

Nicole Erler:

GIS- und fernerkundungsgestützte
Bewertung von „Natural Hazards“
im oberen Einzugsgebiet
des Río Yaque del Norte
(Dominikanische Republik)

ERDSICHT - EINBLICKE IN GEOGRAPHISCHE UND GEOINFORMATIONSTECHNISCHE ARBEITSWEISEN

Schriftenreihe des Geographischen Instituts der Universität Göttingen,
Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung

Herausgegeben von Prof. Dr. Martin Kappas

ISSN 1614-4716

- 1 *Claudia Sültmann*
GIS- und Satellitenbildgestützte Landnutzungsklassifikation mit
Change detection im Westen der Côte d'Ivoire
ISBN 3-89821-356-0
- 2 *Katharina Feiden*
GIS - gestützte Analyse der zeitlichen und räumlichen Verteilung
der Niederschlagsjahressummen (1961 - 1990) in der
Dominikanischen Republik
Charakteristika und Trends
ISBN 3-89821-368-4
- 3 *Nicole Erler*
GIS- und fernerkundungsgestützte Bewertung von „Natural Hazards“ im
oberen Einzugsgebiet des Rio Yaque del Norte (Dominikanische Republik)
ISBN 3-89821-409-5

Nicole Erler

**GIS- UND FERNERKUNDUNGSGESTÜTZTE
BEWERTUNG VON "NATURAL HAZARDS" IM OBEREN
EINZUGSGEBIET DES RIO YAQUE DEL NORTE
(DOMINIKANISCHE REPUBLIK)**

ibidem-Verlag
Stuttgart

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

∞

ISBN: 978-3-8382-5409-8

© *ibidem*-Verlag
Stuttgart 2004
Alle Rechte vorbehalten

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und elektronische Speicherformen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Vorwort des Herausgebers

Die Reihe „Erdsicht – Einblicke in geographische und geoinformationstechnische Arbeitsweisen“ soll Forschungsergebnisse und Arbeiten im Bereich der Erdsystemforschung vorstellen. Die Betrachtung der Erde als System ist als Inhalt heutiger und zukünftiger geowissenschaftlicher Gemeinschaftsforschung dringend gefordert. Die Herausforderungen liegen zum einen in der Erforschung der grundlegenden Erdsystemprozesse sowie in der Erforschung der vielfältigen Interaktionen zwischen den verschiedenen Teilbereichen des Systems Erde. Hierzu zählen Wechselwirkungen zwischen fester Erde und Atmosphäre, zwischen der Landoberfläche und der Hydrosphäre oder zwischen Biosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre. Der Mensch steht dabei mit seinen zentralen Nutzungsansprüchen (Ernährung – agrare Landnutzung – Ressourcennutzung) im Mittelpunkt eines vielfach vernetzten Erdsystems. Der Mensch verändert Landschaften und Atmosphäre und greift somit in alle Skalenbereiche des Erdsystems ein. Insofern müssen diese Veränderungen beobachtet und bewertet werden, damit Konzepte für ein nachhaltiges Erdsystemmanagement auf den unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen entwickelt werden können. Die neuen Geoinformationstechniken (Geographische Informationssysteme – GIS; luft- und satellitengestützte Fernerkundungssysteme) helfen dabei das System Erde zu beobachten und zu begreifen. Ohne diese Techniken ist eine ganzheitliche Betrachtung der Erde und eine flächenhafte Bereitstellung von Informationen über das Erdsystem nicht möglich.

Die vorliegende Arbeit von Frau Erler entstand am Geographischen Institut der Universität Göttingen in der Abteilung Kartographie, GIS & Fernerkundung (Prof. Dr. M. Kappas) und beschäftigt sich mit dem komplexen Problem von Bergrutschungen in der Dominikanischen Republik. Rutschungen gehören zum großen Komplex der Naturgefahren („Natural Hazards“) und stellen innerhalb der fragilen Landschaftsräume der Tropen ein erhebliches Gefährdungspotential für die Menschen dar. Darüber hinaus verringern Rutschungen das ökologische Leistungspotential der Landschaft erheblich. Frau Erler erstellt in ihrer Arbeit ein aussagekräftiges GIS-gestütztes Modell zur Bewertung der Rutschungsgefährdung innerhalb

eines geschlossenen Wassereinzugsgebiets. Die realen Schäden des Hurricans „George“ (1998) fließen in die Modellberechnung mit ein. Hervorzuheben ist, dass es sich um ein multi-faktorielles Modell handelt, welches durch ein Ranking von Einflussfaktoren die Ausweisung möglicher Rutschungsgebiete zu optimieren versucht.

