

Manfred F. Buchroithner

Veränderung von Landnutzung und Vegetationsbedeckung in der östlichen Sahelzone von 1972 bis 2003

1 Einleitung

In den letzten Jahren ist weltweit eine Zunahme des Umweltbewusstseins im Allgemeinen sowie der sozialen und ökonomischen Werte der natürlichen Vegetation im Speziellen zu beobachten; dies vor allem vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit in der landwirtschaftlichen Produktion und der Erhaltung natürlicher Ressourcen. Im Laufe der Geschichte hat das Verhältnis zwischen agronomischer Produktivität und Ökonomie stets sowohl die Landnutzungsmuster als auch die räumliche Bevölkerungsverteilung bestimmt. Erst in jüngerer Zeit wurde diese enge Beziehung durch finanzielle Stützungen und den rapiden gegenwärtigen Klimawandel gestört [12].

Obwohl der Sudan hinsichtlich seiner Naturressourcen eines der reichsten Länder Afrikas ist, zeigten sich bei der regenbewässerten Landwirtschaft, im Speziellen bei der großflächigen maschinenbasierten Bewirtschaftung, deutlich die Konflikte zwischen Produktionssteigerung und nachhaltigem

Ressourcenmanagement sowie der derzeitigen Klimaveränderung. Nach mehr als einem halben Jahrhundert mit nicht-nachhaltiger (unsustainable) Nutzung belegten Studien, dass rund 120 Millionen Hektar Land, zwar in unterschiedlichem Maße, aber doch degradiert sind [2]. Das rapide Bevölkerungswachstum im Sudan von 2,6 % pro Jahr [29] stimulierte die Entwicklung der maschinenbasierten regenbewässerten Landwirtschaft im Raum Gadarif im Ost-sudan (Bilder 1 und 2) von ca. 500 ha in den 1940er-Jahren zu ungefähr 2,3 Millionen ha im Jahre 2003.

Nahezu ein Drittel der sudanesischen Produktion von Sorghum (*Sorghum bicolor*), der vorrangigen Futterpflanze, und Sesam (*Sesamum indicum*) wird in dieser Region kultiviert. Wie in den meisten Entwicklungsländern ist auch im Sudan die Ökonomie großteils von der Landwirtschaft abhängig (70 % der Bevölkerung des Landes arbeiten in der Landwirtschaft, 90 % leben im ländlichen Raum). Um nun eine nachhaltige agronomische Entwicklung zu

Seit den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat sich im Gebiet südlich der Stadt Gadarif im Ost-sudan, am Ostende der Sahelzone gelegen, nicht nur infolge des Klimawandels, sondern auch aufgrund extremer agrarischer Nutzung eine signifikante Veränderung der Vegetationsbedeckung ergeben. Stark reduzierte Bodenerträge führten in den neunziger Jahren zu Stilllegungen von Ackerland. Mittels multitemporaler Satellitenbilddaten konnte die neuerliche Entwicklung der natürlichen Vegetationsverjüngung auf den Brachen nachgewiesen werden. Weiterer Schutz dieser Gebiete kann künftig die vollständige Regeneration der früheren Maximalvegetation eines Savannenwaldes zwischen den Äckern ermöglichen. Die festgestellten Landnutzungsbefunde werden mit den klimatischen Veränderungen in der östlichen Sahelzone in Verbindung gebracht.

The period since the 1970s has seen significant changes to the vegetation cover in the region south of the city of Gadarif in East Sudan, at the eastern end of the Sahel, due to both the current climate change and extreme agricultural use. Seriously degraded harvests led to the abandoning of agricultural land in the 1990s. By means of multi-temporal satellite imagery, it has been possible to demonstrate the development of vegetation renewal on such land. Further protection of the areas could permit complete future regeneration of the previous maximum natural vegetation of a savannah between the agricultural fields. The ascertained land use changes are linked to the climatic changes in the Eastern Sahel.

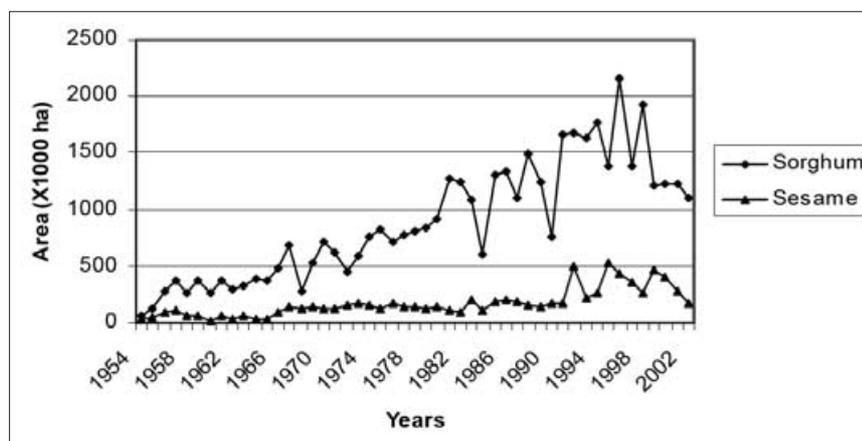


Bild 1. Gesamtanbaugesamt von Sorghum und Sesam in der Region Gadarif während der Jahre 1954 bis 2003 (Quelle: Mechanized Farming Corporation, Gadarif Office)

