

Kim André Vanselow

Die Ruhe nach dem Sturm

Eine Zeitreihenanalyse zur Entwicklung der Vegetationsbedeckung auf der Karibikinsel Guanaja nach Hurrikan Mitch

In der vorliegenden Studie wird die Vegetationsentwicklung der Karibikinsel Guanaja untersucht. Vor allem die Kiefern- und Mangrovenwälder der Insel wurden im Oktober 1998 durch Hurrikan Mitch nahezu komplett zerstört. Die Regeneration wurde im Frühjahr 2004 eingehend in der Diplomarbeit des Autors untersucht. Hier soll nun mit Hilfe einer Satellitenbild-Zeitreihenanalyse die Entwicklung der Vegetationsbedeckung auf Basis des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) bis heute nachvollzogen werden. Für die ehemaligen Kiefernwälder konnte eine durchweg positive Entwicklung des NDVI festgestellt werden. Die unzerstörten Kiefernwaldrelikte, die Eichenwälder und die Tropischen Hang- und Galeriewälder zeigen keinen signifikanten Trend im NDVI. Die ehemaligen Mangrovenwälder verhalten sich unterschiedlich: Für bestimmte Teile konnte ein Anstieg der Vegetationsbedeckung festgestellt werden, andere wiederum zeigen keine Anzeichen eines steigenden NDVI.

Schlagnworte: **Regeneration, Sukzession, NDVI, Fernerkundung, MODIS, Pinus, Mangrove**

1 Einleitung

Im Mai 2002 lernte ich Michael Richter etwas besser kennen. Wir waren zum Geländepraktikum in den Cinque Terre und er fragte mich, ob ich schon ein Thema für meine Diplomarbeit hätte. Er bot mir damals an, ein Thema auf den Äolischen Inseln zu bearbeiten. Als ich ihn dann wenige Monate später auf dem Gang des Instituts für Geographie (damals noch in der Kochstraße) traf, hatte er diese Idee aber längst verworfen. „Hamse schon mal was von der Insel Guanaja gehört?“ Ich musste passen. Ich hatte noch nie etwas von dieser zu Honduras gehörenden Karibikinsel gehört. „Hamse denn schon mal was von Hurrikan Mitch gehört?“ Hier konnte ich punkten. Der tödlichste Wirbelsturm des Jahrhunderts in der westlichen Hemisphäre, der im Oktober 1998 große Teile Mittelamerikas verwüstete, war sogar mir ein Begriff (KRAUSSE/DYER 1999). Im weiteren Verlauf des Gesprächs erklärte Richter, dass es auf Guanaja besondere Kiefernwälder mit *Pinus caribaea* var. *hondurensis* gäbe, welche allerdings durch eben diesen Hurrikan fast vollständig zerstört wurden und nun sehr dynamischen Jungwuchs zeigen. Er hatte die Insel kürzlich besucht und fand die Untersuchung der Regeneration sei ein wesentlich spannenderes Thema als eine weitere Studie auf den Äolischen Inseln. So kam es, dass ich im Dezember 2003 zu Feldforschungen nach Honduras aufbrach. Die Ergebnisse meiner Studie sowie die über die Korallenriffe von Melanie Kolb und die über die Mangroven von Thomas Fickert sind eingehend in VANSELOW (2005), KOLB (2004), VANSELOW et al. (2007), FICKERT et al. (2008) sowie FICKERT (2016 a, b) dokumentiert. Seit diesem

viermonatigen Aufenthalt 2003/2004 bin ich nie nach Guanaja zurückgekehrt. Ich frage mich jedoch häufig wie die Sukzession in den letzten 13 Jahren weiter verlief und ich kann mir gut vorstellen, dass es Michael Richter mitunter genauso geht. Dieser Frage ist diese Arbeit gewidmet, bei der ich leider ausschließlich auf Fernerkundungsdaten zurückgreifen muss. Aber wer weiß? Fernerkundungsstudien bedürfen immer eines sogenannten ground-truthing. Vielleicht ist dieser Artikel der Grundstein für eine weitere Feldkampagne auf Guanaja, am besten zusammen mit Michael.

2 Die Insel Guanaja

Guanaja gehört zu den Islas de la Bahía bzw. Bay Islands, einer Inselgruppe in der westlichen Karibik vor der honduranischen Küste. Der Archipel setzt sich aus den drei größeren Inseln Roatán, Utila und Guanaja, sowie aus etwa 70 kleineren Inseln und „Cays“ (Korallensandinseln) zusammen. Mit 56 km² ist Guanaja die zweitgrößte dieser Inseln. Als östlichste der drei Hauptinseln erstreckt sie sich zwischen 85° 49' und 85° 57' westlicher Länge sowie 16° 24' und 16° 31' nördlicher Breite. Ihre maximale Länge beträgt 17,5 km, an der breitesten Stelle misst sie 5,5 km. Das Klima der Insel wird maßgeblich durch das Meer und den Nordostpassat geprägt, von Mai bis Oktober können tropische Wirbelstürme auftreten. Die Temperaturen sind das ganze Jahr über relativ konstant und liegen bei 28° C im Jahresdurchschnitt. Nur in den Monaten November und Dezember ist ein Absinken der Temperaturen zu verzeichnen. Dies

hängt mit dem Heranziehen außertropischer Kaltfronten, sogenannter „Nortes“, zusammen, welche gegen Ende Oktober die Regenzeit eröffnen. In dieser Zeit werden die Niederschlagsmaxima der Region gemessen, eine echte Trockenzeit gibt es jedoch nicht. Der Jahresdurchschnittsniederschlag wird mit 2457 mm angegeben (Consultores en Recursos 1996). Die Insel ist ausgesprochen gebirgig und erreicht am Gipfel des Michael Rock Peak eine Höhe von 415 m ü. M. (VILLEDA et al. 2000). Der größte Teil besteht aus stark metamorphisierten Gneissen und Glimmerschiefern und weist sehr flachgründige und unfruchtbare Böden (Lithosole, Regosole) auf. Nur an den Inselrändern sind häufig tiefgründige Sumpfböden über Schwemmmaterial vorzufinden. Das Vegetationsbild der Insel wird von vier wichtigen Formationen bestimmt: In den steilen und höheren Lagen dominierte vor dem Hurrikan ein tropischer Offenwald mit *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Durch den Sturm wurden diese Wälder jedoch fast restlos zerstört. Statt ihrer waren im Frühjahr 2004 Gebüschformationen, die ein frühes Regenerationsstadium der Wälder darstellen,

vorzufinden. Tiefere, feuchtere Hänge und Talflanken beherbergen einen immergrünen Eichenwald mit *Quercus oleoides*. In den tief eingeschnittenen Kerbtälern wächst ein artenreicher tropischer Hang- und Galeriewald. Flache, schlecht entwässerte Gebiete werden von Mangroven dominiert, die jedoch im Frühjahr 2004 sehr große Sturmschäden aufwiesen (Abbildung 1).

3 Hurrikan Mitch

Wie die meisten atlantischen Hurrikane entstand Mitch aus einer tropischen Welle (*tropical wave*, *easterly wave*) die ausgehend von Westafrika den Atlantik überquerte. Am 20. Oktober bildeten sich erstmals organisierte Wolkenmuster über der südlichen Zentralkaribik und Schauer und Gewitter nahmen zu. Am 22. Oktober wurde der Sturm als Tropische Depression klassifiziert, die langsam westwärts zog und über dem warmen Meer rasch an Stärke gewann.