Martin Kappas

| | |
|-----------------------------------|-------------|
| INHALTSVERZEICHNIS | V |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... | VII |
| TABELLENVERZEICHNIS | XI |
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS..... | XIII |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 EINFÜHRUNG..... | 1 |
| 1.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT | 1 |
| 1.2 MOTIVATION | 3 |
| 1.3 STAND DER NATURGEFAHREN- UND KATASTROPHENFORSCHUNG | 5 |
| 2 UNTERSUCHUNGSGBIET..... | 9 |
| 2.1 GEOGRAPHISCHE LAGE | 9 |
| 2.2 NATURRÄUMLICHE UND GEOLOGISCHE GLIEDERUNG | 10 |
| 2.3 KLIMA | 13 |
| 2.3.1 <i>Tropische Passatzirkulation</i> | 13 |
| 2.3.2 <i>Temperatur und Niederschläge</i> | 13 |
| 2.3.3 <i>Regionales Klima des Untersuchungsgebietes</i> | 16 |
| 2.3.4 <i>Tropische Wirbelstürme (Hurrikane)</i> | 18 |
| 2.4 LANDNUTZUNG..... | 21 |
| 3 ALLGEMEINE GRUNDLAGEN GRAVITATIVER MASSENBEWEGUNGEN, INSBESONDERE RUTSCHUNGEN..... | 24 |
| 3.1 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN VON MASSENBEWEGUNGEN | 24 |
| 3.2 URSACHEN, AUSLÖSER UND EINFLUSSFAKTOREN VON RUTSCHUNGEN..... | 26 |
| 3.3 RUTSCHUNGSTYPEN | 30 |
| 4 DATENGRUNDLAGE, GERÄTE UND SOFTWARE..... | 33 |
| 4.1 DIGITALE GELÄNDEMDELLE | 33 |
| 4.2 RELIEFPARAMETER..... | 36 |
| 4.3 SATELLITENBILDER | 36 |
| 4.4 TOPOGRAPHISCHE KARTEN | 39 |
| 4.5 GEOLOGISCHE KARTE | 40 |
| 4.6 LANDNUTZUNGSKARTE | 40 |
| 4.7 FELDDATEN | 41 |
| 4.8 GERÄTE | 43 |
| 4.9 SOFTWARE..... | 44 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | METHODISCHER ANSATZ UND MODELLENTWICKLUNG..... | 45 |
| 5.1 | FORSCHUNGSSTAND MODELLANSÄTZE | 45 |
| 5.2 | MODELLANSATZ DER GEFAHRENKARTE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES | 48 |
| 5.3 | MODELLENTWICKLUNG..... | 51 |
| 5.3.1 | <i>Rutschungsinventarisierung</i> | 51 |
| 5.3.2 | <i>Berechnung der relativen Häufigkeiten des Auftretens von Rutschungen für verschiedene Parameter</i> | 54 |
| 5.3.3 | <i>Auswahl der Eingangsparameter</i> | 55 |
| 5.3.4 | <i>Gefahrenklassenbildung</i> | 56 |
| 5.3.5 | <i>Validierung des Modells</i> | 57 |
| 5.3.6 | <i>Erstellung der Gefahrenzonenkarte</i> | 58 |
| 6 | ERGEBNISDARSTELLUNG | 59 |
| 6.1 | RELATIVE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER AUSGEWÄHLTEN PARAMETER | 59 |
| 6.1.1 | <i>Hangneigung</i> | 59 |
| 6.1.2 | <i>Einzugsgebietsgröße</i> | 64 |
| 6.1.3 | <i>Landnutzung</i> | 68 |
| 6.2 | RELATIVE HÄUFIGKEIT DES AUFTRETENS VON RUTSCHUNGEN BEI KOMBINATIONEN DER EINGANGSPARAMETER..... | 71 |
| 6.3 | GEFAHRENKLASSENBILDUNG | 75 |
| 6.4 | VALIDIERUNG..... | 76 |
| 6.5 | GEFAHRENZONENKARTEN | 78 |
| 6.6 | RUTSCHUNGSGRÖßEN | 86 |
| 7 | DISKUSSION UND KRITISCHE BETRACHTUNG..... | 91 |
| 7.1 | FEHLERQUELLEN IN DER DATENGRUNDLAGE | 91 |
| 7.2 | ERGEBNISDISKUSSION | 93 |
| 7.2.1 | <i>Eingangsparameter</i> | 93 |
| 7.2.2 | <i>Modellansatz</i> | 96 |
| 7.2.3 | <i>Zuverlässigkeit der Gefahrenkarten</i> | 96 |
| 7.2.4 | <i>Rutschungsgrößen</i> | 97 |
| 7.3 | VERBESSERUNGSANSÄTZE..... | 97 |
| 8 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK (DEUTSCH UND SPANISCH) | 99 |
| | LITERATURVERZEICHNIS UND INTERNETQUELLEN | 103 |
| | ANHANG | 112 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abb. 1: Abnahme der Waldfläche in der Dominikanischen Republik in Prozent in den Jahren 1900-2000 (ULBERT 1999:108)..... | 1 |
| Abb. 2: Region um La Sal, eine Woche nach dem Durchzug des Hurrikan „Georges“ (September 1998) (Foto freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Ramon Elias Castillo) | 3 |
| Abb. 3: Anzahl der Naturkatastrophen weltweit von 1966-2000 (CRED)..... | 6 |
| Abb. 4: Materielle Schäden in Industrie-Schwellen- und Entwicklungsländern von 1991-2000 (IFRC, World Disaster Report 2001) | 6 |
| Abb. 5: Verluste an Menschenleben in Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern von 1991-2000 (IFRC, World Disaster Report 2001) | 7 |
| Abb. 6: Naturkatastrophen in Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern von 1991-2000 (IFRC, World Disaster Report 2001)..... | 7 |
| Abb. 8: Zeiträume der Entstehung der geologischen Einheiten der Dominikanischen Republik (BOLAY 1997:55)..... | 10 |
| Abb. 9: Geologische Einheiten im Untersuchungsgebiet (Quelle: Geologische Karte der Dominikanischen Republik 1:250000)..... | 12 |
| Abb. 10: Geschwindigkeit und geographische Breite der Passate im Winter und im Sommer (RIEHL 1979:9)..... | 13 |
| Abb. 11: Durchschnittliche Temperatur in °C in der Dominikanischen Republik für die Monate Januar und August (BOLAY 1997:62)..... | 14 |
| Abb. 12 : Jahressummen der Niederschläge in der Dominikanischen Republik (BOLAY 1997:63)..... | 16 |
| Abb. 13: Niederschlag, Evaporation und Temperatur im Jahresverlauf für die Station Taveras (Höhe 300 m ü. NN) für die Periode 1968-1988 (Eigener Entwurf, Quelle: VICIOSO 2002, Departamento de Hidrología del INDRHI) | 17 |
| Abb. 14: Niederschlag, Evaporation und Temperatur im Jahresverlauf für die Station Jarabacoa (Höhe 529 m ü. NN) für die Periode 1968-1988 (Eigener Entwurf, Quelle: VICIOSO 2002, Departamento de Hidrología del INDRHI) | 17 |
| Abb. 15: Schematische Darstellung des Durchzuges einer Passatstörung (Easterly Wave) mit charakteristischen Witterungsmerkmalen (LAUER 1995:136) | 18 |
| Abb. 16: Ausgewählte Tagesniederschlagssummen (nahe La Sal) im Zeitraum 27.08.1998 bis 22.01.1999 (Eigener Entwurf, Datenerhebung: SCHÖGGL 1998/ 1999) | 19 |
| Abb. 17: Hurrikan „Georges“ über der Dominikanischen Republik am 22.09.1998 (www.wsicorp.com 12.05.2003) | 20 |

