

BARBARA-GESPRÄCHE

Payerbach 1997

Klastische Sedimente im Umkreis von Chicxulub (Yucatan,
Mexiko): Zur Altersstellung des Impakt-Events und anderer
Ereignisse an der Wende Kreide-Tertiär *

W. STINNESBECK



Payerbach,

* Manuskript eingelangt Jänner 1999

INHALT

Zusammenfassung/Abstract	111
1. Einführung	111
2. Nordost-Mexiko	113
3. Haiti	117
4. Guatemala und Süd-Mexiko	117
5. Kuba	119
6. Brasilien	122
7. Diskussion - Zum Alter der klastischen Ablagerungen	125
8. Ergebnisse	127
Danksagung	128
Literatur	128

Anschrift des Verfassers:

*Univ.Prof. Dr. Wolfgang STINNESBECK
Institut für Geologie
Universität Karlsruhe
Postfach 6980
D - 76128 Karlsruhe*

Klastische Sedimente im Umkreis von Chicxulub (Yucatan, Mexiko): Zur Altersstellung des Impakt-Events und anderer Ereignisse an der Wende Kreide-Tertiär

W. STINNESBECK

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Stratigraphie, der lithologischen Abfolge und den Ablagerungsbedingungen der vermeintlichen Impakt-Ejekta und Megatsunami Gesteine in Mexiko, Haiti, Guatemala, Kuba und Nordost-Brasilien. Die Untersuchungen belegen, daß diese Sedimente zu unterschiedlichen Zeiten innerhalb des oberen Maastricht und des unteren Dan zur Ablagerung kamen. Für den Kreide/Tertiär-Übergangsbereich wird daher ein Multi-Event-Szenario vorgeschlagen, in welchem die exakte stratigraphische Stellung des Asteroiden-Einschlagkraters bei Chicxulub, Yukatan, noch unklar ist.

Abstract

Siliclastic and limestone breccia deposits in Mexico, Guatemala, Cuba, Haiti and northeastern Brazil have variously been interpreted as proximal to distal impact ejecta and megatsunami deposits, generated by a bolide impact that struck Yukatan at Cretaceous-Tertiary (K/T) boundary time. The stratigraphy, lithology and depositional environment of these deposits are reviewed in order to evaluate the nature, origin and age of these deposits. The investigation shows that these deposits occur at different stratigraphic levels during the late Maastrichtian and early Danian. In consequence, a multi-event scenario across the K/T boundary is proposed in which the precise stratigraphic position of the Chicxulub crater in Yukatan is unclear.

1 Einführung

Die kreisförmige Chicxulub-Struktur im Untergrund von Yukatan (1) wird allgemein als Einschlagskrater eines Asteroiden von 10 km Durchmesser angesehen. Hierbei soll der Aufschlag exakt an der Kreide/Tertiär (K/T)-Grenze erfolgt sein und zum weltweiten Massensterben mariner und terrestrischer Faunen geführt haben.

Als prominenteste Opfer werden die Dinosaurier, marine Reptilien, Flugsaurier, Ammoniten, Belemniten sowie ein Großteil des kalkigen Nannoplanktons und der planktonischen Foraminiferen aufgeführt, obwohl Magnitude, Timing und Verlauf der Faunenkrise auch zwanzig Jahre nach der Erstveröffentlichung der K/T-Impakthypothese (ALVAREZ et al., 1980) intensiv diskutiert werden (MACLEOD et al., 1997; HUDSON, 1998).

Die Interpretation von Chicxulub als K/T-Impaktkrater begründet sich auf die Präsenz geschockter Quarze und Feldspate in Brekzien-Proben aus dem Untergrund von Yukatan (SHARPTON et al., 1992, 1996), ungewöhnlich hohen Iridium-Werten in einem Gesteinsfragment (SCHURAYTZ et al., 1994, 1996), welches zuvor als Andesit beschrieben wurde, Ähnlichkeiten in der chemischen Zusammensetzung zwischen Glas aus Chicxulub-Brekzien und „Tektit-ähnlichen“ Gläsern aus Haiti und Nordost-Mexiko sowie deren $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ -Alter von 65 Millionen (IZETT et al., 1990, 1991, IZETT, 1991; SIGURDSSON et al., 1991; BLUM & CHAMBERLAIN, 1992; SHARPTON et al., 1992, 1996; SWISHER et al., 1992; SMIT et al., 1992; KOEBERL, 1993; KOEBERL & SIGURDSSON, 1992; KOEBERL et al., 1994) und der Präsenz einer konzentrischen geophysikalischen Anomalie, welche mit Brekzien und Andesiten oder „melt

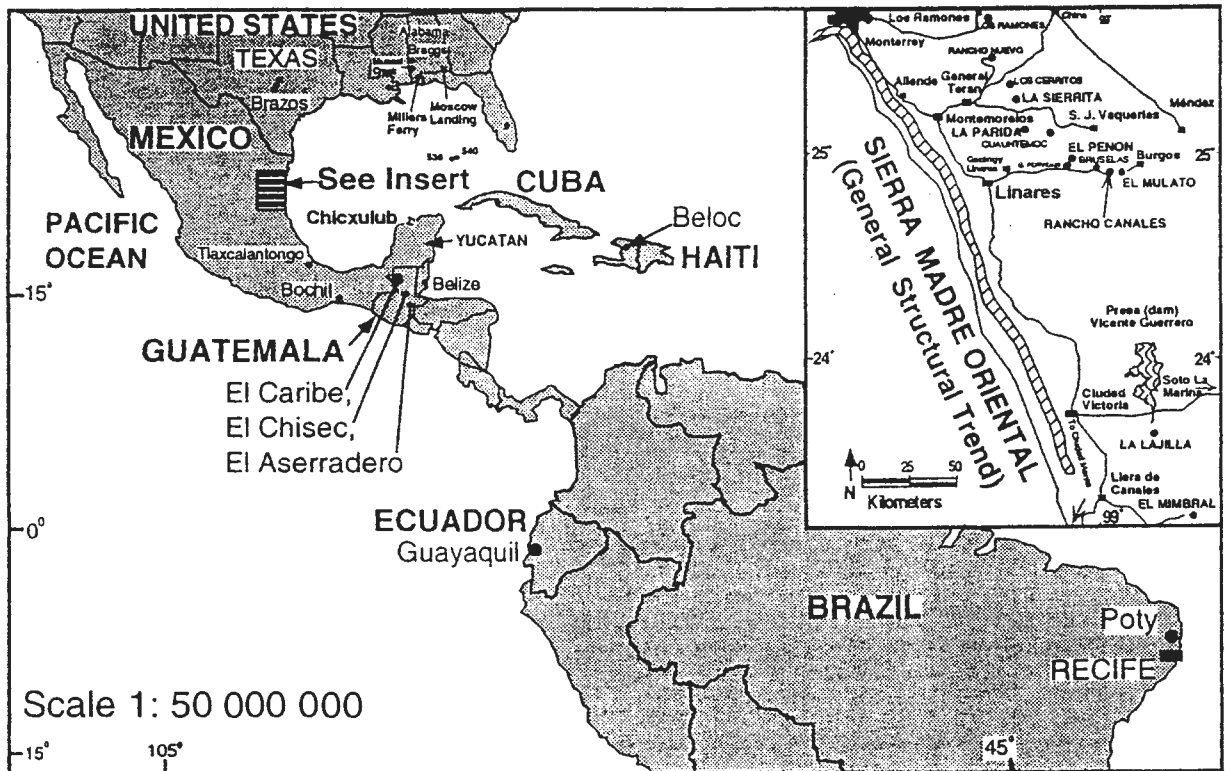


Abb. 1. Geographische Verteilung wichtiger Kreide/Tertiär-Grenzprofile mit klastischen Ablagerungen von Texas bis Brasilien. Die Profile in Nordost-Mexiko sind in der kleinen (eingelagerten) Karte aufgeführt.

rock“ assoziiert ist (POPE et al., 1991; HILDEBRAND et al., 1991, 1994, 1995; SHARPTON et al., 1992, 1996; PILKINGTON & HILDEBRAND, 1994; KRING, 1995; MORGAN et al., 1997).

Zusätzlich wurden im Umkreis von Yucatan ballistische Impakt-Ejekta und -Megatsunami-Sedimente beschrieben: komplexe Sandsteinpakete mit kalkigen und glasigen Kügelchen (Sphaerolithe) in New Jersey, Texas, Alabama, Haiti, im Golf von Mexiko und in Nordost-Mexiko, sowie Karbonat-Brekzien in Süd-Mexiko (Chiapas), Guatemala, Belize, Kuba und Nordost-Brasilien sollen ebenfalls ein K/T-Alter besitzen und innerhalb weniger Stunden bis Tagen vom Chicxulub-Impakt hervorgerufen worden sein (BOUGEOIS et al., 1988; IZETT, 1991; SIGURDSSON et al., 1991; SMIT et al., 1992, 1996;

ALVAREZ et al., 1992; BOHOR, 1996; MONTANARI et al., 1994; HILDEBRAND et al., 1993, 1994; OCAMPO et al., 1996; ALBERTÃO et al., 1994; ALBERTÃO & MARTINS, 1996; KOUTSOUKOS, 1998; HABIB et al., 1996; OLSSON et al., 1996, 1997; PECHEUX & MICHAUD, 1997; BRALOWER et al., 1998; FOURCADE et al., 1998; Abb. 1).

Das genaue Alter des Chicxulub-Events läßt sich bisher in Yucatan selbst nur schwer ermitteln: So wurde von LOPEZ RAMOS (1973, 1975) und WARD et al. (1995) darauf hingewiesen, daß in den Bohrungen Y6 und C1 der mexikanischen Erdölgesellschaft PEMEX die „Impakt“brekzien von Mergeln überlagert werden, welche eine Foraminiferenfauna des späten Maastricht enthalten (Abb.2). Wenn diese Interpretation der ursprünglichen

Bohrlochbeschreibungen und Elektrologs korrekt ist, so würde dies bedeuten, daß der Meteoriteneinschlag vor Ende der Kreidezeit erfolgte, also nicht an der K/T-Grenze selbst. In diesem Fall bestände keine direkte zeitliche Relation zwischen dem Einschlag und dem weltweiten Faunenschnitt, es sei denn, das Massensterben hätte bereits vor der K/T-Grenze begonnen. Zusätzlich scheinen in einigen Bohrungen (Y2, Y4, Y6) Horizonte nicht brekziierter Kalksteine und Anhydrite in die Brekzieneinheit eingeschaltet zu sein (WARD et al., 1995, URRUTIA et al., 1996; Abb. 2); in diesem Fall wären die Brekzien durch mehrere, zeitlich voneinander getrennte Events zur Ablagerung gekommen. Alternativ existiert allerdings auch die Möglichkeit, daß die Alterseinstufung der Mergel ins späte Maastricht fälschlich auf umgelagerten kretazischen Faunenelementen basierte und daß die aufgefundenen Anhydrite und Kalke lediglich größere Blöcke oder Gleitmassen innerhalb der Brekzie darstellen. Die bisher publizierten Bohrproben und -logs von PEMEX (WARD et al., 1995) gestatten hierzu keine eindeutigen Antworten. Diese werden erst von einer eingehenden biostratigraphischen Analyse der vollständig gekernten UNAM-Bohrungen und der für das Jahr 2000 beabsichtigten ICDP-Tiefbohrung erwartet.

In Ermangelung eindeutiger biostratigraphischer Kontrolle innerhalb und oberhalb der Chicxulub-Brekzie basiert das exakte Timing des Einschlags im allgemeinen auf den sog. Impakt-Ejekta und Megatsunami-Ablagerungen in der Umgebung von Yucatan. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Lithologie, dem Ablagerungsmilieu und der stratigraphischen Einstufung dieser Ablagerungen in Mexiko, Guatemala, Haiti, Kuba und Nordost-Brasilien (Abb. 1). Die vorliegende Analyse belegt, daß die klastischen Sedimente und Sphaerolithe zu unterschiedlichen Zeiten vom obersten Maastricht bis ins unterste Paläozän zur Ablagerung kamen. Diese Daten weisen auf ein Multievent-Szenario im K/T-Übergangsbereich hin, in welchem die genaue zeitliche Position des Chicxulub-Impakts und seine Beziehung zum globalen Massensterben ungeklärt sind.