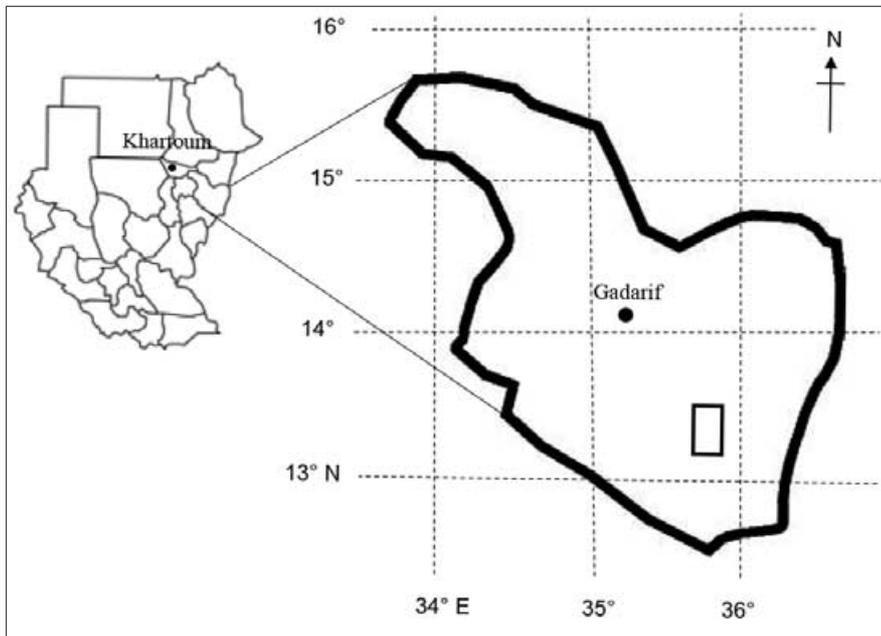


Bild 2. Lage des Untersuchungsgebietes

erreichen und um die wachsende Bevölkerung zu versorgen, wurde Priorität auf die Erhaltung und Kapazitätssteigerung in den Regionen mit einem erhöhten Landwirtschaftspotenzial und auf die Konservierung und Rehabilitation der Naturressourcen des Sudan mit geringerem Landwirtschaftspotenzial gelegt [11]. Bei dem derzeit im Bereich der Sahelzone stattfindenden Klimawandel mit erhöhten Temperaturen in der Trockenzeit und gesteigerten Starkregen in der Regenzeit [7, 17] ist dies ein schwieriges und dringend notwendiges Unterfangen.

Der 2005 erschienene FAO-Bericht mit der Bewertung der weltweiten Waldressourcen [6] weist für den Sudan mit 67 546 000 ha 28,4 % der Staatsfläche als Wald aus. Die Veränderung in der Waldfläche zwischen 1990 und 2000 wurde im Schnitt mit 589 000 ha pro Jahr angegeben, was eine jährliche Waldeinschlagsrate von 0,77 % impliziert. Berechnet man die Gesamtrate der Habitatveränderungen (definiert als die Veränderungen der Forstflächen plus Veränderungen der natürlichen Waldflächen minus der Nettoausweitung bepflanzer Flächen) für das Zeitintervall 1990 bis 2005, so hat der Sudan 11,6 % seiner Forst- und Waldhabitate verloren. Laut der Sudan Country Study on Biodiversity (SCSB) aus dem Jahr 2001 [24] existieren im Untersuchungsgebiet 112 Pflanzenarten, von denen 91 vom Aussterben bedroht und drei bereits nahezu ausgestorben sind.

Landbedeckungskartierungen mittels Satellitenfernerkundung liefern nicht nur laufende Inventare der Naturressourcen und der Landnutzung, sondern bieten auch die Möglichkeit zur Identifikation und zum Monitoring sich verändernder Landschaftsmuster. Herkömmliche Monitoringmethoden für Landbedeckungsveränderungen, die auf Geländeerhebungen und Luftbildern basieren, sind für so große Gebiete wie das untersuchte kostenintensiv und zeitaufwändig [22]. Einer der limitierenden Faktoren für Länder wie den Sudan sind die Kosten von traditionellen Feldkartierungen. Satellitenbilder verfügen über ein einmaliges, heute unverzichtbares Potenzial zur Bewertung und zum Monitoring von Naturressourcen bei vergleichsweise moderaten Kosten. Analysen von meteorologischen Satellitenbilddaten der letzten Jahre dienen dem Beweis einer deutlichen klimatischen Veränderung mit sehr heißen Sommer-

temperaturen in den Trockenzeiten und einer Zunahme kurzzeitiger Hochenergieniederschläge während der Regenzeiten [9].

Das Leistungsvermögen von kosmischer Fernerkundung und GIS (Geoinformationssystemen) für das Monitoring von Landnutzungs- und Landbedeckungsveränderungen hat sich in den letzten Jahren signifikant erhöht. Infolgedessen sind diese Techniken heutzutage grundlegende Werkzeuge für das Monitoring sowie das Verständnis von Abholzungen und sekundären Sukzessionsprozessen, vor allem in den Tropen [25]. Eine Analyse der aktuellen Geschichte der gegenwärtigen Landbedeckungsmuster liefert die Grundlage für eine Bewertung allfälliger zukünftiger Landschaftsmuster und ihrer Auswirkungen [31, 32]. Vor dem geschilderten Hintergrund ist das Ziel dieser Darstellung, die bisherigen Veränderungen der natürlichen Vegetation infolge der klimatischen Veränderungen und der Expansion der maschinenbetriebenen regenbewässerten Landwirtschaft zu analysieren und den derzeitigen Zustand der natürlichen Regeneration auf ausgesuchten Feldern im Kontext der Klimaentwicklung der letzten Jahre mittels Satellitenfernerkundung und Geländedaten zu bewerten.

Der generelle Trend einer Klimaveränderung ist zwar im Osten des Sahel nicht so ausgeprägt, aber doch merkbar. Einer Zunahme kurzzeitiger Platzregen während der Regenzeit steht im Untersuchungsgebiet eine verlängerte Trockenphase ohne Niederschlag gegenüber (vgl. [28], Eigenbeobachtungen des Autors und Aussagen der interviewten Informanten).

Die hier vorgestellte Studie soll stellvertretend für Gebiete mit ähnlichen Veränderungen zeigen, welche Rolle die multitemporale Erdbeobachtung mittels moderner Satelliten einnehmen kann, um einen Bezug zu gesicherten – und in diesem Falle auch teilweise über Probandenbefragung selbst erhobenen und teilweise beobachteten – Klimaveränderungen herzustellen.