| | |
|--|----|
| Abb. 18: Absolute Häufigkeiten von Hurrikanen und Tropischen Wirbelstürmen im Zeitraum 1870-1991 (HORST 1991:207) | 20 |
| Abb. 19: Aktuelle Landnutzung im Untersuchungsgebiet (Eigener Entwurf, Quelle: GWB/ GFA-AGRAR 1998)..... | 22 |
| Abb. 20: Potentielle Landnutzung im Untersuchungsgebiet (Eigener Entwurf, Quelle: GWB/ GFA-AGRAR 1998) | 23 |
| Abb. 21: Vektorparallelogramm der Schwerebeschleunigung an einem Hang (AHNERT 1996:121)..... | 24 |
| Abb. 22: Einfluss verschiedener Faktoren auf die Hangstabilität (RICKLI 2001:10) | 27 |
| Abb. 23: Schematische Darstellung von Dimensionen und Beschreibungsmerkmalen von Rutschungen: 1 Breite der Rutschmasse, 2 Breite der Gleitfläche, 3 Gesamtlänge, 4 Länge der Rutschmasse, 5 Gleit-flächenlänge, 6 Mächtigkeit der Rutschfläche, 7 Tiefe der Gleitfläche (MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY 1993) | 30 |
| Abb. 24: Schematische Darstellung einer Translationsrutschung (a), Querschnitt einer geologischen Matrix mit sich entwickelnder Abrisspalte (b). (DIKAU 1996:110)..... | 31 |
| Abb. 25: Schematische Darstellung eines Raster-DGM (a), eines TIN (b) und eines Vektor - DGM (c) (MOORE & GRAYSON & LADSON 1994:8)..... | 33 |
| Abb. 26: Modellansätze zur Erstellung von Gefahrenkarten | 46 |
| Abb. 27: Schematische Darstellung des Modellansatzes zur Erstellung der Gefahrenzonenkarte für das obere Einzugsgebiet des Rio Yaque del Norte..... | 50 |
| Abb. 28: Skizze der Lage der Trainingsgebiete im Untersuchungsgebiet mit zugehörigen Satellitenbild-ausschnitten..... | 52 |
| Abb. 29: Ausschnitt aus Gebiet 2 um La Sal (1-m-Auflösung). Die roten Punkte markieren die während des Feldaufenthalts beprobten Rutschungen. Weiß umrandet sind die aus dem Satellitenbild kartierten jüngeren Rutschungen, die rosafarben umrandeten Flächen sind die älteren Rutschungen (Aufnahmedatum: 16.04.2001, Maßstab ca. 1:5000)..... | 53 |
| Abb. 30: Neigungsstärken innerhalb des Untersuchungsgebietes für das TK50-DGM (Quelle: Instituto Cartográfico Militar, República Dominicana) | 60 |
| Abb. 31: Neigungsstärken innerhalb des Untersuchungsgebietes für das SRTM-DGM (Quelle: NASA & USGS) | 60 |
| Abb. 32: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen innerhalb der Trainingsgebiete für verschiedene Hangneigungsklassen, berechnet aus dem TK50-DGM und aus demSRTM-DGM | 63 |
| Abb. 33: Einzugsgebietsgrößen innerhalb des Untersuchungsgebietes für das TK50- DGM (Quelle: Instituto Cartográfico Militar, República Dominicana) | 64 |