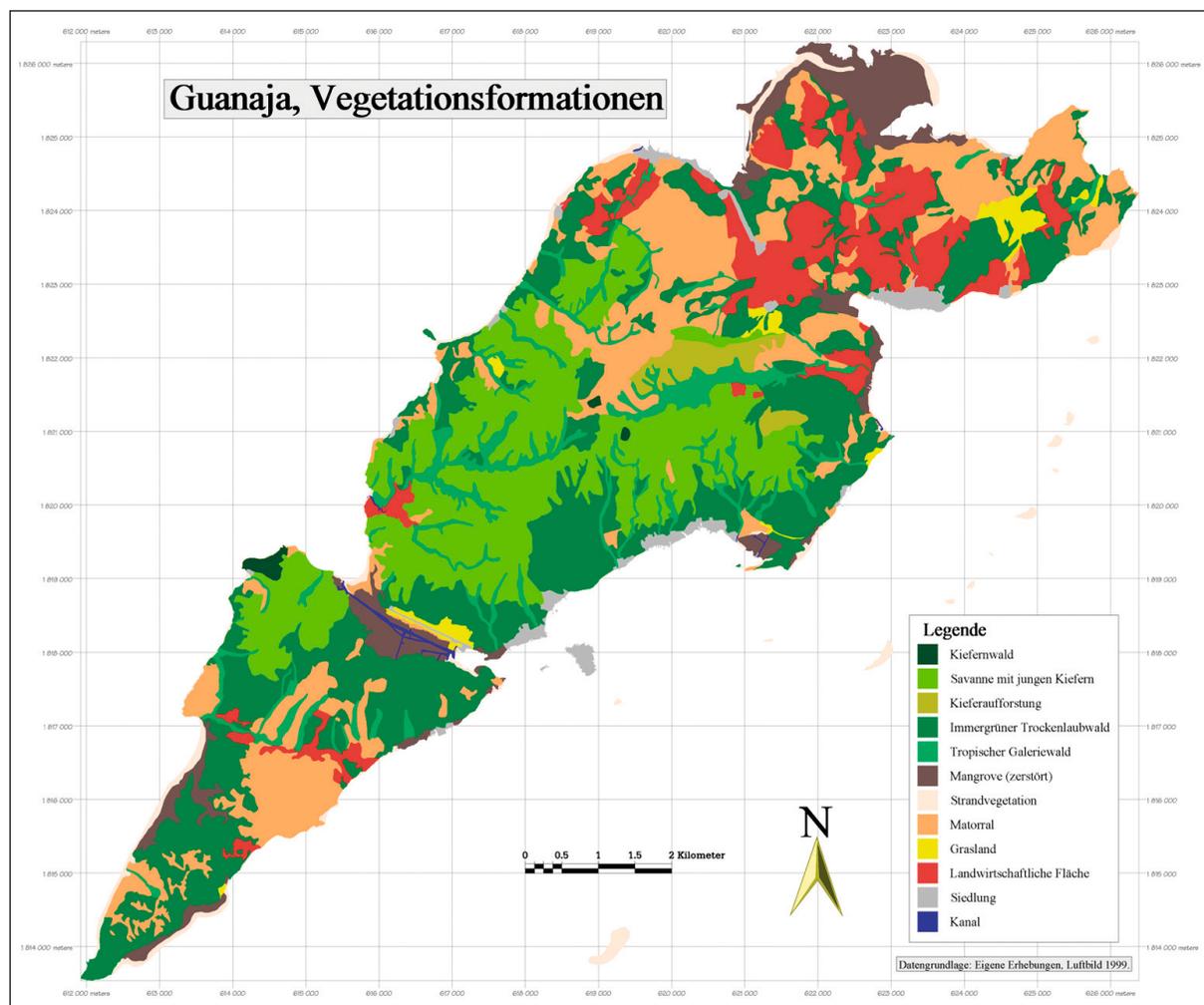


Abb. 1: Vegetationsformationen der Insel Guanaja im Frühjahr 2004

(Quelle: VANSELOW 2005)

Bereits am gleichen Abend wurden Windgeschwindigkeiten von mehr als 40 Knoten gemessen und die Depression zum 13. benannten Tropischen Sturm der Saison erhoben, Mitch. Sein Zentrum lag knapp vor der kolumbianischen Karibikküste. Am Morgen des 24. Oktober erreichte Mitch Hurrikanstärke. Das Zentrum befand sich nun 470 km südwestlich von Kingston, Jamaika. Innerhalb der nächsten 24 Stunden fiel der Kerndruck auf nur noch 924 hPa. Der Durchmesser des gesamten Systems reichte nun von Zentralnicaragua bis nach Südkuba. Am Nachmittag des 26. Oktober erreichte der Kerndruck sein Minimum mit 905 hPa. Mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 165 Knoten (305 km/h) in einzelnen Böen war Mitch jetzt der stärkste Oktoberhurrikan seit Beginn der Messungen 1886. Das Zentrum befand sich zu dieser Zeit bereits nordöstlich der honduranischen Ostküste. Am 27. Oktober führte der Hurrikan mehrere abrupte Kurswechsel durch, die zu einiger Verwirrung führten. Zunächst befand er sich auf einem langsamen Westkurs und bedrohte damit Belize und Yucatán, wo bereits 75.000 Menschen evakuiert worden waren. Der Kurs wechselte jedoch schließlich auf eine südliche Zugrichtung, direkt auf die unvorbereiteten Islas de la Bahía zu. Das Sturmzentrum passierte Guanaja extrem nah als Kategorie-4-Hurrikan (mit 105 Knoten und Böen bis zu 130 Knoten). Vom Morgen des 27. bis zum 29. Oktober verlor Mitch zwar an Stärke, jedoch verharrte das Zentrum stationär vor der Nordküste von Honduras. Erst am Morgen des 29. Oktober traf der Hurrikan 130 km östlich von La Ceiba, mit Windgeschwindigkeiten von 85 Knoten und einem Kerndruck von 987 hPa, auf das Festland. Ab hier schwächte er sich zwar immer weiter ab, forderte aber aufgrund der verheerenden Niederschlagssummen in Honduras und Nicaragua über 10.000 Menschenleben (SANDNER 1999) und wurde so zu einem der tödlichsten Hurrikane seit Menschengedenken.

4 Ausgangslage der vorliegenden Arbeit

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Vegetationsentwicklung der (ehemaligen) Kiefernwälder sowie der Eichen- und Mangrovenwälder der Insel Guanaja. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Formation der Kiefernwälder. Als Grundlage verwende ich vor allem meine Diplomarbeit (VANSELOW 2005).

An den niedrigen Hanglagen der Insel bestimmt nach wie vor ein immergrüner Eichenwald das Vegetationsbild. Dieser wird von *Quercus oleoides* dominiert, oftmals in Reinbeständen, meist jedoch vergesellschaftet mit *Byrsonima crassifolia*. In den höheren Lagen findet man oft einen Mischwald der

Eiche mit *Pinus caribaea* var. *hondurensis* vor. Adulte Kiefern waren 2004 vor Ort kaum zu finden, nur abgestorbene Kiefernruinen ragten aus dem Laubdach. Diese Formation wurde, abgesehen von den Kiefern, nur wenig von Mitch in Mitleidenschaft gezogen. Das Gleiche gilt für die in den tief eingeschnittenen Kerbtälern wachsenden tropischen Galeriewälder, die aufgrund ihrer geschützten Lage keine direkten Schäden erlitten. Flache, schlecht entwässerte Ebenen und Feuchtgebiete, die unter keinem oder nur geringem Einfluss von Wellenenergie stehen, stellen den Lebensraum für Mangroven dar. Vor dem Hurrikan nahmen diese Gezeitenwälder eine Fläche von 243 ha ein (Consultores en Recursos 1996). Die dominante Baumart war und ist *Rhizophora mangle* (Rote Mangrove), welche mit ihren charakteristischen Stelzwurzeln vor dem Hurrikan die größten Flächen besiedelte. Außerdem sind *Avicennia germinans* (Weiße Mangrove), *Laguncularia racemosa* (Schwarze Mangrove) und *Conocarpus erectus* (Knopf-Mangrove) die kennzeichnenden Bäume. Mangroven reagieren jedoch sehr empfindlich auf mechanische Beanspruchung und Entlaubung (OGDEN 1992), was fast überall auf der Insel zur nahezu totalen Zerstörung dieser Vegetationsformation führte. Die Regeneration der Mangroven war im Frühjahr 2004 noch in einem sehr frühen Stadium. Besonders die östlich gelegenen Mangrovenflächen, die dem Hurrikan besonders stark ausgesetzt waren, präsentierten sich als Gewirr toter Stelzenwurzeln und Baumstümpfe, in dem der lichtliebende Mangrovenfarn *Acrostichum aureum* die einzigen grünen Flächen darstellte.

