Deshalb ist diese einheitliche Methode ein bedeutender Schritt zu einer Datenharmonisierung hin. Die kontinuierliche Auswertung von Fernerkundungsdaten erlaubt schließlich auch eine verlässliche Ableitung von dringend benötigten Parametern zur Vegetationsdynamik und zu den Veränderungsraten der Ausdehnung der weltweiten Waldgebiete.

Um diese Ziele zu realisieren wurde der *Remote Sensing Survey* (RSS) für 2010 anhand einer globalen systematischen Stichprobe durchgeführt. Dazu bildet jeder Längen- und Breitengradschnittpunkt über Land den Zentroid eines 400 km² großen Quadrates, von welchem Landsat-Daten ausgewertet wurden. Um eine Überrepräsentation nördlicher Gebiete zu vermeiden, reduziert sich diese Stichprobe ab dem nördlichen sechzigsten Breitengrad, von dort an dient nämlich nur noch jeder zweite Längen- und Breitengradschnittpunkt als Stützpunkt für die Stichprobenflächen. Jenseits von 84° N bzw. 56° S ist auf Grund der kaum noch vorhandenen Vegetation gar kein Untersuchungsgebiet innerhalb des RSS vorgesehen. Insgesamt umfasst dieses Stichprobennetz 13.689 Stichprobenpunkte und erfasst somit etwas mehr als 1% der gesamten Erdoberfläche.

Aufgrund des hohen, nahezu permanenten Bewölkungsgrades zahlreicher tropischer Regionen ist eine Auswertung von optischen Landsat Daten an vielen RSS Stichprobenflächen nicht rechtzeitig möglich. Deswegen wurden für das Projekt FRA-SAR 2010 zunächst die wolkenreichsten Regionen anhand einer Studie von Ju & Roy (2008) über die Wolkenbedeckung in Landsat Daten mittels einer GIS Analyse herausgefiltert. Es zeigte sich, dass für etwa 15% (2.011) aller RSS Stichprobenflächen mit einem Wolkenbedeckungsgrad von 50% oder mehr in Landsat-Daten zu rechnen ist. Im Wesentlichen teilen sich diese wolkenverhangenen Gebiete in nur zwei Regionen auf. Entweder handelt es sich um relativ vegetationsarme Gebiete in den hohen nördlichen Breiten (687) oder um Regionen in den Tropen (1.324) (s. auch Abb. 1-1). Weil der Schwerpunkt dieser Studie eindeutig auf Landoberflächen mit Vegetation liegt, wurde in Abstimmung mit der FAO beschlossen die für FRA-SAR 2010 insgesamt 350 zur Verfügung stehenden TerraSAR-X Datensätze ausschließlich innerhalb der Tropen möglichst repräsentativ zu verteilen.

Die rechteckige Ausdehnung einer TerraSAR-X Szene deckt ungefähr 50 km² (5 mal 10 km) ab, wenn sie, wie für diese Studie vorgesehen im dual polarimetrischen High Resolution Spotlight Modus aufgenommen wird. Über tropischen Regenwaldgebieten ist eine solche, verhältnismäßig kleine Fläche jedoch häufig einfach nur von einer Klasse (z.B. Wald) komplett bedeckt, weshalb eine Entwicklung von Algorithmen zur Landbedeckungsklassifikation anhand solcher Szenen nicht möglich

ist. Deswegen wurden zunächst alle 1.324 RSS Stichprobenflächen der Tropen unter zu Hilfenahme folgender zusätzlicher Datensätze bewertet:

- Informationen zu den Gebieten mit den höchsten Abholzungsraten (HANSEN et al. 2008)
- Informationen über die Anzahl von Landbedeckungsklassen innerhalb der 20 km² großen RSS Stichprobenflächen auf Basis von GlobCover V2 (GlobCover 2008)
- Verhältnis von Wald zu anderen Landbedeckungsklassen innerhalb der 20 km² großen RSS Stichprobenflächen, basierend auf GlobCover V2 (GlobCover 2008)
- Informationen wo vorrangegangene optische Fernerkundungskampagnen wiederholt Probleme hatten die Landbedeckung auf Grund der starken Wolkenbedeckung zu identifizieren (pers. Kommunikation mit dem JRC 2008)
- Anzahl der Ökozonen innerhalb des jeweiligen 20 km² großen RSS Stichprobenquadrats (pers. Kommunikation mit FAO)
- Informationen über die Hangneigung, abgeleitet aus SRTM Daten (JARVIS et al. 2008).

Alle diese Informationen wurden anhand verschiedener Szenarien unter Verwendung von Kostenfunktionen bewertet. Anschließend wurde für jede Kostenfunktion eine Rangliste aus allen potenziellen Stichprobenflächen abgeleitet. Die dazu notwendigen Wichtungsfaktoren für die einzelnen Inputdatensätze (a-f) wurden jeweils in enger Absprache mit der FAO gebildet. Schließlich wurden die verschiedenen Ranglisten mit Pivot Tabellen einander gegenübergestellt. Anhand dieser Gegenüberstellung wurden schließlich die endgültigen Wichtungsfaktoren bestimmt. Gleichung (1) zeigt die für FAR-SAR 2010 gewählte Kostenfunktion:

$$x_{rank} = \sum_{i=1}^{1.324} 0.3 \frac{a_i}{a_{max}} + 0.2 \frac{b_i}{b_{max}} + 0.15 \frac{c_i}{c_{max}} + 0.1 \frac{d_i}{d_{max}} + 0.1 \frac{e_i}{e_{max}} + 0.15 f_i \quad (1)$$

mit

$$f = \prod_{i=1}^{1.324} -1(0.34 \frac{\hat{x}_i}{\hat{x}_{max}} + 0.33 l_i + 0.33 m_i) \quad (2)$$

und

$$l_i(\bar{x}_i, SD_i) = \begin{cases} \frac{\bar{x}_i + SD_i}{\bar{x}_{max}}, & \bar{x}_i + SD_i \leq \varphi \\ -1 \frac{\bar{x}_i + SD_i}{\bar{x}_{max}}, & \bar{x}_i + SD_i > \varphi \end{cases} \quad (3)$$

und

$$m_i = \begin{cases} \frac{m_i}{m_{max}}, & m_i \leq \varphi \\ -1 \frac{m_i}{m_{max}}, & m_i > \varphi \end{cases} \quad (4)$$

wobei

a-e = Inputdatensätze (s. oben);

abgeleitet aus Gebietsstatistiken der Hangneigung (f):

$\hat{x}$ = Median, m = Mehrheit, SD = Standardabweichung, $\bar{x}$ = Mittelwert
und schließlich

$\varphi = 15^\circ$, Schwellwert ab dem durch die Aufnahmegeometrie des SAR-Sensors Einschränkungen zu erwarten sind (Layover, Shadow, Foreshortning).

Durch die hier dargestellte Kombination der Wichtungsfaktoren gelingt es einerseits einen Schwerpunkt auf Waldgebiete mit hohem Rodungspotential zu setzen und andererseits gleichzeitig möglichst heterogene Landbedeckungsklassen zu erfassen, welche nicht zu stark von der Aufnahmegeometrie des SAR-Sensors beeinflusst werden.

In Abb. 1-1 ist die geographische Verteilung aller 350 Untersuchungsgebiete dargestellt. Da der TerraSAR-X Sensor zu Projektbeginn noch nicht lange genug operationell im Einsatz war (erst seit dem 7. Januar 2008), existierten noch keine TerraSAR-X High Resolution Spotlight Daten von den ausgewählten Gebieten im DLR Datenarchiv. Stattdessen mussten alle Szenen für dieses Projekt jeweils einzeln über das DLR Webportal geordert werden. Zum einen sind dadurch Verzögerungen im Aufbau der Projektdatenbankbank leider unvermeidlich gewesen. Zum anderen konnten auch nicht alle 350 Untersuchungsgebiete wie geplant aufgezeichnet werden, weil nach Auskunft der TerraSAR-X Missionskoordinatoren die Nachfrage nach TerraSAR-X zu hoch gewesen ist, um alle Nachfragen befriedigen zu können. Trotzdem gelang es bis zum 28.02.2012 insgesamt 304 Stichprobenflächen des RSS mit TerraSAR-X Daten abzudecken. Berücksichtigt man die insgesamt 413 ausgelösten Bestellungen, ergibt sich eine Erfolgsquote für die Akquise von 85%. Allerdings musste dafür an einigen wenigen Stellen vom ursprünglichen Ranking der Daten abgewichen werden um verfügbare Referenzdaten mit berücksichtigen zu können und Aufnahmekonflikte zu umgehen.

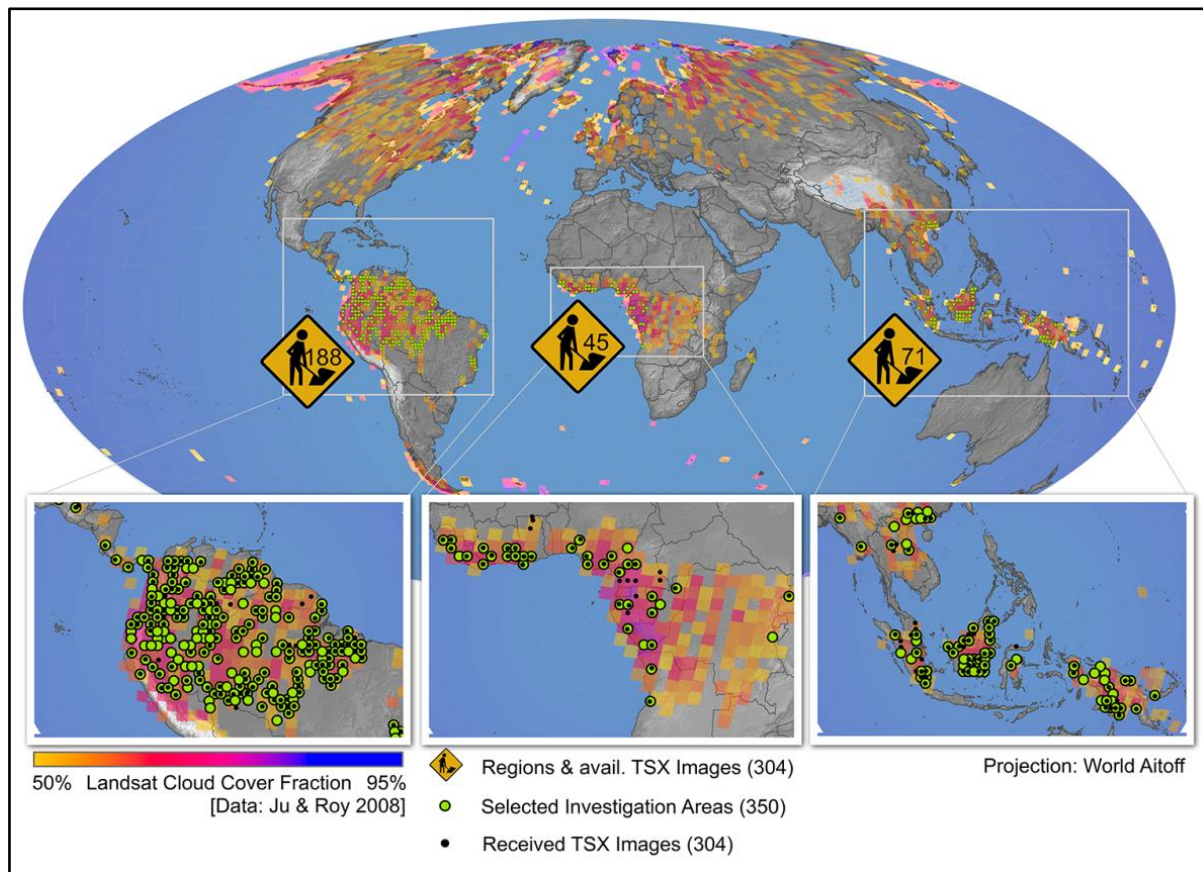


Abb. 1-1: Globale Wolkenbedeckung und FRA-SAR 2010 X-Band Untersuchungsgebiete.

Die Abbildung zeigt ausschließlich die mittlere Wolkenbedeckung in Landsat-Aufnahmen ab einem Schwellwert von größer gleich 50% (gelb) bis 95% (dunkelblau) (Informationen zur Wolkenbedeckung von Ju & Roy 2008). Alle 350 ausgewählten X-Band Untersuchungsgebiete sind mit einem Grünen Kreis markiert. Wegen verfügbarer Referenzdaten und weil nicht alle TerraSAR-X Aufnahmen realisiert werden konnten, weicht die tatsächliche X-Band Datengrundlage (schwarze Punkte) geringfügig von der Planung ab und umfasst nur 304 Stichprobenflächen.

1.1.2 Auswahl der fünf X+C+L-Band Untersuchungsgebiete (AP 2200)

Neben hochqualitativen Referenzdaten sind vollpolarimetrische ALOS PALSAR-Daten die Grundvoraussetzung für die Multifrequenzanalyse gewesen, denn die JAXA sieht einen strikten Aufnahmeplan für nahezu alle ALOS PALSAR-Daten vor. Deswegen wurden zu Projektbeginn zunächst alle verfügbaren geographischen Koordinaten der vollpolarimetrischen ALOS PALSAR-Datensätze in den Tropen beschafft und für eine GIS Analyse aufbereitet. Anschließend sind dieselben Informationen für Envisat ASAR-Daten über die ESA bezogen und ebenfalls GIS tauglich aufgearbeitet worden. Weil die TerraSAR-X Daten praktisch weltweit bestellt werden konnten, spiegelt eine Überlagerung der C+L-Band Datensätze bereits die mögliche Lage aller potentiellen X+C+L-Band Untersuchungsflächen wider (s. Abb. 1-2). Durch eine zusätzliche Verschneidung mit den 350 X-Band Stichprobenflächen wurde diese Auswahl jedoch weiter eingegrenzt.

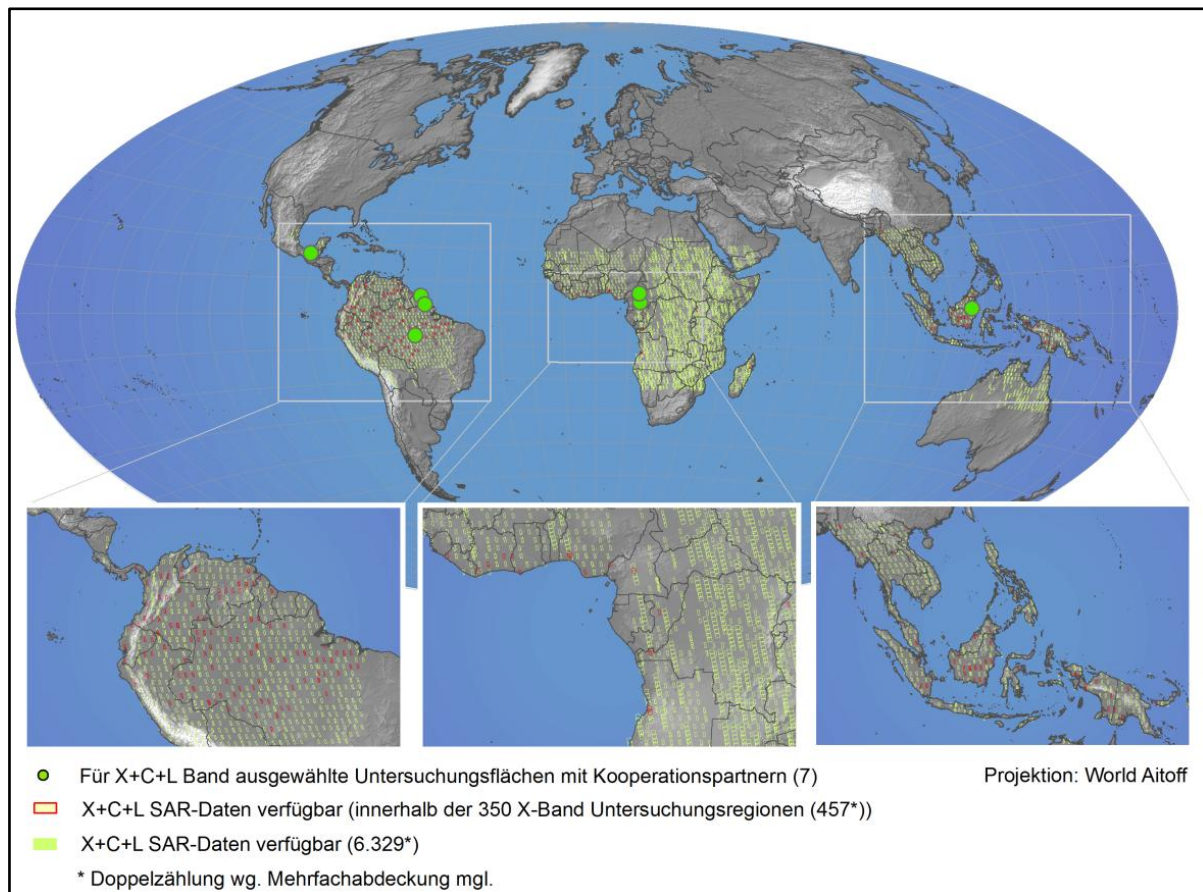


Abb. 1-2: FRA-SAR 2010 X+C+L-Band Untersuchungsgebiete.

Für diese Karte wurden zunächst alle vollpolarimetrischen ALOS PALSAR-Daten innerhalb der Tropen ausgewählt, welche über einer RSS Stichprobenfläche liegen. Anschließend wurde diese räumliche Information mit sämtlichen verfügbaren Envisat ASAR AP Datensätzen abgeglichen. Die pastelgrünen Flächen in der Karte zeigen das Ergebnis dieser räumlichen Abfragen. In rot sind zusätzlich diejenigen Flächen dargestellt, die sich mit den 350 X-Band Stichprobenflächen überlagern. Aufgrund von multi-temporalen C+L-Band Datensätzen kommt es zu Mehrfachüberschneidung einzelner Stichprobenflächen, weshalb die Gesamtanzahl mit 457 zunächst deutlich größer erscheint. Schließlich kennzeichnen die grünen Kreise die Lage, wo zusätzlich zu den X+C+L-Band SAR-Daten auch noch Referenzdaten grundsätzlich verfügbar waren.

Zeitgleich zur C+L-Band Metadatenbeschaffung wurde von der FSU und der FAO versucht Kontakt zu nationalen und internationalen Ministerien, Universitäten, Instituten, sonstigen Forschungseinrichtungen (z.B. National Parks), Nichtregierungsorganisationen und Stiftungen herzustellen, damit in einer gemeinsamen Kooperation mit FRA-SAR 2010 in-situ Daten geteilt werden können (s. Tab. 1-1). Hierzu wurden Telefonate geführt, E-Mails wurden ausgetauscht und wenn möglich auch direkt Kontakt zu Personen während Konferenzen gesucht. Innerhalb der Grenzen der 350 X-Band Untersuchungsregionen gelang es einen Austausch von Referenzdaten mit der FAO selbst (für zwei Gebiete in Kamerun) und der TU-Freiberg (jeweils ein Gebiet in Brasilien und Indonesien) zu vereinbaren. Damit alle fünf Untersuchungsregionen auch tatsächlich abgedeckt werden konnten, wurde nach Abstimmung mit allen Projektpartnern beschlossen, an drei Gebieten von der ursprünglichen X-Band Gebietsauswahl etwas weiter abzuweichen. Dadurch gelang es schließlich weitere Referenzdaten für ein Gebiet in Mexiko von der mexikanischen Behörde für die Biodiversität (CONABIO) zu erhalten. Schließlich unterstützte die ESA das Projekt maßgeblich durch

die Zusage für weitere *in-situ* Daten für zwei Regionen in Französisch-Guayana. Alle Versprechen wurden eingehalten und die Referenzdaten wurden an FRA-SAR 2010 geliefert.

Tab. 1-1: Für in-situ Daten kontaktierte Institutionen und Anzahl der angefragten Untersuchungsgebiete.

Institution	Gebiet (Anfragen)
Joint Research Centre	Afrika (1)
Georgia Tech School of Earth & Atmospheric Sciences	Brasilien (1)
Instituto de Biociências Brasil	Brasilien (1)
Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement	Brasilien (1)
Technologia da Informacao Brasil	Brasilien (1)
Seoul National University	Brasilien (1)
Swansea University	Brasilien (1)
Jet Propulsion Laboratory / California Institute of Technology	Brasilien (1)
Ministério da Ciência e Tecnologia Brasil / Geral de Observacao da Terra	Brasilien (2)
World Resources Institute	Kamerun (1),
World Resources Institute	Zentralafrika (1)
Friedrich-Schiller-Universität Jena / Institut für Geowissenschaften	Indonesien (1)
Remote Sensing Solutions GmbH	Indonesien (1)
International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation	Indonesien (2)
ZEBRIS Geoinformationssysteme und Consulting	Indonesien (3)
Clark University Worcester	Mexiko (1)
Online South Pacific	Papua Neuguinea (1)
University of Central Florida	Peru (1)
Université catholique de Louvain / Departement de géologie et de géographie	Zentralafrika (1)
Woods Hole Research Center	Zentralafrika (1)
Addis Ababa University / College of Development Studies	Zentralafrika (1)
Yamaguchi University	Zentralafrika (1)
Epidemio Project team	Zentralafrika (1)
Canada Centre for Remote Sensing	Zentralafrika (1)
Max-Planck-Institute for Evolutionary Anthropology	Zentralafrika (1)

1.1.3 Fernerkundungsdaten (AP 2300)

Für alle 350 X-Band Untersuchungsflächen wurden über das DLR TerraSAR-X Daten neu bestellt. Es wurden ausschließlich Aufnahmen im High Resolution Spotlight Modus mit einer räumlichen Auflösung von etwa 0,9 m in Azimut einer Range Auflösung von maximal 2 m (abhängig vom Einfallswinkel) beschafft. Im High Resolution Spotlight Modus des Sensors können in der Regel nur die ko-polaren Kanäle aufgezeichnet werden. Entsprechend liegen alle 304 TerraSAR-X Datensätze als HH- und VV-Bild in der FRA-SAR 2010 Datenbank vor. Grundsätzlich erlauben größere Einfallswinkel eine bessere Unterscheidung zwischen Wald- und Nichtwaldgebieten, weshalb bei der Bestellung auf größtmögliche Einfallswinkel Wert gelegt wurde. Schließlich variiert der Einfallswinkelbereich für alle FRA-SAR 2010 verfügbaren TerraSAR-X Szenen zwischen 35° und 55°.

Für die X+C+L-Band Untersuchungsgebiete wurden zusätzlich zu den TerraSAR-X Daten, Envisat ASAR- und ALSO PALSAR-Daten über die ESA bestellt. Für diese beiden SAR-Sensoren bestand jedoch nicht die Möglichkeit die Aufnahmeparameter projektspezifisch auszuwählen. Stattdessen konnten

diese Daten nur über die jeweiligen Archive der ESA bzw. der JAXA bestellt werden. Die entsprechenden Aufnahmekonfigurationen für die einzelnen Untersuchungsflächen sind in Tab. 1-2 für alle drei Sensoren zusammengestellt.

Zusätzlich zu den Radardaten wurden optische Landsat-Daten und wo verfügbar auch noch Quickbird Daten (über Google Earth) für die Validierung eingesetzt. Schließlich wurden auch noch das GlobCover V2 Produkt (GlobCover 2008) und das *Vegetation Continuous Fields* Produkt (HANSEN et al. 2003) zu Vergleichszwecken genutzt.

Tab. 1-2: SAR-Datengrundlage für die X+C+L-Band Untersuchungsgebiete.

Land & Kooperations-partner f. Ref. Daten	Region	RSS ID	Sensor und Polarisation	Aufnahme Datum	Einfalls-winkel	Orbit
Mexiko	Chiapas	w091n16	TSX_HH_VV	9.11.2010	41	ac
CONABIO			ASAR_VH_VV	21.3.2010	34	ac
			ASAR_VH_VV	30.5.2010	34	ac
			ALOS_PLR_vollp.	4.6.2009	26	ac
Frz.-Gyana	Paracou	w053n05	TSX_HH_VV	4.5.2011	52	dc
ESA			ASAR_VH_VV	13.4.2006	44	ac
			ALOS_PLR_vollp.	1.4.2009	26	ac
	Nourages	w053n04	TSX_HH_VV	14.3.2011	49	dc
			ASAR_HH_HV	11.9.2009	29	ac
			ALOS_PLR_vollp.	17.5.2009	24	ac
Kamerun	Norden	e015n04	TSX_HH_VV	6.12.2009	44	dc
FAO			ASAR_VH_VV	22.8.2009	34	dc
			ASAR_VH_VV	26.9.2009	34	dc
			ALOS_PLR_vollp.	5.6.2009	26	ac
	Süden	e015n03	TSX_HH_VV	6.12.2009	42	dc
			ALOS_PLR_vollp.	15.4.2007	24	ac
			ALOS_PLR_vollp.	31.5.2007	24	ac
			ALOS_PLR_vollp.	20.4.2009	24	ac
Brasilien		w055s03	TSX_HH_VV	30.10.2010	42	ac
TU Freiberg			ASAR_VH_VV	15.10.2008	29	dc
			ALOS_PLR_vollp.	13.3.2009	24	ac
			ALOS_PLR_vollp.	28.4.2009	24	ac
			ALOS_FBD_HH_HV	20.8.2009	39	ac
			ALOS_FBD_HH_HV	17.8.2008	39	ac
Indonesien		e117n02	TSX_HH_VV	22.3.2009	47	ac
TU Freiberg			ASAR_HH_HV	24.6.2006	19	dc
			ASAR_VV_VH	29.7.2006	19	dc
			ASAR_HH_HV	20.7.2006	23	ac
			ASAR_VV_VH	4.7.2006	29	ac
			ASAR_HH_HV	23.7.2006	34	ac
			ASAR_VV_VH	18.6.2006	38	dc
			ASAR_VV_VH	23.7.2006	38	dc
			ASAR_HH_HV	4.7.2006	41	dc
			ASAR_HH_VV	21.6.2006	44	ac
			ASAR_HH_HV	26.7.2006	44	ac
			ALOS_FBD_HH_HV	12.6.2007	39	ac
			ALOS_FBD_HH_HV	14.6.2008	39	ac
			ALOS_FBD_HH_HV	2.8.2009	39	ac
			ALOS_PLR_vollp.	21.5.2007	24	ac

1.1.4 Referenzdaten (AP 2300)

Wie bereits unter Punkt 1.1.2 festgestellt wurde, sind alle Versprechen FRA-SAR 2010 Referenzdatensätze zur Verfügung zu stellen eingehalten worden, jedoch ausnahmslos mit erheblicher Verzögerung. Entsprechend enthält die Projektdatenbank Informationen zu Referenzdateninformationen für fünf Länder, aufgeteilt auf insgesamt sieben Gebiete mit Untersuchungsflächen in: Mexiko (1), Französisch-Guyana (2), Kamerun (2), Brasilien (1) und Indonesien (1). In den folgenden Unterkapiteln werden diese Regionen zusammen mit den Referenzinformationen kurz präsentiert werden. Davor ist es jedoch notwendig einige gewichtige Kritikpunkte zu diesen Datengrundlagen zu nennen. Denn leider besitzen die gelieferten Informationen nicht immer die notwendigen Informationen/Qualität, um die Untersuchungen auf allen Testgebieten verlässlich durchführen zu können.