2 Nordost-Mexiko

In Nordost- und Ost-Mexiko sind grobkörnige siliziklastische Ablagerungen in K/T-Profilen weit verbreitet und wurden bisher über eine Distanz von mehr als 600 km von Los Ramones bei Monterrey im Norden bis Tlaxcalantongo und Coxquihui bei Poza Rica im Süden erkannt (SMIT et al., 1992, 1996; STINNESBECK et al., 1993, 1996; KELLER et al., 1994a,b; 1997; BOHOR, 1996; Abb.1). Für die vorliegende Untersuchung wurden mehr als zwei Duzend dieser Profile analysiert, wobei die siliziklastischen Ablagerungen Mächtigkeiten von wenigen cm bis hin zu mehr als 11 m erreichten. Im allgemeinen bestehen sie aus einer komplexen Folge von Sandsteinen, Siltsteinen und dünnen Tonsteinen sowie an der Basis der Abfolge aus Schichten kalkiger Kügelchen (Sphaerolithe), die max. 5 mm Durchmesser erreichen und vermutlich ursprünglich einmal aus Glas bestanden (Abb. 3). Mit erosivem Kontakt überlagern die siliziklastischen Ablagerungen Mergel, welche aufgrund ihrer Gemeinschaften planktonischer Foraminiferen in die *Plummerita hantkeninoides* Zone (Zone CF1) des obersten Maastricht eingestuft werden und damit während der letzten 300-400 Tausend Jahre der Kreidezeit abgelagert wurden (Abb.3). Sie unterlagern dunkle Tonsteine und mergelige Siltsteine mit Faunen der *Parvularugoglobigerina eugubina* Zone (Zone P1a) des basalen Paläozän. In einigen Profilen (z.B. Lajilla, Peñon, Mulato) überlagert eine 5-10 cm dünne Mergellage mit planktonischer Foraminiferenfauna des obersten Maastricht (*Plummerita hantkeninoides*-Zone) das siliziklastische Sedimentpaket und trennt es zeitlich von der K/T-Grenze (Abb. 3). Diese befindet sich erst oberhalb der Mergelschicht und ist durch eine Iridium-Anomalie von 0.9 ng/g und das Massensterben der tropischen planktonischen Foraminiferen charakterisiert (LOPEZ-OLIVA & KELLER, 1996; KELLER et al., 1997). Einige Autoren (z.B. SMIT et al., 1996) interpretieren diese Mergelschicht als suspendiertes Trübematerial, das wenige Stunden oder Tage nach dem Impakt zur Ablagerung kam; dieser Einschätzung stehen aber fehlende Partikelgradierung und die Präsenz

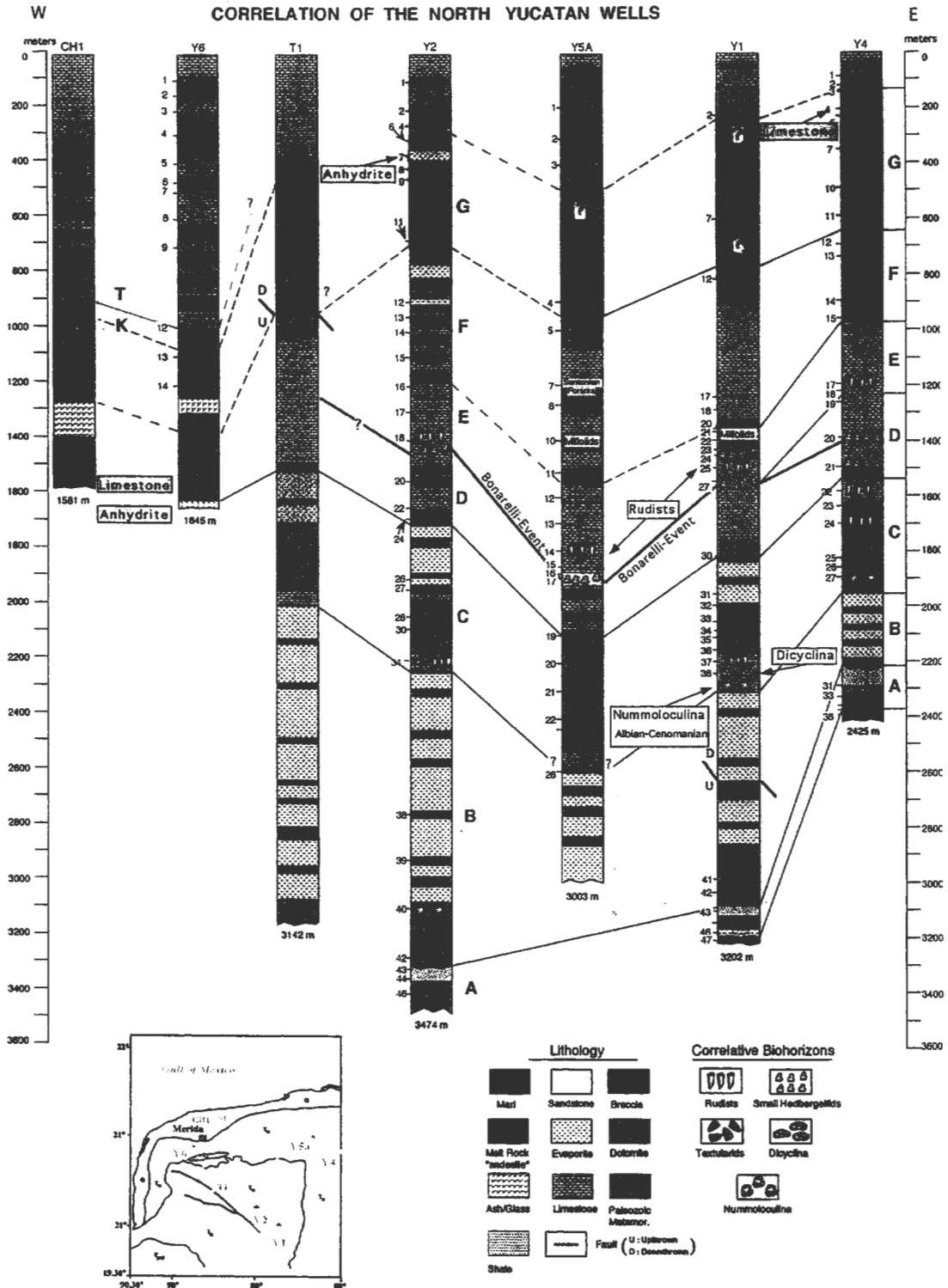
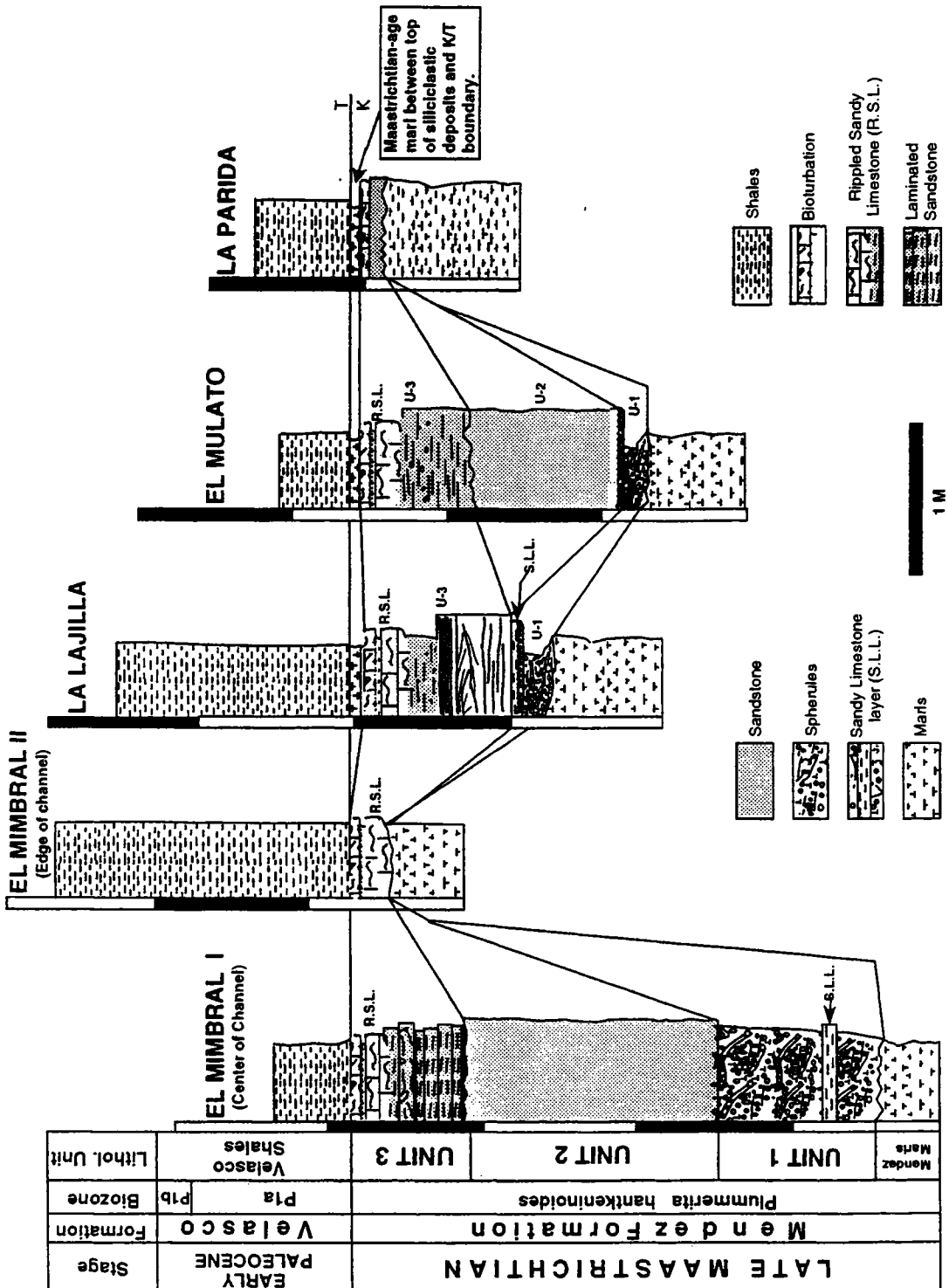


Abb. 2. Stratigraphische Korrelation der PEMEX-Bohrungen in Nord-Yucatan. Alle Bohrungen beginnen in einer Höhe von nur wenigen Metern über NN. Y-Bohrungen = Yucatan Nrn. 1, 2, 4, 5a und 6; C-Bohrung = Chicxulub Nr. 1; T-Bohrung = Ticul Nr. 1. Die Großeinheiten des Mesozoikums basieren auf lithologischen Wechsell, korrelierbaren Fossilzonen, und e-Log-Charakteristika. Ungefähre Alter der Einheiten: A - Jura bis frühe Kreide; B - Alb; C - Alb bis Cenoman; D - Cenoman - Turon; E - Turon; F - Coniac ? bis Maastricht; G - spätes Maastricht (aus Ward et al., 1995)

Abb. 3. Litho- und biostratigraphische Korrelierung von vier der vollständigsten K/T-Grenzprofile in Nordost-Mexiko. Beachten Sie, daß sich die drei Einheiten (U1, U2, U3) über 250 bis 300 km korrelieren lassen. In dreien der vier Profile überlagert eine Mergelschicht des obersten Maastricht die siliziklastischen Ablagerungen und deutet darauf hin, daß normale hemipelagische Sedimentation bereits vor der K/T-Grenze wieder einsetzte (aus Keller et al., 1997).



diverser Foraminiferen-Vergesellschaftungen entgegen (ADATTE et al., 1996). Die genannten Punkte sprechen dafür, daß nach der Ablagerung der siliziklastischen Sedimente für kurze Zeit (wenige tausend Jahre) normale hemipelagische Sedimentationsbedingungen in das Nordost-mexikanische Becken zurückkehrten, bevor es dann an der K/T-Grenze zum Massensterben bei den planktonischen Foraminiferen und zur Ir-Anreicherung kam.

Die siliziklastischen Sedimente werden allgemein in drei lithologisch und mineralogisch unterschiedliche Einheiten untergliedert (STINNESBECK et al., 1993, 1996; Abb. 3): Die basale Einheit I besteht aus den Sphaerolith-reichen Sedimenten und enthält darüberhinaus Glaukonit, Mergelklasten und seltene Glasfragmente. Sphaerolithen und Glas werden als Impakt- oder Tektitglas interpretiert und mit dem Chicxulub-Einschlag in Verbindung gebracht (SMIT et al., 1992, 1996, KOEBERL et al., 1994). Profile in der Umgegend von La Sierrita (Abb.4) belegen die Präsenz von zwei und mehr Sphaerolithschichten, welche in Mergeln des späten Maastricht (P. hantkeninoides Zone, CF1) eingeschaltet sind (SCHULTE, 1999; STINNESBECK et al., 1999; Abb. 4). Mit Ausnahme der untersten enthalten alle zusätzlichen Schichten vor allem Bruch-resistente Foraminiferen (Globotruncanen, Rugoglobigerinen) und weisen auf Umlagerung einer ursprünglichen Sphaerolithschicht hin, also nicht unbedingt auf mehrere Sphaerolith-produzierende Ereignisse. Mehr als 2 m Mergel der Zone CF1 lagern zwischen diesen Sphaerolithschichten und den Einheiten II und III der siliziklastischen Sequenz. Sie belegen das Vorhandensein lang andauernder Zeitintervalle mit normaler hemipelagischer Sedimentation zwischen den Events.