2 Untersuchungsgebiet

Das ausgewählte, rund 55 x 40 km² große, repräsentative Untersuchungsgebiet liegt im Umfeld der ländlichen

Kleinstadt Doka, im südlichen Gadarif, Ostsudan (Bild 2). Das Gebiet fällt in die Sudano-Sahelische Klimazone Afrikas. Es wird von dunklen, sehr schweren, tiefe Risse aufweisenden Vertisolböden eingenommen. Das Relief ist flach bis leicht wellig, im Süden etwas hügelig. Der jährliche Niederschlag konzentriert sich auf eine relativ kurze Periode zwischen Juni und September und beträgt rund 680 mm, wobei in den letzten Jahren eine Zunahme der Niederschlagsheftigkeit und eine leichte Zunahme der Sommertemperaturen zu verzeichnen sind. Die Temperaturen reichen von einem durchschnittlichen Minimum von 17 °C im Januar bis zu einem durchschnittlichen Maximum von 40 °C – und jünger mehr – im April und Mai.

HARRISON und JACKSON klassifizierten die natürliche Vegetation des weiteren Untersuchungsgebietes als eine *Acacia seyal*- und *Balanites aegyptica*-Savanne [10]. Sorghum-Gräser, *Cymbopogon ssp.* und *Sporobolus*-Grasarten dominieren Areale mit reifen Feldfrüchten bzw. brache Felder [26]. Die Vegetation wird durch deutliche saisonale Variationen geprägt. Sie wurde während ausgedehnter Kahlschläge für den Landbau weitgehend zerstört. Nur verstreute Fragmente davon sind übrig geblieben. Zur rezenten Vegetationsbedeckung gab es vor der hier präsentierten Studie keine umfassenden und zuverlässigen Daten. Die wenigen in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen sind aufgrund der dramatischen Umweltveränderungen veraltet. Trotz dieser Veränderung der natürlichen Vegetation verbleiben jedoch ausreichend Spuren, welche die Beschreibung der vorherrschenden natürlichen Pflanzensoziationen der Region erlauben (Raine zwischen Farmen, aufgelassene Farmen, Land entlang von Flussläufen).

Die Tierwelt (wildlife) ist – von Insekten und Reptilien vielleicht abgesehen – zum Teil bereits vor dem Beginn des maschinengestützten Ackerbaus extrem zurückgedrängt worden. Mammalia sind auf den Feldern und in den wenigen verbliebenen und sich nunmehr neu regenerierenden Wäldern so gut wie nicht existent. Auch die Avifauna ist sehr spärlich und artenarm.

Die Siedlungsstruktur des Gebietes ist durch verstreute kleine Dörfer und Weiler charakterisiert. Die ländliche Bauweise ist bis auf wenige Ausnahmen durch strohgedeckte Lehmhütten, zumeist umgeben von Lehmmauern, bestimmt.

3 Datengrundlage

Benutzt wurden wolkenfreie multispektrale Landsat-MSS- (Dezember 1972 und November 1979) sowie Landsat-ETM-Aufnahmen (November 1999 und April 2003), die von der Global Land Cover Facility (GLCF) akquiriert worden sind. Zum Ausgleich geometrischer und radiometrischer Verzerrungen wurden Vorverarbeitungstechniken angewandt, sind doch eine hochgenaue geometrische Registrierung und die radiometrische Normalisierung die zwei kritischsten Erfordernisse für eine erfolgreiche Change Detection [3, 4, 25]. Die geometrische Korrektur sämtlicher Satellitenbilder stützte sich auf jeweils 17 bis 20 Passpunkte aus der zuvor entzerrten Landsat-ETM-Szene aus dem Jahr 1999. Für die Normalisierung der Reflexionswerte aller Szenen wurde der Ansatz von MARKHAM und BARKER implementiert [19]. Geländeerhebungen mit stratifizierten Zufallsbeprobungen wurden während März und April 2005 auf aufgelassenen bzw. brachliegenden Feldern durchgeführt. Die insgesamt 77, 20 x 20 m² großen, Beprobungsflächen wurden mittels GPS eingemessen.

4 Algorithmen

4.1 Change Vector Analysis (CVA)

Seit der Erstanwendung durch MALILA im Jahre 1980 [18], die auf Veränderungen in Waldgebieten abzielte, ist die CVA oft eingesetzt und weiterentwickelt worden. Die Veränderungen werden durch Ausmaß und Richtung im spektralen Merkmalsraum von unterschiedlichen Aufnahmezeiten beschrieben [14, 16]. Um einige Einschränkungen des ursprünglichen Ansatzes zu beseitigen, haben verschiedene Autoren eine modifizierte CVA vorgeschlagen [21, 25].

Die CVA ist eine multivariate Change-Detection-Technik, welche die volle spektrale und temporale Dimensionalität der Bilddaten verarbeitet und zwei Ergebnissätze erzeugt: Veränderungsausmaß und Veränderungsrichtung (Change Magnitude und Change Direction). Ein Hauptvorteil ist die Möglichkeit, im Gegensatz zu ausgewählten Spektralbändern alle Datenebenen gleichzeitig analysieren zu können [4]. Die CVA spielt ihr größtes Potenzial in jenen Situationen aus, wo volldimensionale spektrale und radiometrische Information gewünscht wird [14]. LAMBIN und STRAHLER definieren Veränderungsvektoren (Change Vectors) als die vektoriellen Differenzen zwischen sukzessiven Aufnahmezeitpunkten, d. h. entlang von Zeittrajektorien, jeweils repräsentiert als ein Vektor in einem multidimensionalen Werteraum [16]. Die Vektorlänge zeigt die Größe der Veränderung zwischen den (Folge-)Jahren an, während die Richtung den Veränderungscharakter induziert. In ihrer Arbeit verwendeten die beiden genannten Autoren die Hauptachsentransformation und berechneten Veränderungsvektoren für die westafrikanische Sahelzone. Sie schied vier Grade der Veränderungsintensität und vier grundsätzlich unterschiedliche Arten der Veränderung aus. Die Vektorlänge, also die Veränderungsintensität, kann durch die Euklidische Distanz zwischen zwei Punkten im n-dimensionalen Merkmalsraum berechnet werden.