Grundsätzlich sind für eine erfolgreiche Ableitung von Waldstrukturparametern aus SAR-Daten ausreichend großflächige, absolut verlässliche und mit den SAR-Daten zeitlich abgestimmte Referenzdaten unabdingbar. Mit Ausnahme der Testgebiete in Französisch-Guayana haben alle anderen Referenzgebiete diesbezügliche folgende gravierende Mängel:

1. Verfügbare Referenzdaten sind flächenmäßig viel zu klein, um sie mit den ausgewählten Satellitendaten auswerten zu können. Damit Envisat ASAR- und ALOS PALSAR-Daten sinnvoll zur Anwendung kommen können müssen diese zunächst etwas räumlich gemittelt werden, damit der Speckle-Effekt reduziert werden kann. Für eine polarimetrische Modelanwendung (Erzeugung von Kohärenz-, bzw. Kovarianz Matrix) ist darüber hinaus eine zusätzliche räumliche Aggregation notwendig. Im Besten Fall kommen also C+L-Band Daten mit einer räumlichen Auflösung von 25 m in Betracht. Die vorliegenden Referenzdaten haben jedoch deutlich geringere Auflösungen: 1 Plot = 30 x 30 m (Mexiko), 1 Plot = 20 x 250 m (Kamerun), nur Punktdaten (Brasilien und Indonesien).
2. Verfügbare Referenzdaten sind zahlenmäßig nicht ausreichend. Für Waldgebiete, die in einer SAR-Szene bereits mehrere Hektar abdecken, sind die Anzahl der Referenzplots mit: 5 in Mexiko und jeweils 4 Plots für die beiden Szenen in Kamerun zu gering. (Brasilien und Indonesien haben zwar deutlich mehr Plots jedoch nur punktuelle Informationen.)
3. Die Verteilung der verfügbaren Referenzplots kann oftmals als nicht repräsentativ angesehen werden (z.T. schon allein wegen der zu geringen Anzahl).
4. Der Informationsgehalt reicht für eine Waldstrukturparameterableitung nicht aus. Wenn die Referenzinformationen lediglich Informationen über die Landbedeckungstypus beinhalten (Kamerun, Brasilien, Indonesien), dann können daraus keine Parameter wie Baumhöhe, Bestockungsgrad, Biomasse etc. aus den X+C+L-Band Daten abgeleitet werden.

Der Vollständigkeit halber soll in diesem Kontext auf noch zwei weitere Gründe hingewiesen werden die maßgeblich für den Ausschluss von zusätzlichen X+C+L-Band Referenzgebieten waren:

5. Der Zugriff auf nutzbare verfügbare Referenzdaten ist auf Grund von vertragsrechtlichen Gründen im Projektzeitraum nicht möglich gewesen (gilt auch für die Kooperation mit der TU Freiberg und die brasilianischen Untersuchungsgebiete).
6. Eine unvollständige X+C+L-Band Datengrundlage.

Diese aufgeführten Probleme haben dazu geführt, dass nicht alle Multifrequenzanalysen sinnvollerweise in jeder Region durchgeführt werden konnten.

1.1.4.1 Kamerun

Von der FAO konnten für insgesamt 21 RSS Stichprobenflächen Referenzdaten bezogen werden. Diese wurden bereits im GIS tauglichen ESRI shp-Dateiformat geliefert, so dass keine weitere Aufarbeitung notwendig war. Wie in der Karte in Abb. 1-3 dargestellt gibt es für 2 der 21 Untersuchungsflächen eine vollständige X+C+L-Band Datengrundlage. Hinzu kommen außerdem noch stereoskopische ALOS PRISM-Datensätze welche für diese Region vorliegen. Abb. 1-4 soll einen Eindruck über die räumliche Verteilung der Referenzflächen und der damit verknüpften Probleme anhand einer Region vermitteln. Für jede RSS Stichprobenflächen in Kamerun lieferte die FAO insgesamt vier Plots à 20 x 250 m, die jedoch ausschließlich Informationen über die Landbedeckung enthalten.

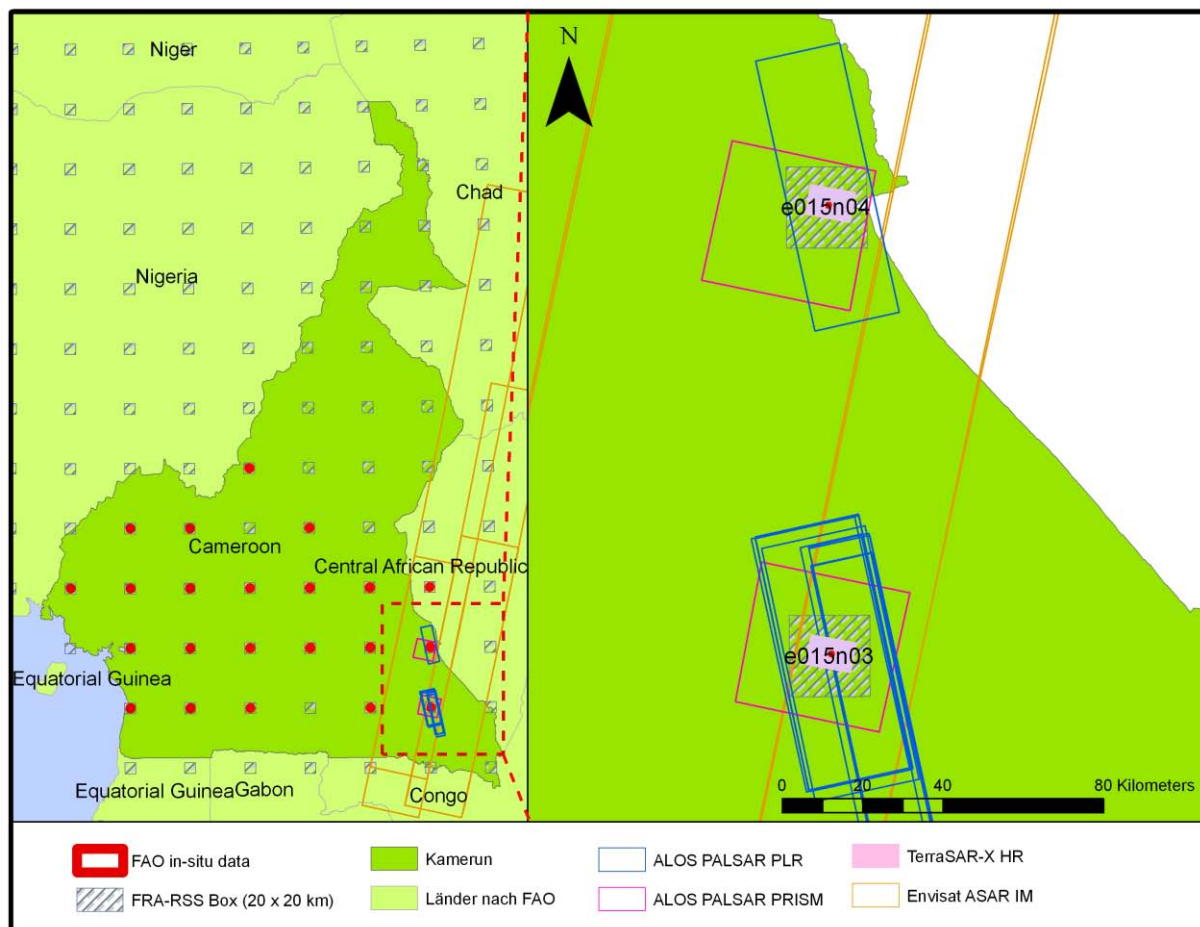


Abb. 1-3: Geographische Verteilung der Referenz- und SAR-Daten in Kamerun.

Von der FAO wurden aus Kamerun für insgesamt 21 Regionen Landbedeckungsinformationen in Form von jeweils vier Feldplots geliefert à 20 x 250 m. Jedoch waren nur für zwei RSS Untersuchungsflächen die notwendigen C+L-Band Datensätze verfügbar. Allerdings gab es für diese Gebiete auch noch stereoskopische ALOS-PRISM Daten, welche zur Validierung genutzt werden konnten.

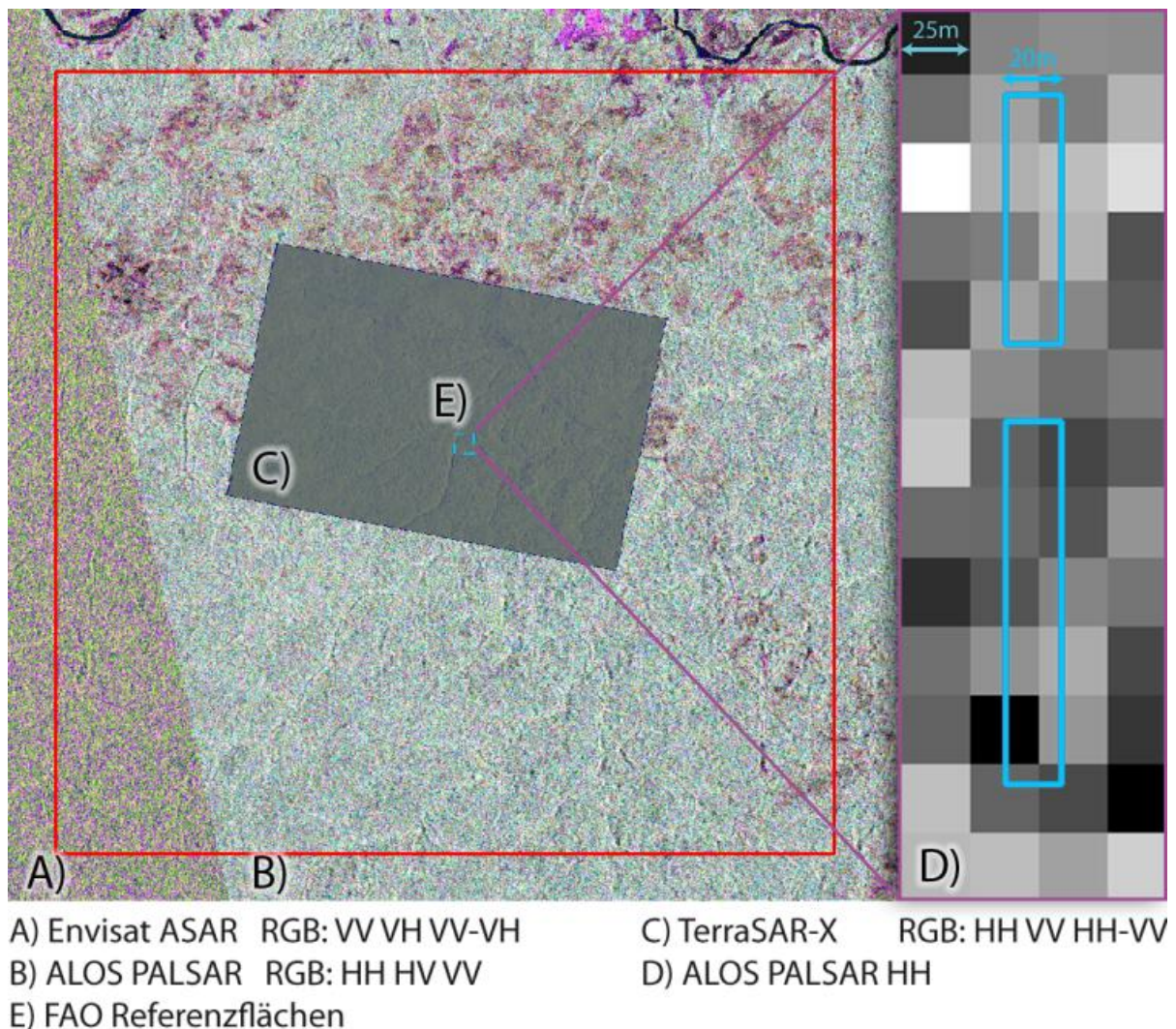


Abb. 1-4: Übersicht über die X+C+L-Band Datengrundlage und Referenzplots für die nördliche Untersuchungsregion in Kamerun.

Das rote Quadrat entspricht der RSS Untersuchungsfläche (20 x 20 km). Im Ausschnitt werden die Envisat ASAR-Daten (A) von den ALOS PALSAR-Daten (B) überlagert, welche schließlich von der vollständigen TerraSAR-X Szene (C) überlagert werden. Im TerraSAR-X Bild sind im unteren rechten Drittel die vier Referenzdatenplots in hellblau zu erkennen (E). Im rechten Teil der Abbildung ist ein Ausschnitt eines Referenzplots (hier aufgesplittet in zwei Teile) über HH-polarisierten L-Banddaten zu sehen (D). Diese Abbildung illustriert beispielhaft die Schwierigkeiten der Referenzdatensituation.

1.1.4.2 Französisch-Guyana

Die von der ESA gelieferten Referenzdaten sind die umfangreichsten und für die Auswertung von den vorliegenden SAR-Daten auch die am besten geeignetsten. Die Informationen wurden im Rahmen des Projektes TropiSAR (ESA 2011) erhoben. Weil diese Daten zunächst nur in Form von einer pdf-Datei und Excel Tabellen mit Biomasseinformationen geliefert wurden, mussten die Informationen zunächst selbst in entsprechende GIS-Daten überführt werden. Verfügbare Informationen sind ausschließlich Biomassewerte für insgesamt 28 Plots aufgeteilt in die zwei

Regionen Nouragues und Paracou (vgl. Abb. 1-5). Zusammen decken die Untersuchungsflächen eine Gesamtfläche von etwa 157 ha ab. Alle 28 Untersuchungsflächen liegen in drei unterschiedlichen räumlichen Auflösungen vor: 25 m, 50 m und 100 m (Nouragues) bzw. 250 m (Paracou). Dementsprechend ist die Variation der Biomassewerte für die verschiedenen Auflösungen teilweise enorm. In Extremfällen reichen die Biomassewerte innerhalb einzelner Plots von 200 t ha^{-1} bis zu 1.400 t ha^{-1} (vgl. Abb. 1-6).

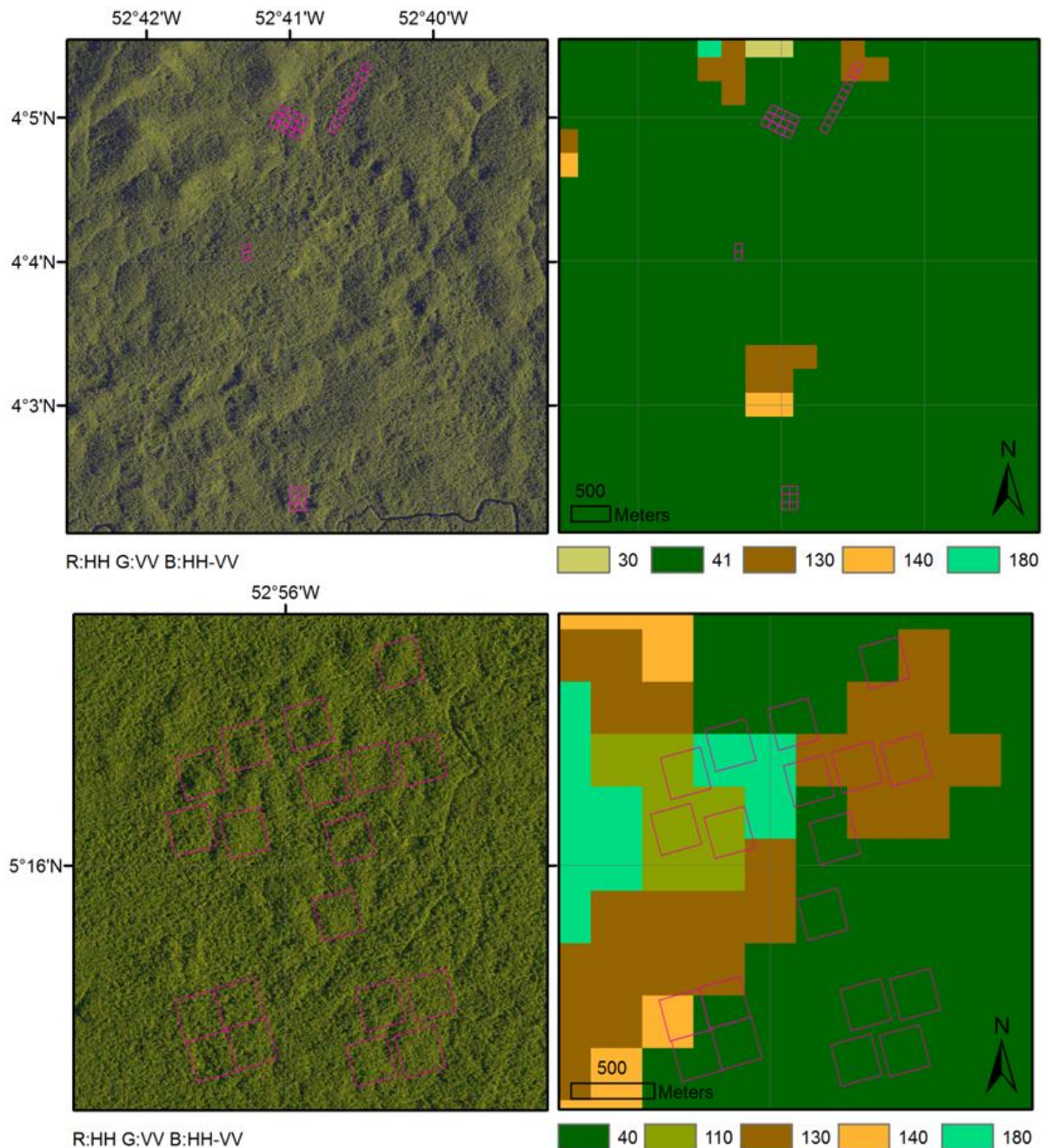


Abb. 1-5: Geographische Lage der Untersuchungsplots in Französisch-Guyana.

Der direkte Vergleich mit der Landbedeckung anhand von TerraSAR-X (links) und GlobCover V2 (rechts) für die beiden Untersuchungsgebiete in Französisch-Guyana Paracou (oben) und Nouragues (unten) verdeutlicht, wie wenig verlässlich die Landbedeckung hier aus optischen Daten extrahiert wurde. Beide Gebiete liegen in Regionen, welche zum Zeitpunkt der Aufnahmen vollständig von einer geschlossenen tropischen Walddecke bedeckt sind. Im Gegensatz dazu zeigt die GlobCover V2 Klassifikation teilweise abweichende Landbedeckungsklassen. Diese Unterschiede sind im direkten

Vergleich mit den X-Band SAR-Daten jedoch nicht plausibel und spiegeln die Tatsache wider, dass das GlobCover V2 Klassifikationsprodukt oftmals lokal und regional eine sehr geringe Genauigkeit hat.

GlobCover V2 Legende (Auszug der hier dargestellten Klassen):

30 Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest) (50-70%) / cropland (20-50%)

(Fortsetzung Legende Abb. 2-5)

40 Closed to open (>15%) broadleaved evergreen or semi-deciduous forest (> 5m)

41 Closed to open (>15%) broadleaved evergreen or semi-deciduous forest (> 5m)

110 Mosaic forest or shrubland (50-70%) and grassland (20-50%)

130 Closed to open (>15%) (broadleaved or needle-leaved, evergreen or deciduous) shrubland (<5m)

140 Closed to open (>15%) herbaceous vgt (grassland, savannas or Lichens/Mosses)

180 Closed to open (>15%) grassland or woody vgt on regularly flooded or waterlogged soil, fresh, brakish or saline water

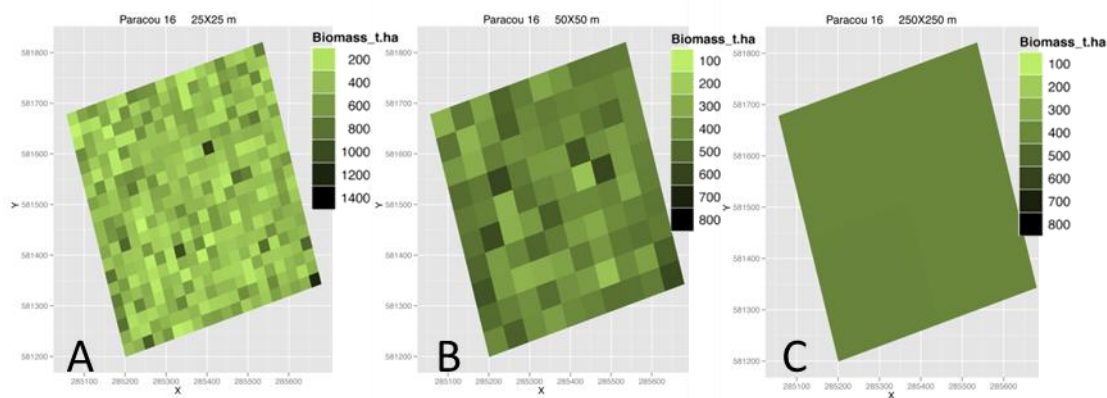


Abb. 1-6: Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Variabilität der Biomasse.

Am Beispiel eines einzelnen Untersuchungsplots (500 x 500 m) Paracou soll hier die Schwierigkeit aufgezeigt werden die Biomasse über SAR-Daten abzuleiten. Die Abbildungen A-C zeigen den gleichen Inventurblock auf drei verschiedenen räumlichen Auflösungsskalen: A) 25 m, B) 50 m und C) 250 m. Aufgrund der extrem hohen Variabilität der Biomasse in den Tropen zeigen sich enorme Schwankungsbereiche, wie hier wo die Biomasse in diesem einen Plot von maximal 500 t ha⁻¹ (C) bis maximal 1400 t ha⁻¹ (A) variiert. (Daten und Abbildung: ESA TropiSAR - Final Report).

1.1.4.3 Mexiko

Gemeinsam mit der mexikanischen Behörde für die Biodiversität (CONABIO) wurde im Juni 2010 eine von CONABIO finanzierte und organisierte einwöchige Feldkampagne durchgeführt. Dabei konnten drei Untersuchungsplots (30 x 30 m) eingemessen werden, d.h. es wurden Baumhöhen und –durchmesser aller Bäume bestimmt. Anschließend wurde die Biomasse unter Verwendung von regional gültigen allometrischen Gleichungen berechnet. Zusätzlich gibt es wie in Abb. 1-7 dargestellt, Daten über die Biomasse aus der nationalen Inventurdatenbank für diese Region. Allerdings gibt es jedoch keine verlässlichen Angaben über die Qualität der dort gespeicherten Biomassenwerten (auch wie diese Information abgeleitet wurde blieb unklar).

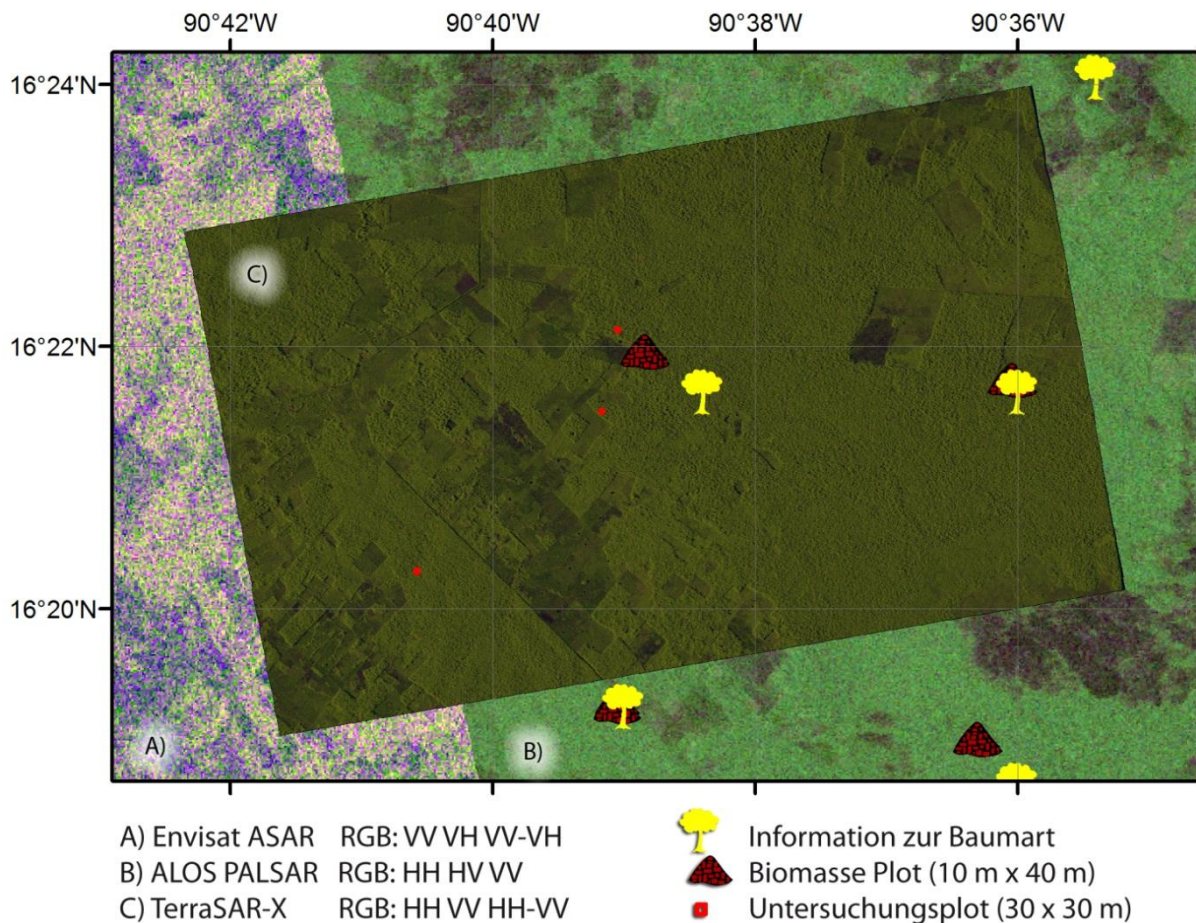


Abb. 1-7: Geographische Verteilung der Referenz- und SAR-Daten in Mexiko.