| | |
|---|-----|
| Abb. 34: Einzugsgebietsgrößen innerhalb des Untersuchungsgebietes für das SRTM-DGM (Quelle: NASA & USGS) | 65 |
| Abb. 35: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen innerhalb der Trainingsgebiete für verschiedene Klassen der Einzugsgebietsgrößen, berechnet aus dem TK50-DGM sowie aus dem SRTM-DGM | 67 |
| Abb. 36: Landnutzung innerhalb des Untersuchungsgebietes (Quelle: BRÖTJE 2002) | 69 |
| Abb. 37: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen innerhalb der Trainingsgebiete für die Landnutzungsklassen | 70 |
| Abb. 38: Relative Häufigkeit des Auftretens der gesamten kartierten Rutschungen im Untersuchungsgebiet für die Gefahrenklassen der TK50- und der SRTM-Gefahrenkarte | 78 |
| Abb. 39: Prozentualer Anteil der Gefahrenklassen im Untersuchungsgebiet für die Gefahrenklassen der TK50- und der SRTM-Gefahrenkarte..... | 80 |
| Abb. 40: Rutschungsdisposition im oberen Einzugsgebiet des Rio Yaque del Norte, basierend auf dem TK50-DGM..... | 81 |
| Abb. 41: Rutschungsdisposition im oberen Einzugsgebiet des Rio Yaque del Norte, basierend auf dem SRTM-DGM | 82 |
| Abb. 42: Rutschungsdisposition in Trainingsgebiet 1, basierend auf dem TK50-DGM | 83 |
| Abb. 43: Rutschungsdisposition in Trainingsgebiet 1, basierend auf dem SRTM-DGM... | 83 |
| Abb. 44: Rutschungsdisposition in Trainingsgebiet 2, basierend auf dem TK50-DGM | 84 |
| Abb. 45: Rutschungsdisposition in Trainingsgebiet 2, basierend auf dem SRTM-DGM... | 84 |
| Abb. 46: Rutschungsdisposition in Trainingsgebiet 3, basierend auf dem TK50-DGM | 85 |
| Abb. 47: Rutschungsdisposition in Trainingsgebiet 3, basierend auf dem SRTM-DGM... | 85 |
| Abb. 48: Größe der kartierten Rutschungsflächen in m ² | 87 |
| Abb. 49: Schematische Darstellung der Entstehung von Rutschungen im Oberhang aufgrund des Strömungsdrucks des Interflows (roter Kreis)..... | 94 |
| Abb. 50: Rutschungen in Landnutzungsklasse „Wald“ (Foto: Anke Brötje)..... | 120 |
| Abb. 51: Rutschungen in Landnutzungsklasse „Gestörte Flächen“ (Foto: Lars Gleitsmann) | 120 |
| Abb. 52: Brandflächen südlich von Casabito (Foto: Lars Gleitsmann) | 121 |
| Abb. 53: Rutschungen in Landnutzungsklasse „Landwirtschaft“ | 121 |
| Abb. 54: Rutschung in Landnutzungsklasse „Landwirtschaft“ | 122 |
| Abb. 55: Rutschungen im Valle Rio Jimenoa bei Paso Bajito (Foto: Anke Brötje) | 122 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 56: Rutschungen im Valle Rio Jimenoa bei La Sal (Foto: Anke Brötje) | 123 |
| Abb. 57: Rio Jimenoa bei La Sal, die Brücke wurde durch den Hurrikan Georges zerstört | 123 |
| Abb. 58: La Ciénaga am Rio Yaque del Norte, im Hintergrund der Nationalpark Armando Bermudez..... | 124 |
| Abb. 59: Jarabacoa (Foto: Anke Brötje)..... | 124 |
| Abb. 60: Der Stausee Taveras, der das Untersuchungsgebiet nördlich begrenzt (Foto: Anke Brötje)..... | 125 |
| Abb. 61: Stausee Taveras mit Staumauer..... | 125 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tab. 1: Standardabweichung in Metern (aus 4 bis 5 Punkten pro Szene) berechnet aus den Differenzen der UTM-Koordinaten von Ikonosszene und Topographischer Karte. Auswahl der für die Analyse verwendeten Bilder ist rot markiert. | 39 |
| Tab. 2: Korngrößenverteilung und Bodenart der Bodenproben..... | 43 |
| Tab. 3: Kombinationen der Gefahrenklassen der einzelnen Einflussfaktoren Hangneigung, Einzugsgebietsgröße und Landnutzung..... | 57 |
| Tab. 4: Anzahl der Pixel in den einzelnen Gebieten, Anzahl der vorkommenden Rutschungen sowie berechnete relative Häufigkeit der Anzahl der Rutschungen innerhalb der Trainings-gebiete für die Hangneigungsklassen, berechnet aus dem TK50-DGM | 61 |
| Tab. 5: Anzahl der Pixel in den einzelnen Gebieten, Anzahl der vorkommenden Rutschungen sowie berechnete relative Häufigkeit der Anzahl der Rutschungen innerhalb der Trainingsgebiete für die Hangneigungsklassen, berechnet aus dem SRTM-DGM..... | 62 |
| Tab. 6: Anzahl der Pixel in den einzelnen Gebieten, Anzahl der vorkommenden Rutschungen sowie berechnete relative Häufigkeit der Anzahl der Rutschungen innerhalb der Trainings-gebiete für die Klassen der Einzugsgebietsgrößen, berechnet aus dem TK50-DGM..... | 66 |
| Tab. 7: Anzahl der Pixel in den einzelnen Gebieten, Anzahl der vorkommenden Rutschungen sowie berechnete relative Häufigkeit der Anzahl der Rutschungen innerhalb der Trainings-gebiete für die Klassen der Einzugsgebietsgrößen, berechnet aus dem SRTM-DGM | 66 |
| Tab. 8: Anzahl der Pixel in den einzelnen Gebieten, Anzahl der vorkommenden Rutschungen sowie berechnete relative Häufigkeit der Anzahl der Rutschungen innerhalb der Trainingsgebiete für die Landnutzungsklassen..... | 69 |
| Tab. 9: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen in verschiedenen Kombinationen der Hangneigungsklassen mit der EGG, berechnet für das TK50-DGM..... | 71 |
| Tab. 10: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen in verschiedenen Kombinationen der Hangneigungsklassen mit der EGG, berechnet für das SRTM-DGM..... | 72 |
| Tab. 11: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen in verschiedenen Kombinationen der Hangneigungsklassen mit den Landnutzungsklassen, berechnet für das TK50-DGM | 73 |
| Tab. 12: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen in verschiedenen Kombinationen der Hangneigungsklassen mit den Landnutzungsklassen, berechnet für das SRTM-DGM..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Tab. 13: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen in verschiedenen Kombinationen der Klassen der EGG mit den Landnutzungsklassen, berechnet für das TK50-DGM | 74 |
| Tab. 14: Relative Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen in verschiedenen Kombinationen der Klassen der EGG mit den Landnutzungsklassen, berechnet für das SRTM-DGM..... | 75 |
| Tab. 15: Kombinationen der Klassen der Einflussfaktoren zur Bildung der Gefahrenklassen für die Gefahrenzonenkarte | 75 |
| Tab. 16: Relative Häufigkeit des Auftretens der Rutschungen (ältere, jüngere, gesamt) im Untersuchungsgebiet, berechnet für die Gefahrenklassen der TK50-Gefahrenkarte .. | 77 |
| Tab. 17: Relative Häufigkeit des Auftretens der Rutschungen (ältere, jüngere, gesamt) im Untersuchungsgebiet, berechnet für die Gefahrenklassen der SRTM-Gefahrenkarte | 77 |
| Tab 18: Anzahl der Pixel, Flächenanteil in km ² sowie prozentualer Anteil der Klassen im Untersuchungsgebiet, berechnet für die Gefahrenklassen der TK50-Gefahrenkarte .. | 79 |
| Tab. 19: Anzahl der Pixel, Flächenanteil in km ² sowie prozentualer Anteil der Klassen im Untersuchungsgebiet, berechnet für die Gefahrenklassen der SRTM-Gefahrenkarte | 79 |
| Tab. 20: Gesamtgröße der Trainingsgebiete, Summe und Mittelwert der Rutschungsflächen, Minimum und Maximum der Rutschungsgrößen sowie prozentualer Anteil der Rutschungs flächen am gesamten Trainingsgebiet, für die jüngeren und älteren Rutschungen in den verschiedenen Trainingsgebieten..... | 88 |
| Tab. 21: Durchschnittswerte für die Parameter Hangneigung und EGG, berechnet für die 100 kleinsten und die 100 größten Rutschungsflächen des Inventars der jüngeren Rutschungen (TK50-DGM und SRTM-DGM) | 90 |
| Tab. 22: Prozentualer Anteil der Landnutzungsklassen, berechnet für die 100 kleinsten und die 100 größten Rutschungsflächen des Inventars der jüngeren Rutschungen | 90 |

