

GEOFOKUS



Tsunami – eine unterschätzte Naturgefahr?

Dieter Kelletat, Anja Scheffers und Sander Scheffers *

26. Dezember 2004

Spätestens seit diesem Datum wissen die meisten Menschen, was Tsunami sind: große, oft zerstörerische Wellen, ausgelöst durch Erd- oder Seebeben bei Plattenverschiebungen. Der Begriff aus dem Japanischen (tsu=Hafen, nami=Welle, Singular und Plural gleich geschrieben) umfasst alle Tiefwasserwellen, also solche, die die gesamte Wassersäule anstoßen. Das können submarine Rutschungen sein, wie sie besonders häufig an übersteilen vulkanischen Inseln auftreten, wo sie – wie um Hawaii – Areale von einigen tausend km² und Weiten von über 100 km erreicht haben. Fels- und Eisstürze in der Lituya Bay Südalaskas lösten 1958 mit 520 m *run up* (= Wellenaufwurf) den höchsten bisher bekannten Tsunami aus. Kollaps von Vulkanen bei der Calderabildung ebenso wie Meteoriten- oder Kometeneinschläge in den Ozean können Tsunami verursachen. In den Katalogen über von Tsunami ausgelöste Naturkatastrophen steht bisher der Krakatauausbruch von 1883 in der Sundastraße am südlichen Ende Sumatras mit ca. 36.000 Opfern an erster Stelle, doch ist nicht bekannt, wie viele davon durch den Vulkanausbruch selbst ums Leben kamen. Damals drang während eines Ausbruches Meerwasser in die Vulkaninsel, was zu einer gewaltigen Explosion mit einer 35 m hohen Flutwelle führte. Der Sumatra-Andaman-Tsunami genannte Vorgang vom 26. Dezember 2004 hatte etwa die zehnfache Opferzahl und steht damit neben den großen Flutkatastrophen in China und Bangladesch nach der Zahl der Menschenleben an erster Stelle in den Listen historischer Schadensereignisse. Nimmt man jedoch die zerstörte Infrastruktur oder den Versicherungsschaden zum Maßstab, so rangiert der Sumatra-Andaman-Tsunami mit etwa 4 Mrd. € trotz seiner Fernwirkung bis nach Ostafrika weit hinter jedem der 4 starken Hurrikane des Jahres 2004 allein an den Küsten der USA.

Das liegt natürlich daran, dass mit Indonesien, Thailand, Sri Lanka, Indien, Myanmar, den Malediven, Seychellen oder Somalia Schwellen- und Entwicklungsländer betroffen sind, deren Infrastruktur entweder nicht den Geldwert von Industrieländern aufweist, oder – was hier mehr zählt – in denen solche Ereignisse gar nicht versichert oder versicherbar sind. Ein Indikator für die rein wirtschaftliche Bewertung dieses größten Tsunamischadens in der Menschheitsgeschichte sind die Aktienmärkte der anliegenden Länder: ihre Kurse haben allenfalls um einige Zehntel Punkte reagiert, manche sogar nach oben in der Erwartung eines wirtschaftlichen Anschubs durch die notwendigen Instandsetzungen.

Werfen wir einen kurzen Blick auf einige charakteristische Daten des Sumatra-Andaman-Tsunami: er wurde ausgelöst von einer Bewegung an der Grenze der Südostasiatischen Platte gegen die des Indischen Ozeans, welche auf einer Länge von fast 1.200 km erfolgte und mit 9,3 auf der Richterskala die zweitgrößte Energie nach dem Chilebeben von 1960 aufwies, die jemals gemessen wurde. Die ersten Messdaten über die Bewegungen selbst ergaben Werte bis 5,5 m vertikal und bis 11 m horizontal, beides jedoch auf großer Fläche, was einer Wasserverdrängung von vielen Kubikkilometern entspricht, die in Form einiger langer Wellen mit ca. 700 km/h (bei ca. 3.500–4.000 m Wassertiefe) über den Indischen Ozean rasten. Nach 20 Minuten war die Nordwestküste von Sumatra (Banda Aceh) erreicht, wo mit Abstand die größten Schäden auftraten und bei einer Überflutungshöhe der Küstenlinie bis ca. 15 m (Abb. 1 und 2) eine *inundation* (= landwärtige Reichweite der Wassermassen) von über 3 km verzeichnet wurde. Nach etwas mehr als einer Stunde wurde die Westküste von Thailand und die Andamanen und Nikobaren getroffen, nach rund 3 Stunden Sri Lanka, dann die indische Südküste und nach fast 8 Stunden schließ-