Als ausgedehnteste Vegetationsformation vor dem Hurrikan nahmen die Kiefernwälder eine Fläche von 1930 ha ein und prägten v.a. das zentrale Gebirgsmassiv (Macizo Central) sowie ein kleineres Gebiet auf dem Westteil um den Grant's Peak. Der Deckungsgrad der Baumschicht variierte je nach Standort zwischen 5 und 75% bei einer Wuchshöhe von 10 bis 25 m und einer Wuchsdichte von ca. 30 Bäumen pro Hektar. Bereits vor dem Sturm wies der Wald starke Schäden auf und das natürliche Regenerationsvermögen wurde als gering eingestuft (Consultores en Recursos 1996). Durch den Hurrikan wurden die Kiefernwälder jedoch fast restlos zerstört. Nur an drei geschützt liegenden Standorten ließ sich im Frühjahr 2004 der Habitus dieser Formation noch nachvollziehen. An ihrer statt fand man nun eine Gebüschformation vor, die ein frühes Regenerationsstadium der Wälder darstellte. Neben Jungpflanzen von *Pinus caribaea* var. *hondurensis* prägten die immergrünen Laubbäume *Quercus oleoides*, *Quercus sapotifolia*, *Byrsonima crassifolia* und *Curatella americana* sowie einige andere Laubsträucher, vor allem Melastomataceen, die Strauchschicht dieser Formation. In die Lücken zwischen den Sträuchern drängte sich das Gras *Trachypogon spicatus*.

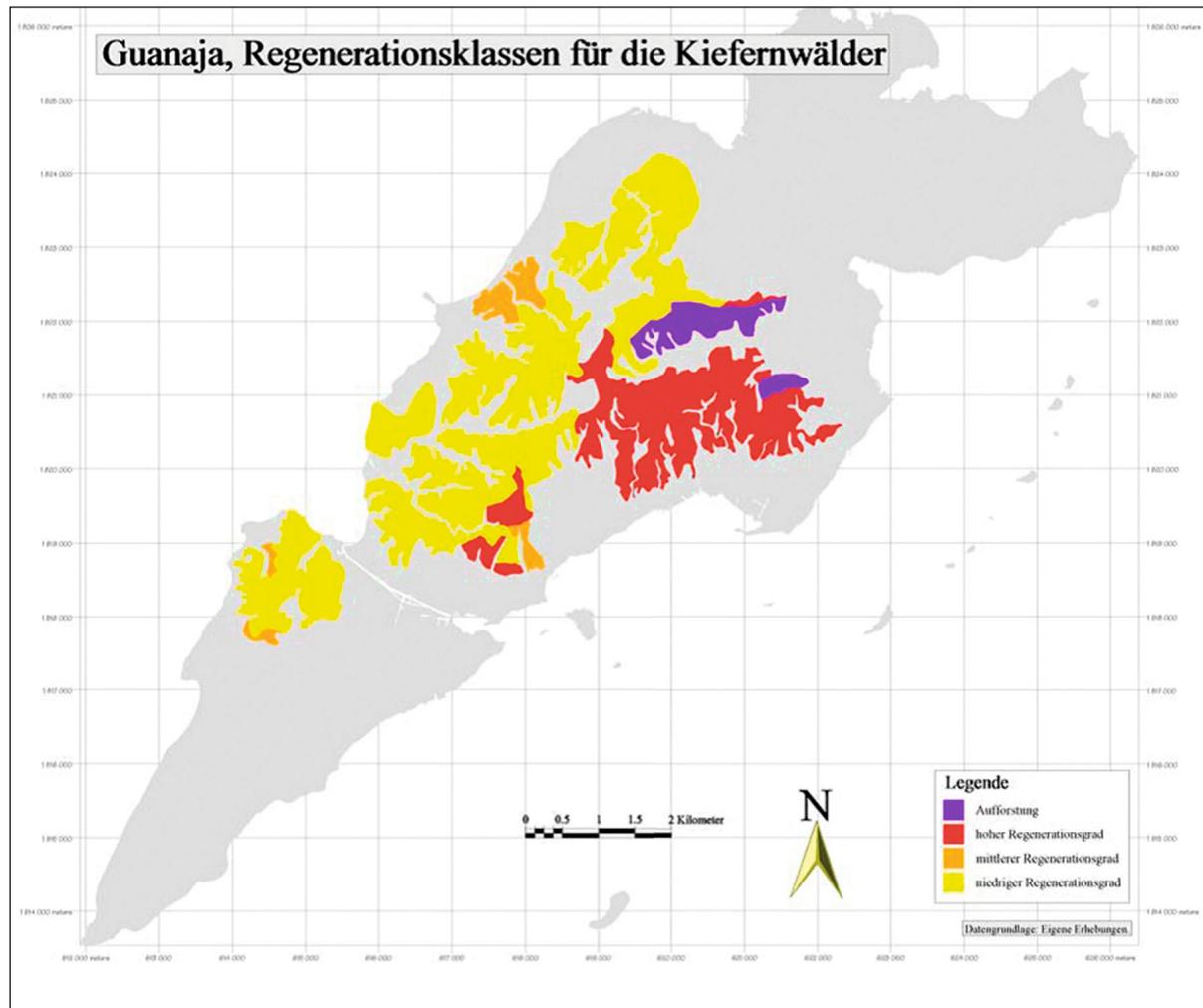


Abb. 2: Regenerationsklassen der Kiefernwälder der Insel Guanaja

(Quelle: VANSELOW 2005)

In meiner Diplomarbeit habe ich fünf verschiedene floristische Typen der zerstörten Kiefernwälder ausgewiesen, welche drei unterschiedlichen natürlichen Regenerationsklassen (hoch, mittel, niedrig) sowie den Aufforstungsflächen zugeordnet wurden (Abbildung 2).