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen:

| | |
|---------|---|
| Abb. | Abbildung |
| Bd. | Band |
| BGR | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe |
| BRD | Bundesrepublik Deutschland |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | zirka |
| CRED | Centre for Research on the Epidemiology of Disasters |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft |
| DGF | Dirección General de Foresta |
| DGM | Digitales Geländemodell |
| DHM | Digitales Höhenmodell |
| DNP | Dirección Nacional de Parques |
| EGG | Einzugsgebietsgröße |
| EO | Earth Observation |
| ERS | European Remote Sensing |
| ESE | Ostsüdost |
| ETM | Enhanced Thematic Mapper |
| etc. | et cetera (und so weiter) |
| et al. | et altera |
| FAO | Food and Agriculture Organisation |
| FAOSTAT | Food and Agriculture Organisation Statistical Databases |
| fluv. | fluvial |
| GEO | Global Environment Outlook |
| ges. | gesamt |
| Gew. | Gewässer |
| GIS | Geographisches Informationssystem |
| GMT | Greenwich Mean Time |
| GPS | Geographisches Positioniersystem |
| GRASS | Geographic Resources Analysis Support System |
| GTZ | Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit |
| Häuf. | Häufigkeit |
| IDNDR | International Decade of Natural Disaster Reduction |
| INDRHI | Instituto Nacional de Recursos Hidraulicos (República Dominicana) |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------|--|
| IFRC | International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| Jg. | Jahrgang |
| KNN | Künstliche Neuronale Netze |
| Kap. | Kapitel |
| MSI | multispektral |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| N | Nord |
| NE | Nordost |
| NW | Nordwest |
| NWN | Nordnordwest |
| PAN | panchromatisch |
| PROCARYN | Proyecto Cuenca Alta Río Yaque del Norte |
| PROGRESSIO | Fundación para el Mejoramiento Humano |
| Proz. | Prozent |
| RD | República Dominicana |
| rel. | relativ |
| S. | Seite |
| SAGA | System for an Automated Geo-Scientific Analysis |
| SE | Südost |
| SI | Stabilitätsindex |
| Siedl. | Siedlung |
| sog. | sogenannt |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| TIN | Triangulated Irregular Network |
| TK 50 | Topographische Karte 1:50000 |
| u.ä. | und ähnliche |
| ü. NN | über Normalnull |
| UCU | Unique Condition Unit |
| UG | Untersuchungsgebiet |
| UNCCD | United Nations Convention to Combat Desertification |
| UNDP | United Nations Development Programme |
| UNEP | United Nations Environment Programme |
| UNESCO | United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation |
| URL | Uniform Resource Locator |
| USGS | United States Geological Survey |

| | |
|--------|-------------------------------|
| US\$ | United States Dollar |
| UTM | Universal Transverse Mercator |
| vgl. | vergleiche |
| Vol. | Volume |
| WGS 84 | World Geodetic System 1984 |
| z.B. | zum Beispiel |

Geologische und pedologische Einheiten:

| | |
|------------------|-------------------------|
| Ls4 | stark sandiger Lehm |
| Lt2 | schwach toniger Lehm |
| Lt3 | mittel toniger Lehm |
| Lu | schluffiger Lehm |
| magmat. Gest. | magmatisches Gestein |
| metamorph. Gest. | metamorphes Gestein |
| Sl2 | schwach lehmiger Sand |
| Sl3 | mittel lehmiger Sand |
| Sl4 | stark lehmiger Sand |
| Su3 | mittel schluffiger Sand |
| Tu3 | mittel schluffiger Ton |
| Uls | sandig lehmiger Schluff |
| Us | sandiger Schluff |
| Ut2 | mittel toniger Schluff |
| ultramaf. Gest. | ultramafisches Gestein |

Physikalische Einheiten und mathematische Symbole:

| | |
|-----------------|----------------------|
| cos | Cosinus |
| g | Fallbeschleunigung |
| GWH | Gigawatt Stunde |
| ha | Hektar |
| K | Schwerkraft |
| km ² | Quadratkilometer |
| km/h | Kilometer pro Stunde |
| Kn | Druckkraft |
| Ks | Schwerkraft |
| M | Masse |
| m | Meter |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|---|
| ml | Milliliter |
| m/s ² | Meter pro Quadratsekunde |
| Mio. | Million |
| mm | Millimeter |
| Mrd. | Milliarde |
| R | Anzahl der Rutschungspolygone einer bestimmten Klasse |
| RH | Relative Häufigkeit |
| RZ | Anzahl der Rasterzellen einer bestimmten Klasse |
| sin | Sinus |
| x | mal |
| µm | Mikrometer |
| α | Hangneigung |
| τ | Scherspannung oder Schubspannung |
| σ | Druckspannung oder Normalspannung |
| ° | Grad |
| °C | Grad Zelsius |
| % | Prozent |
| & | und |
| = | gleich |
| > | größer |
| < | kleiner |
| ≥ | größer gleich |
| +/- | plus-minus |
| ' | geographische Minuten |
| '' | geographische Sekunden |

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Im karibischen Raum hat das Zusammenspiel vielfältiger endogener und exogener Ursachen gravierende ökologische Umwandlungsprozesse in Gang gesetzt. Gemeint sind die ungleiche Verteilung von Macht und Reichtum sowie eine auf einen außenabhängigen Wachstumsprozess hin orientierte wirtschaftliche Entwicklung, welche sich unter anderem im großflächigen Kahlschlag der Wälder mit Folgeschäden wie Artenschwund, Bodenerosion, abnehmende Bodenfruchtbarkeit und schließlich der Degradierung der Böden ausdrückt. Die Dominikanische Republik ist in weiten Landesteilen akut von fortschreitenden Entwaldungsprozessen betroffen (Abb. 1) (ULBERT 1999).

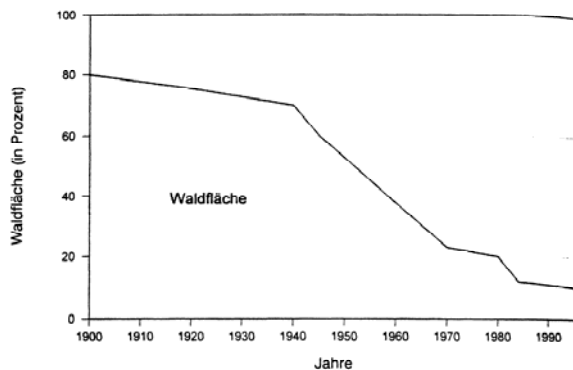


Abb. 1: Abnahme der Waldfläche in der Dominikanischen Republik in Prozent in den Jahren 1900-2000 (ULBERT 1999:108)

Etwa die Hälfte der Landesfläche ist wegen der steilen Hangneigung bzw. der flachgründigen Böden nur für die forstliche Nutzung geeignet, wobei sowohl Schutz- als auch Nutzwälder eingeschlossen sind. Tatsächlich liegt der Bewaldungsgrad jedoch bei ca. 10-15 %, so dass die Erhaltung der restlichen Bergwaldreste von größter Bedeutung ist (MAY 1997).