Abb. 1: Verletzungen an Bäumen erlauben eine gute Abschätzung der höhenwärtigen Reichweite starker Wasserbewegungen (Westküste von Phuket).

lich die ostafrikanische Küste, immer noch mit einer Höhe von rund 3 Metern. Zwar reichten die Flutwellen des Chile-Tsunami von 1960 und des Alaska-Tsunami von 1964 mit mehr als 10.000 km noch erheblich weiter, doch war ihre Zerstörungskraft und vor allem die Opferzahl in diesen Entfernungen viel geringer.

Wissenschaftler, die sich mit Tsunami befassen, und zwar nicht nur als Seismologen mit den Ursachen, als Ozeanographen mit der Wellenausbreitung oder als Physiker mit Modellen, sondern als Geologen, Sedimentologen und Geomorphologen mit den Auswirkungen auf die Küstenlandschaften selbst konnten davon ausgehen, dass ihnen dieser Mega-Tsunami nach dem Prinzip des Aktualismus eine Fülle von Informationen zum Erkennen und Verstehen von Paläo-Tsunami an die Hand geben würde.

Genau dieses ist aber nicht der Fall, denn der Sumatra-Andaman-Tsunami hatte offenbar Eigenschaften, die ihn von den meisten großen der Vergangenheit unterscheiden, und zwar gerade im Hinblick auf Spuren, die im *geological record* erkennbar bleiben. Das ergaben Feldarbeiten entlang von einigen 100 km Küstenlinie im Westen Thailands. Es kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass an anderen betroffenen Küsten die Verhältnisse anders liegen, doch halten wir das für unwahrscheinlich. Es wurde zweifellos eine gewaltige Wassermasse bewegt, aber entlang einer so ausgedehnten Plattengrenze, dass der Anstoß der Wellen offenbar nicht in einem Augenblick, sondern über viele Sekunden erfolgte. So blieb die Wellenhöhe und vor allem die Transport- und Zerstörungskraft an den Küsten deutlich



Abb. 2: Zerstörungen an Häusern und vor allem Dächern ermöglichen die Messung der Wellenhöhe, hier bei Khao Lak mit ca. +12 m über Hochwasserniveau.

hinter derjenigen vieler Paläo-Tsunami zurück (Abb. 3). Das hängt sicher vor allem mit der geringen Wassertiefe weit vor der Küste West-Thailands zusammen (80 m Tiefe oft erst 30 km vor der Küste), die die Geschwindigkeit des Tsunami auf unter 100 km/h abgebremst haben muss. Außerdem wurde Infrastruktur von meist geringer Stabilität getroffen. Die sichtbare Folge ist eine vergleichsweise kleine Menge verlagertes Sedimente, die meisten davon seewärts, relativ wenig Zerstörung an Korallenriffen (Abb. 4) und Küstenvegetation und geringer Blocktransport (Abb. 5 und 6). Auch der *run up* war mit maximal kaum über 12 m Höhe viel geringer als bei Dutzenden japanischer Tsunami in der Vergangenheit. Die Strömungsgeschwindigkeit über der Küstenlinie mit meist

unter 30 km/h, die die vielen Videodokumente belegen, war ebenfalls vergleichsweise mäßig.

Wie erkennt man Tsunami der Vergangenheit?

Ein erster Ansatz war die Erkenntnis von erdbebengefährdeten Regionen, die auch unter dem Ozean liegen können. Die Plattentektonik hat dazu quantitative Daten über die Bewegungsraten an Plattengrenzen geliefert, die Seismologie Werte der Energieentladung, und Pegelmessungen von Wasserstandsänderungen von anderem Charakter als Wellen, Gezeiten oder luftdruckbedingten Meeresspiegeln ergaben weitere Informationen. Heute geht man davon aus, dass Beben mit der Stärke 7 oder mehr, die in Küstennähe oder

unter dem Meer auftreten und deren Hypozentrum weniger als 20 km tief liegt, mit sehr großer Wahrscheinlichkeit (zu 70–80 %) einen Tsunami auslösen. Dessen Stärke und Wellenhöhe allerdings wird bestimmt von der bewegten Wassermasse und der Kürze des Stoßimpulses, während die Ausbreitungsgeschwindigkeit direkt abhängig ist von der jeweiligen Wassertiefe (bei 4.000 m z.B. 713 km/h, bei 2000 m Wassertiefe noch 504 km/h).

