

## BERICHTE UND MITTEILUNGEN

## 'HUTELLE': AUSWIRKUNGEN EINER TROPISCHEN DEPRESSION MIT STARKNIEDERSCHLÄGEN AUF DEN OSTABHANG MADAGASKARS

Mit 4 Abbildungen, 3 Tabellen und 3 Photos

JÜRIG BRAND

*Summary:* 'Hutelle': impact of a tropical depression with extreme rainfall on the eastern escarpment of Madagascar

From March 1-3, 1993, the eastern escarpment of Madagascar was touched by the tropical depression 'Hutelle', which, with its 440 mm rainfall within 24 hours, represented an event which occurs once every 50-100 years. Monitored catchments under mainly natural forest, secondary vegetation and shifting cultivation showed runoff coefficients of 61%, 73% and 79%, respectively. With soil-water saturation numerous landslides occurred with local volumes of up to 192 m<sup>3</sup>/ha. Aside from factors of slope, exposure, and geology, the main cause of destabilization lies in higher infiltration capacity than lateral drainage capacity in the topsoil. Severe soil erosion occurred only on the small slash-and-burn plots, whereas on plots of upland rice 50-65 t/ha and on ginger plots 100-250 t/ha of soil loss were estimated. Damages for Malagasy farmers consist primarily in short-term harvest losses. According to the traditional shifting land-use system, damaged agricultural plots can be left to fallow, and soil fertility on sites suffering from landslides should be naturally regenerated within 10-20 years. Consequently, proposed permanent land-use within development activities must include an integrated drainage system in order to resist the devastating consequences of such major rainfall events.

### 1 Einleitung

Das Projekt Terre-Tany führt seit 1989 unter anderem am Ostabhang Madagaskars ein angewandtes Forschungsprogramm zum Zustand der natürlichen Ressourcen und der Dynamik des Landnutzungssysteme durch. Es wird von der Direktion für Entwicklungszusammenarbeit und humanitäre Hilfe (DEH) finanziert und von der Gruppe für Umwelt und Entwicklung (GfEU) des Geographischen Institutes der Universität Bern geleitet. Mit einer vorwiegend madegassischen Forscherequipe unterstützt das Projekt das Programme de Conservation des Sols des DRFP/FOFIFA de Ministère de la Recherche Scientifique et Technique de Madagascar. Seit 1994 unterstützt der Schweizerische Nationalfonds für wissenschaftliche Forschung mit einem Zusatzprojekt die vertiefte Erforschung der ökologischen Auswirkungen der Brandrodung auf die natürlichen Ressourcen.

Die Untersuchungsregion (250 km<sup>2</sup>) erstreckt sich auf 25 km Länge und 10 km Breite entlang der Route Nationale 2, auf halber Strecke zwischen der Haupt-

stadt Antananarivo und der Hafenstadt Toamasina (Abb. 1). Sie umfaßt mit den Regionen von Beforona und Ranomafana die typische Landschaftsabfolge des Ostabhanges, welche bereits von LE BOURDIEC (1974, 258) beschrieben wurde. Ganz im Westen befindet sich auf 750-1000 m ü. M. die aktuelle Grenze des tropischen Regenwaldes, welcher die Gipfelzone bedeckt. Östlich daran schließt zwischen 350-750 m ü. M. eine feingekammerte Zone mit scharfgeschnittenen Kämmen an, welche durch verschiedene Formationen von Sekundärvegetation dominiert wird. Die östlichste Zone im Untersuchungsgebiet liegt auf 150-350 m ü. M. und ist gekennzeichnet durch sanftgerundete Hügelkuppen, welche bereits degradierte, savannenartige Vegetation aufweisen.

Diese drei agroökologischen Unterzonen charakterisieren das räumliche, ökologische Profil am Ostabhang, in dem von Westen nach Osten Nutzungsdauer und entsprechende Degradationserscheinungen zunehmen (Photo 1). In den drei Zonen wurden je ein repräsentatives Einzugs- und Dorfgebiet ausgewählt (Vohidrazana/Ambohimarina, Fierenana, Salapinga), in welchem klimatische, hydrologische und pedologische Untersuchungen vorgenommen wurden. Gleichzeitig wurden Studien zu Vegetation, Landnutzung und Bodenrechten durchgeführt. In der langjährigen Forschungsstation von Marolafa wurden zusätzlich ein experimentelles Kleineinzugsgebiet hydrologisch gemessen und agroforstwirtschaftliche Versuche eingeleitet. Bergreisbau unter Brandrodung (Tavy) ist die traditionelle Landnutzung im Untersuchungsgebiet. Teilweise wird Maniok als Folgefrucht auf den aufgegebenen Tavy angebaut. Die Gunstlagen an Wasserläufen sind durch Kaffee- und Frucht bäume unter Albizien besetzt oder werden mit dem Anbau von Bohnen, Süßkartoffeln und Taro genutzt. Naßreisterrassen gibt es vor allem in Fierenana und Beforona, sie werden jedoch eher extensiv bewirtschaftet. Als Marktprodukte werden Bananen und Ingwer angebaut (Photo 2). Das feucht-tropische Klima des Ostabhanges Madagaskars weist eine Jahressumme der Niederschläge von 2000-3500 mm auf (OLDEMAN 1990, 9; CHAPURON et al. 1993, 109). Während der Regenzeit im Südsommer, vor allem von Dezember bis März, wird Madagaskar im Mittel von vier tropischen Zyklonen heimgesucht (SERVICE DE LA METEOROLOGIE 1990, 2).

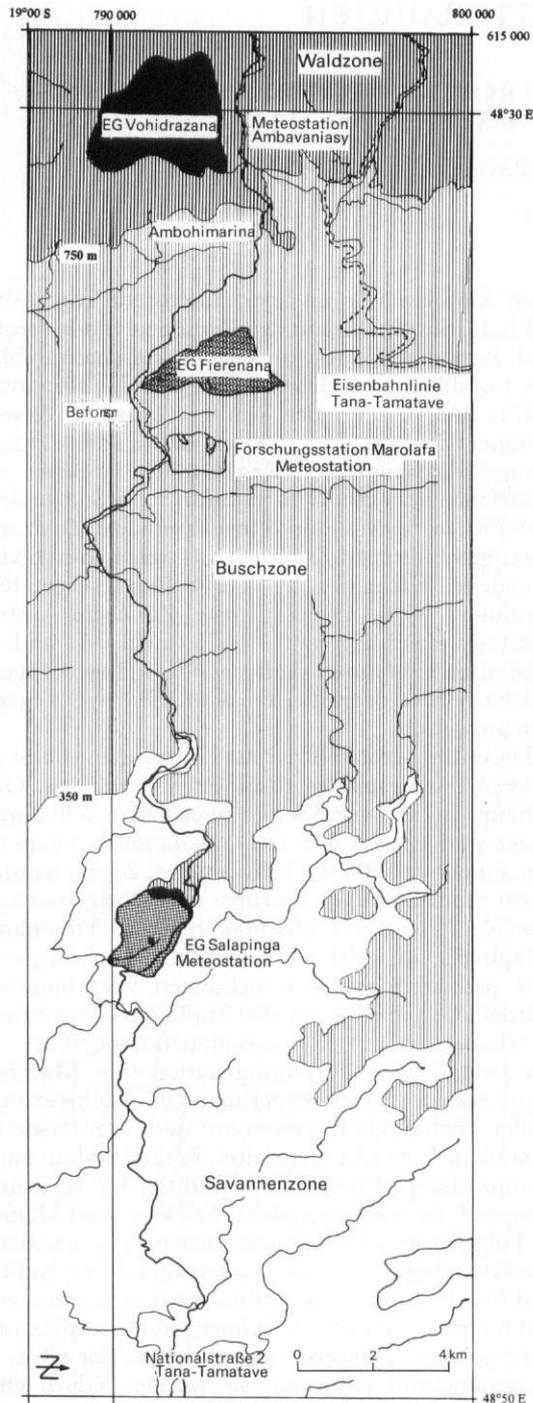


Abb. 1: Karte des Untersuchungsgebiets

Quelle: BRAND 1994, 31

Map of the research region

Von den zehn Zyklonen, die im Südsommer 1992/93 im südwestindischen Ozean registriert wurden, wurde Madagaskar vor allem von ‚Iona‘ und ‚Hutelle‘ Anfang März schwer getroffen. ‚Hutelle‘

durchzog vom 1. bis zum 3. März 1993 die Region von Vatomandry und Brickaville an der Ostküste Madagaskars und löste dort durch Starkniederschläge Überschwemmungen und zahlreiche Erdbeben aus.