Für die Degradierung der Bergwälder ist zu einem großen Teil das Vordringen des landwirtschaftlichen Anbaus in die Gebirge verantwortlich. Zu den anthropogen hervorgerufenen Störgrößen wie Holznutzung, Brände und Neulanderschließung kommen auch natürliche hinzu.

Im September 1998 führte Hurrikan „Georges“ bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 200 km/h und einem Tagesniederschlagsmaximum von 300 mm am 22.9. zu extremen Abflussereignissen und damit zu schweren Schäden im Hoch- und Tiefland der Dominikanischen Republik. Die Bergwälder spielen bei solchen Starkregenereignissen eine entscheidende Rolle für die Rückhaltung des Wasserabflusses und damit für die Verminderung von Bodenerosion und Rutschungsgefahr (KAPPAS 1999).

Seit 1967 erlaubt das Forstgesetz keinen Einschlag mehr. Das hat auch zur Folge, dass Großgrundbesitzer keine Motivation haben aufzuforsten. Wenn die Vegetation auf einer Brachfläche 1-2 m Höhe erreicht, verliert der Besitzer das Recht die Fläche zu roden, um sie zu landwirtschaftlichen Zwecken zu nutzen. (VICIOSO 2002).

Der Gesetzgeber wirkt durch die negative Gesetzesformulierung somit dem benötigten Aufforsten zur Deckung des Energiebedarfs, zur Verminderung von Bodenerosion und zur Stabilisierung des Wasserkreislaufes entgegen. Die nachhaltige Bewirtschaftung der Dominikanischen Republik ist kein technisches Problem, sondern ein gesellschaftliches. Damit liegt die Lösung der Probleme weitgehend in politischer Hand, wobei auch die Industrieländer aufgefordert sind, durch eine gerechte Handelspolitik und aktive Maßnahmen zur Entschuldung der Entwicklungsländer mitzuwirken (WEISE 1991).

Im Rahmen dieser Studie soll für das obere Einzugsgebiet des Rio Yaque del Norte die potentielle Gefahr von Hangrutschungsprozessen abgeschätzt werden. Ziel ist die Erstellung einer Gefahrenzonenkarte, die für das Untersuchungsgebiet anhand von drei Gefahrenklassen (schwach, mittel, stark) die potentielle Hangrutschungsdisposition darstellt.

Die Bewertung der Gefahr in qualitativen Stufen wird von der relativen Häufigkeit des Auftretens von Rutschungen in festgelegten Klassen der digital vorliegenden Einflussfaktoren Hangneigung, Einzugsgebietsgröße (EGG) und Landnutzung abgeleitet. Mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) werden die Daten zur Erstellung der Gefahrenzonenkarte miteinander verschnitten. Die Analyse soll für zwei Digitale Geländemodelle (DGM) im Vergleich erfolgen, um einen Eindruck zu gewinnen, wie stark das Endergebnis von dem Höhendatensatz abhängt. Zur Verfügung stehen dafür zum einen das DGM des Instituto Cartográfico Militar (República Dominicana), welches aus Höhenlinien Topographischer Karten im Maßstab 1:50000 abgeleitet wurde. Zum anderen wird das DGM der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) im Jahr 2000 verwendet.

Die folgenden Fragen sollen in der vorliegenden Studie erörtert werden:

- Welche Gebiete im Untersuchungsgebiet sind mehr, welche sind weniger rutschungsgefährdet?
- Welche Faktoren haben einen größeren oder kleineren Einfluss auf die Rutschungsgefährdung?
- Wie kann die Gefährdung in den besonders bedrohten Gebieten vermindert werden?
- Wie gut sagt das Modell die Rutschungsanfälligkeit im Untersuchungsgebiet voraus?
- Wie unterscheiden sich die gewonnenen Ergebnisse aus den beiden DGM?

1.2 Motivation

Rutschungen entstehen im Zusammenspiel mehrerer Faktoren. Dabei können sowohl tektonische Prozesse wie auch hohe Niederschläge die Hauptursache sein. Die Dominikanische Republik wird aufgrund tropischer Zyklone und anderer klimatischer Prozesse häufig von Starkniederschlägen aufgesucht. Die dadurch ausgelösten Hangrutschungen (Abb. 2) bewirken innerhalb kürzester Zeiträume die irreversible, großflächige Degradation von Böden, wodurch mehr und mehr die Lebensgrundlage der dominikanischen Bevölkerung zerstört wird.



Abb. 2: Region um La Sal, eine Woche nach dem Durchzug des Hurrikan „Georges“ (September 1998) (Foto freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Ramon Elias Castillo)

Der Eintrag des Bodenmaterials in die Gewässer wirkt sich dabei negativ auf die Gewässerbeschaffenheit aus. Die Schwebstoffe im Fluss führen zur Trübung des Gewässers, welche eine Verminderung des Lichteinfalls bewirkt und eine Absenkung der Photosyntheseleistung verursacht. Außerdem kann es zum Eintrag von Umweltschadstoffen (Pestizide, Herbizide und Dünger) kommen, welche in die Nahrungskette gelangen. Weiterhin kann die Verschlammung der Flüsse eine Verminderung der Durchströmung des Sediments und damit eine Anreicherung von Stoffwechselprodukten der Organismen, Sauerstoffmangel und Faulschlamm Bildung bewirken (SYMANDER 1998).

Gewaltige Kosten entstehen, da mit Erosionsmaterial angefüllte Staubecken schneller als erwartet ausgebaggert werden müssen, die Reservefunktion der Trinkwasserspeicher verringert sich. Gleichzeitig können Bewässerungsflächen nicht zuverlässig beliefert werden, und damit ist an die Ausweitung des Bewässerungslandbaus in manchen Regionen nicht zu denken (WEISE 1991).

Neben den auftretenden Störungen in den einzelnen Teilökosystemen können jedoch beim Auftreten von Hangrutschungen - durch den Prozess der Massenverlagerung - auch direkt Menschenleben gefährdet sowie durch die Zerstörung von Häusern, Wegen, Brücken usw. ihr Lebensraum bedroht werden.