Eine besonders wichtige Quelle sind historische Dokumente, d.h. Berichte über ungewöhnliche und heftige Wellenereignisse an den Küsten der Erde. Daraus wurden Tsunami-Kataloge entwickelt. Diese enthalten vor allem Extremereignisse oder solche, die aus irgendeinem anderen

Grunde lange im Gedächtnis der Menschen blieben, und sie reichen in den verschiedenen Erdregionen unterschiedlich weit zurück. Im Mittelmeergebiet sind es um 4000 Jahre, in China und Japan über 2000 Jahre, in Amerika erst ca. 500 Jahre. Alle Kataloge zusammen enthalten mehr als 2.400 Tsunami innerhalb der letzten 4000 Jahre. Viele berichten über die Zerstörung von Hafenstädten oder Schiffen, aber nicht ein einziges Mal sind Naturveränderungen festgehalten. Es ist ohne weiteres möglich, dass diese Kataloge auch Ereignisse aufführen, bei denen es sich um andere als tsunamigene Erscheinungen gehandelt hat, oder sogar Fälschungen aus Gründen der Schönfärbung von geschichtlichen Vorgängen.



Abb. 3: Die Tsunamiwellen haben bei Bang Thao im Westen von Phuket die sandige Küstenlinie um ca. 20 m zurückgeschnitten und etwa 1 m Sand flächenhaft abgetragen. Dabei wurden zahlreiche Bäume entwurzelt.



Abb. 4: *An den mittleren Similan-Inseln NW Phuket sind lokal Zerstörungen und Übersandung von Korallenriffen bis in mindestens 10 m Tiefe zu erkennen.*

Versuche, aus diesen Katalogen die herausragendsten Ereignisse nach ihrer Stärke in Küstenformen oder -sedimenten nachzuweisen, sind bisher praktisch vollständig gescheitert. Das gilt auch für eine der größten Katastrophen der Menschheitsgeschichte wie den Kollaps des Santorinulkans vor über 3600 Jahren, bei dem angeblich die minoische Kultur ausgerottet wurde. Feldzeugnisse fehlen, und die heutigen Datierungen auf 1628 v. Chr. widersprechen den archäologischen Zeitskalen für den Untergang der minoischen Kultur. Auch fehlt uns bisher jeder Sediment- oder Formenbeleg für einen extremen Tsunami, wie ihn die plötzliche Heraushebung Westkretas um 9 m (und die Bewegung anderer Küstenregionen zum glei-

chen Zeitpunkt) am 21. Juli 365 n.Chr. ausgelöst haben muss. Das gleiche gilt für einen submarinen Vulkanausbruch großer Stärke nord-östlich Santorin im Jahre 1650.

Ein dritter, aber erst seit einigen Jahren betriebener Forschungsansatz zur Aufhellung der Geschichte der Paläo-Tsunami ist die Analyse, Kartierung und letztlich Datierung erklärungsbedürftiger Küstensedimente und Küstenformen, die offensichtlich nicht durch „normale“ Küstenprozesse entstanden sein können. Dabei ergaben sich überraschende Ergebnisse:

- Paläo-Tsunami von großer Stärke und Zerstörungskraft auch an Küstenabschnitten, die für ungefährdet gehalten wurden, eine große Häufigkeit extremer Tsunami,

- Tsunami bedeutender Stärke innerhalb historischer Zeit, die nicht in Katalogen auftauchen. Mittlerweile wird versucht zu klären, ob bisher für Küstendünen gehaltene Ablagerungen bis 150 m Höhe und 10 km Reichweite ins Landesinnere im Westen Australiens aufgrund ihrer merkwürdig schwingenden Form und des Inhaltes an größeren Fragmenten Folge holozäner Tsunami sind.