Das Landnutzungssystem am Ostabhang ist größtenteils auf Starkniederschläge ausgerichtet, allerdings wurden während ‚Hutelle‘ die bisher gemessenen Niederschlagsmengen bei weitem übertroffen. Es soll deshalb die Frage beantwortet werden, ob dieses klimatische Extremereignis mit Überschwemmungen, Erdbeben und Schäden an Kulturen auch für die Landnutzung ein Extremereignis mit nachhaltigen Auswirkungen darstellt.

## 2 Zugbahn von ‚Hutelle‘ und Niederschlagsverhalten

In den Tiefdruckzentren der Zyklone des südwestindischen Ozeans wird vielfach ein Luftdruck unter 980 mb gemessen. Den Rekordwert erreichte ‚Lydia‘ 1973 über Tromelin mit 932 mb (DONQUE 1975, 12). ‚Hutelle‘ wies jedoch 1000 mb als geringsten Luftdruck und gemäßigte Windstärken unter 60 km/h auf und wurde in der Folge als ‚schwache tropische Depression‘ klassifiziert. An der Ostküste Madagaskars treffen die Zyklone üblicherweise aus nordöstlicher Richtung ein, überqueren die Insel diagonal oder in einem unregelmäßigen Halbkreis und verlassen Madagaskar in südöstlicher Richtung wieder (DONQUE 1975, 39). Die Meteokarten (Abb. 2) zeigen, wie ‚Hutelle‘ über dem Untersuchungsgebiet eine atypische, schlaufenförmige Zugbahn beschrieb und damit sintflutartige Niederschläge auslöste.

Am 1. März um 21:00 h lag das Tiefdruckzentrum südöstlich des Untersuchungsgebiets. Die Niederschläge der eindrehenden Wolkenbänder setzten in der Gegend von Beforona um 22:00 h ein. In der Nacht vom 1. auf den 2. März zog das Auge des Zyklons knapp östlich des Untersuchungsgebiets vorbei, was weiterhin anhaltende und langsam stärker werdende Niederschläge bewirkte. Im Verlauf des Morgens vom 2. März setzte das Zentrum seinen Weg in nordwestlicher Richtung fort, wodurch es im Untersuchungsgebiet ab 9:00 h während 6 Stunden zu extremen Niederschlägen kam. Darauf drehte ‚Hutelle‘ wieder auf die typische Südost-Bahn ab.

Die Niederschlagsmessungen der fünf Meteorologischen Stationen im Untersuchungsgebiet zeigten während des Zyklonendurchgangs vergleichbare Totalniederschläge. In der höchstgelegenen Station (900 m ü. M.) wurden dabei mit 460 mm rund 10% weniger Niederschlag gemessen als in der tiefstgelegenen Station (235 m ü. M.) mit 510 mm. Im 40 km östlich gelegenen Brickaville (10 m ü. M.) wurden total nur 206 mm Niederschlag registriert. Auch im westlich anschließenden Gebiet kann anhand der Schäden angenommen werden, daß die Niederschlagsmenge rasch ab-



*Photo 1:* Luftaufnahme des Untersuchungsgebiets (vgl. Abb. 1) in Richtung Westen. Am unteren Bildrand ist ein Teil des Einzugsgebiets Salapinga sichtbar. Der Regenwald und das Einzugsgebiet Vohidrazana sind am oberen Bildrand als dunkle Flächen (z. T. Wolkenschatten) erkennbar

*Photo:* J. BRAND

Aerial photograph of the research region, taken in western direction (cf. Fig. 1). In the foreground part of the Salapinga catchment can be seen. The dark surfaces in the background represent the rainforest and the Vohidrazana catchment

genommen hat. Die Ostwestausdehnung der Starkniederschlagszone beträgt demnach nur 25–30 km. Wie sich die Niederschläge in südlicher und nördlicher Richtung fortsetzen, ist nicht bekannt.

In der Station Marolafa wurden die Niederschläge mit einem Pluviographen kontinuierlich aufgezeichnet. Die Kurve der 15'-Niederschlagsintensitäten während ‚Hutelle‘ zeigt, daß die Niederschläge am

1. März 1993 um ca. 22:00 h begonnen haben und erst am 3. März um 2:00 h aufhörten (Abb. 3). Die maximalen Niederschlagsintensitäten (Tab. 1) sind für die Intervalle 1 Minute bis 1 Stunde mit 144–67 mm/h wohl hoch, liegen aber im Bereich der jährlich auftretenden Intensitätsmaxima während der Gewitter am Ostabhang (CHAPERON et al. 1993, 136). Für das Untersuchungsgebiet äußerst seltene Ausmaße