Einheit II ist ein homogener Feinsandstein mit paralleler Lamination. Vereinzelt werden auch unregelmäßige J-förmige Bauten angetroffen, welche mit Sphaerolithen gefüllt sind (EKDALE & STINNESBECK, 1998). Einheit III besteht aus einer Wechsellagerung von Feinsandsteinen, Siltsteinen und dünnen Tonsteinlagen und zeichnet sich durch diverse

Sedimentstrukturen (z.B. Rippel-, Flaser, kleinräumige Schrägschichtung) aus. Spurenfossil-Vergesellschaftungen sind ebenfalls häufig und divers (z.B. Freßbauten von Chondrites und Zoophycos, Wohnbauten und Fährten von Ophiomorpha und Planolites). Insgesamt belegt die Ichnofauna mehrere Kolonisierungsperioden während der Ablage

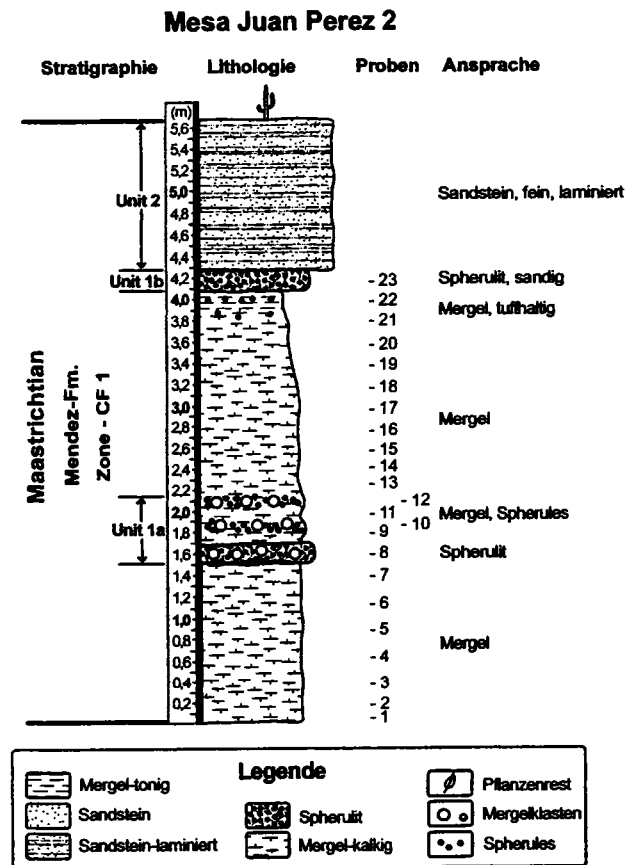


Abb. 4. Litho- und Biostratigraphie des Profils Juan Perez, 30 km nördlich von La Sierrita. Beachten Sie das Auftreten von Sphaerolithschichten innerhalb pelagischer Mergel der Foraminiferenzone CF1 des obersten Maastricht. Diese Mergelschichten belegen Zeiträume normaler Sedimentation, welche das Sphaerolith-produzierende Event stratigraphisch von umgelagerten Sphaerolithen und den überlagernden siliziklastischen Einheiten II und III trennen. Die gesamte Sedimentation fand während der letzten 300-400 Tausend Jahre des Maastricht statt (aus Schulte, 1999).

zung der Einheiten II und III und weist damit auf einen längeren Sedimentationszeitraum hin, welcher die von der Tsunami-Hypothese geforderten Stunden oder Tage bei weitem übertrifft (EKDALE & STINNESBECK, 1998)

3 Haiti

Die K/T-Grenze bei Beloc, Haiti, ist berühmt für das Auftreten von Sphaerolithablagerungen, in denen noch reichlich „Tektit“glas vorhanden ist (IZETT et al., 1990, 1991; IZETT, 1991; SIGURDSSON et al., 1991; MAURASSE & SEN, 1991; BLUM & CHAMBERLAIN, 1992; JEHANNO et al., 1992; LEROUX et al., 1995). Strittig allerdings ist auch hier die stratigraphische Position der Glas-führenden Schichten in Bezug auf die K/T-Grenze. So belegt nämlich die kürzliche Untersuchung von sechs expandierten Profilen in der Umgebung von Beloc, daß die K/T-Grenze an der Erosionsdiskordanz zwischen mergeligen Kalken der Zone CF1 (P. hantkeninoides Zone) und überliegenden Sphaerolithablagerungen liegt (STINNESBECK et al. 1999, in Vorber.; Abb. 5). Letztere enthalten Vergesellschaftungen winziger (38-63 μ) planktonischer Foraminiferen der Zone P1a (P. eugubina Zone) des frühen Paläozän. Die Foraminiferenzone P0 des frühesten Dan und die K/T-Grenzschiicht selbst fehlen also in Beloc.

Die Aufeinanderfolge der tertiären Foraminiferenarten in den Sphaerolithablagerungen und überlagernden pelagischen Kalken entspricht der weltweit beobachteten evolutiven Aufeinanderfolge und weist somit darauf hin, daß es sich nicht um von oben eingewaschene Faunen handelt, sondern um in situ-Vergesellschaftungen der Zone P1a (Abb.5). Die Sphaerolithablagerungen dagegen scheinen in mehreren Events abgelagert worden zu sein.

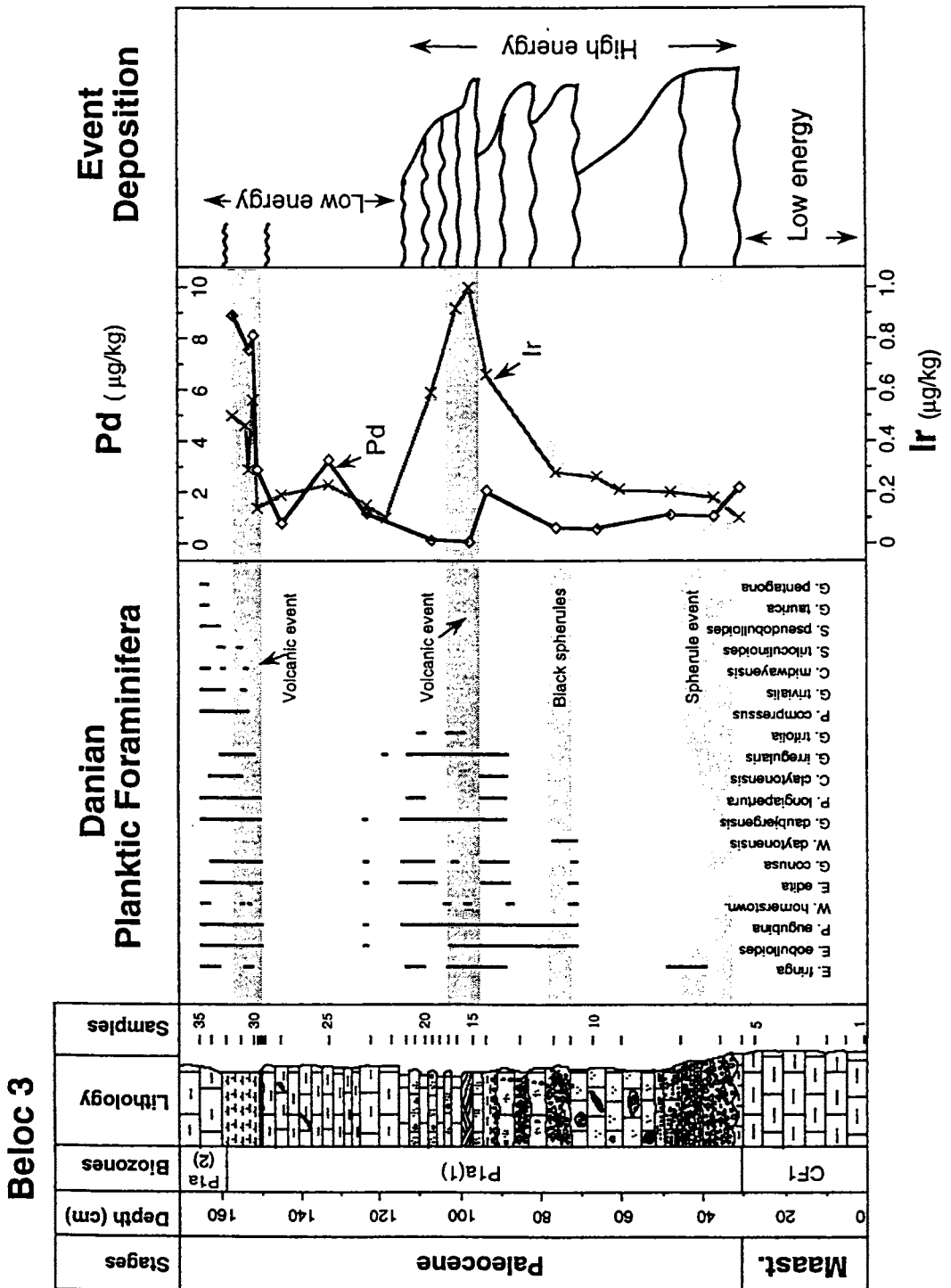
Für diese Interpretation sprechen Lagen mit unterschiedlicher diagenetischer Alteration der Sphaerolithe, Wechsel der Lithologie (z.B. Wechsellagerung von Sphaerolithlagen und bioklastischen Kalken), erosive Kontakte an den lithologischen Kontakten und die

Größengradierung von Bioklasten und Kügelchen. Ir ist in der Sphaerolithereinheit nur wenig angereichert, zeigt aber eine Anomalie von 1,0 ng/g am Top der Einheit bis in die darüberlagernden pelagischen Kalke (STÜBEN et al., 1999; STINNESBECK et al., in Vorber; Abb. 5). Es ist derzeit noch unklar, ob diese Anomalie aus der mechanischen Umlagerung einer Anomalie resultiert, die sich ursprünglich an der K/T-Grenze befunden hat und die in Beloc erodiert wurde, oder aber ob sie von einem Impaktereignis im frühen Paläozän (Zone P1a) stammt. Die zweite Möglichkeit scheint jedoch wahrscheinlicher, weil Sphaerolithablagerungen und Ir-Anomalie durch dünne Lagen pelagischer Kalksteine getrennt sind. Diese enthalten fröhertertiäre Foraminiferen der Zone P1a und Stress-resistente kalkige Dinoflagellaten (z.B. Thoracosphaera) und wurden sicher nicht umgelagert. Eine zweite Anomalie von PGEs (Platingruppen-Elementen) weiter oben im Profil wird von Pd dominiert und geht wahrscheinlich auf einen magmatischen Ursprung zurück (STÜBEN et al., 1999).

4 Guatemala und Süd-Mexiko

Im südlichen Petén-Becken von Guatemala treten in Profilen des K/T-Übergangs von der Grenze mit Mexiko im Westen bis hin nach Süd-Belize im Osten Karbonatbrekzien bzw. -konglomerate auf (HILDEBRAND et al., 1993; STINNESBECK et al., 1997; FOURCADE et al., 1998). In den Profilen von El Caribe, Aserradero, Chisec und Actela erreicht die Brekzieneinheit bis zu 35 m Mächtigkeit und überlagert Rudisten-führende Flachwasserkalke der späten Kreidezeit (Campan-Maastricht; Abb. 6). Rhythmisch geschichtete Kalke, Mergel und Siltsteine der Zone P1a (P. eugubina Zone) des frühen Dan überlagern die Brekzie. Sie wurden unter Wassertiefen des mittleren und äußeren Neritikum abgelagert. Die Klasten der Brekzie bestehen aus Flachwasserkalken mit reichlich Rudisten und benthonischen Großforaminiferen. Sie bilden Lagen, welche unterschiedliche Färbungen aufweisen. Die Größe der Klasten nimmt nach oben hin ab, wobei zuerst feinkörnige Kalzi-

Abb. 5. Der Kreide-Tertiär-Übergang im Profil Beloc III, Haiti. Lithologische Abfolge, stratigraphische Verteilung wichtiger planktonischer Foraminiferen, Iridium- und Palladium-Verteilung sowie Interpretation der Ablagerungsenergie. Beachten Sie das Auftreten von zwei PGE-Anomalien innerhalb der Zone P1a des basalen Dan (Zone P1a) (aus Stinnesbeck et al., in Vorber.).



rudite und zuoberst Grainstones zur Ablagerung kamen. Hierbei nimmt zum Hangenden der Rundungsgrad der Klasten von Kantenrundung bis hin zu guter Rundung allgemein zu. Die Ablagerung der Brekzien erfolgte vermutlich während des Maastricht, obwohl die obersten 10 cm der Einheit bei Chisec bereits seltene Exemplare von *P. eugubina* aufweisen und damit ins basale Tertiär datiert werden (STINNESBECK et al., 1997). *P. eugubina* wurde von FOURCADE et al. (1998) auch in den obersten Grainstone-Schichten der Brekzien von El Caribe und Actela identifiziert, in Sedimenten, welche in Caribe außerdem diagenetisch alterierte Glas-Sphaerolithe enthalten (Abb. 6). Diese Sphaerolithe befinden sich damit in einer ähnlichen stratigraphischen Position wie die Sphaerolithe von Beloc, Haiti, und Mimbral, Mexiko, und gehen vermutlich auf dasselbe Event zurück. Es gibt aber bisher keinerlei Hinweise dafür, daß die gesamte Brekzie durch dieses Ereignis verursacht worden wäre, denn Glas wurde bisher nur am Top der Einheit aufgefunden. Auch fehlen in der Brekzie Gesteine des tieferen Untergrundes oder andere exotische Lithologien, und die Klasten sind weder mechanisch fragmentiert noch alteriert. Es ist daher wahrscheinlich, daß die Brekzie in mehreren Ereignissen über einen längeren Zeitraum abgelagert wurde. Hierfür sprechen auch alternierende Lagen mit unterschiedlicher Größe und Rundungsgrad der Klasten, Feinlagerung sowie Farbwechsel der Schichten in den obersten Metern der Einheit (STINNESBECK et al., 1997). In anderen Profilen in Guatemala und Süd-Mexiko (z.B. Chemal, Lanquin, Bochil; Abb.1) sind Karbonatbrekzien in einem siliziklastischen Flysch der oberen Kreide und des Alttertiärs (? Campan, Maastricht bis Eozän) enthalten (STINNESBECK et al., 1994, 1997). Die Brekzien wurden vermutlich als Debris Flows abgelagert und befinden sich in unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus innerhalb der Sedimentfolge (bsw. sind bei Lanquin 3 bis 4 Brekzienlagen in Schichten des frühen Ober-Maastricht enthalten). In Chemal und Bochil wurde darüberhinaus eine Brekzienschicht nahe der K/T-Grenze festgestellt

(STINNESBECK et al., 1994, 1997, MONTANARI et al., 1994; SMIT et al., 1996; CLAEYS et al., 1998). In Chemal wird diese Brekzienlage von Flysch-Sedimenten der Zone P1a (*P. eugubina*) überlagert (Abb. 6), in Bochil sind es Mergel und Siltsteine der Zonen P1c bzw. P3 (Abb. 7). Die Iridium-Anomalie, die von Montanari et al (1994) und Claeys et al. (1998) 1 m oberhalb der Brekzie von Bochil beschrieben wurde, befindet sich danach in Sedimenten des unteren Paläozän und steht nicht mit den Ereignissen an der K/T-Grenze in Zusammenhang.

5 Kuba

Die K/T-Profile in West- und Zentral-Kuba enthalten Karbonatbrekzien von bis zu 300 m Mächtigkeit (PSZCOLKOWSKI, 1986, PSZCOLKOWSKI et al., 1987; ITURRALDE, 1992; TAKAYAMA et al., 1999; KIYOKAWA et al., 1999). Die von uns untersuchten Profile von Rio Santiago, Cinco Pesos, Peñalver und Santa Clara ähneln einander bezüglich der Lithologien und der Ablagerungsfolge (Abb. 8). Allgemein nimmt die Größe der Klasten nach oben ab, wobei zunächst feinkörnige Kalzirudite und im Anschluß Grainstones abgelagert wurden. Letztere zeigen eine leichte Stratifikation und Laminierung. Die beobachtete Korngrößen-Gradierung des Sedimentpaketes, dessen massiver, weitgehend unstratifizierter Aspekt und das generelle Fehlen von Diskonformitäten, kleinräumigen lithologischen Wechseln bzw. von Wechseln der Klastengröße oder Rundung machen es wahrscheinlich, daß die Ablagerung der Brekzien in einem einzigen sedimentologischen Zyklus erfolgte. Bei Peñalver und Cinco Pesos enthält die Sedimentmatrix der feinkörnigeren Kalzirudite und Grainstones gut erhaltene planktonische Foraminiferen, wohingegen die Klasten selbst benthonische Großforaminiferen und Flachwasser-Invertebraten enthalten. Dies weist auf einen Sediment-Transport vom flachen ins tiefere Wasser hin. Die aufgefundenen planktonischen Foraminiferen besitzen ein frühes Ober-Maastricht-Alter (~ 68-70 Ma.), wohingegen Index taxa des obersten Maastricht

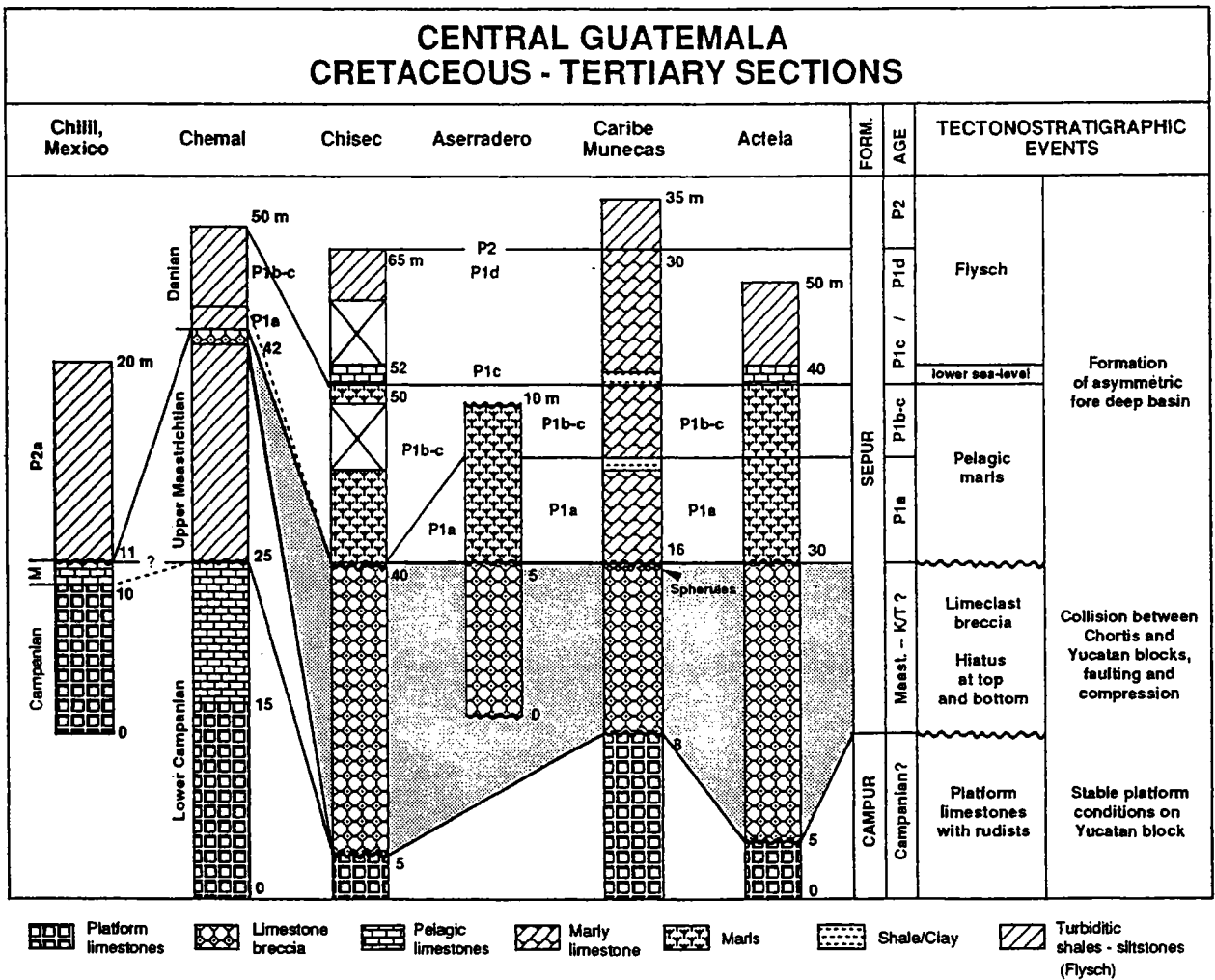


Abb. 6.: Litho- und biostratigraphische Korrelation von fünf K/T-Grenzprofilen aus Guatemala und des Chilil-Profiles in Süd-Mexiko (Chiapas). Alle sechs Profile zeigen den Übergangsbereich von Flachwasserkarbonaten (Campur Fm. in Guatemala, Angostura Fm. in S-Mexiko) hin zu pelagischen Mergeln und siliziklastischen Flyschablagerungen der Sepur Fm. (in Guatemala) und Soyatal Fm. (in Chiapas). Beachten Sie, daß vier der fünf guatemalteckischen Profile (alle außer Chimal) durch mächtige Einheiten von Karbonatbrekzien charakterisiert sind, welche die Campur Fm. diskordant über- und die Sepur Fm. unterlagern. In Chimal und Chilil werden die Flachwasserkalke von pelagischen Kalken des oberen Campan (calcarata- Zone; Chimal) bzw. des mittleren Maastricht (gansseri- Zone; Chilil) überlagert. Dies weist darauf hin, daß der Beginn der pelagischen Sedimentation diachron verlief und unabhängig von den Ereignissen an der K/T-Grenze erfolgte. Die Sphaerolithe am Top der Brekzieneinheit von Caribe wurden nahe der K/T-Grenze oder sogar im basalen Dan (Zone P1a) abgelagert (aus STINNESBECK et al., 1997).

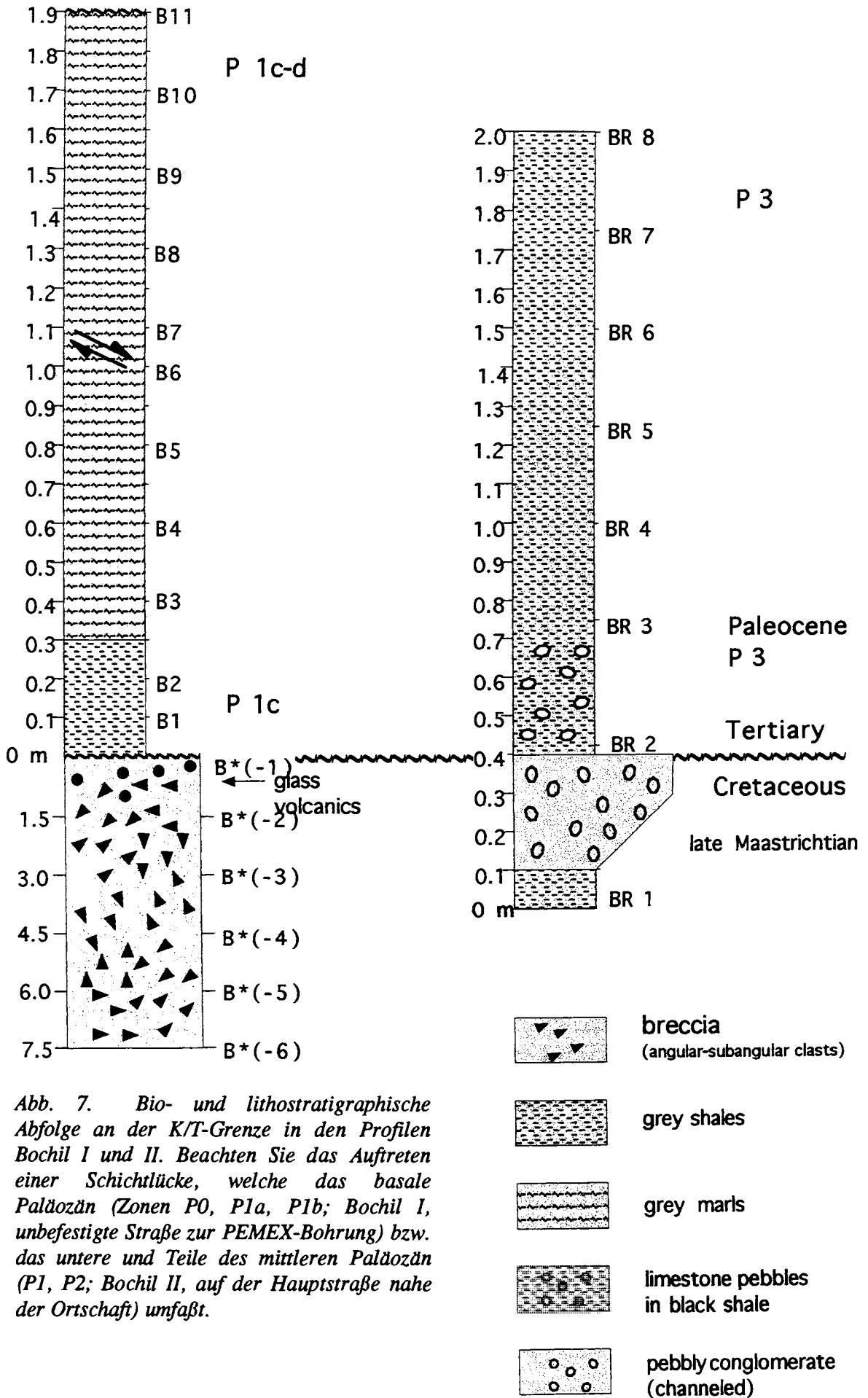


Abb. 7. Bio- und lithostratigraphische Abfolge an der K/T-Grenze in den Profilen Bochil I und II. Beachten Sie das Auftreten einer Schichtlücke, welche das basale Paläozän (Zonen P0, P1a, P1b; Bochil I, unbefestigte Straße zur PEMEX-Bohrung) bzw. das untere und Teile des mittleren Paläozän (P1, P2; Bochil II, auf der Hauptstraße nahe der Ortschaft) umfaßt.

(bsw. *Plummerita hantkeninoides*, *Racemigubelina fructicosa*, *Globotruncana contusa*) fehlen. Damit wären die kubanischen Brekzien um drei bis fünf Ma älter als die K/T-Grenze und ständen mit dem Chicxulub-Impakt in keinerlei Beziehung. Das Fehlen von Fossil-Vergesellschaftungen des obersten Maastricht könnte aber auch damit zusammenhängen, daß diese bei der Menge des umgelagerten Sedimentmaterials zu selten sind und daß zu viele ältere Spezies umgelagert wurden. So wurde kürzlich von Takayama et al. (1999) in einem Intraklasten von Peñalver eine einzelne *Micula prinsii* identifiziert. Sollte sich diese Bestimmung bestätigen, dann fiel die Ablagerung der Brekzie von Peñalver in die letzten 400-500 Tausend Jahre des Maastricht und ein kausaler Zusammenhang mit dem Chicxulub-Impakt wäre möglich.

In der Brekzie des Profiles Santa Clara wurden bisher keinerlei planktonische Foraminiferen festgestellt und die genaue stratigraphische Einstufung bleibt damit unklar (Abb. 8). Eine Erosionsdiskordanz charakterisiert den lithologischen Kontakt zwischen Brekzie und überlagernden Mergeln. Letztere enthalten Faunen der Zone P1c des unteren Dan (Abb. 8).

Frühtertiäre Alter ergaben sich auch bei der Analyse eines vermeintlichen K/T-Profiles in Ost-Kuba (FERNÁNDEZ et al., 1991). Die Flyschsequenz von Alcarraza enthält neben umgelagerten Faunen der obersten Kreide autochthone Vergesellschaftungen des mittleren Paläozän (Zonen P2-3).

6 Brasilien

Der Poty-Steinbruch nördlich von Recife in Nordost-Brasilien enthält einen nahezu vollständigen K/T-Übergang (Stinnesbeck, 1989; Stinnesbeck & Keller, 1996; Albertao et al., 1994; Albertao & Martins, 1996; Koutsoukos, 1998). Maastricht und Paläozän werden durch fossilreiche Mergelkalke repräsentiert. Die Sedimente des Maastricht enthalten in den obersten Metern planktonische Foraminiferen-Vergesellschaftungen der P. *hantkeninoides* Zone (CF1) des obersten Maastricht (Abb. 9). In diesem Teil des Profiles sind Seeigel (*Hemiaster*) und Anneliden (*Hamulus*) häufig und indizieren normal marine Schelf-

Bedingungen. Die Seltenheit von *Globotruncana* und anderer tief schwebender planktonischer Foraminiferen deutet auf relativ geringe Wassertiefen von höchstens 150 m hin (mittleres Neritikum). Ungefähr 70 cm unterhalb der K/T-Grenze ist der Mergelkalk erosiv gekappt und wird von einer Schicht brekziierter Mergel und Kalksteine überlagert (Abb. 9). Diese Brekzieneinheit enthält Knochen, phosphatische Aggregate und phosphatisierte Foraminiferen, Glaukonit und kleine Pyritkonkretionen, und weist auf Erosion und Umlagerung aus dem Flachwasser hin. Vermutlich geht die Einheit auf den Meeresspiegel-Tiefstand im obersten Maastricht zurück (KELLER & STINNESBECK, 1996a, b); dieser senkte in der Region die Wassertiefen um 50 bis 70 m vom mittleren Neritikum auf Tiefen des inneren Neritikum ab (STINNESBECK & KELLER, 1996). Nach oben nimmt die Größe der Klasten ab. Die Makrofauna dieser Schichten besteht aus Serpuliden, gelegentlichen Austern, Vertretern der pteriiden Muscheln und Schnecken, wohingegen Seeigel fehlen. Die genannten Faunen-Vergesellschaftungen und die Häufigkeit von benthonischen Foraminiferen des inneren bis mittleren Neritikum weisen damit ebenfalls auf reduzierte Wassertiefen und flache Innerschelf-Bedingungen hin, wobei die Salinität womöglich leicht herabgesetzt war. Die obersten 10 cm der kreidezeitlichen Sedimente sind wiederum durch mergelige Kalksteine repräsentiert, obwohl Phosphat und Glaukonitpartikel auch hier noch häufig auftreten. Benthische Foraminiferen dieser Schicht indizieren wieder Wassertiefen des mittleren Neritikum, und auch die planktonischen Foraminiferen werden wieder durch biserialen Formen und *Rugoglobigeriniden* repräsentiert, ähnlich wie unterhalb der Brekzienschicht. Diese faunistischen Veränderungen weisen auf tieferes Wasser und ansteigenden Meeresspiegel hin, wobei die Transgression bis ins unterste Tertiär hinein andauerte. Eine Ir-Anomalie von 0.69 ppb charakterisiert die K/T-Grenze (Albertao et al., 1994; Albertao & Martins, 1996). Oberhalb des Ir-führenden Horizontes

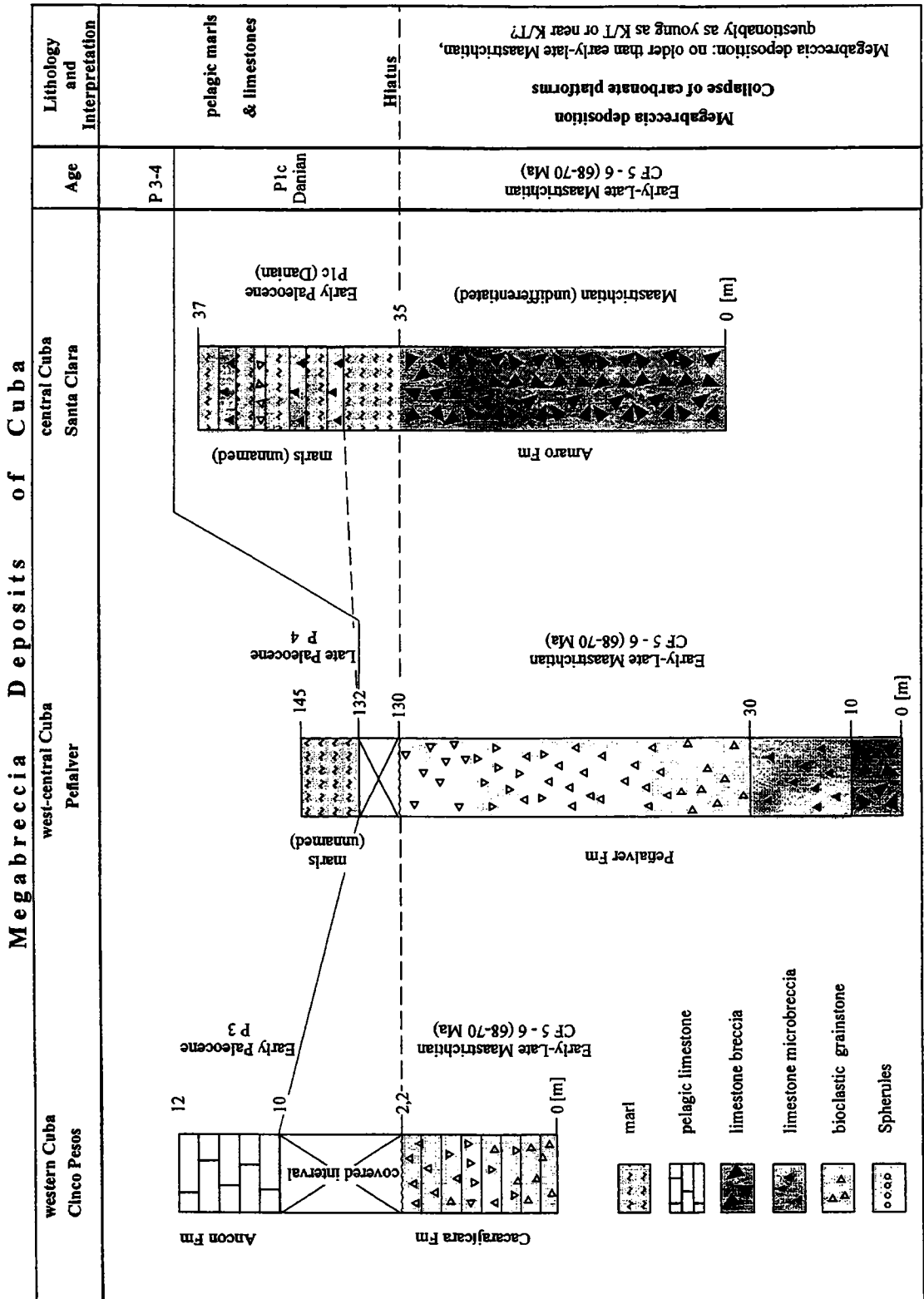


Abb. 8. Litho- und biostratigraphische Korrelierung von drei K/T-Grenzprofilen aus Kuba. Alle drei Profile enthalten dicke Kalksteinbreccien des frühen Ober-Maastricht und sind von pelagischen Kalken und Mergeln des frühen Dan (P1c; Santa Clara) bzw. des mittleren Paläozän (Cinco Pesos, Peñalver) überlagert.

befindet sich eine 5 cm mächtige Schicht aus mergeligem Kalkstein mit Foraminiferen der Zone P1a des frühen Dan, unter ihnen *E. fringa* und *P. eugubina* (STINNESBECK & KELLER, 1996).

Die gewonnenen Daten weisen auf einen scharfen Abfall des Meeresspiegels zur Zeit des obersten Maastricht hin. Die anschließende Transgression beginnt vor der K/T-Grenze und reicht bis ins frühe Dan. In dieser Interpretation ist die Karbonatbrekzie mit dem frühen Stadium der Transgression assoziiert und die Ir-Anomalie mit der K/T-Grenze (KELLER & STINNESBECK, 1996 a, b; STINNESBECK & KELLER, 1996). ALBERTAO et al. (1994), ALBERTAO & MARTINS (1996) und KOUTSOUKOS, 1998

haben demgegenüber die Karbonatbrekzie von Poty als Tsunami-Ablagerungen des Chicxulub-Impaktes interpretiert. Die Ir-Anomalie soll von einem zweiten, bisher unbekanntem Impakt im frühen Dan herrühren. Die genannten Autoren verweisen auf die vereinzelte Präsenz von *P. eugubina* in dem 10 cm mächtigen Mergelkalk unterhalb der Ir-Anomalie und im Liegenden bis hinab zum Brekzienhorizont; entsprechend messen sie diesen Schichten ein fröhertäres P1a-Alter zu. Sollte sich diese Einstufung als korrekt erweisen und auch eine Umlagerung der vereinzelten Exemplare von *P. eugubina* auszuschließen sein, dann wäre die Ir-Anomalie unabhängig von den Ereignissen an der K/T-Grenze und das Resultat eines tertiären Events.

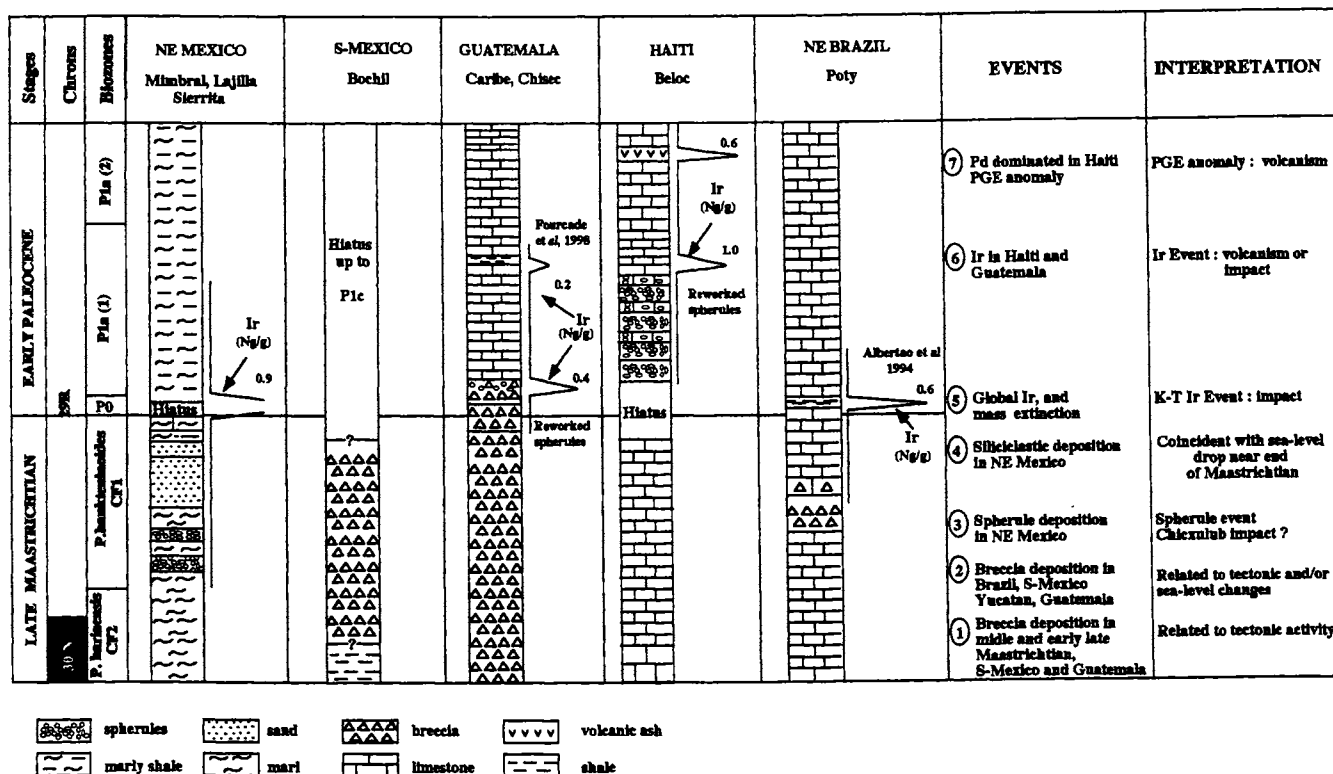


Abb. 9. Der Kreide-Tertiär-Übergang im Steinbruch Poty in Nordost-Brasilien. Von links nach rechts: Biostratigraphische Einstufung, charakteristische Lithologien, wichtige Foraminiferen und Invertebraten, Iridium-Verteilung und Interpretation bezüglich der Meeresspiegel-Schwankungen. Lithologische Unterteilung A bis J und Ir-Daten nach Albertao et al. (1994). Beachten Sie, daß der Meeresspiegel-Tiefstand in Zone CF1 des Ober-Maastricht mit der Brekzienbildung korrelierbar ist (aus Stinnesbeck & Keller, 1996).

7 Diskussion - Zum Alter der klastischen Ablagerungen

Gehen die klastischen Sedimente in der Umgebung des Golf von Mexiko und in der Karibik auf ein einziges, kurzeitiges Event an der K/T-Grenze zurück, und ist dieses Event der Chicxulub-Impakt? Die derzeitigen Daten sprechen gegen ein solches einfaches Szenario. In den Profilen in der Umgebung von La Sierrita in Nordost-Mexiko lagern die Sphaerolithschichten unterhalb der siliziklastischen Ablagerungen der Einheiten II und III und sind von ihnen durch mehrere m pelagischer Mergel getrennt (SCHULTE, 1999; STINNESBECK et al., 1999; Abb. 4). Damit sind sie deutlich älter als die Sand- und Siltstein-Ablagerungen. Diese (Einheiten II und

III) enthalten mehrere bioturbirte Horizonte und wurden über einen längeren Zeitraum abgelagert (EKDALE & STINNESBECK, 1998). Sie können also nicht auf einen Megatsunami zurückgehen, wie dies wiederholt postuliert wurde. Die K/T-Grenze in Nordost-Mexiko ist durch die Iridium-Anomalie und das Aussterben tropischer planktonischer Foraminiferen gekennzeichnet und befindet sich oberhalb der siliziklastischen Sedimente und oberhalb der über diesen lagernden dünnen Mergellage des obersten Maastricht (KELLER et al., 1997). Daraus ergibt sich, daß Sphaerolithe und siliziklastische Sedimente älter als das K/T-Event sein müssen.

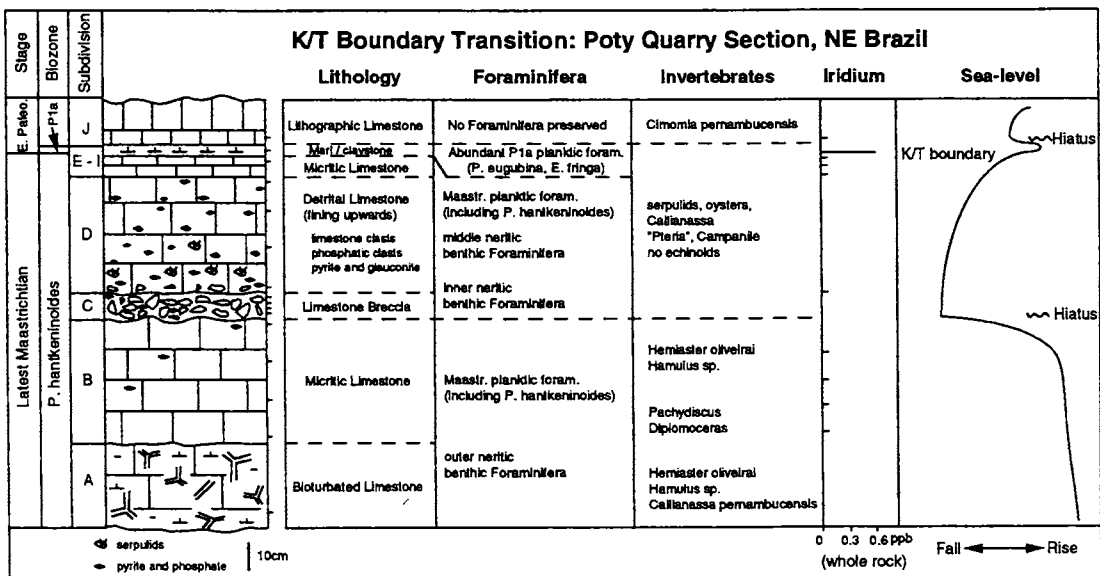


Abb. 10. Bio- und lithostratigraphische Abfolge an der K/T-Grenze in Profilen aus Nordost-Mexiko (Daten von Mimbral, Lajilla und La Sierrita wurden kombiniert), Bochil in Süd-Mexiko, Caribe und Chisec in Guatemala, Beloc in Haiti und Poty in Nordost-Brasilien. Es existieren Hinweise auf wichtige Ereignisse im frühen Ober-Maastricht (Brekzien in Kuba, S-Mexiko, Guatemala), im obersten Maastricht (z.B. Sphaerolithe in Nordost-Mexiko, klastische Ablagerungen in Nordost-Mexiko, Brekzienbildung in Brasilien), an der K/T-Grenze (Ir in Nordost-Mexiko und Brasilien), in der mittleren Zone P1a des frühen Dan (z.B. Sphaerolith-Ablagerung/?Umlagerung und Ir in Beloc), und am Top der Zone P1a (Pd dominierte PGE-Anomalie magmatischen Ursprungs in Beloc).

Die Situation in Beloc, Haiti, unterscheidet sich von den mexikanischen K/T-Profilen durch die Präsenz von in situ Vergesellschaftungen frühtertiärer (P1a) Foraminiferen in den Sphaerolithschichten (STINNESBECK et al., in Vorber.; Abb. 5). Die Fauna belegt die Sedimentation dieser Schichten nach der K/T-Grenze, im frühen Dan (Zone P1a). Dies schließt aber eine Bildung der Sphaerolithe vor dem Dan nicht aus. Wie die Sphaerolithe in Mexiko könnten auch diejenigen von Beloc im Maastricht gebildet und später umgelagert worden sein. Die ähnliche Geochemie der mexikanischen und haitianischen Sphaerolithe unterstützt diese Interpretation (IZETT, 1991; SMIT et al., 1992, BLUM & CHAMBERLAIN, 1992; KOEBERL, 1994).

Eine Ir-Anomalie läßt sich dagegen nicht so leicht in frühtertiäre Sedimente umlagern wie Sphaerolithe, und die Ir-Anomalie oberhalb der Sphaeruliteinheit von Beloc könnte daher in situ gebildet worden sein. Ein Beleg für diese Interpretation ist die Präsenz von Thoracosphaera-reichen pelagischen Kalksteinen oberhalb der Sphaerolithschicht aber unterhalb der Ir-Anomalie (STINNESBECK et al., in Vorber.). Darüberhinaus haben JEHANNO et al. (1992) und LEROUX et al. (1995) darauf hingewiesen, daß die Ir-reichen Sedimente von Beloc auch an geschockten Mineralen und Ni-reichen Spinellen angereichert sind. Die Präsenz dieser Impakt-Anzeiger im Horizont der Ir-Anomalie könnte daher auf einen Impakt im frühen Dan zurückgehen, wobei dieses Event unabhängig und verschieden von den unterlagernden Sphaerolithen wäre. Eine weitere PGE (Platingruppen-Element)-Anomalie wurde weiter oben in der Profilsäule am Top der Zone P1a erkannt. Sie wird durch Pd dominiert und besitzt vermutlich einen magmatischen Ursprung (STÜBEN et al., 1999; STINNESBECK et al., in Vorber.).

In Poty in Nordost-Brasilien gibt es gute paläontologische Hinweise für eine Platzierung der K/T-Grenze im Horizont der Ir-Anomalie, ähnlich wie in vielen Profilen weltweit. Die Karbonatbrekzie 70 cm unterhalb der Anomalie wurde während der Zone CF1 (P. hantkeninoides Zone) gebildet (Abb. 9). Sie wurde

vermutlich über einen längeren Zeitraum abgelagert und fällt zeitlich mit dem Meeresspiegel-Tiefstand im obersten Maastricht zusammen; vermutlich geht die Brekzie auf diesen zurück. In der Analyse von STINNESBECK & KELLER (1996) wurden keine tertiären Faunenelemente unterhalb der Ir-Anomalie identifiziert. Es gab auch keine Hinweise auf Faunenvermischungen oder Fragmentierung von Exemplaren und damit keine Anzeichen für zwei Impaktereignisse, wie sie von ALBERTAO et al (1994), ALBERTAO & MARTINS (1996) und KOUTSOUKOS (1998) postuliert werden.

Die stratigraphische Auflösung in den Profilen in Guatemala, Süd-Mexiko und Kuba ist relativ grob und läßt eine exakte Datierung der Ereignisse im K/T-Übergang nur bedingt zu (Abb. 6, 7, 8). Die Ablagerung der guatemaltekischen Brekzien erfolgte über einen längeren Zeitraum und vermutlich während des Maastricht. Allerdings belegt die Präsenz von Faunenelementen der Zone P1a (P. eugubina Zone) in den obersten cm der Brekzie von Chisec (STINNESBECK et al, 1997) und vermutlich auch Caribe und Actela (FOURCADE et al., 1998), daß die Ablagerung (oder Umlagerung) der Brekzie bis ins frühe Dan hineinreichte. Die alterierten Glas-Sphaerolithe im Top der Brekzie von El Caribe können danach ins oberste Maastricht, an die K/T-Grenze oder ins frühe Dan gestellt und bezüglich ihrer stratigraphischen Stellung entweder mit den mexikanischen oder mit den haitianischen Sphaerolithen korreliert werden.

Die Flyschablagerungen von Bochil und Chemal enthalten ebenfalls Brekzien mit einem stratigraphischen Alter nahe an der K/T-Grenze (Abb. 6, 7). In Bochil allerdings zeigen die Faunen oberhalb der Brekzie bereits paläozäne Alter (Zone P1c oder sogar P3) und diejenigen unterhalb gehören dem Maastricht an (Fig. 7). Dies indiziert einen größeren Sedimenthiatus, in dem das genaue Alter der Brekzie unbekannt bleibt. In Chemal behindert die schlechte Faunenerhaltung (z.B. An- und Auflösung kleiner Arten mit feiner Schale) in den Silt- und Sandsteinen unter- und oberhalb der Brekzie eine exakte stratigraphische

Einstufung, wenn auch oberhalb schlecht erhaltene Faunenelemente der Zone P1a aufgefunden wurden (STINNESBECK et al., 1997; Fig. 6).

Ursprung und Ablagerungszeitraum der kubanischen Brekzien ist ebenfalls nicht genau bekannt (Abb. 8). Eigene Analysen ergaben als jüngste Faunenelemente Foraminiferen-Vergesellschaftungen des frühen Ober-Maastricht, wohingegen Indexarten des obersten Maastricht nicht beobachtet wurden. In diesem Fall bestände vermutlich keine kausale Beziehung zwischen den kubanischen Brekzien und dem Chicxulub-Impakt. Das Fehlen von Leitarten des obersten Maastricht könnte aber auch auf der Seltenheit dieser Taxa beruhen und mit der großen Menge an geschüttetem Material erklärt werden. Hierfür spräche die kürzliche Identifikation von *Micula prinsii* in der Brekzie von Peñalver (TAKAYAMA et al., 1999). Weitere biostratigraphische Analysen sind notwendig, um das genaue Alter der kubanischen Brekzien eindeutig zu bestimmen.

8 Ergebnisse

Die Chicxulub-Impakt-Hypothese postuliert, daß alle Sphaerolithschichten und klastischen Ablagerungen in der Umgegend von Yucatan stratigraphisch exakt an der K/T-Grenze und schnell, innerhalb von Stunden oder Tagen, abgelagert wurden. Eine Reihe von Punkten stehen dieser Interpretation aber entgegen; hierzu gehören sedimentologische Charakteristika wie etwa in Nordost-Mexiko die Bioturbation in den siliziklastischen Ablagerungen (EKDALE & STINNESBECK, 1998), die biostratigraphische Position der Sphaerolithe an ihrer Basis oder mehrere Meter unterhalb der siliziklastischen Sedimente in einer Mergel-folge (SCHULTE, 1999; STINNESBECK et al., 1999), oder die Mergelschicht oberhalb der siliziklastischen Sedimente aber unterhalb der K/T-Grenze (LOPEZ-OLIVA & KELLER, 1996; KELLER et al., 1997). So wird zwar aufgrund des ähnlichen Chemismus und Aussehens allgemein angenommen, daß die Glaskügelchen in Nordost-Mexiko, Haiti und Guatemala auf ein und dasselbe Impakt-Event zurückgehen, die stratigraphische Position der Sphaerolith-Einheiten allerdings vari-

iert beträchtlich. In Mexiko befinden sich die Sphaerolithe eindeutig unterhalb der K/T-Grenze, während sie in Haiti in Schichten der Zone P1a des frühen Dan enthalten sind. In Guatemala wurden die Sphaerolithe in den obersten 10 cm der dortigen Brekzieneinheiten nahe der K/T-Grenze beobachtet. Vereinzelt tertiäre Faunenelemente in diesen Schichten legen eine Ablagerung zur Zeit der P.eugubina Zone des frühen Dan nahe. Diese Altersunterschiede der Sphaerolithe von Haiti, Mexiko und Guatemala scheinen das Resultat von Aufarbeitung und Umlagerung einer ursprünglichen Sphaerolithschicht zu sein, die ein spätkretazisches Alter (P. hantkeninoides Zone, CF1) gehabt haben muß.

Die biostratigraphische Analyse weist damit auf ein Multievent-Szenario für den K/T-Übergang hin, bei dem folgende zeitlich voneinander getrennte Ereignisse unterschieden werden (Abb. 10):

- (1) Brekzienablagerung im „mittleren“ und frühen Ober-Maastricht (z.B. Kuba, Guatemala, Süd-Mexiko)
- (2) Brekzienablagerungen während des obersten Maastricht in Brasilien, Guatemala und Süd-Mexiko,
- (3) Sphaerolithablagerungen in Nordost-Mexiko und möglicherweise Guatemala (Caribe),
- (4) siliziklastische Ablagerungen in Nordost-Mexiko
- (5) die K/T-Grenze (weltweite Ir-Anomalie, hier Ir in Nordost-Mexiko und Brasilien)
- (6) Sphaerolithablagerungen in Beloc, ? Sphaerolithe und ? Ir in Caribe, Guatemala
- (7) eine Pd dominierte PGE-Anomalie am Top der P. eugubina Zone von Beloc. Sie ist mit einer Aschelage assoziiert und besitzt vermutlich einen magmatischen Ursprung.

Welches dieser unterschiedlichen Ereignisse entspricht nun dem Asteroideneinschlag von Chicxulub? Die derzeitigen Daten erlauben keine eindeutige Antwort auf diese Frage. Wenn allerdings die Glaskügelchen in Nordost-Mexiko, Guatemala und Haiti einen Einschlag im karibischen Raum belegen, dann können die Punkte 1, 2, 4 und 7 (Abb. 10)

ausgeschlossen werden, da sie entweder langfristige Ereignisse darstellen oder auf Vulkanismus zurückgehen. Die Sphaerolithe von Beloc in Haiti (Punkt 6) erscheinen umgelagert von Event Nr. 4 (der Sphaerolithablagerung in Nordost-Mexiko), und dieses Ereignis geht dem Event 5 (Ir-Anomalie an der K/T-Grenze) zeitlich voraus. In diesem Fall wäre der Chicxulub-Impakt vor der K/T-Grenze erfolgt.

Danksagung

An den Untersuchungen für diese Studie waren zahlreiche Kollegen beteiligt, denen ich für ihre Unterstützung und Diskussionen sehr herzlich danke. Besonders hervorheben möchte ich die langjährige gute Zusammenarbeit mit Thierry Adatte, Gerta Keller und Jose Guadalupe Lopez-Oliva. Die Arbeiten wurden finanziell unterstützt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (STI 128/2-1, 2, 3) und dem mexikanischen Conacyt (L120-36-36).

Literatur

- ADATTE, T.; STINNESBECK, W. & KELLER, G. (1996): Lithostratigraphic and mineralogic correlations of near K/T boundary clastic sediments in NE Mexico: Implications for origin and nature of deposition. S. 211-226. -In: Ryder; G., Fastovsky, D., and Gartner, S. (eds.): The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History. - Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 307.
- ALBERTÃO, G.A. AND MARTINS jr, P.P. (1996): A possible tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Pernambuco, northeastern Brazil. - Sedimentary Geology 104, S.189-201.
- ALBERTÃO, G.A.; KOUTSOUKOS, E.A.M.; REGALI, M.P.S.; ATTREP JR, M., & MARTINS jr, P.P. (1994): The Cretaceous-Tertiary boundary in southern low latitudes: preliminary study in Pernambuco, northeastern Brazil. - Terra Nova, 6, S. 366 - 375
- ALVAREZ, L.W.; ALVAREZ, W.; ASARO, F. & MICHEL, H.V. (1980): Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. - Science, 208, S. 1095-1108.
- ALVAREZ, W., SMIT, J., LOWRIE, W., ASARO, F., MARGOLIS, S.V., CLAEYS, P. KASTNER, M. & HILDEBRAND, A.R. (1992): Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP Leg 77 Sites 536 and 540: Geology, 20, S. 697-700.
- BLUM, J.D. & CHAMBERLAIN, C.P. (1992): Oxygen isotope constraints on the origin of impact glasses from the Cretaceous-Tertiary boundary. Science, 257, S. 1104-1107.
- BOHOR, B.F. (1996): A sediment gravity flow hypothesis for siliciclastic units at the K/T boundary, northeastern Mexico. S. 183-196. . In: Ryder; G., Fastovsky, D., & Gartner, S. (eds.): The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History. - Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 307.

- BOURGEOIS, I., HANSEN, T.A., WIBERG, P.L., & KAUFFMAN, E.G. (1988): A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas: *Science*, 241, S. 567-570.
- BRALOWER, T.; PAULL, C.K., & LECKIE, R.M., 1998, The Cretaceous-Tertiary boundary cocktail: Chicxulub impact triggers margin collapse and extensive sediment gravity flows. - *Geology*, 26, S.331-334.
- CLAEYS, P.; HEUSCHKEL, S.; GRE-SHAKE, A.; PALME, H. & STÖFFLER, D. (1998): The Cretaceous-Tertiary (KT) Boundary Chicxulub Impact Structure, and Distribution of Ejecta material, Yucatan, Mexico. - *ICDP/KTB-Kolloquium*, 4.-5. Juni.1998, Bochum, 3 S.
- EKDALE, A.A. & STINNESBECK, W. (1998): Trace Fossils in Cretaceous-Tertiary (KT) Boundary Beds in Northeastern Mexico: Implications for Sedimentation during the KT Boundary Event. - *Palaios.*, 13, S. 593-602.
- FERNÁNDEZ, G.; QUINTAS, C.; SÁNCHEZ, J.R. & COBIELLA, J. (1991): El límite Cretácico-Terciario en Cuba. - *Revista Minera y Geología, Cuba*, v.8 (1-3), S. 69-85.
- FOURCADE, E.; ROCCHIA, R.; GARDIN, S.; BELLIER, J-P.; DEBRABANT, P.; MASURE, E.; ROBIN, E. & POP, W.T. (1998): Age of the Guatemala breccias around the Cretaceous-Tertiary boundary: relationships with the asteroid impact on the Yucatan.- *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, 327, S. 47-53.
- HABIB, D.; OLSSON, R.K.; LIU, CH. & MOSHKOVITZ, S. (1996): High-resolution biostratigraphy of sea-level low, biotic extinction, and chaotic sedimentation at the Cretaceous-Tertiary boundary in Alabama, North of the Chicxulub crater. S.243-252. In: Ryder; G., Fastovsky, D., & Gartner, S. (eds.): *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. - Boulder, Colorado, GSA Special Paper 307.
- HILDEBRAND, A.R.; PENFIELD, G.T., KRING, D.A., PILKINGTON, M., CAMARGO, A.Z., JACOBSON, S.B. & BOYNTON WV (1991): Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary Boundary impact crater on the Yucatan Peninsula. *Geology*, 19, S. 867-869.
- HILDEBRAND A. R.; BONIS, S.; SMIT, J. & ATTREP jr, M. (1993): Cretaceous/Tertiary boundary deposits in Guatemala: Evidence for impact waves and slumping on a platform scale? - *Soc. Mex. Paleont.*, IV Congr. Nac. Paleont., Proc., S. 133-137.
- HILDEBRAND, A.R., CONNORS, M., PILKINGTON, M., ORTIZ ALEMAN, C., & CHAVEZ, R.E. (1994): Size and structure of the Chicxulub Crater: *Rev. Soc. Mex. Paleont.* 7 (1), S. 59-68.
- HILDEBRAND, A.R., PILKINGTON, M., CONNORS, M., ORTIZ-ALEMAN, C., CHAVEZ R.E. (1995): Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes. - *Nature*, 376, S. 415-417
- HUDSON, J.D. (1998): Discussion on the Cretaceous-Tertiary biotic transition. - *Jl. Geol. Soc., London*, S. 413-419.
- ITURRALDE-VINCENT, M.A. (1992): A short note on the Cuban late Maastrichtian megaturbidite (an impact-derived deposit?) - *Earth and Planetary Science Letters*, 109, S. 225-229
- IZETT, G.A. (1991): Tektites in the Cretaceous-Tertiary Boundary Rocks on Haiti and Their Bearing on the Alvarez Impact Extinction Hypothesis. - *Jl. of Geophysical Research*, 96, S. 20,879-20,905.
- IZETT, G.; MAURASSE, F.J.-M.R.; LICHTÉ, F.E.; MEEKER, G.P. & BATES, R. (1990): Tektites in Cretaceous/Tertiary boundary rocks on Haiti. USGS Open File Rept. 90-635.
- IZETT, G.A.; DALRYMPLE, G.B. & SNEE, L.W. (1991): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age of Cretaceous-Tertiary Boundary Tektites from Haiti. - *Science*, 252, S. 1539-1542.

- JÉHANNO, C., BOCLET, D., FROGET, L., LAMBERT, B., ROBIN, E., ROCCHIA, R., AND TURPIN, L. (1992): The Cretaceous-Tertiary boundary at Beloc, Haiti: No evidence for an impact in the Caribbean area: *Earth and planet. Sci. Lett.* 109, S. 229-241
- KELLER, G. & STINNESBECK, W. (1996): Sea level changes, clastic deposits and megatsunamis across the Cretaceous/Tertiary boundary. In: MacLeod, N. & Keller, G., eds., *The Cretaceous-Tertiary Boundary Mass Extinction: Biotic and Environmental Events.* - S. 415-449, Norton Press, New York.
- KELLER, G. & STINNESBECK, W. (1996): Near-K/T Age of Clastic Deposits from Texas to Brazil: Impact, Volcanism and/or Sea-Level Lowstand? - *Terra Nova*, 8, S. 277-285.
- KELLER, G., STINNESBECK, W., AND LOPEZ-OLIVA, J.G. (1994): Age, deposition and biotic effects of the Cretaceous/Tertiary boundary event at the Arroyo El Mimbral, NE Mexico. - *Palaios*, 9, S. 144-157
- KELLER, G., LOPEZ-OLIVA, J.G., STINNESBECK, W., AND ADATTE, T. (1997): Age, stratigraphy and deposition of near K/T siliciclastic deposits in Mexico: Relation to bolide impact? *Geological Society of America Bulletin.*, 109, S. 410-428.
- KIYOKAWA, S.; TADA, R.; MATSUI, T.; TAJIKA, E.; TAKAYAMA, H. & ITURRALDE-VINENT, M.A. (1999): Extraordinary thick K/T boundary sequence: Cacarajfcara Formation, Western Cuba. - *Lunar and Planetary Science Conf.*, Houston, Abs.
- KOEBERL, C. (1993): Chicxulub crater, Yucatan: Tektites, impact glasses, and the geochemistry of target rocks and breccias. *Geology*, 21, S. 211-214
- KOEBERL, C., AND SIGURDSSON, H. (1992): Geochemistry of impact glasses from the K/T boundary in Haiti: relation to smectites and new types of glass: *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 56, S. 2113-2129.
- KOEBERL, C., SHARPTON, V.L., SCHURAYTZ, B.C., SHIRLEY, S.B., BLUM, J.D., AND MARIN, L.E. (1994): Evidence for a meteoric component in impact melt rock from the Chicxulub structure: *Geochim. cosmochim. Acta* 56, S. 2113-2129
- KOUTSOUKOS, E.A.M. (1998): An extraterrestrial impact in the early Danian: a secondary K/T boundary event? - *Terra Nova* 10, S. 68-73.
- KRING, D.A. (1995): The dimensions of the Chicxulub impact crater and impact melt sheet: *J. Geophys. Res.* 100, S. 16,979-16,986
- LEROUX, H., ROCCHIA, R., FROGET, L., ORUE-ETXEBARRIA, X., DOUKHAN, J., AND ROBIN, E. (1995): The K/T boundary of Beloc (Haiti): Compared stratigraphic distributions of boundary markers: *Earth and planet. Sci. Lett.* 131, S. 255-268
- LOPEZ OLIVA, J.G., & KELLER, G. (1996): Age and stratigraphy of near-K/T boundary clastic deposits in northeastern Mexico. In: Ryder G, Fastovsky D, Gartner, S, (eds) *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History: Boulder, Colorado, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.* 307, S. 227-242.
- LOPEZ RAMOS, E. (1973): Estudio geológico de la Peninsula de Yucatan. - *Bol. Assoc. Mexicana de Geol. Petrol.*, vol. 25 (1-3), S. 23-76
- LOPEZ RAMOS, E. (1975): Geological summary of the Yucatan Peninsula, in A.E.M. Nairn and Stehli, F.G. (eds.): *The ocean basins and margins, Vol. 3, The Gulf of Mexico and the Caribbean.* - New York, Plenum Press, S. 257-282.
- MAURASSE, F.J.-M., AND SEN, G. (1991): Impacts, tsunamis, and the Haitian Cretaceous-Tertiary boundary layer: *Science*, v. 252, S. 1690-1693.

- MACLEOD, N.; RAWSON, P.F.; FOREY, P.L.; BANNER, F.T.; BOUDAGHER-FADEL, M.K.; BOWN, P.R.; BURNETT, J.A.; CHAMBERS, P.; CULVER, S.; EVANS, S.E.; JEFFERY, C.; KAMINSKI, M.A.; LORD, A.R.; MILNER, A.C.; MILNER, A.R.; MORRIS, N.; OWEN, E.; ROSEN, B.R.; SMITH, A.B.; TAYLOR, P.D.; URQUHARDT, E. & YOUNG, J.R. (1997): The Cretaceous-Tertiary transition. - *Jl. Geol. Soc.*, London, 154, S. 265-292.
- MONTANARI, A., CLAEYS, P., ASARO, F., BERMUDEZ, J., & SMIT, J (1994): Preliminary stratigraphy and iridium and other geochemical anomalies across the K/T boundary in the Bochil section (Chiapas, southeastern Mexico). in: New developments regarding the K/T event and other catastrophes in Earth history: Lunar and Planetary Institute, LPI Contrib. No. 825, S. 84.
- MORGAN, J., WARNER, M. und 17 weitere Autoren (1997): Size and morphology of the Chicxulub impact crater. - *Nature*, 390, S. 472-476.
- OCAMPO, A.R., POPE, K.O., FISCHER, A.G., & MORRISON, J. (1996): Ejecta blanket deposits of the Chicxulub crater from Albion Island, Belize. S. 75-88. In: Ryder; G., Fastovsky, D., & Gartner, S. (eds.): *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. - Boulder, Colorado, GSA Special Paper 307.
- OLSSON, R.K.; LIU, CH. & VAN FOSSEN, M. (1996): The Cretaceous-Tertiary catastrophic event at Millers Ferry, Alabama. S. 263-278. In: Ryder; G., Fastovsky, D., and Gartner, S. (eds.): *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. - Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 307.
- OLSSON, R.K.; MILLER, K.G.; BROWNING, J.V.; HABIB, D. & SUGARMAN, P.J. (1997): Ejecta layer at the Cretaceous/Tertiary boundary, Bass River, New Jersey (Ocean Drilling Program Leg 174AX). - *Geology*, 25, S. 759-762.
- PECHEUX, M. & MICHAUD, F. (1997): Yucatan subsurface stratigraphy: Implications and constraints for the Chicxulub impact: Comment. - *Geology*, 25, S.92.
- PILKINGTON, M., AND HILDEBRAND, A.R. (1994): Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub crater, Mexico. *J. Geophys. Res.* 99, S. 13,147 - 13,162
- POPE, K.O., OCAMPO, A.C., AND DULLER, C.E. (1991): Mexican site for K/T impact crater. *Nature*, 351, S. 105-108
- PSZCOKOWSKI, A. (1986): Megacapas del Maestrichtiano en Cuba occidental y central: Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Earth Sciences, 34 (1), S. 81-94.
- PSZCOKOWSKI, A.; PISTROWSKA, K.; PIOTROWSKI, J.; DE LA TORRE, A.; MYCZINSKI, R. & HACZEWSKI, G. (1987): Contribución a la geología de la Provincia de Pinar del Río. - Editorial Científico-Técnico Ciudad de La Habana, 255 S.
- SCHULTE, P. (1999): Geologisch-sedimentologische Untersuchungen des Kreide-Tertiär-Übergangs im Gebiet zwischen El Toro und La Sierrita, Nuevo León, Mexiko. - Unveröff. Diplomarbeit, TU Karlsruhe, 134 S.
- SCHURAYTZ, B.C., SHARPTON, V.L., & MARIN, L.E. (1994): Petrology of impact-melt rocks at the Chicxulub multiring basin, Yucatán, Mexico. -*Geology*, 22, S. 868-872.
- SCHURAYTZ B.C.; LINDSTROM, D.J.; MARIN L.E.; MARTÍNEZ, R.R.; MITTFEHLDT, D.W.; SHARPTON V.L. & WENTFORTH, S.J. (1996): Iridium metal in Chicxulub impact melt: Forensic chemistry on the K/T-smoking gun. - *Science*, 271, S. 1573-1576.
- SHARPTON, V.L., DALRYMPLE, G.B., MARIN, L.E., RYDER, G., SCHURAYTZ, B.C., & URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. (1992): New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous-Tertiary boundary. - *Geology*, 20, S. 105-108.

- ous/Tertiary boundary: *Science* 359, S. 819-821
- SHARPTON, V.L., MARIN, L.E., CARNEY, C., LEE, S., RYDER, G., SCHURAYTZ, B.C., SIKORA, P., & SPUDIS, P.S. (1996): A model for the Chicxulub impact basin based on evaluation of geophysical data, well logs and drill core samples. S. 55-74. In: Ryder, G., Fastovsky, D. & Gartner, S. (eds): *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*: Boulder, Colorado, Spec. Pap. Geol. Soc. Amer. 307,
- SIGURDSSON, H.; BONTE, P.; TURPIN, L.; CHAUSSIDON, M.; METRICH, N.; STEINBER, M. PRADEL, P. & D'HONDT, S. (1991): Geochemical constraints on source region of Cretaceous/Tertiary impact glasses. - *Nature*, 353, S. 839-842.
- SMIT, J., MONTANARI, A., SWINBURNE, N.H.M., ALVAREZ, W., HILDEBRAND, A., MARGOLIS, S.V., CLAEYS, P., LOWRIE, W., ASARO, F. (1992): Tektite-bearing deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico: *Geology*, v. 20, S. 99-103.
- SMIT, J., ROEP, T.B., ALVAREZ, W., MONTANARI, A., CLAEYS, P.; GRAJALES-NISHIMURA, J.M. & BERMÚDEZ, J. (1996): Coarse-grained, clastic sandstone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: Deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact. S. 151-182. In: Ryder, G., Fastovsky, D., & Gartner, S. (eds.): *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. - Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 307.
- STINNESBECK, W. (1989): Fauna y microflora en el límite Cretácico-Terciario en el estado de Pernambuco, Noreste de Brasil. - *Contribuciones a los Simposios sobre el Cretácico de América Latina*, in: Spaletti, L.A. (ed.) Parte A: Eventos y Registro Sedimentario, Buenos Aires, S. 215-230.
- STINNESBECK, W. & KELLER, G. (1996): Environmental Changes across the Cretaceous-Tertiary Boundary in northeastern Brazil. - In: MacLEOD, N. & Keller, G. (eds.): *The Cretaceous-Tertiary Boundary Mass Extinction: Biotic and Environmental Events*. - S. 451-469, Norton Press, New York.
- STINNESBECK, W., BARBARIN, J.M., KELLER, G., LOPEZ-OLIVA, J.G., PIVNIK, D.A., LYONS, J.B., OFFICER, C.B., ADATTE, T., GRAUP, G., ROCCHIA, R. & ROBIN, E. 1993. Deposition of channel deposits near the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico: Catastrophic or "normal" sedimentary deposits. *Geology*, 21, 797-800.
- STINNESBECK, W.; ADATTE, T. & KELLER, G. (1994): KT boundary sections in Southern Mexico (Chiapas): Implications for the proposed Chicxulub Impact Site. - *New Developments Regarding the K/T Event and Other Catastrophes in Earth History*, LPI Contribution No. 825, Lunar and Planetary Institute, S. 120-121
- STINNESBECK, W.; KELLER, G.; ADATTE, T., LOPEZ-OLIVA, J.G. & MACLEOD, N. (1996): Cretaceous-Tertiary boundary clastic deposits in NE Mexico: Bolide impact or sealevel lowstand. In: MacLEOD, N. & Keller, G. (eds.): *The Cretaceous-Tertiary Boundary Mass Extinction: Biotic and Environmental Events*. - S. 471-517, Norton Press, New York.
- STINNESBECK, W., KELLER, G., DE LA CRUZ, J., DE LEON, C., MACLEOD, N. & WHITTACKER, J.E. (1997): The Cretaceous-Tertiary boundary in Guatemala - Limestone breccia deposits from the South Peten Basin. - *Geol Rundschau*, 86, S. 686-709.
- STINNESBECK, W.; KELLER, G.; ADATTE, T.; LOPEZ-OLIVA, J.G.; STÜBEN, D. & KRAMAR, U. (1999): Multiple events across the K/T boundary in northeastern Mexico and Haiti: relationship

- to the Chicxulub impact? - Geological Association of Canada and Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Sudbury, May 26-28, 1999.
- STINNESBECK, W., KELLER, G., ADATTE, T., STÜBEN, D.; KRAMAR, U.; BERNER, Z.; DESREMAUX, C., & MOLIERE, E. (in Vorber.): Beloc, Haiti, revisited: multiple events across the Cretaceous-Tertiary transition in the Caribbean? - Terra Nova, eingereicht.
- STÜBEN, D., BERNER, Z.; KRAMAR, U.; ECKHARDT, J.-D.; STINNESBECK, W.; ADATTE, T. & KELLER, G. (1999): Geochemical evidence for a multievent at the K/T boundary at Beloc, Haiti. Geological Association of Canada and Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Sudbury, May 26-28, 1999.
- SWISHER, C.C., GRAJALES-NISHIMURA, J.M., MONTANARI, A., MARGOLIS, S.V., CLAEYS, P., ALVAREZ, W., RENNE, P., CEDILLO-PARDO, E., MAURASSE, F.J.-M., CURTIS, G.H., SMIT, J., AND WILLIAMS, M.O. (1992): Coeval $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of 65.0 million years ago from Chicxulub crater melt rock and Cretaceous-Tertiary boundary tektites: *Science*, 257, S. 954-958.
- TAKAYAMA, H.; TADA, R.; MATSUI, T.; ITURRALDE-VINENT, M.A.; OJI, T.; TAJIKA, E.; KIYOKAWA, S.; GARCIAANMD, D.; OKADA, H.; HASEGAWA, T. & TOYODA, K. (1999): Origin of a giant event deposit in northwestern Cuba and its relation to K/T boundary impact. - Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abs.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J.; MARÍN, L. & TREJO-GARCÍA, A. (1996): UNAM Scientific drilling program of Chicxulub impact structure - Evidence for a 300 kilometer crater diameter. - *Geophysical Research Letters*, 23 (13), S. 1565-1568.
- WARD, W., KELLER, G., STINNESBECK, W. & ADATTE, T. (1995): Yucatan Subsurface Revisited: Implications and Constraints for the Chicxulub Meteor Impact. - *Geology*, 23, S. 873-876.