Ergebnisse der Paläotsunami-Forschung und ein neues Weltbild des Tsunami-Risikos

Tsunami sind offensichtlich keine echten *high magnitude-low frequency events* im geologischen Sinne. Dazu sind sie zu häufig und zu weit verbreitet, auch wenn das in unseren geologisch eher ruhigen Mittelbreiten bisher wenig wahrgenommen wurde. So wird in Japan mit Tsunami-*run ups* von 50 m etwa alle hundert Jahre gerechnet, und im 20. Jahrhundert gab es so bemerkenswerte Ereignisse wie das Erd- und Seebeben von Messina im Jahre 1908 mit ca. 60.000 Opfern, den Grand Banks Tsunami (aufgrund einer Rutschung vor Neufundland) von 1929, die Kamchatka- und Alaska-Tsunami von 1946 und 1964, letzterer mit Opfern bis nach Nordkalifornien und Hawaii, das Chilebeben von 1960 mit Opfern ebenfalls noch auf Hawaii, den Amorgos-Tsunami in der Ägäis von 1956, der auf der gegenüberliegenden Insel Astipalaia einen *run up* von 30,5 m erzeugte, den Mindoro-Tsunami auf den Philippinen 1992 oder denjenigen an der Nordküste von Neuguinea 1998, dem über 2.000 Menschen zum Opfer fielen.

Dieses alles aber waren Ereignisse, die beobachtet und gemessen wurden, also objektiv belegbar und aufgezeichnet sind.

Im Rahmen von Feldforschungen zu pleistozänen Niveauperänderungen des Meeresspiegels auf der Insel Zypern wurden im Jahre 1999 an vielen Stellen Blockmassen entdeckt, die aufgrund ihrer Größe und Lage weit außerhalb des Brandungssaumes nicht Stürmen zugeordnet werden können. Die größten Einzelblöcke errei-

chen mehr als 30 t, ihre Höhe über dem Meer +11 m auch an Kliffküsten, und Füllungen von Buchten mit einem Gemisch aus Sanden und groben Schottern können eine Breite von 500 m und eine Länge von über 1 km aufweisen mit einer Materialmenge von mind. 1 Mio t. Begleitet werden diese Ablagerungen im Westen Zyperns auf vielen Kilometern Länge von einer deutlichen Marke an Vegetation und Boden, die meist in +15 bis +16 m ü.M. verläuft. Bis hierher ist der Küstenstreifen nahezu vollständig entblößt, und dieser helle Saum ist auch aus großer Höhe beim Anflug auf die Insel deutlich erkennbar. In einem V-förmig geöffneten Taleingang erreichte die Tsunamiwelle +50 m und 800 m landwärtige Reichweite. In den Sedimenten wurden Holzkohle und Holz gefunden und mit der Radiokohlenstoffmethode datiert ebenso wie an Blöcken angeheftete Vermetidenschwarten aus dem Eulitoral. Die Daten weisen auf einen Zeitpunkt des Tsunami vor etwa 250–300 Jahren hin. An der Südküste der Türkei, bei der Ortschaft Mamutlar im Osten Alanyas, sind offenbar zur selben Zeit Beachrockplatten bis zu 20 t aufeinander gestürzt worden.

Etwas ältere Daten konnten auf Mallorca ermittelt werden, wo es Blockreihen und Blockwälle gibt, deren Verlagerung die 20- bis 50-fache Energie des 500-Jahre-Sturms vom Dezember 2001 erfordern. Als absolut bestimmte Alter ergaben sich 500 BP und 1400 BP.

Als die größte Tsunamikatastrophe Europas gilt das Lissabon-Ereignis von 1755, bei dem noch im Süden Portugals und Spaniens die Wellen 15 m hoch gewesen sein sollen. Am Kap Trafalgar an der südspanischen Atlantikküste wurden dabei Blöcke bis 100 t bewegt. Von den ca. 30.000 Toten werden etwa 1000 auf den Tsunami zurückgeführt. Jüngste Studien westlich Lissabon in der Region Cascais konnten zeigen, dass dort immer noch die deutliche Vegetationsgrenze in bis zu +50 m ü.M. zu sehen ist, dazu Blöcke bis gegen +15 m mit Gewichten von über 20 t. Absolute Datierungen an Muscheln und Schnecken ergaben, dass bereits 2400 BP und um 6000 BP ähnlich starke



Abb. 6: Ein Korallenblock von mehreren Tonnen Gewicht wurde bei Khao Lak mindestens 200 m landwärts und aus etwa 4–5 m Tiefe in den Gezeitenbereich transportiert.



Abb. 5: Bei Kalim Beach N Patong (Phuket) wurden Korallenfragmente bis zu mehreren 100 kg bis auf + 4 m über HW geworfen.

Tsunami stattgefunden haben. Inzwischen haben italienische Kollegen spätmittelalterliche Tsunami in Apulien ebenfalls anhand ungewöhnlich großer Blockverlagerungen nachgewiesen.

Die obere Grenze von Blockgewichten, die von Stürmen gegen die Schwerkraft auf größeren Distanzen bewegt werden können, liegt bei einigen Tonnen, weshalb Küsteningenieure z.B. Tetrapoden von 4 oder 6 t Gewicht zum Küstenschutz auch in stürmischen Erdregionen ver-

wenden. Viel schwerere dislozierte Einzelblöcke oder Blockstreifen und -wälle mit solchen Dimensionen, die zweifelsfrei aus dem Litoral stammen, deuten immer auf Tsunami-Bewegung hin, weil nur dabei die notwendige Höhe, Geschwindigkeit und Masse des Wassers erreicht wird. Zum Beweis der Herkunft aus dem Litoral dienen z.B. Korallen als Blöcke oder angeheftet an anderes Material, Bohrmuschellöcher, Seepocken- oder Wurmschneckenbesatz, Reste von Hohlkehlen, *algal rims* oder



Abb. 7: Verbreitung holozäner Tsunami

rock pools u.a.m. Ein dislozierter Block ist immer hinreichender Beweis für eine Mindestenergie der Welle, die ihn bewegt hat. Oft aber findet man daneben auch Feinsedimente (vornehmlich Sande), in denen gröbere Fragmente wie Korallenäste, Kies und Schotter oder gar Blöcke „schwimmen“ (sogenannte *floating boulders*). Eine solche chaotische Mischung ohne Materialsortierung, Schichtung oder andere Charakterzüge von Wasserbewegung spricht ebenfalls für Tsunami, solange Herkunft aus dem Hinterland durch Rutschungen, Hochfluten u.a. ausgeschlossen werden kann. Dieser Sedimenttyp wird wegen des Vorherrschens von Sanden allerdings oft als Küstendüne angesprochen und kartiert. Noch schwieriger ist das Erkennen der tsunamigenen Herkunft bei reinen Sandlagen, zumal wenn diese von geringer Mächtigkeit sind. Sie lassen sich nur schwer von Sturmflutsedimenten abgrenzen. Manchmal hilft der Inhalt von Foraminiferen, die aus tieferen Wasserschichten stammen als jene, die bei Sturmwellen aufgenommen werden können.

Hinsichtlich sedimentologischer und geomorphologischer Tsunamizeugnisse in der Küstenregion kann die Karibik im weiteren Sinne (d.h. einschließlich der Bahamas) als die am besten untersuchte Großregion der Erde gelten. Auf Aruba, Curaçao und Bonaire bilden Millionen von Tonnen grober Korallenrümmer kilometerlange Wälle und *ramparts* weit außerhalb des Einflussbereiches der stärksten Stürme. Das konnte im September 2004 am Beispiel des Hurrikans Ivan mit bis 12 m hohen Wellen im Brandungssaum nachgewiesen werden. Einzelblöcke erreichen um 200 t. Sie sind meist nicht gerollt, sondern aus dem Kliff gebrochen und bis zu 200 m weit im Wasserschwall ohne Bodenberührung bewegt und beim Auftreffen auf die Oberfläche teilweise in mehrere Stücke zerbrochen. Ähnliche Spuren wurden auf Barbados, St. Lucia, Guadeloupe, St. Martin, Anguilla oder einigen Bahama-Inseln gefunden, wobei die Blockmassen und Einzelgewichte auf letzteren am größten sind und mehr als 300 t (bei +15 bis +17 m) für das Holozän und um