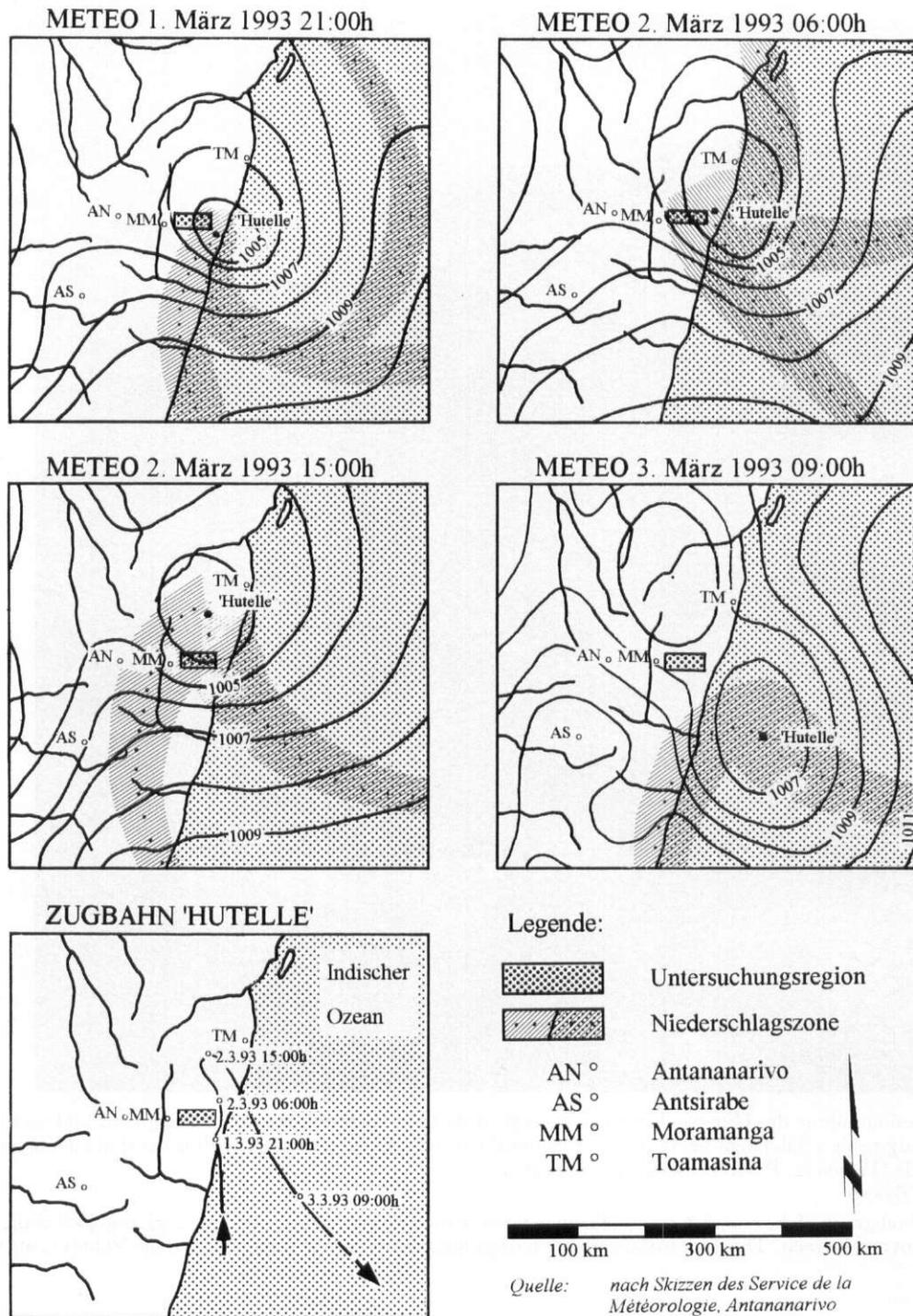


Abb. 2: Meteokarten und Zugbahn von 'Hutelle' (nach Skizzen des Service météorologique)  
Surface isobars and path of 'Hutelle' (after sketches of the Service météorologique)

nehmen die Intervalle 6 und 24 Stunden an, in denen 257 mm beziehungsweise 440 mm Niederschlag fielen.

Im Vergleich mit den Extremwertstatistiken der umliegenden nationalen Meteostationen mit jeweili-

ger Beobachtungsdauer von 30-40 Jahren, Toamasina, Brickaville und Moramanga (DURET 1976), kann der 24h-Niederschlag von 440 mm während 'Hutelle' als Jahrhundertereignis bezeichnet werden. Diese Interpretation wird allerdings relativiert durch



Photo 2: Typisches Landnutzungsmuster bei Beforona

- 1. Bergreis (Tavy); 2. Ingwer; 3. Bananen; 4. Frucht- und Kaffeebäume (Tanimboly); 5. 2jährige Sekundärvegetation (Savoka); 6. 5jährige Sekundärvegetation (Savoka); 7. Regenwald

Photo: J. BRAND

Typical land-use patterns near Beforona

- 1. Upland-rice (Tavy); 2. Ginger; 3. Bananatrees; 4. Fruit- and Coffeetrees (Tanymboly); 5. 2-year-old secondary vegetation (Savoka); 6. 5-year-old secondary vegetation (Savoka); 7. Rainforest

die geringe Dichte des Beobachtungsnetzes, die unsicheren Niederschlagsmessungen während großer Zyklonen und durch die Tatsache, daß die von DURET (1976) verwendeten Tageswerte immer von 7:00–7:00 h gemessen wurden, der 24h-Wert für ‚Hutelle‘ jedoch der maximalen Niederschlagssumme während eines beliebigen 24h-Intervalls entspricht. Unter Berücksichtigung der Aussagen älterer Bauern, welche während ihrer Lebenszeit noch nie eine derartige Häufung von Erdbeben miterlebt haben, kann man im Falle von ‚Hutelle‘ für das Untersuchungsgebiet von einem 50–100jährigen Extremereignis ausgehen. An der Ostküste Madagaskars wurden bisher nur dreimal Tagesniederschläge über 500 mm registriert. Drei Küstenstädte weisen vergleichbare Rekordwerte

von 440–450 mm auf, während für Inlandstationen am Ostabhang die Maximalwerte um die 300 mm betragen. Das benachbarte La Réunion hält mit 1860 mm in 24 h den Weltrekord für Tagesniederschläge (CHAPERON et al. 1993, 73).

### 3 Abflußverhalten

Tabelle 2 zeigt die Eigenschaften der Einzugsgebiete und deren Abflußwerte, während die spezifischen Abflußkurven der Einzugsgebiete in Abbildung 3 dargestellt sind. Der Einfluß der unterschiedlichen Größen der Einzugsgebiete äußert sich im Abflußverhalten, indem im Experimentaleinzugs-

Tabella 1: Niederschlagsintensitäten der Station Marolafa (525 m ü. M.) am 2. März 1993

Rainfall intensities in Marolafa (525 m asl) on 2 March 1993

Intervall	1'	5'	10'	15'	30'	1h	6h	12h	24h
Intensität (mm/h)	144.0	115.2	115.2	113.4	94.4	67.2	42.9	24.6	18.3
Niederschlag (mm)	2.4	9.6	19.2	28.4	47.2	67.2	257.2	294.6	440.0

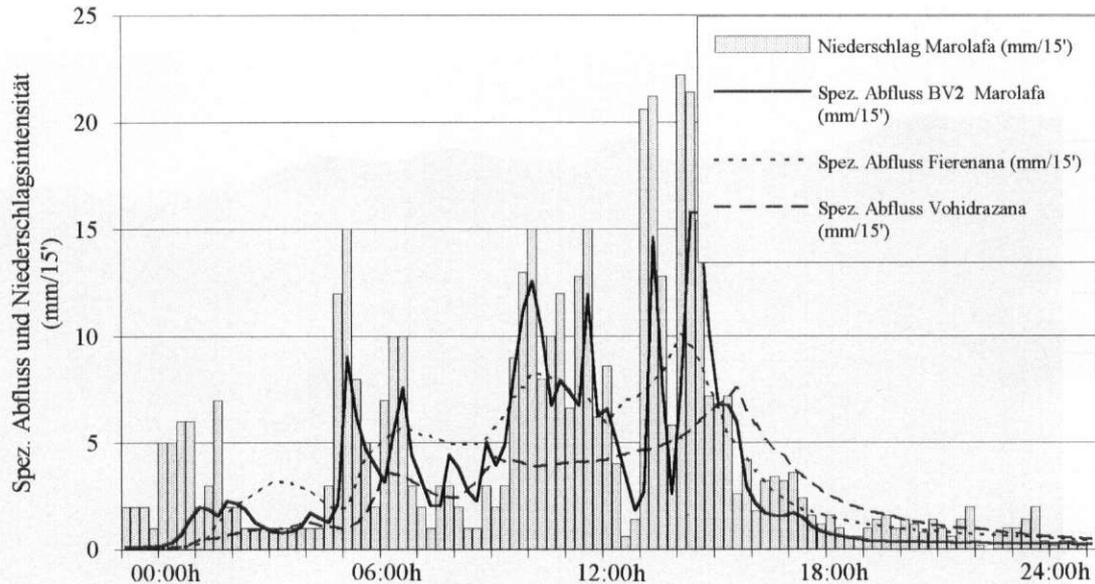


Abb. 3: Kurve der Niederschlagsintensitäten und spezifisches Abflußverhalten während 'Hutelle'  
Curves of rainfall intensities and specific discharge during 'Hutelle'

gebiet BV2 der Abfluß unmittelbar dem Niederschlagsverhalten folgt, während in den größeren Einzugsgebieten die Abflußkurve geglättet und der Spitzenabfluß verzögert wird.