Die Gebiete mit hohem Regenerationsgrad beschränkten sich zum größten Teil auf die hochgelegenen Beckenlagen der Insel und gehören zu den Vegetationstypen 1 und 2. Diese zeichnen sich durch die größte Anzahl abgestorbener großer Kiefern und den stärksten Kiefernjungwuchs aus. Hier konnten bei den Feldarbeiten 2004 auf Flächen von jeweils 400m² im Median 56 Jungbäume für Typ 1 und 48 für Typ 2 gezählt werden, welche einen Deckungswert von im Median 5% aufwiesen. Auch die größten Wuchshöhen der Jungbäume (Ø 1,33 m) wurden in den Aufnahmen dieser beiden Typen festgestellt. Während Typ 1 allerdings Gesamtdeckungswerte von 100% aufwies, die vor allem durch die dichte Grasschicht bedingt waren (Median: 92%), wurde Typ 2 von Laubstrüchern geprägt und bedeckte im Median nur 87%. Eine Hochrechnung

der Wuchseleistungen dieser Regenerationsklasse um 15 Jahre ergab eine Wuchshöhe von ca. 5 m. Diese ist jedoch vor dem Hintergrund bestehender Wuchsversuche als zu niedrig anzusehen. Wahrscheinlich ist, dass Konkurrenz der Kiefern untereinander und mit Gras- und Laubstrauchbewuchs das Wachstum zu Beginn der Sukzession noch einschränken. Sobald sich die stärksten Exemplare durchgesetzt haben, nehmen die Wachstumsraten in der Regel zu. Vor diesem Hintergrund könnte das ursprüngliche Bild mit Kiefern von 10 bis 12 m Höhe dann innerhalb von etwa 20 Jahren (also bis 2024) wieder erreicht werden.

Für die Gebiete mit mittlerem Regenerationsgrad ist ebenfalls eine stetige Regeneration zum Ursprungsbild zu erwarten, allerdings wird diese länger dauern als für die Gebiete mit hohem Regenerationsgrad. In diese Klasse gehören Aufnahmen der Vegetationstypen 1 und 2 mit für diese Gruppe unterdurchschnittlichen Wuchseleistungen sowie Aufnahmen des Typs 3. Letzterer nimmt über fast alle untersuchten Faktoren eine Übergangsstellung ein.

Mittlere Regenerationsraten (Median: 55 Kiefern mit 3% Deckung und 1 m Wuchshöhe) waren hier bei mittleren Gesamt- (Median 87%), Gras- (73%) und Laubstrauchdeckungen (6%) auszumachen. Auch beschränkten sich die Aufnahmen des Typs 3 nicht auf eine bestimmte Gegend. Es handelte sich meist um Hänge, die von Quarzschutt und geringen Deckungen geprägt waren, aber am Übergang zu dichter bewachsenen Flächen lagen.

Die Gebiete mit geringem Regenerationsgrad müssen nochmals unterteilt werden. Die Flächen im Osten und Zentrum des zentralen Gebirgsmassivs wurden von Laubsträuchern und -bäumen geprägt, zwischen denen sehr wenig Kiefernregeneration vorzufinden war. Dies führte jedoch zu keinen nachhaltigen ökologischen Problemen. Viel schwerwiegender war der geringe Regenerationsgrad in den steilen Lagen an der Nordseite und im Westen des Massivs. Die Flächen, die bereits vor dem Hurrikan entwaldet waren (Grant's Peak, El Soldado), waren bereits so stark degradiert, dass sie nicht mehr von der Samenverbreitung durch den Hurrikan profitieren konnten. Es wurde daher angenommen, dass diese Flächen auch in Zukunft waldfrei bleiben würden. Noch problematischer wurde die Entwicklung der Flächen bewertet, die vor dem Hurrikan große Waldbestände aufwiesen, danach jedoch besonders schlecht regenerierten. Solche Flächen waren vor allem auf der Nordseite des Michael Rock Peak zu finden. Diese Gebiete wurden vor allem von Aufnahmen des Vegetationstyps 4, zum Teil auch des Typs 5, gebildet. Diese waren durch geringe Gesamt- (Median: 55 bzw. 51%) und Grasdeckungen (45 bzw. 44%) auf extrem steinigem Böden gekennzeichnet. Die Deckung der Kiefern lag sogar nur bei jeweils 1%. So konnte in diesen Gebieten der Boden nicht ausreichend geschützt werden und es bestand die Gefahr, dass sie sich zu irreversiblen Ödland entwickeln. Die Aufnahmen des Typs 4 zeichneten sich gegenüber dem Typ 5 durch deutlich höhere Laubstrauchdeckungen aus. Diese war vor allem auf skleromorphe Zwergsträucher wie z. B. *Miconia lundelliana* zurückzuführen, die im Typ 5 weitestgehend fehlten. Lokal ließen sich die Aufnahmen des Typs 4 hauptsächlich auf die Nordabdachung eingrenzen, jedoch konnten auch an steinigem Mittelhängen der Südseite ähnliche Bestände aufgenommen werden. Die Aufnahmen des Typs 5 konnten nicht als derart ortsfest dargestellt werden. Hier handelte es sich um Aufnahmen, die auf steinigem, stark erodierten Flächen inmitten von Gebieten mit höheren Regenerationsraten vorkamen. Die Zuwachsraten waren bei beiden Typen gering. Für Typ 4 lag die Durchschnittshöhe im Frühjahr 2004 bei 0,65 (+/- 0,23) m, für Typ 5 nur bei 0,42 (+/- 0,13) m. Bei Annahme eines gleichmäßigen Wachstums der Bäume wurde mit einer Wuchshöhe von nur maximal 2,5 bis 3 m innerhalb von 10 Jahren gerechnet.

Die Gefahr der Verödung der Flächen des Typs 4 und 5 war auch der Hauptkritikpunkt an der Standortwahl der ersten Aufforstungsphase. Zwar wurde mit der Quebrada de la Ensenada ein wichtiges Trinkwassergewinnungsgebiet aufgeforstet, doch wäre hier nach Auffassung des Autors aufgrund des Strauch- und Grasbewuchses auch ohne Eingriff des Menschen keine derart massive Erosion wie in manch anderen Gebieten aufgetreten. Auf der Nordseite der Insel, unterhalb von Michael Rock Peak, fehlte eine geschlossene Grasdecke ebenso wie eine gut ausgebildete Laubstrauchschiebt. Die Erosion schritt deshalb schnell voran. Bereits 2004 war zwischen den abgestorbenen Kiefern kaum noch echter Boden vorzufinden. Stattdessen prägten weite Quarzschuttfelder die steile Nordflanke. Die Aussage von Mitarbeitern der staatlichen Forstschule, dass die Nordseite keine Siedlung mit Wasser versorgt, erschien aufgrund der nachhaltigen Degradation der Böden sowie der Vegetation in dem Gebiet mit dem höchsten Tourismuspotential (auf der Nordseite befinden sich die schönsten Strände, die spektakulärsten Wasserfälle und die meisten Resorts) sehr unüberlegt. Allerdings musste auch anerkannt werden, dass sich die Kiefern auf den bepflanzten Flächen gegenüber der natürlichen Regeneration sehr gut entwickeln. Hier waren mit Abstand die höchsten Zuwachsraten zu verzeichnen (Median: 40 Kiefern mit 4% Deckung und 2,1 m Wuchshöhe).

In meinem Beitrag möchte ich auf der Basis dieser Daten die Vegetationsentwicklung seit den Feldstudien aus dem Jahr 2004 nachvollziehen. Allerdings ist es mir mit der verwendeten Methodik und ohne weiteren Feldaufenthalt leider nicht möglich die (prognostizierten) Wuchshöhen oder die Zahl der Bäume zu überprüfen. Möglich sind jedoch Angaben zum relativen Deckungswert, welcher über den Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ermittelbar ist. Basierend auf den Ergebnissen meiner Diplomarbeit stelle ich dazu die folgenden Hypothesen auf:

1. Ehemalige Kiefernwaldgebiete mit hohem und mittlerem Regenerationsgrad sowie die Aufforstungsflächen zeigen einen positiven Trend des NDVI.
2. Gebiete mit geringem Regenerationsgrad zeigen keinen signifikanten Trend im NDVI und verharren auf relativ niedrigem Niveau.
3. Gebiete der unzerstörten Kiefernwaldrelikte, der Eichenwälder sowie der Tropischen Galeriewälder zeigen keinen signifikanten Trend im NDVI und verharren auf relativ hohem Niveau.
4. Gebiete der Mangrovenwälder zeigen keinen signifikanten Trend im NDVI und verharren auf relativ niedrigem Niveau.