JOHNSON und KASISCHKE vertreten die Meinung, dass die Change-Vector-Methode die indikativste und am besten zu interpretierende ist [14], dies unter der Voraussetzung, dass statt Rohdaten phänomenologisch relevante Spektralwerte wie etwa jene der Tasseled-Cap-Transformation (TCT) verwendet werden. So würde zum Beispiel ein Vegetationsverlust durch Vektoren angezeigt werden, die durch einen Anstieg der TCT-Helligkeit und eine Abnahme der TCT-Greenness charakterisiert sind.

Für die Untersuchungen im Studiengebiet Gadarif wurde eine multispektrale CVA zur Bestimmung der Abholzung und Urbarmachung auf der Basis von Greenness und Brightness, abgeleitet nach der TCT von KAUTH und THOMAS [15], verwendet. Hierbei ist die Greenness mit Ausmaß und Vitalität der Vegetation sowie die Brightness mit der Veränderung der Bodenreflexion korreliert. TCT kann als eine der besten Standardtransformationen von Satellitenbilddaten zur Verstärkung von deren spektralem Informationsgehalt angesehen werden. Hinsichtlich weiterer Ausführungen zu diesem Bildanalyseansatz, vor allem für die Sahelzone, sei auf die Arbeiten von JOHNSON und KASISCHKE [14], GROSS [8], NACKAERTS et al. [21], SULIEMAN und BUCHROITHNER [28] sowie SULIEMAN [27] verwiesen.

4.2 Klassifikation der Landbedeckungsveränderungen

Für eine quantitative Analyse der Veränderungsvektoren wurden die Richtungs- und Magnitudenkanäle der CVA als Input für eine Maximum-Likelihood-Klassifikation zur

Diskriminierung und Quantifizierung der verschiedenen Land Cover Changes verwendet. Die Art der Veränderung wird durch die Vektorrichtung definiert. Beim Magnitudenkanal spiegeln sich die hohen negativen Beträge von Abholzung und Urbarmachung wider, während hohe positive Werte Gebiete natürlicher Vegetationsregeneration indizieren. Dem entsprechend wurden die Klassen und Veränderungstypen der Landbedeckung in vier Kategorien eingeteilt (Tabelle 1).

Tabelle 1
Landbedeckungsklassen und Veränderungstypen (aus [27])

Land-cover class	Description
Natural vegetation (NV)	Natural forest and woodland savannah. The only remaining forests are Saref-Said National Forest and some small private forests on some unsuitable or low-fertility soils. Woodland savannah occurs along seasonal water courses and some depressions.
Natural vegetation converted to agricultural land (NV to AL)	Deforested areas under rain-fed mechanized farming. In general, they include bare soils, very sparsely vegetated areas, areas covered with crop residue or late emerging grass species debris. These areas are cultivated with Sorghum and Sesame.
Agricultural land (AL)	
Abandoned agricultural land (AAL)	Former agricultural land having been abandoned 3 – 10 years ago. These areas represent the naturally regenerated parts.

Die Auswahl repräsentativer Referenzgebiete für die überwachte Klassifizierung basierte auf Geländekartierungen, visuellen Vergleichen der Originalsatellitenbilder und dem Hintergrundwissen des Autors. Wie bereits RICHARDS und JIA im Jahr 1999 feststellten, besteht der wesentlichste Schritt bei einer überwachten Klassifizierung in der Auswahl der Trainingspixel [23]. Vor dieser wurden im Juli und August 2004 sowie im März und April 2005 ausführliche Geländekampagnen durchgeführt, bei denen von den „Pionierbauern“, die in die maschinenbasierte Bewirtschaftung in der Region investiert hatten, Informationen über die früheren Landnutzungen sowie die von ihnen festgestellten klimatischen Veränderungen im Untersuchungszeitraum eingeholt wurden [27]. Da für die gesamte Provinz Gadarif keine aktuelleren Karten über die Landnutzungsaktivitäten existieren, wurden auch Interviews mit der Belegschaft der National Forest Corporation durchgeführt. Vor dem visuellen Vergleich der Originalbilder wurden verschiedene Routinen von ERDAS Imagine, Version 8.7, für das Pre-Processing eingesetzt.

Während der Feldarbeit wurden Anzahl und Zusammensetzung des Baum- bzw. Strauchbestandes sowie die Above-Ground-Biomasse der krautigen Vegetation erfasst. Zur Beurteilung, welche geländebasierten Parameter mit Satellitenbilddaten korrelieren, wurde eine lineare Regression für die

einzelnen Landbedeckungsklassen über einem ein 3 x 3 Pixel großen Fenster eines NDVI-Bildes gerechnet.

5 Ergebnisse und Diskussion

Mittels der Berechnung der raumbezogenen Unterschiede in den Landbedeckungs- und Landnutzungsstatistiken des Untersuchungsgebietes wurden die Veränderungen in Landbedeckung und -nutzung bestimmt. Zur Erfassung der Vegetationsanteile auf den stillgelegten landwirtschaftlichen Flächen wurden Geländedaten verwendet. Tabelle 2 gibt die Landuse/Landcover-Changes für den Zeitraum 1972 bis 2003 wieder. Bild 3 zeigt auf der Basis von Satellitenbildern einen Vergleich der überwachten Klassifikation für die CVA-Kanäle.