Im Ausschnitt werden die Envisat ASAR-Daten (A) von den ALOS PALSAR-Daten (B) überlagert, welche schließlich von der vollständigen TerraSAR-X Szene (C) überlagert werden. Im TerraSAR-X Bild sind neben den drei roten 30 m² großen Untersuchungsplots zwei Biomasseplots aus der nationalen Forstinventurdatenbank zu sehen (10 x 40 m). Hinzu kommen schließlich noch zwei Punkte (gelbe Bäume) aus der nationalen Forstinventurdatenbank mit zusätzlichen Informationen über die Bäume (Spezies, Höhe, Brustdurchmesser). Eigentlich müssten die Daten zur Biomasse und Informationen zu den Bäumen aus der Datenbank deckungsgleich sein. Die Frage wie der vorliegende Versatz zustande kam und auch wie die Biomasse schließlich berechnet wurde, konnte jedoch nicht abschließend geklärt werden.

1.1.4.4 Brasilien & Indonesien

Für Brasilien und Indonesien wurden die Referenzinformationen ebenfalls direkt als GIS taugliche shp-Dateien geliefert. Allerdings handelt es sich bei den eingegangenen Daten ausschließlich um Landbedeckungsinformationen und nicht wie gewünscht um Informationen zu Waldstrukturparametern. Hinzu kommt, dass für beide Regionen lediglich Punktdaten (vgl. Abb. 1-8), bzw. im Fall von Indonesien zusätzlich auch Polygone mit einem unbestimmten räumlichen Abweichungsfehler geliefert werden konnten. Nach Aussage der an der TU-Freiberg verantwortlichen Projektmitarbeiter ist der Zugriff auf flächenmäßige Informationen für eine Waldstrukturparameterableitung aus vertragsrechtlichen Gründen erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich.

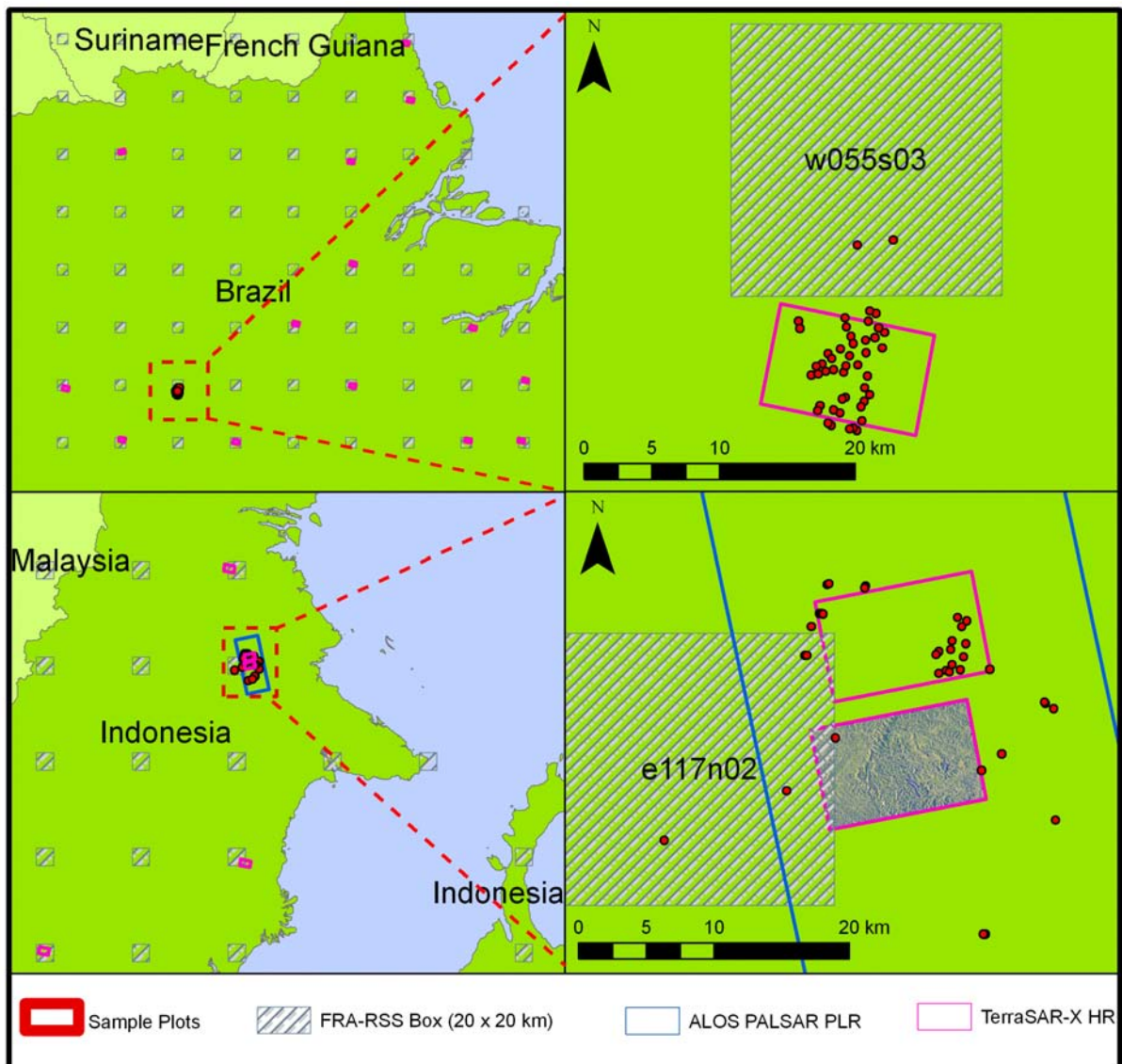


Abb. 1-8: Geographische Verteilung der Referenz- (rote Punkte) und SAR-Daten in Brasilien (oben) und Indonesien (unten).

1.2 Datenverarbeitung (AP 3000)

1.2.1 SAR-Daten Prozessierung

Alle TerraSAR-X Daten wurden im COSAR Dateiformat mit für die wissenschaftliche Analyse ausgelegten Orbit Vektoren bestellt und geliefert. Auf die Lieferung von bereits kalibrierten und geokodierten SAR-Daten vom DLR wurde bewusst verzichtet, damit bei der Algorithmen Entwicklung verschiedene Konfigurationen innerhalb der Prozessierung in ihrem Zusammenspiel getestet werden konnten (z.B. die Anwendung verschiedener Multi-Look Faktoren zur radiometrischen Stabilisierung). Im Flussdiagramm (Abb. 1-9) ist die entsprechende SAR-Datenprozessierung mit der eingesetzten GAMMA Software dargestellt. Nach dem Import der SAR-Daten in ein GAMMA lesbares Format werden die Daten kalibriert und zu Sigma Nought Werten transformiert. Anschließend erfolgt eine Reduzierung von Speckle durch räumliche Mittelung mehrerer Pixel. Dabei verringert sich die räumliche Auflösung auf 5 m. Anschließend wird ein digitales Geländemodell (hier SRTM) für die

automatisierte Georeferenzierung der SAR-Daten verwendet. Algorithmen zur automatischen Orthorektifizierung und topographischen Normalisierung wurden ebenfalls in die Prozessierungskette eingearbeitet, konnten jedoch nicht operationell eingesetzt werden, weil hierfür die räumliche Auflösung der SRTM Daten (~ 90 m) nicht ausreicht und deshalb zu falschen Ergebnissen führt (vgl. Abb. 1-10).

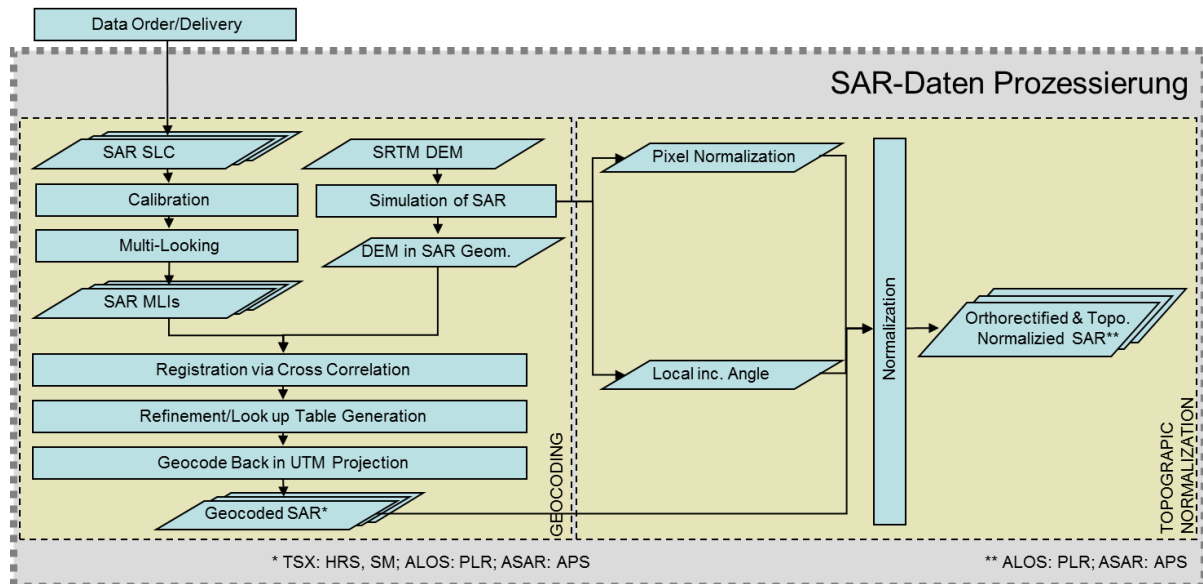


Abb. 1-9: Schema der SAR-Daten Prozessierung.

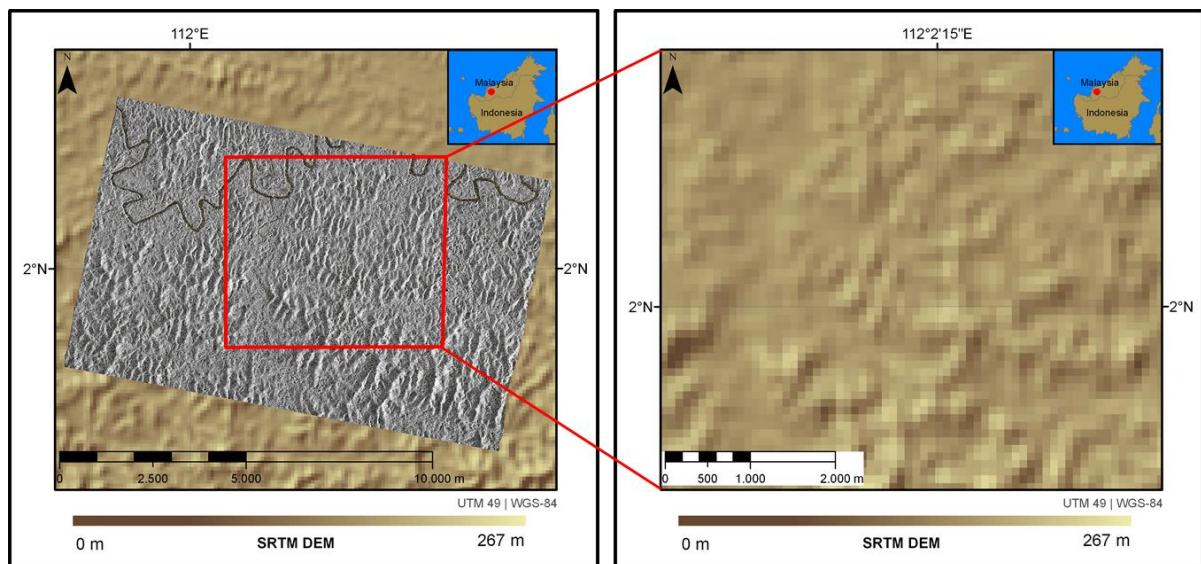


Abb. 1-10: Vergleich der räumlichen Auflösung von TerraSAR-X (links) und SRTM DEM (rechts).

Während die orthorektifizierte und topographisch normalisierte TerraSAR-X Szene eine räumliche Auflösung von 5 m hat, ist das Auflösungsvermögen des SRTM DEMs mit 90 m deutlich geringer. Wegen dieser Diskrepanz misslingt sowohl die Orthorektifizierung, als auch die topographische Normalisierung der TerraSAR-X Aufnahme und es sind immer noch Layover sowie Foreshorting Effekte, als auch das Mesorelief im SAR-Produkt deutlich sichtbar.

Die Lieferung der Envisat ASAR-Daten sowie der ALOS PALSAR-Daten erfolgte ebenfalls als *Single Look Complex* Produkt. Deshalb konnten ähnliche Algorithmen wie für die TerraSAR-X

Datenprozessierung Verwendung finden. Entsprechend wurde die vorgestellte Prozessierungskette durch Anpassung einiger Parameter, wie z.B. Kalibrationskonstanten, Multi-Looking Faktoren und Oversamplingfaktoren an den jeweiligen Sensor angepasst und verwendet. Für Envisat ASAR-Daten wurden darüber hinaus die besseren Orbitpositionsparameter von der TU Delft bei der Georeferenzierung verwendet. Weil die ASAR- und PALSAR-Daten während der Prozessierung auf eine räumliche Auflösung von 25 m gebracht wurden, konnten sie anschließend auch sinnvoll mit SRTM Geländedaten orthorektifiziert und topografisch normalisiert werden.

1.2.2 X-Band Datenauswertung (AP 3100)

Das folgende Unterkapitel beschäftigt sich ausschließlich mit der Datenverarbeitung der räumlich hoch aufgelösten TerraSAR-X Daten um daraus Waldkarten für die Welternährungsorganisation abzuleiten. Weil der RSS für 2010 multi-temporale optische Daten auswertet mussten die abzuleiten Klassen geringfügig angepasst werden. Dazu wurden gemeinsam mit der FAO für FRA-SAR 2010 folgende drei Klassifikationsebenen vereinbart:

1. binär, d.h. nur eine Waldmaske;
2. zwei Waldklassen (1-10% und 11-100% Waldbedeckung) + eine Wasserklasse + eine sonstige Klasse;
3. drei Waldklassen (1-10%, 11-70% und 71-100% Waldbedeckung) + eine Wasserklasse + eine sonstige Klasse.

Damit die Algorithmen entsprechend trainiert werden konnten sind dazu in einem ersten Schritt zunächst 20 repräsentative TerraSAR-X Szenen von der FAO und der FSU in enger Zusammenarbeit ausgewählt worden.

1.2.2.1 Visuelle Interpretation

Auf Basis der verfügbaren TerraSAR-X Aufnahmen und unter zu Hilfenahme von frei verfügbaren hoch aufgelösten optischen Daten (Google Earth) wurden auf den 20 repräsentativen Szenen Trainingsgebiete nach der modifizierten FRA Klassenbeschreibung abgeleitet (vgl. Tab. 1-3). Bereits hier zeigte sich, dass die sehr hohe räumliche Auflösung der TerraSAR-X Daten die Interpretation der Landoberfläche durch Experten erheblich vereinfachen kann. Sogar im Vergleich mit den hoch aufgelösten optischen Daten sind Texturen im SAR-Bild oftmals besser zu interpretieren, weil Dunst, Nebel, Rauch oder sonstige atmosphärische Effekte nicht existieren.

Tab. 1-3: Überblick über die Trainingsgebiete von 20 X-Band Untersuchungsgebieten.

Id	RSS Tile	Waldbedeckungsgrad 71-100%		Waldbedeckungsgrad 11-70%		Waldbedeckungsgrad 1-10%		Sonstige Landbedeckung		Wasser		Total	
		ROIs	Pixel	ROIs	Pixel	ROIs	Pixel	ROIs	Pixel	ROIs	Pixel	ROIs	Pixel
1	w040s19	19	25929	0	0	4	3219	10	4711	16	5208	49	39067
2	w047s01	10	9268	7	11181	6	6525	9	9773	5	355	37	37102
3	w053s03	18	30385	8	11558	0	0	15	19916	12	1447	53	63306
4	w055s07	20	35038	9	14703	5	7597	15	21043	3	143	52	78524
5	w057s03	41	29069	4	2332	0	0	17	6910	13	8805	75	47116
6	w057s11	9	76104	3	7915	7	33492	0	0	7	1999	26	119510
7	w062n09	23	9679	6	9555	4	3482	34	6244	14	27841	81	56801
8	w065s10	18	29772	11	17601	11	10630	8	13429	4	203	52	71635
9	w067s05	26	9493	7	10429	3	3316	20	4830	9	4877	65	32945
10	w074s10	24	16243	7	10921	2	2695	17	2252	11	11750	61	43861
11	w077s00	24	5831	6	1675	12	1905	10	965	13	3856	65	14232
12	e103s00	10	15096	19	6957	11	67171	0	0	0	0	40	89224
13	e105s04	13	17398	15	5495	0	0	6	8713	0	0	34	31606
14	e112n01	13	15802	10	16665	6	8034	3	5003	12	4087	44	49591
15	e113s02	7	11319	6	11104	4	7422	11	15083	10	1605	38	46533
16	e113s03	4	3771	4	3679	8	6868	9	6252	11	5135	36	25705
17	e114s02	10	15118	5	7737	6	8564	0	0	13	8587	34	40006
18	e115s03	0	0	3	4385	6	6317	8	9338	11	4296	28	24336
19	e116s03	13	21881	6	9575	5	2975	5	4908	14	11893	43	51232
20	e117s00	14	6668	5	7037	11	5238	11	4984	0	0	41	23927
Total		316	383864	141	170504	111	185450	208	144354	178	102087	954	986259

1.2.2.2 Auswertung der Rückstreuintensitäten

Im Anschluss an die Digitalisierung der Trainingsgebiete sind die Rückstreuintensitäten von allen 20 repräsentativen TerraSAR-X Szenen ausgewertet worden. Entgegen den Erwartungen der visuellen Interpretation, geht aus Abb. 1-11 eindeutig hervor, dass keine der beiden vorliegenden Polarisationen genügt, um aus den reinen TerraSAR-X Rückstreuintensitätswerten die gewünschte Klassifikation vollständig abzuleiten. Nur die Wasserklasse lässt sich offenbar von allen anderen unterscheiden. Auf Grund des Einfluss von Speckle ist insbesondere die höchste realisierbare räumliche Auflösung von 2 m wenig zielführend. Aber auch radiometrisch stabilere Daten (durch einfache Mittelung), mit einer räumlichen Auflösung von 5 m bzw. 10 m eignen sich nur geringfügig besser für die angestrebte Klassentrennung (vgl. Abb. 1-12 u. Abb. 1-13).

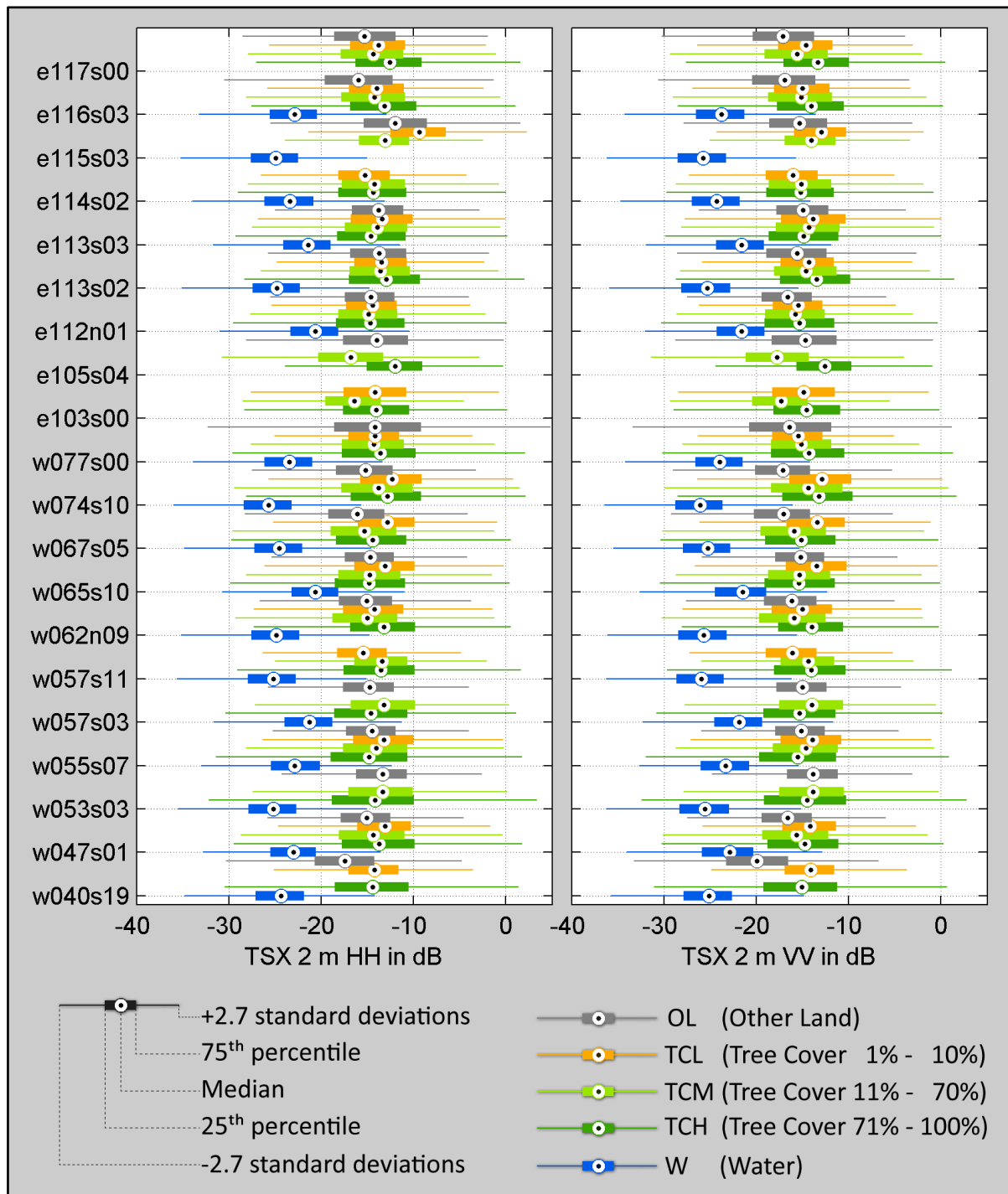


Abb. 1-11: Boxplotauswertung der TerraSAR-X Intensitäten.

Die Boxplots der 20 repräsentativen TerraSAR-X Szenen zeigen deutlich, dass eine Unterscheidung in die gewünschten fünf Klassen anhand der reinen Rückstreuintensitäten und bei einer räumlichen Auflösung von 2 m nicht möglich ist. Lediglich die Klasse Wasser kann basierend auf Rückstreuintensitäten unterschieden werden. (Nicht alle Szenen verfügen über alle fünf Klassen (z.B. e105s04 enthält keine Wasserkategorie). Deswegen fehlen manchmal jeweils Boxplots.)

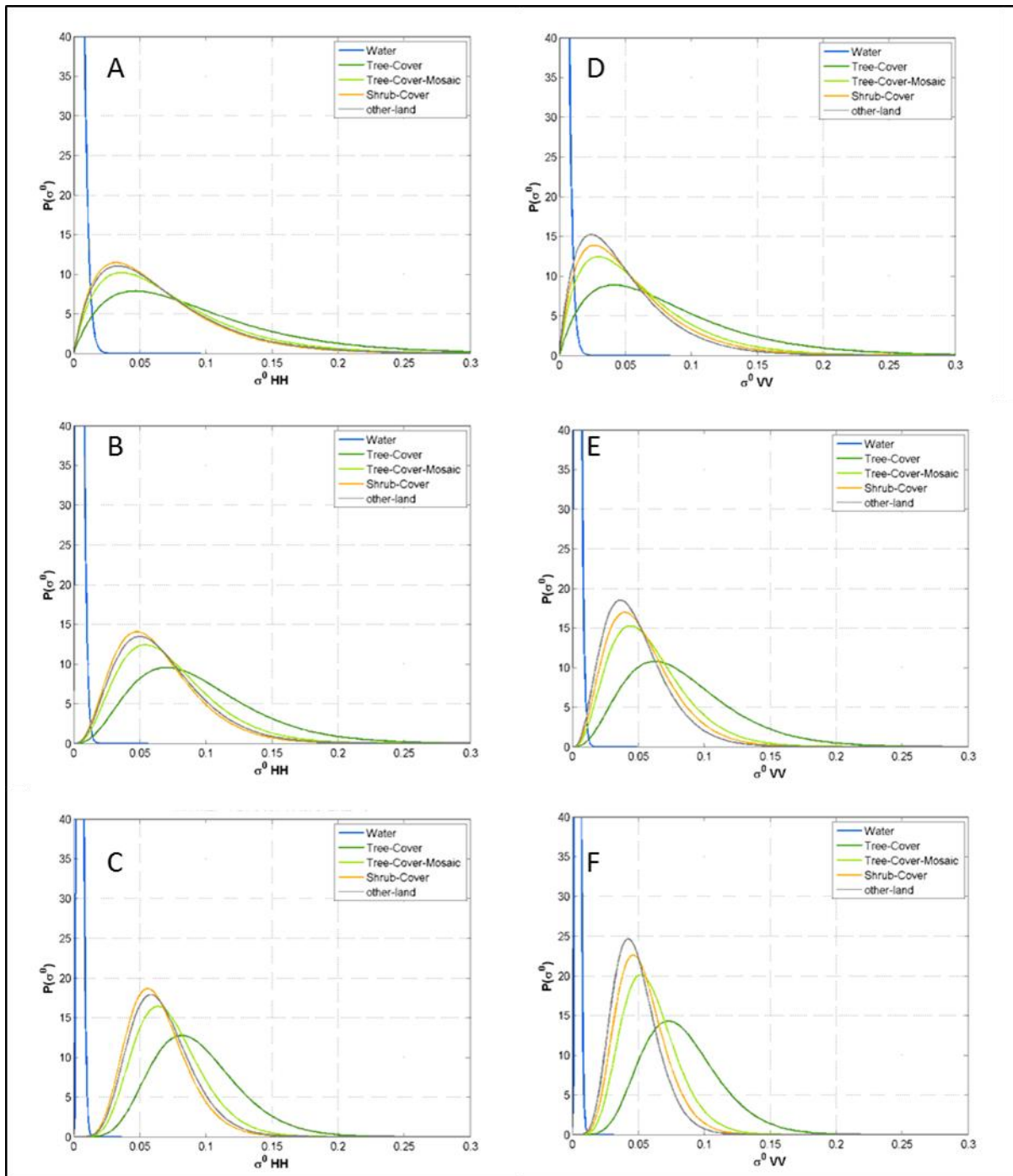


Abb. 1-12: PDFs für eine einzelne TerraSAR-X Szene*.