Das Abflußverhalten wird jedoch auch durch die unterschiedlichen Vegetations- und Landnutzungsbedingungen und die Bodeneigenschaften geprägt. Das Einzugsgebiet Vohidrazana mit 87% Waldbedeckung hat einen Abflußkoeffizienten von 58% des Niederschlags, unter der homogenen 4jährigen Sekundärvegetation des Experimentaleinzugsgebiets beträgt er 73% und im Einzugsgebiet Fierenana, mit regionaltypischer Vegetation und Landnutzung, flossen 76% der Niederschläge innerhalb von 35 h ab. Unter Berücksichtigung des Anteils landwirtschaftlich genutzter Flächen im Waldeinzugsgebiet, der atypischen Naßreisböden im Einzugsgebiet Fierenana und der Einzugsgebietsgröße von Marolafa verhalten sich die Abflußkoeffizienten von natürlichem

Wald, dichter Sekundärvegetation und Savoka/Tavy-Nutzung etwa 55% zu 70% zu 80% bei Extremniederschlägen. Dies entspricht Resultaten aus den USA, wo im ersten Jahr nach Entwaldung 20% mehr Abfluß bei Starkniederschlägen registriert wurden. Unter 8jähriger Sekundärvegetation wurde jedoch wieder dasselbe Abflußverhalten wie unter Wald beobachtet (HAMILTON 1983, 35).

#### 4 Erdrutsche und Bodenerosion

Auf dem Kulminationspunkt der Niederschlagsintensität, welcher am 2. März nach 10stündigen Starkniederschlägen auftrat, ereigneten sich im gesamten Untersuchungsgebiet zahlreiche Erdrutsche. Im zu 85% bewaldeten Einzugsgebiet von Vohidrazana entstanden 12 sichtbare Rutschungen, zur Hälfte an Wegböschungen. 5 Erdrutsche ereigneten

Tabelle 2: Eigenschaften der Einzugsgebiete und Abflußwerte während 'Hutelle'  
Discharge and characterization of the catchments during 'Hutelle'

Einzugsgebiet	Fierenana	Vohidrazana	Marolafa
Fläche (ha)	438	946	20
Q <sub>max</sub> (l/s ha)	107	85	175
Q <sub>tot</sub> 35h (mm)	355	272	340
K <sub>q</sub> (%)	76	58	73
Anteil Wald (%)	13	87	4
Anteil Sekundärvegetation (%)	65	10	96
Anteil genutzte Flächen (%)	19	3	0
Anteil Naßreisfelder (%)	3	0	0



Photo 3: Luftaufnahme der steilen Bergflanke bei Ambohimarina. Die Erdrutsche und Murgänge nach ‚Hutelle‘ (1993) und ‚Geralda‘ (1994) sind als helle, braunrote Flächen erkennbar. Am linken oberen Bildrand ist das Einzugsgebiet Vohidrazana (vgl. Abb. 1) sichtbar

Photo: J. BRAND

Aerial photograph of landslides near Ambohimarina after ‚Hutelle‘ (1993) and ‚Geralda‘ (1994). In the upper left corner the Vohidrazana catchment can be seen (cf. Fig. 1)

sich unter Sekundärvegetation bei Hangneigungen von 70–80%, wobei die Anbruchstellen häufig ca. 10 m unterhalb des Waldrandes lagen. Dies läßt auf eine Wasserzufuhr aus der Mooschicht des Waldbodens auf die unbemoosten Böden unter Sekundärvegetation schließen. Ebenfalls knapp unterhalb des Waldrandes liegt der einzige Erdrutsch auf einem Tavy. Im Einzugsgebiet von Fierenana wurden 48 Rutschungen mit folgender Verteilung gezählt: Flußböschungen: 18 Erdrutsche – Sekundärvegetation: 17 Erdrutsche – Wegböschungen: 6 Erdrutsche – Albizien und Fruchtbaumhaine: 4 Erdrutsche – Tavy: 2 Erdrutsche – Maniok: 1 Erdrutsch. Im Einzugsgebiet Salapinga ereigneten sich ca. 90 Erdrutsche. Auch hier bestand die Vegetation der Anbruchstellen meist aus gemischter Sekundärvegetation. Ebenfalls stark betroffen waren die Albizzia-Fruchtbaumhaine mit steilen Hängen, während unter Tavy nur 2 Rutsche beobachtet wurden.

Besonders schwer betroffen wurde die Bergflanke von Ambohimarina (Photo 3). Für das lokal gehäufte Auftreten der 110–120 Erdrutsche sind folgende Faktoren ausschlaggebend:

– Trotz schwacher Winde bewirkten die von Südost kommenden Niederschläge auf der ostexponierten

Flanke beträchtlich höhere Regenmengen und Intensitäten.

– Die Mooschicht des Waldes entwässerte die aufgefangenen Niederschläge direkt auf die hangabwärts liegenden Brachflächen.

– Das Substrat weist aufgrund der Metamorphose präkambrischer Sedimente in Glimmergneise eine deutliche schichtartige Struktur auf, welche sich auch im verwitterten Lateritmantel fortsetzt und generell nach Osten geneigt ist. Ein Aufschluß im Rutschgebiet zeigt beispielsweise eine Fallrichtung von 70° und einen Fallwinkel von 50%. Dies bedeutet, daß auf diesem Osthang potentiell alle Hangneigungen über 50% instabil werden können, da die schichtartige Struktur unten angeschnitten wird.

Um eine Volumenabschätzung vornehmen zu können, wurden die Rutschungen in drei Kategorien aufgeteilt, je 3 Erdrutsche ausgemessen und anhand dieser Messungen das Gesamtvolumen abgeschätzt (Tab. 3). Kleine und mittlere Rutschungen sind meist zwischen 0,4–1 m tief, während größere Rutschungen bis auf das Anstehende in 2–4 m Tiefe reichen können. Die Bergflanke bei Ambohimarina wurde mit einem Rutschvolumen von 50 000 m<sup>3</sup> auf 260 ha (192 m<sup>3</sup>/ha) am stärksten betroffen, während das

Tabelle 3: Volumenabschätzung der Erdrutsche während ‚Hutelle‘  
Estimated volumes of landslides caused by ‚Hutelle‘

	Kleine Erdrutsche	Mittlere Erdrutsche	Große Erdrutsche	Geschätztes Volumen
Ostflanke Ambohimarina (260 ha)	80-110	20-25	2	50 000 m <sup>3</sup>
Einzugsgebiet Vohidrazana (900 ha)	12	0	0	500 m <sup>3</sup>
Einzugsgebiet Fierenana (420 ha)	43	5	0	15 000 m <sup>3</sup>
Einzugsgebiet Salapinga (350 ha)	80	10	0	30 000 m <sup>3</sup>
Untersuchungsregion (300 km <sup>2</sup> )	-	-	-	1 000 000 m <sup>3</sup>

Waldeinzugsgebiet Vohidrazana nur 500 m<sup>3</sup> auf 900 ha (0.55 m<sup>3</sup>/ha) aufwies. Für die gesamte Untersuchungsregion wird ein Rutschvolumen von 1 Mio m<sup>3</sup> geschätzt, was bei einer mittleren Bodendichte von 1.30 g/cm<sup>3</sup> etwa 1.3 Mio Tonnen Erdmaterial (43 t/ha) entspricht. Landwirtschaftlich darf allerdings der Schaden nicht überschätzt werden, da im Mittel nur 1% der gesamten Fläche durch Erdrutsche beeinträchtigt wurde. HAMILTON (1983, 39) zitiert Resultate einer vergleichbaren Studie von O'LOUGHLIN und PEARCE (1976) in Neuseeland. Danach wiesen bewaldete Gebiete eine Dichte von einem Erdrutsch pro km<sup>2</sup> auf, während auf entwaldeten Flächen 20 Erdrutsche pro km<sup>2</sup> auftraten. 98% aller Erdrutsche ereigneten sich bei zwei Extremereignissen.