Tabelle 2
Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsveränderungen im Zeitraum 1972 bis 2003 in ha (nach [27, 28]) – Abkürzungserläuterung im Text –

Klasse	1972 – 1979		1979 – 1999		1999 – 2003	
	Fläche	%	Fläche	%	Fläche	%
NV	34.5	14.1	45.9	18.7	54.3	22.2
NV to AL	194.8	79.5	27.6	11.2	19.2	7.9
AL	15.8	6.4	144.9	59.2	134.9	55.1
AAL	-	-	26.4	10.8	36.2	14.8
Gesamt	245.0	100	245.0	100	245.0	100

5.1 Veränderungen von 1972 bis 1979

Im Zeitraum von 1972 bis 1979 fand eine intensive Abholzung der natürlichen Vegetation infolge der dramatischen Expansion der maschinenbasierten regenbewässerten Landwirtschaft statt. Sie erreichte bis zu 11,4 % pro Jahr, und die Ackerfläche betrug zum Schluss mit etwa 210 000 ha 85,9 % der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets. Die befragten Bauern bezeichneten die 1970er-Jahre als die Goldene Zeit der „rain-fed mechanized agriculture“ in der Region. Die hohe anfängliche Profitabilität ermutigte viele Landwirte, zusätzliche Bereiche ihrer natürlichen Vegetationsbedeckung zu berauben. Die Bewirtschaftung neuen Landes hatte für sie darüber hinaus noch in zweifacher Hinsicht die positive Auswirkung, dass neue fruchtbare Felder gewonnen wurden und gleichzeitig das geschlagene Holz auf den lokalen Märkten als Brenn- und Baumaterial verkauft werden konnte.

5.2 Veränderungen von 1979 bis 1999

Von 1979 bis 1999 weist die Landbedeckung eine Zunahme der natürlichen Vegetation von ca. 4,6 % und des brachliegenden Ackerlandes (z. B. natürlicher Regenerationsgebiete) von etwa 10,8 % auf. Es ist eindeutig, dass die landwirtschaftliche Expansion während dieser Phase ihren Höhepunkt erreicht hatte, und die Bauern begannen, Teile ihres Ackerlandes aufgrund fallender Ernteerträge oder star-

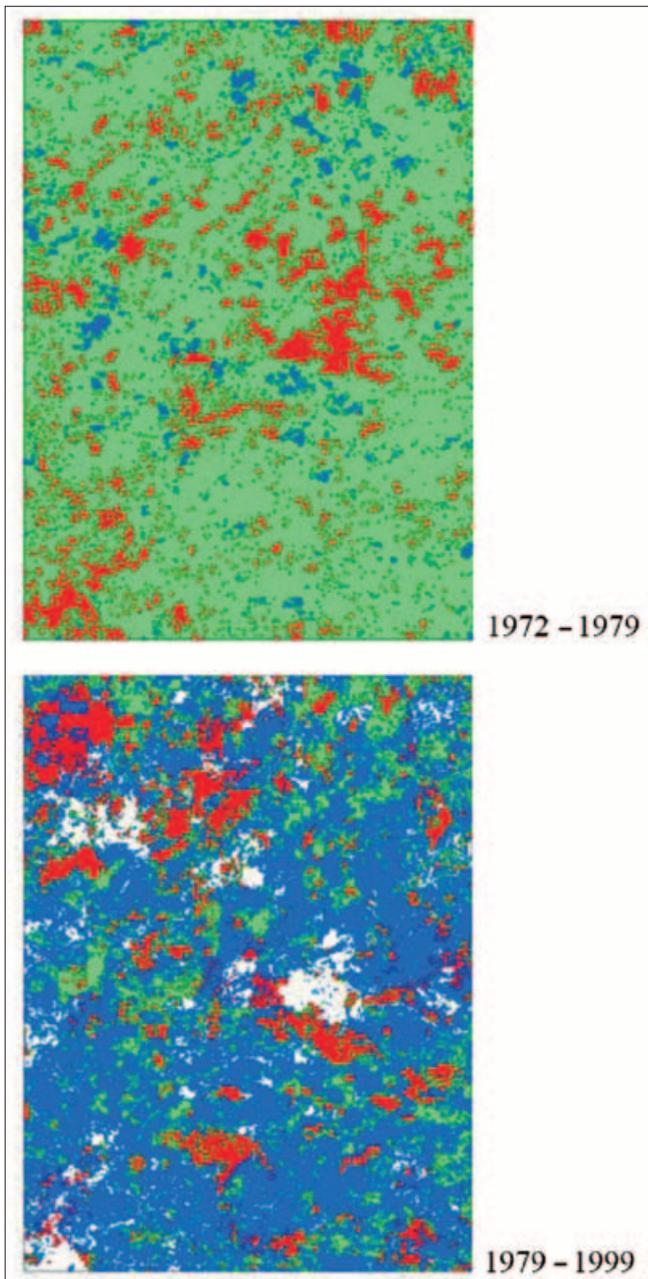


Bild 3. Vergleich der überwachten Klassifikation von CVA-Kanälen in drei Zeiträumen zwischen 1972 und 2003 aus [28]. Auf den ersten Blick ist die extreme Veränderung des Landnutzungsmusters erkennbar.

ken Unkrautbefalls brachzulegen. Die heftige Erosion durch die Intensivregen und die Bildung von tiefen Sprüngen im ausgetrockneten Boden ist nicht nur auf die intensive Agronomie, sondern auch auf die Veränderung der klimatischen Gegebenheiten in diesem Zeitraum zurückzuführen [7].

Die Analyse zusätzlicher Satellitenbildszenen aus den späten 1980er-Jahren könnte dabei helfen genauer zu bestimmen, wann die Bauern aufhörten, ihr gesamtes Land agronomisch zu nutzen. Das Southern Kassala Agricultural Project (SKAP) berichtete 1992, dass während der Saison 1990 rund 25 % des gesamten Ackerlandes brachlagen [26]. Von verschiedenen Autoren ist über eine natürliche Vegetationsverjüngung der brachen Felder berichtet worden [5, 20].

5.3 Veränderungen von 1999 bis 2003

Im Zeitraum 1999 bis 2003 verlangsamte sich die Konvertierung von Gebieten mit natürlicher Vegetation in Ackerland weiterhin. Lediglich etwa die Hälfte des Untersuchungsgebiets wurde ackerbaulich genutzt, während sich die natürliche Vegetationsbedeckung (die bereits bestehende und die sich natürlich zurückentwickelnden Bereiche) auf rund ein Viertel des Gesamtgebietes belief. Das brachgelegte Ackerland, das ca. 14,8 % des Gebietes einnahm, konnte in natürliche Restaurierungsareale überführt werden. Infolge entsprechender waldbaulicher Maßnahmen konnte die Produktivität der Brachen hinsichtlich des Wuchses von Brenn- und Bauholz gesteigert werden, während die Habitaterhaltung aufgrund ihrer offensichtlichen Vorteile eine der attraktiven Optionen für die Bauern war. ASEFA et al. stellten 2003 fest, dass Brachlegungen zu den üblichen Strategien gehören, um die Herstellung der Biodiversität in degradiertem Acker- und Weideland zu fördern [1].