Die PDFs wurden für die verfügbaren Polarisationen (HH A-C u. VV D-F) und drei geometrische Auflösungen (2 m(A,D), 5 m(B,E) u. 10 m (C,F)) berechnet. Es ist deutlich sichtbar, dass trotz Dezimierung des Speckle-Effektes (durch räumliche Mittelung der SAR-Pixel) sich die einzelnen Zielklassen nicht einfach trennen lassen. *FAO-RSS Box: e113s02

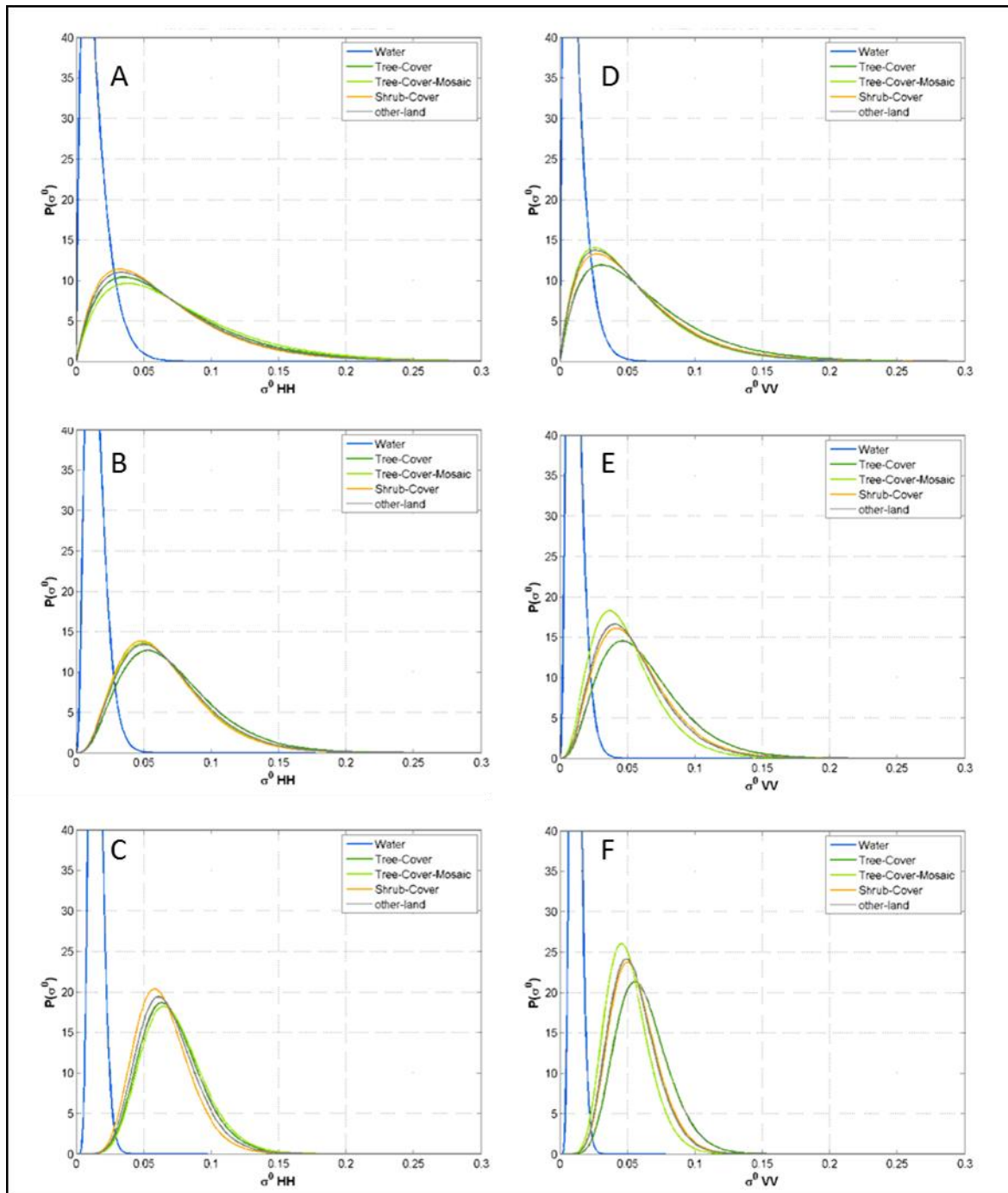


Abb. 1-13: Gemittelte PDFs für insgesamt 10 TerraSAR-X Szenen*.

Die PDFs wurden ebenfalls für die verfügbaren Polarisationen (HH A-C u. VV D-F) und drei geometrische Auflösungen (2 m(A,D), 5 m(B,E) u. 10 m (C,F)) berechnet. *FAO-RSS Boxen: w047s01, w055s07, w062n09, w065s10, w067s05, w074s10, e112n01, e113s02, e113s03, e116s03.

1.2.2.3 Radiometrie und Radarfilter

Insgesamt vier verschiedene, speziell für die Auswertung von SAR-Daten ausgelegte Speckle-Filterverfahren wurden auf ihre Eignung hin untersucht, ob sie die Radiometrie der Rückstreuintensitäten soweit verbessern können, dass eine Klassifikation ermöglicht wird. Die gewählten Filteralgorithmen (s. Tab. 1-4) variieren z.T. beträchtlich, weshalb kein Filterverfahren *a priori* als das Geeignetste bestimmt werden kann. Die Möglichkeiten den besten Filter auszuwählen sind jedoch wegen fehlender Bodenreferenzdaten limitiert gewesen. Deshalb wurde entschieden die

radiometrische Qualitätssteigerung der Speckle-Filterung in einem zweistufigen Prozess zu bestimmen. Im ersten Schritt wurden dazu alle vier Speckle-Filter auf zwei verschiedenen TerraSAR-X Szenen mit Filterfenstergrößen von 3x3 bis 15x15 Pixeln angewendet. Die Überlegung dabei war, dass derjenige Filteralgorithmus der Geeignetste ist, welcher die geringste Standardabweichung über alle Untersuchungsflächen und Filterfenstergrößen hinweg aufweist. Im zweiten Schritt wurde dieser „beste“ Filteralgorithmus dann wiederholt eingesetzt und die resultierende Verbesserung der radiometrischen Qualität der zweifach gefilterten Daten anhand der *Equivalent Number of Looks* (ENL) Methode begutachtet. Hierbei wird das Verhältnis vom quadrierten Mittelwert zur Varianz über einer homogenen Fläche im Bild bestimmt. Homogen bedeutet in diesem Fall das die zugrunde liegenden Rückstreuprozesse einheitlich sein müssen. Je höher (niedriger) der ENL-Wert, desto besser (schlechter) ist die radiometrische Qualität. Um eine weitere Degradation der räumlichen Auflösung weitestgehend zu verhindern sind bei der zweiten Filterung nur Filterfenstergrößen von 3x3 und 5x5 Pixeln verwendet worden. Im Ergebnis ist eine zweifache FROST-Speckle-Filterung mit Fenstergrößen von zunächst 3x3 und dann 5x5 Pixeln am besten für die Klassifikation geeignet (s. Abb. 1-14).

Tab. 1-4: Übersicht über die Speckle-Filter Analyseergebnisse.

(TCH = Waldbedeckungsgrad 71-100%, TCM = Waldbedeckungsgrad 11-70%, TCL = Waldbedeckungsgrad 1-10%, W = Wasser, OL = sonstige Landbeckung)

ROI	Speckle - Filter												Filter- größe in Pixeln
	Lee			Gamma Map			Frost			Enhanced Lee			
	Mean	SD	CV	Mean	SD	CV	Mean	SD	CV	Mean	SD	CV	
TCH	0,0665	0,0333	0,5005	0,0659	0,0405	0,6148	0,0669	0,0197	0,2939	0,0662	0,0279	0,4217	3x3
TCM	0,0555	0,0398	0,7177	0,0552	0,0444	0,8055	0,0554	0,0290	0,5229	0,0552	0,0371	0,6725	
TCL	0,0796	0,0236	0,2966	0,0780	0,0275	0,3525	0,0801	0,0172	0,2148	0,0797	0,0184	0,2306	
W	0,0046	0,0012	0,2694	0,0046	0,0006	0,1215	0,0046	0,0005	0,1186	0,0046	0,0005	0,1184	
OL	0,0392	0,0237	0,6052	0,0390	0,0253	0,6489	0,0388	0,0161	0,4145	0,0390	0,0213	0,5464	
TCH	0,0670	0,0330	0,4930	0,0667	0,0425	0,6377	0,0672	0,0124	0,1850	0,0670	0,0266	0,3966	5x5
TCM	0,0559	0,0397	0,7110	0,0557	0,0457	0,8207	0,0557	0,0231	0,4153	0,0557	0,0379	0,6812	
TCL	0,0794	0,0206	0,2593	0,0775	0,0273	0,3528	0,0802	0,0128	0,1592	0,0798	0,0143	0,1795	
W	0,0046	0,0008	0,1685	0,0046	0,0004	0,0922	0,0046	0,0004	0,0912	0,0046	0,0004	0,0912	
OL	0,0391	0,0231	0,5905	0,0390	0,0254	0,6508	0,0388	0,0137	0,3526	0,0392	0,0223	0,5686	
TCH	0,0671	0,0330	0,4924	0,0669	0,0430	0,6428	0,0671	0,0097	0,1451	0,0673	0,0257	0,3823	7x7
TCM	0,0560	0,0397	0,7088	0,0559	0,0462	0,8256	0,0557	0,0202	0,3616	0,0558	0,0382	0,6841	
TCL	0,0796	0,0201	0,2530	0,0775	0,0282	0,3646	0,0802	0,0108	0,1344	0,0799	0,0128	0,1604	
W	0,0046	0,0006	0,1405	0,0046	0,0004	0,0807	0,0046	0,0004	0,0807	0,0046	0,0004	0,0807	
OL	0,0391	0,0230	0,5874	0,0390	0,0255	0,6533	0,0388	0,0122	0,3142	0,0391	0,0227	0,5808	
TCH	0,0670	0,0330	0,4927	0,0669	0,0431	0,6448	0,0670	0,0084	0,1250	0,0671	0,0249	0,3714	9x9
TCM	0,0560	0,0397	0,7100	0,0560	0,0463	0,8275	0,0556	0,0185	0,3324	0,0559	0,0384	0,6874	
TCL	0,0796	0,0200	0,2513	0,0771	0,0284	0,3684	0,0800	0,0096	0,1202	0,0798	0,0121	0,1512	
W	0,0046	0,0006	0,1245	0,0046	0,0003	0,0760	0,0046	0,0004	0,0761	0,0046	0,0003	0,0755	
OL	0,0392	0,0231	0,5882	0,0390	0,0253	0,6486	0,0390	0,0117	0,3008	0,0391	0,0233	0,5964	
TCH	0,0670	0,0331	0,4940	0,0669	0,0432	0,6455	0,0669	0,0090	0,1343	0,0671	0,0248	0,3703	11x11
TCM	0,0560	0,0397	0,7089	0,0561	0,0464	0,8274	0,0556	0,0176	0,3168	0,0559	0,0382	0,6832	
TCL	0,0794	0,0200	0,2513	0,0774	0,0293	0,3783	0,0797	0,0085	0,1061	0,0795	0,0114	0,1436	
W	0,0046	0,0006	0,1270	0,0046	0,0004	0,0916	0,0046	0,0004	0,0889	0,0046	0,0004	0,0850	
OL	0,0392	0,0231	0,5898	0,0389	0,0253	0,6505	0,0395	0,0184	0,4668	0,0391	0,0238	0,6075	
TCH	0,0670	0,0331	0,4945	0,0669	0,0432	0,6454	0,0676	0,0072	0,1059	0,0670	0,0246	0,3671	13x13
TCM	0,0559	0,0396	0,7078	0,0561	0,0464	0,8272	0,0555	0,0173	0,3124	0,0559	0,0379	0,6782	
TCL	0,0792	0,0200	0,2520	0,0773	0,0292	0,3773	0,0792	0,0086	0,1081	0,0791	0,0111	0,1398	
W	0,0046	0,0006	0,1396	0,0046	0,0005	0,1157	0,0047	0,0005	0,1125	0,0046	0,0005	0,1111	
OL	0,0392	0,0232	0,5924	0,0390	0,0255	0,6551	0,0792	0,0086	0,1081	0,0392	0,0242	0,6164	
TCH	0,0670	0,0332	0,4954	0,0669	0,0432	0,6454	0,0668	0,0071	0,1070	0,0671	0,0247	0,3689	15x15
TCM	0,0559	0,0394	0,7054	0,0561	0,0464	0,8268	0,0553	0,0163	0,2941	0,0558	0,0373	0,6676	
TCL	0,0791	0,0203	0,2571	0,0774	0,0299	0,3860	0,0777	0,0073	0,0946	0,0789	0,0112	0,1417	
W	0,0046	0,0007	0,1494	0,0046	0,0006	0,1295	0,0047	0,0005	0,1057	0,0046	0,0006	0,1275	
OL	0,0392	0,0233	0,5930	0,0389	0,0256	0,6562	0,0397	0,0119	0,2987	0,0392	0,0243	0,6188	

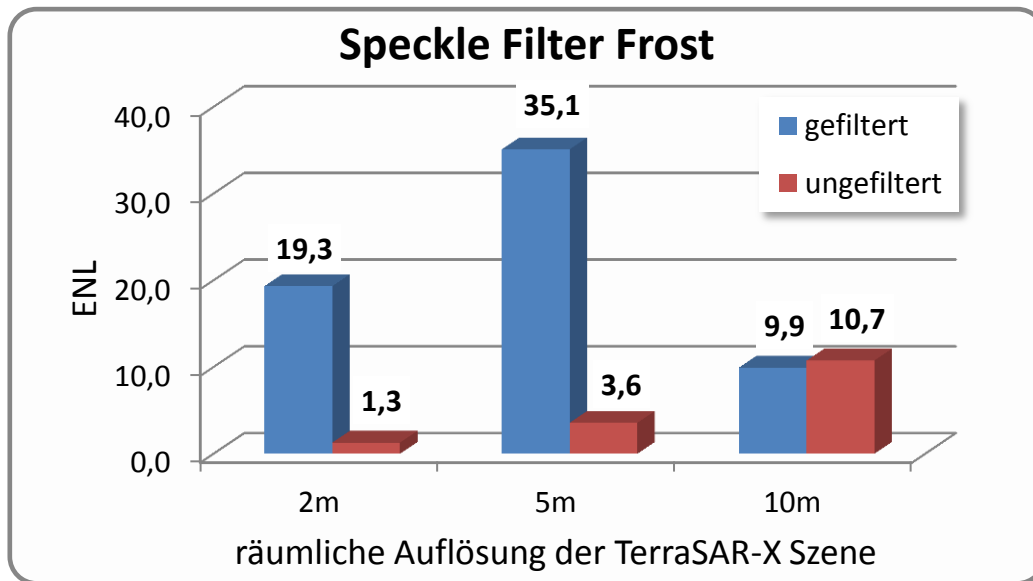


Abb. 1-14: Ergebnisse der ENL-Auswertung.

Aus der Abbildung ist deutlich zu sehen, dass bei den ungefilterten Daten die radiometrische Qualität mit zunehmender Degradation der Auflösung nur geringfügig zunimmt. Im Gegensatz dazu bewirkt eine doppelte Speckle-Filterung zu nächst eine eindeutige Verbesserung der Radiometrie. Die Ursache für den rapiden Abfall der radiometrischen Qualität bei den Speckle gefilterten Daten mit einer räumlichen Auflösung von 10 m beweist, dass kaum noch Speckle in Ausgangsdaten existierte und somit der FROST-Filter für eine Verbesserung der Radiometrie nicht länger geeignet ist.

Bis hierher zusammengefasst bedeutet dies, dass die radiometrische Qualität der TerraSAR-X Daten zu Lasten der räumlichen Auflösung erheblich verbessert werden kann. Jedoch eine Klassifikation unter ausschließlichen Einsatz der Intensitätsrückstreuwerte nur schwer möglich ist. Deswegen wurden zusätzlich zu den Rückstreuintensitäten Haralick Texturen untersucht.

1.2.2.4 Textur Untersuchung nach Haralick

Haralick Texturen können mit einer großen Vielzahl von Parametern berechnet werden, weshalb das zu bearbeitende Datenvolumen exponentiell anwächst. Um das Datenvolumen bereits von Anfang an etwas zu reduzieren, sind die Korrelationen zwischen beiden verfügbaren Polarisierungen (HH und VV) über verschiedene Landbedeckungsklassen berechnet worden. Für die 20 ausgewählten Szenen zeigte sich stets das gleiche Ergebnis. Beide Polarisierungen korrelieren positiv. Diese Beobachtung deckt sich auch mit der Erfahrung, dass bei X-Band Daten die Rückstreuprozesse nahezu ausschließlich an der Oberfläche erfolgen, weshalb insbesondere bei ko-polaren Polarisierungen kein gravierender Unterschied im Rückstreuverhalten zu erwarten ist. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden alle Texturuntersuchungen für die operationelle Waldklassifikation auf zweifach FROST gefilterten Datensätzen, der HH-Polarisation mit einer räumlichen Auflösung von 5 m, zu beschränken.

Die Ableitung einer jeden Haralick Textur kann mit unterschiedlichen Einstellungen für die Fenstergrößen, in vier verschiedenen Richtungen und in beliebigen Distanzen erfolgen. Ein Variogramm beschreibt die räumliche Korrelation von zwei Punkten X und Y über eine Distanz h hinweg in alle Richtungen. Eine Auswertung von klassenspezifischen Variogrammen über verschiedene Entfernungen ermöglicht es also, die sinnvollsten Fenstergrößen und Distanzen für die

Texturberechnung zu bestimmen (vgl. Abb. 1-15). Sinnvolle Fenstergrößen und Distanzen verstehen sich in diesem Zusammenhang als solche, die später eine optimale Trennung der einzelnen Klassen gewährleisten. Auf Basis der Variogrammauswertung wurden für die Unterscheidung zwischen Wald- und Nichtwaldgebieten Fenstergrößen von 5 x 5 Pixeln und eine Distanz von 5 Pixeln für die Ableitung der Haralick Texturen ausgewählt.

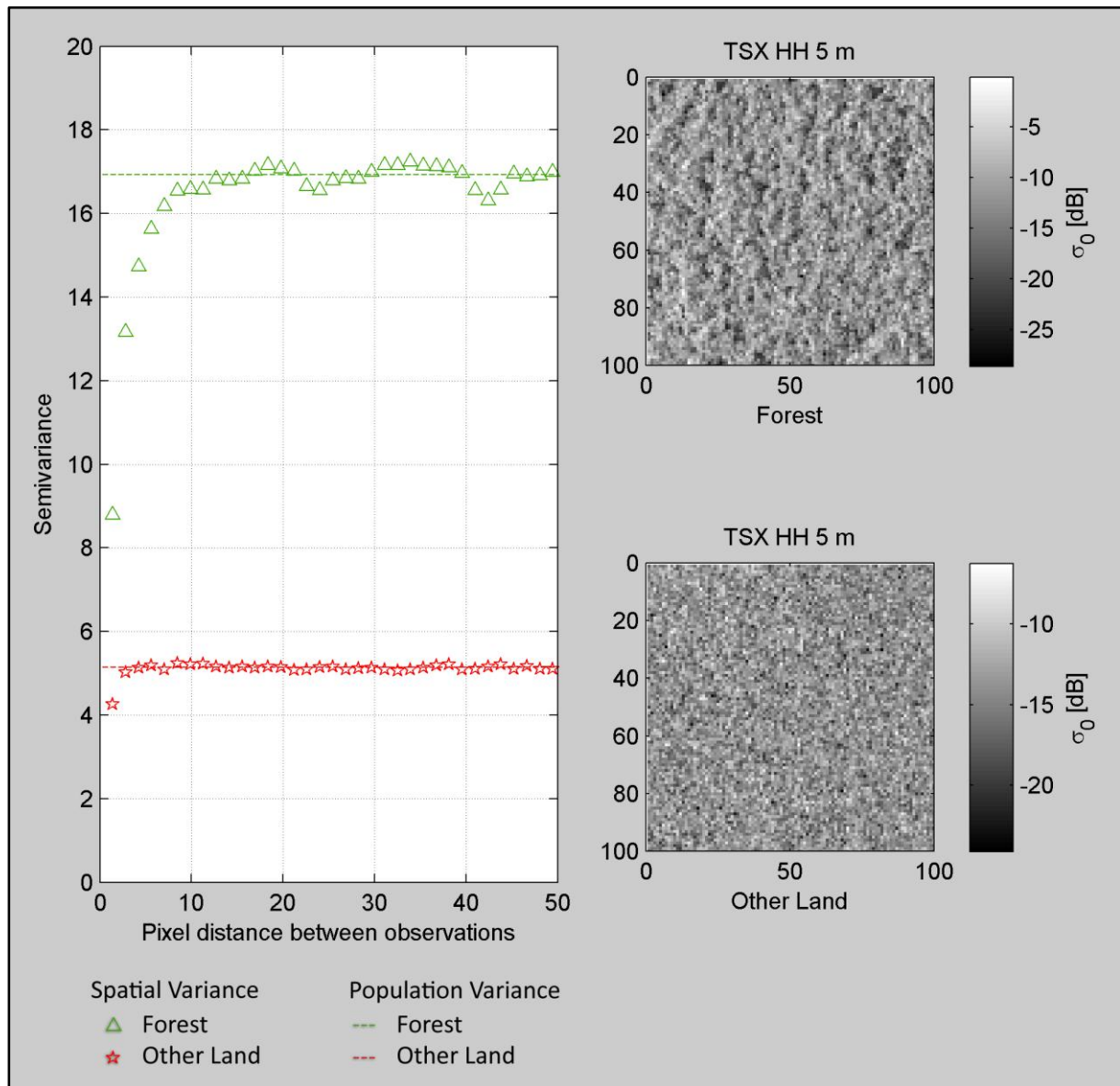


Abb. 1-15: Variogrammanalyse für Wald- und Nichtwaldflächen.

Die hier dargestellten empirischen Variogramme (links) wurden basierend auf den 5 ha großen TerraSAR-X Testflächen für Wald (rechts oben) und Nichtwald (links unten) für eine räumliche Auflösung von 5 m berechnet. Es zeigte sich, dass die räumliche Varianz von Nichtwaldflächen bereits nach einer Distanz von nur einem Pixel den Sill erreicht (rote Sterne). Im Gegensatz dazu wird über Waldgebieten der Sill erst bei deutlich größeren Entfernungen erreicht (5-9) Pixel (grüne Dreiecke). Ursächlich hierfür ist die typische Baumkronenstruktur von Regenwaldgebieten. Dadurch, dass einige Baumkronen stets über alle anderen hinaus wachsen, erzeugen sie bei entsprechend großen Einfallswinkeln des SAR-Sensors Radarschattengebiete. Dieses, sich wiederholende Muster findet sich auch im Variogramm wieder und kann daher benutzt werden die optimale Fenstergröße und Distanz für die Texturberechnung zu bestimmen.

Eine wesentliche Vorgabe an das Projekt war es einen möglichst breiten Anwenderkreis anzusprechen. Deswegen wurde beschlossen die Berechnung der Haralick Texturen mit der Software ENVI/IDL skriptbasierend umzusetzen. Die Software (Version 4.8) erlaubt die Berechnung der folgenden 8 Haralick Texturen auf Basis der *Greylevel-Co-Occurrence Matrix*: *Contrast*, *Correlation*, *Dissimilarity*, *Entropy*, *Homogeneity*, *Mean*, *Second Moment* und *Variance*. Für die Berechnung der Texturen wurden zunächst sowohl lineare als auch dB-skalierte SAR-Input Daten verwendet. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen keinen klaren Unterschied. Trotzdem soll aber an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass im Originalaufsatz von HARALICK et al. (1973) optische Satellitendaten zu Grunde gelegt wurden und somit möglicherweise eine Normalverteilung der Eingangsdaten Voraussetzung für die Berechnung von Haralick Texturen ist und somit für in dB-skalierte SAR-Inputdaten spricht. Diese Frage konnte jedoch nicht abschließend geklärt werden. Auf die Möglichkeit die Texturen richtungsabhängig zu berechnen und somit insbesondere lineare Muster zu erkennen wurde bereits hingewiesen. Allerdings darf bezweifelt werden, dass solche Muster in Satellitenbildaufnahmen die natürliche Landoberfläche umfassend charakterisieren. Graduelle Übergänge, oder Formen der fraktalen Geometrie dominieren die typischen Strukturen der Landoberfläche in Satellitenbildern. Aus diesem Grund sind alle vier möglichen Richtungen bei der Texturberechnung anschließend zu jeweils einem gemittelten Datensatz für jedes der 8 Texturmaße zusammengefasst worden. Bei der Auswertung der Jeffries-Matusita Trennbarkeitsanalyse stellte sich schließlich heraus, dass Entropy, Second Moment und Correlation nicht gut geeignet sind die entsprechenden Klassen voneinander zu trennen. Deswegen sind dann letztendlich für alle 304 TerraSAR-X Kartierflächen zusätzlich zu der HH-polarisierten Intensität, noch die Haralick-Texturen Mean, Contrast, Variance, Dissimilarity und Homogeneity, mit einer über alle Richtung gemittelten Distanzverschiebung von 5 Pixeln und Texturfenstergrößen von 5x5 Pixeln, berechnet worden.