Neben den obengenannten Lagefaktoren (steile Hänge, Wasserzufuhr, südostexponierte Lage und hangparallele, schichtartige Lateritstruktur) sind Bodeneigenschaften wie Horizontmächtigkeit, Infiltration und Drainage für die Auslösung der Erdrutsche mitverantwortlich. Die Infiltrationsraten der Oberböden im Untersuchungsgebiet, welche eine Mächtigkeit von 15–30 cm haben, sind unter anderem vom Gehalt an organischem Material und der Bodendichte abhängig. Waldböden mit 7–9% organischem Gehalt und einer Bodendichte von 0.82 g/cm<sup>3</sup> weisen Infiltrationsraten nach 90 Minuten von 9–10 cm/h auf. Für die Böden unter dichter Sekundärvegetation und agroforstwirtschaftlicher Nutzung (organischer Gehalt 6.5–8.8%; Bodendichte 0.90–0.98 g/cm<sup>3</sup>) beträgt die Infiltrationsrate 4–5 cm/h, während diese in Böden unter degradiertem Sekundärvegetation (organischer Gehalt 4.8–5.9%; Bodendichte 0.98–1.27 g/cm<sup>3</sup>) nur 0.5–1 cm/h betrug. Der B-Horizont weist in der Regel eine geringe Perkolation auf, weshalb das infiltrierte Bodenwasser auf steilen Hängen hauptsächlich lateral im A-Horizont entwässert.

Die Waldböden konnten während ‚Hutelle‘ nahezu die gesamte Niederschlagsmenge infiltrieren. Bedingt durch die hohe Porosität von ca. 69% und durch die lockere Moos- und Bodenstruktur war die seitliche Entwässerungskapazität im Oberboden groß genug, um eine Bodensättigung und -verflüssigung zu verhindern. Die Oberböden unter dichter Sekundärvegetation und Fruchtbaumkulturen, wo die meisten Erdrutsche beobachtet wurden, infiltrierten auf-

grund ihres hohen organischen Gehaltes so viel Niederschlag, daß es nur zu geringem Oberflächenabfluß kam. Durch höhere Bodendichte und geringere Bodenfauna als unter Wald ist die seitliche Entwässerungskapazität jedoch reduziert, was nach 6 Stunden maximaler Infiltration während ‚Hutelle‘ zu Bodensättigung, -verflüssigung und Erdrutschen führte, die zum Teil murgangartige Formen aufwiesen. Ein wichtiger Faktor ist auch der Umstand, daß unter Sekundärvegetation das dichte Wurzelwerk des Waldes fehlt, welches bei Bodensättigung mit bis zu 80% zur Bodenstabilität beiträgt (HAMILTON 1983, 39). Auf den humusarmen und kompakten Böden unter degradiertem Sekundärvegetation trat bedingt durch die geringen Infiltrationsraten massiver Oberflächenabfluß auf, dessen erosive Auswirkungen allerdings durch das Wurzelwerk und gute Bodenbedeckung gemindert wurden. Im Oberboden überstieg die seitliche Entwässerungskapazität die geringe Infiltration, wodurch auf diesen Vegetationseinheiten fast keine Erdrutsche entstanden.

Im Untersuchungsgebiet sind unter normalen Verhältnissen trotz hoher Niederschlagsintensitäten und steiler Hänge (bis 70%) die Erosionsraten erstaunlich gering. In Experimentaleinzugsgebieten wurde unter Tavy eine Bodenerosion pro Jahr von 6 t/ha gemessen, während sie unter Wald und Sekundärvegetation vernachlässigbar ist (DRFP 1975). HAMILTON (1983, 19) beschreibt die Ursachen der geringen Bodenerosion unter Brandrodung: gute Bodenbedeckung, außer 1–2 Monate nach dem Brennen, Schutz durch umgebende Sekundärvegetation und geringe Bodenbearbeitung. Während jedoch unter traditionellem Bergreisbau Bodenerosion nur während 2 Monaten der mehrjährigen Rotation auftritt, kann unter Ingwer bedeutend mehr Bodenerosion auftreten. Ingwer ist im Untersuchungsgebiet eine marktorientierte Innovation und wird vorzugsweise in steilsten Lagen angebaut, wobei der Boden umgestochen und eingeebnet wird und die Ingwerpflanzen auch nach 4–5 Monaten eine nur geringe Bodenbedeckung erreichen. Feldbeobachtungen lassen darauf schließen, daß während ‚Hutelle‘ unter Bergreis und Maniok ca. 0.5 cm Boden (50–65 t/ha) abgetragen wurden, während unter Ingwer lokal 1–2 cm Boden (130–260 t/ha) verloren gingen und zusätzlich bedeutende Rillenerosion auftrat. Bergreis, Maniok und Ingwer

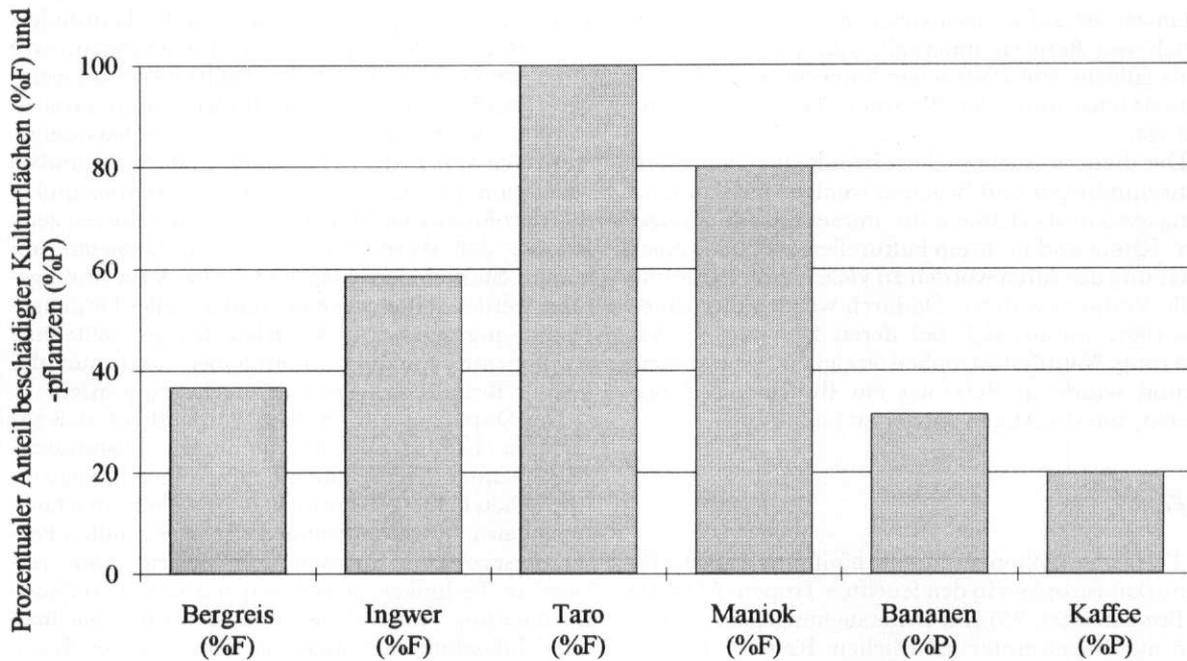


Abb. 4: Kulturschäden in Ambohimarina (nach Schadensrapport der Bauern)

Agricultural damages in the Ambohimarina village (according to local damage-report)

machen jedoch insgesamt nur ca. 15% der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus.