Dies gab die Motivation zur Bearbeitung des ausgewählten Themas. Die Gefahrenzonenkarte soll eine Basis für die Planung nachhaltiger Landnutzung und eventueller Wiederaufforstungsmaßnahmen für besonders gefährdete Gebiete bieten. Damit soll die Grundlage zur Verminderung von zukünftigen ökologischen, materiellen und sozialen Schäden gegeben werden.

An dieser Stelle muss jedoch nochmals erwähnt werden, dass Wiederaufforstungsmaßnahmen nicht die Endlösung der Problematik darstellen, da einem großen Teil der dominikanischen Bevölkerung immer noch kein alternativer Ausweg geboten wird, sich eine sichere Lebensgrundlage zu erschaffen. Die nachhaltige Entwicklung muss das Endziel bleiben, um die natürlichen Lebensgrundlagen für die gegenwärtigen und zukünftigen Generationen dauerhaft zu erhalten. Sie umfasst dabei die Erfüllung ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Teilziele, welche ohne eine maßgebliche Unterstützung des Staates nicht zu erfüllen sind.

1.3 Stand der Naturgefahren- und Katastrophenforschung

Die Forschung über Naturgefahren (natural hazards) betrachtet spezielle Interaktionen im Mensch-Umwelt-System. Neben Kenntnissen der natürlichen Prozesse selbst sind Frequenz und Magnitude des Ereignisses ebenso wie die Einwirkung auf Raum, Gesellschaft und Individuum wichtige Parameter. Die Hazardforschung hat einen starken Anwendungsbezug, da durch extreme Naturereignisse weltweit immer größere Schäden hervorgerufen werden. Unterschieden werden Naturgefahren, die im Zusammenhang mit der Erdkruste (Erdbeben, Tsunami, Vulkane), der Erdoberfläche (Rutschungen, Sackungen, Lawinen) oder aufgrund von Schwankungen der Atmosphäre bzw. des Wasserhaushalts (Dürre, Feuer, Stürme, Hochwasser, Hurrikane u.ä.) auftreten (POHL & GEIPEL 2002).

Die Nachwirkungen beeinflussen insbesondere in ärmeren Ländern Volkswirtschaft und Gesellschaft nachhaltig. Die Mitverantwortung der Industrieländer für die wachsende Katastrophenanfälligkeit der Entwicklungsländer durch ungerechte Weltwirtschaftsstrukturen sowie durch großräumige Umweltbelastungen darf hierbei nicht übersehen werden. Da die Armut in den Entwicklungsländern ständig wächst, müssen mehr und mehr Menschen ihren Lebensunterhalt auf Kosten der Umwelt sichern. Eine Katastrophenvorsorge auf der Ebene der ökologischen Nachhaltigkeit ist also wesentlich durch eine Veränderung der Sozialstrukturen zu bewirken (PLATE & MERZ 2001).

Extreme Naturereignisse werden zu Katastrophen, wenn Menschen direkt oder indirekt betroffen sind. Laut den Vereinten Nationen (1992) ist eine Katastrophe "die Unterbrechung der Funktionsfähigkeit einer Gesellschaft, die Verluste an Menschenleben, Sachwerten und Umweltgütern verursacht und die Fähigkeit der betroffenen Gesellschaft aus eigener Kraft damit fertig zu werden, übersteigt".

Viele Analysen beschreiben die signifikante Zunahme von Naturkatastrophen im Laufe der letzten Jahrzehnte (Abb. 3). Eine Vielzahl lokal begrenzter Katastrophen wurden dabei noch nicht einmal statistisch erfasst. Noch stärker als die Häufigkeit ist jedoch das Ausmaß der entstandenen materiellen Schäden (Abb. 4) und der Verlust an Menschenleben gestiegen (Abb. 5) (GTZ 2001).

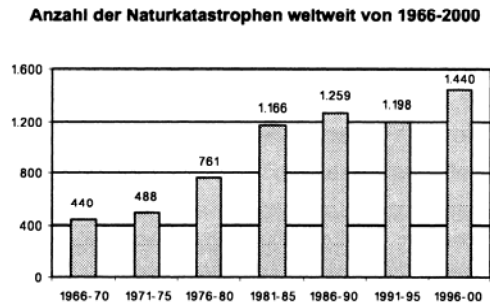


Abb. 3: Anzahl der Naturkatastrophen weltweit von 1966-2000 (CRED)

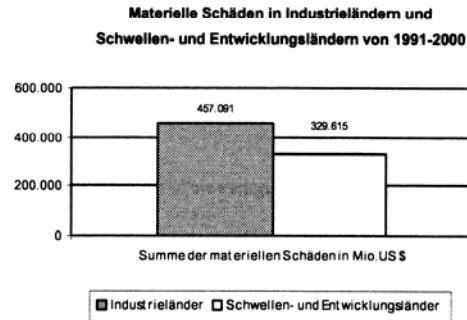


Abb. 4: Materielle Schäden in Industrie- Schwellen- und Entwicklungsländern von 1991-2000 (IFRC, World Disaster Report 2001)

Je nach geographischer Lage, den kulturellen und sozialen Strukturen und in Abhängigkeit von der Wirtschaftskraft, ist das Problem der Katastrophenvorsorge in jeder Region anders zu lösen. Die abzuleitenden Vorsorgestrategien einzelner Regionen werden die Ursachen von Naturkatastrophen kaum verhindern, jedoch können sie das Ausmaß einer Katastrophe im Vorfeld vermindern. Vom Standpunkt einer nachhaltigen Entwicklung hat die Katastrophenvorsorge für jedes Land zum Ziel, das Restrisiko auf eine Größe zu reduzieren, die von der Gesellschaft verkraftbar ist (PLATE & MERZ 2001).

Die Analyse sowie die kartographische Darstellung von geographischen Informationen ist ein wichtiger Beitrag, die negativen Auswirkungen von Naturgefahren auf unseren Lebensraum zu vermindern (CUTTER 2001). Erste Schritte zur Katastrophenvorsorge stellen deshalb die Risikoanalyse bzw. die Gefährdungsermittlung dar. Durch eine angepasste Landnutzung kann ein wichtiger Beitrag zum Schutz vor Katastrophen geleistet werden, daher sollten Gefahren- und Risikokarten zum Bestandteil raumplanerischer Entscheidungsgrundlagen werden. Großräumig werden die Gefahren seit einiger Zeit durch die Münchner Rückversicherungsgesellschaft für die gesamte Welt kartiert. In der Weltkarte der Naturgefahren sind Zonen besonderer Gefahren durch die verschiedenen Arten der Naturereignisse ausgewiesen (PLATE & MERZ 2001).