1.2.2.5 Segmentierung/Klassifizierung

Zur Klassifikation hochauflöster SAR-Daten kommen zwei grundlegende Klassifikationsansätze in Frage, zum einen die pixelbasierte und zum anderen die objektbasierte Klassifikationsmethode. Der wesentliche Unterschied der objektbasierten Methode, verglichen zur pixelbasierten Variante ist der Prozess der Segmentierung. Dabei werden benachbarte Pixel mit ähnlichen Grauwerten und Formeigenschaften zu nicht überlappenden, homogenen Regionen zusammengefasst. Die resultierenden Objekte einer erfolgreichen Segmentierung stellen reale Objekte der Erdoberfläche dar. Entscheidender Vorteil des objektbasierten Klassifikationsansatzes ist die Möglichkeit, objektgeometrische Eigenschaften sowie objektspezifische Texturmerkmale in den Klassifikationsprozess einbeziehen zu können und somit das Klassifikationsverfahren sowie die Klassifikationsstabilität zu verbessern. Des Weiteren werden bei einer objektbasierten Klassifikation oft Nachbarschaftsbeziehungen und Kontextinformationen zur Zuweisung eines Objektes zu einer bestimmten Klasse genutzt (HAHMANN et al. 2008).

Zusätzlich zu diesen Vorteilen bietet die Software eCognition Developer dem Nutzer die Möglichkeit, fuzzy-Funktionen zur Klassifikation einzusetzen. Dabei wird ein Objekt nicht einfach der einen oder anderen Klasse zugewiesen. Vielmehr werden dabei zusätzlich die Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit des Objektes zu allen anderen möglichen Klassen errechnet.

Zur Ermittlung der Landbedeckungsklassen innerhalb der Mindestkartiergröße (1 ha) wurde ein multi-skaliger Ansatz gewählt. Dieser beinhaltet eine Segmentierungsebene mit Segmentgrößen auf ebendieser Mindestkartiergröße. Weiterhin wurde ein sehr feines Segmentierungslevel erzeugt, dessen Objekte nur wenige Pixel zu homogenen, nicht überlappenden Einheiten zusammenfassen. Auf der Ebene dieses sehr feinen Segmentierungslevels ist eine Klassifikation von Wald und Wasserobjekten möglich. Darauf basierend lässt sich auf dem gröberen Level der prozentuale Anteil von Waldflächen innerhalb der Mindestkartiereinheit ableiten. Leider ist der Algorithmus nicht ohne weiteres auf alle tropischen Regenwaldgebiete übertragbar. Sowohl die Intensitätswerte als auch die Texturmaße variieren zwischen verschiedenen TerraSAR-X Datensätzen. Die Ursachen dafür liegen in den unterschiedlichen Aufnahmebedingungen und verschiedenen ökologischen und soziogeographischen Aspekten, welche zu unterschiedlichen Vegetationsmustern führen. Um die Limitation in der Übertragbarkeit des entwickelten Klassifikationsalgorithmus zu begegnen, wird dem Anwender über ein eigens dafür zugeschnittenes, selbstentwickeltes Software Interface für eCognition die Möglichkeit gegeben, ein paar Schwellwerte manuell vorzugeben.

1.2.2.6 Validierung der X-Band Ergebnisse (AP 4100)

Gemäß Projektantrag war vorgesehen, die TerraSAR-X Kartierungsergebnisse anhand von 50 Stichproben zu validieren. In enger Absprache mit dem Kooperationspartner FAO konnte jedoch vereinbart werden, die Validierung auf sogar insgesamt 81 Stichprobenflächen auszudehnen (vgl. Abb. 1-16). Für diese 81 Regionen wurden über die FAO folgende Referenzinformationen beschafft: (i) Landsat Aufnahmen für die Jahre 1990, 2000 und wo vorhanden auch aus dem Jahr 2005; (ii) erste Klassifikationsergebnisse des FRA RSS vom JRC. Darüber hinaus konnten für insgesamt 30 Stichprobenflächen zusätzlich hochaufgelöste Satellitendaten aus Google Earth verwendet werden.

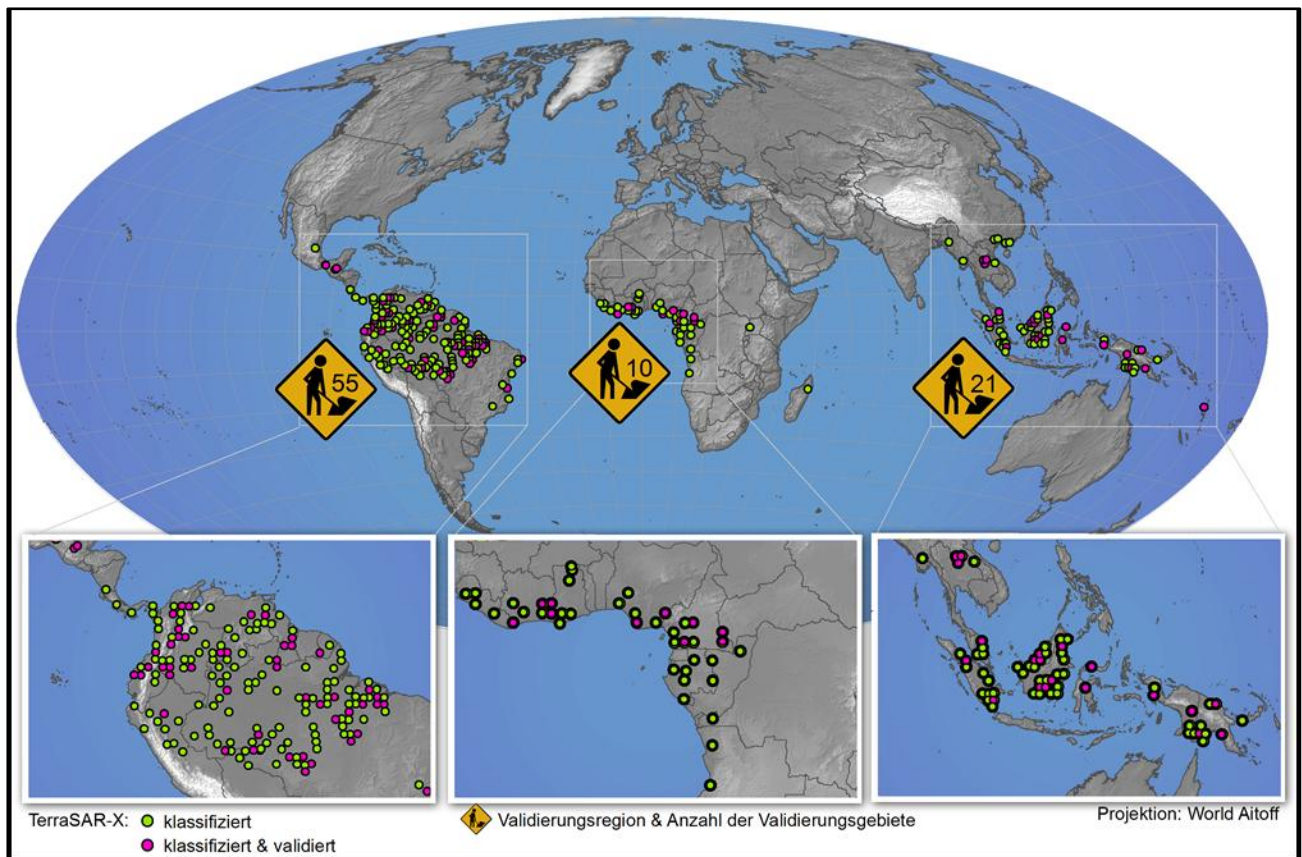


Abb. 1-16: Geographische Übersicht der FRA-SAR 2010 TerraSAR-X Kartierungs- & Validerungsflächen.

Vereinbarungsgemäß folgt die gewählte Validierungsmethode den Vorgaben der Group on Earth Observation und basiert auf einer geschichteten Stichprobe von jeweils 100 Punkten pro Szene. Die gesamte Auswertung wurde pixelbasiert durchgeführt. Für eine verlässliche Interpretation der Landoberfläche auf Basis der verfügbaren Landsat Daten und Klassifikationsergebnisse ist als kleinste Kartiereinheit eine Pixelgröße von 90 x 90 m festgelegt worden.

Während des Treffens mit dem Kooperationspartner FAO im November 2011 hat sich herausgestellt, dass zunächst ausschließlich eine Wald/Nichtwald Klassifikation die größte Bedeutung für die FAO hat, denn innerhalb des gegenwärtigen FRA RSS werden keine Walddichteklassen erfasst. Um trotzdem die Leistungsfähigkeit der entwickelten Algorithmen zu testen, wurde die Validierung deshalb für drei verschiedene Klassifikationsszenarien mit unterschiedlichen Klassentiefen durchgeführt: 1. eine komplexe Klassifikation mit drei Walddichteklassen, einer Wasserklasse und einer sonstigen Kategorie; 2. eine Klassifikation mit zwei Walddichteklassen, einer Wasserklasse und einer sonstigen Kategorie; 3. eine binäre Klassifikation in Wald- und Nichtwaldgebiete.

In Tab. 1-5 sind nun die Ergebnisse der Validierung jeder einzelnen Region für die unterschiedlichen Klassifikationsszenarien zusammengefasst und auf Basis der verschiedenen Referenzinformationen aufgeteilt dargestellt. Die Ergebnisse zeigen über die verschiedenen Referenzdatensätze hinweg denselben vorhersehbaren Trend, nämlich, dass die binäre Klassifikation mit einer Genauigkeit von über 70% die besten Ergebnisse liefert und dass die komplexe Klassifikation mit der größten Klassentiefe deutlich geringere Genauigkeiten besitzt. Dieses Gesamtergebnis sollte jedoch

differenziert betrachtet werden, denn schließlich variieren die individuellen Genauigkeiten einzelner Stichprobenflächen für die komplexen Klassifikationsszenarien untereinander beträchtlich (vgl. Abb. 1-17). Mögliche Ursachen, die maßgeblich zu diesen Unterschieden beigetragen haben können, werden in Kapitel 1.3.1 diskutiert. Vor dem Hintergrund, dass innerhalb des Projektes ein einziger, nahezu vollständig automatisierter Prozess zur Klassifikation von mono-temporalen SAR-Daten entwickelt wurde und zur Anwendung kam, ist dies ein beachtenswerter Erfolg.

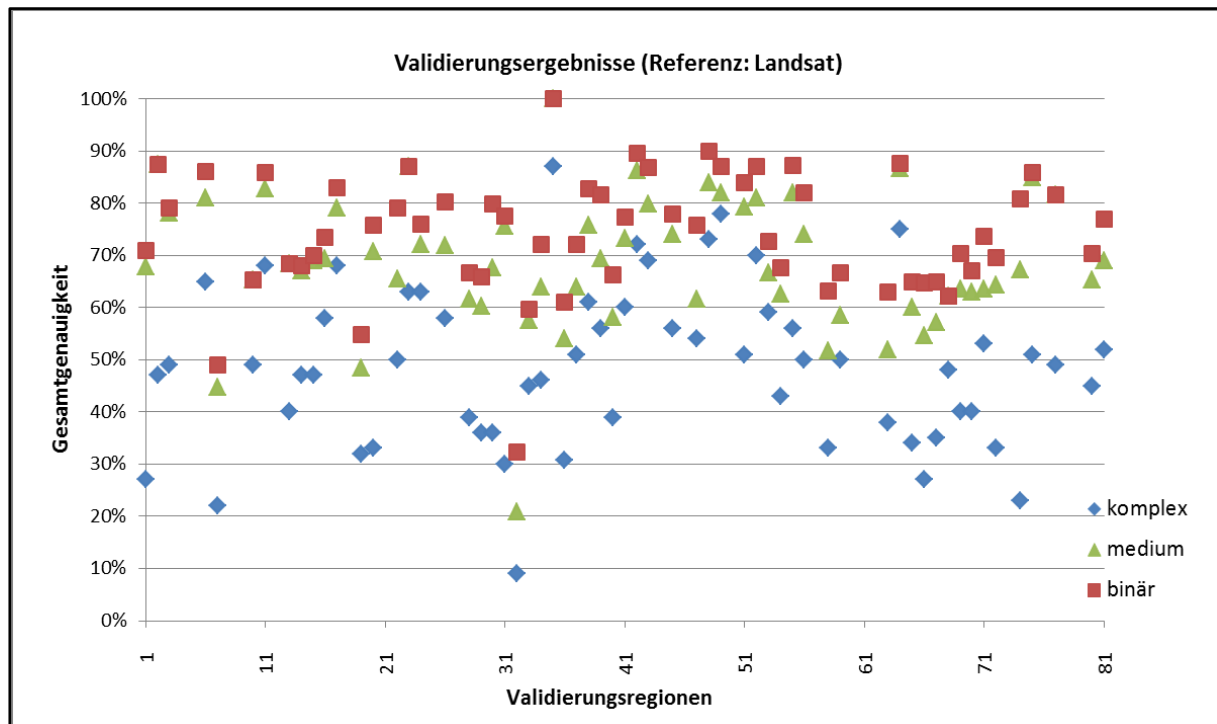


Abb. 1-17: Ergebnis der Gesamtgenauigkeit für alle 81 Validierungsregionen.

Die blauen Quadrate repräsentieren die komplexe Klassifikation mit drei Walddichteklassen, einer Wasserklasse und einer sonstigen Kategorie. Die Klassifikation mit zwei Walddichteklassen, einer Wasserklasse und einer sonstigen Kategorie sind als grüne Dreiecke dargestellt und schließlich die roten Quadrate repräsentieren die binäre Wald/Nichtwaldklassifikation. Es fällt auf, dass die Gesamtgenauigkeiten für individuelle Szenen deutlich verschieden sind. Neben zum Teil zu alten Referenzdaten kann auch die Fehlklassifikation aufgrund von Topografie oder die Verwechslung mit urbanen Gebieten als maßgebliche Ursache für die starken Schwankungen angesehen werden. Darüber hinaus wurde die FRA-SAR 2010 Klassifikation durch notwendiges resampeln auf 90 m räumliche Auflösung nachträglich zusätzlich verschlechtert. Die Kombination all dieser Effekte wirkt sich sicherlich auch negativ auf das Gesamtergebnis aus.

Tab. 1-5: Ergebnisse d. Validierung d. FRA-SAR 2010 Klassifikation.
Vergleich mit Landsat (A), Quickbird (B) und JRC Referenzdaten(C) für jeweils verschiedene Klassentiefen.

A		Landsat Referenz Daten																
Klassifikation		1-10% *	11-70% *	71-100%*	Sonstige	Wasser	keine Daten**	Total		1-10% *	11-100%*	Sonstige	Wasser	Total		Wald	kein Wald	Total
	1-10% *	118	116	166	195	3	33	631	1-10% *	118	282	195	3	598	Wald	3168	739	3907
	11-70% *	92	456	444	264	8	106	1370	11-100%*	202	3168	511	26	3907	kein Wald	726	1059	1785
	71-100%*	110	499	1769	247	18	192	2835	Sonstige	95	430	558	15	1098	Total	3894	1798	5692
	Sonstige	95	202	228	558	15	61	1159	Wasser	1	14	6	68	89	Gesamtgenauigkeit = 0,74			
	Wasser	1	10	4	6	68	17	106	Total	416	3894	1270	112	5692				
	keine Daten**	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtgenauigkeit = 0,69									
	Total	416	1283	2611	1270	112	409	6101										
Gesamtgenauigkeit with „Keine Daten“ = 0,49																		
Gesamtgenauigkeit ohne „Keine Daten“ = 0,52																		

B		Quickbird (Google Earth) Referenz Daten																		
		1-10% *	11-70% *	71-100%*	Sonstige	Wasser	keine Daten **	Total			1-10% *	11-100%*	Sonstige	Wasser	Total			Wald	kein Wald	Total
Klassifikation	1-10% *	59	57	50	105	0	47	318	1-10% *	59	107	105	0	271	Wald	1254	478	1732		
	11-70% *	80	181	149	138	3	95	646	11-100%*	192	1254	279	7	1732	kein Wald	267	589	856		
	71-100%*	112	281	643	141	4	203	1384	Sonstige	78	153	312	1	544	Total	1521	1067	2588		
	Sonstige	78	78	75	312	1	64	608	Wasser	0	7	2	32	41	Gesamtgenauigkeit = 0,71					
	Wasser	0	6	1	2	32	3	44	Total	329	1521	698	40	2588						
	keine Daten**	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtgenauigkeit = 0,64											
	Total	329	603	918	698	40	412	3000												
Gesamtgenauigkeit with „Keine Daten“ = 0,41																				
Gesamtgenauigkeit ohne „Keine Daten“ = 0,47																				

C		JRC Ref. Klassifikation			
Klass.		Wald	kein Wald	keine Daten **	Total
	Wald	591	358	15	964
	kein Wald	886	1133	14	2033
	keine Daten**	0	0	0	0
	Total	1477	1491	29	2997
Gesamtgenauigkeit with „Keine Daten“ = 0,57					
Gesamtgenauigkeit ohne „Keine Daten“ = 0,58					

* Walddichteklasse

** keine Information weil z.B. Wolken, Schatten, Datenfehler

1.2.3 X+C+L Band Datenauswertung (AP 3200 & AP 4200)

Auf Grund mangelnder flächiger Referenzdaten konnte die X+C+L Radarkompositen Auswertung leider nicht in den vorgesehenen Testflächen in Brasilien und Indonesien durchgeführt werden. Die Referenzdatenlage für die ausgewählten Testflächen in Mexiko und Kamerun schränkte dort die Multifrequenzuntersuchungen im Wesentlichen auf die Bildinterpretation und Kohärenzberechnung ein. Allerdings konnten alle geplanten Analysen innerhalb der beiden Untersuchungsregionen in Französisch Guyana durchgeführt werden. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeiten und entsprechenden Ergebnisse separat aufgeführt.

1.2.3.1.1 Bildinterpretation

Für alle ausgewählten X+C+L Untersuchungsflächen gilt, dass die verfügbaren SAR-Szenen stark variieren (vgl. Tab. 1-2, S. 13) und zwar:

1. zeitlich, da die X+C+L SAR-Akquisitionen z.T. sehr weit auseinander fallen,
2. räumlich, so haben sinnvoll nutzbare Pixelgrößen eine räumliche Auflösung von 2-5 m (TerraSAR-X) und (nur noch) 25 m für die beiden niedrigen Frequenzbereiche,
3. radiometrisch, die verschiedenen Polarisationen sind nicht immer vollständig untereinander vergleichbar. Denn TerraSAR-X Daten konnten nur in der HH/VV Konfiguration beschafft werden, während ENVISAT ASAR-Daten entweder als HH/HV oder VH/VV Daten vorliegen. Somit können maximal die ko-polarisierten Datensätze (also HH oder VV) aller drei Frequenzen miteinander verglichen werden. Hinzu kommt, dass die Einfallswinkel aller drei Sensoren ebenfalls unterschiedlich für die einzelnen Aufnahmen sind.

Beim direkten Vergleich der verschiedenen SAR-Frequenzen miteinander fällt sofort der deutliche Unterschied bezüglich der räumlichen Auflösung auf (s. Abb. 1-18). Die extrem hohe räumliche Auflösung von TerraSAR-X Daten zeigt deutliche Unterschiede in der Textur der verschiedenen Landbedeckungsklassen. Dabei ist es nahezu unerheblich, ob man Intensitätsbilder der HH- oder VV-Polarisation Bildern betrachtet. Die Texturunterschiede in VV polarisierten C- und L-Band Bildern sind wegen der 5-fach schlechteren räumlichen Auflösung deutlich schlechter erkennbar. Beim Betrachten der Kreuzpolarisationen (HV od. VH) kann auf Grund der bekannten Zusammenhänge von Volumenrückstreuung über Waldgebieten zwischen Wald- und Nichtwaldgebieten unterschieden werden. Eine RGB-Intensitätskomposite der drei Frequenzen hilft, den Unterschied zwischen Wald- und Nichtwaldgebieten deutlicher herauszustellen. Stellt man die polarimetrischen Streumatrix Dekompositionen den klassischen RGB-Intensitätskompositen gegenüber, zeigen diese einen deutlich höheren Bildkontrast. Für eine visuelle Unterscheidung verschiedener Landbedeckungsklassen sind diese daher oftmals besser geeignet (vgl. Abb. 1-19).

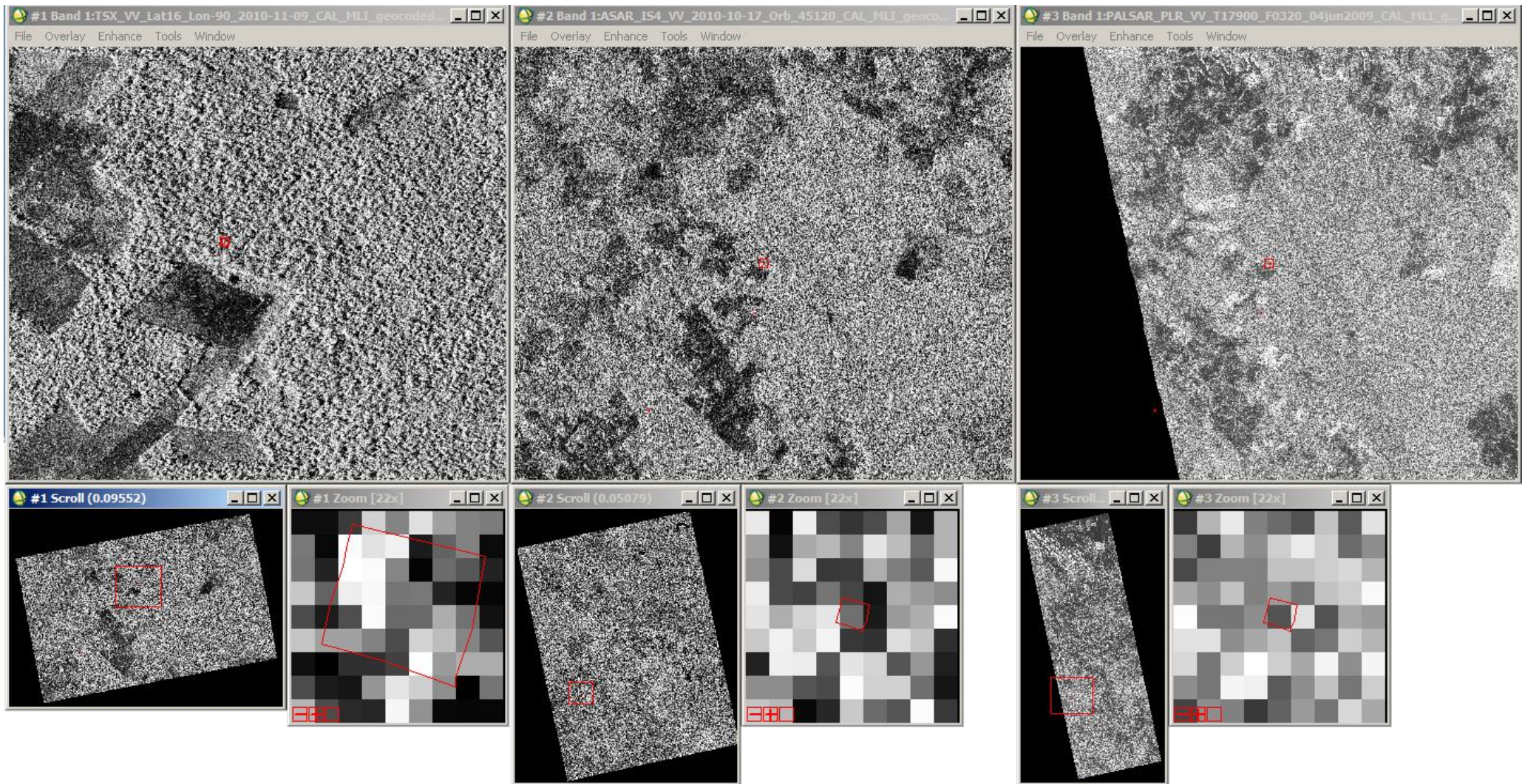


Abb. 1-18: Visueller Vergleich der X+C+L-Band Daten.

Die Abbildung zeigt jeweils die VV-Polarisation von TerraSAR-X (5 m geometrische Auflösung; ganz links) mit ENVISAT und ALOS PALSAR (beide 25 m geometrische Auflösung; mittig und rechts). Die Aufnahmen zeigen einen Ausschnitt vom mexikanischen Bundesstaat Chiapas, dessen Landoberfläche i.W. von Rinderzucht, Ölpalmlantagen und verbleibenden Regenwald gekennzeichnet ist. Die kleinen roten Rechtecke im „Zoom“ Fenster repräsentieren Untersuchungsflächen, die während einer Feldkampagne im Juni 2011 inventarisiert wurden. (Anordnung der Fenster: unten links ist jeweils die vollständige SAR-Szene zu sehen, darüber der Ausschnitt welcher im Scrollfenster rot markiert ist, rechts daneben befindet sich im Zoomfenster die 22 fache Vergrößerung des rot markierten Bereiches vom oberen Fenster.)