5 Daten und Methoden

Für diese Untersuchung nutze ich das MODIS AQUA Produkt MYD13Q1, welches verschiedene Vegetationsindizes mit einer zeitlichen Auflösung von 16 Tagen sowie einer räumlichen Auflösung von 250x250m² zur Verfügung stellt. Von diesen wird ausschließlich der NDVI verwendet. Der Datensatz besteht aus 324 Satellitenbildszenen im Abstand von jeweils 16 Tagen. Die Zeitreihe startet am 4. Juli 2002, die letzte Szene in der vorliegenden Analyse stammt vom 19.7.2016. Somit ergibt sich für jedes 250x250 m² Pixel der Insel eine Zeitreihe von 14 Jahren. Die Situation der Vegetationsbedeckung vor und direkt nach Mitch kann damit leider nicht abgedeckt werden. Diese Studie steigt also ca. vier Jahre nach dem Hurrikan und ca. zwei Jahre vor der Datenerhebung für die damalige Diplomarbeit ein.

Bei der Betrachtung des Wandels der Vegetationsbedeckung über die Zeit werden drei Typen der Veränderung unterschieden: saisonale, graduelle und abrupte Veränderung. Saisonale Veränderung ist i.d.R. abhängig vom jährlichen Temperatur- und Niederschlagsgang, welche die Phänologie beeinflussen. Graduelle Veränderung kann durch interannuelle Klimavariabilität, voranschreitende Landdegradation oder Sukzession hervorgerufen werden. Abrupte Veränderung wird durch Störungen und Extremereignisse verursacht (z.B. Stürme, Feuer, etc.). Ein geeignetes Werkzeug zur Analyse der Veränderung der Vegetationsbedeckung muss in der Lage sein, zwischen diesen drei Typen zu unterscheiden. Hierzu verwende ich den Breaks For Additive Seasonal and Trend (BFAST) Algorithmus von VERBESSELT et al. (2010). Diese Methode zerlegt die Information in der Zeitreihe in einem iterativen Prozess in Trend-, saisonale und Rauschkomponenten. Somit können auch abrupte Veränderungen in der saisonalen und der Trendkomponente aufgedeckt und graduelle sowie abrupte Veränderungen charakterisiert werden, indem

Zeitpunkt bzw. -verlauf, Magnitude und Richtung der Veränderung extrahiert werden. Veränderungen in der Trendkomponente können somit als graduelle oder abrupte Veränderungen interpretiert werden, wogegen Veränderungen in der saisonalen Komponente phänologische Veränderungen anzeigen. Der Fokus liegt auf den graduellen und abrupten Veränderungen. Die detektierten Veränderungen werden anschließend in einer Karte dargestellt.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Breakpoints in den Zeitreihen

Zunächst wurde für jedes Pixel der Insel der NDVI-Trend mit der BFAST Methode untersucht. Die Analyse wurde unter der Annahme durchgeführt, dass es mehrere Umkehrpunkte im Trend (sogenannte Breakpoints) gibt. Es zeigte sich jedoch, dass es kaum Pixel gibt, für die mehr als ein solcher Breakpoint detektiert werden konnte. Deshalb wurde die finale Analyse mit der Annahme eines Breakpoints durchgeführt.

In den meisten Gegenden der Hauptinsel konnten keine Breakpoints ausgemacht werden (Abbildung 3a). Die größte Fläche, die Breakpoints zeigt, liegt im Nordosten der Insel bei der Ortschaft Mangrove Bight. Hier kam es v.a. 2006 zu einem Break, d.h. zu einem abrupten Wechsel des Trends. Zur etwa gleichen Zeit konnten kleinere Flächen mit einem Break in anderen Teilen der Insel detektiert werden. Breakpoints entstehen in der Regel durch Störungen. Für Guanaja wäre ein weiterer Hurrikan oder größerer Brand als Ursache vorstellbar. Die hier aufgedeckten Breaks zeigen allerdings einen abnehmenden NDVI im ersten Segment und anschließend keine weiteren signifikanten Veränderungen im zweiten Segment. Eine Interpretation erscheint schwierig. Bei der größten sich so verhaltenden Fläche handelt es sich

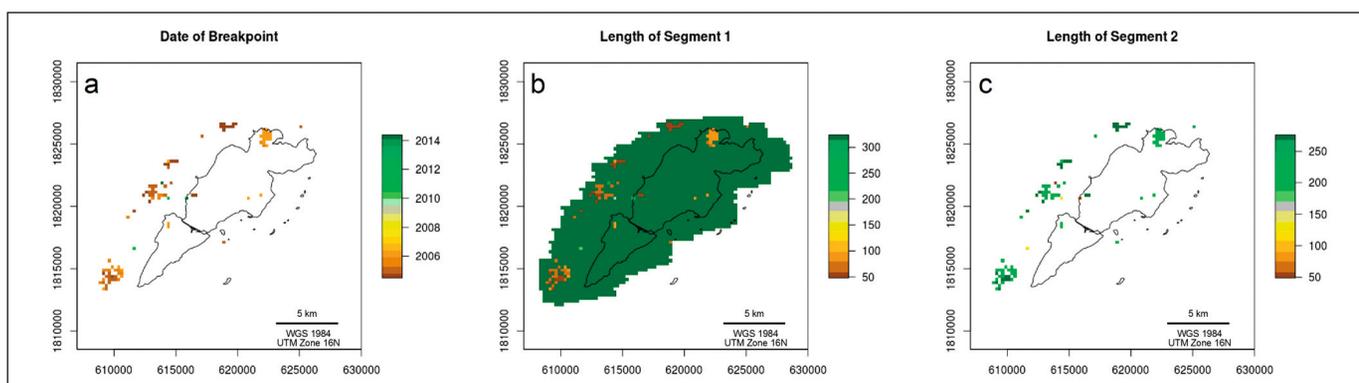


Abb. 3: Zeitpunkt der Breakpoints (a), Länge des ersten Segments (b) und Länge des zweiten Segments (c)

um ein Weidegebiet. Denkbar ist, dass hier Überweidung oder Dürre in den Jahren bis 2006 die Ursache ist. Auch einige der Riffe zeigen Breakpoints. Womit diese zusammenhängen konnte jedoch nicht evaluiert werden. Dadurch, dass nur maximal ein Breakpoint herausgearbeitet wurde, ergeben sich maximal zwei Trendsegmente für die einzelnen Pixel, eines vor und eines nach dem Breakpoint. Segment 1 geht für den größten Teil der Insel über die gesamte Zeitreihe (14 Jahre), da für die meisten Pixel kein Breakpoint detektiert werden konnte (Abbildung 3b). Bei den Pixeln mit Breakpoint zeigt sich meist ein kurzes Segment 1 (<50 bis 100 Szenen x 16 Tage), was bestätigt, dass es bereits zwei Jahre nach den Datenaufnahmen 2004 ein Ereignis oder mehrere Ereignisse gab, die zu einer Veränderung im Trend geführt haben. Das Segment 2 betrifft nur Pixel, die einen Breakpoint aufweisen (Abbildung 3c).