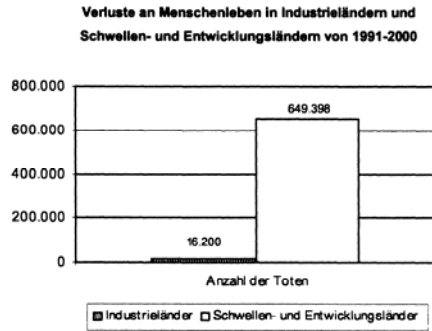


Abb. 5: Verluste an Menschenleben in Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern von 1991- 2000 (IFRC, World Disaster Report 2001)

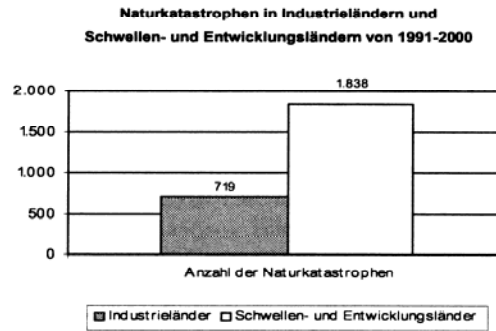


Abb. 6: Naturkatastrophen in Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern von 1991-2000 (IFRC, World Disaster Report 2001)

Entwicklungsländer sind wegen ihrer geographischen Lage besonders häufig von Naturgefahren betroffen (Abb. 6). Stürme, starke Regenfälle und Hangrutschungen treten in den subtropischen und tropischen Regionen häufiger auf und sind gravierender (GTZ 2001).

Die Degradation landwirtschaftlicher Nutzflächen stellt dabei ein großes Problem dar, da ein Verlust der Ressource Boden die dort ohnehin unsichere Ernährungssituation weiter Bevölkerungsteile zusätzlich gefährdet (MORGENROTH 1999). Ein Rückblick auf die Entwicklung der Nahrungsmittelproduktion seit 1972 lässt einen wachsenden Druck auf den bewirtschaftbaren Boden erkennen. Im Vergleich zu 1972 ist der Bedarf an Nahrungsmitteln im Jahr 2002 für 2,22 Mrd. Menschen mehr zu decken (GLOBAL ENVIRONMENT OUTLOOK 2003).

In den Karibischen Staaten haben sich von 1972-1999 die Acker- und Weidelandflächen um 32 % bzw. 1,8 Mio. ha vergrößert (FAOSTAT). Die Probleme der Bodendegradation werden auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene seit mehreren Dekaden diskutiert. Es wurde beispielsweise von dem Sekretariat der United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) in Zusammenarbeit mit dem United Nations Environment Programme (UNEP) und der Regierung von Mexiko eine Regionale Koordinationseinheit für Lateinamerika und die Karibischen Staaten zur Organisation und Koordination von nationalen Aktionsprogrammen geschaffen. Dies führte in einigen Staaten zur Entwicklung ähnlicher Programme (z.B. von Monitoringsystemen) (GLOBAL ENVIRONMENT OUTLOOK 2002).

Für die immer größeren Schäden ist einerseits die dichte Besiedlung und Industrialisierung hochexponierter Regionen verantwortlich. Andererseits bewirkt die Anfälligkeit der

modernen Gesellschaft und ihrer Technologien eine Zunahme der Vulnerabilität der Menschheit. Gleichzeitig haben sich die Indizien verstärkt, dass der sich abzeichnende Klimawandel einen Einfluss auf die Häufigkeit und Intensität von atmosphärischen Extremereignissen gewinnt. Im dritten Statusbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2001) wird dem eine Bedeutung zugemessen. Selbst wenn die wissenschaftliche Absicherung dieses Zusammenhangs noch aussteht, müssen Wirtschaft und Politik nach dem Vorsorgeprinzip eine weitere Verschärfung der Katastrophenszenarien als Folge der erwarteten Klimaveränderungen in ihre Überlegungen und Handlungen einbeziehen (BERZ 2002).

Mit der Internationalen Dekade zur Verminderung von Naturgefahren (International Decade of Natural Disaster Reduction, IDNDR) von 1991 bis 2000 bekam die Wissenschaft bezüglich der Thematik der Naturgefahren politischen Rückenwind. Die Vereinten Nationen hatten zu einem verstärkten Kampf gegen Extremereignisse aufgerufen, so dass in vielen Teilen der Welt nationale Komitees gebildet wurden (so auch das deutsche IDNDR-Komitee) (POHL & GEIPEL 2002).

Im Rahmen der IDNDR wurde von 1991 – 2000 das von der International Geotechnical Society UNESCO Working Party on World Landslide Inventory entwickelte Konzept zur systematischen Sammlung und weltweit verfügbarer Daten über Rutschungen weitergeführt (BROWN & CRUDEN & DENISON 1991).

Die stärkere Beachtung der Naturgefahren und –risiken im Entwicklungszusammenhang findet Ausdruck im Bestreben des United Nations Development Programme (UNDP) in Zukunft jährlich einen so genannten World Vulnerability Report heraus zu geben. Dabei soll, ähnlich wie im Human Development Report, die Entwicklung der Verletzlichkeit der Staaten und die Anstrengung Naturgefahren und Naturrisiken zu reduzieren anhand von aussagekräftigen Indikatoren dargestellt werden. Im Zusammenhang mit der Leitidee der nachhaltigen oder zukunftsfähigen Entwicklung der Rio-Konferenz 1992 hat eine integrative Sichtweise an Boden gewonnen und Naturgefahren bzw. Naturrisiken werden nun weniger als plötzliche und unerwartete Extremereignisse angesehen, sondern in einen größeren ökologischen Zusammenhang gestellt. Ebenso wird diese Problematik immer stärker in der Entwicklungspolitik beachtet, man möchte von einer „culture of reaction“ zu einer „culture of prevention“ übergehen (POHL & GEIPEL 2002).