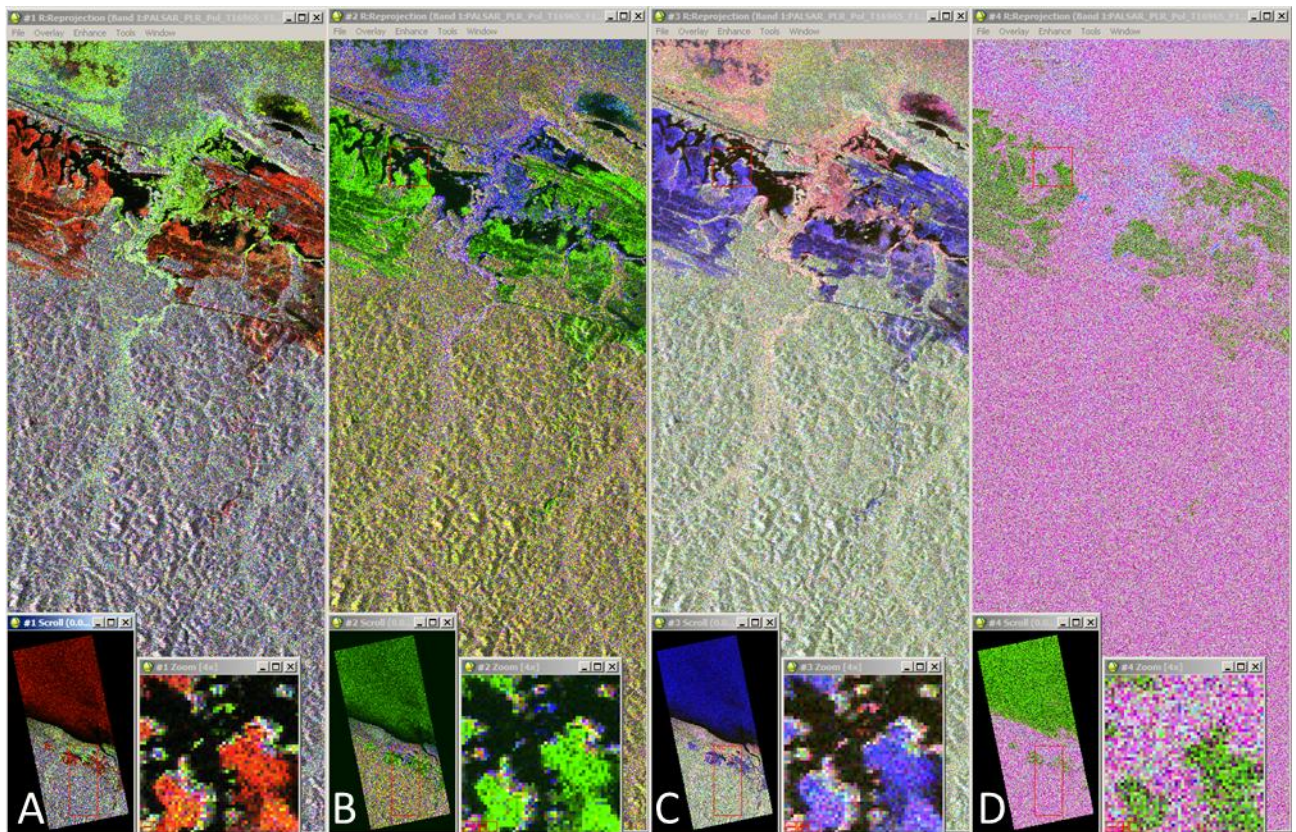


Abb. 1-19: Polarimetrische Streumatrix-Dekompositionen. (RGB: (i) Oberflächen-, Volumen- und Zweiflächenrückstreuung (A-C); (ii) Entropie, Anisotropie und α -Winkel (D))

A) Pauli, B) nach Cloude, C) nach Freeman & Durden und D) nach Cloude & Portier. Die ALOS PALSAR Szene wurde in der Region Paracou über Französisch-Guyana aufgenommen. Die Abbildungen A-C zeigen das enorme Potential, welches die Streumatrix-Dekompositionen hinsichtlich einer Landbedeckungsklassifikation haben (insbesondere nördlicher Bereich der Szene). Über Gebieten mit einer geschlossenen Walddecke, wie im Fall der für dieses Projekt vorliegenden Untersuchungsgebiete (südlicher Bereich der Szene), konnten jedoch keine signifikanten Zusammenhänge mit der Biomasse gefunden werden. (Anordnung der Fenster: unten links ist jeweils die vollständige SAR-Szene zu sehen, darunter der Ausschnitt welcher im Scrollfenster rot markiert ist, rechts neben der Gesamtübersicht befindet sich im Zoomfenster die 4 fache Vergrößerung des rot markierten Bereiches vom oberen Fenster.)

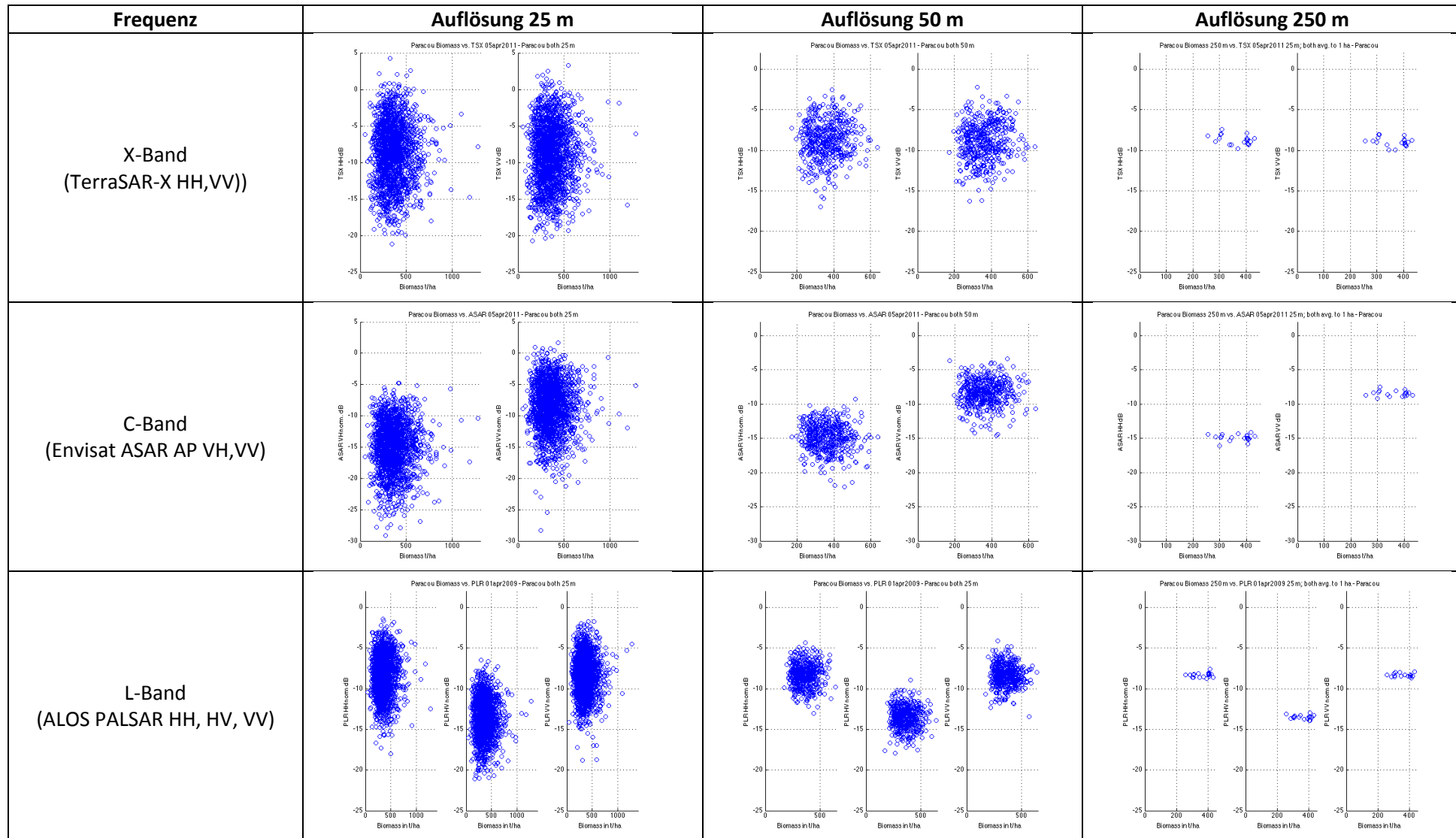
Wegen der räumlichen, zeitlichen und radiometrischen Variation der SAR-Datensätze untereinander ist eine visuelle Bildinterpretation der Intensität nur schwer möglich. Forststrukturparameter, wie z.B. Baumstammdurchmesser oder Biomasse, aus der visuellen Bildinterpretation abzuleiten, ist zum derzeitigen Zeitpunkt nicht realisierbar. Im geometrisch hochauflösenden TerraSAR-X Bild ist es zwar möglich, die Baumhöhe an einigen Waldkanten anhand des Radarschattens grob zu schätzen. Aber es ist nicht möglich diese Höhenschätzungen dann zuverlässig flächenhaft zu extrapolieren. Schließlich sind qualitative Aussagen über eine Bestandsdichte mit den geometrisch hochauflösenden X-Band Daten möglich.

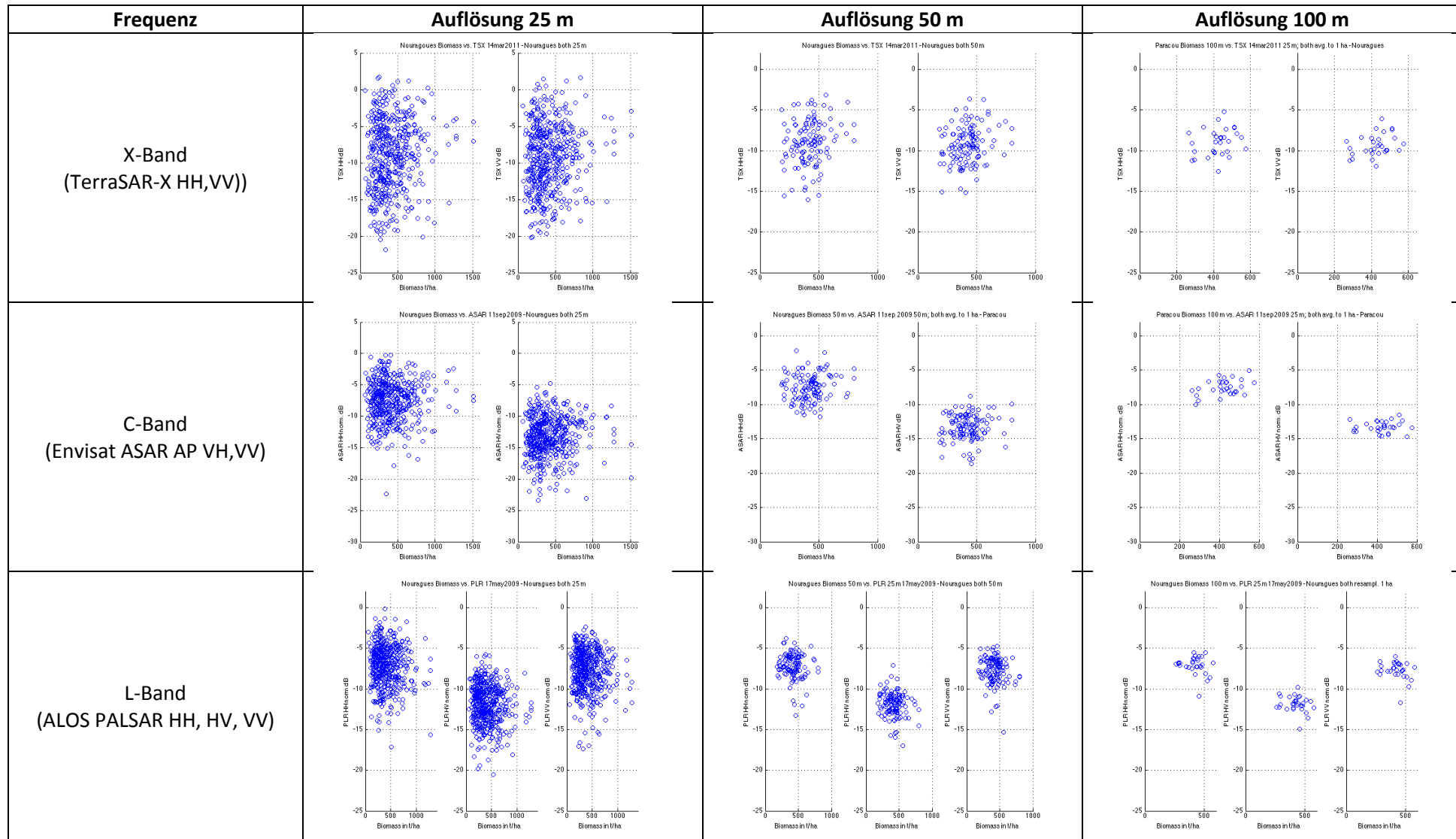
Zusammengefasst bedeutet dies, dass eine auf visueller Bildinterpretation basierende erweiterte Waldstrukturkartierung nur durch geometrisch hochauflösende SAR-Daten bedingt ermöglicht wird.

1.2.3.1.2 Intensitäten & Ratios

Zunächst wurden die Intensitätsdaten aller verfügbaren Frequenzen und der jeweiligen Polarisationen auf einen möglichen Zusammenhang mit der Biomasse in Französisch-Guayana

untersucht. Dazu wurden explizit die verschiedenen räumlichen Auflösungen der Biomasseplots berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Studie sind in Tab. 1-6 und Tab. 1-7 für die beiden Untersuchungsregionen getrennt voneinander dargestellt. Über die verschiedenen Frequenzen hinweg zeigt sich je nach räumlicher Auflösungsstufe der Biomasseplots immer wieder das gleiche Muster: bei 25 m und 50 m Auflösung bildet sich im Biomasse-Radarrückstreuintensitätsdiagramm eine Punktwolke, welche keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Biomasse erkennen lässt. Räumlich noch schlechter aufgelöste Biomassedaten (250 m) zeigen dann die bekannte Sättigung der Radarrückstreuung bei Biomassewerten von deutlich über 150 t ha⁻¹.

Tab. 1-6: Vergleich Biomasse ($t\ ha^{-1}$) vs. X+C+L-Band (dB) für verschiedene räumliche Auflösungen (alle Plots Paracou).

Tab. 1-7: Vergleich Biomasse ($t\ ha^{-1}$) vs. X+C+L-Band (dB) für verschiedene räumliche Auflösungen (alle Plots Nouragues).

Um die räumliche Variabilität der Biomasse zu erhalten, gleichzeitig aber auch noch genügend Pixelwerte zum Vergleich mit den SAR-Daten zu haben (insbesondere C+L-Band), wurde entschieden, die Ratios der Biomasse mit einer räumlichen Auflösung von 50 m einander gegenüberzustellen. Insbesondere die Intensitätsdaten der C- und L-Band Daten profitieren von dieser zusätzlichen Mittelung, weil somit der Speckle weiter dezimiert werden konnte. Für die Untersuchung, ob ein Zusammenhang zwischen der Biomasse und einem Ratio aus SAR-Daten besteht, wurden insgesamt neun Ratios aus den X+C+L-Band Daten für alle Untersuchungsflächen in Französisch-Guyana erzeugt. Anschließend wurde der Pearson Korrelationskoeffizient zwischen dem jeweiligen Ratio und der Biomasse berechnet. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abb. 1-20 in der jeweiligen Korrelationsmatrix dargestellt. Keiner der neun Ratios zeigte einen nennenswerten Zusammenhang mit der Biomasse.

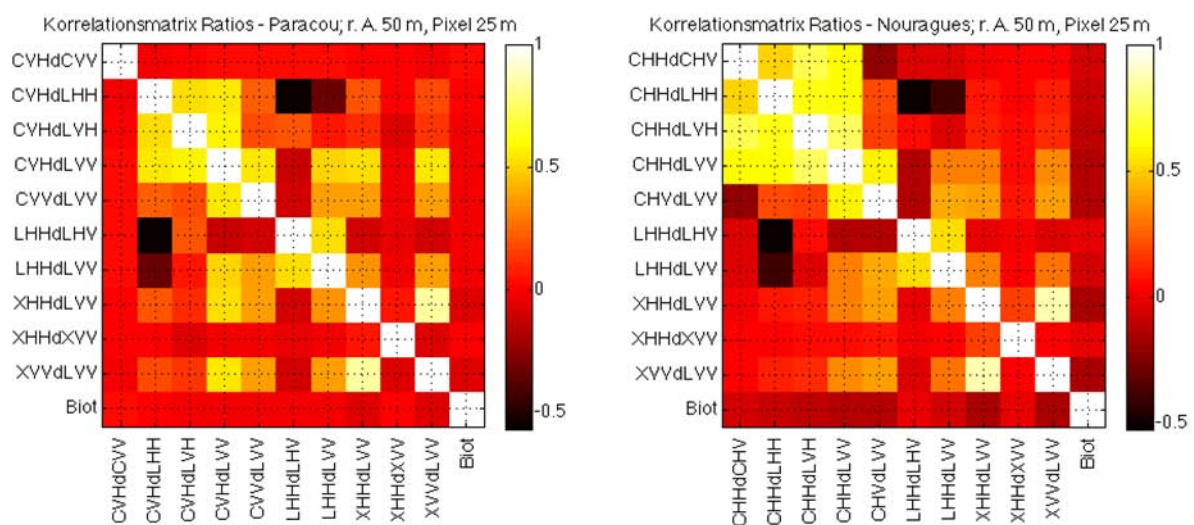


Abb. 1-20: Korrelationsmatrizen für alle untersuchten X+C+L-Band Ratios.

Die SAR-Eingangsdaten (25 m räumliche Auflösung) wurden auf 50 m gemittelt, damit sie der gewählten Biomasseauflösung von 50 m entsprechen. Es fällt auf, dass verschiedene Ratios z.T. stark korrelieren. Generell sind jedoch nur sehr geringe Korrelationen mit der Biomasse zu erkennen. Erläuterung: „CVHdCVV“ entspricht: C-Band VH/C Band VV usw. „Biot“ ist die Biomasse.

1.2.3.1.3 Hauptkomponententransformation

Eine Reduktion eines jeweiligen X+C+L Datensatzes durch eine Hauptkomponententransformation ist nur dann sinnvoll, wenn ein starker Zusammenhang zwischen den einzelnen Variablen existiert. Aus diesem Grund wurden zunächst alle drei Frequenzen und Polarisationen in einer Korrelationsmatrix gegenübergestellt. Aus dem in Abb. 1-21 dargestellten Ergebnis geht eindeutig hervor, dass lediglich im X-Band zwischen der HH und VV Polarisation eine entsprechende hohe Korrelation zu sehen ist. Deswegen wurde zunächst eine Orthogonaltransformation für diese beiden Kanäle durchgeführt (s. Abb. 1-22). Für die Untersuchungsgebiete in Französisch-Guyana wurden anschließend die beiden abgeleiteten Hauptkomponenten zusammen mit den X-Band Eingangsdaten und der Biomasse in einer Korrelationsmatrix verglichen (Abb. 1-23). Grundsätzlich ist bekannt, dass die hohen Biomassewerte der tropischen Untersuchungsgebiete nicht mit X-Band Daten korrelieren. Deswegen ist auch in dieser

Untersuchung die geringe Korrelation zwischen der Biomasse mit den orthogonal transformierten X-Band Daten plausibel.

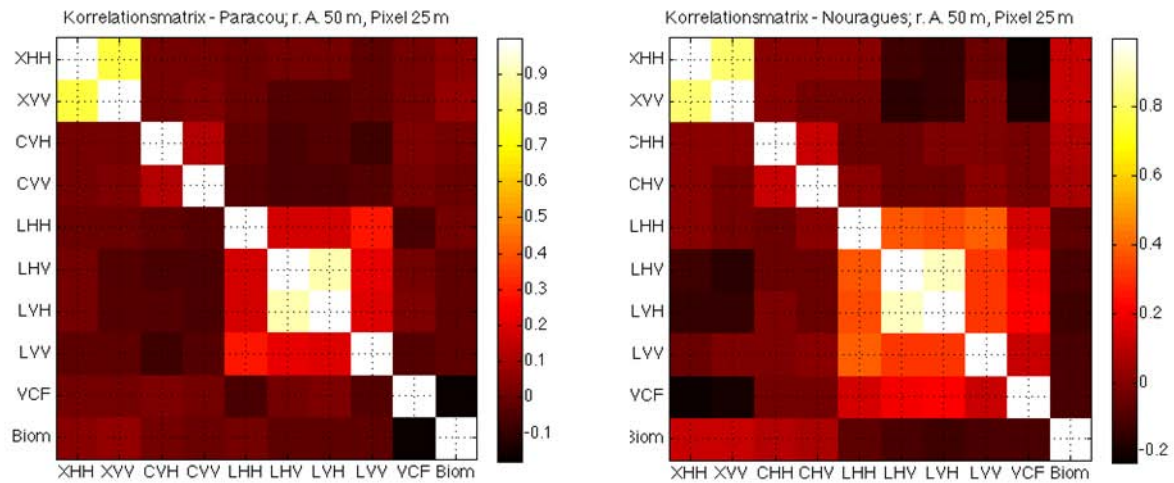


Abb. 1-21: Korrelationsmatrizen für alle untersuchten X+C+L-Band Frequenzen, dem VCF Produkt und der Biomasse.

Die Fernerkundungsdatenprodukte (25 m räumliche Auflösung für SAR-Daten und 500 m für VCF Daten) wurden auf 50 m gemittelt, damit sie der gewählten Biomasseauflösung von 50 m entsprechen. Mit Ausnahme der beiden X-Band Polarisationen sind die Korrelationen zwischen den einzelnen Datenprodukten eher schwach ausgeprägt. Erläuterung: XHH entspricht: X Band HH Polarisation usw., Biom = Biomasse.

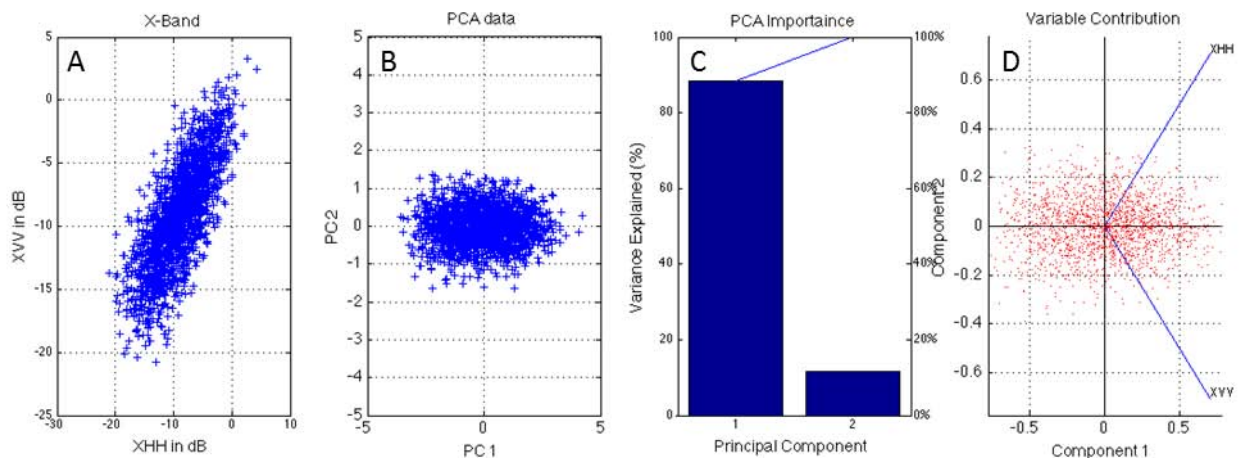


Abb. 1-22: Hauptkomponentenanalyse der X-Band Daten.

Originale X-Band Daten (A), 1. u. 2. Hauptkomponente der X-Band Daten (B), Pareto-Diagramm der beiden Hauptkomponenten (C) und Beitrag der beiden Eingangsvariablen (HH, VV) zur Hauptkomponententransformation (D). Abbildung A) u. B) zeigen, dass die Transformation sinnvoll ist und nahezu die gesamte Variation von HH u. VV in der ersten Hauptkomponente zusammengefasst ist (C). Beide Variablen tragen in etwa gleich stark zu den beiden Hauptkomponenten bei (Vektorklänge in (D)). Die Abbildung zeigt ausschließlich Ergebnisse für die Region Paracou. Für Nouragues sind die Ergebnisse jedoch vergleichbar.

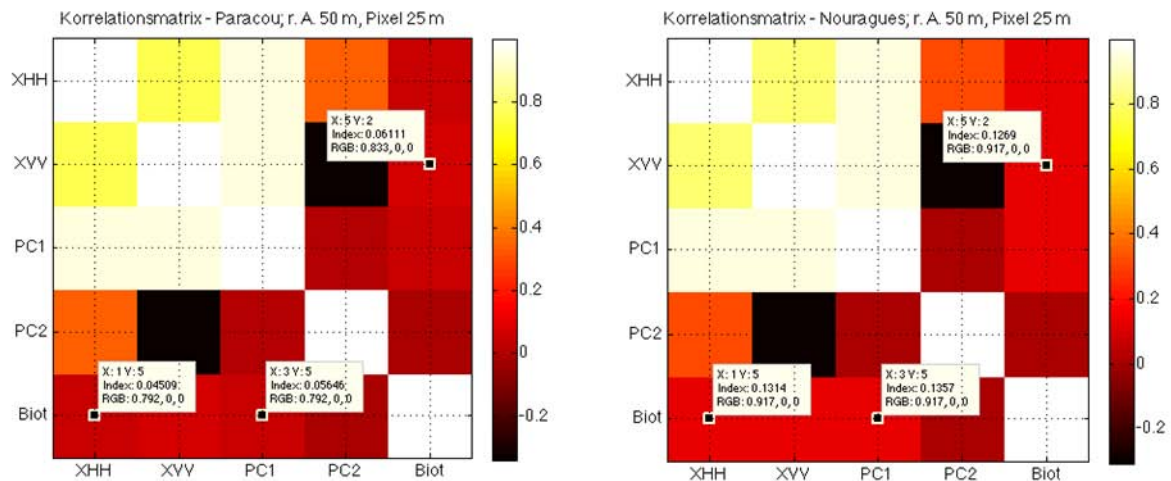


Abb. 1-23: Korrelationsmatrizen für die X-Band Frequenz.

Das Feld „Index“ gibt jeweils den genauen Korrelationswert an. Weder die X-Band Daten (XHH, XVV) noch die daraus abgeleiteten Hauptkomponenten (PC1 & PC2) korrelieren mit der Biomasse (Biot) der beiden Untersuchungsgebiete.

Um verlässlich zu klären, ob trotz der niedrigen Korrelationen zwischen den verschiedenen Frequenzen eine Datenreduktion möglich ist, wurde die Hauptkomponententransformation auch für den jeweiligen gesamten Multifrequenzdatensatz durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass jede für sich genommene Hauptkomponente eine nicht zu vernachlässigende Variabilität aufweist (Abb. 1-24), weshalb eine Reduktion wenig sinnvoll erscheint. Außerdem sind alle Hauptkomponenten dimensionslos und damit nur schwer interpretierbar. Schließlich zeigen die errechneten Hauptkomponenten auch keine bessere Korrelation mit der Biomasse.

