



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Berechnung von zeitlichen Variationen der Wasservolumina in Feuchtgebieten aus der Kombination von Satellitenaltimetrie und Fernerkundung – Beispielregion Pantanal

Ausgeführt am Institut für
Photogrammetrie und Fernerkundung
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von Prof. Dr. Wolfgang Wagner und Dr. Vahid Naeimi
als verantwortlich mitwirkenden Universitätsassistenten sowie
Prof. Dr. Florian Seitz und Dr. Denise Dettmering
vom Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI-TUM) der TU München

durch
Franziska Strehl
Sudetenlandstr.88
D-85221 Dachau

Die Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem DGFI-TUM in München angefertigt

August 2016

Kurzbeschreibung

Große Feuchtgebiete gehören zu den natürlichen Wasserspeichern der Erde. Des Weiteren haben sie eine wichtige ökologische Bedeutung, insbesondere für den Klima- und Hochwasserschutz. Detaillierte Kenntnisse über die saisonalen Veränderungen der Wasserspeicherung sind notwendig für die Ableitung von hydrologischen Parametern und zum besseren Verständnis der Dynamik. Durch die teilweise abgeschiedenen Lagen und der fehlenden Infrastruktur ist eine Überwachung mit Bodenstationen nur schwer durchführbar. Fernerkundungsverfahren können helfen flächendeckende Informationen zu liefern. Verschiedene Satellitenverfahren, wie SAR und Radar Altimeter, erlauben heutzutage die Bestimmung der horizontalen und vertikalen Ausdehnungen von Inlandgewässern.

In dieser Studie werden ALOS PALSAR-Aufnahmen und ENVISAT Altimetermessungen kombiniert. Das Ziel der Verknüpfung beider Datensätze ist die Ableitung des Wasservolumens und die Untersuchung der zeitlichen Variationen im Pantanal. Das Pantanal gehört mit einer Fläche von etwa 140.000 km² zu den größten Feuchtgebieten weltweit. Es befindet sich in Südamerika und ist starken zeitlichen und räumlichen Veränderungen ausgesetzt. Neben offenen Wasserflächen besteht die komplexe Hydrologie aus saisonal überschwemmter Vegetation. Für das Extrahieren der Wasserflächen aus den SAR-Daten wird die einfache Schwellwert-Methode verwendet. Die Ergebnisse werden anschließend mit denen der Altimetrie verglichen und in dem Zeitraum von 2006 bis 2010 analysiert. In Regionen mit offenen Wasserflächen kann ein jährliches Signal der Wasservolumenvariation abgeleitet werden. Hingegen stellt die Wasserklassifizierung in Gebieten mit unterschiedlichen Landbedeckungstypen und saisonalen Überschwemmungsmustern eine Herausforderung dar. Aufgrund der verschiedenen Rückstrahlungseigenschaften ist eine Trennung zwischen Wasser und Land nur schwer möglich. Ein Vergleich zwischen Sigma⁰ Rückstrahlwerten von ENVISAT RA-2 und ALOS zeigt, dass auch Altimeter-Backscatter zur groben Wasserdetektion verwendet werden können.

Abstract

Large wetlands belong to the natural water reservoirs of the earth. Furthermore they have a great ecological importance in particular for climate and flood protection. Explicit knowledge of the seasonal changes in the water volume is necessary to derive hydrological parameters and for a better understanding of the dynamics. By the remote locations and the lack of infrastructure monitoring based on ground stations is difficult to conduct. Remote sensing methods can help to provide comprehensive information. Nowadays various satellite techniques such as SAR and radar altimetry allow to determine horizontal and vertical extents of inland water.

In this study ALOS PALSAR images and ENVISAT altimeter measurements are combined. The goal of the combination of both data sets is the calculation of the water volume and the analysis of the temporal variations in the Pantanal. The Pantanal is with an area of about 140,000 square kilometers one of the largest wetlands worldwide. It is located in South America and is subjected to strong temporal and spatial changes over the year. In addition to open water bodies the region is influenced by seasonally flooded vegetation. A simple threshold method is used for extracting the water surfaces from SAR data. The results are then compared with those of altimetry and analyzed in the time series 2006-2010. In regions with open water bodies a distinct signal of the annual water volume variation are derived. In contrast the water classification in areas with different land cover types and seasonal flooding patterns poses challenges. Due to the various backscatter characteristics a separation between water and land is difficult. A comparison between Sigma0 values from ENVISAT RA-2 and ALOS shows that altimeter backscatter can be used for coarse water detection.

Inhaltsverzeichnis

Glossar und Abkürzungen	- 7 -
1 Einleitung.....	- 9 -
1.1 Einführung in die Thematik	- 9 -
1.2 Aufgabenstellung	- 10 -
1.3 Fernerkundung von Feuchtgebieten	- 11 -
2 Grundlagen der aktiven Radarfernerkundung	- 13 -
2.1 Abbildende Radarsysteme und Aufnahmecharakteristik	- 13 -
2.2 Radar mit synthetischer Apertur.....	- 18 -
2.3 Mechanismen der Radarrückstreuung.....	- 19 -
2.3.1 Radargleichung.....	- 20 -
2.3.2 Systemspezifische Einflussfaktoren	- 21 -
2.3.3 Geländespezifische Einflussfaktoren.....	- 23 -
2.4 Radar Altimeter	- 27 -
3 Testgebiet Pantanal	- 29 -
3.1 Geographische Lage	- 29 -
3.2 Klima.....	- 31 -
3.3 Hydrologie	- 33 -
3.4 Landbedeckung und Vegetation	- 36 -
4 Datenmaterial und Vorprozessierung	- 38 -
4.1 SAR-Datenrecherche	- 38 -
4.2 Aufnahmesystem ALOS PALSAR.....	- 40 -
4.2.1 Verwendete Daten	- 43 -
4.2.2 Vorprozessierung	- 43 -
4.3 ENVISAT Altimeterdaten	- 47 -
4.4 Optische Vergleichsdaten	- 48 -

5 Bestimmung der Wasserflächenausdehnung mit SAR-Daten	- 50 -
5.1 Visuelle Untersuchung der Radarrückstreuung	- 50 -
5.2 Pixel-basierte Klassifizierung von Wasser	- 54 -
5.2.1 Histogramm-Schwellwertbildung.....	- 55 -
5.2.2 Schwellwertbildung aus den statistischen Parametern der Zeitreihe	- 60 -
5.3 Analyse der Klassifizierungsergebnisse	- 63 -
5.3.1 Sensibilität der Schwellwerte	- 64 -
5.3.2 Zeitliche Veränderungen der Wasserflächen	- 65 -
5.3.3 Vergleich zu anderen Studien.....	- 69 -
5.4 Validierung mit optischen Daten.....	- 72 -
5.5 Interpretation der Ergebnisse	- 75 -
6 Verknüpfung von SAR und Satellitenaltimetrie	- 78 -
6.1 Vergleich mit Altimeter-Backscatter	- 78 -
6.2 Zeitreihenanalyse	- 86 -
6.2.1 Wasserausdehnung	- 87 -
6.2.2 Wasserhöhen.....	- 89 -
6.2.3 Berechnung der Volumenvariationen	- 91 -
7 Zusammenfassung und Ausblick	- 94 -
Literaturverzeichnis	- 96 -
Datenquellen	- 104 -
Abbildungsverzeichnis.....	- 105 -
Tabellenverzeichnis.....	- 106 -
Anhang.....	- 107 -

Glossar und Abkürzungen

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASF	Alaska Satellite Facility
AWEI	Automated Water Extraction Index
Backscatter	Radarrückstrahlung
Buffer	Puffer-Zone
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
DAHITI	Database for Hydrological Time Series of Inland Waters
dB	Dezibel, Einheit
DEM	Digital Elevation Model (Höhenmodell)
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Double-Bounce	Doppelte Radarrückstrahlung, zweimalige Spiegelung
ENSO	El Niño Southern Oscillation
ENVISAT	European Environmental Polar Orbit Earth Observation Mission
ERS	European Earth Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
Footprint	Beleuchtungszone des Altimeters am Boden
GHz	Giga-Hertz, Einheit der Frequenz
GIEMS	Global Inundation Extent Multi-Satellite
GIS	Geographisches Informationssystem
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
In-situ	vor Ort, hier Datenaufnahme
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JERS	Japanese Earth Resources Satellite
Landsat	Land Remote Sensing Satellite
MIR	Mittleres Infrarot
MNDVI	Modified Normalized Differenced Water Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index
NDWI	Normalized Differenced Water Index
NIR	Nahes Infrarot
PALSAR	Phased Array type L-Band Synthetic Aperture Radar
r	Korrelationskoeffizient
RA-2	Advanced Radar Altimeter, an Bord des ENVISAT Satelliten

SAR	Synthetic Aperture Radar
SGDR	Sensor Geophysical Data Record, Datenaufnahme RA-2
σ_0	Radarrückstreuquerschnitt (Sigma0)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Kurzwelliges Infrarot
Threshold	Schwellwert
TIR	Thermales Infrarot
Track	Satellitenpass
UTM	Universal Transverse Mercator (Koordinatensystem)
VIS	Sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums
WRI	Water Ratio Index

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Die Verfügbarkeit und Qualität von Wasser stellt weltweit eine essentielle Lebensgrundlage dar. Trotz der Notwendigkeit ist unser Wissen über die Verteilung und die zeitlichen Änderung der natürlichen Wasservorräte vergleichsweise beschränkt [Alsdorf et al., 2007]. Bestandteil der hydrologischen Forschung ist die Beobachtung und Analyse der Ressourcen sowie die Ableitung von entscheidungsunterstützenden Parametern. Die Quantifizierung der saisonalen Volumenvariation ist ein wichtiges hochaktuelles Forschungsthema, vor allem in Hinsicht auf den Klimawandel und der Zunahme von Wetterextremereignissen. Große Feuchtgebiete sind wichtige Bestandteile des globalen Wasserkreislaufs und erfüllen wesentliche Aufgaben, einschließlich Hochwasserschutz, Klimaregulierung, Kohlenstoffspeicherung, Grundwasseranreicherung und Biodiversitätsmanagement. Diese Übergangs-Ökosysteme zwischen Land und Wasser dienen als natürliche Filter zur Verbesserung der Wasserqualität und bieten Lebensraum für eine Vielzahl von Tier- und Pflanzenarten [Keddy et al., 2009]. Das Wissen über den Lauf und die Dynamik von Wasser in diesen Regionen ist wertvoll für viele Anwendungen, wie Flutrisikoermittlung und Studien zur Wasserverfügbarkeit. Trotz der Bedeutung von Feuchtgebieten ist deren genaue Ausbreitungsfläche nicht bekannt. Schätzungen reichen von 7 bis 10 Millionen Quadratkilometer, von denen sich etwa die Hälfte in tropischen und subtropischen Regionen befinden [Mitsch & Gosselink, 2000; Lehner & Döll, 2004]. Die meisten Überschwemmungsgebiete liegen sehr abgeschieden und sind zum Teil nur schwer zugänglich. In den vergangenen Jahren ist jedoch ein Rückgang der Feuchtgebiete verzeichnet worden [Mitsch & Gosselink, 2000], insbesondere durch die Ausbreitung von landwirtschaftlichen Anbauflächen und Siedlungen. Es ist daher zwingend notwendig den Status von Feuchtgebieten zu überwachen, um den Einfluss von menschlichen Aktivitäten und Klimawandel auf terrestrische Wasserspeicher zu verstehen. Die Überwachung vor Ort ist aufgrund der spärlichen Abdeckung von In-situ Stationen und der fehlenden Infrastruktur teilweise schwierig durchführbar. Fernerkundungsmethoden können helfen nützliche Informationen über hydrologische Fragen zu liefern. Sie bieten den Vorteil hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung sowie eine kostengünstige Ergänzung zu den Feldmessungen [Gallant, 2015].

Radar Altimeter und Satellitenbildern von verschiedenen Frequenzen ermöglichen heutzutage eine Bestimmung der Wasserhöhen und Ausdehnungen von Inlandgewässern. Die Verbindung beider Verfahren erlaubt die Quantifizierung von Volumenvariationen in Überschwemmungsgebieten.

1.2 Aufgabenstellung

Speziell für die Überwachung der weltweiten Feuchtgebiete bietet der Einsatz von Radar Altimeter und SAR einen neuen Forschungsansatz. Er zielt dabei auf die Gewinnung von detaillierten Informationen für ein besseres Verständnis der Hydrologie dieser sehr dynamischen Regionen.

Gegenstand der folgenden Arbeit ist die Untersuchung von zeitlichen Variationen der Wasserspeicherung in Feuchtgebieten aus der Kombination unterschiedlicher Satellitenbeobachtungsdaten. Die Abschätzung der Volumenänderung erfolgt über Informationen der vertikalen und horizontalen Ausdehnung eines Oberflächengewässers. Im Rahmen der Arbeit soll für die Beispielregion Pantanal eine Zeitreihe der Wasserflächenvariationen aus SAR-Daten abgeleitet werden. Die benötigten Wasserstandshöhen werden über Radar Altimetrie bestimmt. Das Ziel ist die anschließende Verknüpfung der beiden Datensätze zur Berechnung der Wasservolumina. Das in Südamerika gelegene Pantanal gehört zu den größten Feuchtgebieten weltweit und erstreckt sich über eine Fläche von etwa 140.000km² zwischen Brasilien, Bolivien und Paraguay [Hamilton, 2002a]. Es ist definiert durch saisonale Überschwemmungen die zeitlich und räumlich variieren. Durch seine komplexe Gewässerstruktur ergeben sich besondere Herausforderungen. Diese bestehen vor allem darin, dass viele kleine, nicht zusammenhängende Wasserflächen vorliegen, die jedoch hohen jährlichen Schwankungen zwischen feuchten und trockenen Perioden ausgesetzt sind. Zum Teil staut sich das Wasser auch verdeckt unterhalb der Vegetation.

Neben der Klassifizierung und Analyse der Überflutungsgebiete im Jahresverlauf gehören zu den Hauptaufgaben die Recherche nach geeigneten SAR-Daten, sowie die Bestimmung des exakten Untersuchungszeitraumes. Bei den Altimeterdaten beschränkt sich die Studie auf bereits zur Verfügung stehenden Messungen der ENVISAT-Mission (2002-2010). Durch die Wahl von ALOS PALSAR ScanSAR Aufnahmen (L-Band) ergibt sich eine Zeitreihe von Ende 2006 bis August 2010. Des Weiteren werden beispielhaft zeitgleich gemessene Altimeter-Rückstrahlkoeffizienten mit den Ergebnissen der Radarfernerkundung verglichen um zu überprüfen, ob sich aus der Charakteristik von σ_0 ein Rückschluss auf das Vorliegen von Wasserflächen ziehen lässt.

1.3 Fernerkundung von Feuchtgebieten

In den letzten Jahren haben Fernerkundungsmethoden gezeigt, dass sie die Fähigkeit besitzen, Oberflächengewässer und Feuchtgebiete zu beobachten. Die Wasserausdehnung kann mit verschiedenen Sensoren im optischen Bereich (z.B. Landsat, MODIS, SPOT) oder mit SAR (Synthetic Aperture Radar) Daten (z.B. ALOS, Radarsat, ENVISAT) gemessen werden [Alsdorf et al., 2007, Ozesmi et al., 2002]. Optische Systeme (VIS-NIR) besitzen jedoch den großen Nachteil, dass die Aufnahmen von der Wetterlage und der Wolkenbedeckung abhängig sind. So können etwa längere Untersuchungsperioden, vor allem in tropischen Regionen, meist nicht vollständig abgedeckt werden. Die Mikrowellenfernerkundung bietet hingegen die Möglichkeit ohne große Beeinflussung von Wetter und Licht aufnehmen zu können. Ein weiterer Unterschied zwischen Radar und optischer Fernerkundung ist der Informationsgehalt. Während die „Farbe“ in optischen Bildern durch die molekulare Resonanz in den Oberflächen, der Vegetation und den Böden bestimmt wird, sind in Radarbildern Geometrie und dielektrischen Eigenschaften der Objekte die entscheidenden Parameter. Des Weiteren können Mikrowellen, aufgrund der längeren Wellenlängen tiefer in Vegetationsschichten und Böden eindringen. [Ulaby et al. ,1981, S.1ff]. Woodhouse (2006) beschreibt die optische Fernerkundung mit dem bekannten Prinzip des „Sehens“, hingegen die Mikrowellenfernerkundung mit dem akustischen Prinzip des „Hörens“.

In der Literatur ist die Nutzung von SAR zur Flutkartierung und Zeitreihenanalyse bereits weit verbreitet [Hidayat et al., 2012; Kuenzer et al, 2013]. Chapman et al. (2015) verwendet ALOS PALSAR L-Band Daten für das Detektieren von Überschwemmungen in Südamerika. Vor allem längere Wellenlängen wie etwa das L-Band sind laut aktuellen Studien am geeignetsten für die Beobachtung von Wasserflächen. Ein Multi-Sensor-Ansatz (SAR, passive Mikrowellen, optisch) zur Untersuchung der globalen Dynamik in Feuchtgebieten über einen längeren Zeitraum wird in Prigent et al. (2007) beschrieben. Bartsch et al. (2006) präsentiert die Möglichkeit des Monitorings von Feuchtgebieten mit ENVISAT ASAR Global Mode Daten.

SAR bietet viele Eigenschaften, die ideal für die Überwachung von Oberflächengewässer sind. Dennoch gibt es einige Faktoren, welche die Radarrückstrahlung beeinflussen, wie etwa Blickrichtung, Einfallswinkel, Bodenfeuchte, dielektrische Konstante und Struktur sowie Zusammensetzung der Oberflächenobjekte [White et al., 2015]. Zudem erschweren die Charakteristiken der Feuchtgebiete die fernerkundungsgestützte Kontrolle. Ein Hauptfaktor ist, dass sie aus keinem einzelnen Landbedeckungstyp bestehen. Des Weiteren sind die dynamischen Veränderungen teilweise innerhalb von Stunden oder

Tagen herausfordernd für die Satellitenbeobachtung in diesen Regionen [Gallant, 2015]. Für die Wasserklassifizierung von SAR-Bildern werden in der Literatur verschiedene Ansätze beschrieben. Die meistverbreitete Technik beruht auf der Bildung eines Grauwert-Thresholds [White et al. (2015)].

Neben der Information zur Ausdehnung sind die Wasserhöhen essentiell für die Analyse der Wasserspeicherdynamik. Momentan bieten vier Internetportale Altimeter-Zeitreihen von Wasserständen für Inlandsgewässer an. Dazu gehören die Datenbanken DAHITI (<http://dahiti.dgfi.tum.de/de/>), LEOGOS-Hydroweb (<http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/>), ESA River and Lake System (<http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/RiverLake/shared/main>) und USDA Gobal Reservoir and Lake Monitor (http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/).

Die Verknüpfung von Wasserhöhen und Fernerkundung zur Ableitung von Volumenvariationen wird in einigen Studien bereits erläutert. Neben der Verwendung von Wasserständen aus In-situ Messungen [Hidayat et al., 2011], gibt es auch rein satellitengestützte Ansätze. Frappart et al. (2015) kombinierte Global Inundation Extent Multi-Satellite (GIEMS) Daten mit denen des ENVISAT RA-2 Altimeters zur Beobachtung von Variationen des Frischwasserspeichers im Orinoco Überschwemmungsgebiet. Eine ähnliche Vorgehensweise ist bei Baup et al. (2014) beschrieben, wobei die Flächenausdehnung aus Formosat-2, Terrasar-X und Radarsat-2 Aufnahmen bestimmt werden.

Die meisten hydrologischen Untersuchungen im Testgebiet Pantanal basieren auf spärlichen In-situ Messungen, wie Niederschläge, Flusststände und Abflussdaten [Penatti et al., 2015]. Eine der ersten Untersuchung auf Basis der Fernerkundung wurde 1996 von Hamilton und Kollegen veröffentlicht. Sie analysierten die saisonalen Überschwemmungsmuster zwischen 1979 und 1987 mit Hilfe von passiven Mikrowellenaufnahmen (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, Nimbus-7 Satellit). Hingegen verwendet Padovani (2010) optische MODIS Vegetationsindizes (2000 bis 2009) und ein Linear Spectral Mixture Model für die Quantifizierung der Überflutungsbereiche. Evans et al. (2010, 2014) kartieren die Landbedeckung und die saisonalen Überschwemmungen im Pantanal. Ihre Klassifizierung basiert auf einer objektorientierte Bildanalyse (OBIA) von ALOS PALSAR und Radarsat-2 Aufnahmen.

Alle diese Studien beziehen sich hauptsächlich auf die Variabilität der Überschwemmungsfläche, jedoch nicht auf eine Analyse der Veränderung der Wasservolumina im Pantanal.

2 Grundlagen der aktiven Radarfernerkundung

Das aktive Radar ist ein Fernerkundungsverfahren, das gesendete und wieder reflektierte Mikrowellen zur Ortung, Entfernungsmessung und Objekterfassung benutzt. Im Gegensatz zu passiven Verfahren, die natürliche Strahlungen verwenden, wird bei der aktiven Fernerkundung das Signal vom System selbst generiert. Der Begriff Radar kommt aus der englischen Sprache und steht für „Radio detection and ranging“. Die deutsche Bezeichnung ist „Funkmessverfahren“ [Klausing & Holpp, 2000, S.1].

Die Entwicklung des Radars ist auf die Arbeit von Heinrich Hertz in den Jahren 1885 bis 1889 zurückzuführen, in der er die Existenz von elektromagnetischen Wellen, nach der Theorie von Maxwell, experimentell nachwies. Noch heute ist der Name Hertz als Einheit für die Frequenz bekannt. Mit der Möglichkeit Radar für militärische Zwecke zu nutzen, wurde die Technik insbesondere während des zweiten Weltkrieges vorangetrieben. 1951 kam es zu einer Weiterentwicklung der Technik mit synthetischer Apertur. Dies ermöglicht die Erzeugung höher aufgelöster Bilder durch besondere Verfahren der Signalverarbeitung (siehe Kap. 2.2) [Klausing & Holpp, 2000, S.13f].

2.1 Abbildende Radarsysteme und Aufnahmecharakteristik

Als abbildende Radarsysteme (siehe Abb.1) versteht man Verfahren, welche die zurückreflektierte Signale entsprechend ihrer räumlichen Lage in ein zweidimensionales digitales Bild umsetzen. Radarsensoren können von Flugzeugen beziehungsweise von Satelliten getragen werden. Einfache flugzeuggestützte Radarsensoren bezeichnet man als Radarsysteme mit realer Apertur oder RAR (Real Aperture Radar). Während des Überflugs werden Radarimpulse in einer bestimmten Wellenlänge seitlich und parallel zur Flugrichtung in einem keulenförmigen Strahl ausgesendet. Man spricht hier auch von einem Seitensicht Radar oder SLAR (Sidelooking Airborne Radar).

Die Hauptkomponenten eines Radars sind Sender, Empfänger, Prozessor und Antenne [Ulaby et al., 1981, S.34/42]. Abhängig von der Erdoberfläche sowie den auf ihr befindlichen Objekten werden die vom Sender generierten ausgesendeten Strahlungen mit unterschiedlichen Intensitäten reflektiert und wieder vom Empfänger aufgezeichnet und prozessiert. Da aktive Radarsysteme mit kohärenten Signalen arbeiten, müssen Sender und Empfänger in einer Weise korreliert sein um die gesendeten und empfangenen Signale vergleichen zu können. Zum Senden und Empfangen kann eine einzelne Antenne (monostatic) oder zwei separate (bistatic) benutzt werden [Lillesand et al., 2015, S.400].

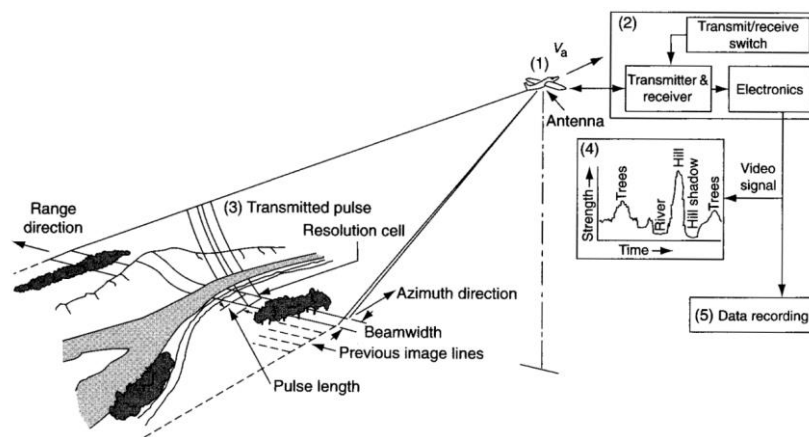


Abb.1 Abbildendes Radarsystem [Lillesand et al, 2015, S.391]

Als Messgrößen dienen Frequenz, Amplitude und Phase. Die Amplituden von Sende- und Empfangssignal geben Auskunft über Größe, Gestalt, Lage und Materialeigenschaften eines Objekts. Durch Änderungen der Frequenz werden Aufschlüsse über Objektbewegungen gewonnen. Phasenmessungen erlauben schließlich Positionsbestimmungen und Entfernungsmessungen [Klausing & Holpp, 2000, S.53].

Das allgemeine Funktionsprinzip des aktiven Radars beruht auf der Messung der Pulssignallaufzeit des Radarechos. Ist die genaue Laufzeit eines Radarimpulses und die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung in der Atmosphäre bekannt, kann der Abstand zwischen Sender/Empfänger und Objekt berechnet werden [Woodhouse, 2006, S.224]:

$$R = \frac{ct}{2} \quad (2.1)$$

R = Entfernung zum Objekt (slant range)

t = Pulslaufzeit

c = Lichtgeschwindigkeit

Die Division durch zwei in der oberen Formel, resultiert auf der Zwei-Weg-Länge des Signals, von Sender zu Reflektor und wieder zurück.

In Abbildung 2, wird die Aufnahmegeometrie von Radarsystemen veranschaulicht. Unter dem Depressionswinkel γ versteht man den Winkel zwischen Horizontale und Radarstrahl. Er hat maßgeblichen Einfluss auf die Abbildung der Oberfläche im Radarbild. Der Sichtwinkel Φ beschreibt den Winkel zwischen Vertikalebene des Sensors (Nadir) und der Beobachungsposition am Boden. Zwischen dem Radareinfallsstrahl und der Oberflächennormalen eines bestimmten Zielpunktes wird der Einfallswinkel θ definiert [Curlander & McDonough, 1991, S.14].

Der Aufnahmestreifen (Swath) wird in Nahbereich (Near-Range) und Fernbereich (Far-Range) unterschieden.

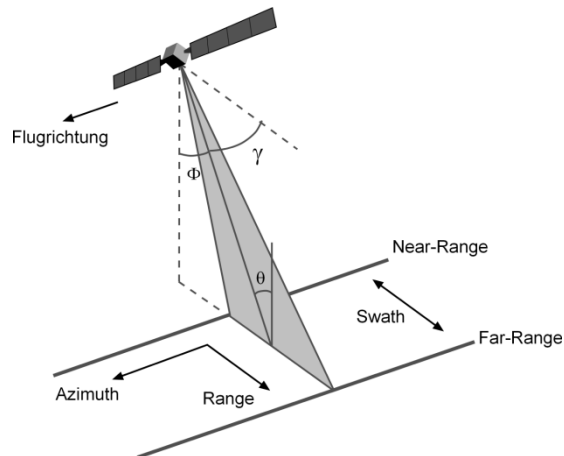


Abb.2 Schematische Darstellung der Radaraufnahmegeometrie
[eigene Darstellung nach Natural Resources Canada, 2007]

Bei der Abbildungsgeometrie eines Radarsystems ist grundsätzlich zwischen Schrägentfernung, der Slant-Range (SR) und Entfernung am Boden, der Ground-Range (GR) zu unterscheiden, welche in Abbildung 3 schematisch dargestellt sind.

Abbildende Radarsysteme setzen einen Geländepunkt, entsprechend seiner Sensordistanz, in die Bildebene um. Die ausgesendete Wellenfront überstreicht dabei eine Strecke im Nahbereich, mit einem kürzeren Zeitintervall, als im Fernbereich. Dadurch kommt es in der Slant-Range Darstellung zu einer Verkürzung der Strecke (A) und somit zu einer Vergrößerung des Abbildungsmaßstabs in Querrichtung.

Im Gegensatz dazu wird bei der Ground-Range Darstellung die Situation, aufgrund von Korrekturverfahren, kartenähnlich und in etwa maßstabsgerecht wiedergegeben [Kronberg, 1985, S.157].

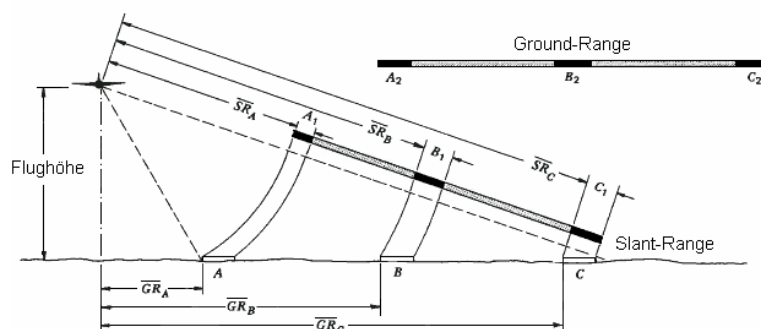


Abb.3 Slant-Range und Ground-Range Darstellung [verändert nach Lillesand et al., 2015, S.403]

Bei der Radaraufnahme unterscheidet man zwei verschiedene Auflösungsvermögen, die unterschiedliche Dimensionen annehmen können. Quer zur Flugrichtung (Range) wird die Auflösung durch die Dauer des ausgesendeten Radarimpulses beeinflusst. In Flugrichtung (Azimut) ist die Auflösung abhängig von dem Öffnungswinkel β , d.h. der Breite des Radarstrahls. Nach Lillesand et al. (2015, S.397f) gilt folgende Gleichung für die azimutale Auflösung R_a , mit SR der Slant-Range:

$$R_a = \overline{SR} * \beta \quad (2.2)$$

Der Öffnungswinkel der Antenne ist direkt proportional zur Wellenlänge des gesendeten Pulses und inverse proportional zur Länge der Antenne l .

$$\beta = \frac{\lambda}{l} \quad (2.3)$$

Um zweidimensionale Bilder mit hoher räumlicher Auflösung beispielsweise von Satellitenplattformen generieren zu können, ist demnach ein Radar mit synthetischer Apertur (SAR) notwendig, da die technischen Möglichkeiten einer mehrere Meter langen Antenne limitiert sind.

2.2 Radar mit synthetischer Apertur

Abbildungssysteme mit synthetischer Apertur benutzen eine relativ kleine Antenne, wobei diese in regelmäßigen Abständen Radarimpulse aussendet und empfängt (siehe Abb.5). Während der Vorwärtsbewegung des Satelliten werden so Geländepunkt mehrmals beleuchtet und im Vorbeiflug an verschiedenen aufeinanderfolgenden Positionen wieder empfangen. Je weiter die Objekte von der Antenne entfernt sind, desto häufiger werden sie abgebildet. Diese vielfach aufgezeichneten Radarechos werden in einem aufwändigen Rechenprozess miteinander korreliert, sodass die Daten so behandelt werden können, als stammten sie von einer scheinbar großen Antenne. Dadurch lassen sich Bilddaten mit höherer Auflösung erzeugen, die in Flugrichtung entfernungsunabhängig sind [Albertz, 2009, S.57f].

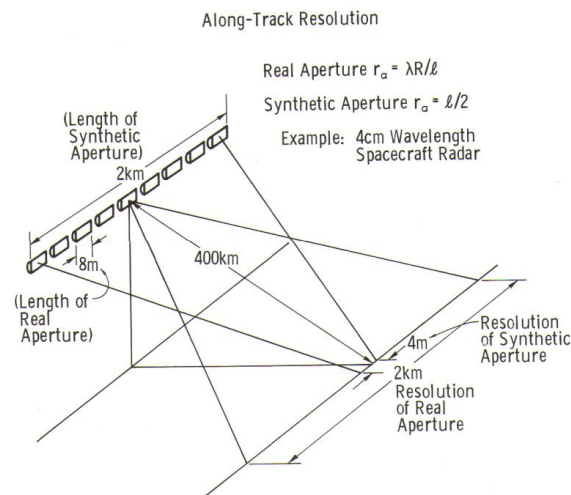


Abb.5 Wirkungsweise eines SAR-Systems [Ulaby et al., 1981, S.48]

Ein anderer Ansatz beruht auf der Detektion der Doppler Frequenz Veränderung. Durch die Relativbewegung zwischen Sensor und Reflektor kommt es zur zeitlichen Änderung der Frequenz. Dadurch können Echos innerhalb des weiten Radarstrahls lokalisiert werden. Echos hinter dem Flugsystem werden in niedriger Frequenzen verschoben und die davor in höhere. Reflektierte Signale die sich annähernd in der Mitte des Strahls befinden erfahren nur eine kleine oder gar keine Frequenzveränderung. Durch die Prozessierung der Echos entsprechend der Doppler Verschiebung, kann eine kleine effektive Strahlbreite generiert werden [Lillesand et al., 2015, S.400].

Die azimutale Auflösung eines SAR-Systems entspricht der halben Länge der Antenne [Ulaby et al., 1981, S. 47].

$$R_a = \frac{l}{2} \quad (2.4)$$

Sie ist unabhängig vom Abstand zwischen Sensor und Reflektor sowie von der Wellenlänge.

2.3 Mechanismen der Radarrückstreuung

Radarbilder, bestehen aus Pixeln mit unterschiedlichen Werten der Radarrückstreuung. Um den Inhalt, der auf den ersten Blick abstrakt wirkenden Amplitudenbilder, gut interpretieren und deuten zu können, sind einige grundlegende Eigenschaften der Rückstreuung zu beachten.

Die Radarrückstrahlung und die Abbildung der Landoberfläche im Radarbild sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Der Grauton und die Textur eines Objektes werden durch die Intensität des empfangenen Radarechos beeinflusst. Helle Pixel weisen auf eine starke Reflexion hin, dunkle auf eine geringe Reflexion.

Eine Besonderheit in Radarbildern ist der Speckle-Effekt. Die körnige Bildstruktur wird auch als Salt-and-Pepper-Effekt bezeichnet und geht auf die kohärenten Radarsignale zurück. Sie entsteht durch Interferenz der unterschiedlich zurückreflektierten elektromagnetischen Wellen, innerhalb der Auflösungszelle. Aufgrund des Vorkommens einer hohen Anzahl verschiedener Einzelstreuer innerhalb des Bildelements, kommt es zu einer individuellen Rückstrahlung jedes einzelnen beleuchteten Zielpunktes, die sich addiert beziehungsweise überlagert. Als Resultat erhält man konstruktive oder destruktive Interferenzen, wodurch die Rückstrahlintensität geschwächt oder verstärkt wird. Dadurch entstehen heller und dunkler Pixel im Bild [Campbell & Wynne, 2011, S.222].

Die Stärke der zurückgestrahlten Energie ist gekennzeichnet durch die Interaktion der ausgesendeten Mikrowellen mit der Geländefläche. Dabei spielen die Charakteristiken des Aufnahmesystems sowie die Oberflächeneigenschaften eine wichtige Rolle.

2.3.1 Radargleichung

In der Radargleichung wird der Zusammenhang von Radar, Objekt und empfangenem Signal beschrieben und eine Beziehung zwischen gesendeter (P_t) und empfangener (P_r) Leistung hergestellt. Sie berücksichtigt technische und physikalische Eigenschaften des Radarsystems und des reflektierenden Objekts. Für ein monostatisches System gilt:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.5)$$

wobei R die Entfernung zum Objekt, G die Antennencharakteristik (*Gain*), λ die Wellenlänge und σ der Radarrückstreuquerschnitt (*radar cross section*) ist [Woodhouse, 2006, S.226].