Die für die Bodenerosion mitentscheidende Erosivität der Niederschläge läßt sich entweder durch die kinetische Energie  $E$  oder durch den Erosivitätsindex  $EI_{30}$  ausdrücken, wobei nach LAL (1975, 50 ff)  $EI_{30}$  besser mit dem Bodenabtrag korreliert ist als  $E$ . Zur Berechnung von  $E$  wurde die Formel von LAL (1975, 50)  $E' = 210 + 89 \log I'$  verwendet, welche aus der Niederschlagsintensität  $I'$  die kinetische Energie  $E'$  pro cm Niederschlag berechnet.  $EI_{30}$  berechnet sich aus  $E$  und der maximalen Niederschlagsintensität während 30 Minuten  $I_{30}$ . Während des Durchzuges von ‚Hutelle‘ betrug  $E$   $11\,891 \text{ J/m}^2$ , was einem Drittel der gesamten kinetischen Niederschlagsenergie des hydrologischen Jahres 1992/93 gleichkommt.  $EI_{30}$  dagegen betrug für ‚Hutelle‘  $1037 \text{ J/mh}$ , während das restliche hydrologische Jahr insgesamt  $767 \text{ J/mh}$  erreichte. Daraus kann geschlossen werden, daß der Bodenabtrag während des Niederschlagsereignisses größer gewesen ist als während des gesamten restlichen Jahres und dies ohne Berücksichtigung der Erdbeben.

##### 5 Landwirtschaftliche Schäden

In Ambohimarina ging nach Angaben der Bauern ca. 1/3 des Bergreisertrags verloren. Die Bauern versuchten diese Ernteeinbußen mit dem Anbau von Maniok, Süßkartoffeln und Taro wettzumachen. Stärker als der Bergreis waren die Kulturen Maniok

und Ingwer betroffen, für welche Ernteeinbußen von 60% angegeben wurden. Taro, in Vertiefungen in Feuchtlagen gepflanzt, wurde überall überschwemmt und zusedimentiert. Der Schadensrapport der Bauern von Ambohimarina gibt im weiteren 1072 zerstörte Bananenstauden und 895 zerstörte Kaffeebäumchen an, was etwa 25% des gesamten Bestandes entspricht (Abb. 4). Die Bananenplantagen wurden etwas stärker betroffen, weil sie üblicherweise näher am Flußlauf liegen. Befragungen von Bauern zeigten, daß in anderen Dörfern die Schäden ein ähnliches Ausmaß erreichten.

Zu den längerfristigen Auswirkungen befragt, gaben die Bauern für zerstörte Bananenheine eine Erholungszeit von einem Jahr an, falls die Stauden noch im Boden verwurzelt seien, sonst betrage die Regenerationszeit 3 Jahre. Die überfluteten und zerstörten Naßreisterrassen in Fierenana müssen mit großem Arbeitseinsatz repariert werden. Nach Angaben der Bauern in Ambohimarina, Salapinga und Fierenana weist eine flache Rutschung auf Laterit nach 6–10 Jahren wieder dieselbe Sekundärvegetation auf wie die übrigen Terrains und kann mit geringen Ernteeinbußen wieder angebaut werden. Der ursprüngliche Bodenzustand sei jedoch erst nach 20 Jahren wieder erreicht. Tiefergehende Rutschungen, bei denen Stein oder Felsgrund zutage treten, sind für die Bauern langfristig (> 50 Jahre) unbrauchbar. Feldbeobachtungen bestätigen diese Aussagen. Die Rutschungen vom März 1986 (Zyklon ‚Honorinina‘) sind wieder vegetationsbedeckt. Bergreis entwickelt auf solchen Standorten jedoch deutlich kleinere

Pflanzen als auf benachbarten Parzellen. Der Vergleich von Bergreis innerhalb und außerhalb einer Rutschfläche von 1959 zeigte hingegen keine Unterschiede hinsichtlich der Pflanzengröße und des Ernteertrags.

Die Bauern suchen die Gründe für die Überschwemmungen und Schäden weniger im Landnutzungssystem als vielmehr im ‚immer unregelmäßigeren‘ Klima und in ihrem kulturellen Weltbild. Nach Meinung der Alten wurden zu viele Fahdys (traditionelle Verbote) verletzt. Dadurch würden die Ahnen beleidigt, worauf sich bei deren fehlender Unterstützung Naturkatastrophen ereignen. Aus diesem Grund wurde in Beforona ein Büffelopfer dargebracht, um die Ahnen wieder zu besänftigen.

## 6 Fazit

Tropische Zyklonen sind die häufigste Ursache für Naturkatastrophen in den feuchten Tropen (MANTON a. BONELL 1993, 25). Im Untersuchungsgebiet scheinen nur Böden unter natürlichem Regenwald hohe Niederschlagsmengen aufnehmen und entwässern zu können, wobei bezüglich der Erdrutsche die Drainagekapazität des Waldoberbodens wichtiger ist als dessen Rückhaltefähigkeit. Alle anderen Vegetations- oder Landnutzungseinheiten zeigen entweder Bodenerosion durch Oberflächenabfluß oder gehäuft Erdrutsche durch ein ungünstiges Verhältnis zwischen Infiltration und Entwässerung, wobei Lagefaktoren eine entscheidende Rolle spielen.

Die teilweise Erntezerstörung hatte für die Bauern überwiegend kurzfristige Auswirkungen, wobei die Ernteeinbußen bei Bergreis und der Ausfall der Einkünfte aus dem Verkauf von Bananen und Kaffee am schwersten wogen. Mittelfristige Schäden entstanden durch partielle Zerstörung der Naßreisterrassen und durch Erdrutsche an steilen und ostexponierten Hängen. Obwohl die Bodenerosion auf agrarisch genutzten Flächen beträchtlich war, scheint sie auf die gesamte Fläche bezogen unproblematisch zu sein. Außerdem haben die feuchttropischen Oberböden als Nährstoffspeicher eine geringere Bedeutung als in gemäßigten Breiten. Langfristige Schäden wurden einzig durch Erdrutsche verursacht, welche bis auf das Anstehende reichten. Der Anteil derart betroffener Flächen war jedoch verschwindend klein.

Es zeigte sich, daß bei Extremereignissen insbesondere die von Kolonisten, Immigranten etc. eingeführten Landnutzungssysteme gefährdet sind. Überschwemmungen, Erdrutsche und Bodenerosion betrafen vor allem Naßreisterrassen, Frucht- und Kaffeebaumhaine sowie Ingwerparzellen. Dagegen waren Flächen mit traditionellem Bergreisanbau weniger gefährdet. Dieser Befund sollte bei agraren Entwicklungsmaßnahmen berücksichtigt werden, denn die konventionellen Konzepte empfehlen für

Hanglagen häufig Agroforstwirtschaft, kontinuierliche Bodenbedeckung und Terrassierungen, wodurch unter anderem erhöhte Infiltration und weniger Oberflächenabfluß und Bodenerosion erreicht werden soll. Das im Untersuchungsgebiet bevorzugte Auftreten von Erdrutschen unter dichter Sekundärvegetation, in Frucht- und Kaffeebaumhainen und in den agroforstwirtschaftlichen Versuchsgebieten zeigt jedoch, daß diese Maßnahmen in Gebieten mit hohem Starkniederschlagsrisiko nur dann durchgeführt werden sollte, wenn ein funktionelles Drainagesystem angelegt wird. Auf Risikoflächen sollte eine permanente Nutzung unterbleiben und nur das flexible Brandrodungssystem zugelassen werden.

Der Durchzug von ‚Hutelle‘ verdeutlicht, daß aus anderen Klimazonen übernommene Lösungsvorschläge unter den extremen Bedingungen der feuchttropischen Hügelländer nicht ohne weiteres nachhaltig angewandt werden können. In angewandten Forschungsprojekten müssen modifizierte und verbesserte Techniken zusammen mit der betroffenen Bevölkerung erarbeitet werden, denn nur nachhaltige Maßnahmen erhalten das Vertrauen der Bevölkerung und tragen zur Verbesserung der Lebensbedingungen bei.

## Literatur

- BONELL, M., HUFSCHEMIDT, M. M. a. GLADWELL, J. S. (Eds.) (1993): Hydrology and Water Management in the Humid Tropics. Paris.
- BOURDIEC, F. LE (1974): Homme et paysage de Madagascar. Antananarivo.
- BRAND, J. (1994): Interessenkonflikte im Urwald Madagaskars. In: Uni Press Bern 81, 29–32.
- CHAPERON, P., DANLOUX, J. a. FERRY, L. (1993): Fleuves et rivières de Madagascar. Paris.
- DEPARTEMENT DE LA RECHERCHE FORESTIERE ET PISISCOLE (DRFP) (1975): Etude du ruissellement et de l'érosion en parcelles élémentaires à Périnet. Antananarivo (unveröffentlicht).
- DONQUE, G. (1975): Les cyclons tropicaux des mers malgaches. Mise au point. In: Revue de Géographie de Madagascar 27, 9–63.
- DURET, L. (1976): Estimation des débits de crue à Madagascar. Antananarivo.
- GILMOUR, D. A., BONELL, M. a. SINCLAIR, D. F. (1980): An investigation of storm drainage processes in a tropical rainforest catchment. Australian Water Resources Council Technical Paper 56, Canberra.
- HAMILTON, L. S. with KING, P. N. (1983): Tropical Forested Watersheds. Hydrologic and Soil Response to Major Uses or Conversions. Boulder, Colorado.
- LAL, R. (1975): Analysis of Factors Affecting Rainfall Erosivity and Soil Erodibility. In: GREENLAND, D. J. a. LAL, R. (Eds.): Soil Conservation and Management in the Humid Tropics. Chichester, 49–56.
- (1993): Challenges in Agriculture and Forest Hydrology in the Humid Tropics. In: BONELL, M., HUFSCHEMIDT,

- M. M. a. GLADWELL, J. S. (Eds.): Hydrology and Water Management in the Humid Tropics. Paris, 395-404.
- LINSLEY, R., KOHLER, M. a. PAULHUS, J. (1988): Hydrology for Engineers. Singapore.
- MANTON, M. J. a. BONELL, M. (1993): Climate and Rainfall Variability in the Humid Tropics. In: BONELL, M., HUFSCHMIDT, M. M. a. GLADWELL, J. S. (Eds.): Hydrology and Water Management in the Humid Tropics. Paris, 13-33.
- MILLER, B. I. (1958): On the maximum intensity of hurricanes. In: Journal of Meteorology 15, 184-195.
- O'LOUGHLIN, C. L. a. PEARCE, A. J. (1976): Influence of cenozoic geology on mass movement and sediment yield response to forest removal, north Westland, New Zealand. In: International Association of Hydrological Sciences Publ. 130, 285-292.
- OLDEMAN, L. R. (1990): Agroclimatic Characterization of Madagascar. ISRIC Technical Paper 21, Wageningen.
- ROSE, C. W. (1993): Erosion and Sedimentation. In: BONELL, M., HUFSCHMIDT, M. M. a. GLADWELL, J. S. (Eds.): Hydrology and Water Management in the Humid Tropics. Paris, 301-343.
- SERVICE DE LA METEOROLOGIE (1990): Perturbations cycloniques à Madagascar. Antananarivo (unveröffentlicht).

## BUCHBESPRECHUNGEN

Dauerhafte, umweltgerechte Raumentwicklung. V u. 305 S., zahlr. Abb. und Tab. Arbeitsmaterial der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Band 212. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover 1994, DM 30,-

Sustainable development – ein Schlagwort, eine Zauberformel für eine künftige Wirtschaftsweise oder ein Begriff zur Verschleierung einer mehr oder weniger unklaren umwelt- und ordnungspolitischen Strategie? Spätestens seit den Umwelt-Gipfelkonferenzen von Rio de Janeiro und Berlin hat sich gezeigt, daß die Klarheit, wofür dieser Begriff eigentlich stehen soll, eher ab- als zugenommen hat. Die Akademie für Raumforschung und Landesplanung hat sich besonders in ihrer Sektion I (Wirtschaft und Umwelt) um eine Operationalisierung des ins Deutsche als „nachhaltig“ oder „dauerhaft umweltgerecht“ übersetzten Begriffes bemüht. Der jetzt vorgelegte Band enthält dazu zehn Beiträge namhafter Fachleute aus Ökologie, Ökonomie und Raumforschung. Daß die Autoren unterschiedliche Akzente setzen, ist schon aus diesen Gründen verständlich. Einigkeit besteht darüber, daß die Raumordnung über Flächennutzungsfestlegungen einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung des Umweltkapitalstocks und seiner Funktionen zu leisten hat. Aus diesem Grunde ist der in mehreren Beiträgen gemachte Vorschlag durchaus plausibel, neben dem Sachverständigenrat für Umwelt und dem für gesamtwirtschaftliche Entwicklung einen dritten für „Fragen der Landes- und Regionalplanung“ zu schaffen (Beiträge von D. MARX und U. BRÖSSE). Unterschiedliche Auffassungen unter den Autoren bestehen demgegenüber verständlicherweise über die für die Erreichung von Nachhaltigkeit zu benutzenden Instrumente und die verteilungspolitischen Implikationen. Welche Rolle soll dem Marktprozeß und welche einem übergeordneten, politisch-ethisch gesteuerten Bereich zukommen? Sicher ist, daß es gegenwärtig keine akzeptable Grundlage für eine quantitativ-interventionistische Wirtschafts- und Umweltpolitik gibt. Das hat sich beispielsweise vor kurzem in der Studie „Sustainable Netherlands“ gezeigt, in der die Widersprüchlichkeit zwischen sustainability auf der einen und development auf der anderen Seite deutlich wurde (Beitrag von W. HABER).

P. KLEMMER warnt daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt zurecht vor einem präventiven Umweltschutz um jeden Preis. Es entstehe sonst die Gefahr, daß nachhaltig in die individuellen Freiheitsräume eingegriffen werde. Richtiger sei es, dem Marktprozeß einzelne Grenzen und Vorgaben zu machen, die notwendig seien, um irreversible Schäden zu vermeiden.

Zwar ist auch nach der Lektüre der Beiträge nicht unbedingt klar, was unter dem schillernden Begriff sustainable development konkret zu verstehen ist, aber zwei sicher nicht zu unterschätzende Verdienste kommen diesem „Arbeitsmaterial“ zu: die Vielfalt der gegenwärtig bestehenden Interpretationen kommt zum Ausdruck und die räumlichen Dimensionen (global, regional, lokal) der Nachhaltigkeit werden klar herausgearbeitet. Darüber hinaus wird eindringlich gezeigt, daß akuter Handlungsbedarf der Raumplanung im Sinne dessen besteht, was von den Wissenschaftlern gegenwärtig noch recht unterschiedlich als Nachhaltigkeit definiert wird. KLAUS-ACHIM BOESLER

NICOLAS, ADOLPHE: Die ozeanischen Rücken. Gebirge unter dem Meer. XVII u. 200 S., 92 (teils farbige) Abb. und Photos. Springer-Verlag, Berlin et al. 1995, DM 58,-

Mit diesem Buch liegt die deutsche Übersetzung der französischen Originalausgabe von 1990 vor. In den ersten Abschnitten werden die für die Dynamik der Ozeanböden und -rücken wesentlichen Grundlagen der Plattentektonik in der Sicht neuerer Erkenntnisse vertieft dargestellt. Weiterführende Einsichten ergeben sich dann besonders aus dem vergleichenden Studium der Ophiolithe (regionaler Schwerpunkt: Oman-Ophiolithe), d. h. Bruchstücken junger ozeanischer Lithosphäre, die randlich auf Kontinente aufgeschoben wurden (Obduktion) und dort detaillierter Untersuchung zugänglich sind. Es ergeben sich Einsichten in die Prozesse des Vulkanismus (Magmendifferenzierung, Magmakammern, Diapire), die Entwicklung kontinentaler Grabenbrüche (regionaler Schwerpunkt: Rotes Meer) sowie in die Dynamik zweier unterschiedlicher Typen ozeanischer Rücken, nämlich der „schnellen Rücken“ (Prototyp: Ostpazifischer Rücken) mit großer Expansionsrate und

konstanter Entwicklung sowie der „langsamen Rücken“ (Prototyp: Mittelatlantischer Rücken) mit langsam-diskontinuierlicher Entwicklung. Im letzten Kapitel wird von der Kinematik der Ozeanböden her der Pangäa-Zyklus (Aufbrechen und Zusammenführen von Kontinentalmassen) in der Sicht der neuen Erkenntnisse diskutiert, wobei die Ophiolithe der aktivsten (Früh-)Phase eines solchen Zyklus zuzuschreiben sind. Zahlreiche instruktive (meist farbige) Abbildungen sowie ein Glossar-Anhang erleichtern das Verständnis des Textes.

Das Bemühen um flüssige Darstellung und Verständlichkeit macht es dem nicht einschlägig vorgebildeten Leser allerdings zuweilen schwer, zwischen gesicherten Fakten und weiter zu diskutierenden Theorien bzw. Modellen zu unterscheiden. Autoren werden nur im Quellenverzeichnis der Abbildungen zitiert, ein darüber hinausgehendes Literaturverzeichnis fehlt. Der Text enthält vermeidbare Widersprüche, z. B. wenn die Gesamtlänge des Systems der ozeanischen Rücken im Geleitwort (S. IX) mit „fast 50 000 km“ angegeben wird, wenig später im Vorwort (S. XI) dann mit „etwa 75 000 km“, oder wenn das Auseinanderbrechen von Pangäa vor 150–200 Ma mal der Trias (S. 185), mal der Jura-Periode zugeordnet wird (S. 188). Desungeachtet handelt es sich um ein ideenreiches und anregendes Werk mit vorbildlicher Ausstattung. PETER HÖLLERMANN

ROTHE, PETER: Gesteine. Entstehung - Zerstörung - Umbildung. 162 S., zahlr. Abb., Tab. und Photos. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1994, DM 45,-

Das mit klaren Strichzeichnungen und einigen Farbtafeln ausgestattete Buch will kein Leitfaden der Gesteinsbestimmung sein. An diesen, zumeist populärwissenschaftlichen Büchern besteht auf dem Büchermarkt kein Mangel. Zwar ist auch das vorliegende Werk allgemeinverständlich für einen breiten Leserkreis mit einer gewissen geowissenschaftlichen Vorbildung gedacht, doch legt der Verfasser das Schwergewicht seiner Darstellung auf das Verständnis der Prozesse der Gesteinsbildung und -umbildung. Diesem Ziel entsprechend verzichtet der Autor auf die enzyklopädische Sammlung und Übersicht von Gesteinsnamen. So ersetzt das Werk keine Petrologiebücher, statt dessen werden - wissenschaftlich solide - Hintergrundinformationen gegeben, Zusammenhänge zwischen allgemeiner Geologie und Gesteinsausprägung hergestellt. Das mit ausführlichen Hinweisen auf die neuere Fachliteratur ausgestattete Werk vermag einerseits Interesse an einem eingehenderen Studium der Petrologie zu wecken, andererseits bietet es einen gelungenen Mittelweg zwischen spezialisiertem Fachlehrbuch und den üblichen stark verkürzten Überblicksdarstellungen der Gesteinskunde, wie sie in zahlreichen geowissenschaftlich und landschaftsökologisch ausgerichteten Studiengängen geboten werden. Daß bei einem solchen Vorhaben die genetische Sichtweise gegenüber anwendungsbezogenen Aspekten dominiert, versteht sich von selbst. Die wirtschaftliche oder die standortökologische Bedeutung von Gesteinen wird in diesem Buch nicht thematisiert. HARALD ZEPP

HARDENBICKER, ULRIKE: Hangrutschungen im Bonner Raum. Naturräumliche Einordnung und ihre anthropogenen Ursachen. 105 S., 54 Abb. und 5 Tab. Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde, Heft 64. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1994, DM 28,-

Im Übergangsbereich vom nördlichen Rheinischen Schiefergebirge zur Niederrheinischen Bucht werden die Bedeutung und das Ausmaß gravitativer Hangbewegungen im Hinblick auf die pleistozäne und holozäne Hangformung dokumentiert und diskutiert. Die Autorin betreibt damit neben der geomorphologischen Formenanalyse zugleich geomorphologische Prozeßforschung. Neben der Frage nach dem Alter der Hangrutschungen wird auch erörtert, inwieweit die rezenten, oft anthropogen ausgelösten Rutschungen an frühere, jungquartäre Bewegungen gebunden sind. - Die Studie stützt sich auf umfangreiche Archiv- und Geländearbeiten, die durch Laboranalysen ergänzt werden, und kommt zum Ergebnis, daß die im geologischen Untergrund ausgebildeten Rutschungen entweder durch anthropogen externe Faktoren (z. B. Hangunterscheidung) oder durch Niederschläge ausgelöst wurden (im Jahre 1926 mag auch ein Erdbeben mitgewirkt haben). Die letzten 150 Jahre werden archivalisch erfaßt; ältere Rutschungen im Holozän und Jungpleistozän können nur hypothetisch altersmäßig angesprochen und bezüglich der Ursachen erklärt werden. Die Dissertation zeigt, daß die Bedeutung der Rutschungen für die holozäne Hangformung im Bonner Raum bisher nicht recht gewürdigt wurde. KLAUS HEINE

BIERKENS, MARC F. P.: Complex confining layers. A stochastic analysis of hydraulic properties at various scales. 263 S., 102 Abb. und 30 Tab. Nederlandse Geografische Studies 184. KNAG/Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht, Utrecht 1994, Dfl 39.00

In weiten Teilen der Niederlande sind die tieferen Bodenstockwerke normalerweise durch komplex aufgebaute Grundwasserdeckschichten unterschiedlicher Durchlässigkeit abgedeckt. Ihre komplizierte räumliche Struktur, Erbe der spätpleistozänen und holozänen Flußgeschichte, stellt die dynamische Modellierung des Grundwassers wegen der extremen räumlichen Variabilität hydraulischer Eigenschaften vor große Probleme. BIERKENS widmet sich der Problematik der räumlichen Skalenübergänge von der Gewinnung hydraulischer Kennwerte im Labor bis zu Simulationen im regionalen Maßstab. Ein besonderer Reiz der Untersuchung liegt in der Verknüpfung „weicher“ sedimentologischer Bohrlochdaten (z. B. Korngrößen) mit „harten“ hydraulischen Parametern. Die Skalenübergänge, insbesondere das „up-scaling“, löst der Autor, indem er die geostatistische Theorie der regionalisierten Variablen und fortgeschrittene stochastische Ansätze der Hydrologie verknüpft. Er erläutert überzeugend, welche Fehler auftreten, wenn im Labor bestimmte Parameter nicht ohne Modifikationen in regionale Grundwassersimulationsmodelle übernommen werden. Die Arbeit leistet einen anspruchsvollen Beitrag zur aktuellen Regionalie-