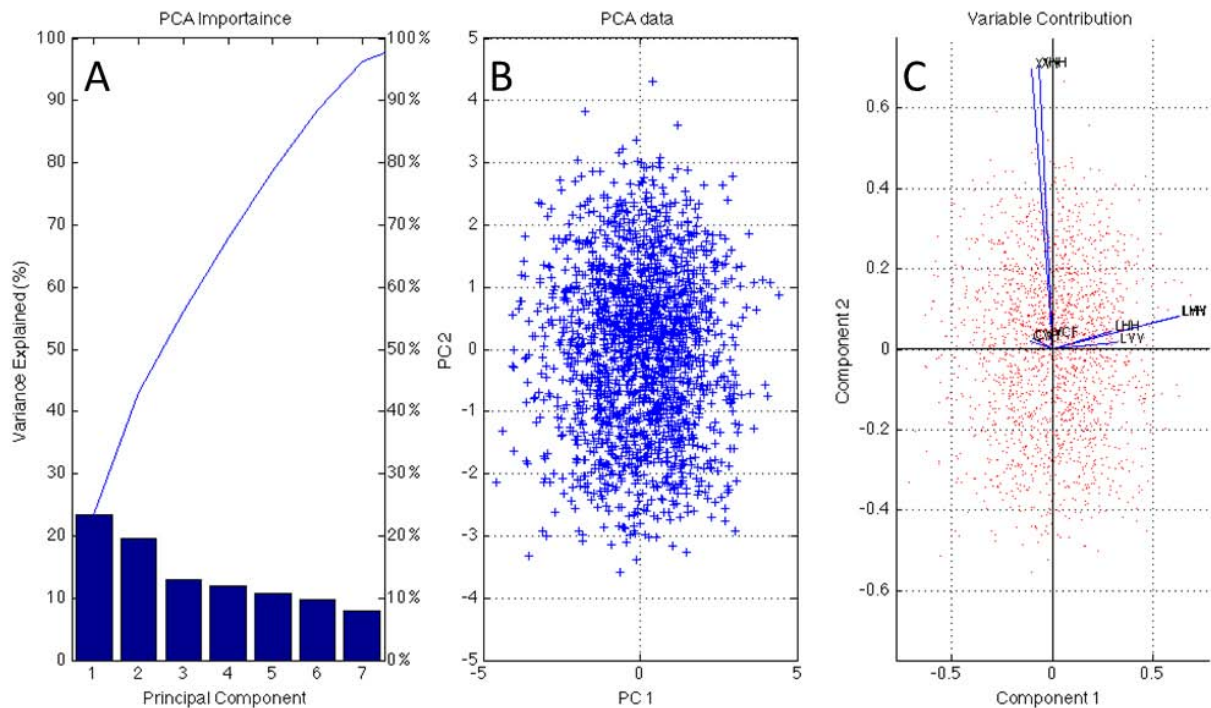


Abb. 1-24: X+C+L Band und VCF Hauptkomponentenanalyse.

Der Paretoplot zeigt deutlich, dass es keinen deutlichen Sprung bei der Variabilität zwischen den einzelnen Hauptkomponenten gibt (A). Die beiden ersten Hauptkomponenten variieren beträchtlich (B).

Einfluss der Eingangsvariablen auf die 1. und 2. Hauptkomponente (C). Die Abbildung zeigt ausschließlich Ergebnisse für die Region Paracou. Für Nouragues sind die Ergebnisse jedoch vergleichbar.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Hauptkomponententransformation der vorliegenden X+C+L Daten für eine Ableitung von Waldstrukturparametern wenig sinnvoll ist.

1.2.3.1.4 Polarimetrische Modellanwendung

Für die polarimetrische Auswertung wurden zunächst die vier in Tab. 1-8 aufgeführten Streumatrix Dekompositionen mit ihren entsprechenden Elementen berechnet. Im Anschluss daran fand eine Auswertung der einzelnen Elemente mit den verfügbaren Referenzinformationen in Französisch-Guyana anhand einer Korrelationsanalyse statt. Die unterschiedlichen Streuvorgänge verschiedener Landoberflächen sind sehr gut in den Dekompositionen wiedergegeben. So ist beispielsweise die Unterscheidung von Wald- und Nichtwaldgebieten anhand von polarimetrischen RGB-Farbkompositen visuell in jedem polarimetrischen Modell hervorragend möglich (s. Abb. 1-19). Eine Differenzierung der einzelnen Untersuchungsflächen bezüglich der Biomasse war jedoch nicht möglich. Dementsprechend zeigen die Ergebnisse aller Streumatrix Dekompositionen bei der durchgeführten Korrelationsanalyse lediglich sehr schwache Zusammenhänge mit der Biomasse (vgl. Abb. 1-27).

Tab. 1-8: Streumatrix-Dekompositionen und deren jeweiligen Elemente.

Streumatrix Dekomposition	Berechnete Elemente
Pauli	Pauli 1
	Pauli 2
	Pauli 3
nach Freeman & Durden	Oberflächenrückstreuung
	Volumenrückstreuung
	Zweifachreflexion
nach Cloude	Oberflächenrückstreuung
	Volumenrückstreuung
	Zweifachreflexion
nach Cloude & Portier	Entropie
	Anisotropie
	α -Winkel

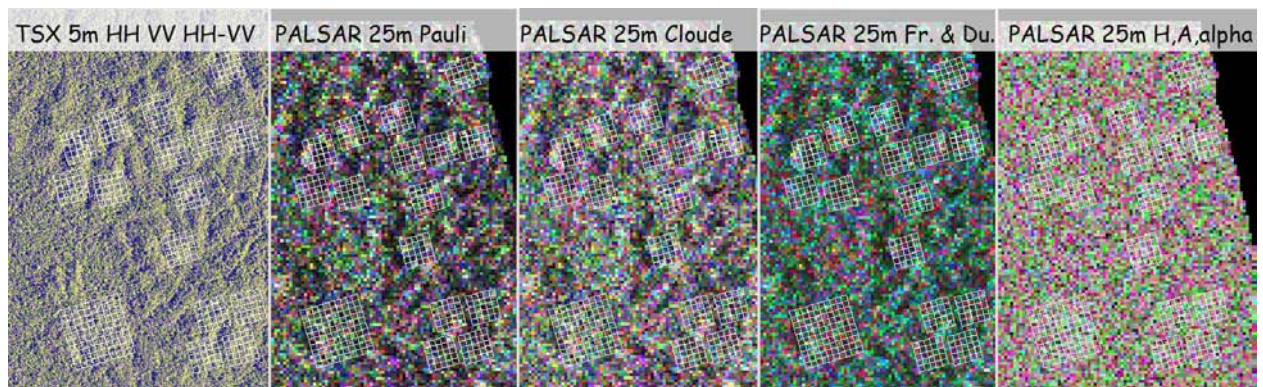


Abb. 1-25: Ergebnisse aller gerechneten polarimetrischen Dekompositionen für die Region Paracou. Links im Bild ist die RGB-Farbkomposite der TerraSAR-X Daten zu sehen. Die weißen Polygone zeigen die geographische Lage der einzelnen Untersuchungsplots.

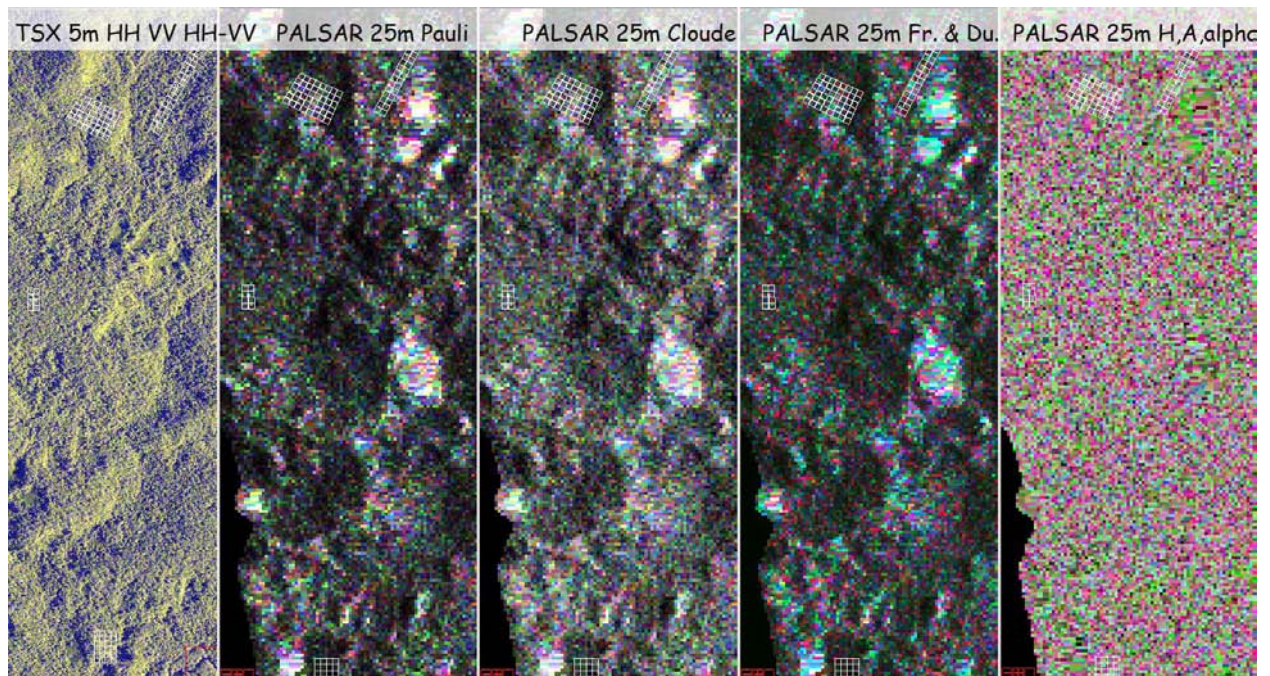
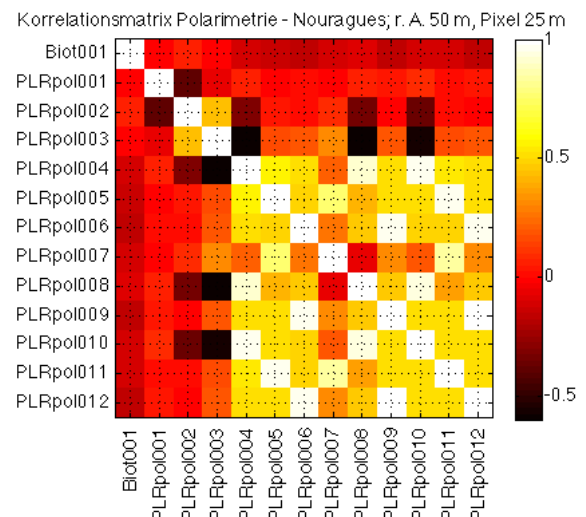
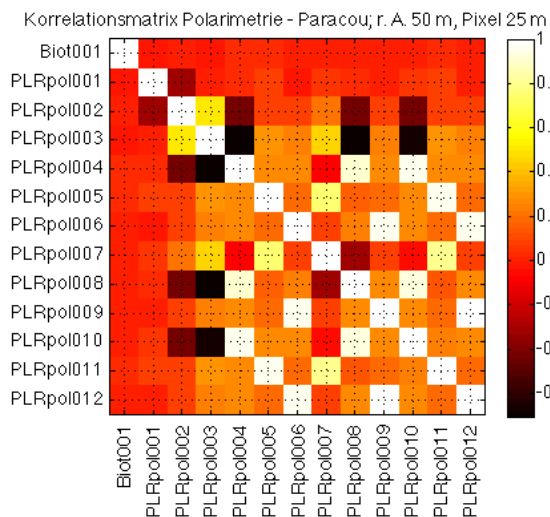


Abb. 1-26: Ergebnisse aller gerechneten polarimetrischen Dekompositionen für die Region Nouragues. Links im Bild ist die RGB-Farbkomposite der TerraSAR-X Daten zu sehen. Die weißen Polygone zeigen die geographische Lage der einzelnen Untersuchungsplots.



Abkürzung	Erläuterung
Biot001	Biomasse
PLRpol001	Cloude & Portier Anisotropie
PLRpol002	Cloude & Portier Entropy
PLRpol003	Cloude & Portier α -Winkel
PLRpol004	Cloude 1. Oberflächenrückstreuung
PLRpol005	Cloude 2. Zweifachreflexion
PLRpol006	Cloude 3. Volumenrückstreuung
PLRpol007	Freeman & Durden Zweifachreflexion
PLRpol008	Freeman & Durden Oberflächenrückstreuung
PLRpol009	Freeman & Durden Volumenrückstreuung
PLRpol010	Pauli 1
PLRpol011	Pauli 2
PLRpol012	Pauli 3

Abb. 1-27: Korrelationsmatrizen für alle untersuchten polarimetrischen Streumatrix-Dekompositionen und der Biomasse.

Die SAR-Eingangsdaten (25 m räumliche Auflösung) wurden auf 50 m gemittelt, damit sie der gewählten Biomasseauflösung von 50 m entsprechen. Es sind nur sehr geringe Korrelationen mit dem Waldstrukturparameter Biomasse zu erkennen.

1.2.3.15 Interferometrische Modellanwendung

Die Anwendung von interferometrischen Untersuchungen konnte nur anhand von zwei Untersuchungsflächen, eine in Mexiko und eine in Kamerun, durchgeführt werden. Denn nur für diese Gebiete standen Envisat ASAR C-Band Datensätze zur Verfügung, deren Aufnahmeconfiguration SAR-Interferometrie grundsätzlich ermöglicht.

In Tab. 1-2 sind die Aufnahmeparameter der Envisat Bildpaare für diese Testregionen wiedergegeben. Der direkte Vergleich zeigt, dass für die Region in Kamerun die bestmögliche Aufnahmedifferenz von 35 Tagen erreicht wurde. Für Mexiko dagegen beträgt der zeitliche Versatz zwischen den Aufnahmezeitpunkten bereits 70 Tage. Für beide Testgebiete liegen leider keine direkten Wetteraufzeichnungen vor. Deswegen können die atmosphärischen Gegebenheiten zum jeweiligen

Aufnahmezeitpunkt nur anhand von Klimadaten ungefähr abgeschätzt werden. Demzufolge liegt bei jedem SAR-Bildpaar jeweils eine der beiden Aufnahmen genau in der Übergangsperiode von der Trocken- zur Regenzeit.

In Abb. 1-28 sind die Ergebnisse der interferometrischen Kohärenz dargestellt. Leider bestätigen sich in diesen beiden Bildern die bereits zu erwartenden negativen Ergebnisse drastisch, denn sogar für Nichtwaldgebiete gibt es offenbar keine Kohärenz, bzw. wenn überhaupt, dann nur lokal begrenzt und sehr gering. Die Ursachen dafür mögen einerseits in dem zu langen zeitlichen Versatz der jeweiligen C-Band Aufnahmebildpaare liegen. Andererseits könnten auch die Witterungsverhältnisse maßgeblichen Einfluss auf die Kohärenzberechnung gehabt haben (z.B. starker Niederschlag zum Zeitpunkt einer Aufnahme und große Trockenheit zum anderen Aufnahmezeitpunkt). Um diesen Effekt beispielhaft zu illustrieren, sind in Abb. 1-29 die beiden über Mexiko aufgezeichneten Envisat ASAR Intensitätsbilder einander gegenübergestellt worden. In der ersten Aufnahme vom 21. März 2010 sind deutliche Signaturen von Nichtwaldgebieten zu erkennen. Diese vermeintlichen Nichtwaldgebiete sind 70 Tage später visuell nicht mehr wahrnehmbar. Selbst unter tropischen Klimabedingungen erscheint es höchst unwahrscheinlich, dass hier eine vollständige Waldregeneration stattgefunden haben kann. Abschließend muss noch erwähnt werden, dass die von der ESA gelieferten Daten zur radiometrischen Korrektur noch eine zusätzliche mögliche Fehlerquelle darstellen könnten. Um weitere externe Daten für die radiometrische Kalibration zu beschaffen, fehlte jedoch die Zeit.

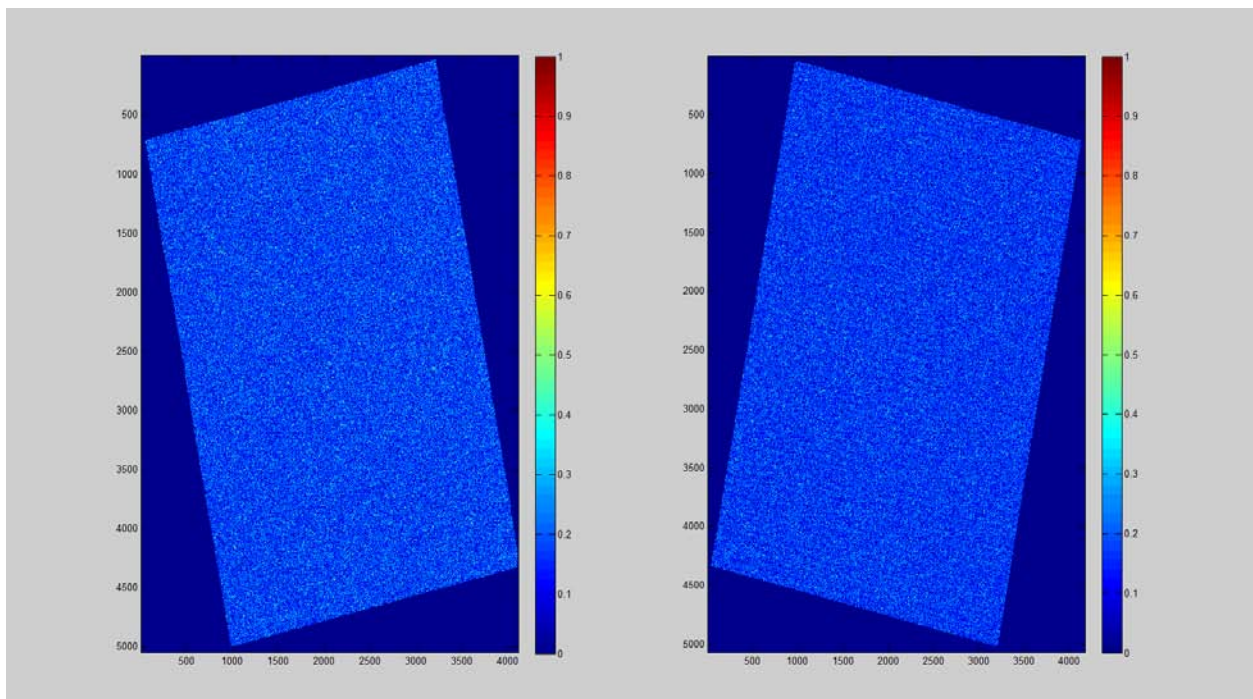


Abb. 1-28: Ergebnisse der interferometrischen Kohärenzberechnung.

Für die Analyse wurden jeweils zwei ENVISAT ASAR AP Aufnahmen über Mexiko (links) und Kamerun (rechts) ausgewertet. Der zeitliche Versatz zwischen den jeweiligen Aufnahmen beträgt 70 Tage für die Daten von Mexiko und 35 Tage für die Daten von Kamerun. Die niedrigen Kohärenzwerte lassen sich höchstwahrscheinlich nicht allein auf den hohen zeitlichen Versatz der beiden Aufnahmen zurückführen.

Gewiss sind sie auch ein Ausdruck der witterungsbedingten Einflüsse in den beiden tropischen Untersuchungsgebieten, weil die jeweiligen SAR-Aufnahmepaare in der Übergangsperiode von Trocken- zur Regenzeit aufgezeichnet wurden.

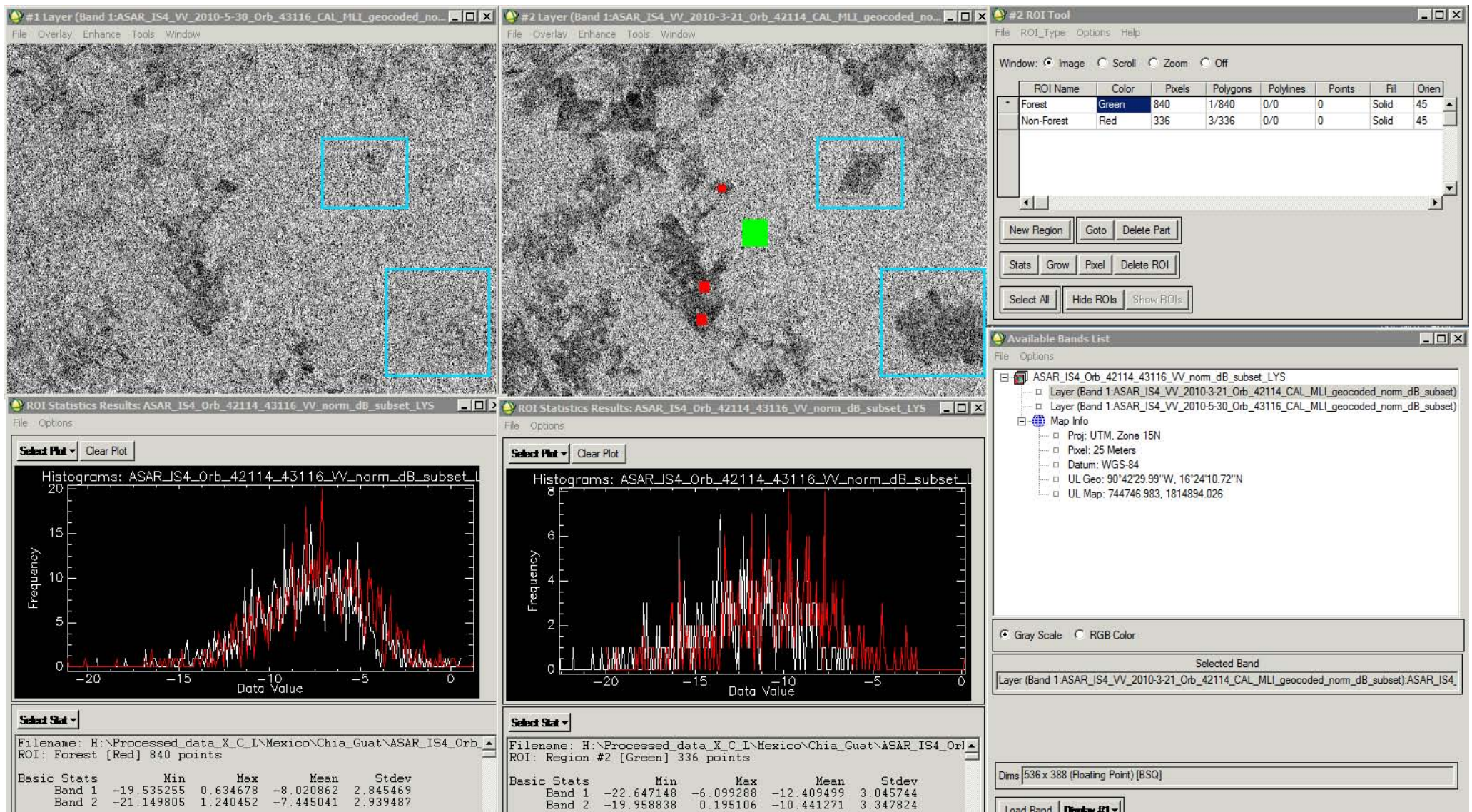


Abb. 1-29: Vergleich zweier ENVISAT ASAR VV-Intensitätsbilder von Mexiko.

Die linke Aufnahme ist am 30. Mai 2010 aufgezeichnet worden, rechts ist die gleiche Region bereits am 21. März 2010 aufgenommen worden. Es fällt auf, dass die Intensitäten beider Bilder über große Flächen stark variieren (vgl. Histogramme der grünen und roten Testflächen). Ganz besonders drastisch ist der Unterschied zwischen Wald- und Nichtwaldflächen sichtbar (hellblaue Kästen).

1.3 Beschreibung von Fehlergrößen (AP 4300)

Im Folgenden sollen zunächst die Ursachen für Fehler bei der TerraSAR-X Landoberflächenkartierung ausführlich beschrieben werden. Weiter unten erfolgt dann eine Analyse möglicher Fehlerquellen, die bei der kombinierten X+C+L Auswertung eine wesentliche Rolle spielen.

1.3.1 Fehlergrößen der Landoberflächenkartierung mit TerraSAR-X

Aus den vorangegangenen Ausführungen ist bekannt, dass auf insgesamt 81 Testregionen die TerraSAR-X Methodik validiert wurde. Eine GIS-Analyse der vollständigen FRA-SAR 2010 TerraSAR-X Datenbank hatte ergeben, dass 81 von 304 Szenen eine gemeinsame Schnittmenge von mehr als 50% mit den verfügbaren FAO RSS Untersuchungsflächen haben. Ursprünglich war geplant, dass alle TerraSAR-X Szenen vollständig innerhalb der RSS Untersuchungsgebiete liegen sollen. Allerdings wird von der FAO nunmehr für jedes Untersuchungsgebiet statt der ursprünglich geplanten 20 x 20 km großen Flächen lediglich der Zugriff auf 10 x 10 km große Flächen gewährt. Trotzdem verteilen sich die 81 Szenen auf alle drei Hauptuntersuchungsregionen in Mittel- und Südamerika, Afrika und Süd-Ostasien (vgl. Abb. 2 5, S.20). Bezüglich der hier zu führenden Diskussion über Fehlergrößen muss darauf hingewiesen werden, dass die gewählte Strategie für die Stichprobenauswahl wegen der vorgegebenen Bedingung nicht unbedingt optimal ist. Bei einer optimalen Referenzdatenlage sollten Faktoren wie Flächenanteile der einzelnen Klassen in der jeweiligen Szene, die geografische Lage und die räumliche Nähe der Szenen zueinander für die Stichprobenauswahl zusätzlich berücksichtigt werden.

Ein zentraler Bestandteil einer jeden Validierung ist die Güte der Referenzdaten. Für die Referenzdaten, die für die FRA-SAR 2010 TerraSAR-X Kartenprodukte zur Verfügung stehen, müssen die folgenden fünf Kritikpunkte genannt werden, welche einzeln oder auch zusammen zu Fehlinterpretationen der Landbedeckung führen können:

1. Die verfügbaren Landsat Daten hatten beim Vergleich untereinander keineswegs eine vergleichbar gute Datenqualität. Bei etwa 35% sind z.T. erhebliche atmosphärische Beeinträchtigungen zu verzeichnen. Zusätzlich weisen 15% sogar Datenlücken auf, die auf bekannte technische Probleme mit dem Landsat 7 Sensor zurückzuführen sind.
2. Zwischen den Referenzinformationen und den Kartenprodukten besteht teilweise ein großer zeitlicher Versatz. Die verfügbaren Landsat Daten waren im Mittel 5,7 Jahre älter (Standartabweichung 3,5) als die zur Kartierung genutzten TerraSAR-X Aufnahmen. Für die hoch auflösenden Google Earth Daten betrug die zeitliche Differenz zu den TerraSAR-X Daten im Mittel 2,5 Jahre (Standartabweichung 2,6).
3. Hoch aufgelöste Daten von Google Earth sind nicht immer verlässlich zu datieren. Insbesondere die Fusion von mehreren Aufnahmezeitpunkten ist für die Validierung problematisch.
4. Eine Zuordnung von Walddichteklassen auf Grundlage von Landsat Daten ist wesentlich schwieriger aufgrund der deutlich schlechteren räumlichen Auflösung.