Insgesamt 13 Baum- und Straucharten wurden während der Geländeerhebungen aufgenommen. Die generelle Zusammensetzung der Pflanzenassoziations spiegelt den Gesundheitszustand der Landschaft wider. Obwohl das Gebiet als *Acacia seyal*- und *Balanites aegyptiaca*-Savanne klassifiziert ist, stellt *Ziziphus spina-christi* (Frequenz = 26), gefolgt von *Acacia senegal*, die dominante Spezies dar. Dies könnte das hohe Potenzial der beiden Arten für eine natürliche Regeneration auf brachliegenden Feldern indizieren. Die kleinen Forstflecken inmitten einiger landwirtschaftlich genutzter Areale und die verstreuten Landstreifen zwischen den großen Gebieten maschinenbasiert bearbeiteter Felder, die in ihrem ungestörten Zustand belassen worden sind, stellen mehr oder minder die verbleibenden Bereiche für In-situ-Konservierung und für Samenressourcen zur natürlichen Regeneration und Klimaverbesserer dar.

Die Berechnungsergebnisse der linearen Regression zwischen NDVI und krautiger Above-Ground-Biomasse zeigen eine vergleichsweise hohe Korrelation ($r^2 = 0,62$), während jene mit der Anzahl der Bäume und Sträucher eine geringe Korrelation ($r^2 = 0,22$) aufweist. Mit der Zusammensetzung der Bäume und Sträucher besteht nahezu keine Korrelation. Allerdings könnten Berechnungen linearer und nicht-linearer Regressionen mit verschiedenen anderen Vegetationsindices wie ASVI oder VCI möglicherweise bessere Ergebnisse zeitigen. Hier zeigte sich die Bedeutung der terrestrischen Erhebungen während der beiden bereits erwähnten Geländekampagnen.

6 Schlussfolgerungen

Generell kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass die Ergebnisse deutlich das Potenzial der CVA zeigen, unterschiedliche Arten der Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsveränderungen hinsichtlich Vegetationsverlust und -zuwachs aufgrund der Expansion von regenbewässerter maschinenbasierter Landwirtschaft richtungs- und größenordnungsmäßig zu erfassen. Des Weiteren zeigen sie eine sehr rasche Abholzung innerhalb eines kritischen Bereichs. Die im Jahre 2003 verbliebene natürliche Vegetation repräsentiert ein Fünftel jener des Jahres 1972. Die auf den brachgelegten Feldern frisch gewachsene Vegetation kann der Restaurierung und natürlichen Konservierung der Landschaft dienen. Dass sich hier im Gegensatz zu den tropischen Regenwäldern eine der ursprünglichen Vegetation nahezu idente Waldvegetation und nicht eine variierende

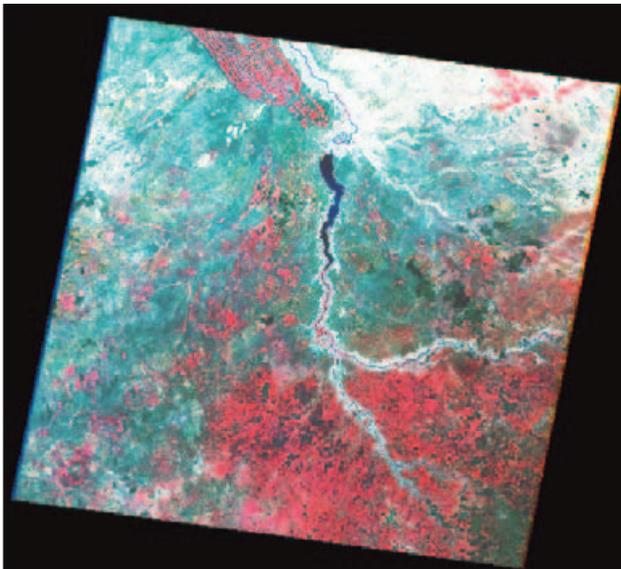


Bild 4a. Falschfarbenkompositum einer Landsat-MSS-Szene vom 5. November 1979 (Erläuterungen siehe Text)

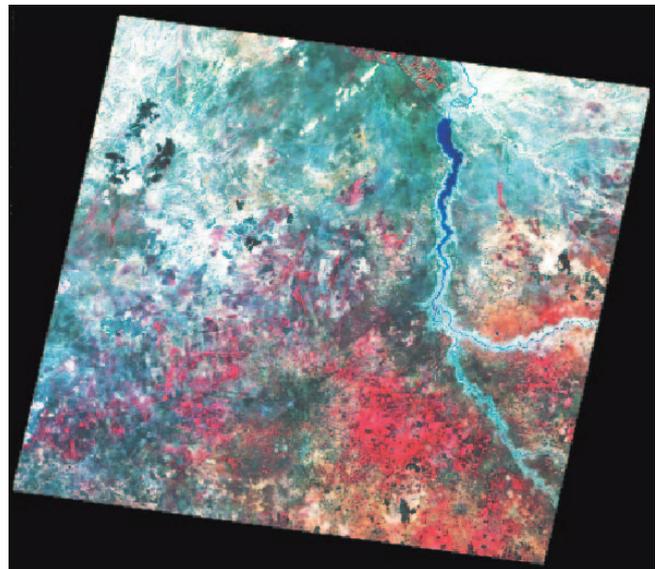


Bild 4b. Falschfarbenkompositum einer Landsat-ETM+-Szene vom 22. November 1999 (Erläuterungen siehe Text)

Sekundärvegetation bildet, hängt vermutlich damit zusammen, dass auch die originären lockeren Savannenwälder im Kontrast zu den eben erwähnten Regenwäldern eine annähernd gleiche Sonneneinstrahlung hatten. Für deren Holzgewächse spielt augenscheinlich die Veränderung von Bodenchemismus und die Bodenkompaktion durch die vorangegangene intensive landwirtschaftliche Nutzung nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Ein Vergleich von Bild 4a mit Bild 4b zeigt anhand zweier Satellitenbilder großräumig die Veränderung von Landbedeckungsmustern im Raume Gadarif über einen Zeitraum von fast 20 Jahren mit einem Anwachsen der vegetationslosen ariden Wüstenbereiche im Nordosten. Aussagen der einheimischen Bevölkerung stützen diesen Satellitenbildbefund.