6.2 Richtung und Signifikanz des Trends

Als nächstes wurde die Richtung und Signifikanz ($p < 0,05$) der Trends in den jeweiligen Segmenten untersucht. Signifikante negative Trends, also eine Abnahme des NDVI, konnten meist nur für die Pixel mit Breakpoint im ersten Segment festgestellt werden (Abbildung 4a). Vor allem das bereits erwähnte Weidegebiet bei Mangrove Bight im Nordosten der Insel sowie die Riffe im Norden stechen hervor. Dort ist im relativ kurzen Segment 1 eine signifikante Abnahme der Bedeckung mit grüner Vegetation zu verzeichnen. Der Großteil der Insel, für den keine Breakpoints detektiert werden konnten und der somit nur aus einem Segment über die gesamte Zeitreihe (14 Jahre) besteht, zeigt keinen signifikanten negativen Trend. Auch die soeben besprochenen Flächen mit einem Breakpoint haben in ihrem zweiten, längeren Segment keinen signifikanten negativen Trend mehr (Abbildung 4b). Nach dieser Datenlage kam es also seit der Datenaufnahme 2004 für den Großteil der Insel zu keinen gravierenden Störungsereignissen wie erneuten Stürmen oder großen Feuern, die zu einer signifikanten Auflichtung der Vegetationsdecke geführt hätten. Dies widerspricht allerdings Berichten über zwei große Feuer in den Kiefergebieten im Jahre 2005, welche durch die MODIS-Daten offenbar nicht abgebildet werden (vgl. VANSELOW et al. 2007).

Signifikante positive Trends, also eine Zunahme der Bedeckung mit grüner Vegetation, wurden vor allem für weite Teile des Zentrums des Hauptteils der Insel, für den Nordosten des Westteils der Insel, sowie das Zentrum des Ostteils der Insel festgestellt (4c und d). Dabei handelt es sich überwiegend um Flächen des zerstörten Kiefernwaldes. Hierbei spielt die Regenerationsklasse bzw. der Vegetationstyp aus

VANSELOW (2005) offenbar keine entscheidende Rolle. Sowohl die 2004 gut regenerierenden Beckenlagen als auch die kaum regenerierenden Steillagen der Nordseite zeigen einen signifikant positiven Trend des NDVI.

Mit Blick auf die Mangroven ist festzustellen, dass vor allem die große Mangrovenfläche im Zentrum der Insel (am Flughafen) einen signifikanten positiven Trend zu mehr grüner Vegetationsbedeckung zeigt. Diese Fläche war bei der Datenaufnahme 2004 die einzige, auf der Regeneration festgestellt wurde. Auch die Mangroven um El Bight zeigen nun eine positive Entwicklung. Für den größten ehemaligen Mangrovenbestand im Nordosten der Insel (North East Bight) kann dieser Trend jedoch nicht bestätigt werden. Hier scheint auch 18 Jahre nach dem Hurrikan noch keine Regeneration eingesetzt zu haben. Thomas FICKERT (2016 a, b) untersuchte die Regeneration der Mangroven auf Guanaja entlang von Linientransekten in sechs unterschiedlichen Arealen. Er konnte auf den meisten Flächen im Jahr 2009 regen Jungwuchs feststellen, der bis 2016 zu teils dichten 4 bis 5 Meter hohen Mangroven-Dickichten aufgewachsen war. Er kommt zu dem Schluss, dass es sich bei den Mangroven zwar um eine wenig resistente, dafür aber resiliente Waldformation handelt. Dies deckt sich weitestgehend mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Leider hat er keine Daten für North East Bight aufgenommen. Es kann daher nur vermutet werden, dass die ausbleibende Regeneration in diesem Teil der Insel auf den extremen Grad der Zerstörung zurückzuführen ist. Diese Fläche war dem Hurrikan am stärksten ausgesetzt. Der größte Teil der Eichenwälder sowie der tropischen Hang- und Galeriewälder zeigt keinen signifikanten Trend im untersuchten Zeitraum, da sich diese Bestände bereits unmittelbar nach Hurrikan Mitch regeneriert hatten.

6.3 Stärke des Trends (Slope)

Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Stärke des Trends. In Segment 1 zeigen die Zeitreihen der einzelnen Pixel überwiegend schwach positive Entwicklungen (nahe 0). Den stärksten Trend weist die bereits mehrfach angesprochene Weidefläche bei Mangrove Bight auf (negativ; $< -0,01$). In Segment 2 wurden in beide Richtungen nur sehr schwache Steigungen festgestellt.

6.4 Fallbeispiele

Für die Kiefernwälder sollen abschließend acht $20 \times 20 \text{ m}^2$ Plots genauer untersucht werden. Ihre Benennung (Aufnahmen 4, 16, 20, 31, 34, 35, 42 und 45)

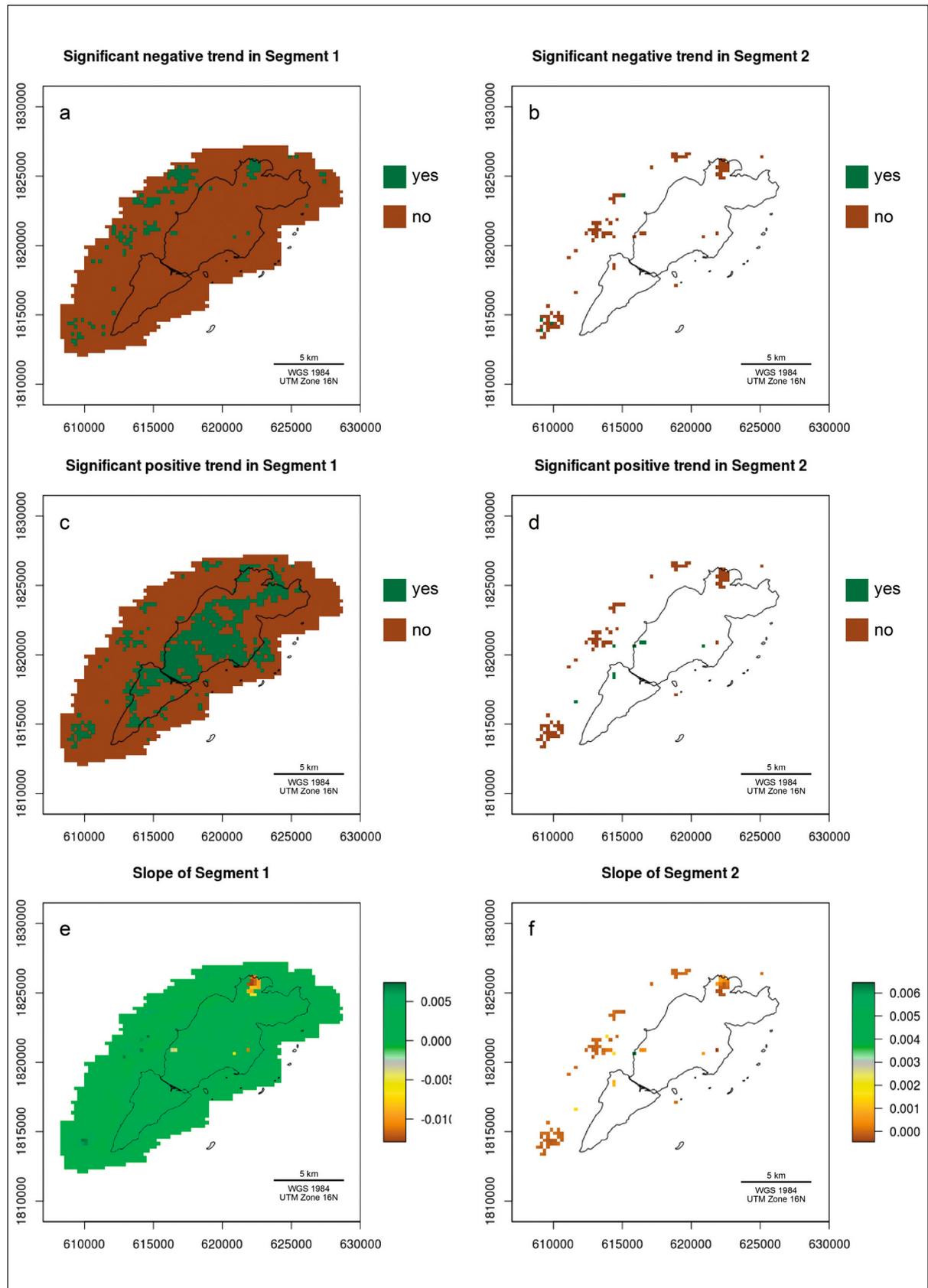


Abb. 4: Signifikanter negativer Trend in Segment 1 (a) bzw. Segment 2 (b).
 Signifikanter positiver Trend in Segment 1 (c) bzw. Segment 2 (d).
 Stärke des Trends in Segment 1 (e) bzw. Segment 2 (f).