2.000 t für ein pleistozänes Ereignis erreichen. Insgesamt liegen allein aus diesem Raum fast 100 Datierungen vor, weitere 95 sind in Arbeit. Alle diese Tsunami haben weitaus mehr und größere Blöcke höher transportiert als der Sumatra-Andaman-Tsunami von 2004, und zwar nicht nur lokal, sondern entlang von hunderten von Kilometern Küstenstrecke. Es wäre aber wohl falsch anzunehmen, dass sie auf Beben größerer Stärke (also mehr als 9 bis 9,3) zurückgehen müssen. Wahrscheinlicher ist, dass der Sumatra-Andaman-Tsunami eben nicht der Modellfall zur endgültigen Klärung von Tsunami-Sedimentation ist, sondern eher ein Sonderfall mit mäßiger Wellenwirkung trotz extremer Bebenstärke und Reichweite. Sicher spielt dabei auch die Bathymetrie vor den Küsten eine Rolle, die im Falle des Indischen Ozeans oft vergleichsweise einen weiten und flachen Anstieg zum Festland aufweist und damit einen deutlichen Bremseffekt ausübt. Auf keinen Fall darf der Fehler begangen werden, aus den Opferzahlen gegenwärtiger und ehemaliger Tsunami auf deren Wellenhöhe und -stärke oder die Bebenenergie zu schließen.

Eine Weltkarte der durch Feldbelege gesicherten Tsunami des Holozäns (Abb. 7) zeigt, wie gering bisher die Forschungsdichte ist. Dabei haben sich die Einträge auf dieser Karte in den letzten 5 Jahren bereits verdoppelt. Wir wissen aber, dass die allermeisten Feldbelege bisher übersehen oder als Sturm- oder Windwirkung fehlinterpretiert wurden, und es sicher noch hunderte von weiteren Spuren gibt. Aus dem Sumatra-Andaman-Tsunami von 2004 aber haben wir gelernt, dass selbst ein so extremes Ereignis nur äußerst wenige sedimentologische und geomorphologische Spuren hinterlassen kann. An der Westküste Thailands jedenfalls sind es nur lokal große Korallenblöcke, die bis in die Gezeitenzone aufgeworfen wurden, und wenige dünne Sandlagen, welche sicher den nächsten Monsunregen zum Opfer fallen. Die meisten Tsunami-Marken zu *run up*- und *inundation*-Werten liefern die stehengebliebenen Bäume durch die Rindenverletzungen so-

wie die zerstörten oder beschädigten Gebäude, nur nachgeordnet auch Zerstörungsgrenzen der niederen Vegetation. Alle diese Marken aber werden in wenigen Jahren vollständig verschwunden sein, und im *geological record* wird dieser Tsunami jedenfalls im Untersuchungsgebiet West-Thailand praktisch keine Spuren hinterlassen. Vielleicht ist das die Erklärung dafür, dass man diese Region bisher für wenig oder gar nicht von Tsunami betroffen hielt. Es handelt sich also nicht nur um eine Beobachtungslücke (weil hier bisher niemand nach Spuren von Paläo-Tsunami gesucht hat), sondern frühere holozäne Tsunami haben wahrscheinlich ebenso wenige dauerhafte Signaturen hinterlassen.

Nehmen wir die sich häufenden Feldbefunde auch in bisher für tsunamifrei gehaltenen Regionen (Mallorca, Bahamas) zusammen mit der Erkenntnis, dass auch große Tsunami nach kurzer Zeit spurlos sind, so ergibt sich die Erkenntnis, dass die Küsten der Erde weit mehr von diesem Naturprozess betroffen waren und sein werden, als wir bisher erahnt haben. Ebenso, wie Ted Bryant seine umfangreiche Zusammenschau zum Thema Tsunami bereits 2001 nannte, bestätigen wir ebenfalls aufgrund ausgedehnter eigener Feldarbeiten: Tsunami – the Underrated Hazard!

Weiterführende Literatur

- Bryant, E. (2001): Tsunami – The Underrated Hazard. - Cambridge University Press, 320 S.
 Scheffers, A. (2002): Paleotsunamis in the Caribbean: field evidences and datings from Aruba, Curaçao and Bonaire. - Essener Geographische Arbeiten, **33**, 186 S.
 Scheffers, A. & Kelletat, D. (2003): Sedimentologic and Geomorphologic Tsunami Imprints Worldwide – a Review. - Earth Science Reviews, **63** (1–2): 83–92.
 Whelan, F. & Kelletat, D. (2003): Submarine slides on volcanic islands – a source for megatsunamis in the Quaternary. – Progress in Physical Geography, **27** (2): 198–216.

* *Geographisches Institut, Universität Essen*
dieter.kelletat@uni-essen.de