5. Die vorliegende Referenzklassifikation vom JRC ist noch nicht auf ihre Gültigkeit überprüft worden. Außerdem wurde sie aus denselben Landsat Daten erzeugt, welche als Referenz für die hier diskutierte Validierung dienten. Entsprechend zeigt dieses JRC Kartenprodukt eine Einteilung der Landoberfläche zu einem früheren Zeitpunkt. Die temporale Differenz zur FRA-SAR 2010 Klassifikation beträgt dementsprechend mindestens 5 Jahre.

In der Summe führen diese fünf potentiellen Fehlerquellen gewiss zu Problemen bei der Bildinterpretation und zu signifikanten Unterschieden in der Referenzdatenbasis. Das genaue Ausmaß auf die Gesamtgenauigkeit lässt sich hieraus jedoch nur schwer abschätzen. Zukünftig wäre es sicherlich wünschenswert, Zugang zu aktuelleren Referenzinformationen mit gleichbleibend guter Qualität zu haben. Unter Umständen wäre es sinnvoll, nur dort Daten zu akquirieren, wo bereits überprüfte großflächige Bodenreferenzinformationen vorliegen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ursachen für Fehlklassifikation der X-Band Daten beschrieben. Ein gutes Drittel (31%) der zu überprüfenden TerraSAR-X Szenen ist durch urbane Gebiete gekennzeichnet. Bei einem großen Einfallswinkel der SAR-Antenne und auf einer räumlichen Skala von 20 m ähneln sich nun die Texturen dieser Stadtgebiete mit denen von tropischen Regenwaldgebieten. Immer wieder wechseln sich hohe Grauwerte (Baumkronen vs. Hausdächer) mit niedrigen Grauwerten (Radarschatten von großen Baumkronen vs. Radarschatten von Häusern) ab. Erschwerend kommt hinzu, dass in Städten viele Bäume und Parkanlagen zu finden sind. Insofern verwundert es nicht, dass der gewählte Klassifikationsansatz hier nicht verlässlich funktioniert und Stadtgebiete oft mit Waldgebieten fehlerklassifiziert wurden. Starke Topographie führte bei etwa einem Fünftel (20%) der 81 Szenen zu Fehlklassifikationen. SAR-Aufnahmen sollten immer vor einer Klassifikation topographisch normalisiert werden, damit das Relief nicht mehr die Grauwerte des Datensatzes verzerrt. Leider gab es zum Zeitpunkt der FRA-SAR 2010 TerraSAR-X Methodenentwicklung noch kein digitales Geländemodell mit einer vergleichbar guten räumlichen Auflösung. Deswegen konnte auch keine der insgesamt 304 Szenen topographisch normalisiert werden. Daher folgen die Klassifikationsergebnisse in Gebieten mit starken Reliefunterschieden eher der Topographie statt den tatsächlichen Landbedeckungen. Oftmals wird die Klasse „Wald“ fälschlicherweise der Klasse „sonstige Landbedeckung“ zugeordnet. Dort wo die Landbedeckung höchst komplex ist, sind weitere Fehlklassifikationen zu bemerken. Konkret bedeutet dies, dass an Grenzen zwischen Biotopen (z.B. von einem Primär- zu einem Sekundärwald oder von einem Wald- zu einem Sumpfgebiet) die Klassifikation oftmals misslingt und zu geringe Walddichteklassen oder die Klasse „sonstige Landbedeckung“ in einem geschlossenen Wald ausgewiesen werden. Das es in diesen speziellen Gebieten immer wieder zu Fehlklassifikationen kommt, liegt an der großen Artenvielfalt tropischer Regenwälder. Sie führt dazu, dass die tropischen Waldtypen in unterschiedlichen Naturräumen verschiedenste Texturmuster besitzen. So kann es sein, dass eine geschlossene Primärwalddecke relative hohe Grauwertsprünge aufweist (wegen der einzelnen Baumriesen), während ein Sekundärwald, um seine kommerziell wertvollen Baumriesen beraubt, nur sehr wenige Grauwertsprünge hat und daher im direkten Vergleich mit dem Primärwald durch eine eher homogene Fläche gekennzeichnet ist. Diese pan-tropische Vielfalt führte auch zu Schwierigkeiten bei der Auswahl der szenenspezifisch richtigen Klassifikationsschwellwerte einzelner Szenen. Möglichkeiten, wie diese Fehler zukünftig minimiert werden können, werden nun im nächsten Absatz vorgestellt.

Obwohl die Unterscheidung von urbanen Gebieten und tropischen Wald mit einer mono-temporalen TerraSAR-X Aufnahme anhand der Haralick-Textur problematisch ist, könnte man diese Klassifikationsergebnisse zukünftig durch den Einsatz von multi-temporalen SAR-Daten deutlich verbessern. Schließlich sollte sich dann beispielsweise Wald durch eine Kohärenzanalyse eindeutig von Stadtgebieten trennen lassen, weil die temporale Dekorrelation von Wäldern bei einem X- oder C Band Sensor um ein Vielfaches höher ist als bei Städten. Selbstverständlich eröffnet sich mit multi-temporalen Datensätzen auch der Zugang zu anderen Methoden zur Klassifikation von komplexen Landoberflächen (z.B. multi-temporale Metriken). Fehlklassifikationen auf Grund von Topographie können schon bald durch bessere Oberflächenmodelle (z.B. TanDEM-X) minimiert werden. Ein entsprechender Algorithmus ist schon jetzt in die FRA-SAR 2010 SAR-Prozessierung integriert, so dass die komplette Neuprozessierung inklusive topographischer Normalisierung aller vorliegenden 304 TerraSAR-X Daten lediglich etwa eine Woche Rechenzeit in Anspruch nehmen würde. Die Realisierung von akkuraten Klassen der Walddichte war ein große Herausforderung und es wurde im vorangegangenen Absatz erwähnt, dass die Genauigkeit unter Verwendung der gewählten Haralick Texturparameter (*Dissimilarity*, *Homogeneity*, *Contrast*, *Mean* und *Variance*) nicht immer wünschenswert präzise ist. Deswegen soll an dieser Stelle auf andere Texturmaße verwiesen werden (z.B. *Lacunarity*, *Coefficient of Variation*), die grundsätzlich in der Lage sind, die Lückenhaftigkeit einer Region besser zu erfassen.

1.3.2 Fehlergrößen bei der X+C+L Methodik

Bezüglich möglicher Fehlerquellen für die X+C+L Methodik wird festgestellt, dass in nahezu allen Fällen die Referenzdatenlage leider ungenügend für die angestrebten Analysen zur Ableitung von Waldstrukturparametern ist. Die synergetische X+C+L Band Auswertung kann sinnvollerweise nur mit einer besten räumlichen Auflösung von 25 m durchgeführt werden, weil die derzeit verfügbaren C- und L-Band Sensoren auf Grund ihrer geringeren räumlichen Auflösung nicht ohne eine entsprechende Speckle-Reduktion nutzbar sind. Dies bedeutet, dass alle verfügbaren Referenzplots in Mexiko, Kamerun, Brasilien und Indonesien viel zu klein sind, um statistisch verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Im Fall von Französisch-Guyana ist die Situation trotz der wesentlich größeren Untersuchungsflächen leider ähnlich. Folgendes Beispiel soll dies verdeutlichen: Bei einer Plotgröße von 100 x 100 m und einer räumlichen Auflösung von 25 m würden im Idealfall 16 SAR-Pixelwerte mit Biomasseinformationen abgedeckt. Da aber die Satellitenorbits schräg und nicht parallel zu den Untersuchungsplots verlaufen, liegen die SAR-Pixel nicht deckungsgleich auf den Biomasseuntersuchungsflächen. Dies bedeutet, dass von den ursprünglich 16 verfügbaren Referenzpixeln einige so ungünstig von den SAR-Pixeln geschnitten werden, dass sie nicht mehr verwendet werden können. Während der anschließenden notwendigen Transformation der punktuellen Biomassewerte zu flächigen Masken, für die spätere Analyse, erzeugen die GIS Arbeitsschritte (*Resampling* und Anpassen der Pixel Raster aufeinander) einen weiteren Verlust. Insgesamt verliert man auf diese Weise etwa 4-6 Referenzpixel für die Analyse. Ist dann noch die räumliche Auflösung und Ausdehnung ungenügend, können keine statistisch vertretbaren Ergebnisse erwartet werden.

1.4 Zusammenfassung

Die Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen hat erkannt, dass die von ihren Mitgliedsstaaten individuell erfassten Statistiken und daraus hervorgehenden Zahlen sowie Informationen zum Zustand des jeweiligen Waldes und Forstsektors zukünftig nicht ausreichen werden, um ein ausführliches, aktuelles und weithin akzeptiertes Bild zu zeichnen, welches in Form eines regelmäßig zusammengefassten Reports den globalen Status aller Wälder widerspiegelt. Deswegen wurde von der FAO der Beschluss gefasst, den gegenwärtigen und auch alle kommenden Waldzustandsberichte durch die Analyse von Fernerkundungsdaten zu ergänzen und weiter auszubauen. Nur durch den Einsatz von Satellitendaten können die notwendigen Informationen großflächig gewonnen werden, um die Länderstatistiken zu untermauern, sie gegebenenfalls zu ergänzen oder gar zu verbessern. Darüber hinaus soll die systematische Aufzeichnung der Erdoberfläche anhand von Satellitenbilddaten über größere Zeitintervalle hinweg Aufschluss darüber geben, wie sich die Entwicklung einer naturräumlich bedingten und/oder anthropogen induzierten Landbedeckungsänderung vollzieht.

Für den gegenwärtigen Waldzustandsbericht (FRA 2010) stützt sich die Fernerkundungsstudie der FAO hauptsächlich auf die Verwendung von optischen Satellitenbilddaten der Landsat-Baureihe. Einerseits bieten nur sie die Möglichkeit, Daten von der Gegenwart bis zurück zum Jahr 1975 zu analysieren. Andererseits sind diese multi-spektralen Bilder oftmals von der Atmosphäre stark beeinträchtigt und können dann nur schwer beziehungsweise gar nicht ausgewertet werden. Dies gilt insbesondere in Regionen, wo mit einer nahezu permanenten Wolkenbedeckung zu rechnen ist. Damit diese gewissermaßen weißen Flecken auf der Landkarte gefüllt werden können und die Fernerkundungsstudie der FAO keine Lücken aufweist, bedarf es einer Auswertung von weltraumgestützten SAR-Daten.

Deswegen ist es das primäre Ziel von diesem Projekt (FRA-SAR 2010) gewesen, in enger Zusammenarbeit mit der Welternährungsorganisation und anhand von 350 über die gesamten Tropen verteilten Stichprobenflächen räumlich hoch aufgelöste mono-temporale SAR-Daten des deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X nahezu vollständig automatisiert auszuwerten, um daraus Waldkarten für die FAO zu erstellen, die anderweitig nicht hätten realisiert werden können. Das Projekt stellt somit einen entscheidenden ersten Schritt hin zur wiederholten Anwendung von hoch aufgelösten X-Band SAR-Daten innerhalb kommender FRA's dar.

Bereits die räumlich hohe Auflösung von TerraSAR-X Daten ermöglichte es regionalen Experten, erste exakte Rückschlüsse über die lokale Landoberflächenbedeckung nur auf Basis der SAR-Rückstreuung zu gewinnen. Allerdings war das Ziel von FRA-SAR 2010 eine weitgehend maschinelle Auswertung. Bei der Entwicklung der dafür notwendigen Algorithmen zeigte sich, dass insbesondere große Einfallswinkel ($> 45^\circ$) von entscheidender Bedeutung bei der Erstellung von Waldkarten sind, denn hierdurch wird der Kontrast zwischen Wald- und Nichtwaldgebieten maßgeblich erhöht. Darüber hinaus sind Texturmerkmale für die Klassifikation von X-Band Daten von großer Wichtigkeit. Die hier verwendeten Haralick Texturmerkmale werden durch eine ganze Reihe von Parametern bestimmt, weshalb eine Auswertung der für die Klassifikation am relevantesten Merkmale sehr schnell unüberschaubar werden

kann. Damit die Zeit für die maschinelle Auswertung jedoch so gering wie möglich bleibt, wurden über eine Variogrammanalyse die Parameter zur Texturerzeugung vorher so bestimmt, dass die jeweilige resultierende Textur die Landbedeckungsklasse bestmöglich repräsentiert. Schließlich sollte die radiometrische Stabilität der SAR-Daten durch den Einsatz von räumlicher Mittelung einiger Pixel und den gezielten Einsatz von Speckle-Filtern gesteigert werden, auch wenn dies zu einer Degradation der räumlichen Auflösung führt. Durch die Entwicklung der FRA-SAR 2010 Analysemethoden konnten aus den mono-temporalen TerraSAR-X Daten Waldmasken mit einer mittleren Genauigkeit von etwa 75% erzeugt werden. In vielen Regionen ist die absolute Genauigkeit jedoch deutlich besser. Denn die Ergebnisse der globalen Validierung ergaben, dass insbesondere Regionen mit viel Topographie Fehlklassifikationen hervorgerufen haben. Dieses Problem kann jedoch mit einem adäquaten Höhenmodell (~10 m räumliche Auflösung oder besser) korrigiert werden. Die zweithäufigste Ursache für Fehlklassifikationen sind urbane Gebiete gewesen. Diese Fehler könnten durch eine Analyse von multi-temporalen Daten leicht korrigiert werden, z.B. durch eine Auswertung der TerraSAR-X Kohärenz von zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmezyklen derselben Region.

Auf Basis einer Multifrequenzanalyse von X+C+L-Band SAR-Daten sollte innerhalb des Projektes auch eine exemplarische Ableitung von Waldstrukturparametern in fünf Gebieten erfolgen. Leider war es lediglich für zwei Regionen in Französisch-Guyana möglich, die dafür ausreichenden Bodenreferenzdaten für einen Vergleich mit der Biomasse zu beschaffen. Immer wieder wurde festgestellt, dass vorhandene Referenzdaten flächenmäßig viel zu klein für eine Nutzung mit Fernerkundungsdaten sind, dass rechtliche Verpflichtungen eine Weitergabe von Referenzdaten nicht ermöglichen, die Referenzdaten keine oder nur ungenügende Informationen über Waldstrukturparameter enthielten oder aber dass Unstimmigkeiten berechnete Zweifel über die Qualität der Referenzdaten hervorriefen. Für die beiden Regionen mit verwertbaren Referenzdaten konnte schließlich kein Zusammenhang mit der Biomasse gefunden werden. Dies kann vor allem darauf zurückzuführen sein, dass die Biomassewerte des intakten tropischen Regenwaldes in Französisch-Guyana den Sensitivitätsbereich der verwendeten SAR-Daten deutlich überschritten haben.

1.5 Ausblick

Hinsichtlich der Gesamtgenauigkeit der existierenden, räumlich hoch aufgelösten Waldkarten auf TerraSAR-X Basis wird festgestellt, dass insbesondere die Topographie einen starken negativen Einfluss auf die lokale Genauigkeit gehabt hat. Deswegen ist eine Ableitung von Geländehöhen mit adäquater räumlicher Auflösung (besser 20 m) absolut notwendig. Nur mit einem solchen Höhenmodell ist es schließlich möglich, die räumlich hoch aufgelösten TerraSAR-X Daten mit den bereits entwickelten und implementierten Algorithmen verlässlich topographisch zu normalisieren.

Außerdem sollte der Einsatz von multi-temporalen SAR-Datensätzen für die Landoberflächenklassifikation in Erwägung gezogen werden. Eine multi-temporale Datengrundlage würde die Ableitung von zusätzlichen stabilen Merkmalen erlauben, welche dann eingesetzt werden könnten, um die Klassifikationsalgorithmen für die Landoberfläche robuster auszulegen. Damit die hoch

aufgelösten SAR-Daten in zukünftigen Waldzustandsberichten der Vereinten Nationen auch tatsächlich wiederholt genutzt werden können, muss unbedingt zusätzlich die Erdoberflächenveränderung über die Zeit erfasst werden. Dementsprechend sollten die FRA-SAR 2010 Algorithmen um Methoden der Veränderungskartierung erweitert werden.

2 Nutzen des Vorhabens

Die Verfügbarkeit von zuverlässigen und aktuellen Landbedeckungsinformationen ist für eine Vielzahl von Anwendungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen von herausragender Bedeutung. In Hinblick auf eine operationelle Anwendung der Techniken der Fernerkundung ist aus Kostengründen die Entwicklung von halb- und vollautomatischen, auf andere Gebiete übertragbaren Verfahren von enormer Bedeutung und Gegenstand intensiver Forschungsarbeit. Mit dem im Rahmen des Projektes entwickelten Verfahren zur nahezu vollständig automatischen Ableitung von Waldkarten aus räumlich hoch aufgelösten TerraSAR-X Daten in tropischen Gebieten mit einem sehr hohen Bewölkungsgrad ist für den gegenwärtigen globalen Waldzustandsberichte der Welternährungsorganisation ein wichtiger Beitrag geleistet worden. Alle innerhalb von FRA-SAR 2010 erstellten Waldkarten stellen oftmals die einzigen zur Verfügung stehenden, flächenmäßigen Informationen dar, die Auskunft über den gegenwärtigen Zustand der jeweiligen Landoberfläche geben.

3 Bekannt gewordener Fortschritt an anderer Stelle

Während des Projektzeitraumes sind keine neuen Untersuchungen bekannt geworden, die eine automatische Klassifikation von Landbedeckungsinformationen anhand von hoch aufgelösten TerraSAR-X Daten innerhalb der gesamten Tropen zum Ziel haben.

4 Veröffentlichungen

Knuth, R., R. Eckardt, R. Leiterer, N. Richter, C. Thiel & C. Schmullius (2008): FRA-SAR 2010 - An Experimental Analysis of High Resolution Synthetic Aperture Radar within the Framework of the FAO's next Global Forest Resources Assessment for the Year 2010. - Proceedings of 3rd TSX Science Meeting: 25 - 26 November 2008, Oberpfaffenhofen, Germany.

Knuth, R., R. Leiterer, R. Eckardt, N. Richter, C. Schmullius (2008): Global Forest Resource Assessment with Synthetic Aperture Radar. - Proceedings of GOFC-GOLD Meeting: 25 - 26 November 2008, Jena, Germany.

Knuth, R., Ca. Thiel, Ch. Thiel, R. Eckardt, N. Richter & C. Schmullius (2009): Multisensor SAR Analysis for Forest Monitoring in boreal and tropical Forest Environments. - Proceedings CD of IEEE 2009 International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'09: 13 - 17 July 2009, Cape Town, Republic of South Africa.

- Knuth, R., R. Eckardt, N. Richter, C. Thiel & C. Schmullius (2009): FRA-SAR 2010 - Analysis of high resolution SAR data throughout the tropics within the next FAO global Forest Resources Assessment in 2010. - Proceedings of 33rd ISRSE, 4 - 8 May 2009, Stresa, Italy.
- Knuth, R., R. Eckardt, N. Richter & C. Schmullius (2009): Tropical Forest Mapping with Spaceborne High Resolution Radar Imagery. - Poster of World Forest Congress in Buenos Aires 18 - 23 October 2009, Buenos Aires, Argentina
- Knuth, R., R. Eckardt, N. Richter, C. Thiel & C. Schmullius (2009): An Experimental Analysis of High Resolution Synthetic Aperture Radar within the Framework of the FAO's next Global Forest Resource Assessment for the Year 2010. - Proceedings of 29. DGPF Jahrestagung: 24 - 26 March 2009, Jena, Germany.
- Knuth, R., R. Eckardt, N. Richter & C. Schmullius (2010): SAR analysis in tropical forest environments to support FAO's next global forest resources assessment. - Proceedings of ESA Living Planet Symposium 28 June - 2 July 2010, Bergen, Norway.
- Knuth, R., N. Richter, R. Eckardt & C. Schmullius (2011): Tropical Forest Mapping Using Single Date TerraSAR-X High Resolution Spotlight Data. - Proceedings of 34rd ISRSE, 10 - 15 April 2011, Sydney, Australia.

5 Literaturverzeichnis

- Achard, F., Stibig H.-J., Eva H. & P. Mayaux (2002): Tropical Forest cover monitoring in the humid Tropics - the TREES project. - International Journal for Tropical Ecology, 43 (1),9-20.
- Albertz, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt.
- Baatz, M. & A. Schäpe (1999): Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks. In: Proceedings of 2nd International Symposium: Operationalization of Remote Sensing, 16-20 August, ITC, NL.
- Bähr, H.-P. & T. Vögtle (Eds.) (1998): Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung, Wichmann: Heidelberg.
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I. & M. Heyen (2004): Multiresolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. - Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58, 239-258.
- Blaschke, T. & J. Strobl (2001): What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. - GeoBIT: Geoinformationstechnologie für die Praxis, 6/01, 12-17.
- Börner, W.-M., Mott, H., Lüneburg, E., Livingstone, C., Brisco, B., Brown, R. J. & J. S. Paterson (1998): Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts. In: Henderson, F.M. & A.J. Lewis (eds.) (1998): Principles and applications of imaging radar, Wiley: New York.

- Cloude, S. R. (1992): Uniqueness of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry. In: Börner, W.-M. & H. Brand (1992): Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry. Part 1, 266-296, Kluwer: Dordrecht.
- Cloude, S. R. & Pottier, E. (1996): A Review of Target Decomposition in Radar Polarimetry. – IEEE Transactions in Geosciences & Remote Sensing, 34 (2), 498-518.
- Cloude, S. R. & Pottier, E. (1997): An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR. – IEEE Transactions in Geosciences & Remote Sensing, 35 (1), 68-78.
- Czaplewski, R. L. (2003): Can a sample of Landsat sensor scenes reliably estimate the global extent of tropical deforestation? – International Journal of Remote Sensing, 24, 1409-1412.
- de Jong, J. J. M., Klaassen, W. & P. J. C. Kuiper (2001): Monitoring of rain water storage in forests
- Dobson, M. C., L. Pierce, K. McDonald & T. Sharik (1991): Seasonal change in radar backscatter from mixed conifer and hardwood forest in Northern Michigan. In: Proceedings IGARSS '91, 1121 - 1124.
- ESA (2011): TropiSAR final Report: Technical Assistance for the Development of Airborne SAR and Geophysical Measurements during the TropiSAR 2009 Experiment, available from https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=21020&name=DLFE-899.pdf.
- GlobCover Land Cover v2 (2008): Database. European Space Agency, European Space Agency GlobCover Project, led by MEDIAS-France, available from <http://ionia1.esrin.esa.int/index.asp>.
- FAO (1996): FRA1990 - survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO forestry paper 130, ISSN 0258-6150, FAO, Rome.
- FAO (2001): FRA2000 - global forest cover mapping. Final report. FRA working paper 50, FAO, Rome.
- Gallego, F. J. (2004): Remote sensing and land cover area estimation. – International Journal of Remote Sensing, 25, 3019-3047.
- Hahmann T., S. Martinis, M. Twele, A. Roth & M. Buchroithner (2008): Extraction of water and flood areas from SAR data. Proceedings of EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany.
- Hansen, M., DeFries, R.S., Townshend, J.R.G., Carroll, M., Dimiceli, C. & R.A. Sohlberg (2003): Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. - Earth Interactions, Vol 7, No 10, pp 1-15.
- Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., Loveland, T.R., Townshend, J.R.G., DeFries, R.S., Pittman, K.W., Stolle, F., Steininger, M.K., Carroll, M. & C. Dimiceli(2008): Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified using multi-temporal and multi-resolution remotely sensed data. PNAS, 105(27), 9439-9444.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K. & I. Dinstein (1973): Textural Features for Image Classification. – IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 3, 6, 610-621.

- Hellmann, M. (2000): Classification of Fully Polarimetric SAR-Data for Cartographic Applications. Doctoral Thesis TU Dresden, DLR-Forschungsbericht, 2000, 19.
- Henderson, F. M. & A. J. Lewis (1998) (Eds.): Principles & Applications of Imaging radar. Manual of Remote Sensing - Volume 2. John Wiley: New York.
- Hunsaker, C. T., O'Neill, R. V., Jackson, B. L., Timmins, S. P. & D. A. Levine (1994): Sampling to characterize landscape pattern. – *Landscape Ecology*, 9, 207-226.
- Jarvis A., Reuter, H.I., Nelson, A. & E. Guevara (2008): Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Klaassen, W., van der Linden, M. & Ballast, A. (1997): SAR sensing of vegetation wetness -the first results. In: Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment, Florence, Italy, 17-21 March 1997, ESA-SP-141.
- Sanchez-Azofeifa, G. A., Skole, D. L. & W. Chomentowski (1997): Sampling global deforestation databases: the role of persistence. – *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2, 177-189.
- Satake, M. & H. hanado (2004): Diurnal change of Amazon rain forest σ^0 observed by Kuband spaceborne radar. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42 (6), 1127-1134.
- Schmullius, C. C. & D. L. Evans (1997): Review article: Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR. – *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2713-2722.
- Skole, D. & C. Tucker (1993): Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. – *Science* 260, 1905-1910.
- Stehmann, S. V., Sohl, T. L. & T. R. Loveland (2003): Statistical sampling to characterize land cover change. – *Remote Sensing of Environment*, 86, 517-529.
- Stehmann, S. V., Sohl, T. L. & T. R. Loveland (2005): An evaluation of sampling strategies to improve precision of estimates of gross change in land use and land cover. – *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4941-4957.
- Thiel, C. (2004): Extrahierung hydrologisch relevanter Parameter aus hoch aufgelösten polarimetrischen L-Band sowie interferometrischen X-Band SAR-Daten. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität, Jena.
- Thiel, C, Weise, C. & C. Schmullius (2004): Object-based detection of forest cover changes with JERS SAR-data - the TerraSAR-L Project. – Proceedings of the 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 16-19 September, Innsbruck, Austria.
- Townshend, J. R. G., Bell, V., Desch, A. C., Havlicek, C., Justice, C. O., Lawrence, W. E., Skole, D., Chomentowski, W. W., ET AL. (1995): The NASA Landsat Pathfinder Humid Tropical Deforestation Project. Land Satellite Information in the next decade. Tyson's Corner, Virginia: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, IV76-IV87.

- Tucker, C. J. & J. R. G. Townshend (2000): Identifying land cover change from satellite data – Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. – *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1461-1472.
- van den Broek, A. C., Smith, A. J. E. & A. Toet (2004): Land use classification of polarimetric SAR data by visual interpretation and comparison with an automatic procedure. – *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3573-3591.