Dargestellt ist in Bild 4a ein Gebiet von rund 55 x 55 km² im Maßstab von etwa 1 : 1 650 000. Die hellen Stellen im Nordwesten stellen großteils Wolken dar, die hellen Partien im Nordosten Wüstenbereiche. Der dunkle Fleck südlich des Zentrums repräsentiert die Stadt Gadarif. Rot steht für aktive Vegetation.

In Bild 4b ist ein nahezu identes Gebiet wie in Bild 4a dargestellt, nur 20 Jahre später. Ein Vergleich beider Bilder zeigt, abgesehen von einem generellen Zuwachs von aktiver Vegetation (rot), anhand der hellen Partien im Nordosten das klimabedingte Vordringen der ariden Wüstenbereiche. Diese Zone ist – außer den markanten, kleinen roten Bewässerungsbereichen im äußersten Nordosten – eindeutig nicht anthropogen genutzt.

Geländedaten haben sich als äußerst wichtig für die Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit der Landbedeckungsveränderungen sowie für die Bewertung der Vegetationsattribute, die sonst nur aus Landsat-Bildern hätten geschätzt werden können, erwiesen. Die gesamten Landveränderungsprozesse seit den 1950er-Jahren müssen im Kontext sich ändernder Klimaverhältnisse im Osten der Sahelzone betrachtet werden. Vor diesem Hintergrund sind auch die in der Literatur sowie auf verschiedenen Internetseiten, in Internet-Klimaforen, aber auch bei Wikipedia zu findenden, im Folgenden resümierend wiedergegebenen Feststellungen zu sehen, in deren Bild sich die Beobach-

tungen der hier referierten Untersuchungen bestens einfügen.

Hatte man ursprünglich angenommen, dass die anthropogenen Veränderungen der Landnutzung der Auslöser der Dürre in den 1970er-Jahren waren, so haben Modelluntersuchungen der jüngsten Zeit gezeigt, dass die primäre Ursache in den klimatischen Randbedingungen lag. Die Vegetationsdecke spielte nur in Rückkopplungen mit dem Klima eine wichtigere Rolle.

Über die Mechanismen im Einzelnen bestehen noch Unklarheiten, weshalb die Projektionen im Hinblick auf eine globale Erwärmung im 21. Jahrhundert zum Teil unterschiedlich ausfallen. Entscheidend scheinen die Meeresoberflächentemperaturen der umgebenden Ozeanbecken zu sein, einschließlich einer Fernwirkung des Pazifiks [7, 9, 13, 17]. Die Rückwirkung dieser komplexen klimatischen Interaktionen auf die gegenwärtige und zukünftige Landnutzung im Ostsudan zu ermitteln, muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Dass der Kampf gegen Klimawandel, Wüstenausbreitung und Naturkatastrophen aber nicht aussichtslos ist, zeigt ein aktueller Beitrag auf Spiegel-online.de anlässlich des Earth Day am 22. April 2009 [33]. Dieser aktuelle Beitrag bestätigt, gestützt auf wissenschaftlich valide Befunde, den positiven Einfluss, welchen die wiederkehrende Baumvegetation auf das Regionalklima und die Gesamtfertilität eines Gebietes ausüben kann, und somit auch die aus den vorgestellten Untersuchungen im Ostsudan gezogenen Schlüsse.

Dank

Die gegenständlichen Untersuchungen wurden dankenswerterweise durch die finanzielle Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD) ermöglicht. Kritische Gutachterbemerkungen wurden berücksichtigt und halfen, das Manuskript, welches auf einer ursprünglich stark fernerkundungsmethodisch orientierten Arbeit basierte, noch mehr in Richtung der Wechselbeziehung von Klima, Landnutzung und Ökologie zu lenken und dessen Qualität zu verbessern. Hierfür sei ebenfalls gedankt. Ein Dank geht auch an HUSSEIN M. SULIEMAN.