Die Richtungsempfindlichkeit einer Antenne nimmt mit der Steigerung ihrer effektiven Größe zu. Der Radarrückstreuquerschnitt spiegelt die Eigenschaften des Objekts wider und resultiert aus einer komplexen Kombination von mehreren Faktoren, wie Form und Größe. Alle anderen Parameter in der Gleichung werden über das Radarsystem selber bestimmt. Wird die *cross section* über das aktuelle Beobachtungsgebiet A normalisiert, spricht man von dem normierten Radarrückstreuquerschnitt σ_0 [Woodhouse, 2006, S.225f].

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{A} \quad (2.6)$$

Mit einer großen Antenne, einer guten Rückstreuung und einer kurzen Entfernung zum Objekt kommt es demnach zu einem starken Signal an der Empfangsantenne.

2.3.2 Systemspezifische Einflussfaktoren

Zu den systemspezifischen Einflussfaktoren gehören Wellenlänge beziehungsweise Frequenz, Polarisation und Depressionswinkel. Der Spektralbereich der Mikrowellen entspricht den Wellenlängen zwischen 1mm und 1m bzw. Frequenzen von 0,3 GHz bis 300 GHz [Albertz, 2009, S.55]. Die für die Radarfernerkundung verwendeten Wellenlängen werden in sogenannte Bänder unterteilt und mit Buchstaben gekennzeichnet. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Bandbezeichnungen aufgelistet.

Bandbezeichnung	Wellenlänge λ [cm]	Frequenz ν [MHz]
Ka-Band	0,75-1,1	40.000-26.500
K-Band	1,1-1,67	26.500-18.000
Ku-Band	1,67-2,4	18.000-12.500
X-Band	2,4-3,75	12.500-8.000
C-Band	3,75-7,5	8.000-4.000
S-Band	7,5-15	4.000-2.000
L-Band	15-30	2.000-1.000
P-Band	30-100	1.000-300

Tab.1 In der Radarfernerkundung gebräuchliche Frequenzbereiche
[Lillesand et al., 2015, S.409]

Die Wellenlänge bzw. Frequenz in der ein System aufnimmt, beeinflusst das Eindring- und Durchdringungsvermögen von Mikrowellen in das Oberflächenmaterial.

Je länger die Wellenlänge, desto tiefer dringen die Strahlen in die Materie ein [Albertz, 2009, S.61f]. Ulaby (1981) stellt die Abhängigkeit zwischen Eindringtiefe von Mikrowellen und steigender Bodenfeuchte dar. In Abbildung 6 wird verdeutlicht, dass mit steigendem Wassergehalt die Fähigkeit für Mikrowellen in die Erdoberfläche einzudringen sinkt. Während im L-Band (1,3 GHz) bei trockenen Böden eine Tiefe von mehreren Metern erreicht wird, sind es bei höheren Frequenzen und feuchten Böden nur noch Zentimeter.

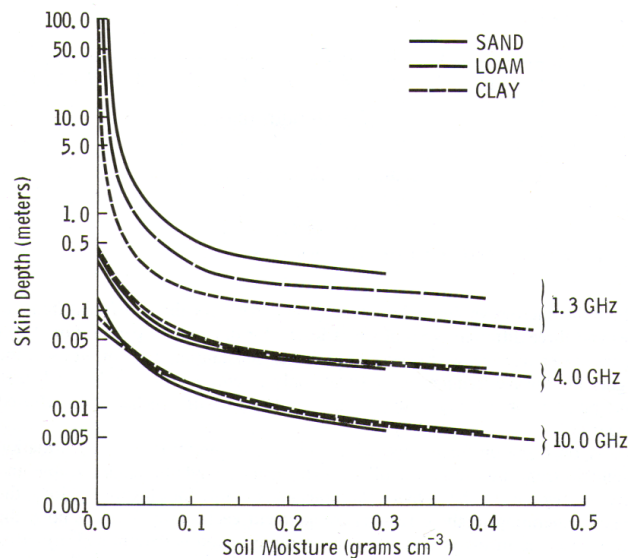


Abb.6 Eindringtiefen von Mikrowellen (L-, C-, X-Band) in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und Art
[Ulaby et al., 1981, S.4]

Neben der Frequenz ist die Schwingungsrichtung der Wellen bestimmend für die Aufnahme. Die sogenannte Polarisation bezieht sich dabei auf die Ausrichtung des elektrischen Feldes. Je nach Radarsystem können horizontal (H) oder vertikal (V) orientierte Impulse gesendet und empfangen werden. Insgesamt ergeben sich mit den Kreuzkombinationen vier Möglichkeiten der Polarisation HH, VV, HV und VH, wobei der erste Buchstabe für die ausgesendete und der Zweite für die empfangene Polarisation steht [Lillesand et al., 2015, S.411].

Ein wichtiger Einflussfaktor ist auch der Einfallswinkel, der an sich vom Depressionswinkel, also vom Aufnahmesystem vorgegeben ist. Ausschlaggebend ist aber, wie die einfallenden Mikrowellen mit dem Relief interagieren. Je nachdem mit welchem Winkel der Radarimpuls auf die Oberfläche auftritt, kommt es zu Veränderungen der Rückstahlintensität und somit zu einer unterschiedlichen Darstellung im Radarbild. Bei antennenzugeneigten Geländeflächen werden größere Anteile an elektromagnetischen Strahlen reflektiert [Kronberg, 1985, S. 148].

2.3.3 Geländespezifische Einflussfaktoren

Die Eigenschaften der reflektierten Welle (Amplitude, Phase, Polarisation) werden hauptsächlich von der elektrischen Leitfähigkeit, Oberflächenrauigkeit und der lokalen Neigung beeinflusst [Curlander & McDonough, 1991, S. 46]. Physikalisch werden die elektrischen Materialeigenschaften durch die komplexe Dielektrizitätskonstante ausgedrückt. Die relative Dielektrizitätskonstante ε_r ist eine zusammengesetzte Funktion bestehend aus einem realen ε'_r und einem imaginären Teil ε''_r [Ulaby et al., 1981, S. 225]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r + \varepsilon''_r \quad (2.7)$$

Je nach elektrischer Leitfähigkeit der Materie kommt es zu einer unterschiedlich starken Reflexion. Allgemein variiert die Dielektrizitätskonstante im Mikrowellenbereich von etwa 3 bis 80. Böden können als ein Stoffgemisch, bestehend aus Bodenpartikel (Sand, Lehm, Ton), Luft und Wasser (frei und gebunden) definiert werden. Ihre elektrische Leitfähigkeit ist abhängig von der Bodenart, Frequenz, Temperatur, Wassergehalt und Salzgehalt [Ulaby et al., 1986, S.2091]. Im Frequenzbereich des L-Bandes liegt die Dielektrizitätskonstante für trockene Böden zwischen 2 und 4 und steigt rapide mit Zunahme der Bodenfeuchte [Curlander & McDonough, 1991, S. 62f]. Abbildung 7 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante und Wassergehalt. Wasser ist einer der entscheidenden Parameter bei der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit. Dies hängt vor allem von den speziellen Eigenschaften der Wassermole ab, der asymmetrischen Ausrichtung der elektrischen Ladung. Wasserdipole orientieren sich in Richtung des äußeren elektrischen Feldes und bewirken eine dipolare Polarisation oder Orientierungspolarisation. Dagegen wirkt nur die thermische Bewegung. Die Abhängigkeit der Orientierungspolarisation wird in der Debye Gleichung beschrieben [Wikipedia, 2016]. Neben der Wechselwirkung mit der Temperatur, wird die Dielektrizitätskonstante von Wasser durch die Frequenz und dem Salzgehalt beeinflusst [Ulaby et al., 1986, S.2020]. Generell gilt je höher die Dielektrizitätskonstante, desto stärker ist die Rückstrahlung. Mit ansteigender Leitfähigkeit (Bodenfeuchte) nimmt jedoch auch die Eindringtiefe der Mikrowellen ab [Curlander & McDonough, 1991, S. 62]. Ist der Boden gefroren, können die Wassermoleküle nicht mehr frei rotieren und die Rückstrahlung nimmt ab [Woodhouse, 2006, S. 141]. Metallische Strukturen, wie Zäune oder Hochspannungsmasten, rufen auch eine hohe Rückstrahlung hervor [Albertz, 2009, S.61].

Insbesondere in Siedlungsbereichen kommt es aufgrund der Konzentration von Materialien mit hohen Dielektrizitätskonstanten zu Überstrahlungseffekten im Radarbild.

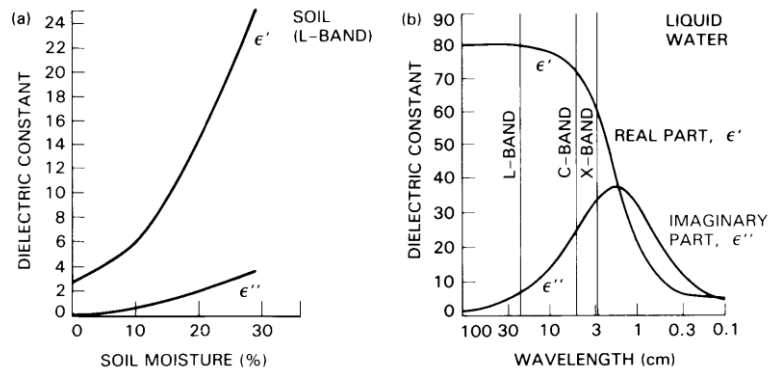


Abb.7 Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante und Bodenfeuchte (l.) sowie der Wellenlänge (r.) [Curlander & McDonough, 1991, S. 63].

Die Streuung einer Welle wird aber auch entscheidend durch die Rauigkeit einer Geländefläche beeinflusst, dabei spielen die Texturmerkmale der Oberfläche eine entscheidende Rolle. Bei glatten Oberflächen kommt es zu einer gerichteten Reflexion, beziehungsweise zu einer spiegelnden Wirkung (Einfallswinkel = Ausfallwinkel). Im Gegensatz dazu kommt es bei rauen Oberflächen zu einer diffusen Rückstrahlung.

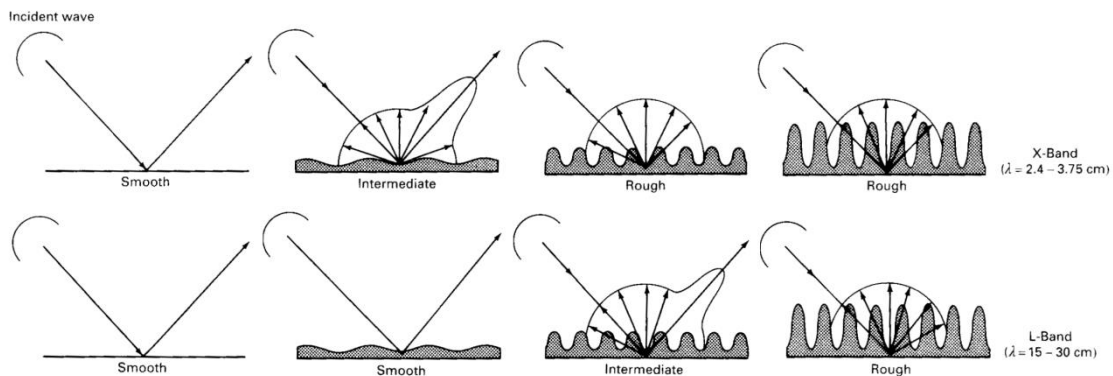


Abb.8 Oberflächenstreuung und Rauigkeit [Lillesand et al., 2015, S.421]

Oberflächenrauigkeit wird gewöhnlicherweise mit der RMS (Root-Mean-Square) Höhe und der Korrelationslänge beschrieben. Die RMS Höhe ist definiert als Standardabweichung eines unregelmäßigen Bodens von einer mittleren Referenzfläche. Mit der Korrelationslänge können Aussagen getroffen werden, wie stark sich die Bodenhöhen ändern.

Für die Quantifizierung der Oberflächenrauigkeit ist auch die verwendete Wellenlänge ausschlaggebend. So kann im X-Band ein Boden rau wirken hingegen im L-Band glatt, siehe Abbildung 8. Um zwischen rauer und glatter Oberfläche entscheiden zu können, kann das Rayleigh Kriterium verwendet werden. Es besagt, dass ein Boden als rau und diffuser Reflektor bezeichnet werden kann, wenn die RMS Höhe h ein Achtel der Wellenlänge dividiert durch den Kosinus des Einfallswinkel überschreitet:

$$h_{rau} > \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (2.8)$$

Das Rayleigh Kriterium ist hilfreich für eine erste Klassifizierung, jedoch für die Modellierung des Mikrowellenstreuungsverhaltens an natürlichen Flächen, ist ein strikteres Kriterium nötig. Im Mikrowellenbereich wird aus diesem Grund das Fraunhofer Kriterium verwendet. Hierbei muss die Phasendifferenz $\Delta\phi$ größer sein als $\pi/8$ [Woodhouse, 2006, S. 125]:

$$h_{rau} > \frac{\lambda}{32 \cos \theta} \quad (2.9)$$

Der Rückstrahlungskoeffizient wird demnach von der Dielektrizitätskonstante und der Oberflächenrauigkeit beeinflusst. Glatte Oberflächen mit einer hohen Dielektrizitätskonstante rufen eine spiegelnde Wirkung hervor, sodass weniger Energie empfangen wird. Aus diesem Grund erscheinen Wasserflächen in Radarbildern schwarz. Bei rauen Oberflächen mit hoher Leitfähigkeit kommt es hingegen zu einem stärkeren Rückstrahlvermögen.

In der Natur gibt es neben der Streuung an stetigen Oberflächen auch Volumenstreuung. Unter Volumenstreuung wird die diffuse Streuung der ausgesendeten Mikrowellen an Elementen innerhalb einer inhomogenen Materie mit hoher Eindringtiefe verstanden. Die Unterscheidung ist abhängig von der relativen Größe der Wellenlänge und den einzelnen Volumenstreuern. Eine Volumenstreuung kann bei Schnee, Eis, trockenen Böden und Vegetation unter bestimmten Bedingungen beobachtet werden. Die Intensität des Rückstreusignals ist abhängig von den dielektrischen und geometrischen (Größe, Verteilung) Eigenschaften des Mediums [Woodhouse, 2006, S. 112f]. Mehrfachreflexionen im Bestand können zu einer Dämpfung der Energie führen.

Die Rückstrahlcharakteristik in einem Pflanzenbestand ist sehr komplex (siehe Abb.9), es können mehrere Arten der Rückstrahlung auftreten. Zum einen die direkte Reflexion an der oberen Vegetationsschicht sowie des Bodens und zum anderen die Mehrfachstreuung der Radarsignale an Stielen, Blättern und Boden [Ulaby et al. 1986, S.1852]. In Abhängigkeit von ihren Eigenschaften, können Mikrowellen zu einem gewissen Grad in eine Vegetationsschicht gelangen. Je größer die Wellenlänge, desto tiefer können sie eindringen.

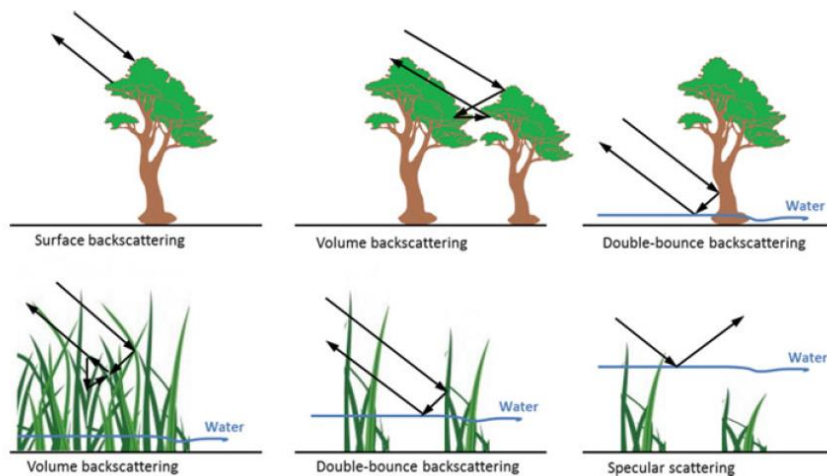


Abb.9 Interaktion von Mikrowellen in tropischen Feuchtgebieten [Kuenzer et al., 2015 nach Wang 2010]

Ein weiterer Rückstrahleffekt entsteht durch zweimalige Spiegelung an einer zum Aufnahmesystem hin orientierten Vertikalen. Durch diese Doppelstreuung werden die elektromagnetischen Strahlen direkt zum Sensor zurück reflektiert. Diese Doppel-Bounce Effekte bewirken eine Überstrahlung im Radarbild. Im Fall von Wasser unter der Vegetation, kommt es zu einer Streuung an der Wasseroberfläche sowie an Stängel und Geäst der Pflanzen. Überflutete Vegetationsflächen können somit durch hohe Radarrückstrahlungswerte identifiziert werden [Chapman et al, 2015].

2.4 Radar Altimeter

Altimeter gehören zu den nicht-abbildenden Radarsystemen. Sie können zur Bestimmung der Oberflächentopographie über Land, Meer und Eis genutzt werden. Ein Hauptanwendungsgebiet liegt in der Ozeanographie um Gezeiten, Strömungen und Wellenhöhe genau zu bestimmen. Neben der Ableitung von Wasserhöhen ermöglichen die vom Satellit empfangenen Rückstrahlinformationen eine Klassifizierung von verschiedenen Oberflächeneigenschaften [Papa et al., 2003].

Das Grundprinzip basiert auf der Messung der Signallaufzeit, wie in der Gleichung (2.1) beschrieben. Die Antenne sendet Mikrowellenimpulse in Nadir Richtung zur Erdoberfläche und misst die Laufzeit des zurückkommenden Echos, daraus kann der genaue Abstand zwischen Plattform und Oberfläche berechnet werden. Sogar aus Satellitenhöhen von 800km können hohe Genauigkeiten mit Abweichungen von nur wenigen Zentimeter erreicht werden [Woodhouse, 2006, S.231]. Mikrowellenaltimeter haben einen Footprint von etwa 5km bis 10km, mit dem sie den Erdboden abtasten.

Die Form des zurückkommenden Signals wird als Waveform bezeichnet und setzt sich aus tausenden individuellen Echos von Streuungspunkten innerhalb des Footprints zusammen. Charakteristische Waveforms haben eine steil steigende Vorderkante (leading edge) gefolgt von einer allmählich abfallenden hinteren Flanke. Bei komplexeren Oberflächen mit rauer Textur ist das Echoprofil schwieriger zu interpretieren. Der vordere Teil ist weniger steil, die Spitze nicht eindeutig und die hintere Flanke insgesamt verrauschter [Lillesand et al. 2015, S.464f]. In Abbildung 10 wird das Aufnahmeprinzip schematisch dargestellt. Da die Laufzeitdifferenz der Schlüsselparameter ist, kann angenommen werden, dass die „leading edge“ eines gemessenen Echos über dem Ozean immer von der Position direkt unter dem Instrument kommt, dem Nadirpunkt. Waveforms von Inlandgewässern haben hingegen häufig mehrere Peaks. Die Echoform entsteht aus der Kombination von drei Faktoren. Dazu zählen die Form des originalen Pulses, die Streuungseigenschaften innerhalb des Footprints und die lokalen Höhenvariationen.

Im Gegensatz zu Altimetermessungen über dem offenen Ozean, können Radar Echos über andern Oberflächen, abhängig von den Reflektoren innerhalb des Footprints, unterschiedliche Formen annehmen. Eine sorgfältige Dateneditierung und Verarbeitung ist nötig um zuverlässige und genaue Range Messungen von den empfangenen Waveforms zu erhalten. Dieser Prozess wird als „retracking“ bezeichnet [Dettmering, et al., under review].

Es gibt zwei verschiedenen Arten von Altimeter, pulse-limited und beam-limited. Bei pulse-limited Altimeter ist der bestimmende Faktor für die Größe des messenden Footprints die Länge des Pulses und die entsprechende Bodenfläche, welche der Puls zu einer bestimmten Zeit beleuchtet. Folglich kann der Radarpuls nicht den ganzen Footprintstrahl zur selben Zeit beleuchten, beam-limited Altimeter jedoch schon. Die Größe der entsprechenden Ausleuchtungszone ist demnach definiert nach der Pulslänge (pulse-limited) oder der Strahlbreite (beam-limited). Bei den meisten Satellitenaltimeter handelt es sich, aufgrund der technischen Einschränkung der Antennenlänge um pulse-limited Altimeter (Woodhouse, 2006, S. 235ff).

Viele Anwendungen verlangen eine Zentimetergenauigkeit in der vertikalen Dimension. Um dies sicherstellen zu können, muss die Pulslänge sehr klein sein, d.h. im Bereich von Nanosekunden. Dies setzt wiederum eine hohe Energie des gesendeten Signals voraus, welche nur schwer realisierbar ist. Altimeter umgehen das Problem durch die Nutzung hochentwickelter Signalprozessierungsmethoden, wie Pulskompression, die das Modulieren der Signale umfasst („Chirp Radar“) [Lillesand et al, 2015, S. 464].

Seit den frühen 1990er arbeiten Radar Altimeter von einer Anzahl von Plattformen, dazu gehören die europäischen Satelliten ERS-1 (1991-2000), ERS-2 (1995-2011), ENVISAT (2002-2012) und Cryosat-2 (seit 2010) sowie die Kooperationsmissionen von NASA und CNES, Topex/Poseidon (1992-2006) und die Nachfolger Jason-1 (2001-2013) und OSTM/Jason-2 (seit 2008) [Lillesand et al, 2015, S. 465f].

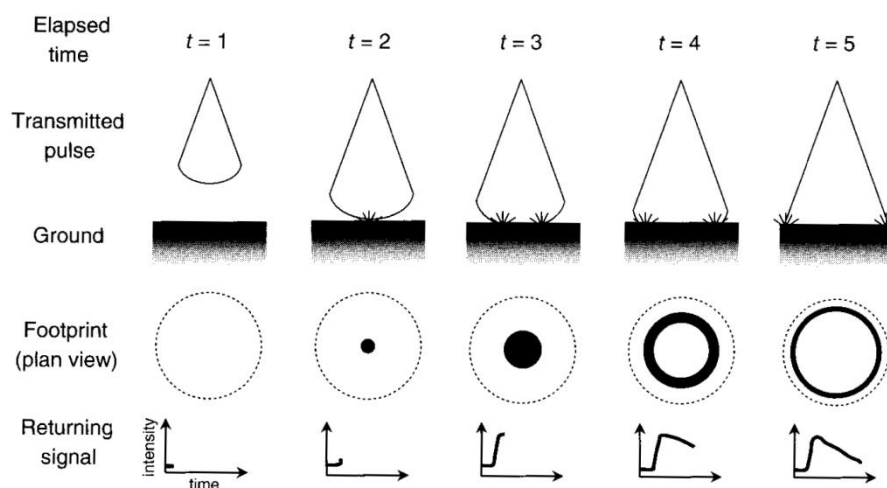


Abb.10 Schematische Darstellung der Altimeter Aufnahme [Lillesand et al, 2015, S.465]

3 Testgebiet Pantanal

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über das Testgebiet. Genaue Kenntnisse über die komplexe Hydrologie und Struktur des Pantanals sind wichtiger Bestandteil für die weitere Analyse, Interpretation und das Verständnis für die Veränderungen im Feuchtgebiet.

Das Pantanal ist eines der größten tropischen Binnenland-Feuchtgebiete. Es ist weltweit für seine ökologische Bedeutung bekannt und gilt als eines der wichtigsten Frischwassersysteme der Erde [Alho, 2005, S.203]. Im Jahr 2000 wurde das Gebiet als Biosphären Reservat und Weltnaturerbe von der UNESCO ausgezeichnet [UNESCO, 2016]. Zusätzlich ist es von der Ramsar Konvention als Feuchtgebiet mit großer internationaler Bedeutung anerkannt [RAMSAR, 2016]. Es zeichnet sich durch eine reiche und vielfältige Flora und Fauna aus, die einzigartig auf dem amerikanischen Kontinent sind. Obwohl es sich noch um ein ziemlich unberührtes Feuchtgebiet handelt, wird es zunehmend von Entwicklungen in der Landwirtschaft und der Bergbauindustrie, speziell auf den umliegenden Plateaus außerhalb des Pantanals, bedroht [Penatti et al., 2015]

3.1 Geographische Lage

Das Testgebiet befindet sich im Zentrum von Südamerika, im Westen des brasilianischen Upper Paraguay River Basin (UPRB) zwischen 15°30'-22°30' S und 54°45'-58°30' W. [Alho, 2005, S.204] Das UPRB (496.000 km²) lässt sich in unterschiedliche Regionen unterteilen - das Überschwemmungsgebiet genannt Pantanal, die Plateaus, das umliegende nicht überflutete Hochland und die Tiefebene Chaco, westlich der brasilianischen Grenze (Abb. 11). Die drei Gebiete unterscheiden sich sehr in ihren hydrologischen und geomorphologischen Eigenschaften. Während die Plateaus im Norden und Osten Höhen von 200m bis 1400m erreichen, liegt das Pantanal nur zwischen 80m und 150m über dem Meeresspiegel [Gonçalves et al., 2011]. Das gemittelte Gefälle des Hochlands beträgt etwa 30cm/km und im flachen Überflutungsgebiet 3-5 cm/km von Ost nach West und 1,5-3 cm/km von Nord nach Süd. [ANA, 2004].

Der größte Teil des Feuchtgebiets befindet sich in Brasilien in den Bundesstaaten Mato Grosso und Mato Grosso do Sul. Des Weiteren liegen kleinere Teile in Bolivien und Paraguay. Die genauen Grenzen sind nur schwer zu definieren, da das wasserbedeckte Gebiet starker saisonal bedingter Veränderungen ausgesetzt ist. Nach Hamilton (2002a) erstreckt sich das Pantanal über eine Fläche von etwa 140.000km². Auf Basis von Satellitenbeobachtungen ergeben sich dabei eine Nord-Süd-Ausdehnung von 450 km und eine West-Ost-Ausdehnung von rund 250 km. Im Anhang A befindet sich eine genaue Karte des Testgebiets. Der verwendete Umriss ist aus der Globalen Datenbank für Seen und Feuchtgebiete (GLWD) nach Lehner und Döll (2004) entnommen.

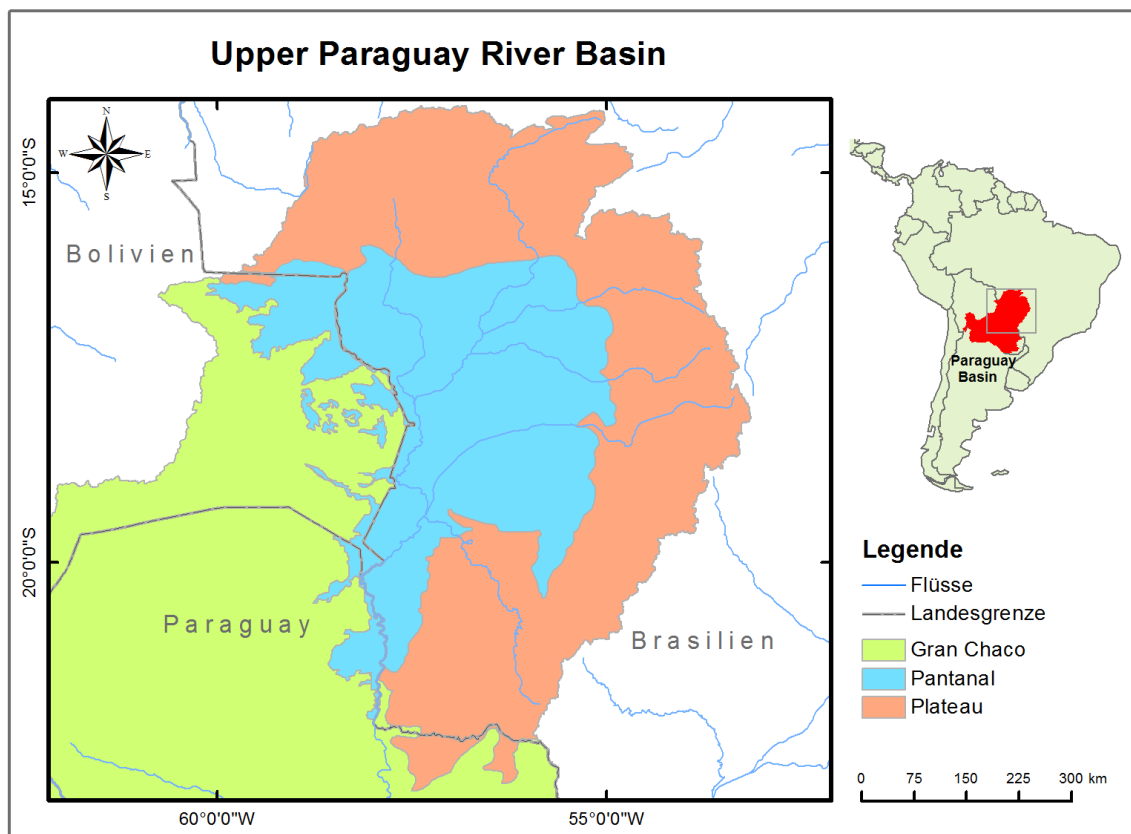


Abb.11 Lage des Pantanal Testgebiets, eigene Darstellung, verändert nach [2, 3, 7]

Um die Hydrologie verstehen zu können, ist es wichtig zwischen Pantanal und dem Hochland in geographischer, ökologischer und ökonomischer Hinsicht zu unterscheiden [Alho, 2005, S.204f]. Hamilton et al. (1996) unterteilt das Pantanal nach hydrologischen und geomorphologischen Eigenschaften in zehn Subregionen.

3.2 Klima

Das Klima im Pantanal ist tropisch, semi-humid bis humid. Durch die Lage, etwa 2000 km südlich des Äquators, ist das Feuchtgebiet jedes Jahr einer saisonalen Veränderung von trockenen und feuchten Zeiten ausgesetzt [Evans et al., 2010]. Die genaue Abgrenzung der Jahreszeiten ist nur schwer festzulegen, da sie jährlich variieren können. In der Literatur findet man daher auch unterschiedliche Zeitangaben. Gonçalves et al. (2011) definieren die Regenzeit von Oktober bis April und die trockenen Monate von Mai bis September. Hingegeben bestimmen Hamilton et al. (1996) die Phase der Niederschläge zwischen November und März. Der jährlich gemittelte Niederschlag im Becken beträgt 1396 mm, wobei die stärksten Regenfälle in den Plateaus auftreten (siehe Anhang B). Die jährliche gemittelte Verdunstung beträgt 1239 mm mit dem Höhepunkt im August.

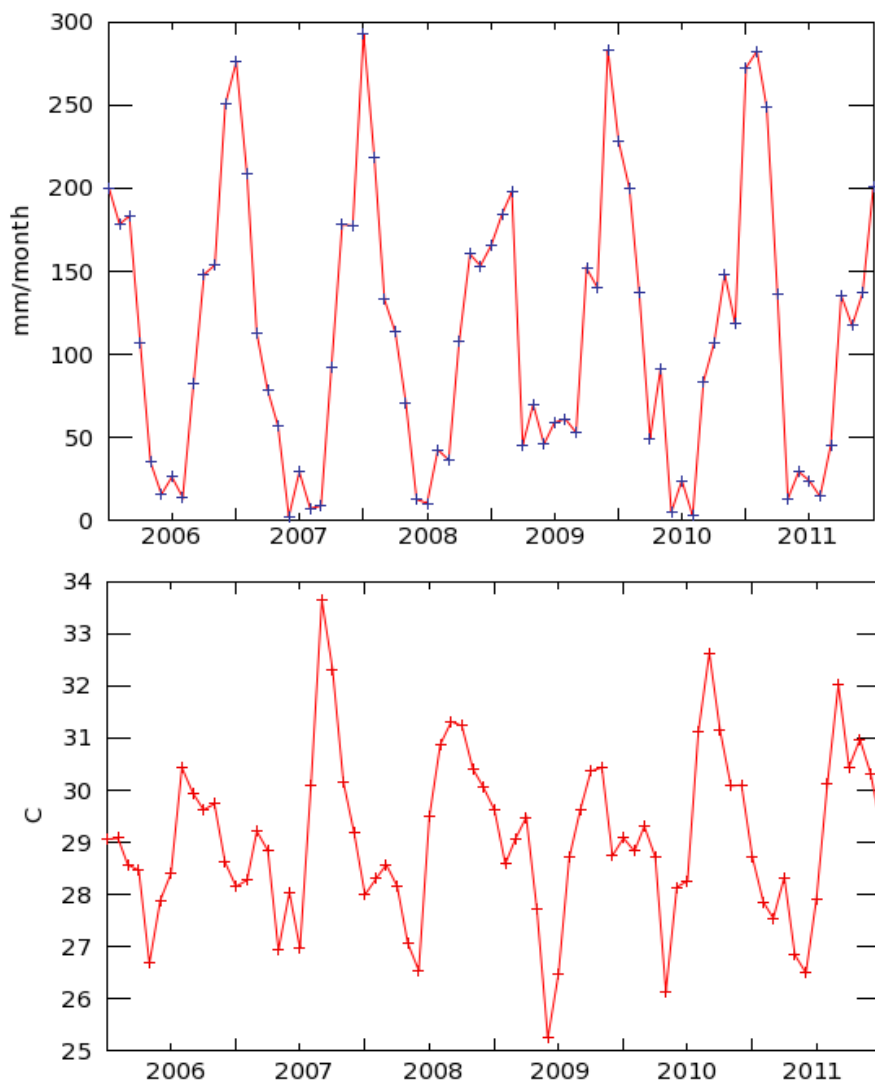


Abb.12 Über das Pantanal gemittelte monatliche Niederschläge von TRMM, 0,25° Auflösung (o.) und Temperaturen am Boden von AIRS, 1° Auflösung (u.) im Zeitraum 2006-2011, verändert nach [4]

Die gemittelten jährlichen Temperaturen variieren von +21°C (Juli) bis +27°C (November). In den Monaten August bis November werden die höchsten Temperaturen von bis zu 40°C gemessen. Zwischen April und August können an einigen Tagen, verursacht durch passierende polare Kaltfronten, die Tiefstwerte bis unter 10°C fallen [Alho, 2005, S.215; Gonçalves et al., 2011].

In Abbildung 12 sind die monatlichen TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) Niederschläge und Temperaturen von AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) im Untersuchungszeitraum von 2006 bis 2011 dargestellt. Man kann deutlich erkennen, dass die höchsten Niederschlagsmengen von Dezember bis Februar auftreten. In den Jahren 2007, 2008, 2010 und 2011 wurden Spitzenwerte von fast 300mm im Monat gemessen. 2009 kam es zu einer Verzögerung der Niederschläge und der höchste Wert wurde erst im März erreicht. Des Weiteren war die Gesamtniederschlagsmenge im Vergleich zu den anderen Jahren geringer.

Die Analysen von Soil Moisture Daten (ASCAT, AMSR-E und WGHM (WaterGAP Global Hydrology Model)), monatlichen Anomalien TWS von GRACE, GPCC Niederschläge und Informationen aus der International Disaster Database (EM-DAT) im La Plata Basin (Südamerika) zeigen eine Dürreperiode im Jahr 2009. Zwischen Dezember 2008 und Januar 2009 wurde der niedrigste Bodenfeuchtwert erreicht. Auch ein lokales Minimum im Mai 2009 lässt auf eine mehrmonatige Trockenphase schließen [Abelen et al., 2015]. Nach Abelen et al. (2015) sind viele Soil Moisture Anomalien verbunden mit El Niño und La Niña Ereignissen. 2009/2010 wurde eine El Niño Flut registriert (siehe Abb.13).

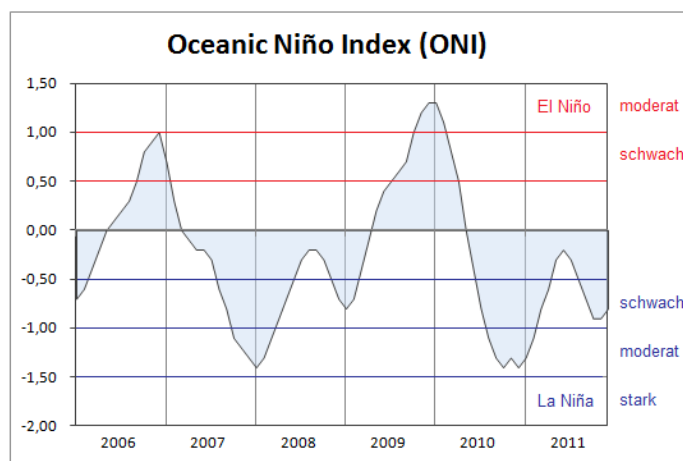


Abb.13 Gemittelter 3-Monats ONI, eigene Darstellung nach [5], [6]

3.3 Hydrologie

Das Pantanal ist ein Überschwemmungsgebiet, das in einem Sedimentbecken mit Schwemmfächern aus mehreren Zuflüssen liegt [Hamilton et al., 2002]. Zu den wichtigsten Flüssen, neben dem von Nord nach Süd verlaufenden Paraguay, gehören unter anderen: Jauru, Cabaçal, Sepotuba, Bento, Gomes, Cuiabá, São Lourenço, Correntes, Itiquira, Piquiri, Taquari, Negro, Miranda, Aquidauana, Nabileque und Apa [ANA, 2004].

Generell fließt das Wasser aus den Plateaus von Osten nach Westen herab. Dabei agiert das Pantanal, aufgrund des geringen Gefälles und der dichten Vegetation als großes Staureservoir. Dadurch fließt das Wasser nur sehr langsam ($2\text{-}10\text{ cm s}^{-1}$) und der Wassertransport wird um bis zu 5 Monate verzögert. Über den Paraguay erfolgt anschließend die Entwässerung in Richtung Süden [Hamilton, 2002a; Penatti et al., 2015].

Die Fließwege durch die Überschwemmungsfläche sind oft angedeutet durch schwach definierte Flussläufe (*corixos* oder *córregos*). Bei höheren Wasserständen fließt das Wasser auch außerhalb der Flussbette. Diese weniger geformten Wasserwege heißen *vazantes*. Sie sind gewöhnlich mit auftauchenden Pflanzen bedeckt und trocknen zeitweise komplett aus [Hamilton, 2002a].

Die Bedingungen im Pantanal ändern sich fortwährend im Laufe eines Jahres. Nach Heckman (1994) können vier Saisonzeiten, entsprechend des Wasserstandes im Pantanal unterschieden werden, die wie folgt definiert sind:

1. *Enchente* (porto. „Flut“)

In der ersten Hälfte der Regenzeit, von Dezember bis Februar ist die Zeit der schnell steigende Wasserstände. Es besteht eine gewisse Zeitverzögerung zwischen dem Auftreten der schweren Regenfälle und der Überflutung, die sich dadurch begründet, dass das Regenwasser Zeit benötigt, um von den Plateaus herabzufließen.

2. *Cheia* (porto. „Hochwasser“)

Nach drei bis vier Monaten Regen, im Allgemeinen von März bis Mai, ist der größte Teil des Pantanals bis zu einer Tiefe von 0,5-2m überflutet. Tägliche Niederschlagsmengen führen zu einem hohen Wasserstand. Nur höher gelegene Stellen bleiben hochwasserfrei.

3. *Vazante* (porto. „Ebbe“)

Am Ende der Regenzeit hat der Wasserstand seinen Höhepunkt erreicht. Der Übergang zur Trockenzeit ist begleitet von einem Anstieg der direkten Sonneneinstrahlung aufgrund der abnehmenden Wolkendecke und der relativen Luftfeuchtigkeit. Verdunstung hat nur einen geringen Einfluss auf die rasche Veränderung des Wasserstandes. Durch den Ablauf des Paraguay kommt es zu einem allmählichen stetigen Rückgang des Wasserstandes im Überschwemmungsgebiet von Juni bis August.

4. *Seca* (porto. „Trockenzeit“)

Die Trockenperiode tritt im Allgemeinen von September bis November auf, in höher gelegenen Gebieten teilweise schon früher. Einige Wasserstellen der Ebene trockenen hingegen überhaupt nicht aus.

Zum Ende der Trockenzeit beginnen erste heftige Niederschläge und es kommt zum Übergang zur Regenphase.

Überschwemmungen treten im Pantanal deutlich saisonal auf. Viele Gebiete sind überflutet durch über die Ufer gehende Flüsse, während andere durch lokale Regenfälle entstehen [Hamilton, 2002a]. Im Norden und Osten tritt die maximale Überflutung im frühen Februar auf, im Süden hingegen erst im späten Juni, etwa 4 bis 5 Monate nach den Höchstniederschlägen, aufgrund des verzögerten Abflusses. Eine zeitliche Verschiebung von 1-2 Monaten ist typischerweise zwischen Höchststand des Flussablaufs und der umliegenden Überschwemmungsgebiete [Hamilton et al., 1996].

In den meisten Regionen ist die Flut unimodal. Nur im südlichen Pantanal können mehr Unregelmäßigkeiten auftreten, hauptsächlich beeinflusst durch die Flüsse Miranda und Aquidauana. Überflutete Gebiete entlang des Paraguay zeigen meist regelmäßige Überflutungsstrukturen [Hamilton et al., 1996].

Mehrjährige Serien von starken und schwächeren Niederschlägen haben einen starken Effekt auf die Flutgebiete in der Region [Hamilton et al., 1996]. Eine vergleichende Studie von Überschwemmungsmustern zeigt, dass die zwischenjährlichen Variationen im Pantanal größer sind, als in fünf anderen großen Flutgebieten in Südamerika [Hamilton et al., 2002].

Der Wasserstand des Paraguay schwankt saisonal zwischen 2m und 5m. In den meisten anderen Teilen des Pantanals ist die Variation jedoch geringer [Hamilton, 2002b]. Abbildung 14 zeigt den durchschnittlichen monatlichen Abfluss des Paraguay an drei ausgewählten Station, im Norden Cáceras, auf mittlerer Höhe *Porto da Manga* und im Süden *Porto Murtinho*. Die Verlagerung des Fluthöhepunkts ist klar erkennbar sowie die

Zunahme der zugeflossenen Wassermassen Richtung Süden. Eine Analyse des regionalen Wasser Gleichgewichts zeigt, dass die hineinfließende Wassermenge, dem Abfluss aus dem Pantanal durch den Paraguay entspricht [Hamilton, 2002a].

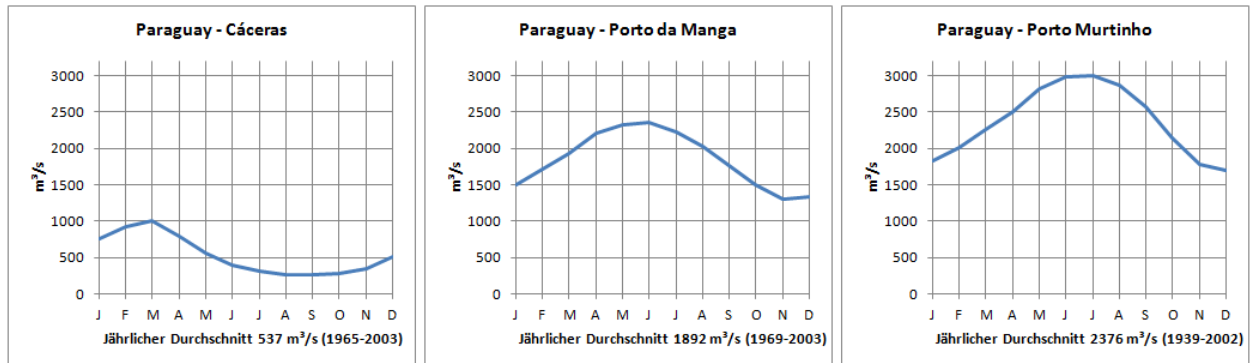


Abb.14 Gemittelter monatlicher Ablauf (m³/s) des Paraguay [eigene Darstellung nach ANA, 2004]

Verglichen mit anderen Überschwemmungsgebieten des Amazonas oder Orinoco machen die Seen nur einen kleinen Teil des Pantanals aus. Grundsätzlich können die Seen in drei Hauptgruppen eingeordnet werden: die permanenten großen Seen (port. lagoas oder baias), die kleineren Salzseen (port. salinas) und die stehenden natürlichen Dammseen des Überschwemmungsgebiets [Hamilton, 2002a].

Zu den großen Seen gehören der Uberaba, der Guaiba, der Mandioré, der Vermelha und der Cáceres. Sie sind hydrologisch mit dem Paraguay Fluss verbunden und haben eine offene Wasserfläche von $>100\text{km}^2$. Einige weitere größere Seen befinden sich nordöstlich des Pantanals, entlang des Cuiabá in der Nähe von Barão do Melgaço. Neben diesen Seen, befinden sich mehrere tausend kleine Seen und Teiche ($<1\text{km}^2$) in Nhecolandia, im südwestlichen Teil der Taquari Schwemmfächer. Sie entstehen durch lokale Regenfälle und haben keine Oberflächenwasserverbindung. Bei Hochwasser können sich einige jedoch zu Ablaufkanälen verbinden. Gewöhnlich bedecken Gefäßpflanzen die Wasseroberfläche dieser Seen. Die kleinen Seiten-Damm Seen sind am häufigsten entlang des Paraguay und umfassen langgestreckte, gekrümmte Altlaufsee sowie mehrere kreisförmige Vertiefungen [Hamilton, 2002a].

3.4 Landbedeckung und Vegetation

Vom geobotanischen Standpunkt aus präsentiert das Pantanal eine Auswahl verschiedener Landschaften. Es zeigt Einflüsse der Pflanzenwelt des Atlantischen Regenwalds im Osten, des Amazonas-Regenwalds im Norden und des Chaco (Trockenwälder und Dornbuschsavannen) im Westen [ANA, 2004]. Die Vegetation des Überschwemmungsgebiets bietet eine Vielfalt von Wasserpflanzen, periodisch gefluteten Grasland, Savannen und Wälder, siehe Tabelle 2 [Pott et al., 2010]. Vorherrschend ist jedoch die Savannen Landschaft („*cerrado*“), ein Mix aus krautigen Pflanzen, Sträuchern, Bäumen und Buschwald. Bewaldete Gebiete lassen sich weiter unterscheiden in Galeriewälder und Savannenwälder, mit Baumhöhen zwischen 3-9m. Galeriewälder tauchen typischerweise an den Ufern der großen Flüsse auf. Nur einige dichtere und höher gelegene Savannenwälder („*cordilheiras*“ und „*capões*“) sind nicht von saisonalen Überschwemmungen betroffen. Zudem werden auch Flächen für die Landwirtschaft genutzt.

Klasse	Fläche km ²	Anteil %
Wald	10.168	7
Galeriewald	10.032	7
Offener Savannenwald	53.790	39
Offener Savannenwald- geflutet	11.959	9
Offene Grassavanne	8.542	6
Sumpfiges Grasland	19.493	14
Sumpfige gemischte Savanne	8.969	7
Landwirtschaftliche Flächen	7.967	6
Vazantes	2.101	2
Wasser	4703	3
Gesamt	137.823	100

Tab.2 Landbedeckung des Pantanal Feuchtgebiets [nach Evans, 2014]

Pott (2011) beschreibt die wichtigsten Vegetationstypen im Pantanal und ihre charakteristischen Arten. Die Flora im brasilianischen Pantanal umfasst 2000 Arten von Blütenpflanzen, 200 Gräsern sowie rund 1000 krautigen Pflanzenarten, die aufgrund ihrer Anpassung an die überflutbaren Bereiche, größtenteils amphibische Lebensräume und Grasland bevölkern. [Pott et al., 2011].

Während der Regenzeit verbinden sich terrestrische und aquatische Lebensräume zu einem Mix aus *cerrado* und Wasserpflanzen [Evans et al., 2010]. Insgesamt gibt es etwa 280 Arten von Wasserpflanzen im Feuchtgebiet [Pott & Pott et al., 2010]. Aquatische oder halb-aquatische vaskuläre Pflanzen (Makrophyten) tauchen fast überall da auf, wo das Wasser länger als ein paar Wochen steht. Schwimmende und verwurzelte-auftauchende Formen sind am häufigsten [Hamilton, 2002a].



Abb.15 Über das Pantanal gemittelter monatlicher Normalized Differenced Vegetation Index von MODIS (Auflösung 5600m) im Zeitraum von 2006-2011, verändert nach [4]

Abbildung 15 zeigt den periodischen Verlauf der Pflanzenvitalität über den gesamten Untersuchungszeitraum. In der Regenzeit ist die Vegetation photosynthetisch stark aktiv, während in den heißen Monaten auch die Pflanzen austrocknen (siehe auch Anhang C).

4 Datenmaterial und Vorprozessierung

Im nächsten Kapitel werden die verwendeten Daten sowie die einzelnen Schritte der Vorprozessierung erläutert. Eine vorab durchgeführte Datenrecherche ergab, dass das Testgebiet am besten durch ALOS PALSAR abgedeckt wird. Neben den SAR Daten werden zusätzlich optische Bilder von Landsat und Altimetermessungen von ENVISAT RA-2 verwendet.

4.1 SAR-Datenrecherche

Eine der herausforderndsten Aufgaben in der Fernerkundung ist die Datenrecherche. Daten sind die Basis jeder wissenschaftlichen Forschung und müssen bestimmte studienspezifische Anforderungen erfüllen. Nicht jede Art von Daten ist zur Lösung einer Forschungsfrage geeignet. Satellitendaten dienen als sehr gute Datengrundlage. Ihr Vorteil ist die räumliche Abdeckung, die relativ kostengünstige Beschaffung und ihr regelmäßiger Aufnahmezyklus [Ozesmi & Bauer, 2002]. Hingegen handelt es sich bei In-situ Messungen an Flüssen um eine eindimensionale punktbasierte Ansicht der Wasseroberfläche. Die Netzwerkdichte der Pegelmessungen ist besonders in nicht industrialisierten Staaten zudem sehr spärlich [Alsdorf et al., 2007]. Kennzeichnende Eigenschaften von Satellitendaten sind die Art des Sensors (aktives oder passives Verfahren), Wellenlänge, zeitliche und räumliche Auflösung, Abdeckung und Verfügbarkeit. Wie bereits in früheren Kapiteln angemerkt, haben optische Daten den Nachteil einer teilweise starken Wolkenbedeckung im Bild. Radarsysteme können jedoch bei jeder Wetter- und Tageszeit aufnehmen. Insbesondere im Pantanal, das etwa ein halbes Jahr von Niederschlägen beeinflusst wird, liefern optische Verfahren keine verwendbaren Informationen. Aus diesem Grund bezieht sich diese Studie hauptsächlich auf die Zeitanalyse von SAR-Daten. Zu Beginn der Arbeit wurde eine ausführliche Bestandsaufnahme von möglichen SAR Satelliten ab 1990 durchgeführt. Einige Missionen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Da für die Durchführung der Arbeit, das Pantanal als Testgebiet fest steht, muss die Verfügbarkeit von SAR-Daten überprüft werden. Ziel ist es eine Reihe von Bildern zu bekommen um saisonale Variationen im Feuchtgebiet zu untersuchen. Für die Suche können Datenkataloge im Internet verwendet werden, wie Eolisa (ESA), EarthExplorer (USGS), Sentinels Scientific Hub (ESA) und Vertex vom Alaska Satellite Facility Service. Neben älteren Missionen wie JERS-1, ERS-1/2, RADARSAT-1, ENVISAT und ALOS-1 werden auch Daten zur aktuellen Mission SENTINEL-1 überprüft.

Satellit	Land	Zeitraum	Band	Auflösung	Wiederholung
ERS-1	Europa (ESA)	1991-2000	C	30m	35 Tage
JERS-1	Japan (JAXA)	1992-1998	L	18m	44 Tage
ERS-2	Europa (ESA)	1995-2011	C	30m	35 Tage
Radarsat-1	Kanada (CSA)	1995-2013	C	8-100m	24 Tage
Envisat	Europa (ESA)	2002-2012	C	30-1000m	35 Tage
ALOS-1	Japan (JAXA)	2006-2011	L	10-100m	46 Tage
TerraSAR-X	Deutschland (DLR)	2007-	X	1-18m	11 Tage
Cosmo-Skymed	Italien (ASI)	2007-	X	1-100m	16 Tage
Radarsat-2	Kanada (CSA)	2007-	C	1-100m	24 Tage
TanDEM-X	Deutschland (DLR)	2010-	X	1-18m	11 Tage
Sentinel-1A	Europa (ESA)	2014-	C	5-40m	12 Tage

Tab.3 Übersicht verschiedener SAR Missionen [ESA, 2016; Lillesand et al., 2015, S. 462f]

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Datenrecherche. Alle aufgelisteten Satellitendaten sind frei verfügbar und können kostenlos heruntergeladen werden. Größtenteils ist nur eine Registrierung nötig.

Leider ist das Pantanal insgesamt nur sehr schlecht abgedeckt. Da eine Zeitreihe gerechnet werden soll, ist es wichtig, dass das gesamte Testgebiet in etwa regelmäßigen Abständen abgedeckt ist. Die meisten Satelliten nehmen aber nur stichprobenartig auf, sodass keine Zeitreihenanalyse möglich ist.

Sensor	Mode	Auflösung	Anzahl der Aufnahmen	Quelle
ALOS PALSAR	WB	100m	637	ASF Vertex
	FBS/D	10-20m	2118	
	PLR	10-30m	505	
JERS-1 SAR	Standard	18m	256	ASF Vertex
Radarsat-1	Standard ScanSAR	30m 50-100m	146 42	ASF Vertex
Sentinel-1A (bis 11.7.2015)	IW	40m	130	Sentinel-1 Hub
Envisat ASAR	WS	150m	8	TU Wien
	AP	150m	17	
ERS-1/2	-	-	0	ASF Vertex

Tab.4 Ergebnisse der Datenrecherche

Obwohl ENVISAT sowohl ein SAR-Instrument (ASAR) als auch ein Altimeter (RA-2) an Bord hat, ist aufgrund der Aufnahmegeometrie (Seitensicht vs. Nadir-Richtung) eine gleichzeitige Aufnahme beider Sensoren über demselben Gebiet nicht möglich [Medina et al., 2009]. Deshalb entsteht auch kein Vorteil durch die Verwendung von ASAR Bildern. Die Datenrecherche hat gezeigt, dass ALOS PALSAR die beste Abdeckung bietet. Aus diesem Grund werden auch in der weiteren Arbeit ALOS ScanSAR Daten verwendet.

4.2 Aufnahmesystem ALOS PALSAR

ALOS (Advanced Land Observing Satellite) oder auch „DAICHI“ genannt, ist ein inaktiver Erdbeobachtungssatellit der japanischen Raumfahrtbehörde JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) und Nachfolger von JERS-1 (Japanese Earth Resource Satellite-1) und ADIOS (Advanced Earth Observing Satellite). Die Hauptziele der Mission sind Kartographie, regionale Beobachtungen, Katastrophenüberwachung und Ressourcen Vermessung durch globale Aufnahmen hochauflösender Landbeobachtungsdaten [JAXA, 2008].

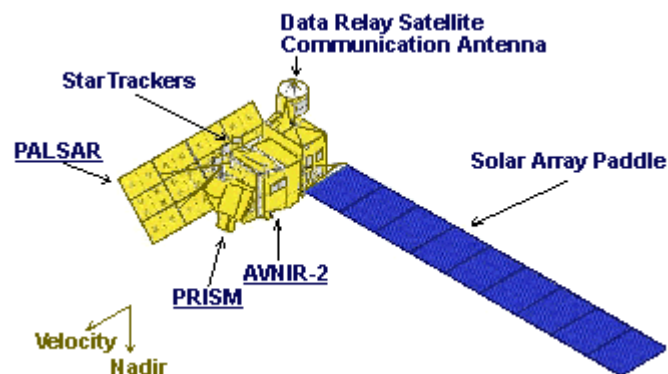


Abb.16 ALOS Satellit [EORC & JAXA 2016]

Der Satellit ist mit zwei optischen Fernerkundungsinstrumenten und einem Radarsystem ausgestattet (siehe Abb.16): PRISM (Panchromatic Remote Sensing Instrument) für präzise Messungen von Geländehöhen, AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer) zur Beobachtung der Landoberfläche und PALSAR (Phased Array type L-Band Synthetic Aperture Radar) ein aktiver Mikrowellensensor für Allwetter sowie Tag und Nacht Aufnahmen [JAXA, 2008]. Die wichtigsten Informationen über den Satelliten sind in Tabelle 5 gelistet.

Lebensdauer	24 Januar 2006 – 12 Mai 2011 (Ausfall)
Orbit	Sonnensynchron sub-recurrent
Höhe	691,65 km (über dem Äquator)
Inklination	98,16°
Orbitumlaufzeit	98,7 min
Wiederholung Zyklus	46 Tage
On-Board Datenspeicher	90 Gbytes

Tab.5 Eigenschaften von ALOS [JAXA, 2008, 2016]

PALSAR

PALSAR ist ein L-Band-Radar (23,6 cm) mit synthetischer Apertur (SAR) [JAXA, 2008]. Entwickelt wurde der Sensor in einem Gemeinschaftsprojekt von JAXA und der Japan Resources Observation System Organisation (JAROS). [EORC & JAXA 2016]. Der Off-Nadir Winkel kann sich im Bereich von 9,7° bis 50,8° verändern. Bei einem Winkel von 41,5° können aber Gebiete jenseits 87,8° nördlicher Breite und 75,9° südlicher Breite nicht beobachtet werden [ASF, 2016].

Das Beobachtungskonzept von PALSAR ist in Abbildung 17 dargestellt. Zur Datenaufnahme stehen fünf unterschiedliche Modi zur Verfügung. Neben dem herkömmlichen hochauflösenden Aufnahmemodus für kleinräumigere Aufnahmen, gibt es auch einen ScanSAR Betrieb für großflächige Aufnahmen mit Streifenbreiten von 250 bis 350km (abhängig von der Anzahl der Scans), jedoch mit geringerer räumlicher Auflösung [EORC & JAXA 2016].

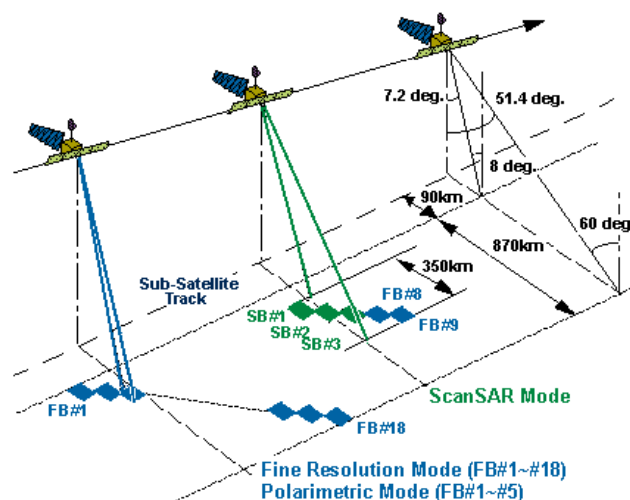


Abb.17 Aufnahmemodi von ALOS Palsar [EORC & JAXA 2016]

Die Modi mit hoher Auflösung (Fine Resolution) heißen FBS (Fine Beam Single polarization), FBD (Fine Beam Double polarization) und DSB (Direct Downlink), hinzu kommt der Polarimetrische PLR. Bei ScanSAR wird zwischen WB1 (Wide Burst) und WB2 unterschieden. Der WB2 Modus mit 28 MHz Chirp-Bandbreite wurde ursprünglich von der JAXA als Versuchsmodus deklariert [ESA, 2007]. Nähere charakteristische Merkmale der einzelnen Aufnahmemodi sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Mode		Fine Resolution FBS / FBD		ScanSAR WB1/2	Polarimetric PLR
Frequenz		L-Band (1.27 GHz)			
Chirp-Bandbreite		28MHz	14MHz	14MHz, 28MHz	14MHz
Polarisation		HH, VV	HH+HV, VV+VH	HH, VV	HH+HV+VH+VV
Einfallswinkel		8° - 60°	8° - 60°	18° - 43°	8° - 30°
Auflösung	Range	10m*	20m*	100m*	30m*
	Azimuth	10-20m	10-20m	100m	10-20m
Streifenbreite		70km*	70km*	250km (3 Scans) 300km (4 Scans) 350km (5 Scans)	30km*
Off-Nadir Winkel (default)		34.3°	34.3°	20.1°-36.5°	21.5°

*Trifft unter default Off-Nadir Winkel zu. Bei ScanSAR Mode : 4th scan (off-nadir 34.1 deg.)

Tab.6 Aufnahmeeigenschaften von PALSAR [JAXA 2008, S.34, ESA 2007]

4.2.1 Verwendete Daten

Um das gesamte Testgebiet abdecken zu können, sind mindestens 5 ScanSAR Bilder nötig. Im ersten Schritt muss der Vertex ASF Datenbestand [8] nach geeigneten Zeitpunkten untersucht werden. Die pathorientierten Szenen bilden das Pantanal mehrmals in einem Zyklus ab (Path 400-410). Aus diesem Grund werden jeweils zwei Streifen mit etwa 5-10 Tagen Zeitdifferenz verwendet, um ein komplettes Mosaik (M) zu erhalten. Bei allen Aufnahmen handelt es sich um HH-polarisierte WB-Szenen (WB1/2 27.1 HH5scan) mit einer räumlichen Auflösung von 100m und einer Streifenbreite von 350km. Der Einfallswinkel beträgt etwa 33,9° und variiert von Near 18° zu Far 43°. Alle ScanSAR Szenen liegen im Prozessierungslevel 1.5 vor und sind im standardisierten CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) Format abgespeichert. Level 1.5 Daten sind Multi-look Amplitudenbilder in Kartenprojektion [JAXA, 2009]. Durch das Multilooking wird das stark vom Speckle-Effekt beeinflusste Bild in mehrere einzelner Looks aufgelöst. Hierfür werden gewählte empfangene Impulse innerhalb der Integrationszeit verwendet. Die Anzahl der Bilder hängt dabei von der finalen Zielauflösung ab. Die daraus resultierende Verbesserung der radiometrischen Auflösung führt aber auch zu einer Verschlechterung der spektralen Auflösung [Woodhouse, 2006, S.294].

Im Anhang D sind alle verwendeten Szenen aufgelistet. Die Zeitreihe umfasst insgesamt 24 Mosaik von Ende 2006 bis Mitte 2010, die jeweils aus zwei Zeitpunkten bestehen. Insgesamt sind 14 Mosaik während der Regenzeit (Oktober-April) und 10 während der Trockenzeit (Mai-September) aufgenommen.

4.2.2 Vorprozessierung

Für die Vorprozessierung der Level 1.5 ALOS Daten wird die kostenlose Software MapReady V 3.1.24 vom Alaska Satellite Facility (ASF) verwendet. Der große Vorteil der Toolbox ist, dass sie genau an den von ASF zur Verfügung gestellten Daten angepasst ist. MapReady akzeptiert Level-1 SAR Daten, SLCs (Single Look Complex SAR Daten) und optische Daten vom ASF und einigen anderen Einrichtungen. Es können Geländekorrekturen, Geokodierung und polarimetrische Bearbeitungsschritte durchgeführt und in mehrere gebräuchliche Bildformate, eingeschlossen GeoTIFF, exportiert werden. Zusätzlich enthalten sind ein Bild-Viewer, ein Metadaten-Viewer, ein Koordinatenprojektion-Konverter und eine Vielzahl von Kommandozeilen-Tools [ASF, 2016]. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Prozessierung erklärt.

Alle Informationen können im Detail aus dem ASF MapReady User Manual (2012) entnommen werden. Das einfach aufgebaute Interface des Programms hat für jeden Arbeitsschritt einen Karteireiter und ist leicht zu bedienen. Die benötigten Tabs können aktiviert und in einem Kettenprozess hintereinander ausgeführt werden. Für die Level 1.5 ALOS Daten sind Kalibration, radiometrische und geometrische Geländekorrektur sowie Geokodierung nötig.

Kalibration

Bei der Kalibrierung eines SAR Bildes wird das lineare Amplitudenbild in ein radiometrisch kalibriertes Power Image umgewandelt. Während das Eingangsbild digitale Zahlen (DNS) als Einheit hat, wird das Ausgangsbild in der Einheit von Beta β_0 , Gamma γ_0 oder Sigma σ_0 ausgegeben. Dies entspricht dem Verhältnis zwischen der Energie die von einer angestrahlten Fläche zurückkommt und der ausgesendeten Energie. Wissenschaftliche Studien verwenden meist σ_0 , da sie an quantitativen Messungen in Bezug auf den Boden interessiert sind. Für die Kalibrierung der ALOS Daten wird daher σ_0 ausgewählt. Die resultierenden Werte der Kalibrierung sind in powerscale gegeben.

Radiometrische und geometrische Geländekorrektur

Wie schon in Kapitel 2.3 beschrieben kommt es aufgrund der Seitensicht Geometrie von SAR zu einer Reihe von Verzerrungen in den Bildern (layover, foreshortening, Schattenwurf). Um diese zu entfernen, muss das Gelände mit Hilfe von Höheninformationen aus digitalen Höhenmodellen (DEM) korrigiert werden. Die Gelände Korrektur kann in geometrische und radiometrische unterschieden werden. Durch die geometrische Korrektur werden die einzelnen Pixel wieder in ihre richtige Lage gebracht. Die in MapReady implementierte Methode benutzt ein in Slant-Range Geometrie umgewandeltes DEM, um ein simuliertes SAR Bild zu erstellen und damit die räumliche Lage zu verbessern. Nach der geometrischen Korrektur erscheinen jedoch die sensorzugeneigten Geländeflächen zu hell und die abgewandten zu dunkel. Die radiometrische Geländekorrektur passt die Helligkeit entsprechend der Beobachtungsgeometrie, definiert durch Einfallswinkel und Neigung des lokalen Terrains an. Dabei ist die genaue Ausrichtung zwischen dem SAR-Bild und dem DEM wichtig. Etwaige Offsets resultieren in der Anwendung eines falschen radiometrischen Korrekturfaktors. Für die radiometrische Geländekorrektur folgt MapReady dem Ansatz nach Ulander (1996).

Es werden sowohl geometrische als auch radiometrische Korrekturen auf die ALOS Bilder angewendet. Als Referenz DEM wird hierfür ein SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) mit 90m Auflösung verwendet. Die jeweiligen Kacheln werden zuvor aus dem Internet heruntergeladen [1] und mosaikiert. Zusätzlich werden die verwendeten Einfallswinkel abgespeichert.

Geokodierung

Die Geokodierung ist wichtig, um die Beziehung zwischen SAR Bild und realer Welt herstellen zu können. Die dreidimensionale Umgebung muss in eine zweidimensionale Darstellung überführt werden. Mittels Transformation wird die SAR Geometrie in eine standardmäßige Kartenprojektion gebracht. Für die ALOS-Daten wird die UTM (Universal Transverse Mercator) Projektion verwendet. Zudem wird die Pixelgröße auf 75m festgelegt. Normalerweise ist der Richtwert die halbe Größe der Auflösungszelle, im Fall von PALSAR ScanSAR Daten 50m (Auflösung 100m). Jedoch kam es bei einigen Bildern der Zeitreihe zu einer Fehlermeldung bei der gesetzten Pixelgröße von 50m. Obwohl alle ScanSAR Aufnahmen eine definierte Auflösung von 100m haben, konnte das Problem nicht behoben werden. Ein möglicher Grund könnte ein Softwarefehler beim Auslesen der Auflösung oder eine falsche Bildinformation sein.

Nachdem alle Parameter eingestellt sind, können alle CEOS-Inputdaten in einem Batch-Lauf prozessiert und im GeoTIFF Format ausgegeben werden. Die komplette Prozessierung aller ALOS Daten dauert etwa 72 Stunden.

Für alle weiteren Arbeitsschritte und Analysen wird Quantum GIS (QGIS) Version 2.10 Pisa verwendet. Es ist ein kostenloses Geographisches Informationssystem (GIS) und bietet Funktionen zur Erstellung, Visualisierung, Analyse, Manipulation und kartographischen Gestaltung von räumlichen Daten. Die Software arbeitet sowohl mit Raster- als auch Vektorformaten [QGIS, 2016].

Konvertierung zu dB (Dezibel)

Kalibrierte Bilder verwenden in der Regel die logarithmische dB-Skala. Da die von MapReady ausgegebenen Bilder in der Einheit powerscale ausgegeben werden, müssen diese in dB (Dezibel) umgerechnet werden.

$$\text{dB} = 10 * \log_{10}(\text{powerscale}) \quad (4.1)$$

Für die Umsetzung der Formel wird in QGIS der grafische Modeller benutzt. Quantum GIS lässt sich mit einfachen Modellen erweitern, in dem nur Eingangsdaten und vorhandene Algorithmen, hier „Raster Calculator“, ausgewählt werden müssen.

Kosinus Normalisierung

Wie bereits erwähnt, ist der Radar Backscatter σ^0 eine Funktion aus Sensor- und Geländeeigenschaften. Besonders der Einfallswinkel hat dabei einen erheblichen Einfluss. Die Rückstreuung ist bei kleinen Einfallswinkeln stärker und nimmt in Richtung der Far-Range, meist in Abhängig von der Rauigkeit und Landbedeckung ab. Daher muss diese Variabilität berücksichtigt und eine Methode zur Kompensation des Effekts angewendet werden [Mladenova & Jackson, 2011]. Ein Ansatz basiert auf dem Lambertschen Gesetz, nachdem die σ^0 Werte im Bild in Beziehung zum Einfallswinkel θ stehen wie:

$$\sigma^0 = \sigma_m^0 * (\cos \theta) \quad (4.2)$$

σ_m^0 ist der Backscatter-Wert unabhängig von der Wirkung des Einfallswinkels [Ardila et. al. 2010].

Das Lambertsche Kosinus-Gesetz besagt, dass von einem Flächenelement nach jeder Richtung in gleiche Raumwinkel ausgestrahlte Energie proportional ist zum Kosinus des Winkels zwischen der Richtung der Strahlung und der Normalen des Flächenelements. [Pepperhoff, 1956, S.12]. Für die Normalisierung der ALOS-Daten werden die von MapReady berechneten Einfallswinkel und die oben genannte Formel verwendet.

Gridding

Anschließend werden die fertig prozessierten Daten in das regelmäßige Equi7-Grid transformiert. Raumgitter definieren eine Reihe von geodätischen Standorten und bilden eine Referenz für Lagerung, Manipulation und Darstellung von Geodaten. Gleichmäßige Grids definieren jeden Ort implizit mit einem festen Abtastabstand relativ zu linearen Achsen. Die Übertragung der Daten in einen gemeinsamen Datenraum erleichtert die Erzeugung, Analyse und Interpretation von Zeitreihen [Bauer-Marschallinger et al., 2014]. Das Equi7-Grid besteht aus sieben individuellen kontinentalen Zonen, wobei entsprechend der Lage des Pantanal das Teilgitter für Südamerika verwendet wird. Für die Auflösung von 75m wird die größte Kacheleinheit T6 (600x600km) gewählt. Das Equi7-Grid bietet den Vorteil, dass alle Bilder in einem fest definierten Gitter vorliegen und somit eine genaue Zeitanalyse der Rückstrahlung für jeden Pixel möglich ist.

4.3 ENVISAT Altimeterdaten

Neben den SAR Daten werden in der Arbeit auch Altimeter Daten von ENVISAT (Enviromental Satellite) verwendet. ENVISAT ist ein Satellit der Europäischen Raumfahrtbehörde (ESA) und war von März 2002 bis April 2012 aktiv. Bis Oktober 2010 flog der Satellit auf einer konstanten Bahn in 800km Höhe mit einer Umlaufzeit von 35 Tagen, danach wurde er um 17km abgesenkt. Neben vielen verschiedenen Sensoren, befindet sich auch ein Altimeter (RA-2) an Bord. Das RA-2 (Advanced Radar Altimeter) Instrument ist ein pulse-limited Radar mit Nadir Blickrichtung und arbeitet mit zwei Frequenzen im Mikrowellenbereich: Ku-Band (13.575Ghz) und S-Band (3.2GHz) [ESAa, 2016].

Im Gegensatz zu bildgebenden SAR Daten handelt es sich in der Altimetrie um numerische Daten die meist in Textformaten ausgegeben werden. Alle Untersuchungen basieren auf den, von der ESA bereitgestellten Sensor Geophysical Data Records (SGDR) Version 2.1. Der Datensatz enthält genaue Satellitenpositionen (Länge, Breite, Höhe), Zeit, Altimeter Range sowie geophysikalische und andere Korrekturen (Instrument, Ausbreitung). Für ENVISAT gibt es vier verschiedene Retracking Algorithmen (Ocean, Ice-1, Ice-2 und Sea-Ice), welche auf die Rohdaten angewendet werden, um Range Schätzungen und Rückstrahlkoeffizienten bereitzustellen. Keiner dieser Retracker ist jedoch speziell für die Prozessierung von Altimeter Echos über Feuchtgebiete konstruiert. Im Fall der verwendeten Sigma0 Daten wurde der Ice-1 Retracker benutzt. Vorangegangenen Studien haben gezeigt, dass dieser Algorithmus Wasserhöhen von kleinen Seen, Reservoirs, Flüssen und Überschwemmungsflächen am genauesten misst [Baup et al., 2014].

Die Originaldaten der ESA werden im Binärformat ausgegeben. Für die Analyse der Altimeter-Backscatter werden bereits vom DGFI vorverarbeitet und in netcdf4 Format transformierte Datensätze verwendet. Die nach Zyklus geordneten Files enthalten für jeden Altimeterpunkt die geographische Länge und Breite, Zeit, Pass-Nummer und σ_0 -Werte für Ku- und S-Band. Die ENVISAT-Passnummern, die das Pantanal abdecken lauten: 134, 149, 220, 235, 592, 607, 678, 693 [OpenADB, 2016].

Die Ableitung der Wasserhöhen aus den SGDR Daten wird in Kapitel 6.2.2 beschrieben.

4.4 Optische Vergleichsdaten

Als Vergleichsdaten stehen für die Analyse der Zeitreihe noch optische Landsat-Bilder zur Verfügung. Mit einer Auflösung von 30m gehört Landsat zu den mittleren auflösenden Sensoren. Insgesamt besitzen Landsat 5 und 7 sieben gemeinsame Kanäle: Blau (0.45-0.52 μ m), Grün (0.52-0.60 μ m), Rot (0.63-0.69 μ m), NIR (0.76-0.90 μ m) und MIR (1.55-1.75 μ m), TIR (10.41-12.5 μ m), SWIR (2.08-2.35 μ m). Die Wiederholungsrate beträgt 16 Tage. Trotz der regelmäßigen Aufnahme, können jedoch aufgrund der hohen Wolkenbedeckung nur wenige Bilder verwendet werden. [NASA, 2016].

Für die spätere Validierung der klassifizierten ALOS-Daten wird zusätzlich nach geeigneten Landsat Szenen gesucht. Dabei wird darauf geachtet, dass die Wolkenbedeckung weniger als 10% beträgt. Um das Pantanal halbwegs abdecken zu können werden sechs 185x175km große Standardszenen benötigt. Landsat-Daten können einfach im USGS EarthExplorer [9] gesucht und im GeoTIFF Format heruntergeladen werden. Die Recherche zeigt, wie schwierig es ist optische Datensätze über dem Pantanal zu finden. Innerhalb der Zeitreihe von 2006 bis 2010 können nur zu sechs passenden Zeitpunkten Landsat-Szenen verwendet werden (Tab.7).

<i>ALOS Mosaik</i>	<i>Landsat</i> (path 227/row 72-74)	<i>Landsat</i> (path 22/ row 72-74)
23.08. / 28.08.2007	24.08.2007 (L5)	25.08.2007 (L7)
10.01. / 15.01.2009	09.01.2009 (L7)	10.01.2009 (L5)
12.04. / 17.04.2009	15.04.2009 (L7)	16.04.2009 (L5)
28.05. / 02.06.2009	02.06.2009 (L7)	03.06.2009 (L5)
08.07. / 18.07.2009	12.07.2009 (L5)	13.07.2009 (L7)
15.04. / 20.04.2010	10.04.2010 (L5)	11.04.2010 (L7)

Tab.7 Landsat-Aufnahmen für die Validierung der ALOS Klassifizierung

Die Level-1 Daten benötigen keiner speziellen Vorprozessierung. Sie werden lediglich einer atmosphärischen Korrektur unterzogen. Um die genauen Rückstrahlwerte je Pixel verwenden zu können, müssen zuerst die Einflüsse der Atmosphäre entfernt werden. Zur Reduzierung solcher Effekte kann das „Semi-Automatic Classification Plugin“ (SCP) in QGIS verwendet werden. Das kostenlose Plugin erlaubt eine halb-automatische Klassifizierung von Fernerkundungsbildern und bietet noch weitere Werkzeuge für das Pre- und Post-processing. Mit der implementierten Funktion kann eine DOS-1 (Dark Object Subtraction) Atmosphärenkorrektur durchgeführt werden [Congedo, 2015].

Für die Durchführung der Korrektur werden verschiedenen Parameter aus der Landsat Metadatei (MTL-File) benötigt. Angaben wie Sensor, Aufnahmedatum, Sonnenhöhe und Abstand zwischen Erde und Sonne werden automatisch ausgelesen.

Seit dem Ausfall der „Scan-Line“ Korrektur im Jahr 2003 an Bord von Landsat-7 stehen nur noch „SLC-off“ Daten zur Verfügung. Während bei diesen Bildern der mittlere Streifen noch ein geschlossenes Bild darstellt, ergeben sich zum Rand hin Streifen ohne Werte. Daher müssen mit Hilfe der mitgelieferten „Gap Mask“ die Lücken interpoliert werden.

Mit den bearbeiteten Landsat-Szenen können im Anschluss verschiedene Wasserindizes berechnet werden. Die Literatur beschreibt einige Indizes und Kombination (NDVI, NDWI, MNDWI, WRI, AWEI, NDVI-NDWI, NDVI-MNDWI), welche für das Extrahieren von Wasserflächen verwendet werden können [Rokni et al., 2014]. In Tabelle 8 sind alle Formeln dargestellt.

<i>Index</i>	<i>Formel</i>	<i>Werte für Wasser</i>
NDVI	$(\text{NIR} - \text{Rot}) / (\text{NIR} + \text{Rot})$	negativ
NDWI	$(\text{Grün} - \text{NIR}) / (\text{Grün} + \text{NIR})$	positiv
MNDWI	$(\text{Grün} - \text{MIR}) / (\text{Grün} + \text{MIR})$	positiv
AWEI	$4 * (\text{Grün} - \text{MIR}) - (0.25 * \text{NIR} + 2.75 * \text{SWIR})$	positiv
WRI	$(\text{Grün} - \text{Rot}) / (\text{NIR} + \text{MIR})$	>1

Tab.8 Aus Satellitendaten abgeleitete Wasserindexe [nach Rokni et al, 2014]

Um die Landsat Szenen später mit den Klassifizierungsergebnissen von ALOS PALSAR vergleichen zu können, werden sie in das EQUI7-Grid transformiert und auf 75m Pixelgröße resampelt.

5 Bestimmung der Wasserflächenausdehnung mit SAR-Daten

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Methoden zu Bestimmung der Wasserflächenausdehnung erläutert. Nach einer ersten Voruntersuchung der Radar-Backscatter werden verschiedene Verfahren der Schwellwertbildung für die Wasserklassifizierung durchgeführt. Zum Schluss werden die Ergebnisse dargestellt und analysiert sowie mit optischen Landsat-Daten validiert.

5.1 Visuelle Untersuchung der Radarrückstreuung

Um ein erstes Verständnis für die Rückstrahleigenschaften im Pantanal zu bekommen wird eine Analyse der ALOS-Rückstrahlwerte durchgeführt. Hierzu werden statistische Informationen der 24 Mosaik für jeden Pixel berechnet: Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung und Range (Differenz zwischen maximalen und minimalen Wert). Zusätzlich werden verschiedene Multilayer-Daten-Sets erstellt, um die Überschwemmungsmuster visuell interpretieren zu können. Der beste Zeitpunkt für die Unterscheidung zwischen gefluteten und nicht gefluteten Regionen ist im Februar, in der Phase des höchsten Wasserstandes [Costa et al., 2009]. Für die in Abbildung 18 dargestellten Color-Composite-Bilder werden Mosaik vom Februar 2007, Juli 2007 und August 2007 sowie die berechnete Statistik der Zeitreihe verwendet. Aufnahmen zum Zeitpunkt des höchsten Wasserstandes und zur Trockenzeit bieten den besten Kontrast zwischen den saisonalen Überschwemmungsregionen.

In den Multilayer-Bildern sind die Regionen mit offenen Wasserflächen und die Überschwemmungsgebiete deutlich erkennbar. Vor allem im Süden des Gebiets entlang des Paraguays sieht man in Abbildung 18a sehr helle weiße Flächen mit hohen Rückstrahlwerten, welche von Double-Bounce Effekten hervorgerufen werden. Die bläulichen Gebiete repräsentieren saisonale Überschwemmungsflächen. Insbesondere im dargestellten Range Bild (Abb. 18d) ist ersichtlich, dass in den überfluteten Bereichen die Rückstrahlwerte über die Zeitreihe am stärksten variieren. Dies beruht auf den unterschiedlichen Verhältnissen während Überschwemmung und Trockenphase. Die teilweisen hohen Werte innerhalb der offenen Wasserflächen werden hauptsächlich durch Wind beeinflusst. Im multitemporalen Layerstack (Abb. 18c) werden zusätzlich die unterschiedlichen Flutungszeitpunkte zwischen Norden und Süden, durch eine unterschiedliche Farbwiedergabe (Norden: Cyan, Süden: Magenta) verdeutlicht.

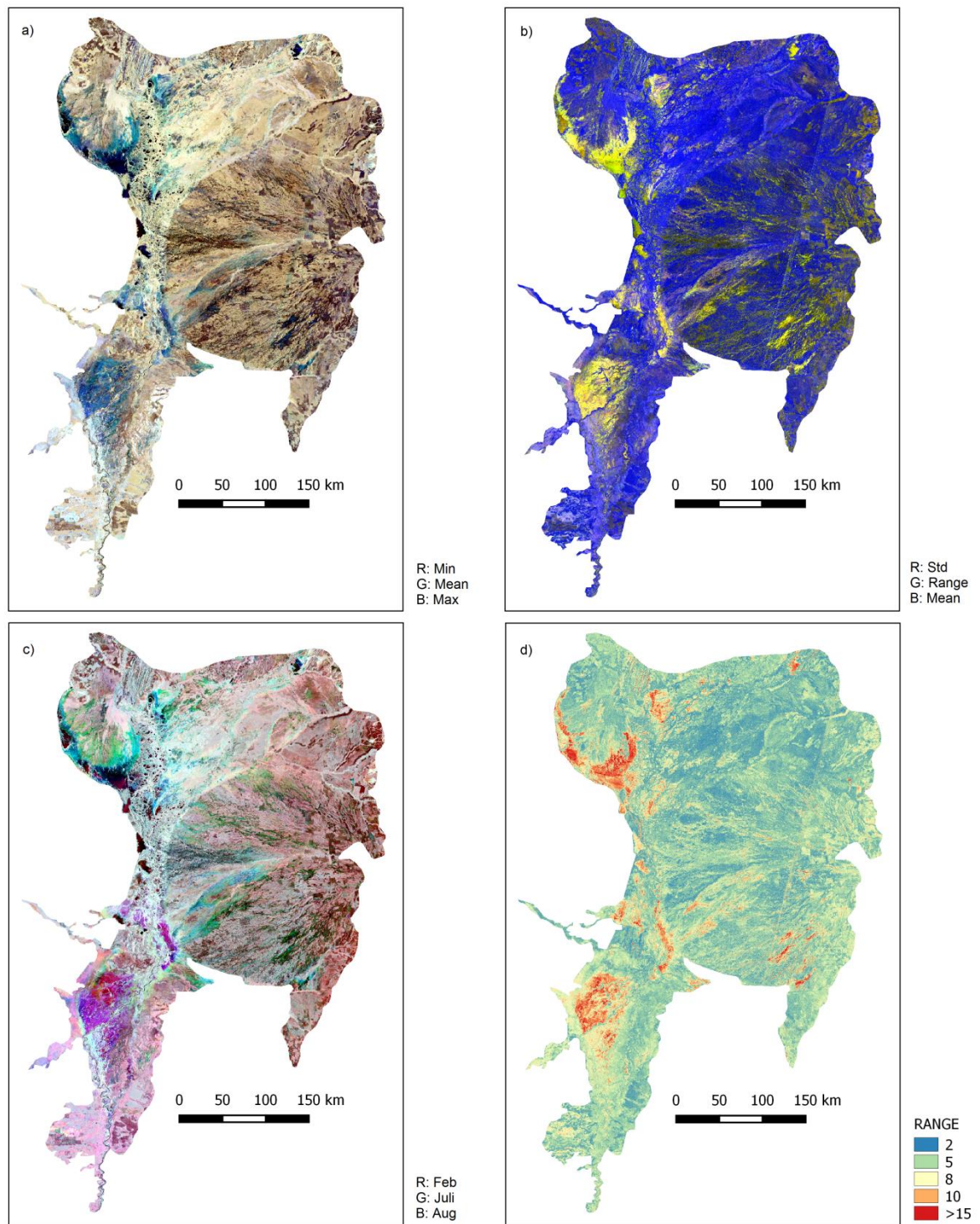


Abb.18 Layerstacks (a-c) und Range-Abbildung (d) des Testgebiets in dB © JAXA, METI

Neben der Analyse der gesamten Zeitreihe werden auch die statistischen Werte für die einzelnen Monate berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 gelistet. Da für Juni nur eine Aufnahme zur Verfügung steht, kann keine aussagekräftige mittlere Rückstrahlung für diesen Monat angegeben werden. Der gemittelte Wert für die Regenzeit von Oktober bis April beträgt -8,92 dB ($\sigma=2,2$ dB) und für die Trockenzeit -8,93 dB ($\sigma=2,32$ dB).

<i>Monat</i>	<i>Anzahl der Bilder</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Standardabweichung</i>
Januar	4	-8,35 dB	2,26 dB
Februar	2	-10,11 dB	2,62 dB
April	2	-8,98 dB	2,41 dB
Mai	2	-8,37 dB	2,25 dB
Juli	4	-9,09 dB	2,47 dB
August	3	-9,22 dB	2,43 dB
Oktober	3	-8,92 dB	2,26 dB
November	3	-8,86 dB	2,24 dB

Tab.9 Analyse der gemittelten Monate (2006-2010) für das gesamte Pantanal

Man kann ganz deutlich erkennen, dass im Februar die Rückstrahlwerte durchschnittlich am niedrigsten sind. Dies spiegelt den Höchststand der Überflutung zu dieser Zeit wider. Zu Beginn der Trockenzeit steigen die Mittelwerte wieder an. Jedoch ist im Juli und August wieder ein leichter Abfall zu erkennen. In Abbildung 19 sind die gemittelten Backscatter-Bilder für jeden Monat dargestellt. Prinzipiell ist der Wasserstrom von Nord nach Süd visuell in den Bildern ablesbar, es kann aber nicht genau zwischen Regen- und Trockenzeit separiert werden.

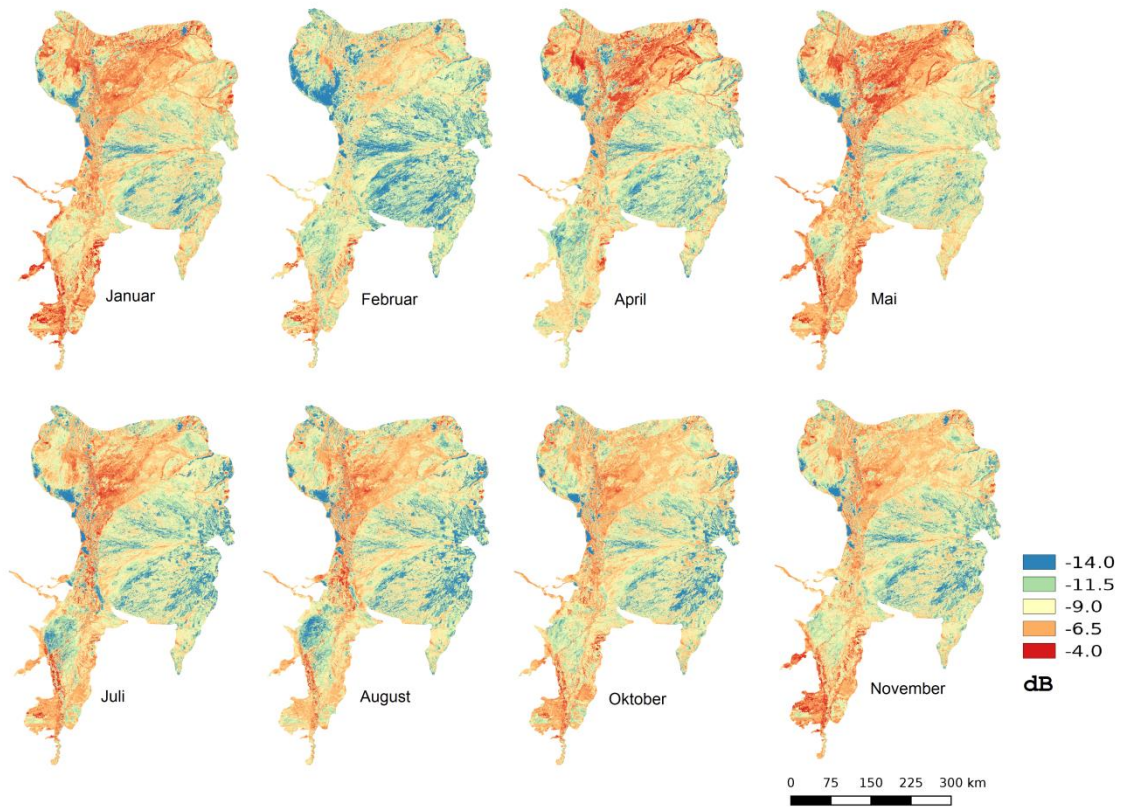


Abb.19 Mittlere Radarrückstrahlung in dB für jeden Monat (2006-2010) © JAXA, METI

5.2 Pixel-basierte Klassifizierung von Wasser

Es existieren verschiedene Bildverarbeitungstechniken und Algorithmen, um Wasserflächen und ihre Ausmaße von Satellitenbilddaten abzuleiten. Dabei wird sich bei SAR zunutze gemacht, dass Wasser aufgrund seiner glatten Oberfläche und der spiegelnden Wirkung eine deutlich geringere Rückstreuintensität aufweist als andere Landbedeckungsklassen. Insbesondere HH polarisierte L-Band SAR Bilder eignen sich hierfür am besten. Neben der Bildung von Helligkeitsschwellwerten gibt es zum Beispiel auch andere Verfahren basierende auf den Eigenschaften von räumlich segmentierten Regionen [Chapman et al., 2015].

In der vorliegenden Arbeit wird die pixel-basierte Threshold-Methode verwendet. Dabei werden nur die einzelnen Pixel als klassifizierende Einheit verwendet, das bedeutet die Klassenzuweisung hat keinen Einfluss auf die benachbarten Bildelemente. Voraussetzung hierfür ist, dass die Objektklassen in bestimmter Hinsicht (Grauwert) homogen sein müssen. Ein weiteres Kriterium ist die Trennbarkeit, d.h. die Objekte müssen sich hinsichtlich ihres mittleren Grauwertes deutlich voneinander unterscheiden lassen.

Bei dem Segmentierungsverfahren wird das Ergebnis pixelweise anhand des Grauwertes bestimmt. Im einfachsten Fall wird aus einem Grauwertbild ein Binärbild durch Anwendung eines festen Schwellwertes S erzeugt. Dabei wird die Grauwertfunktion $g(x,y)$ folgendermaßen in ein binäres Bild transformiert:

$$g'(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } g(x,y) < S \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.1)$$

Der Schwellwert kann dabei entweder durch visuelle Interpretation oder mit Hilfe des Histogramms bestimmt werden [Bartsch et al, 2008]. Derartige Verfahren eignen sich zur Trennung zwischen Objekt und Hintergrund, in diesem Fall Wasser und kein Wasser.

In der weiteren Studie werden verschiedene Methoden zur Schwellwertbildung angewendet. Zum einen wird rein basierend auf der visuellen Interpretation der prozessierten ALOS-Histogramme, zum anderen anhand von statistischen Parametern die Thresholds bestimmt.

5.2.1 Histogramm-Schwellwertbildung

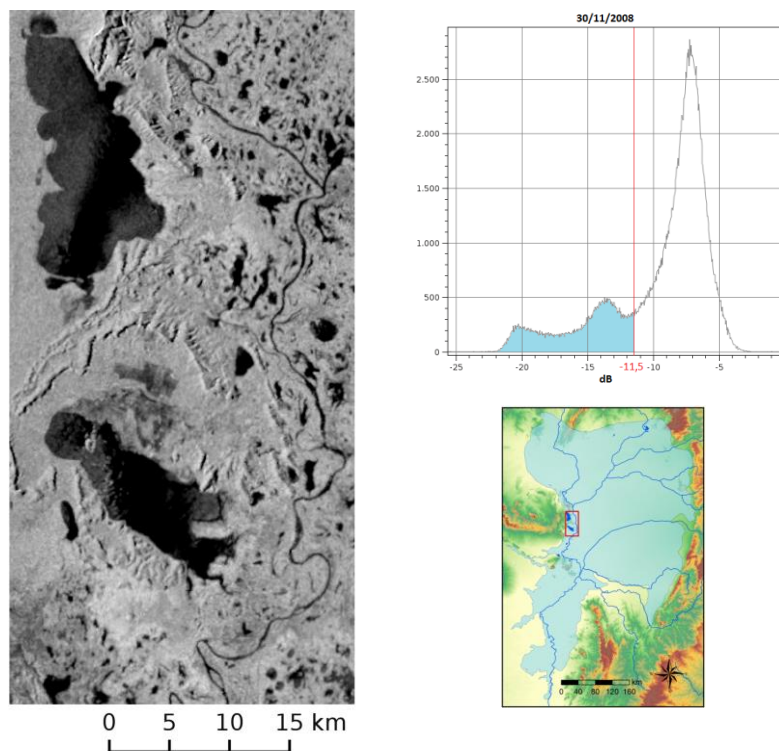
Bei der Histogramm-Schwellwertbildung werden Attribute des Histogramms analysiert um einen optimalen Threshold zu finden, der das Graustufenbild in Wasser und Land unterteilt. Der große Vorteil dieser einfachen Methode ist, dass nur die Informationen des Amplitudenbildes erforderlich sind. Allerdings kann es auch zu Schwierigkeiten kommen, da um einen zuverlässigen Schwellwert setzen zu können, das Histogramm bimodal verteilt sein sollte. Ist der Wasseranteil in einer Bildszene sehr klein, beziehungsweise der Kontrast zwischen Wasser und Nicht-Wasserflächen gering, können die zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen nicht gut voneinander unterschieden werden. Im besten Fall hat das Histogramm zwei Maxima, welche durch ein eindeutiges Tal getrennt sind.

Grundlage der formbasierten Verfahren ist die Analyse der Spitzen, Täler und Krümmung des Histogramms. Da es sich beim Pantanal um ein komplexes Feuchtgebiet handelt, welches aus offenen Wasserflächen aber auch regelmäßig überflutete Regionen besteht, müssen zwei verschiedene Thresholds gesetzt werden. Wie in einem früheren Kapitel beschrieben (Kap.2.3) kommt es teilweise bei überfluteter Vegetation zu sogenannten Double-Bounce Effekten, wenn Mikrowellen zweifach gespiegelt direkt zum Empfänger zurückreflektiert werden. Im Radarbild erscheinen diese Flächen sehr hell, was der eigentlichen niedrigen Rückstrahlung von Wasser nicht entspricht. Da es sich aber in beiden Fällen um Wasser handelt, muss ein oberer Schwellwert für überflutete Vegetation und ein unterer Schwellwert für offene Wasserflächen gesetzt werden. Leider kann aufgrund der Größe des Testgebiets und der anteiligen Wasserfläche kein guter Kontrast im Histogramm wahrgenommen werden. Um dieses Problem zu lösen werden anhand kleinerer ausgewählter Testgebiete, zu zwei repräsentativen Zeitpunkten, die Grenzwerte für offene Wasserflächen und überfluteter Vegetation bestimmt.

Neben der manuellen Schwellwertbestimmung, anhand einer visuellen Interpretation der Histogramme, wird für beide Testgebiete die Otsu-Methode angewendet. Es ist ein automatisiertes Histogramm-Schwellwertauswahlverfahren, benannt nach Nobuyuki Otsu. Sie gehört zu den am häufigsten verwendeten Threshold-Techniken und zielt auf die Minimierung der Variabilität innerhalb der Klasse während zur gleichen Zeit die Variabilität zwischen den Klassen maximiert wird. Es wird vorausgesetzt, dass das zu segmentierende Bild zwei Klassen (Hintergrund und Objekt) beziehungsweise ein bimodales Histogramm besitzt. Die Otsu-Methode wertet die "Güte" von jedem gegebenen Grauwert um den besten Schwellwert für die Bildsegmentierung zu finden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass nur das Graustufenhistogramm eines Bildes benötigt wird und kein weiteres Vorwissen [Otsu, 1979].

Schwellwert für offene Wasserflächen

Das erste Testgebiet in Abbildung 20 zum 30.11.2008 spiegelt die offenen Wasserflächen entlang des Paraguays wider. Bei der Auswahl des Ausschnitts wird darauf geachtet, dass er mindestens 20% Wasser beinhaltet, um einen guten Kontrast im Histogramm zu erreichen. Im dazugehörigen Histogramm ist eine eindeutige Multimodalität erkennbar. Die Verteilung entspricht der Land- bzw. Wasserflächen im Bild, wobei es in der Klasse Wasser noch einen weiteren kleinen Peak bei etwa -20,5 dB gibt. Der untere Schwellwert wird auf Höhe des Minimums zwischen der Land- und der ersten Wasserspitze gesetzt, hier entsprechend bei -11,5 dB. Das bedeutet, dass alle Pixel unter diesem Schwellwert als Wasser klassifiziert werden. Der genaue Wert von -11,5 dB wird durch die visuelle Interpretation sowie durch Ausprobieren mehrerer Schwellwerte festgelegt. Die Anwendung der Otsu-Methode ergibt einen Schwellwert von -11,688 dB. Beide Verfahren führen demnach zu ähnlichen Resultaten.



© JAXA,METI

Abb.20 SAR-Aufnahme mit Histogramm für das Testgebiet 1: Offene Wasserflächen [1,2]

Um einen ersten Eindruck über die gewählten Schwellwerte zu bekommen, wird als Vergleich eine Landsat-5 Szene vom 14.11.2008, ca. 2 Wochen vor der ALOS Aufnahme, verwendet. Hierfür werden alle in Kapitel 4.4 beschriebenen Wasserindizes berechnet und mit dem Klassifizierungsergebnis verglichen. Für die Festlegung des Thresholds der optischen Daten wird die Otsu-Methode verwendet. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Indizes dargestellt.

	<i>Threshold</i>	<i>Fläche km²</i>	<i>Prozent</i>
WRI	>1,1044	403,80	24,22%
NDVI-MNDWI	< 0,0946	429,86	25,78%
MNDWI	> 0,1808	430,68	25,83%
NDVI	< 0,2842	438,01	26,27%
NDVI-NDWI	< 0,4852	439,56	26,36%
NDWI	> -0,2095	443,35	26,59%
AWEI	> -0,1661	466,26	27,96%
ALOS	< -11,5 dB	354,89	21,28%
	< -11,688 dB	346,65	20,79%
ASAR	< -9,5 dB	387,02	23,21%
		1667,49	100%

Tab.10 Ergebnisse der Klassifizierung für das Testgebiet 1

Das Ergebnis zeigt, dass alle angewendeten Indizes zur Bestimmung von Wasserflächen verwendet werden können. Der klassifizierte Wasseranteil liegt zwischen 24,22% und 27,96% Wasser, wobei mit dem Water Ratio Index (WRI) flächenmäßig am wenigsten und mit dem AWEI am meisten klassifiziert wird. Aus diesem Grund werden diese zwei Indizes für die Validierung ausgeschlossen, alle anderen können jedoch verwendet werden. Im Weiteren wird die Kombination aus NDVI und NDWI benutzt, da die Ergebnisse in etwa in der Mitte liegen.

In Tabelle 11 sind die Qualitätsmerkmale der SAR-Klassifizierung aufgelistet. Die Gesamtgenauigkeit gibt Auskunft über die Erfolgsquote der Klassifizierung. Jedoch sagt sie nicht genau aus, wie gut die Klassifizierung gearbeitet hat, denn auch bei rein zufälliger Klassenzuordnung kann man eine richtige Zuordnung erreichen. Aus diesem Grund ist der Kappa-Koeffizient ein aussagekräftiger Parameter. Er untersucht, inwieweit ein Ergebnis einem Zufallswert entspricht oder doch einer Systematik. Je höher der Koeffizient, desto qualitativ besser ist das Klassifizierungsergebnis. Nach Landis und Koch (1977) lässt sich der Grad der Übereinstimmung wie folgt bewerten: 0-0,2 schlecht, 0,21-0,4 ausreichend, 0,41-0,6 mittelmäßig, 0,61-0,8 gut, 0,81-1 ausgezeichnet.

Die Beurteilung des Koeffizienten ist jedoch nicht ganz einfach, da keine exakte untere Grenze für ein zu akzeptierendes Ergebnis angegeben werden kann. Im Fall der durchgeführten Klassifizierung kann ein Wert $>0,75$ schon als sehr gut eingeschätzt werden.

Gesamtgenauigkeit	Kappa κ	Klasse Wasser		
		Producer's A.	User's A.	Kappa κ
ALOS 30.11.2008 (< -11,5dB) und NDVI-NDWI 14.11.2008 (< 0,4852)				
92,13%	0,78	75,44%	93,43%	0,91
ALOS 30.11.2008 (< -11,688 dB) und NDVI-NDWI 14.11.2008 (< 0,4852)				
92,01%	0,78	74,28%	94,19%	0,92
ALOS 30.11.2008 (< -11,5dB) und ASAR 16.11.2008 (< -9,5dB)				
94,44%	0,84	83,88%	91,47%	0,90
ASAR 16.11.2008 (< -9,5dB) und NDVI-NDWI 14.11.2008 (< 0,4852)				
94,81%	0,85	83,37%	94,68%	0,93

Tab.11 Qualitätsmaße der Klassifizierung für das Testgebiet 1

Die Validierungsergebnisse für offene Wasserflächen zeigen, dass die Kappa Koeffizienten für den manuell gewählten Threshold von $-11,5\text{ dB}$, als auch für den Otsu-Schwellwert gleich sind. Der Wert von 0,78 repräsentiert ein sehr gutes Klassifizierungsergebnis. Bei dem höher gesetzten Threshold ist die Gesamtgenauigkeit etwas besser, jedoch lässt sich das aufgrund des Schwellwerts und der dadurch anteilig mehr klassifizierten Pixel zurückführen.

Zusätzlich wird noch eine ENVISAT ASAR-WS Szene (C-Band) vom 16.11.2008 hinzugezogen. Für die ASAR-Daten werden die gleichen Klassifizierungsansätze wie bei ALOS angewendet. Der manuell festgelegte Schwellwert liegt bei $-9,5\text{ dB}$.

Insgesamt stimmen die Klassifizierungen von ALOS ($-11,5\text{dB}$) und ASAR ($-9,5\text{dB}$) besser überein, da beide Systeme mit Mikrowellen arbeiten. Die höhere Klassifizierungsgenauigkeit von ASAR zu NDVI-NDWI kann mit dem kurzen Aufnahmeabstand der beiden Bilder von nur 2 Tagen erklärt werden.

Schwellwert für Wasser unter der Vegetation

In Abbildung 21 ist das zweite Testgebiet am 13.07.2007 dargestellt. Es befindet sich im südlichen Teil des Pantanals. Bei Betrachtung des Histogramms fällt sofort wieder die multimodale Form auf. Die drei Modalwerte entsprechen den offenen Wasserflächen, kein Wasser und Wasser unter Vegetation. Die Intervalle können demzufolge wieder bei $< -11,5$ dB und zusätzlich bei > -5 dB für Wasser unter der Vegetation gesetzt werden. Nach der visuellen Beurteilung kann demnach bei beiden Testgebieten ein Grenzwert von $-11,5$ dB für offene Wasserflächen festgelegt werden. Aus der Otsu-Methode resultieren die Schwellwerte $-11,0046$ dB und $-5,7645$ dB. Es ist ersichtlich, dass diesmal die Unterschiede zwischen den zwei Verfahren größer sind. Insgesamt würde bei Anwendung der Otsu-Schwellwerte mehr Pixel als Wasser klassifiziert werden.

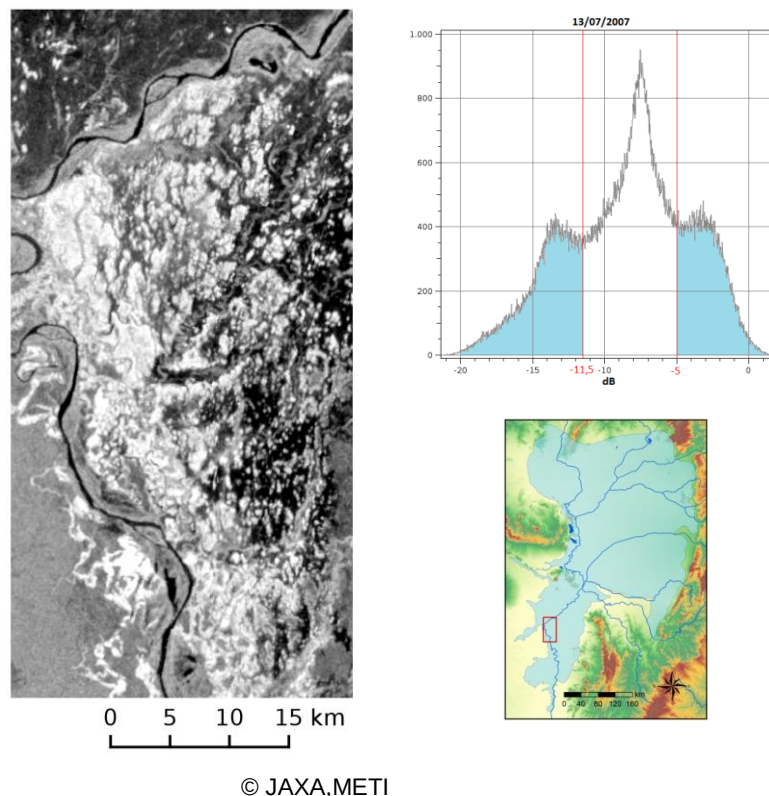


Abb.21 SAR-Aufnahme mit Histogramm für das Testgebiet 2: Wasser unter der Vegetation [1,2]

Die durch die zwei Testgebiete bestimmten Schwellwerte werden anschließend auf alle Szenen der ALOS-Zeitreihe angewendet.

5.2.2 Schwellwertbildung aus den statistischen Parametern der Zeitreihe

In der vorangegangenen Methode wird der Threshold jeweils auf das gesamte Pantanal angewendet. Im Weiteren wird der Schwellwert adaptiv an Subregionen angepasst. Für die Aufteilung des Pantanals wird als Grundlage die Einteilung nach Hamilton et al. (1996) verwendet. Statt der beschriebenen 10 Subregionen wird das Feuchtgebiet jedoch nur noch in 4 Gebiete nach hydrologischen Eigenschaften und Landbedeckung unterteilt, siehe Tabelle 12.

<i>Name</i>	<i>Fläche km²</i>	<i>Hauptflüsse</i>	<i>Abfluss Höchststand</i>
CUIA	42.035,68	Cuiaba	Januar-Februar
		Paraguay	Februar-März
TAQF	53.530,77	Taquari	Januar-Februar
PARA	17.785,37	Paraguay	Mai-Juni
NABI	26.571,32	Paraguay	Juli-August
Pantanal	139.923,15		

Tab.12 Neu erstellte Subregionen CUIA; TAQF, PARA und NABI
[Hauptflüsse und Abfluss Höchststand nach Evans, 2014]

In Abbildung 22 sind die einzelnen Regionen dargestellt. Das Gebiet PARA zeichnet sich vor allem durch die offenen Wasserflächen entlang des Paraguays aus. NABI im Süden des Pantanals ist hauptsächlich beeinflusst von Savanne und überschwemmten Grasland mit teilweise unregelmäßigen Mustern. Im mittleren Westen von TAQF befindet sich teils permanente aquatische Vegetation. Des Weiteren können kleinere Salzseen im Süden beobachtet werden. Größtenteils ist die Subregion jedoch mit Savanne und Grasland bedeckt und im östlichen Teil auch durch Landwirtschaft geprägt. CUIA im Norden des Pantanals besteht aus einem Mix von Wald, Savanne, Grasland sowie landwirtschaftlichen Flächen und ist nur von teilweisen mittelmäßig lang anhaltenden Überflutungen betroffen [Evans, 2014].

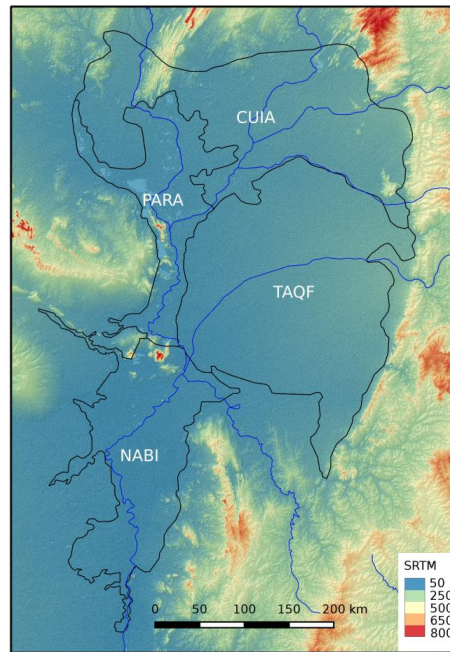


Abb.22 Einteilung des Pantanals in Subregionen,
eigene Darstellung auf Basis von Hamilton et al., 1996, [1,2]

Zudem wird der Schwellwert basierend auf der Statistik der gesamten gemittelten Backscatter-Zeitreihe (Kap. 5.1) gebildet und an jede Teilregion angepasst. Hidayat (2012) verwendet ALOS PALSAR für die Flutkartierung des mittleren Mahakam Flachlands in Indonesien. Er bestimmt den Threshold für offene Wasserflächen und Wasser unter Vegetation mit den Mittelwerten und Standardabweichungen der Radarrückstrahlstatistik von Regionen mit charakterisierenden Überflutungsmustern. Dabei werden Mittelwert $\bar{x}$ und Standardabweichung σ für die Berechnung des unteren Schwellwertes und der Mittelwert für den oberen Schwellwert benutzt, folglich $S_{\text{unterer}} = -11,2 \text{ dB}$ und $S_{\text{oberer}} = -7,52 \text{ dB}$ [Hidayat et al. 2012].

Auf Grundlage dieser Forschung wird ein universeller Threshold für jede Subregion berechnet. Anstatt des Mittelwerts, wird jedoch für die Bildung des oberen Schwellwerts eine ähnliche Kombination wie für offene Wasserflächen benutzt, siehe Formel 5.2 und 5.3. Der Grund hierfür ist, dass bereits die mittlere Radarrückstrahlung im Pantanal sehr niedrig ist und somit auch die Gefahr der Beeinflussung durch andere Landbedeckungsklassen steigt.

$$S_{\text{offene Wasserflächen}} = \bar{x}_{\text{Subregion}} - \sigma_{\text{Subregion}} \quad (5.2)$$

$$S_{\text{Wasser unter Vegetation}} = \bar{x}_{\text{Subregion}} + \sigma_{\text{Subregion}} \quad (5.3)$$

Für die einzelnen Subregionen ergeben sich folgende Grenzwerte (Tab.13):

<i>Subregion</i>	$\bar{x}$	σ	$S_{[Offene\ Wasserflächen]}$	$S_{[Wasser\ unter\ Vegetation]}$
CUIA	-8,25 dB	1,89 dB	-10,14 dB	-6,36 dB
TAQF	-9,94 dB	1,96 dB	-11,90 dB	-7,98 dB
PARA	-8,48 dB	2,74 dB	-11,22 dB	-5,74 dB
NABI	-8,22 dB	1,89 dB	-10,11 dB	-6,33 dB

Tab.13 Berechnete Schwellwerte für jede Subregion

Genau wie in Kapitel 5.2.1 bleiben die Schwellwerte für die gesamte Zeitreihe konstant. Sie variierten ausschließlich räumlich.

5.3 Analyse der Klassifizierungsergebnisse

Nach der ersten visuellen Beurteilung der Klassifizierung ist aufgefallen, dass es Fehlklassifizierungen gibt, die durch ähnliche Rückstrahlwerte in Gebieten mit steiler Topographie hervorgerufen werden. Um diese Geländefehler ausmaskieren zu können, werden die bei der Vorprozessierung generierten Einfallswinkel verwendet: Der projizierte lokale Einfallswinkel (*local*) und der Einfallswinkel der Ellipsoid Korrektur (*ellipsoid*).

$$(\textit{ellipsoid} - \textit{local})^2 \tag{5.4}$$

Aus dem Verhältnisbild wird anschließend eine Maske erstellt. Basierend auf der visuellen Analyse ergibt sich ein Schwellwert von 29. Danach werden morphologische Operationen angewendet, um die Pixelformationen auszudehnen beziehungsweise zu schließen.

Nach der Klassifizierung der ALOS-Bilder werden die einzelnen Wassermasken zweier passender Zeitpunkte zu einem Mosaik (*M*) zusammengeführt (siehe Anhang D), sodass im Überlappungsbereich die Klassifizierungsergebnisse beider Streifen abgebildet werden (Hintergrundwert =noValue). Für die Analyse der Klassifizierungsergebnisse werden anschließend aus den resultierenden Binärmasken (*M1-M24*) die Überschwemmungsflächen in Quadratkilometer für jede Subregion und das gesamte Pantanal berechnet. Es werden dabei jeweils die Ergebnisse für den oberen und den unteren Schwellwert summiert. Dadurch können die Wasserflächenänderungen für jede Teilregion dargestellt werden.

5.3.1 Sensibilität der Schwellwerte

Im Folgenden werden die Unterschiede zwischen den visuell bestimmten (-11,5 dB, -5dB) und den aus der Zeitreihenstatistik abgeleiteten Schwellwerten für jede Subregion dargestellt.

Der Vergleich der verschiedenen Thresholds für offene Wasserflächen zeigt, dass bei einem konstanten Schwellwert der Verlauf über die Zeit stark korreliert ist. Die Auswirkungen auf die prozentuale Klassifizierung der Wasserflächen sind in Tabelle 14 dargestellt. Eine Änderung des Thresholds um 1,39 dB in der Subregion NABI bewirkt beispielsweise, dass 11,49 Prozent mehr Wasser klassifiziert wird, gemessen an der Größe der Region.

	-11,5 dB	Mittlere Differenz	σ	% Fläche
-10,14 dB (CUIA)	r = 0,99	4.216,48 km ²	1.377,06 km ²	10,03
-11,9 dB (TAQF)	r = 0,99	2.306,35 km ²	468,70 km ²	4,31
-11,22 dB (PARA)	r = 0,99	221,90 km ²	62,42 km ²	1,25
-10,11 dB (NABI)	r = 0,97	3.052,47 km ²	1.132,22 km ²	11,49

Tab.14 Vergleich der Schwellwerte für offene Wasserflächen

Eine größere Herausforderung besteht hingegen bei der Wahl des oberen Schwellwertes. Je niedriger der Wert, desto stärker ist der Einfluss von anderen Landbedeckungsklassen wie etwa Wald oder Savanne und es kommt zu einer großen Variabilität. Aus diesem Grund besteht die Gefahr, dass zu viel als Wasser gewertet wird und es zu Fehlklassifizierungen kommt. Im Zeitverlauf ist die Korrelation geringer, je stärker die Schwellwerte auseinanderliegen, siehe Tabelle 15. Insgesamt ist der beste Schwellwert für die Wasserklassifizierung im Pantanal, ohne Referenz nicht genau bestimmbar. Im Weiteren wird jedoch, aufgrund der steigenden Unsicherheit je niedriger der Schwellwert gesetzt wird, der oberen Threshold von -5 dB verwendet.

	-5 dB	Mittlere Differenz	σ	% Fläche
-6,36 dB (CUIA)	r = 0,93	7.497,54 km ²	2.781,26 km ²	17,84
-7,98 dB (TAQF)	r = 0,76	14.126,60 km ²	5.136,92 km ²	26,39
-5,74 dB (PARA)	r = 0,94	2.044,58 km ²	731,20 km ²	11,5
-6,33 dB (NABI)	r = 0,91	4.674,50 km ²	1.954,60 km ²	17,59

Tab.15 Vergleich der oberer Schwellwerte für Wasser unter der Vegetation

5.3.2 Zeitliche Veränderungen der Wasserflächen

In Abbildung 23 sind alle Wassermasken aus den Schwellwerten -11,5dB und -5dB über die Zeitreihe summiert worden, um die Überschwemmungsfrequenz (0-24) der einzelnen Gebiete im Pantanal darstellen zu können. Es kann eindeutig zwischen permanenten Wasserflächen und periodisch überfluteten Bereichen unterschieden werden.

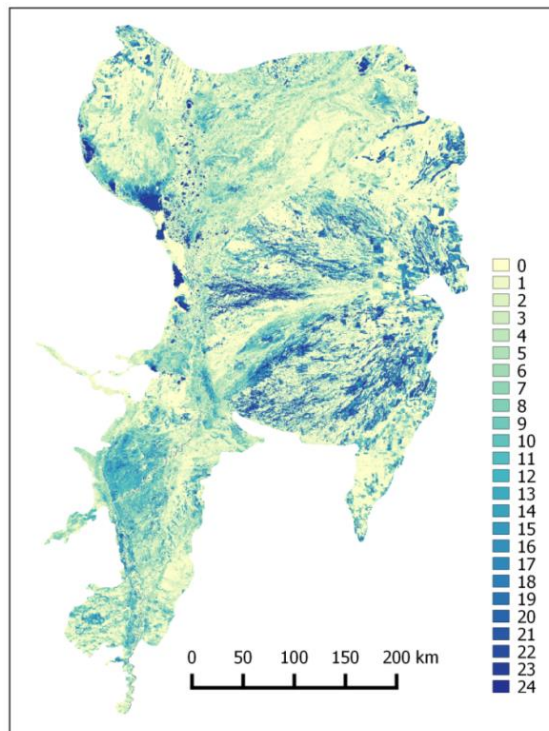


Abb.23 Überschwemmungsfrequenz (2006-2010) für die Schwellwerte -11,5 dB und -5 dB

Für die Ableitung eines Jahressignals im gesamten Pantanal, werden die Klassifizierungsergebnisse über den jeweiligen Monat gemittelt. Die Aufteilung erfolgt wie schon in Kapitel 5.1 beschrieben. Wie zu erwarten entspricht der Verlauf ganz der visuellen Analyse des Radar-Backscatters, siehe Abbildung 24. Der Höhepunkt der Überschwemmung liegt im Pantanal zwischen Februar und April und das Minimum wird im Oktober erreicht (Mittelwerte 2006-2010, Februar: 42.589,37 km², Oktober: 29.345,52 km²). Ein weiteres Maximum ist im August sichtbar.

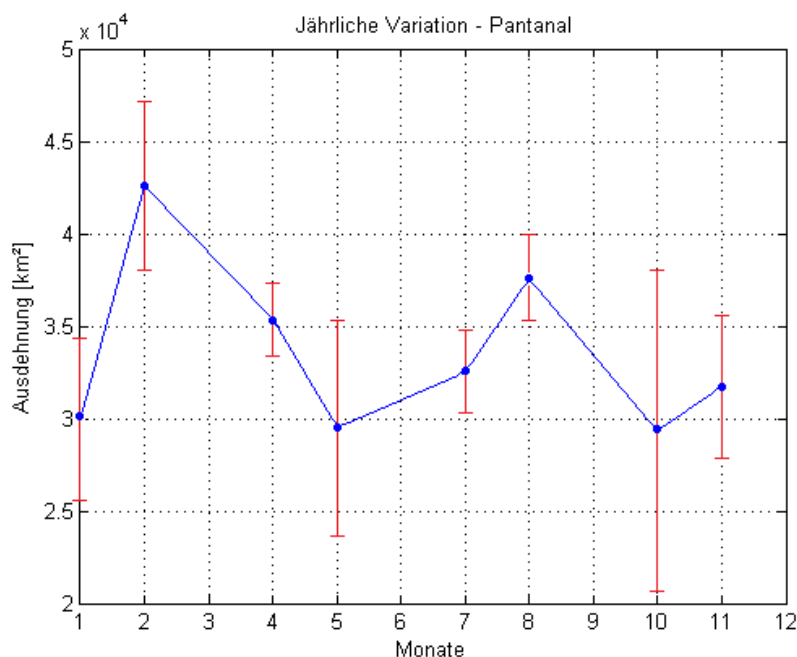


Abb.24 Monatlich gemittelte Überschwemmungsfläche im Pantanal (-11,5 dB & -5 dB)
mit Standardabweichungen

Die visuelle Überprüfung der Ergebnisse ergibt, dass speziell die großen offenen Wasserflächen von Wind beeinflusst werden. Aufgrund der aufgerauten Oberfläche ist keine eindeutige Trennung zwischen Land und Wasser möglich. Aus diesem Grund müssen auch drei Mosaik (M2, M10 und M12) für die weiteren Zeitanalysen aussortiert werden.

Bei der Beurteilung der Flächenausdehnung über die Zeitreihe 2006-2010 fällt auf, dass für das gesamte Pantanal und auch für einzelne Subregionen keine eindeutigen saisonalen Schwankungen erkennbar sind. Ein Beispiel ist die Teilregion NABI, siehe Abbildung 25. Die Gründe hierfür, könnten die unregelmäßige Abdeckung durch ALOS und die zum Teil fehlenden Aufnahmen zu den Zeitpunkten der Extremstände, oder eine Fehlinterpretation der SAR-Daten sein.

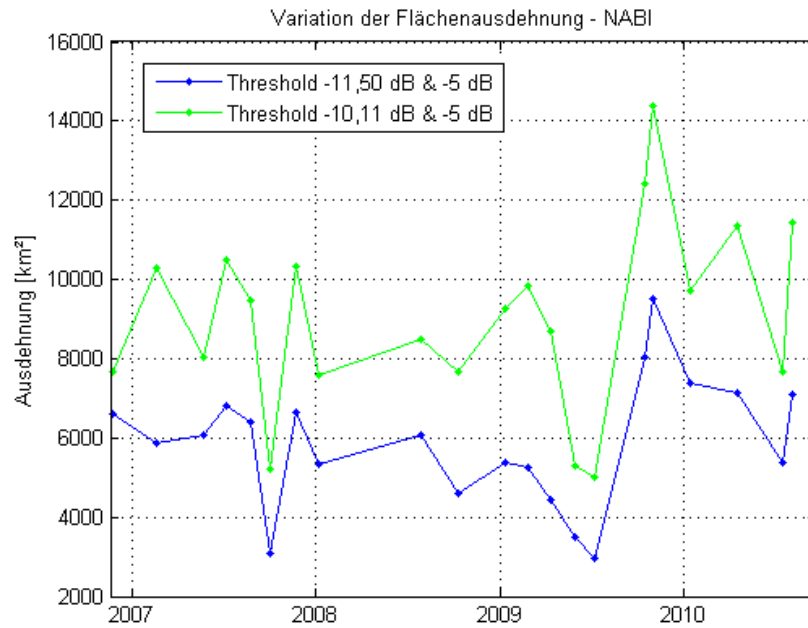


Abb.25 Zeitverlauf der Wasserausdehnung für die Subregion NABI

Nur in dem Teilbereich PARA kann ein saisonales Signal abgeleitet werden (Abb.26). Während die anderen Gebiete von unregelmäßigen Überflutungen betroffen sind, wird die Region PARA hauptsächlich von offenen permanenten Wasserflächen beeinflusst. Nach Evans et al. (2014) besteht die Region PARA (17.043 km²) aus 14% permanenten Wasserflächen (2373 km²), 31% sumpfiger Mixsavanne (5255 km²), 20% sumpfiger Grassavanne (3490 km²) und 16% Auwald (2707 km²).

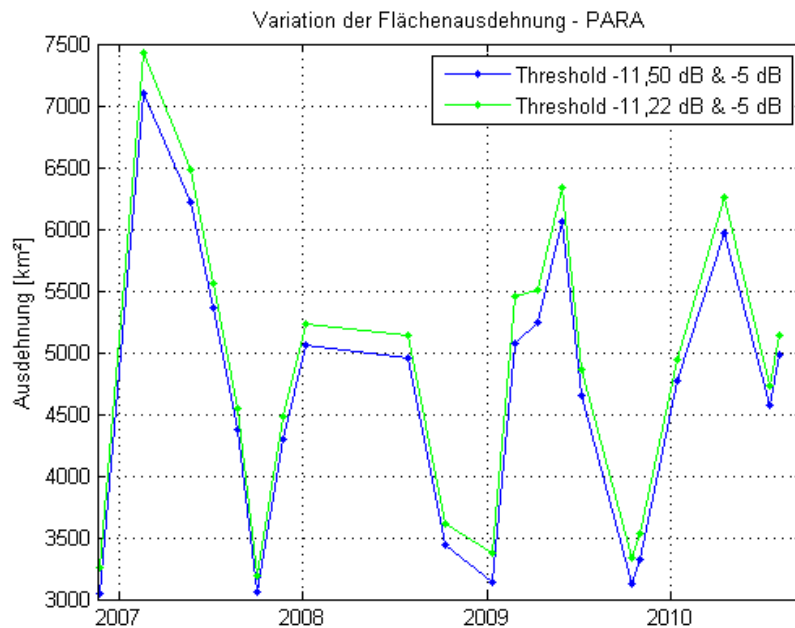


Abb.26 Zeitverlauf der Wasserausdehnung für die Subregion PARA

In Abbildung 26 ist ein gleichmäßiger jährlicher Verlauf sichtbar. Der Vergleich zwischen manuell bestimmten (-11,5 dB) und berechneten unteren Schwellwert (-11,22 dB) zeigt eine große Übereinstimmung. Aufgrund der zum Teil großen Datenlücken (z.B. 2008) sind die genauen Zeiten der größten und geringsten Wasserausdehnung nicht genau ablesbar. Dennoch kann etwa der Höchststand gegen April und der Tiefstand um Oktober herum eingeordnet werden. Auffällig erscheint das Jahr 2009, in dem zwischen Februar und April die Fläche fast konstant bleibt und dann erst Ende Mai, beziehungsweise Anfang Juni den Höhepunkt erreicht. Verglichen mit den Wetterdaten aus Kapitel 3.2 korreliert der Verlauf visuell betrachtet mit den gegebenen Niederschlagswerten, ausgehend von einer zeitlichen Verschiebung von 2-3 Monaten zwischen maximalen Niederschlägen und Überschwemmungen.

In Tabelle 16 sind die dazugehörigen mittleren, maximalen und minimalen Überschwemmungsflächen für die gesamte Zeitreihe aufgelistet.

	PARA	
	<i>-11,5 und -5</i>	<i>-11,22 und -5</i>
<i>Mittelwert</i>	4.657,58 km ²	4.876,27 km ²
<i>Maximum</i>	7.092,36 km ²	7.430,09 km ²
<i>Minimum</i>	3.042,13 km ²	3.196,91 km ²
<i>σ</i>	1.156,66 km ²	1.190,82 km ²

Tab.16 Mittlere, maximale und minimale Überschwemmungsflächen
in der Region PARA (2006-2010)

5.3.3 Vergleich zu anderen Studien

Um die Ergebnisse im Pantanal besser einschätzen zu können, werden sie mit drei unterschiedlichen Studien verglichen, siehe Tabelle 17.

	<i>Hamilton et al., 1996</i>	<i>GIEMS Prigent et al., 2001, 2007</i>	<i>Padovani, 2010</i>	<i>ALOS -11,5 & -5 [dB]</i>
<i>Maximum</i>	110.000 km ²	100.601 km ²	52.894 km ²	45.819,62
<i>Minimum</i>	11.000 km ²	10.173 km ²	5.539 km ²	19.628,77
<i>Mittelwert</i>	53.000 km ²	37.098 km ²	18.329 km ²	33.018,04
<i>Pantanal Fläche</i>	136.927 km ²	139.913 km ²	150.502 km ²	139.923 km²
<i>Untersuchungszeitraum</i>	1979-1987	1993-2007	2000-2009	2006-2010
<i>Sensor</i>	SMMR (wöchentlich)	SSM/I, ERS-1 (SAR-Scat), AVHRR NDVI (monatlich)	MODIS, MOD13 (16-tägig)	PALSAR
<i>Auflösung</i>	0,25°	0,25°	250m	75m

Tab.17 Vergleich zu anderen Studien im Pantanal

Hamilton et al. (1996) bestimmt die Überschwemmungsflächen anhand von passiven Mikrowellenverfahren. Durch die hohe zeitliche Auflösung können Wasserausdehnungen wöchentlich bestimmt werden. Jedoch können diese Daten aufgrund der groben räumlichen Auflösung (0,25°) nicht als Referenzdatensatz gewertet werden.

Um die zeitlichen Flächenvariationen im Pantanal näher untersuchen zu können, wird der Vergleichsdatensatz GIEMS hinzugezogen [Prigent et al., 2001]. GIEMS basiert auf einem Multi-Satellitenbeobachtungsansatz über einen großen Spektralbereich, von sichtbaren Wellenlängen bis zu Mikrowellen. Der Datensatz bietet eine Schätzung der monatlichen Flächenverteilung von Wasser mit einer räumlichen Auflösung von 0,25°. In fünfzehn Beobachtungsjahren von 1993 bis 2007 können die Variabilität und die saisonale Schwankungen der Überschwemmungsfläche global analysiert werden [Prigent et al. 2012]. Die genaue Methode wird von Prigent et al. (2001, 2007) beschrieben. Im Folgenden werden die durchschnittlichen Wasserflächen nur der Vollständigkeit halber genannt und nicht als direkte Referenz angesehen. Da GIEMS hauptsächlich auf dem passiven Mikrowellensignal aufgebaut ist, kann aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Auflösungen keine aussagekräftige Vergleichsbasis geschaffen werden.

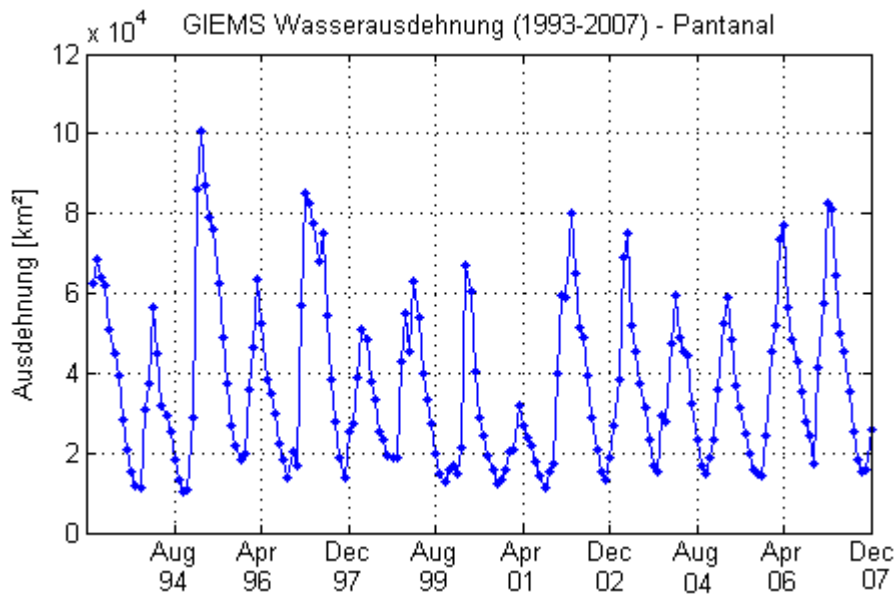


Abb.27 Giems Zeitreihe Pantanal 1993-2007

In Abbildung 27 ist die GIEMS-Zeitreihe (1993-2007) für die entsprechenden Zellen im Pantanal dargestellt. Der Höchststand der Überflutung tritt zwischen Februar und April auf (min: 31.891 km², max: 100.601 km², mean: 67.956 km²), der Tiefststand zwischen September und Dezember (min: 10.173 km², max: 18.751 km², mean: 14.216 km²).

Padovani (2010) benutzt allein optische MODIS Daten um Überschwemmungsflächen im Pantanal über einen Zeitraum von 2000-2009 zu klassifizieren. Mit einer saisonalen Schwankung zwischen 19.628,77 km² und 45.819,62 km² bei den gewählten Schwellwerten von -11,5 dB und -5 dB, liegt die ALOS Klassifizierung im Bereich der Ergebnisse von Padovani (5.539 km² bis 52.894 km²). Auffällig ist, dass in der Trockenphase viel mehr Wasser klassifiziert wird, als bei den anderen Vergleichsdaten. Das Minimum allein für den unteren Schwellwert von -11,5 dB liegt bei 14.956,30 km². Bei Verwendung der einzelnen, an den Subregionen angepassten Schwellwerte und dem unteren Threshold von -5 dB schwankt die Flächenausdehnung zwischen 23.279,34 km² und 54.862,81 km². Demnach ist die Diskrepanz zu den anderen Studien in der Trockenphase noch größer.

Die Analyse der GIEMS-Zeitreihe (1993-2007) für die Subregion PARA (17.779 km²) zeigt den Höchststand der Überschwemmung zwischen März und Mai (Mittelwert 15.002 km²) und den Tiefststand zwischen September und Dezember (Mittelwert 7.623 km²).

Da die zwei Zeitreihen sich nur um ein Jahr überschneiden, kann keine explizite Validierung vorgenommen werden. In Abbildung 28 ist der Jahresverlauf von 2007 für GIEMS und ALOS dargestellt.

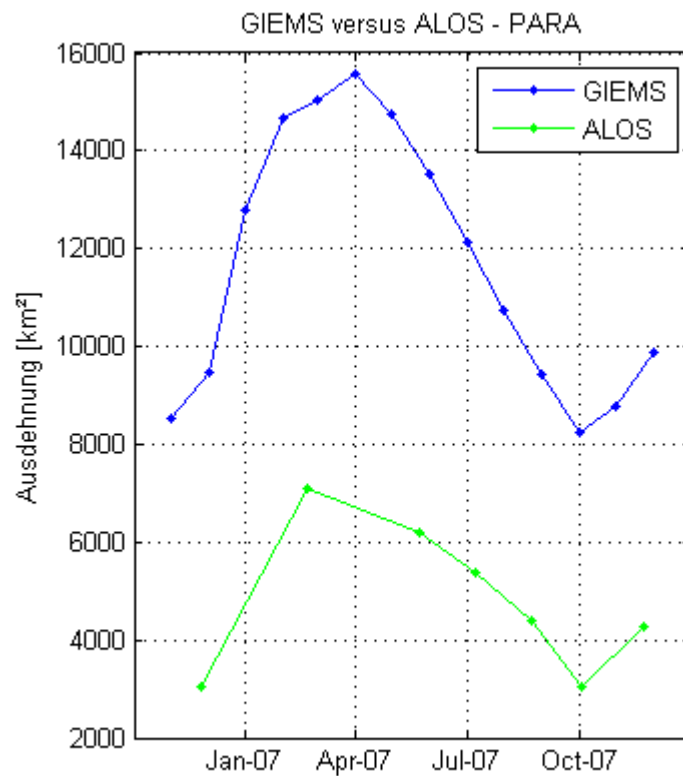


Abb.28 Vergleich von GIEMS und ALOS-Klassifizierung (-11,5dB & -5dB) für das Jahr 2007

Der Vergleich der beiden Datensätze zeigt, dass die Jahreskurven gut zueinander passen. Trotz der ALOS-Datenlücke zwischen März und Mai kann ein ähnlicher Verlauf abgeleitet werden. In beiden Graphen wird das Minimum im Oktober 2007 erreicht.

5.4 Validierung mit optischen Daten

Um die Ergebnisse der ALOS-Zeitreihe auch validieren zu können, werden die zuvor herausgesuchten Landsat-Szenen als Referenzdaten verwendet (Kap. 4.4). Für die Abgrenzung der Wasserflächen wird das Verhältnisbild aus NDVI und NDWI verwendet. Um die Subjektivität bei der Wahl des passenden Thresholds zu vermeiden und das Level der Automatisierung zu steigern wird die Otsu-Methode zur Bildung des Schwellwertes, für jedes Landsat-Bild durchgeführt. Trotz der Suche nach Daten mit weniger als 10% Wolkendecke, befinden sich vereinzelt Wolken in den Bildern. Da diese Werte nicht verwendet werden können, müssen die Bereiche in beiden Datensätzen (Landsat und ALOS) ausmaskiert werden. Hierzu wird der Thermalkanal der Landsat-Aufnahme hinzugezogen, um im ersten Schritt Wolkenbereiche zu extrahieren und anschließend noch manuell nachbearbeiten zu können.

Gesamtgenauigkeit	Kappa κ	Klasse Wasser		
		Producer's A.	User's A.	Kappa κ
ALOS 23./28.08.2007 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 24./25.08.2007				
88,94%	0,23	56,41%	17,85%	0,15
ALOS 10./15.01.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 09./10.01.2009				
89,07%	0,18	71,93%	12,54%	0,11
ALOS 12./17.04.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 15./16.04.2009				
88,31%	0,17	71,38%	11,41%	0,10
ALOS 28.05./02.06.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 02./03.06.2009				
88,16%	0,15	66,97%	10,66%	0,09
ALOS 08./18.07.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 12./13.07.2009				
90,55%	0,20	62,48%	13,89%	0,12
ALOS 15./20.04.2010 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 10./11.04.2010				
86,48%	0,19	72,88%	13,34%	0,11

Tab.18 Klassifizierungsergebnisse für die Schwellwerte -11,5 dB und -5 dB

In Tabelle 18 sind die Genauigkeitswerte der Wasserklassifizierung für die Schwellwerte -11,5 dB und -5 dB dargestellt. Die Kappa Koeffizienten liegen alle unter 0,25 und lassen auf ein schlechtes Klassifizierungsergebnis schließen. Ähnliche Resultate ergeben sich für die, aus der Statistik abgeleiteten unteren Thresholds (-10,14 dB, -11,9 dB, -11,22 dB, -10,11 dB) zusammen mit den oberen Schwellwert von -5 dB.

Bei der Betrachtung des Fehlerbildes in Abbildung 29 ist erkennbar, dass insbesondere in den Gebieten die stark von Savanne, Grasland und Landwirtschaft (TAQF) beeinflusst sind und nur periodische überschwemmt werden, es zu starken Fehlklassifizierungen kommt. Die blauen Regionen im Fehlerbild stellen die Flächen dar, die in beiden Datensätzen als Wasser klassifiziert wurden. Rot hingegen repräsentiert nur die Wassermaske von ALOS und Grün die Ergebnisse des Landsat-Bilds.

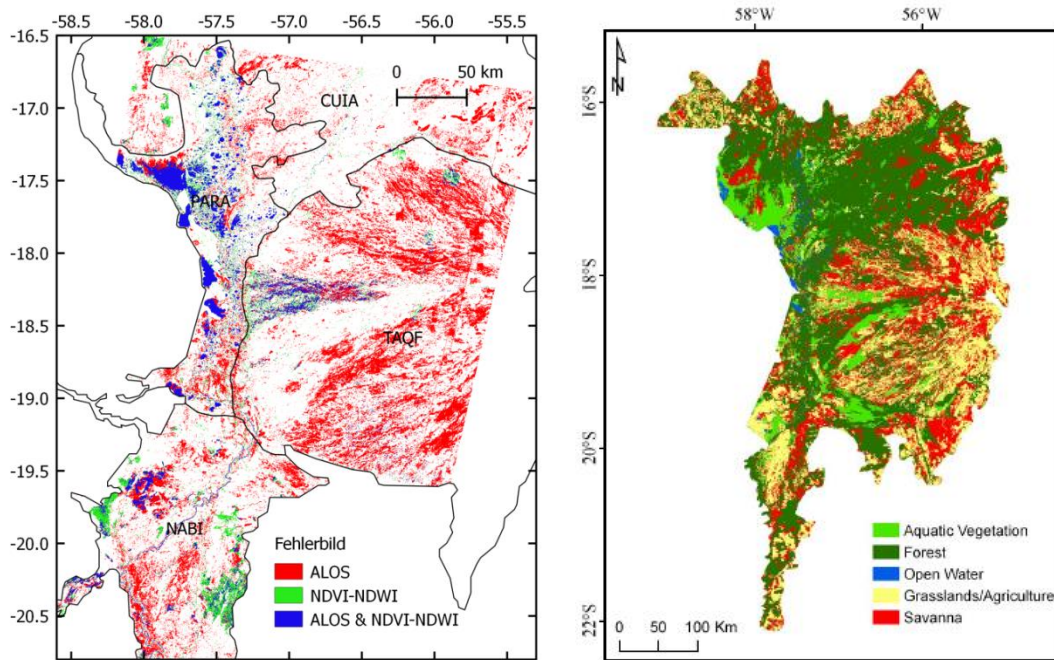


Abb.29 (l.) Validierungsergebnis von ALOS (23./28.08.2007) und Landsat (24./25.08.2007),
(r.) Landbedeckung [Evans et al., 2010]

In der Region PARA werden demnach die offenen Wasserflächen richtig identifiziert. Die Gesamtgenauigkeiten für die Subregion PARA sind in Tabelle 19 gegeben. Während die Kappa Koeffizienten zwischen 0,43 und 0,6 ein akzeptables Ergebnis widerspiegeln, werden an den zwei Zeitpunkten 12./17.04.2009 und 28.05./02.06.2009 nur ausreichende Werte (0,34 & 0,32) erreicht. Auch schon bei der Validierung des gesamten Pantanal war die Genauigkeit dieser Aufnahmen am schlechtesten. Insgesamt ergibt sich aber ein gutes Klassifizierungsergebnis für die Region PARA.

Gesamtgenauigkeit	Kappa κ	Klasse Wasser		
		Producer's A.	User's A.	Kappa κ
ALOS 23./28.08.2007 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 24./25.08.2007				
83,18%	0,50	70,61%	52,02%	0,42
ALOS 10./15.01.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 09./10.01.2009				
90,84%	0,60	77,00%	56,70%	0,51
ALOS 12./17.04.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 15./16.04.2009				
78,50%	0,34	77,68%	30,80%	0,22
ALOS 28.05./02.06.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 02./03.06.2009				
74,76%	0,32	78,12%	30,96%	0,21
ALOS 08./18.07.2009 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 12./13.07.2009				
81,23%	0,43	67,54%	45,29%	0,35
ALOS 15./20.04.2010 (-11,5dB&-5dB) und NDVI-NDWI 10./11.04.2010				
77,75%	0,43	79,00%	43,65%	0,31

Tab.19 Klassifizierungsergebnisse für die Subregion PARA (-11,5 dB und -5 dB)

5.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Validierung hat gezeigt, dass es viele Unsicherheiten bei der Wasserklassifizierung im Pantanal gibt. Im Folgenden werden die auftretenden Komplikationen bei der angewendeten Klassifizierungsmethode im Pantanal erläutert.

Der verantwortliche Mechanismus für die Detektion von Wasser im SAR L-Band ist bekannt. Mikrowellen werden von glatten offenen Wasserflächen spiegelnd vom Sensor wegreflektiert. Das Ergebnis ist eine geringe Rückstrahlintensität. Wind und Regen lassen die Oberflächenrauigkeit deutlich ansteigen, was zum Verlust der bimodalen Verteilung führt und demnach zur Trennung der Landbedeckungsklassen [Bartsch et al, 2012]. Das bedeutet, dass durch den resultierenden Anstieg der Radarrückstreuung keine eindeutige Abgrenzung von Wasser mehr möglich ist. Diese unvorhersehbaren Effekte können jedoch nicht einfach beseitigt werden, da die Windstörungen lokal auftreten und die Grauwerte im Bild höher sein können als Pixelwert über Land [Medina et al., 2010]. In der analysierten Zeitreihe können einige Windeffekte visuell beobachtet werden, insbesondere in den großen Wasserflächen im Nord-Westen des Pantanals. Aus diesem Grund mussten auch 3 Mosaik e entfernt werden. Insgesamt ist es jedoch schwer nachvollziehbar, wo und wie stark der Einfluss auf die Rückstrahlung im Bild ist.

Eine Gegenüberstellung mit der Landbedeckung im Pantanal zeigt, dass vor allem die Fehlklassifizierungen mit landwirtschaftlichen Flächen und Grasland in Verbindung gebracht werden können (siehe Abb.29). Eine Erklärung dafür könnte die Bewässerung der Felder während der Trockenzeit und eine hohe Bodenfeuchte sein. In den über die Zeitreihe gemittelten GLDAS Soil Moisture Daten (siehe Anhang I) ist ein unterschiedliches Bodenfeuchteverhalten innerhalb des Pantanals erkennbar. Insbesondere die Regionen, welche stark von Fehlinterpretationen (TAQF) betroffen sind weisen eine leicht höhere Bodenfeuchte auf.

Um eine genaue Untersuchung der Radarrückstreuung zwischen Wasserflächen und Agrarflächen durchführen zu können, werden mit Hilfe der ESA-CCI 2010 (2008-2012) Landbedeckungskarte (300m Auflösung) [10], die Klassen ≤ 20 für Landwirtschaft und die Klasse 210 für offenen Wasserflächen extrahiert. Für den bessern Vergleich mit den Daten der Studie, wird die Karte zuvor auf 75m Pixelgröße resampelt und ins EQUI7-Grid transformiert. Anschließend werden die mittleren Rückstrahlwerte der Zeitreihe für die einzelnen Klassen analysiert. In Tabelle 20 sind alle Werte dargestellt.

	<i>Offene Wasserflächen</i>	<i>Landwirtschaft</i>
<i>ESA-CCI LC Klasse</i>	210	<= 20
<i>Fläche</i>	3316,43 km ² (589.588 Pixel)	6872,34 km ² (1.221.749 Pixel)
Mean <i>Zeitreihe</i>	-12,04 dB	-11,2 dB
STD <i>Zeitreihe</i>	1,8 dB	1,45 dB
RANGE <i>Zeitreihe</i>	7,69 dB	5,77 dB
Mean <i>Regenzeit</i>	-12,11 dB	-10,91 dB
STD <i>Regenzeit</i>	2,94 dB	1,87 dB
Mean <i>Trockenzeit</i>	-11,93 dB	-11,59 dB
STD <i>Trockenzeit</i>	3,11 dB	2,2 dB

Tab.20 Gemittelte Radarrückstrahlung für Wasser und landwirtschaftliche Flächen

Aus den Werten ist ersichtlich, dass die mittlere Radarstreuung zwischen Wasser und landwirtschaftlichen Feldern nur minimal unterschiedlich ist. Die höheren Range Werte bei den Wasserflächen resultieren aus den oben beschriebenen Windeffekten. Während in der Regenzeit von Oktober bis April die zwei Klassen besser getrennt werden können, ist eine Separierung in der Trockenzeit (Mai-September) so gut wie nicht möglich. Es ist auch klar erkennbar, dass die Rückstrahlung von Wasser sich jahreszeitlich nur kaum ändert (0,18 dB). Hingegen kann eine Bearbeitung der landwirtschaftlichen Flächen beziehungsweise eine veränderte Struktur in der Radarrückstreuung (0,68 dB) abgelesen werden. Aufgrund der ähnlichen Rückstrahlcharakteristik zwischen Wasser und landwirtschaftlichen Flächen ist vor allem zur Trockenzeit, eine einfache Unterscheidung der beiden Klassen allein anhand der Amplitudenbilder nicht möglich.

Insgesamt spielt die Landbedeckung eine entscheidende Rolle für die Wasserklassifizierung im Pantanal. Um eine akkurate Wasserdetektion durchführen zu können, ist eine genaue Untersuchung der Radarrückstrahlcharakteristik der verschiedenen vorkommenden Landbedeckungsarten notwendig. Da sich neben den unterschiedlichen Streuungsmechanismen (siehe Tab.21), auch die Intensität der Radarsignale je nach Zusammensetzung der Vegetation ändert. Nach Hill et al. (1999) können die Rückstrahlwerte von Grasland und Weiden zwischen -8.8 dB und -23,1 dB im L-Band schwanken. Die große Spannweite ist auf die unterschiedlichen Pflanzenarten und bei kompletter Überschwemmung auf die spiegelnde Reflexion zurückzuführen. Insgesamt besteht eine starke Variabilität bei niedrigen Landbedeckungen.

Des Weiteren können Radar Parameter wie das Signal-to-Noise Verhältnis (SNR) die Fähigkeit zwischen offenen Wasserflächen und dunklen Objekten, wie beispielsweise kahlen Boden, zu unterscheiden beeinflussen [Chapman et al., 2015].

Klasse	Mechanismus
Wald Überflutet Nicht überflutet	Double-Bounce Effekt Volumen- Mehrfachstreuung
Savanne Überflutet Nicht überflutet	Double-Bounce Effekt Volumenstreuung
Gras /Landwirtschaft Überflutet Nicht überflutet	Spiegelnde Reflexion Volumenstreuung
Aquatische Vegetation	Volumenstreuung bis spiegelnde Reflexion
Offene Wasserfläche	Spiegelnde Reflexion

Tab.21 Rückstrahlmechanismus für verschiedene Landbedeckungsklassen im Pantanal

[nach Costa et al.,2009]

Da keine weiteren Referenzen über Extremereignisse beispielsweise Starkregen zum Zeitpunkt einer Aufnahme vorliegen, können Fehlinterpretationen der SAR Rückstrahlung nicht ausgeschlossen werden. Für eine detaillierte Zeitreihenanalyse müssten die unsicheren Gebiete ausmaskiert werden. Hierfür sind Zusatzinformationen, wie beispielsweise Bodenfeuchtedaten (GLDAS, etc.) nötig.

Eine Klassifizierungsmethode gilt als robust, wenn die Wasserkategorie von anderen Landbedeckungen getrennt werden kann. [Bartsch et al, 2012]. Allein auf Basis der Amplitudenbilder und der Bildung eines Schwellwertes ist dies im Pantanal nicht gewährleistet. Die angewendete Methode ist deshalb nur eingeschränkt einsetzbar. Die Wasserflächen entlang des Paraguays können eindeutig erkannt werden, hingegen sind die Ergebnisse in Gebieten mit diversen Vegetationsformen nicht vertrauenswürdig, wie Kapitel 5.4 zeigt.

6 Verknüpfung von SAR und Satellitenaltimetrie

Im folgenden Kapitel werden die Fernerkundungsdaten mit denen der Satellitenaltimetrie kombiniert. Die Ergebnisse der horizontalen Ausdehnung sollen mit den Höhevariationen verknüpft werden, um das Wasservolumen ableiten zu können. Die Validierung der SAR-Klassifizierung hat gezeigt, dass es im Pantanal einige Unsicherheiten bezüglich der genauen Bestimmung der Wasserflächenausdehnung gibt. Nur für die offenen Wasserflächen entlang des Paraguays, können die Variationen mit hoher Wahrscheinlichkeit berechnet werden. Aus diesem Grund wird ein Testgebiet in der Subregion PARA verwendet um die Volumenvariationen zu bestimmen

Des Weiteren wird eine Analyse durchgeführt, um die Möglichkeit der Identifizierung von Wasserflächen anhand von σ_0 Backscatter der Altimetrie zu testen.

6.1 Vergleich mit Altimeter-Backscatter

Als erstes werden die Klassifizierungsergebnisse der Wasserausdehnung mit zeitgleich gemessenen Altimeterechos verglichen. Es soll untersucht werden, ob man aus der Charakteristik der Sigma0 Backscatter des ENVISAT Altimeters, Rückschlüsse über das Vorliegen einer Wasserfläche ziehen kann. Hierfür werden beispielhaft drei Testgebiete (T) im Pantanal ausgewählt, die in Abbildung 30 dargestellt sind. Die Testgebiete T1 und T2 repräsentieren permanente offene Wasserflächen, wobei T1 die größten Seen des Pantanals abdeckt. Im Testgebiet 3 kann vor allem ganzjährige aquatische Vegetation beobachtet werden. Die Auswahl der Regionen basiert auf den Validierungsergebnissen der Klassifizierung und der Lage der ENVISAT Satellitenpässe. Demnach liegen sie in einem Bereich, in dem die Wasserflächen mit ALOS ausreichend genau bestimmt werden können.

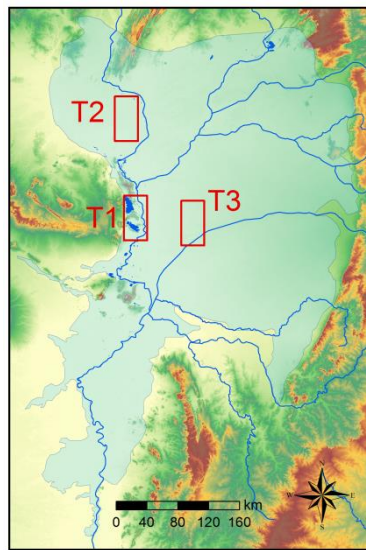


Abb.30 Ausgewählte Testgebiet T1, T2 und T3 [1,2]

Es wird jeweils eine Aufnahme zur Trockenzeit und zur Regenzeit aus der Zeitreihe verwendet. Dabei wird darauf geachtet, dass der zeitliche Offset zwischen ALOS und ENVISAT so gering wie möglich ist. Die gewählten Zeitpunkte sind in Tabelle 22 aufgelistet.

	<i>Trockenzeit</i>	<i>Regenzeit</i>
<i>ALOS</i>	28.08.2007	13.01.2008
<i>ENVISAT</i>		
<i>T1 (Pass 693)</i>	14.09.2007	28.12.2007
<i>T2 (Pass 220)</i>	28.08.2007	15.01.2008
<i>T3 (Pass 149)</i>	26.08.2007	13.01.2008

Tab.22 Ausgewählte Zeiten für ALOS und ENVISAT

Zu den zwei jeweiligen Zeiten, werden aus den in Kapitel 4.3 beschriebenen vorverarbeiteten ENVISAT SGDR-Files, die σ_0 Werte für das Ku- und das S-Band sowie die ALOS Rückstrahlwerte für jeden Altimeterpunkt ausgelesen und analysiert. Da es während der Missionsdauer von ENVISAT zur Störung des S-Bandes kam, können nur bis 17.01.2008 gesicherte Werte verwendet werden [ESA, 2011].

Des Weiteren werden Landsat-Szenen vom 24.08.2007 und 22.12.2008 für die Testgebiete T1 und T2 und für das Testgebiet T3 vom 25.08.2007 und 01.02.2008 hinzugezogen.

Ein vorab durchgeführter Vergleich zwischen den ALOS Radarrückstrahlwerten und den Landsat NDVI-NDWIs aller 474 Altimeterpunkte der drei Testgebiete (jeweils 158), ergeben die Gesamtgenauigkeiten von 87,76% (Producer's Accuracy: 76,02%, Users's Accuracy 88,44%) und 86,10% (Producer's Accuracy: 91,47 %, Users's Accuracy: 68,21%), entsprechend für die ALOS Aufnahmen vom 28.08.2007 und 13.01.2008. Die verwendeten universalen Schwellwerte liegen bei -11,5 dB und -5 dB für ALOS sowie 0,7 für Landsat NDVI-NDWI. Für die Bildung dieser Werte werden die gleichen Methoden angewendet, wie in früheren Kapiteln beschrieben. Bei den optischen Daten wird auf Basis der Otsu-Analyse der Threshold manuell angepasst.

Satellitenaltimetrie kann verwendet werden, um Gewässer vom Weltraum aus zu beobachten. Der Rückstrahlkoeffizient σ_0 (in dB) ist eine Funktion der Energie des zum Altimeter zurückkommenden Signals. Befindet sich eine Wasserfläche innerhalb des Footprints, dominiert sie das zurückkommende Signal. Aus diesem Grund sind die Rückstrahlwerte sehr viel stärker als über Landflächen [Michailovsky et al., 2012]. Im Gegensatz zu SAR sind die Werte positiv, was zu einer negativen Korrelation der Datensätze führt. Je nach Untersuchungsgebiet unterscheiden sich in der Literatur die festgelegte Grenze zwischen Wasser und Land. Michailovsky et al. (2012) definieren einen Schwellwert größer als 20 dB für das Monitoring von Flüssen im Zambezi Becken.

Eine erste visuelle Untersuchung der Altimeter Rückstrahlung mit der SAR Wassermaske zeigt, dass vor allem im Testgebiet 1 (Abb.31) die großen Seen so gut wie gar nicht erkannt werden. Allein durch die Interpretation von Sigma0 kann keine Trennung zwischen Land und Wasser erfolgen. Nur im S-Band kann zur Zeit der Trockenphase am 14.09.2007 die Seefläche eindeutig bestimmt werden und somit eine Korrelation ($r = -0,7$) mit ALOS festgestellt werden. Die Gründe dafür könnten die auftretenden Windeffekte, der Einfluss der Topographie, speziell der umliegenden Bergkette, beziehungsweise ein geändertes Altimeterverhalten über den großen Wasserflächen sein. Um dieses Phänomen nicht auf eine zufällige Auswahl zu begründen, wird ein weiterer Zeitpunkt am 23.11.2007 überprüft an dem ALOS und ENVISAT (693/63) am selben Tag aufgenommen haben. Auch hier lässt sich keine große Übereinstimmung erkennen ($r = -0,28$ für Ku-Band und $r = -0,4$ für S-Band). Die genauen Faktoren, die zu diesem Effekt führen, können nicht mit Bestimmtheit definiert werden. Jedoch kann die Aussage getroffen werden, dass dieser Fehler notorisch in diesem Gebiet auftritt. Die gemittelten σ_0 Werte entlang des Passes betragen 31,66 dB und 35,97 dB für den 14.09.2007 und 25,35 dB und 28,71 dB für den 28.12.2007, jeweils für Ku- und S-Band. Man erkennt deutlich einen Unterschied zwischen der Regen- und Trockenzeit. Während der Phase hohen Niederschlages sind die Rückstrahlwerte um einiges niedriger.

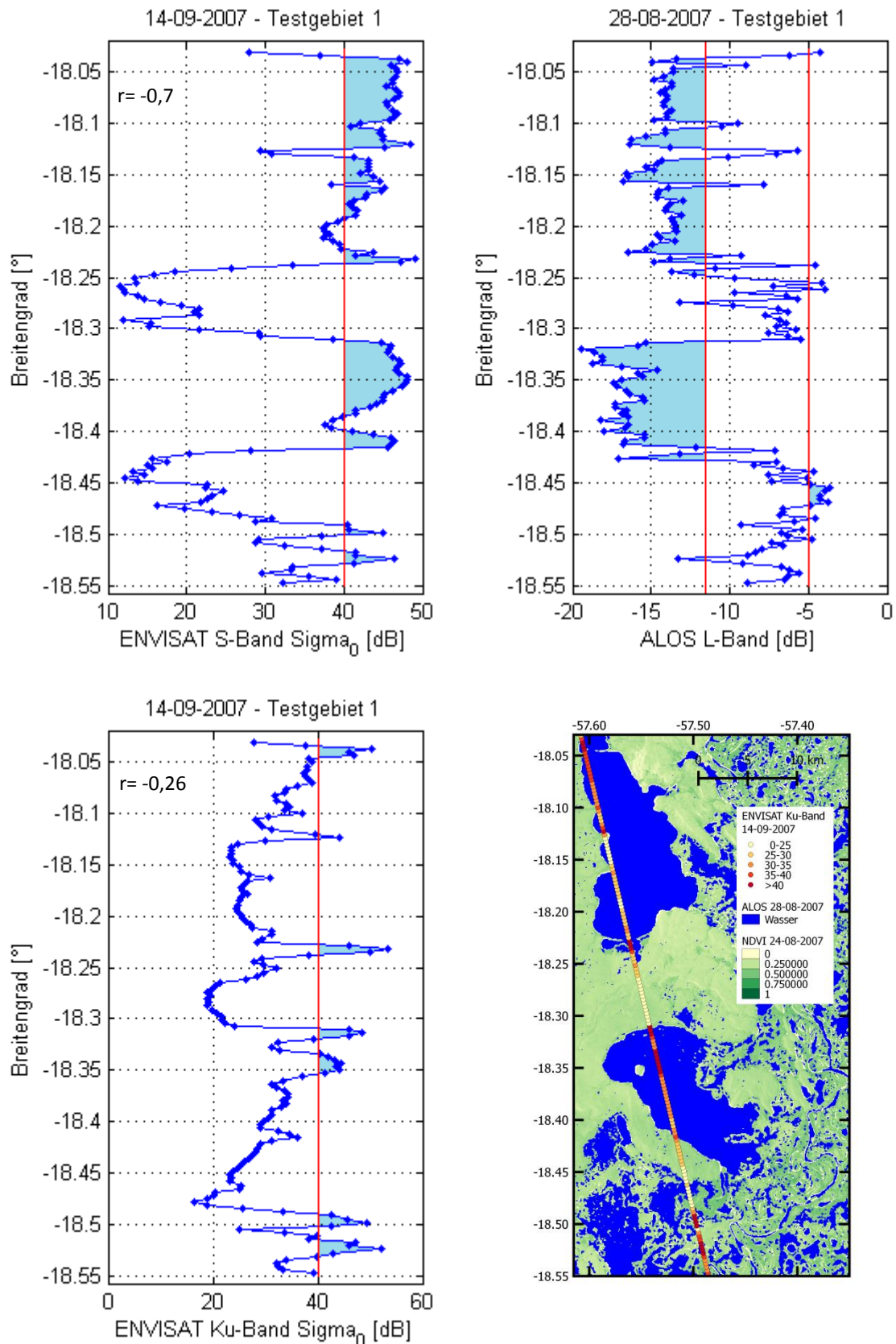


Abb.31 Vergleich der Rückstrahlungen zwischen ALOS L-Band (28.08.2007) sowie Ku- und S-Band (14.09.2007) im Testgebiet 1, ENVISAT Track 693

Das Gebiet T2 (siehe Abb.32) ist geprägt durch viele kleinere offene Wasserflächen. Da sich mehrere Wasserflächen innerhalb des Altimeter-Footprints, mit einem Durchmesser von bis zu 10 km befinden, können die σ_0 Werte nicht direkt mit dem Punkt unter dem Satelliten (Nadir) in Verbindung gebracht werden. Aus diesem Grund ist es schwer eine Korrelation mit dem SAR Backscatter des Nadirpunkts zu finden. Der Versuch die SAR Rückstrahlwerte innerhalb des Footprints um den Altimeterpunkt zu mitteln, ergab nur eine Glättung des Profils. Ein anderer Ansatz wäre die Bestimmung der Extremwerte in der Pufferzone, um das Altimeterverhalten zu synchronisieren.

Am 28.08.2007 ergibt sich eine Korrelation von $r = -0,47$ für das S-Band. Ansonsten können keine linearen Zusammenhänge ermittelt werden ($r = -0,1$ bis $r = -0,3$). Die mittlere Altimeterrückstrahlung bleibt zu beiden Zeitpunkten annähernd konstant. Für das Ku-Band 41,15 dB und 41,75 dB und für das S-Band 40,5 dB und 41,20 dB, jeweils für Trocken- und Regenzeit.

Im Testgebiet 3 wird die Landbedeckung stark durch Wasser und aquatischer Vegetation bestimmt. Dieser Bereich erstreckt sich über ein Band von etwa 22km Breite. Des Weiteren durchkreuzen drei Flüsse das Gebiet von Ost nach West. In der Abbildung 33 können die jeweiligen Flüsse als kleinere Peaks im Ku-Band registriert werden. Dagegen fallen sie bei ALOS unter die räumliche Auflösung und werden nicht erkannt. Insgesamt muss zwischen den unterschiedlichen Auflösungen der beiden System unterschieden werden. Bei SAR-Bildern wird nur anhand eines Pixels (hier 75m) bestimmt, ob es sich um Wasser handelt oder nicht. Hingegen wird der Rückstrahlungskoeffizient des Altimeters aus den einzelnen Objekten und Eigenschaften innerhalb des Footprints ($\varnothing 10\text{km}$) gebildet. Aus diesem Grund erscheinen in T3 bei ALOS nur einzelne Peaks, während bei ENVISAT ein durchgehendes Wasserband erkennbar ist.

Am 13.01.2008 liegt der Korrelationskoeffizient für beide ENVISAT Frequenzen bei $r = -0,44$, indessen wird am 26.08.2008 nur noch eine Übereinstimmung von $r = -0,32$ (S-Band) und $r = -0,26$ (Ku-Band) mit ALOS erreicht. Ähnlich wie schon bei T2 variieren die durchschnittlichen σ_0 Werte kaum. Im Ku-Band 39,6 dB und 40,87 dB und im S-Band 36,86 dB und 39,38 dB, jeweils in der trockenen und feuchten Periode. In beiden Fällen sind auch generell in der Regenzeit die Rückstrahlkoeffizienten höher. Umso gegensätzlicher sind die Verhältnisse im Testgebiet 1. Dies lässt darauf schließen, dass aufgrund der äußeren Einwirkungen die σ_0 Werte in T1 stark beeinflusst werden.

Abgesehen von der Diskrepanz zwischen Ku-Band und S-Band am 14.09.2007 im Testgebiet 1 sind die zwei Frequenzen zwischen $r=0,81$ und $r=0,96$ korreliert. Insgesamt passt jedoch das S-Band besser zu dem L-Band von ALOS, als das kurzwellige Ku-Band.

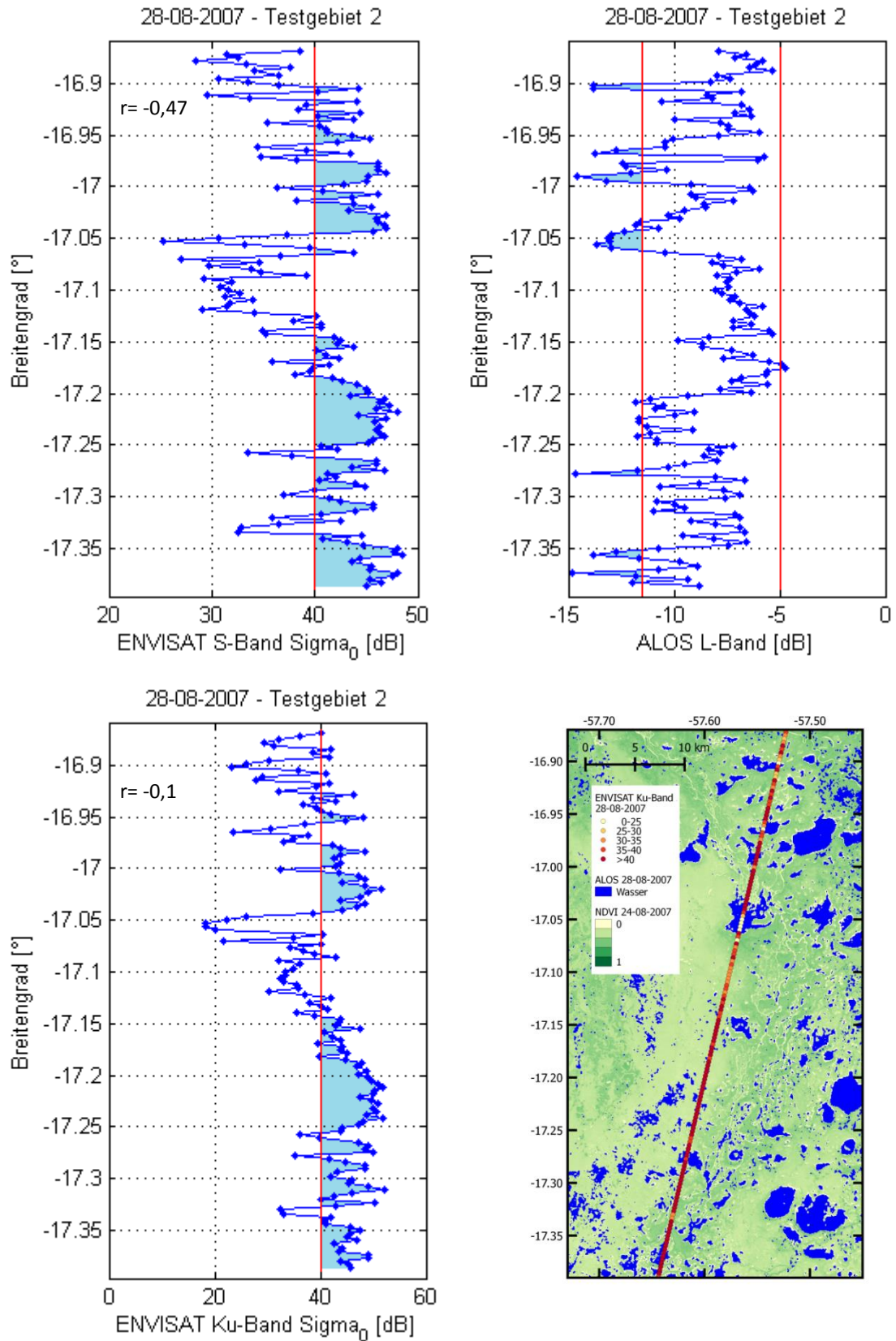


Abb.32 Vergleich der Rückstrahlungen zwischen ALOS L-Band sowie Ku- und S-Band am 28.08.2007 im Testgebiet 2, ENVISAT Track 220

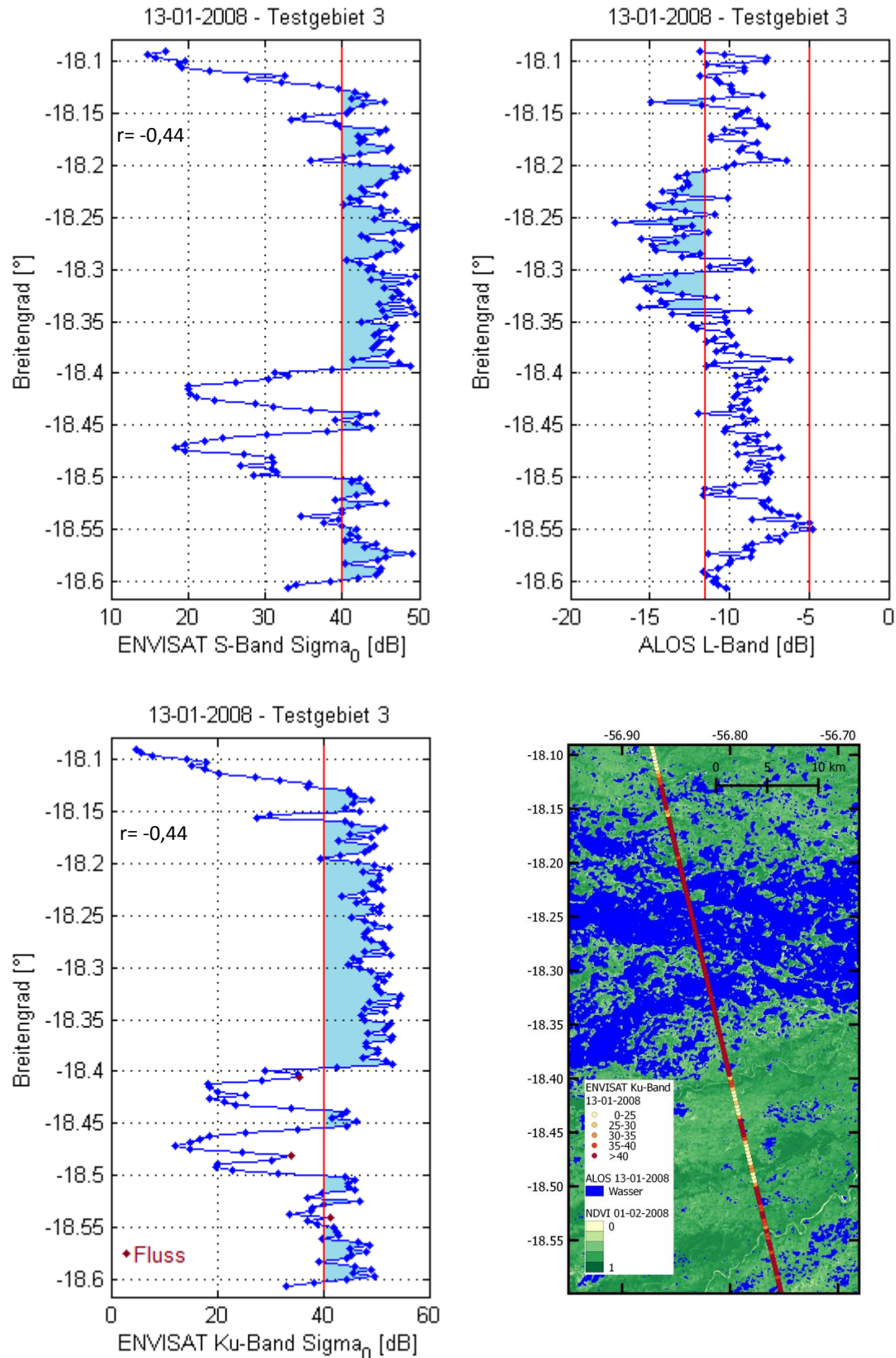


Abb.33 Vergleich der Rückstrahlungen zwischen ALOS L-Band sowie Ku- und S-Band am 13.01.2008
im Testgebiet 3, ENVISAT Track 149

Für eine qualitative Analyse der Klassifizierungsergebnisse von ENVISAT, wird ein universaler Schwellwert von 40 dB festgelegt. Dieser wird nach visueller Interpretation und Berücksichtigung der mittleren Sigma0 Rückstrahlwerten der zwei Testgebiete 2 und 3 bestimmt ($\sigma_{ku}=40,84$ dB, $\sigma_s=39,49$ dB). In den unten stehenden Konfusionstabellen (Tab.23) sind die Ergebnisse der gesamten quantitativen Analyse der beiden Gebiete T2 und T3, für Ku- und S-Band dargestellt. Werden Trocken- und Regenperiode einzeln betrachtet, sind die Gesamtqualitäten der Klassifizierung im August leicht höher (Ku-Band 49,05% und 47,78%, S-Band 59,49% 51,9%).

ALOS σ	ENVISAT σ_0 ku-Band		TOTAL
	Wasser	kein Wasser	
Wasser	106	29	135
kein Wasser	297	200	497
TOTAL	403	229	632

Gesamtqualität 48,42%

ALOS σ	ENVISAT σ_0 S-Band		TOTAL
	Wasser	kein Wasser	
Wasser	115	20	135
kein Wasser	260	237	497
TOTAL	375	257	632

Gesamtqualität 55,7%

Tab.23 Konfusionsmatrix für T2 und T3 im Ku-Band (o.) und S-Band (u.) für einen Threshold von 40dB

Die beispielhafte Untersuchung an drei Testgebieten hat gezeigt, dass Altimetrie zur Identifizierung von Wasser verwendbar ist, jedoch einige Herausforderungen und Komplikationen mit sich bringt. Über großen offenen Wasserflächen kommt es zu einer Änderung des Altimeterverhaltens. Statt der typischen schmalen und spitzen Waveforms über kleinen Inlandgewässern, ergeben sich Echos ähnlich wie bei Ozeanen. Dieses Phänomen ist vor allem im Testgebiet 1 zu beobachten. In Regionen mit vielen kleinen Wasserflächen ist der Einfluss der Umgebung groß. Auch Gewässer die am Rand des Altimeter-Footprints liegen, können die Rückstrahlung dominieren. Dementsprechend entstammt nicht immer das Hauptsignal vom Punkt unterhalb des Satelliten. Gute Ergebnisse ergeben sich im Pantanal für größere zusammenhängende aquatische Vegetation. Des Weiteren können vereinzelte Flüsse erkannt werden. Der Vergleich zwischen Trocken- und Regenzeit deutet auf eine bessere Bestimmbarkeit im August, jedoch können dazu keine eindeutigen Aussagen getroffen werden.

6.2 Zeitreihenanalyse

Die Validierung der ALOS Klassifizierung hat ergeben, dass vor allem in der Subregion PARA die Wasserflächen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können. Aus diesem Grund wird in der weiteren Studie ein Testgebiet (ähnlich zu T2) in dieser Region festgelegt (siehe Abb.34), um den saisonalen Verlauf des Wasservolumens zu analysieren. Hierfür wird zum einen die horizontale Wasserausdehnung aus SAR Daten und zum anderen die Höhenvariation aus den Altimeterdaten verwendet. Der gewählte ENVISAT Track hat die Passnummer 220. Es wird darauf geachtet, dass die beiden Datensätze etwa zur gleichen Zeit sind (1-Nächster-Nachbar). In Tabelle 24 werden alle Zeitpunkte aufgelistet. Aufgrund der unterschiedlichen Systeme ergeben sich teilweise längere Zeitspannen zwischen den beiden Aufnahmen.

<i>ENVISAT RA-2</i>	<i>ALOS PALSAR Mosaik</i>
2006-11-21	2006-11-25 / 2006-12-02
2007-03-06	2007-02-20 / 2007-03-02
2007-05-15	2007-05-23 / 2007-05-28
2007-07-24	2007-07-08 / 2007-07-13
2007-08-28	2007-08-23 / 2007-08-28
2007-10-02	2007-10-03 / 2007-10-13
2007-11-06	2007-11-23 / 2007-11-28
2008-01-15	2008-01-08 / 2008-01-13
2008-07-08	2008-07-27 / 2008-08-06
2008-10-21	2008-10-10 / 2008-10-15
2009-02-03	2009-01-10 / 2009-01-15
2009-04-14	2009-04-12 / 2009-04-17
2009-05-19	2009-05-28 / 2009-06-02
2009-07-28	2009-07-08 / 2009-07-18
2009-10-06	2009-10-13 / 2009-10-18
2009-11-10	2009-10-30 / 2009-11-04
2010-01-19	2010-01-13 / 2010-01-18
2010-03-30	2010-04-15 / 2010-04-20
2010-07-13	2010-07-16 / 2010-07-21
2010-08-17	2010-08-02 / 2010-08-10

Tab.24 Verwendete ENVISAT- und ALOS-Aufnahmen

6.2.1 Wasserausdehnung

Ein bestimmender Nachteil der Satellitenaltimetrie ist, dass nur entlang des Passes gemessen wird. Aus diesem Grund müssen die Wasserflächen in dieser Beleuchtungszone extrahiert werden, um sie anschließend mit den gemessenen Höhen des Altimeters in Verbindung setzen zu können. Als Datengrundlage wird die klassifizierte Wassermaske mit den Schwellwerten -11,5dB und -5dB verwendet, siehe Kapitel 5. Im ersten Schritt wird hierfür ein Buffer von $0,04^\circ$ um den Altimeter Track (220) gelegt, das entspricht in etwa einem Footprint von 8,8 km. Anschließend wird diese Spur zwischen $17,4^\circ\text{S}$ und $16,8^\circ\text{S}$ geographischer Breite in $0,1^\circ$ Abschnitte ($\sim 11,5\text{km}$) unterteilt. Jedes der sechs entstehenden Segmente (siehe Abb.34) hat eine Größe von 100 km^2 . Für diese Flächenabschnitte kann nun die Anzahl der klassifizierten Wasserpixel zu jedem Zeitpunkt bestimmt und die horizontale Ausdehnung berechnet werden. Ein Vergleich mit einem kleineren gewählten Footprint von etwa 4,4 km (Buffer $0,02^\circ$) zeigt, dass beide Ergebnisse stark korreliert sind ($r=0,84$ (a5) bis $r=0,99$ (a3)) und sich nur in den Ausmaßen der Wasserausdehnung unterscheiden. Im Folgenden wird jedoch mit dem größeren Footprint weitergerechnet, da dieser annähernd dem von ENVISAT entspricht.

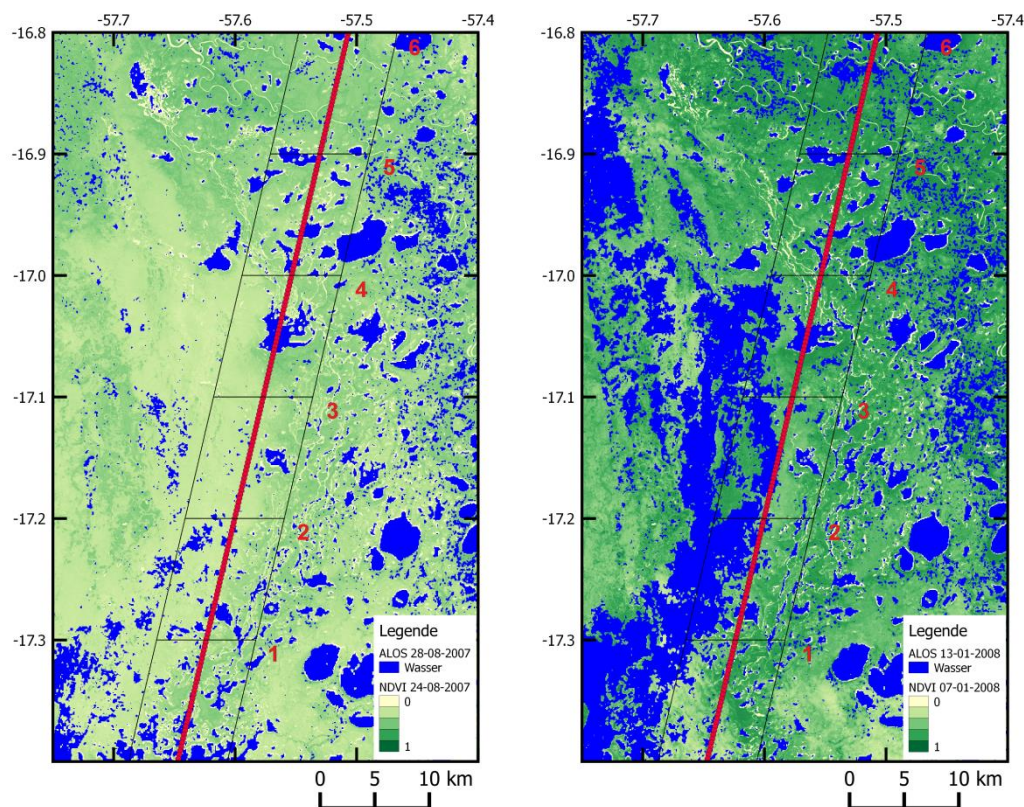


Abb.34 Gewähltes Testgebiet zum Zeitpunkt der Trocken- und Regenzeit

In Abbildung 35 sind die Zeitreihen aller sechs Beobachtungszellen dargestellt. Man kann deutlich erkennen, dass die Zelle a2 periodisch stark überflutet wird. In Segment a5 ist wiederum eine Deutung der Saisonalität so gut wie gar nicht möglich. Die restlichen Zellen sind hauptsächlich geprägt von permanenten Wasserflächen, wobei Abschnitt a6 im Gegensatz zu den anderen, stark von Double-Bounce Effekten beeinflusst wird.

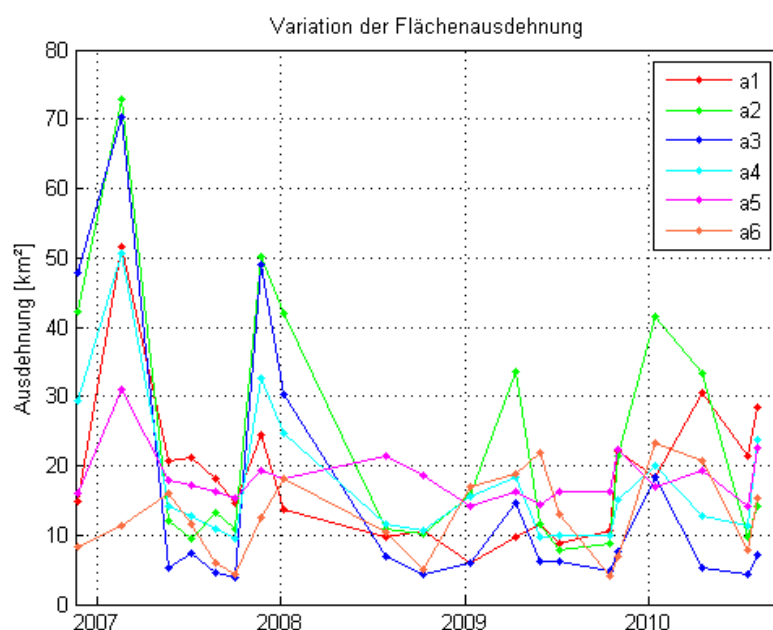


Abb.35 Variation der Flächenausdehnung (Thresholds: -11,5dB & -5 dB, Buffer: 0,04°)

Der lineare Zusammenhang zwischen den benachbarten Zellen ist in Tabelle 25 gegeben. Insbesondere die Zellen a2 und a3 sowie a3 und a4 sind stark korreliert. In diesen Bereichen tritt auch ein regelmäßiges Überschwemmungsmuster auf. Hingegen kann zwischen a5 und a6 kein Zusammenhang festgestellt werden.

<i>Threshold -11,5&-5</i>	
<i>(Buffer 0,4°)</i>	
a1a2	r= 0,61
a2a3	r= 0,91
a3a4	r= 0,95
a4a5	r= 0,69
a5a6	r= 0,00

Tab.25 Korrelation der benachbarten Segmente

6.2.2 Wasserhöhen

Wasserhöhen können aus Radar Altimetrie nur abgeleitet werden, wenn sich im Footprint des Satelliten auch eine Wasserfläche befindet. Um eine Zeitreihe zu erzeugen wird der ENVISAT Track (220) in $0,1^\circ$ große Zellen aufgeteilt (siehe Abb.34). Dadurch sind rund 30 Altimetermessungen, bei einer räumlichen along-track Auflösung von $\sim 375\text{m}$, für jedes Segment und Überflug gesichert.

Die hier verwendeten Höhen der sechs Zellen wurden am DGFI prozessiert und zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wird nur kurz auf die Berechnung der Wasserhöhenzeitreihe aus den SGDR Daten eingegangen. Detaillierte Informationen sind in Dettmering et al. (under review) zu finden.

Für eine genaue Höhenberechnung müssen die Reflexionen über Land eliminiert werden. Die Extrahierung von Oberflächeneigenschaften kann auf Basis der Waveforms oder durch Interpretation der Rückstrahlkoeffizienten σ_0 erfolgen. Durch Verwendung eines Thresholds kann einfach zwischen hohen Rückstrahlungen über Wasser und niedrigen über Land unterschieden werden. Nach Dettmering et al. (under review) ergeben beide Methoden ähnliche Ergebnisse. Das hier durchgeführte Verfahren beruht auf der Klassifizierung von Waveforms. Dies geschieht durch Anwendung eines gewählten Schwellwertes auf waveform-bezogene statistische Parameter wie Schiefe, Kurtosis, Spitze, Maximalleistung und Signal-to-Noise Verhältnis. Der genaue Klassifizierungsansatz ist bei Schwatke et al. (2015) gegeben. Um anschließend hoch genaue Höhen bestimmen zu können, wird ein geeigneter Waveform Retracker für alle Altimeter Echos angewendet. Nach der präzisen Vorprozessierung kann die Wasserhöhenzeitreihe durch die Bildung des Medians bestimmt werden. Dabei werden alle Messungen eines Segments benutzt um den Median und die Standardabweichung der Höhenwerte zu berechnen [Dettmering et al., under review].

In Abbildung 36 sieht man den jährlichen Verlauf der Wasserhöhen. Der Höhepunkt des Wasserstandes liegt im Testgebiet demnach zwischen März und Mai.

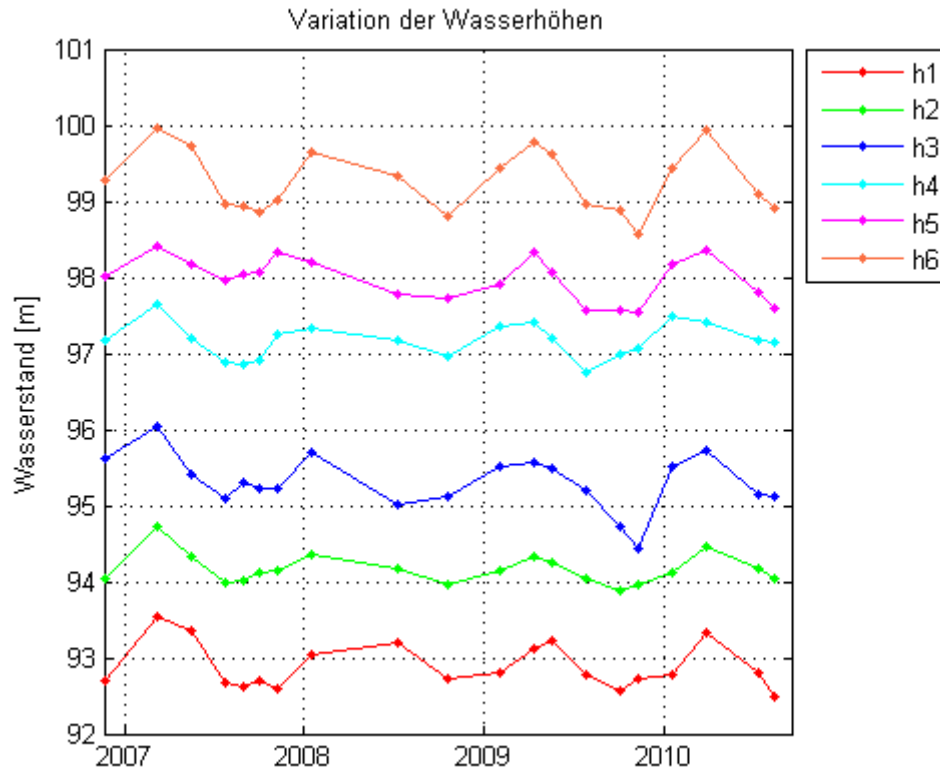


Abb.36 Abgeleitete Höhenvariation der einzelnen Segmente (1-6)

Die hier dargestellten Verläufe repräsentieren nur die ausgewählten Höhenlevel, welche zeitlich mit den ALOS-Bildern übereinstimmen (siehe Kap.6.2). Aus den gesamten ENVISAT-Daten kann hingegen eine Zeitreihe mit einer zeitlichen Auflösung von 35 Tagen generiert werden.

6.2.3 Berechnung der Volumenvariationen

Für die Berechnung der Volumenvariationen werden die horizontalen Ausdehnungen aus SAR-Daten und die aus Altimetermessungen abgeleiteten vertikalen Veränderungen kombiniert. In Tabelle 26 ist die Übereinstimmung der Zeitverläufe von Höhe und Fläche für jede Zelle verdeutlicht. Daraus ist ersichtlich, dass vor allem in den Segmenten 2, 4 und 6 die Zeitreihen annähernd korreliert sind. Wie schon zuvor beschrieben, kann im Segment 5 aufgrund der fehlenden messbaren Jahresschwankungen der Flächenausdehnung, kein linearer Zusammenhang zur Höhe hergestellt werden. Die Korrelation ist jedoch keine Voraussetzung für eine richtige Volumenberechnung, mehr wird sie durch die vorliegende Topographie bestimmt. Je nach dem kann die Höhe gleich bleiben und das Wasser nur in die Fläche fließen oder etwa bei stärkeren Vertiefungen bleibt die Fläche konstant und nur die Höhe variiert. Beide Fälle führen zu einer schlechten Korrelation.

<i>Zelle</i>	<i>Korrelation</i>
1	r= 0,35
2	r= 0,63
3	r= 0,53
4	r= 0,64
5	r= 0,14
6	r= 0,71

Tab.26 Korrelation zwischen Wasserausdehnung und Wasserhöhe
(Threshold -11,5 dB & -5 dB und Buffer: 0,4°)

In der Literatur werden möglich Ansätze zur Volumenberechnung geschildert. Baup et al. und Medina et al. (2009) folgen der zweiten Methode nach Taube (2000). Um die relative Volumenvariation zwischen zwei Zeitpunkten zu berechnen, wird die mittlere Wasserausdehnung und die Höhendifferenz zwischen den zwei Beobachtungen verwendet. Es wird dabei von einer dreieckigen Vertiefungsform ausgegangen. Insbesondere für kleine Seen und Reservoirs wird diese Art der Volumenberechnung oft verwendet. Für die vorliegende Zeitreihe kann dies, aufgrund der unregelmäßigen Zeitabstände, jedoch zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Aus diesem Grund wird ein einfacherer Ansatz gewählt. Da keine weiteren Daten, wie etwa Bathymetrie zur Verfügung stehen, können auch keine genauen Aussagen über die Form der einzelnen Wasservertiefungen getroffen werden.

In dem durchgeführten Ansatz wird deshalb der Koeffizient x als Unbekannte eingeführt. Die Volumenvariation V für jedes Segment wird anschließend wie folgt berechnet:

$$V = (dh + x) * A = A * dh + A * x \quad (6.1)$$

Dabei werden die relativen Wasserhöhen dh , bezogen auf den niedrigsten Stand der Zeitreihe mit den Flächenausdehnungen A multipliziert. In der folgenden Abbildung 37 sind die berechneten Variationen der Wasservolumina bezogen auf die Zeitpunkte der ENVISAT-Messungen dargestellt.

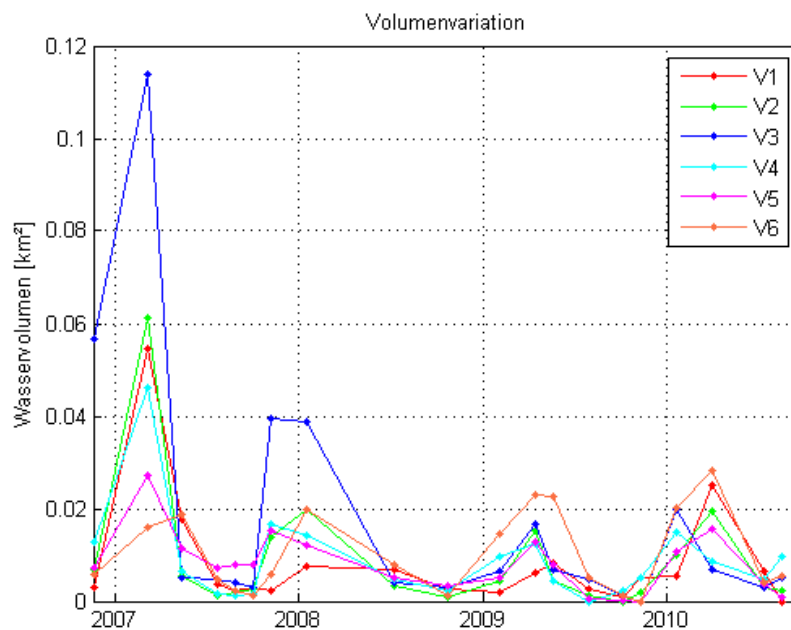


Abb.37 Volumenvariation der einzelnen Segmente (1-6)

Auffällig bei der Betrachtung der einzelnen Verläufe ist, dass im Jahr 2007 sich die Spitzenwerte in den Segmenten 1-5, im Vergleich zu den anderen Jahren deutlich abheben. Hingegen kann in Zeile 6 dieser Effekt nicht beobachtet werden. Zum einen kann das an den verschiedenen Überschwemmungseigenschaften liegen, spiegelnde Reflexion versus Doppelstreuung, zum anderen an einer Fehlinterpretation der SAR-Bilder. Da keine hinreichenden Zusatzinformationen vorliegen, kann diesem Zeitraum auch kein besonderes Ereignis zugeordnet werden, wie etwa starke Niederschläge mit Überflutung. Des Weiteren besteht die Unsicherheit, da aufgrund der geringen Abdeckung von ALOS, die Regenzeit nur durch die Aufnahmen vom 20.02./02.03.2007 repräsentiert wird.

Zum Schluss werden die Ergebnisse aller Segmente zusammengerechnet, um die gesamte Zeitreihe des Testgebiets zu visualisieren, siehe Abbildung 38.

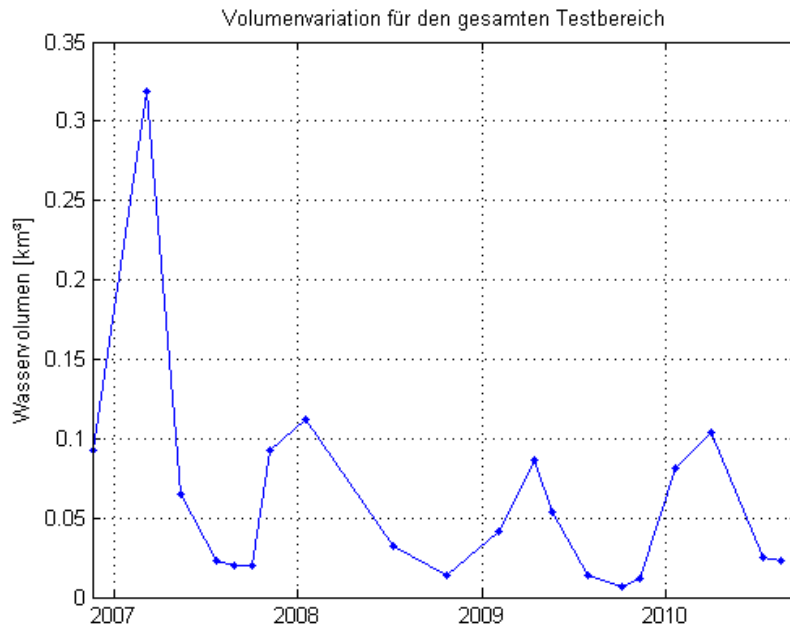


Abb.38 Volumenvariation des gesamten Testbereichs

Die Ergebnisse der Studie haben gezeigt, dass bei guter Bestimmung der Wasserflächenausdehnungen und der Höhenvariationen, die Volumenveränderungen berechnet werden können. Im Fall der Subregion PARA kann ein klares jährliches Signal abgeleitet werden, wobei das maximale Wasservolumen im Zeitraum zwischen März und Mai erreicht wird.

Die verwendete „Nearest-Neighbor-Methode“ für die Zeitzuordnung der SAR- und Altimeterdaten kann zu leichten Verfälschungen des dargestellten Verlaufs führen. Eine Verbesserungsmöglichkeit wäre beispielsweise die Interpolation der Wasserhöhen zu den Zeitpunkten der ALOS-Aufnahmen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Studie demonstriert das Informationspotenzial der Satellitenfernerkundung für die Überwachung von Wasserressourcen in Feuchtgebieten. Unter Verwendung von ALOS PALSAR Daten und ENVISAT RA-2 Altimetermessungen können die Flächenausdehnung und die Wasserstände von Oberflächengewässern abgeleitet werden. Eine anschließende Verknüpfung beider Datensätze ermöglicht die Berechnung von Variationen der Wasservolumina in Überschwemmungsgebieten. Anhand der Beispielregion Pantanal in Südamerika werden über eine Zeitreihe von 2006 bis 2010 die Möglichkeiten und Einschränkungen der Kombination beider Verfahren getestet und analysiert.

Es hat sich gezeigt, dass die Klassifizierung der SAR Amplitudenbilder einige Herausforderungen mit sich bringen. Dazu zählen zum einen die schlechte zeitliche Abdeckung durch ALOS PALSAR und zum anderen der Einfluss der unterschiedlichen Landbedeckungstypen auf die Radarrückstrahlung. Hauptsächlich in Teilgebieten mit hohem Anteil an Grasland, landwirtschaftlichen Flächen und Savanne ist mit der angewendeten Schwellwert-Methode, eine Trennung der einzelnen Klassen nicht möglich. Die Validierung der Klassifizierung mit Landsat-Daten ergibt jedoch, dass für offene Wasserfläche, insbesondere in der Region PARA, eine hohe Genauigkeit erreicht wird. Dort ist auch ein eindeutiger jährlicher Zyklus mit dem maximalen Wasservolumen zwischen März und Mai darstellbar. Demnach kann die Anwendung eines universalen Schwellwerts für diese Region als robust angesehen werden. Für die anderen Gebiete ist eine genauere Analyse der Rückstrahlwerte für verschiedenen Vegetationsformen und Überschwemmungsstadien notwendig. Um die Volumenberechnung auf das gesamte Feuchtgebiet ausweiten zu können müssen unsichere Regionen ausmaskiert oder Zusatzinformationen wie Bodenfeuchtedaten verwendet werden. Aufgrund der beschränkten Messgeometrie entlang des Satelliten Tracks bietet die Satellitenaltimetrie keine komplette Datenabdeckung des Pantanals. Eine Erweiterung durch zusätzlich Missionen, wie Jason-2 oder Sentinel-3 würde zur Verbesserung der räumlichen Abdeckung führen.

Ein beispielhafter Vergleich zwischen ENVISAT RA-2 σ_0 Ku- und S-Band Backscatter, mit den Rückstrahlwerten von ALOS PALSAR L-Band ergibt, dass beide Fernerkundungsmethoden die Identifizierung von Wasserflächen erlauben, jedoch mit unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung. In einigen Testgebieten wird Wasser schlechter von Altimetermessungen erkannt (z.B. T1) als in anderen. Mögliche Einflussparameter sind Wind und Topographie. Für eine genaue Analyse sind noch weitere Untersuchungen nötig.

Auf der anderen Seite zeigt die Arbeit die momentane Limitation an Fernerkundungsdaten im Bereich der Hydrologie und die Notwendigkeit neuer Technologien um Variationen des Wasserhaushaltes, Einflüsse durch ENSO-Ereignisse, Fluten und Dürren besser zu beobachten sowie Zusammenhänge darstellen zu können. Um entsprechende Aussagen über schnell veränderbare Gebiete, wie das Pantanal Feuchtgebiet, treffen zu können, bedarf es mehr Satellitenaufnahmen. Mit der 2014 neu gestarteten Sentinel-1 Mission ist in Zukunft eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung von SAR-Bildern (C-Band) gewährleistet [ESA, 2016b]. Auch die geplante SWOT (Surface Water and Ocean Topography) Mission soll eine Verbesserung gegenüber Nadir-Altimeter bieten. Durch die Verwendung eines Ka-Band (35GHz) SAR Interferometers (KaRIN) wird die flächendeckende Messung von Wasserhöhen über einen Streifen von 120km mit hoher Auflösung möglich [NASA, 2016b].

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Satellitenfernerkundung Lösungen für hydrologische Fragestellungen liefert, jedoch bedarf es in Zukunft noch eine intensivere Weiterentwicklung der Verfahren, um die Informationen effektiv für hydrologische Modelle verwenden zu können und eine detaillierteres Verständnis über den globalen Wasserkreislauf zu erhalten.

Literaturverzeichnis

Abelen, S.; Seitz, F.; Abarca-del-Rio, R.; Güntner, A., 2015: Droughts and Floods in the La Plata Basin in Soil Moisture Data and GRACE

Albertz, J., 2009: Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, 4. Auflage, Darmstadt

Alho, C. J. R., 2005: The Pantanal, The world`s largest wetlands: Ecology and Conservation, Chapter 7, 2005, Cambridge University Press.

Alsdorf, D. E.; Rodríguez, E.; Lettenmaier D. P., 2007: Measuring Surface Water from Space, Reviews of Geophysics, 45, RG2002 / 2007

ANA/GEF/UNEP/OAS, 2004: Strategic Action Program for the Integrated Management of the Pantanal and the Upper Paraguay River Basin

Ardila, J. P.; Tolpekin, V.; Bijker, W., 2010: Angular Backscatter Variation in L-Band ALOS ScanSAR Images of Tropical Forest Areas, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, Vol. 7, No. 4

ASF, 2012: ASF MapReady User Manual, Version 3.1

ASF, 2016: <https://www.asf.alaska.edu>, Abrufdatum: 02.01.2016

Bartsch, A.; Wagner, W.; Scipal, K.; Pathe, C.; Sabel, D.; Wolski, P., 2006: Envisat ASAR Global Mode Capabilities for Global Monitoring of Wetland, Proc. 'GlobWetland: Looking at Wetlands from Space', Frascati, Italien

Bartsch, A.; Pathe, C.; Wagner, W.; Scipal, K., 2008: Detection of permanent open water surfaces in central Siberia with ENVISAT ASAR wide swath data with special emphasis on the estimation of methane fluxes from tundra wetlands, Hydrology Research, Vol. 39(2), S. 89-100

Bartsch, A.; Trofaier, M.; Hayman, G.; Sabel, D.; Schlaffer, S.; Clark, D. B.; Blyth, E., 2012: Detection of open water dynamics with ENVISAT ASAR in support of land surface modelling at high latitudes, *Biogeosciences*, 9, S. 703-714

Bauer-Marschallinger, B.; Sabel, D.; Wagner, W., 2014: Optimisation of global grids for high-resolution remote sensing data, *Computer & Geosciences*, 2014, Vol. 72, S. 84-93

Baup, F.; Frappart, F.; Maubant, J., 2014: Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, S. 2007-2020

Campbell, J. B.; Wynne R. H., 2011: Introduction to Remote Sensing, 5. Auflage, New York

Chapman, B.; McDonald, K.; Shimada, M.; Rosenqvist, A.; Schroeder R.; Hess, L., 2015: Mapping Regional Inundation with Spaceborne L-Band SAR, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, S. 5440-5470

Congedo, L., 2015: Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, Vers. 4.6.1.1

Costa, M.; Telmer, K.; Evans, T., 2009: Seasonal Dynamics of the Pantanal Ecosystem, K&C Science Report – Phase 1

Curlander, J. C.; McDonough, R. N., 1991: Synthetic Aperture Radar – Systems and Signal Processing, New York

Dettmering, D.; Schwatke, C.; Boergens, E.; Seitz, F., submitted to Remote Sensing: Monitoring water level in the Pantanal Wetland by ENVISAT radar altimetry, *Remote Sensing*

EORC & JAXA, 2016: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm, Abrufdatum: 09.01.2016

ESA, 2007: Information on ALOS PALSAR products for Aden users

ESA, 2011: Envisat Altimetry Level 2 User Manual V 1.4

ESA, 2016a: <https://earth.esa.int>, Abrufdatum: 10.01.2016

ESA, 2016b: Sentinel Mission, <https://sentinel.esa.int>, Abrufdatum: 01.05.2016

Evans, T. L.; Costa, M.; Telmer, K., Silva, T. S. F., 2010: Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to Map Land Cover and Seasonal Inundation in the Brazilian Pantanal, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, 2010, Vol. 3, No. 4

Evans, T. L.; Costa, M.; Tomas, W. M.; Camilo, A. R., 2014: Large-scale habitat mapping of the Brazilian Pantanal wetland: A synthetic aperture radar approach, Remote Sensing of Environment, 2014, Vol. 155, S.89-108

Frappart, F.; Papa, F.; Malbeteau, Y.; Gabriel León, J.; Ramillien, G.; Prigent, C.; Seoane, L.; Seyler, F.; Calmant, S., 2015: Surface Freshwater Storage Variations in the Orinoco Floodplains Using Multi-Satellite Observations, Remote Sensing, 7, S.89-110

Gallant, A. L., 2015: The Challenges of Remote Monitoring of Wetlands, Remote Sensing, 7

Gonçalves, H. C.; Mercante, M. A.; Santos, E. T., 2011: Hydrological cycle, Brazilian Journal of Biology, 2011, Vol. 71, No. 1 (suppl.), S. 241-253

Hamilton, S. K.; Sippel, S. J.; Melack, J. M., 1996: Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing, Arch. Hydrobiol. 137, 1, 1-23, Stuttgart, Juli 1996

Hamilton, S. K., 2002a: Hydrological controls of ecological structure and function in the Pantanal wetland (Brazil), Chapter 8 in The Ecohydrology of South American Rivers and Wetlands, 2002, IAHS Special Publication No. 6

Hamilton, S. K., 2002b: Human impacts on hydrology in the Pantanal wetland of South America, Water Science and Technology, 2002, Vol. 45, No. 11, S. 35-44

Hamilton, S. K.; Sippel, S. J.; Melack, J. M., 2002: Comparison of inundation patterns among major South American floodplains, *Journal of Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. D20

Heckman, C. W., 1994: The Seasonal Succession of Biotic Communities in Wetlands of the Tropical Wet-and-Dry Climatic Zone: I. Physical and Chemical Causes and Biological Effects in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil, *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 1994, Vol. 79, No. 3, S. 397-421

Hidayat, H.; Hoekman, D. H.; Vissers, M. A. M.; Hoitink, A. J. F., 2011: Combining ALOS-PALSAR imagery with field water level measurements for flood mapping of a tropical floodplain, *International Symposium on Lidar and Radar mapping 2011: Technologies and Applications*, 2011, Proc. of SPIE Vol. 8286, 82861X

Hidayat, H.; Hoekman, D. H.; Vissers, M. A. M.; Hoitink, A. J. F., 2012: Flood occurrence mapping of the middle Mahakam lowland area using satellite radar, *Hydrology and Earth System Science*, 2012, 16, 1805-1816

Hill, M. J.; Donald, G. E.; Vickery, P. J., 1999: Relating radar backscatter to biophysical properties of temperate perennial grassland, *Remote Sensing of Environment*, 1999, Vol. 67(1), S. 15-31

JAXA, 2008: ALOS Data Users Handbook, Revision C

JAXA, 2009: ALOS/PALSAR Level 1.1/1.5 product Format description

JAXA, 2016: <http://global.jaxa.jp>, Abrufdatum: 09.01.2016

Keddy, P. A.; Fraser, L. H.; Solomenschch, A. I.; Junk, W. J.; Campbell, D. R.; Arroyo, M. T. K.; Alho, C. J. R., 2009: Wet and wonderful: The world's largest wetlands are conservation priorities, *Bioscience*, Vol. 59, No. 1, S. 39-51

Klausing, H.; Holpp, W., 2000: Radar mit realer und synthetischer Apertur – Konzeption und Realisierung, München

Kronberg, P., 1985: Fernerkundung der Erde – Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie, Stuttgart

Kuenzer, C.; Huadong, G.; Huth, J.; Leinenkugel, P.; Li, X.; Dech, S., 2013: Flood Mapping and Flood Dynamics of the Mekong Delta: ENVISAT-ASAR-WSM Based Time Series Analyses, Remote Sensing, 5, S.687-715

Kuenzer, C.; Huth, J.; Martinis, S.; Lu, L.; Dech, S., 2015: SAR Time Series for the Analysis of Inundation Patterns in the Yellow River Delta, China, Chapter 20 in Remote Sensing Time Series – Revealing Land Surface Dynamics, Remote Sensing and Digital Image Processing, 2015, Springer Verlag

Landis, J. R.; Koch, G. G., 1977: The measurement of observer agreement for categorical data, Biometrics, Vol. 33, No. 1, S. 159-174, 1977

Lehner, B.; Döll, P., 2004: Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands, Journal of Hydrology 296/1-4: 1-22

Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. W., 2015: Remote Sensing and Image Interpretation, 7. Auflage

Medina, C.; Gomez-Enri, J.; Alonso, J. J.; Villares, P., 2009: Water volume variations in Lake Izabal (Guatemala) from in situ measurements and ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) data products, Journal of Hydrology, 382, S.34-48

Michailovsky, C. I.; McEnnis, S.; Berry, P. A. M.; Smith, R.; Bauer-Gottwein, P., 2012: River monitoring from satellite radar altimetry in the Zambezi River basin, Hydrology and Earth System Sciences, 16, S. 2181-2192

Mitsch, J. W.; Gosselink, J. G., 2000: Wetlands, 3rd Edition, New York: Van Nostrand Reinhold

Mladenova, I.; Jackson, T. J., 2011: Incidence Angle Normalization of Backscatter Data, Präsentation, <http://www.moisturemap.monash.edu.au/aaces/workshop/Talks/Day2/02-13-TJackson.pdf>

NASA, 2016a: Landsat, <http://landsat.gsfc.nasa.gov>, Abrufdatum: 02.02.2016

NASA, 2016b: SWOT, <https://swot.jpl.nasa.gov>, Abrufdatum: 11.04.2016

Natural Resources Canada, 2007: Fundamentals of Remote Sensing – A Canada Centre for Remote Sensing Remote Sensing Tutorial

OpenADB - An Open Altimeter Database, 2016: <http://openadb.dgfi.tum.de>, Abrufdatum: 25.03.2016

Otsu, N., 1979: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, 1979

Ozesmi, S. L.; Bauer, M. E., 2002: Satellite remote sensing of wetlands, Wetlands Ecology and Management, 2002, Vol. 10, S. 381-402

QGIS, 2016: <http://www.qgis.org/de/site/>, Abrufdatum: 06.06.2016

Padovani, C. R., 2010: Dinâmica Espaço-Temporal das Inundações do Pantanal, Doktorarbeit, Universität von São Paulo

Papa, F.; Legrésy, B.; Remy, F., 2003: Use of the Topex-Poseidon dual-frequency radar altimeter over land surfaces, Remote Sensing of Environment, 87, S.136-147

Penatti, N. C.; De Almeida, T. I. R.; Ferreira, L. G.; Arantes, A. E.; Coe, M. T., 2015: Satellite-based hydrological dynamics of the world's largest continuous wetland, Remote Sensing of Environment, 2015, Vol. 170, S. 1-13

Pepperhoff, W., 1956: Temperaturstrahlung, Wissenschaftlicher Forschungsberichte, Naturwissenschaftliche Reihe, Band 65

Pott, V.J.; Pott, A.; Lima, L. C. P.; Moreira, S. N.; Oliveira, A. K. M., 2011: Aquatic macrophyte diversity of the Pantanal wetland and upper basin, Brazilian Journal of Biology, 2011, Vol. 71, No. 1 (suppl.), S. 255-263

Pott, V.J.; Oliveira, A. K. M.; Damasceno-Junior, G. A.; Silva, J. S. V., 2011: Plant diversity of the Pantanal wetland, Brazilian Journal of Biology, 2011, Vol. 71, No. 1 (suppl.), S. 265-273

Prigent, C.; Matthews, E.; Aires, F.; Rossow, W. B., 2001: Remote sensing of global wetland dynamics with multiple satellite data sets, Geophysical Research Letters, Vol. 28, No. 24, S. 4631-4634

Prigent, C.; Papa, F.; Aires, F.; Rossow, W. B.; Matthews, E., 2007: Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993-2000, J. Geophys. Res., 112

Prigent, C.; Papa, F.; Aires, F.; Jimenez, C.; Rossow, W. B.; Matthews, E., 2012: Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure, Geophysical Research Letters, Vol. 39

RAMSAR, 2016: <http://www.ramsar.org>, Abrufdatum: 11.01.2016

Rokni, K.; Ahmad, A.; Selamat, A.; Hazini, S., 2014: Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery, Remote Sensing, 2014, Vol. 6, Issue 5

Schwatke, C; Dettmering, D.; Göttel, F., 2015: Classification of altimeter waveforms for an improved estimation of water level time series over inland water, Poster präsentiert bei Hydrospace 2015, ESA-ESRIN, Frascati, Italien

Taube, C. M., 2000: Instructions for winter lake mapping, Chapter 12: Three Methods for Computing the Volume of a Lake in Schneider J. C. (ed.) 2000, Manual of fisheries survey methods II: with periodic updates, Michigan Department of Natural Resources, Fisheries Special Report 25, Ann Arbor

Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K., 1981: Microwave Remote Sensing – Active and Passive, Volume 1, Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry

Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K., 1986: Microwave Remote Sensing – Active and Passive, Volume 3, From Theory to Applications

Ulander, L.M.H., 1996: Radiometric slope correction of synthetic-aperture radar images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34(5): 1115 – 1122.

UNESCO, 2016: <http://en.unesco.org/countries/brazil>, Abrufdatum: 19.01.2016

Wang, Y., 2010: Remote sensing of coastal environments, CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, S. 457

White, L.; Brisco, B.; Dabboor, M.; Schmitt, A.; Pratt, A., 2015: A Collection of SAR Methodologies of Monitoring Wetlands, Remote Sensing, 7, S. 7615-7645

Wikipedia, 2016: Orientierungspolarisation, Abrufdatum: 04.01.2016
<https://de.wikipedia.org/wiki/Orientierungspolarisation>

Woodhouse I. H., 2006: Introduction to Microwave Remote Sensing

Datenquellen

[1] SRTM: <http://srtm.csi.cgiar.org>, Abrufdatum 05.07.2015

[2] Natural Earth: <http://www.naturalearthdata.com/>, Abrufdatum 17.01.2016

[3] Barroso, M., 2015: Paraguay River Basin, ERI_PY_Ecoregion.shp,
<http://www.arcgis.com/home/item.html?id=abda2db7bcd9480ba89fd9a9c1bf32ec>
Abrufdatum: 17.01.2016

[4] NASA Earth Data (EOSDIS) – Giovanni Visualization:
<http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>, Abrufdatum: 11.01.2016

[5] National Weather Service, Climate Prediction Center: Oceanic Niño Index (ONI),
http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml,
Abrufdatum: 14.02.2016

[6] Golden Gate Weather Service: El Niño and La Niña Years and Intensities,
<http://ggweather.com/enso/oni.htm>, Abrufdatum: 14.02.2016

[7] WWF: Daten-Download GLWD, <http://www.worldwildlife.org/pages/global-lakes-and-wetlands-database>, Abrufdatum 29.06.2015

[8] Vertex ASF: ALOS Palsar ScanSAR, <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, Abrufdatum 02.07.2015

[9] USGS EarthExplorer: LANDSAT, <http://earthexplorer.usgs.gov/>,
Abrufdatum 04.08.2015

[10] ESA-CCI: Landcover 2010, <http://www.esa-landcover-cci.org/>,
Abrufdatum: 02.02.2016

Abbildungsverzeichnis

Abb.1 Abbildendes Radarsystem	- 14 -
Abb.2 Schematische Darstellung der Radaraufnahmegeometrie	- 15 -
Abb.3 Slant-Range und Ground-Range Darstellung	- 15 -
Abb.4 Darstellung der Radarabbildungseigenschaften	- 16 -
Abb.5 Wirkungsweise eines SAR-Systems	- 18 -
Abb.6 Eindringtiefen von Mikrowellen in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und Art	- 22 -
Abb.7 Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante u.Bodenfeuchte sowie Wellenlänge .	- 24 -
Abb.8 Oberflächenstreuung und Rauigkeit	- 24 -
Abb.9 Interaktion von Mikrowellen in tropischen Feuchtgebieten	- 26 -
Abb.10 Schematische Darstellung der Altimeter Aufnahme	- 28 -
Abb.11 Lage des Pantanal Testgebiets	- 30 -
Abb.12 Über das Pantanal gemittelte monatliche Niederschläge von TRMM, 0,25° Auflösung und Temperaturen am Boden von AIRS, 1° Auflösung im Zeitraum 2006-2011	- 31 -
Abb.13 Gemittelter 3-Monats ONI	- 32 -
Abb.14 Gemittelter monatlicher Ablauf (m³/s) des Paraguay	- 35 -
Abb.15 Über das Pantanal gemittelter monatlicher Normalized Differenced Vegetation Index von MODIS (Auflösung 5600m) im Zeitraum von 2006-2011	- 37 -
Abb.16 ALOS Satellit	- 40 -
Abb.17 Aufnahmemodi von ALOS Palsar	- 41 -
Abb.18 Layerstacks und Range-Abbildung des Testgebiets in dB	- 51 -
Abb.19 Mittlere Radarrückstrahlung in dB für jeden Monat (2006-2010)	- 53 -
Abb.20 SAR-Aufnahme mit Histogramm für das Testgebiet 1: Offene Wasserflächen	- 56 -
Abb.21 SAR-Aufnahme mit Histogramm für das Testgebiet 2: Wasser unter der Vegetation	- 59 -
Abb.22 Einteilung des Pantanals in Subregionen,	- 61 -
Abb.23 Überschwemmungsfrequenz (2006-2010) für die Schwellwerte -11,5 dB und -5 dB	- 65 -
Abb.24 Monatlich gemittelte Überschwemmungsfläche im Pantanal (-11,5 dB & -5 dB)	- 66 -
mit Standardabweichungen	- 66 -
Abb.25 Zeitverlauf der Wasserausdehnung für die Subregion NABI	- 67 -
Abb.26 Zeitverlauf der Wasserausdehnung für die Subregion PARA	- 67 -
Abb.27 Giems Zeitreihe Pantanal 1993-2007	- 70 -
Abb.28 Vergleich von GIEMS und ALOS-Klassifizierung (-11,5dB & -5dB) für das Jahr 2007 ...	- 71 -
Abb.29 Validierungsergebnis von ALOS und Landsat sowie Landbedeckung	- 73 -
Abb.30 Ausgewählte Testgebiet T1, T2 und T3	- 79 -
Abb.31 Vergleich der Rückstrahlungen zwischen ALOS L-Band (28.08.2007) sowie Ku- und S- Band (14.09.2007) im Testgebiet 1, ENVISAT Track 693	- 81 -
Abb.32 Vergleich der Rückstrahlungen zwischen ALOS L-Band sowie Ku- und S-Band am 28.08.2007 im Testgebiet 2, ENVISAT Track 220	- 83 -

Abb.33 Vergleich der Rückstrahlungen zwischen ALOS L-Band sowie Ku- und S-Band am 13.01.2008 im Testgebiet 3, ENVISAT Track 149	- 84 -
Abb.34 Gewähltes Testgebiet zum Zeitpunkt der Trocken- und Regenzeit.....	- 87 -
Abb.35 Variation der Flächenausdehnung (Thresholds: -11,5dB & -5 dB, Buffer: 0,04°).....	- 88 -
Abb.36 Abgeleitete Höhenvariation der einzelnen Segmente (1-6).....	- 90 -
Abb.37 Volumenvariation der einzelnen Segmente (1-6)	- 92 -
Abb.38 Volumenvariation des gesamten Testbereichs.....	- 93 -

Tabellenverzeichnis

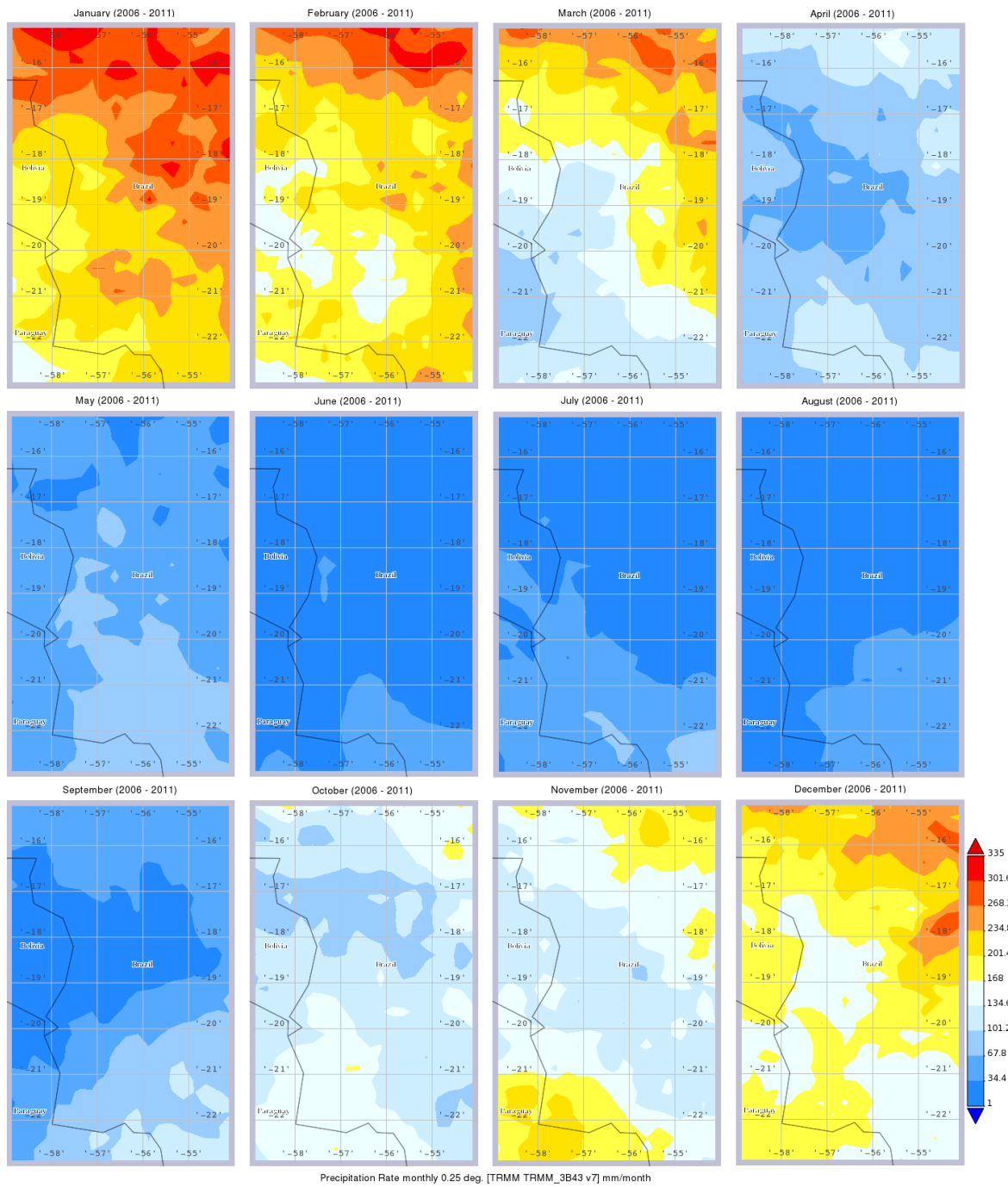
Tab.1 In der Radarfernerkundung gebräuchliche Frequenzbereiche	- 21 -
Tab.2 Landbedeckung des Pantanal Feuchtgebiets.....	- 36 -
Tab.3 Übersicht verschiedener SAR Missionen.....	- 39 -
Tab.4 Ergebnisse der Datenrecherche	- 39 -
Tab.5 Eigenschaften von ALOS	- 41 -
Tab.6 Aufnahmeeigenschaften von PALSAR	- 42 -
Tab.7 Landsat-Aufnahmen für die Validierung der ALOS Klassifizierung	- 48 -
Tab.8 Aus Satellitendaten abgeleitete Wasserindexe.....	- 49 -
Tab.9 Analyse der gemittelten Monate (2006-2010) für das gesamte Pantanal.....	- 52 -
Tab.10 Ergebnisse der Klassifizierung für das Testgebiet 1.....	- 57 -
Tab.11 Qualitätsmaße der Klassifizierung für das Testgebiet 1	- 58 -
Tab.12 Neu erstellte Subregionen CUIA; TAQF, PARA und NABI	- 60 -
Tab.13 Berechnete Schwellwerte für jede Subregion	- 62 -
Tab.14 Vergleich der Schwellwerte für offene Wasserflächen.....	- 64 -
Tab.15 Vergleich der oberer Schwellwerte für Wasser unter der Vegetation	- 64 -
Tab.16 Mittlere, maximale und minimale Überschwemmungsflächen PARA (2006-2010)	- 68 -
Tab.17 Vergleich zu anderen Studien im Pantanal.....	- 69 -
Tab.18 Klassifizierungsergebnisse für die Schwellwerte -11,5 dB und -5 dB.....	- 72 -
Tab.19 Klassifizierungsergebnisse für die Subregion PARA (-11,5 dB und -5 dB)	- 74 -
Tab.20 Gemittelte Radarrückstrahlung für Wasser und landwirtschaftliche Flächen	- 76 -
Tab.21 Rückstrahlmechanismus für verschiedene Landbedeckungsklassen im Pantanal	- 77 -
Tab.22 Ausgewählte Zeiten für ALOS und ENVISAT	- 79 -
Tab.23 Konfusionsmatrix für T2 & T3 im Ku-Band und S-Band für einen Threshold von 40dB ..	- 85 -
Tab.24 Verwendete ENVISAT- und ALOS-Aufnahmen	- 86 -
Tab.25 Korrelation der benachbarten Segmente	- 88 -
Tab.26 Korrelation zwischen Wasserausdehnung und Wasserhöhe	- 91 -

Anhang

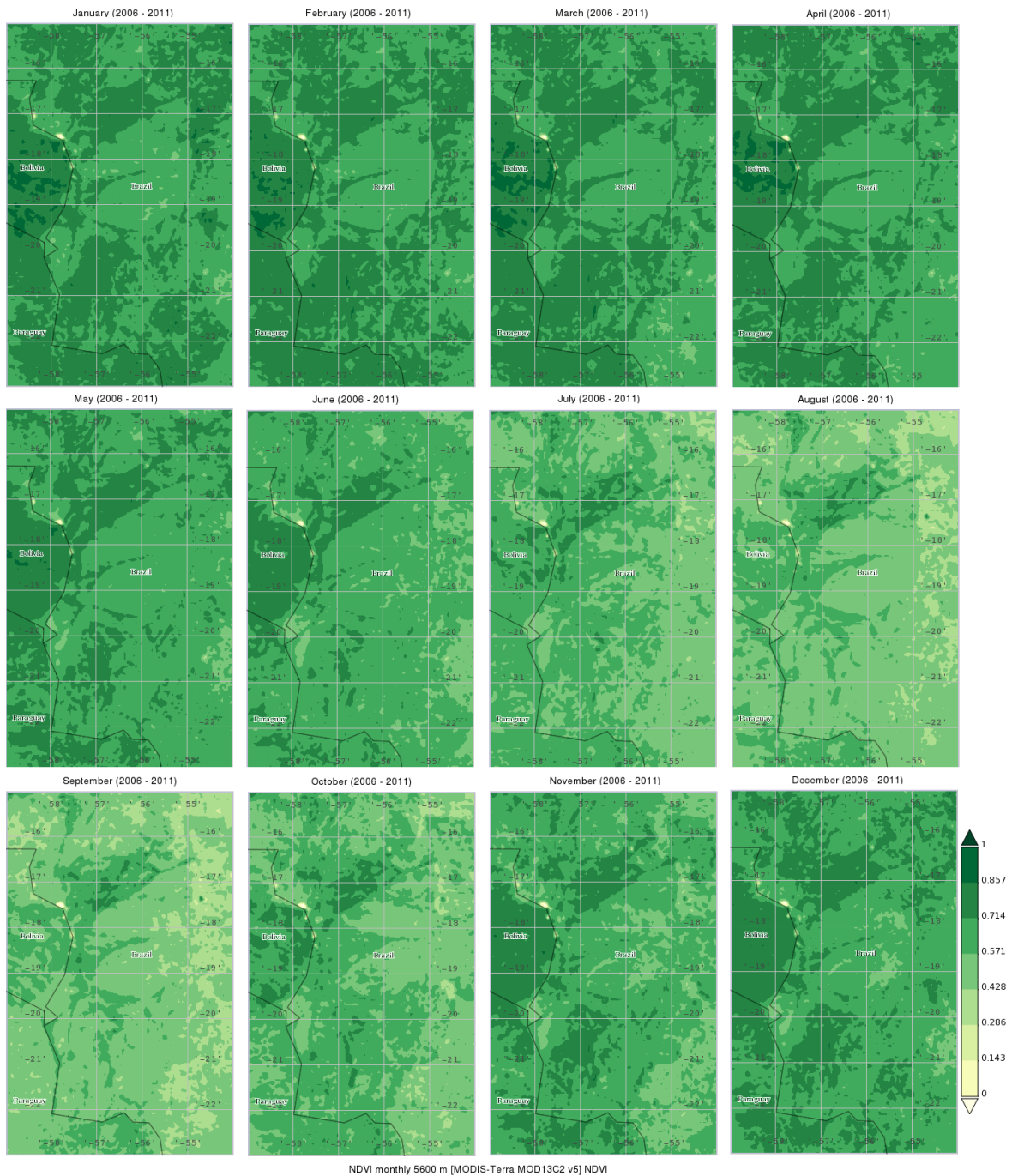
A: Pantanal Testgebiet [eigene Darstellung, modifiziert nach [1] und [2]]



B: Gemittelte monatliche Niederschläge (2006-2011) [4]



C: Gemittelter monatlicher NDVI (2006-2011) [4]



D: Verwendete ALOS PALSAR Daten

Mosaik	1. Aufnahmezeitpunkt tt.mm.yyyy	Szenen ID Path/Frame	2. Aufnahmezeitpunkt tt.mm.yyyy	Szenen ID Path/Frame
1.	25.11.2006	406/3950 406/4000 406/4050	02.12.2006	401/3950 401/4000
2.	05.01.2007	403/3950 403/4000 403/4050	15.01.2007	409/3950 409/4000 409/4050
3.	20.02.2007	403/3950 403/4000 403/4050	02.03.2007	409/3950 409/4000 409/4050
4.	23.05.2007	403/3950 403/4000 403/4050	28.05.2007	406/3950 406/4000 406/4050
5.	08.07.2007	403/3950 403/4000 403/4050	13.07.2007	406/3950 406/4000 406/4050
6.	23.08.2007	403/3950 403/4000 403/4050	28.08.2007	406/3950 406/4000 406/4050
7.	03.10.2007	400/3950 400/4000	13.10.2007	406/3950 406/4000 406/4050
8.	23.11.2007	403/3950 403/4000 403/4050	28.11.2007	406/3950 406/4000 406/4050
9.	08.01.2008	403/3950 403/4000 403/4050	13.01.2008	406/3950 406/4000 406/4050
10.	16.06.2008	407/3950 407/4000 407/4050	23.06.2008	402/3950 402/4000
11.	27.07.2008	404/3950 404/4000 404/4050	06.08.2008	410/3950 410/4000
12.	08.08.2008	402/3950 402/4000	18.08.2008	408/3950 408/4000 408/4050
13.	10.10.2008	403/3950 403/4000 403/4050	15.10.2008	406/3950 406/4000 406/4050

14.	10.01.2009	403/3950 403/4000 403/4050	15.01.2009	406/3950 406/4000 406/4050
15.	25.02.2009	403/3950 403/4000 403/4050	02.03.2009	406/3950 406/4000 406/4050
16.	12.04.2009	403/3950 403/4000 403/4050	17.04.2009	406/3950 406/4000 406/4050
17.	28.05.2009	403/3950 403/4000 403/4050	02.06.2009	406/3950 406/4000 406/4050
18.	08.07.2009	400/3950 400/4000	18.07.2009	406/3950 406/4000 406/4050
19.	13.10.2009	403/3950 403/4000 403/4050	18.10.2009	406/3950 406/4000 406/4050
20.	30.10.2009	404/3950 404/4000 404/4050	04.11.2009	407/3950 407/4000 407/4050
21.	13.01.2010	403/3950 403/4000 403/4050	18.01.2010	406/3950 406/4000 406/4050
22.	15.04.2010	403/3950 403/4000 403/4050	20.04.2010	406/3950 406/4000 406/4050
23.	16.07.2010	403/3950 403/4000 403/4050	21.07.2010	406/3950 406/4000 406/4050
24.	02.08.2010	404/3950 404/4000 404/4050	07.08.2010	407/3950 407/4000 407/4050

E: Monatliche gemittelte Flächenausdehnung des gesamten Pantanal, mit Standardabweichung, für die verwendeten Schwellwerte -11,5 dB und -5 dB (zu Abbildung 24)

<i>PANTANAL</i>	<i>Ausdehnung [km²]</i>	<i>Standardabweichung σ</i>
Januar	29966,33	4387,01
Februar	42589,37	4568,27
April	35389,37	1978,20
Mai	29495,91	5842,49
Juli	32505,30	2240,88
August	37619,44	2345,24
Oktober	29345,53	8706,98
November	31744,62	3855,72

F: Variation der Flächenausdehnung in der Subregion NABI (zu Abbildung 25)

<i>NABI</i>	<i>Ausdehnung [km²]</i>	
<i>Threshold</i>	<i>-11,5 dB & -5 dB</i>	<i>-10.11 dB & -5 dB</i>
2006-11-25 / 2006-12-02	6615,3712	7662,0938
2007-02-20 / 2007-03-02	5848,4194	10307,6494
2007-05-23 / 2007-05-28	6060,0262	8033,1075
2007-07-08 / 2007-07-13	6806,1713	10502,6906
2007-08-23 / 2007-08-28	6412,4100	9455,5238
2007-10-03 / 2007-10-13	3072,1331	5233,4156
2007-11-23 / 2007-11-28	6663,7912	10316,8856
2008-01-08 / 2008-01-13	5321,3850	7581,7744
2008-07-27 / 2008-08-06	6065,1113	8470,9463
2008-10-10 / 2008-10-15	4607,8819	7657,8750
2009-01-10 / 2009-01-15	5373,4894	9249,4181
2009-02-25 / 2009-03-02	5272,4138	9822,2063
2009-04-12 / 2009-04-17	4416,0637	8681,8106
2009-05-28 / 2009-06-02	3498,5925	5313,3188
2009-07-08 / 2009-07-18	2959,9425	4999,7981
2009-10-13 / 2009-10-18	8019,2306	12408,5978
2009-10-30 / 2009-11-04	9513,0000	14400,5625
2010-01-13 / 2010-01-18	7400,9194	9715,5844
2010-04-15 / 2010-04-20	7117,2956	11343,2625
2010-07-16 / 2010-07-21	5381,1731	7682,3606
2010-08-02 / 2010-08-10	7086,8756	11421,1070

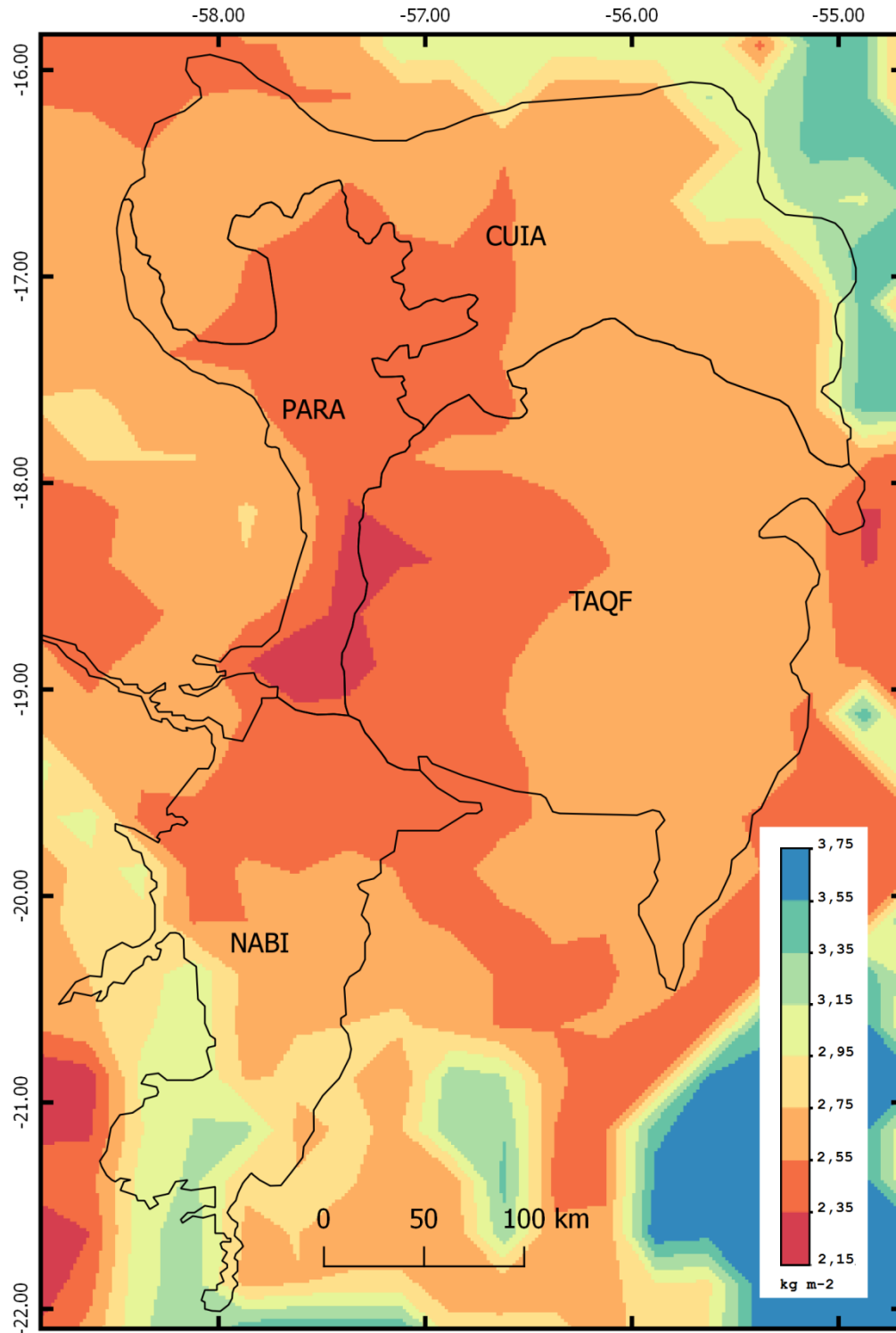
G: Variation der Flächenausdehnung in der Subregion PARA (zu Abbildung 26)

PARA	Ausdehnung [km²]	
<i>Threshold</i>	-11,5 dB & -5 dB	11,22 dB & -5 dB
2006-11-25 / 2006-12-02	3042,1350	3252,2738
2007-02-20 / 2007-03-02	7092,3600	7430,0906
2007-05-23 / 2007-05-28	6214,8881	6475,1119
2007-07-08 / 2007-07-13	5366,1094	5558,2988
2007-08-23 / 2007-08-28	4377,5719	4544,0325
2007-10-03 / 2007-10-13	3060,9619	3196,9125
2007-11-23 / 2007-11-28	4291,7400	4482,3656
2008-01-08 / 2008-01-13	5060,6775	5231,6831
2008-07-27 / 2008-08-06	4959,8888	5138,4263
2008-10-10 / 2008-10-15	3435,3450	3609,7144
2009-01-10 / 2009-01-15	3140,7469	3373,2788
2009-02-25 / 2009-03-02	5074,2956	5457,4200
2009-04-12 / 2009-04-17	5244,2100	5507,3363
2009-05-28 / 2009-06-02	6062,4000	6332,8950
2009-07-08 / 2009-07-18	4645,5581	4863,0150
2009-10-13 / 2009-10-18	3126,4819	3336,4575
2009-10-30 / 2009-11-04	3318,6712	3532,8375
2010-01-13 / 2010-01-18	4763,9306	4946,9850
2010-04-15 / 2010-04-20	5973,3394	6258,0937
2010-07-16 / 2010-07-21	4576,8487	4736,2219
2010-08-02 / 2010-08-10	4981,0725	5138,1281

H: Monatliche GIEMS Wasserausdehnung in der Subregion PARA von November 2006 bis Dezember 2007 (zu Abbildung 28)

<i>PARA GIEMS</i>	<i>Ausdehnung [km²]</i>
Nov 2006	8537
Dez 2006	9481
Jan 2007	12775
Feb 2007	14651
Mrz 2007	15028
Apr 2007	15557
Mai 2007	14755
Jun 2007	13505
Jul 2007	12149
Aug 2007	10731
Sept 2007	9413
Okt 2007	8260
Nov 2007	8789
Dez 2007	9868

I: Gemittelte Bodenfeuchte (0-10 cm) von Jan. 2006 bis Dez. 2010, 0,25° Auflösung, monatlich, GLDAS Model NOAH025_M V.2.0 [4]



J: Variation der Flächenausdehnung für die Segmente 1-6 mit den Schwellwerten -11,5 dB und -5 dB sowie einem Buffer von 0,04° um den ENVISAT Track (zu Abbildung 35)

<i>ALOS PALSAR</i>	<i>Ausdehnung</i>					
<i>Mosaik</i>	<i>[km²]</i>					
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
2006-11-25 / 2006-12-02	14,8331	42,2269	47,8575	29,4694	15,9581	8,3138
2007-02-20 / 2007-03-02	51,5531	72,7763	70,3463	50,7150	31,0725	11,3513
2007-05-23 / 2007-05-28	20,6156	12,0713	5,1694	14,1356	17,9381	16,0425
2007-07-08 / 2007-07-13	21,2344	9,5738	7,3013	12,8025	17,1394	11,5875
2007-08-23 / 2007-08-28	18,0338	13,2356	4,5731	10,9463	16,3350	5,9794
2007-10-03 / 2007-10-13	14,6981	10,8056	3,8925	9,5344	15,2831	4,4156
2007-11-23 / 2007-11-28	24,4463	50,2144	48,9375	32,6644	19,4119	12,5550
2008-01-08 / 2008-01-13	13,6856	42,0356	30,4031	24,7838	18,1013	18,1856
2008-07-27 / 2008-08-06	9,7763	10,7831	6,7894	11,5875	21,4594	10,4794
2008-10-10 / 2008-10-15	10,6875	10,0856	4,2863	10,5919	18,6975	4,9894
2009-01-10 / 2009-01-15	5,9006	15,7556	6,0694	15,4575	14,2369	16,8694
2009-04-12 / 2009-04-17	9,6075	33,6600	14,6194	18,4781	16,3519	18,8831
2009-05-28 / 2009-06-02	11,5819	11,5875	6,2269	9,6806	14,4056	21,7575
2009-07-08 / 2009-07-18	8,7525	7,8413	6,2831	9,9956	16,2394	12,9375
2009-10-13 / 2009-10-18	10,7494	8,6794	4,7194	10,0069	16,3071	4,1625
2009-10-30 / 2009-11-04	22,0219	21,4706	7,5094	15,1988	22,3594	6,8794
2010-01-13 / 2010-01-18	18,3488	41,5856	18,2756	20,1094	17,0719	23,2538
2010-04-15 / 2010-04-20	30,5550	33,2944	5,3213	12,7069	19,2938	20,7844
2010-07-16 / 2010-07-21	21,3019	9,8156	4,3031	11,2669	14,2088	7,7963
2010-08-02 / 2010-08-10	28,5244	14,1581	7,0988	23,7038	22,5900	15,3000

K: Variation der Höhe für die Segmente 1-6 (zu Abbildung 36)

ENVISAT RA-2	Wasserhöhe [m]					
	1	2	3	4	5	6
2006-11-21	92,6956	94,0305	95,6098	97,1828	98,0001	99,2795
2007-03-06	93,5526	94,7156	96,0401	97,6577	98,4135	99,9652
2007-05-15	93,3531	94,3224	95,4049	97,2075	98,1771	99,7340
2007-07-24	92,6645	93,9865	95,0931	96,8696	97,9528	98,9630
2007-08-28	92,6252	94,0226	95,3086	96,8664	98,0316	98,9463
2007-10-02	92,7060	94,1261	95,2264	96,8991	98,0622	98,8434
2007-11-06	92,5871	94,1478	95,2297	97,2555	98,3209	99,0160
2008-01-15	93,0450	94,3428	95,6978	97,3207	98,2093	99,6517
2008-07-08	93,2061	94,1665	95,0162	97,1597	97,7812	99,3309
2008-10-21	92,7366	93,9621	95,1308	96,9640	97,7280	98,7926
2009-02-03	92,8050	94,1427	95,5038	97,3607	97,8969	99,4289
2009-04-14	93,1249	94,3234	95,5568	97,4137	98,3346	99,7777
2009-05-19	93,2111	94,2483	95,4968	97,2014	98,0774	99,6128
2009-07-28	92,7800	94,0424	95,1984	96,7465	97,5656	98,9558
2009-10-06	92,5771	93,8724	94,7179	96,9856	97,5624	98,8741
2009-11-10	92,7238	93,9646	94,4230	97,0705	97,5413	98,5668
2010-01-19	92,7842	94,1146	95,5115	97,4943	98,1753	99,4349
2010-03-30	93,3200	94,4594	95,7366	97,4156	98,3531	99,9331
2010-07-13	92,7930	94,1719	95,1426	97,1652	97,8061	99,0969
2010-08-17	92,4935	94,0269	95,1191	97,1481	97,5877	98,9167

L: Volumenvariation für die Segmente 1-6 und des gesamten Testbereichs
(zu Abbildung 37 und 38)

<i>ENVISAT</i> <i>RA-2</i>	<i>Volumenvariation</i> <i>[km³]</i>						
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>Gesamt</i>
2006-11-21	0,0030	0,0067	0,0568	0,0129	0,0073	0,0059	0,0926
2007-03-06	0,0546	0,0614	0,1138	0,0462	0,0271	0,0159	0,3189
2007-05-15	0,0177	0,0054	0,0051	0,0065	0,0114	0,0187	0,0649
2007-07-24	0,0036	0,0011	0,0049	0,0016	0,0071	0,0046	0,0228
2007-08-28	0,0024	0,0020	0,0040	0,0013	0,0080	0,0023	0,0200
2007-10-02	0,0031	0,0027	0,0031	0,0015	0,0079	0,0012	0,0196
2007-11-06	0,0023	0,0138	0,0395	0,0166	0,0151	0,0056	0,0930
2008-01-15	0,0075	0,0198	0,0388	0,0142	0,0121	0,0197	0,1121
2008-07-08	0,0070	0,0032	0,0040	0,0048	0,0051	0,0080	0,0321
2008-10-21	0,0026	0,0009	0,0030	0,0023	0,0035	0,0011	0,0135
2009-02-03	0,0018	0,0043	0,0066	0,0095	0,0051	0,0145	0,0418
2009-04-14	0,0061	0,0152	0,0166	0,0123	0,0130	0,0229	0,0860
2009-05-19	0,0083	0,0044	0,0067	0,0044	0,0077	0,0228	0,0542
2009-07-28	0,0025	0,0013	0,0049	0	0,0004	0,0050	0,0141
2009-10-06	0,0009	0	0,0014	0,0024	0,0003	0,0013	0,0063
2009-11-10	0,0051	0,0020	0	0,0049	0	0	0,0120
2010-01-19	0,0053	0,0101	0,0199	0,0150	0,0108	0,0202	0,0813
2010-03-30	0,0253	0,0195	0,0070	0,0085	0,0157	0,0284	0,1044
2010-07-13	0,0064	0,0029	0,0031	0,0047	0,0038	0,0041	0,0250
2010-08-17	0	0,0022	0,0049	0,0095	0,0010	0,0054	0,0230