folgt VANSELOW (2005), worin genauere Informationen zur Lage der Gebiete und Skizzen der Aufnahmen nachgeschlagen werden können.

Aufnahme 4 ist ein Beispiel für einen sehr gut regenerierenden Bestand des Vegetationstyps 1. Sie liegt im Süden des zentralen Gebirgsmassivs und zeigte bereits 2004 eine hohe Bedeckung mit über 200 Jungkiefern. Dies zeigt sich auch im hohen Ausgangsniveau des NDVI, der bereits am Beginn der untersuchten Zeitreihe (Juli 2002) bei knapp unter 0,8 lag. Trotzdem ist für diese Fläche ein weiterer signifikanter Anstieg zu verzeichnen (Abbildung 5a). Ähnliches kann für Aufnahme 20 festgestellt werden, die ebenfalls zum Typ 1 zählt, jedoch 2004 nur 60 Jungkiefern bei dichtem Grasbewuchs aufwies. Entsprechend liegt das Ausgangsniveau des NDVI dort etwas niedriger bei etwa 0,7. Der Trend ist aber ebenfalls hochsignifikant positiv (Abbildung 5b). Aufnahme 21 repräsentiert stark verbuschte Flächen mit einem mäßigen Regenerationsgrad des Vegetationstyps 2. Hier konnten 2004 35 junge Kiefern gezählt werden. Der NDVI-Ausgangswert ist, wohl aufgrund der hohen Bedeckung mit Gras und Laubsträuchern, bereits 2002 mit über 0,8 sehr hoch. Auch auf dieser Fläche ist in den Folgejahren ein weiterer Anstieg zu verzeichnen, der allerdings weniger stark und signifikant ausfällt als bei den beiden erstgenannten Beispielen (Abbildung 5c). Ein Beispiel für Vegetationstyp 3, mit geringer Kiefernregeneration (13 Individuen) und größeren Laubsträuchern, ist Aufnahme 34. Sie befindet sich auf der steil abfallenden Nordseite in einem Gebiet mit mittleren Regenerationsraten. Allerdings zeigt sie einen vergleichsweise steilen, hochsignifikanten positiven Trend, der auf einen kontinuierlichen Anstieg der Vegetationsbedeckung hinweist (Abbildung 5d). Aufnahme 35 liegt ein Stück weiter hangaufwärts und bereits im Bereich mit geringer Vegetationsbedeckung (Gesamtdeckung: 55%) und Regeneration (16 Jungkiefern). Sie wurde Vegetationstyp 4 zugeordnet. Doch auch hier zeigt die Zeitreihe einen hochsignifikanten Anstieg des NDVI, ausgehend von etwa 0,73 bis auf über 0,8 im Jahr 2016 (Abbildung 5e). Für den Vegetationstyp 5 wird Aufnahme 42 aus dem Süden des zentralen Gebirgsmassivs angeführt. Auch hier waren 2004 nur relativ wenige junge Kiefern zu finden ($n=32$) und die Gesamtdeckung betrug nur 50%. Auch diese Fläche zeigt einen positiven Trend (Abbildung 5f), der allerdings weniger stark ausfällt als für Aufnahme 35. Zum Vergleich zu den Beispielen von Flächen mit unterschiedlicher spontaner Regeneration der Kiefern werden noch ein Reliktkiefernwald, der den Sturm in geschützter Lage überstanden hat, sowie eine aufgeforstete Fläche vorgestellt. Auf Aufnahme 16 sind Kiefern in Reihen mit ca. 2 m Abstand

vorzufinden, die durch die Nationale Forstschule ESNACIFOR angepflanzt wurden. Die Trendanalyse zeigt hier ein hohes Ausgangsniveau des NDVI $> 0,8$, aber trotzdem einen weiterhin schwachen, jedoch signifikanten Anstieg der Vegetationsbedeckung. Einzig der intakte Kiefernwald mit 8-12 m hohen Bäumen (Aufnahme 45) zeigt keinen Trend.

7 Synthese

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, unabhängig von ihrem prognostizierten Regenerationsverhalten (siehe VANSELOW 2005), für alle Typen von Kiefernwald eine positive Entwicklung des NDVI und somit der Vegetationsbedeckung. Damit wird auch die erste Hypothese bestätigt: Ehemalige Kiefernwaldgebiete mit hohem und mittleren Regenerationsgrad sowie die Aufforstungsflächen zeigen tatsächlich einen positiven Trend des NDVI. Hypothese 2 muss jedoch abgelehnt werden. Auch für die Gebiete mit geringem Regenerationsgrad konnte ein signifikanter positiver Trend hin zu höheren NDVI-Werten festgestellt werden. Hypothese 3, dass Gebiete der unzerstörten Kiefernwaldrelikte, der Eichenwälder sowie der tropischen Hang- und Galeriewälder keinen signifikanten Trend im NDVI zeigen und auf relativ hohem Niveau verharren, konnte indes weitestgehend verifiziert werden. Die mit Hypothese 4 abgedeckten Mangrovenwälder verlangen eine differenziertere Betrachtung. Es konnte bestätigt werden, dass weite Teile der ehemaligen Mangrovenwälder keinen signifikanten Trend im NDVI zeigen und auf relativ niedrigem Niveau verharren. Dies gilt insbesondere für die größte Mangrovenfläche im Nordosten der Insel. Besser sieht es mit den anderen Mangrovenflächen aus, insbesondere im Inselzentrum am Flughafen und im Südosten um El Bight. Für diese Flächen konnte eine signifikante positive Entwicklung des NDVI festgestellt werden.

Kritisch anzumerken bleibt jedoch, dass die Auflösung des MODIS-Produkts von $250 \times 250 \text{ m}^2$ für eine derart stark reliefierte Landschaft und viele kleinräumige Mangrovenflächen zu grob ist. Die Trends für die einzelnen Pixel sind mit Vorsicht zu interpretieren, da sich in ihnen häufig Mischinformation aus verschiedenen benachbarten Vegetationsformationen befindet. Außerdem kann mit der verwendeten Methode keine abschließende Aussage über die Ursache der Zunahme des NDVI getroffen werden. Ob die Entwicklung tatsächlich die Regeneration der Kiefern widerspiegelt oder ob es sich um das verstärkte Aufkommen anderer Pflanzen wie Gräser und Laubsträucher handelt, kann nur mit einer erneuten Feldstudie überprüft werden.

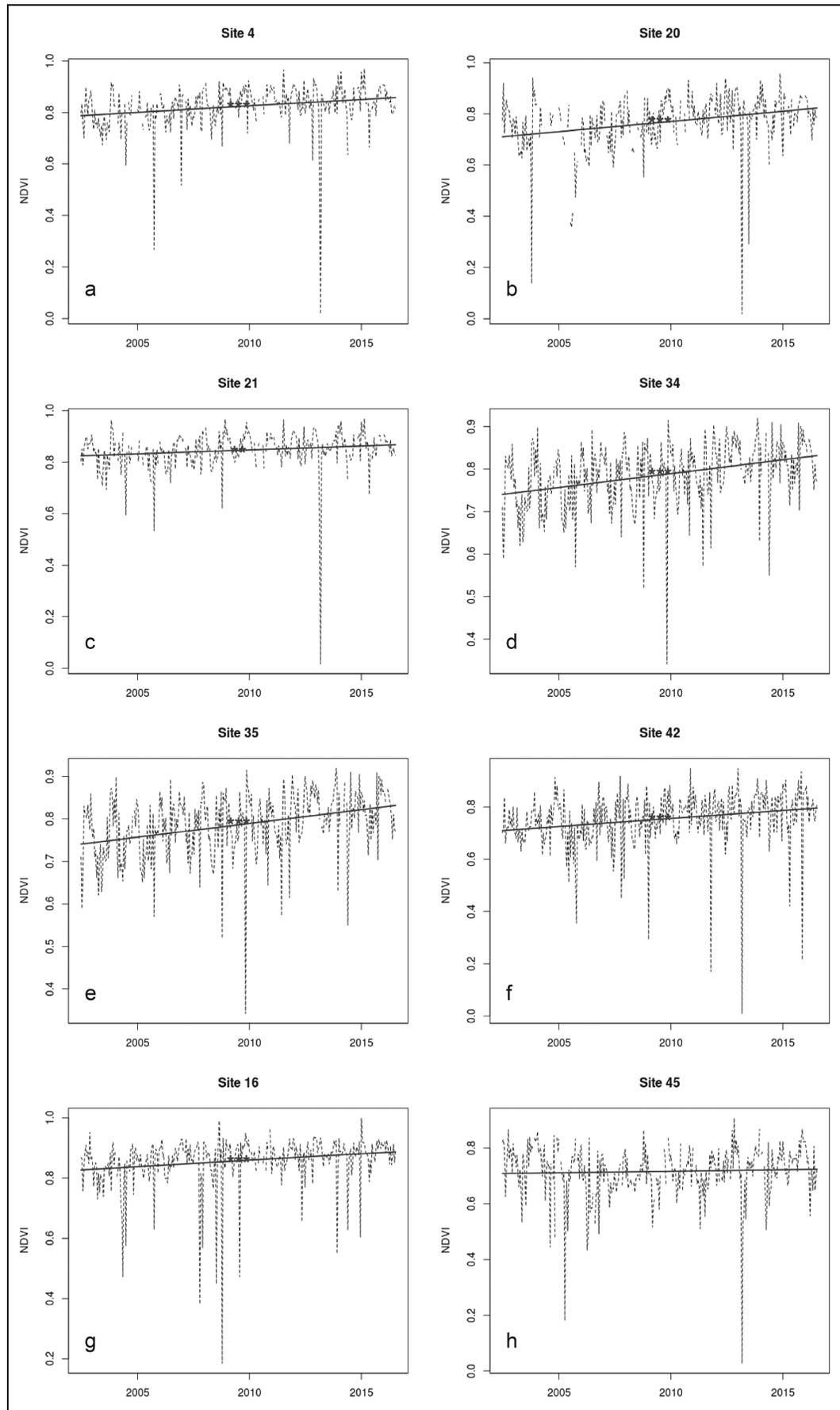


Abb. 5: NDVI-Trends
ausgewählter
Aufnahmen.

Literatur

- Consultores en Recursos*. 1996: Los Ecosistemas Forestales en las Islas de la Bahía, Honduras. Reconocimiento Técnico Forestal. Tegucigalpa.
- FICKERT, Thomas. 2016a: Zur Bedeutung von Dauerbeobachtungsstudien in der Sukzessionsforschung – Zwei Fallstudien zur Primärsukzession in Gletschervorfeldern in den Ostalpen und zur Sekundärsukzession sturmgestörter Mangrovenwälder in Honduras. *PSG* 29. 158 S.
- FICKERT, Thomas. 2016b: Besser resilient als resistent! Zur Regeneration der Mangrovenwälder auf der Karibikinsel Guanaja (Honduras) nach Hurrikan „Mitch“. In: *Geographische Rundschau* 68/10: 30–37.
- FICKERT, Thomas; VANSELOW, Kim André; KOLB, Melanie. 2008: Zerstörungsgrad und Regeneration terrestrischer, litoraler und mariner Ökosysteme auf der Karibikinsel Guanaja (Honduras) ein halbes Jahrzehnt nach Hurrikan Mitch. In: ROTHFUSS, E. (Hg.): *Passauer Kontaktstudium Erdkunde* 9: 107–122.
- KOLB, Melanie. 2004: Auswirkungen von Hurrikan Mitch auf die Zerstörung und Regeneration von Korallenriffen auf der Insel Guanaja, Honduras. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Erlangen.
- KRAUSSE, Gerald; DYER, Christopher. 1999: There's a big wind a comin': a profile of survival and the culture of response after Hurricane Mitch on Isla Guanaja, Honduras. Rhode Island.
- OGDEN, John C. 1992: The impact of Hurricane Andrew on the Ecosystems of South Florida. In: *Conservation Biology* 6/4: 488–492.
- SANDNER, Verena. 1999: Auswirkungen des Hurrikan Mitch auf Zentralamerika. In: *Geographische Rundschau* 51/7-8: 418–423.
- VANSELOW, Kim André. 2005: Die Auswirkungen des Hurrikan Mitch auf die terrestrische Vegetation der Insel Guanaja, Honduras. Eine Studie zur Regeneration der Kiefernwälder. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Erlangen.
- VANSELOW, Kim André; KOLB, Melanie; FICKERT, Thomas. 2007: Destruction and Regeneration of terrestrial, littoral and marine Ecosystems on the Island of Guanaja/Honduras seven years after Hurricane Mitch. In: *Erdkunde* 4/61: 358–371.
- VERBESSELT, Jan et al. 2010: Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. In: *Remote Sensing of Environment* 114/1: 106–115.
- VILLEDA, E. et al. 2000: Informe de evaluación ecológica rápida. Informe técnico No. TER 01 (PMAIB). Islas de la Bahía.

Abstract: The calm after the storm – A time series analysis of the vegetation cover development on the Caribbean island of Guanaja after Hurricane Mitch

In this study, the vegetation cover development on the Caribbean island of Guanaja is analyzed. In particular, the pine and mangrove forests of this island have been nearly completely destroyed by Hurricane Mitch, in October 1998. The regeneration has been exhaustively studied by the author in his diploma thesis, in early 2004. Here, the development of the vegetation cover, based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), will be reproduced until today employing a remote sensing time-series analysis. The former pine forests showed a consistently positive development of the NDVI. Intact relicts of the pine forests as well as oak and tropical slope and gallery forests did not reveal a significant NDVI trend. The former mangrove forests behave differently: in some areas their vegetation cover is increasing, while in others no increasing NDVI could be detected.

Tags: **regeneration, succession, NDVI, remote sensing, MODIS, Pinus, mangrove**

Autor: Kim André Vanselow, kim.vanselow@fau.de, Institut für Geographie, Universität Erlangen-Nürnberg, Wetterkreuz 15, 91058 Erlangen