Literatur

- [1] Asefa, D. T.; Oba, G.; Weladji, R. B.; Colman, J. E.: An assessment of restoration biodiversity in degraded high mountain grazing lands in Northern Ethiopia. In: Land Degradation & Development **14** (2003), S. 25 – 38
- [2] Ayoub, A. T.: Land degradation, rain-fed variation and food production in the Sahelian zone of Sudan. In: Land Degradation & Development **10** (1999), S. 489 – 500
- [3] Coppin, P. R.; Bauer, M. E.: Change Detection in Forest Ecosystems with Remote Sensing Digital Imagery. In: Remote Sensing Reviews **13** (1996), S. 207 – 234
- [4] Coppin, P.; Jonckheere, I.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Lambin, E.: Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. In: International Journal of Remote Sensing **25** (2004) 9, S. 1565 – 1596
- [5] El Houri, A.: Land restoration and re-vegetation. In: FAO (Hrsg.): Role of Forestry in combating desertification. Rom: FAO, 1989 (= FAO Conservation Guide 21)
- [6] FRA, Global Forest Resources Assessment: Country Report 212: Sudan, Forestry Department. Rom: FAO, 2005
- [7] Giannini, A.; Saravanan, R.; Chang, P.: Oceanic forcing of Sahel rainfall on inter-annual to inter-decadal time scales. In: Science **302** (2003), S. 1027 – 1030
- [8] Groß, D.: Development of a semi-automated approach to map wetland changes in semi arid regions, using satellite data. Diplomarbeit. TU Dresden, ITC, 2003
- [9] Haarsma, R. J.; Selten, F. M.; Weber, S. L.; Kliphuis, M.: Sahel rainfall variability and response to greenhouse warming. In: Geophysical Research Letters **32** (2005), L17702
- [10] Harrison, M. N.; Jackson, J. K.: Ecological Classification of the Sudan. Forest Department, Forest Bulletin No. 2. Khartoum: Ministry of Agriculture, 1958
- [11] Hassan, K. I.: An Assessment of Natural Resources: with emphasis on agriculture and food security. Sudan: EDGE for consultancy & research, 2002 <http://www.worldsummit2002.org/texts/SudanRKamil> (abgerufen 11. Oktober 2005)
- [12] Huston, M. A.: Biological diversity: the coexistence of species on changing landscapes. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. S. 558 – 574
- [13] IPCC: Working Group II: Climatic Change Impacts, Adaption and Vulnerability, Kapitel 4: Ecosystems, their Properties, Goods and Services. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Box 4.2
- [14] Johnson, R. D.; Kasischke, E. S.: Change vector analysis: a technique for multi-spectral monitoring of land cover and condition. In: International Journal of Remote Sensing **19** (1998) 3, S. 411 – 426
- [15] Kauth, R. J.; Thomas, G. S.: The Tasseled Cap – A graphic description of the spectral development of the agricultural crops as seen by Landsat. In: Proceedings on Symposium on Machine Processing of Remotely sensed Data. West Lafayette: Purdue University, 29 Juni – 2 Juli 1976. S. 41 – 51
- [16] Lambin, E. F.; Strahler, A. H.: Change-vector analysis in multi-temporal space: A tool to detect and categorize land-cover processes using high temporal-resolution satellite data. In: Remote Sensing of the Environment **48** (1994), S. 231 – 244
- [17] Lu, J.; Delworth, T. L.: Oceanic forcing of the late 20th century Sahel drought. In: Geophysical Research Letters **32** (2005), L22706
- [18] Malila, W.: Change vector analysis: an approach for detecting forest changes with Landsat. In: Proceedings of the 6th Annual Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. West Lafayette: Purdue University, 3 – 6 Juni 1980. S. 326 – 335
- [19] Markham, B. L.; Barker, J. L.: Radiometric properties of U.S. processed Landsat MSS data. In: Remote Sensing of Environment **22** (1987), S. 39 – 71
- [20] Mohamed, Y. A.; Fadlalla, B.; Abdalla, A.; El Amin, M.; Adel Rahman, A.: Indicators of recovery in biomass and soil organic matter of Sudan's Sahel Region: A Case study of Northern Kordofan. Dryland Husbandry in the Sudan. Addis Ababa: OSSREA, 1996 (= DHP Publications Series, Nr. 1)
- [21] Nackaerts, K.; Vaesen, K.; Muys, B.; Coppin, P.: Comparative performance of a modified change vector analysis in forests change detection. In: International Journal of Remote Sensing **26** (2005) 5, S. 839 – 852
- [22] Peterson, D. L.; Egbert, S. L.; Price, K. P.; Martinko, E. A.: Identifying historical and recent land cover changes in Kansas using post-classification change detection techniques. In: Transactions of the Kansas Academy of Science **107** (2004) 3, S. 105 – 118
- [23] Richards, J. A.; Jia, X.: Remote Sensing Digital Image Analysis, An Introduction. Berlin: Springer, 1999. S. 259 – 291
- [24] SCSB (Sudan Country Study on Biodiversity): National Biodiversity Strategy and Action Plan. Khartoum, 2001
- [25] Singh, A.: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. In: International Journal of Remote Sensing **10** (1989), S. 989 – 1003
- [26] SKAP (Southern Kassa Agricultural project): Land use survey report (Main report). Band 1. Khartoum, 1992
- [27] Sulieman, H. M.: Mapping and Modelling of Vegetation Changes in the Southern Gadrif Region, Sudan. Using Remote Sensing. Land-Use Impact on Biophysical Processes. Dresden: TUDpress, 2008
- [28] Sulieman, H. M.; Buchroithner, M. F.: Assessment of Natural Vegetation Clearing and Regrowth in Southern Gadarif (Sudan) Using Change Vector Analysis on Remote Sensing And Field. Enschede: ISPRS Commission VII Mid-term Symposium Remote Sensing: From Pixels to Processes", 8 – 11 Mai 2006, S. 586 – 591
- [29] UNFPA (United Nations Population Fund): State of World Population. 2003
- [30] Warner, T.: Hyperspherical direction cosine change vector analysis. In: International Journal of Remote Sensing **26** (2005) 6, S. 1201 – 1221
- [31] Westman, W. E.; Strong, L. L.; Wilcox, B. A.: Tropical deforestation and species endangerment: the role of remote sensing. In: Landscape Ecology **3** (1989) 2, S. 97 – 109
- [32] Zheng, D.; Wallin, D. O.; Hao, Z.: Rates and patterns of landscape change detection between 1972 and 1988 in the Changbai Mountain area of China and North Korea. In: Landscape Ecology **12** (1997), S. 241 – 254; Enschede: ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes", 8 – 11 Mai 2006, S. 591
- [33] Aufforstung: Millionen neue Bäume spenden in der Sahelzone Leben. 22. April 2009 www.klima-wandel.com/2009/04/24/aufforstung-millionen-neue-baeume-spenden-in-der-sahelzone-leben/ (abgerufen 2. Juli 2009)

Manuskripteingang: 20.4.2009
Angenommen am: 30.6.2009



Buchroithner, Manfred F.

Prof. Dipl.-Geol. Dr. phil. habil.

Studium Geologie und Paläontologie von 1970 bis 1977 an der Universität Graz ♦ Studium Fernerkundung und Kartographie von 1979 bis 1980 am ITC Enschede ♦ 1977 Promotion zum Dr. phil. ♦ 1984 Habilitation zum Dr. phil. habil. ♦ seit 1992 Professor für Kartographie und seit 1997 Direktor des Instituts für Kartographie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden