

CHI-CHI Erdbeben Spektakuläre tektonische Phänomene

Gunther RIEDMÜLLER

ABSTRACT: The devastating Chi-Chi earthquake, September 21, 1999, in Central Taiwan caused spectacular tectonic phenomena. Vertical and horizontal ground displacements in the range of several metres were observed mainly along the Chelungpu Fault, which belongs to a thin-skinned foreland-vergent thrust system. It is assumed that due to lateral shortening of the thrust wedge ramps and flats were generated which caused heave of the ground with a predominance of extensional ruptures. As a consequence, structures were preferably damaged in the hanging wall of the thrust fault.

ZUSAMMENFASSUNG: Das verheerende Chi-Chi Erdbeben in Zentral Taiwan vom 21. September 1999 verursachte spektakuläre tektonische Phänomene. Entlang der Chelungpu Störung, die zu einem "thin-skinned" Überschiebungssystem mit Vergenz zum Vorland gehört, wurden vertikale und horizontale Geländevertellungen in der Größenordnung von mehreren Metern beobachtet. Es wird angenommen, dass die laterale Einengung des Überschiebungskeils die Bildung von steilen und flachen Segmenten ("ramps and flats") bewirkte. Auf diese Weise kam es zu einer Hebung des Untergrundes mit Vorherrschen von Dehnungsbrüchen. Als Folge finden sich Gebäudeschäden bevorzugt im Hangenden der Überschiebung.

1 Einleitung

Das außergewöhnlich starke Chi-Chi Erdbeben ereignete sich am frühen Morgen des 21. September 1999 um 1:47 Uhr Ortszeit in der Nähe der kleinen Stadt Chi-Chi in der Provinz Nantou in Westtaiwan. Das Beben verursachte 2300 Tote und 8700 zum Teil schwer Verletzte. Hunderttausende Menschen wurden obdachlos. Das Hauptbeben hatte eine Stärke von $M=7,3$ und dauerte dreißig Sekunden. Die maximale horizontale Beschleunigung betrug $0,98\text{ g}$, gemessen in E-W Richtung (1). Die während des Hauptbebens entstandenen tektonischen Bewegungen bewirkten die größten Oberflächenveränderungen, von denen in der Geschichte der Erdbebenforschung berichtet wurde.

Fünf Nachbeben mit Magnituden größer als sechs wurden registriert. Das stärkste Nachbeben ($M=6,8$) verursachte zahlreiche Schäden an bereits vorgeschädigten Gebäuden.

Obwohl die rezente Seismizität am stärksten in NE-Taiwan zum Vorschein tritt, werden die stärksten Bebenshäden aus Westtaiwan, aus dem Gebiet um Taichung berichtet. Die Ursache liegt in der geringen Tiefe der Bebenherde. Die stärksten Schadbeben des vergangenen Jahrhunderts ereigneten sich alle in dieser Region. Es waren dies vor allem das Chiayi Beben (1906) und das Hsinchu-Taichung Beben (1935), die aufgrund der katastrophalen Schäden neue Bauvorschriften erzwangen.

Alle diese Beben wurden durch Bewegungen an westvergenten Aufschiebungen ausgelöst (2, 3, 4, 5). Das jüngste Beben mit seinem Hypozentrum nahe der kleinen Stadt Chi-Chi, in einer Krustentiefe von 8 km, entstand durch Bewegungen an der Chelongpu Störung (Abb.1, 2).

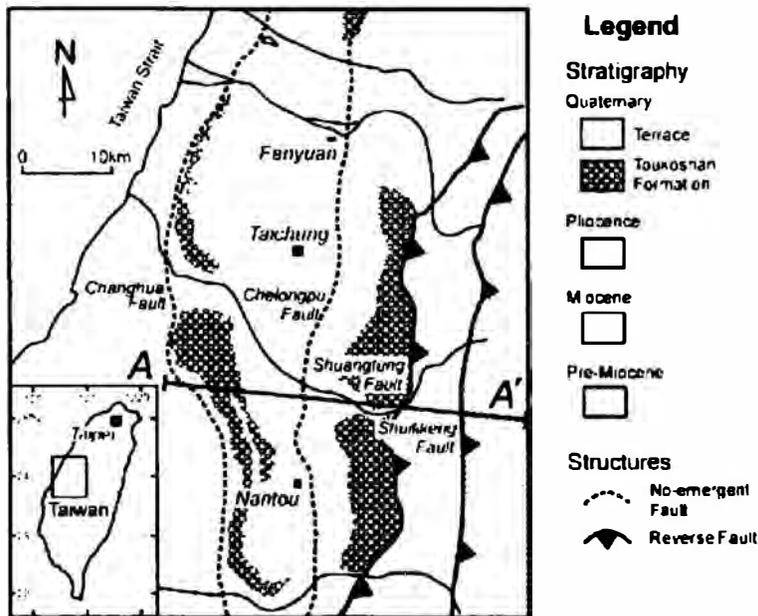


Abb. 1: Schematische geologische Karte des Erdbebengebietes

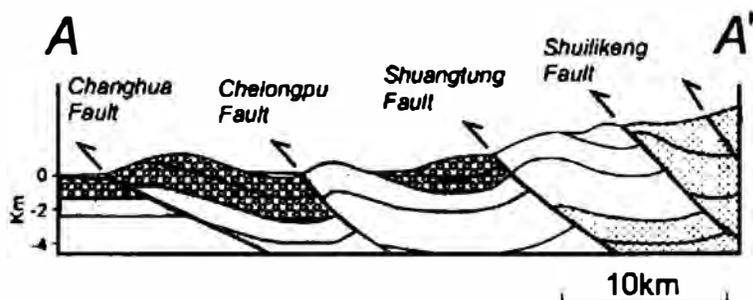


Abb. 2: Schematisches geologisches Profil

2 Geologische Situation

In Taiwan ereignet sich eine rezente Gebirgsbildung mit Plattenkollision, Vorlandsüberschiebungen und Störungstektonik (6). Die kleine Insel Taiwan befindet sich an der konvergenten tektonischen Grenze zwischen der Eurasiatischen und der Philippinischen Platte (Abb.3).

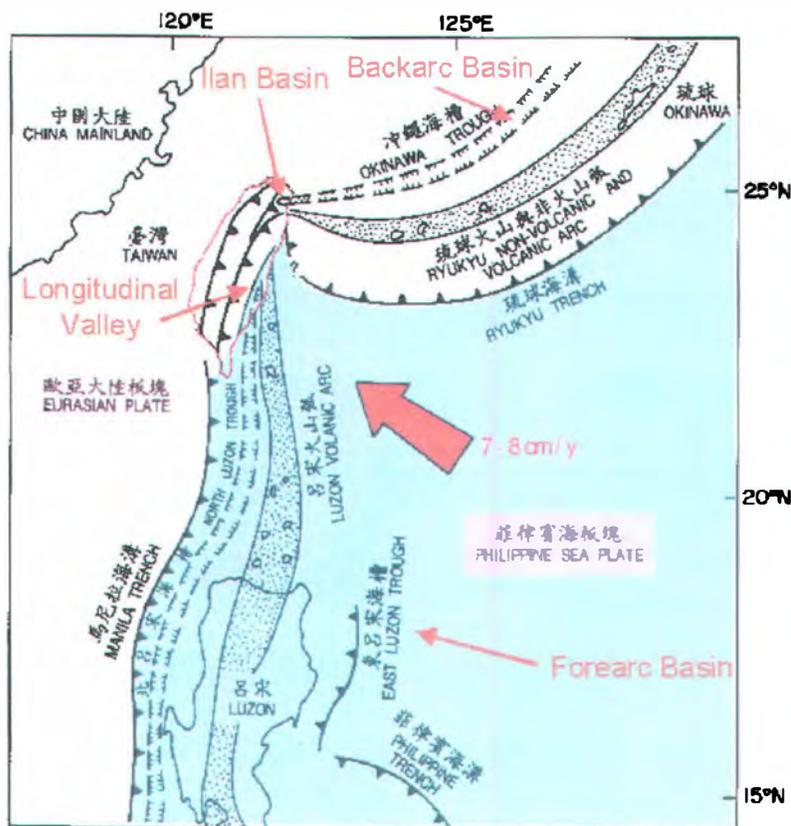


Abb. 3: Känozoische plattentektonische Situation in Taiwan

Die Konvergenzgeschwindigkeit beträgt in NW-SE Richtung derzeit 8,2 cm / Jahr (7). Die Plattenkonvergenz bewirkte eine komplizierte Kompressionstektonik. Sie ist gekennzeichnet durch eine nach Osten gerichtete Subduktion der Eurasiatischen Platte entlang des Manila Grabens unter den vulkanischen Luzon Inselbogen der Philippinischen Platte und durch eine nach Norden gerichtete Subduktion der Philippinischen Platte entlang des Ryukyu Grabens unter den vulkanischen Ryukyu Inselbogen der Eurasiatischen Platte. Entlang der Plattengrenze entstand das NE-SW streichende "Longitudinal Valley". Das im NE der Insel befindliche "Ilan Basin" ist die westlichste Fortsetzung des Okinawa Troges, der als "Backarc Basin" gedeutet wird. Bei der Subduktion der Eurasiatischen Platte unter die Philippinische Platte entstand als "Forearc Basin" der Luzon Trog.

Die beiden vulkanische Inselbögen, Luzon Bogen und Ryukyu Bogen, treffen in Taiwan aufeinander und prägen den känozoischen Vulkanismus Taiwans. Die Plattenkonvergenz mit extremer Kontinent-Inselbogen Kollision bewirkte in Westtaiwan die Ausbildung eines Akkretionskeils. In einer breiten Zone, den sogenannten "Western Foothills" entstanden westvergente Deckenüberschiebungen, wobei eine quartäre Molasse von tertiären Sedimentfolgen überschoben wird (8), (Abb.4).

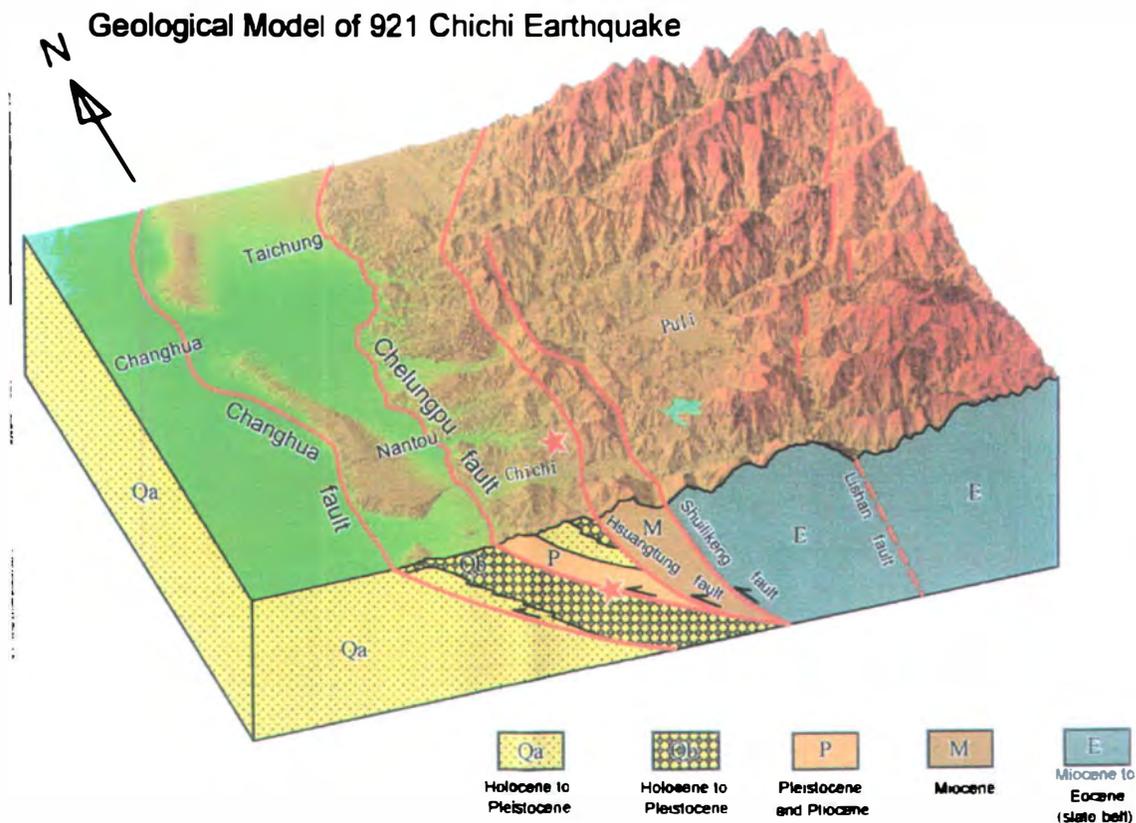


Abb. 4: Westvergente Aufschiebungen tertiärer Sedimente auf die quartäre Molassefüllung

In Fortsetzung gegen Osten führte die Kollision zu einer mehr als 100 km breiten Zone mit intensiver Spröddeformation. In dieser Zone finden sich sinistrale NE-SW streichende Schrägaufschiebungen mit meist dominanter Horizontalbewegungskomponente. Die östlichste dieser gewaltigen Scherzonen markiert das bereits erwähnte "Longitudinal Valley". Der sinistrale Bewegungssinn ist morphologisch durch den Versatz von Nebenflüssen, Schwemmfächern und Flußterrassen erkennbar. Der direkte Beweis erfolgte durch geodätische Vermessungen, aus denen eine durchschnittliche Bewegungsrate von 6 cm / Jahr erkennbar wurde.

Die hohe Aktivität tektonischer Bewegungen wird neben Bewegungen an Störungen vor allem auch durch das häufige Auftreten von seichtliegenden Starkbeben demonstriert. Die Beben treten mehr oder minder auf der gesamten Insel auf (4). Es vergeht kaum eine Woche, in der nicht ein Erdbeben spürbar wird. Konzentriert finden sich die Beben jedoch entlang des "Longitudinal Valleys", dem Ilan Becken und im zentralen Teil Westtaiwans, wo es im vergangenen Jahr zum verheerenden Chi-Chi Beben kam.

3 Charakteristik des Chi-Chi Erdbebens

Die N-S streichende Chelongpu Störung, an der das Chi-Chi Beben stattfand, verläuft entlang des Fußes der "Western Foothills" und bildet die östliche Begrenzung des mit quartären Sedimenten gefüllten Taichung Beckens (Abb.5).

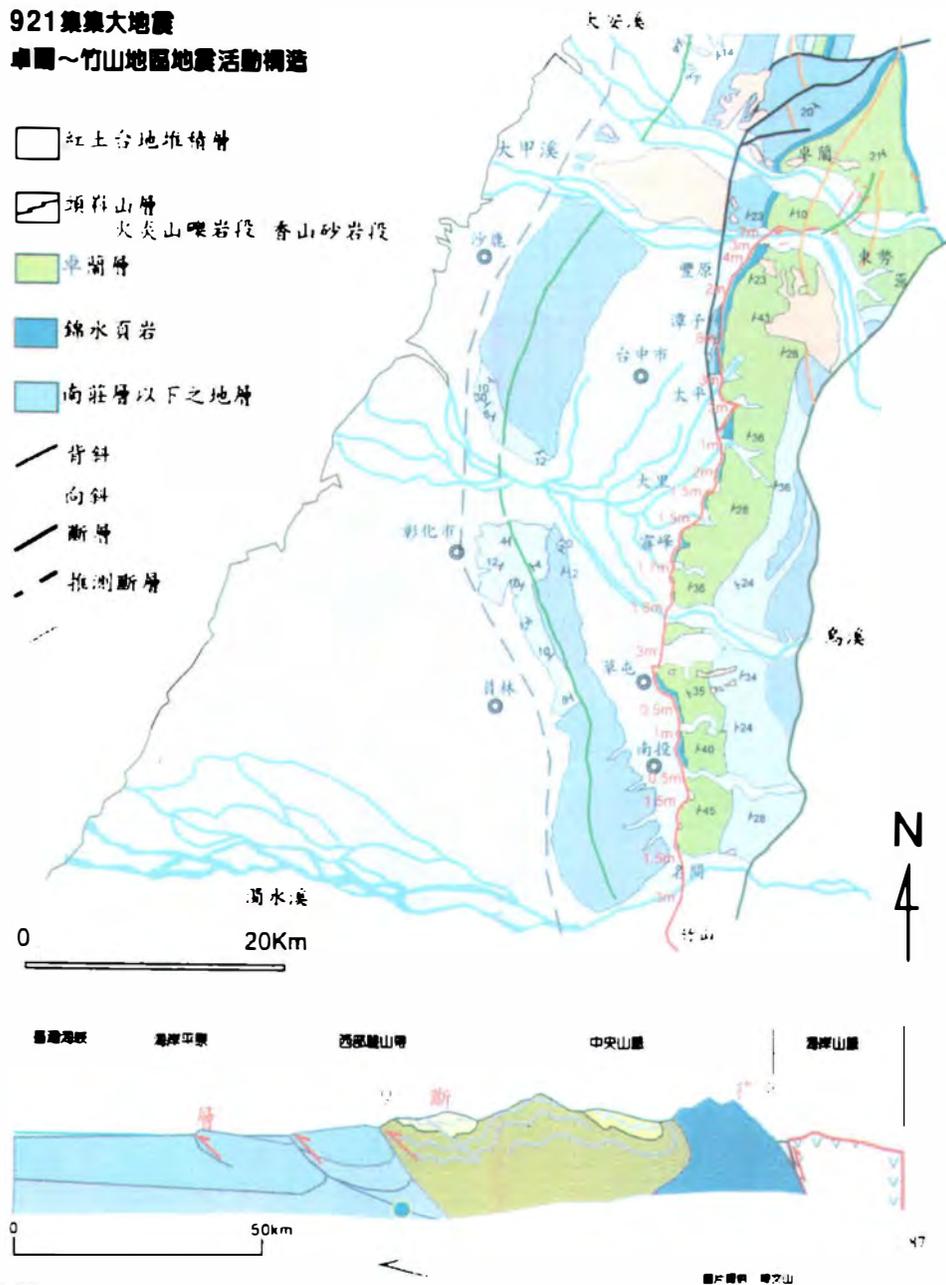


Abb. 5: Geologische Situation des Erdbebengebietes

Entlang dieser Störung kam es zu einer Überschiebung der altpleistozänen Konglomerate der Toukoshan Formation durch die Sand-Siltstein-Shalefolge der pliozänen Cholan Formation (6). Der Ausbiß dieser aktiven Störung kann über eine Länge von ca. 80 km verfolgt werden (9, 10).

An ihrem nördlichen Ende dreht die Chelongpu Störung nach NE und verzweigt sich in mehrere NE bis ENE streichende Segmente. In diesem nördlichsten Abschnitt der Störung, nahe der Stadt Fengyuen, wurden mit 10 m vertikal und 10 m horizontal die stärksten Untergrundverstellungen beobachtet. Es ist dies insofern bemerkenswert, als diese Störungssegmente bisher als nicht aktiv gegolten hatten.

Es ist weiters auffällig, dass die durch geodätische Messungen belegte Langzeitaktivität der Chelongpu Störung nach Süden zunimmt, während gleichzeitig die beim Chi-Chi Erdbeben aufgetretenen Versatzbeträge sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung abnehmen.

4 Erdbebenschäden

Die Erdbebenschäden wurden durch tektonische Untergrundverstellungen, Schädwirkungen durch seismische Wellen und durch sekundäre, vom Beben ausgelöste Massenbewegungen verursacht. Die stärksten Schäden finden sich entlang der Chelongpu Störung, wobei im Süden der Störung, in größerer Nähe zum Epizentrum, die Bauschäden zur Hauptsache durch Schwingungen verursacht wurden, während im Norden die meisten Bauschäden als Folge tektonischer Untergrundverstellungen auftraten. Die beobachteten Schäden korrespondierten mit den PGA (peak ground acceleration) Werten und Schwingungsfrequenzen, die gegen Süden deutlich zunahmten, sowie mit der gegen Norden zunehmenden Intensität von Untergrundverstellungen.

Im folgenden werden einige der spektakulärsten tektonischen Phänomene und Bauschäden vorgestellt.

Die Schäden und Untergrundveränderungen beim Wasserkraftwerk Shi-Kang sind besonders außergewöhnlich. Die Schwergewichtsmauer des Shi-Kang Wasserkraftwerkes hat eine Länge von 700 m. Sie wurde im Zeitraum von 1974 bis 1977 gebaut und staut das Wasser des Ta-Chia Flusses auf. Neben der Energiegewinnung dient das Wasserkraftwerk auch zur Wasserversorgung für die Millionenstadt Taichung. Die von der Chelongpu Störung abzweigende Cher-Lung-Pu Störung quert das rechte Widerlager der Sperre (11). Beim Erdbeben erfolgte südlich der Störung eine Vertikalverstellung von 9,8 m und nördlich der Störung eine gleichsinnige Vertikalverstellung von 2 m, sodass sich eine Relativverstellung von 7,8 m ergab. Die Verstellungen zerstörten die Hochwasserentlastung und die Wehrfelder im unmittelbaren Nahbereich der Störung. Die südlich der Störung befindlichen Bauteile der Betonsperre blieben bei der Vertikalverstellung nahezu unzerstört (Abb.6).



Abb. 6: Zerstörter Abschnitt der Shi-Kang Sperre. Ansicht von der Wasserseite

In den feinsandigen Stausedimenten fanden sich südlich der Störung eine Reihe größerer Liquifaktion-Trichter.

Etwa 1 km flußabwärts der Shi-Kang Sperre quert die Cher-Lung-Pu Störung den Ta-Chia Fluß und zerstörte die Pei-Fung Brücke. Durch eine vertikale Hebung entstand quer über den Fluß eine 7m hohe Felschwelle (Abb.7).



Abb. 7: Felschwelle im Ta-Chia Fluß, entstanden durch Hebung

Am Kreuzungspunkt der Cher-Lung-Pu Störung mit der Chelungpu Störung wurde bis in das Stadtgebiet von Fengyuen mit 10 m die größte horizontale Verstellung gemessen. GPS Messungen ergaben, dass von dieser gewaltigen horizontalen Verstellung ein Gebiet südöstlich der Störung mit einer Breite von 15 km erfaßt wurde. Wie schon erwähnt nimmt das Ausmaß der Untergrundverstellungen gegen Süden kontinuierlich ab.

Flußabwärts der Shi-Kang Sperre zeigt ein Aufschluß die Aufschiebung von pliozänen Siltsteinen auf altpleistozäne Grobklastika. Es ist auffällig, dass im Bereich der Aufschiebung keine rezenten Verstellungen beobachtet werden konnten. Hingegen fanden sich breite Aufwölbungen und Störungsstufen östlich des Ausbisses der Chelongpu Störung (Abb.8).



Abb. 8: Charakteristische Hebung im Hangenden der Chelongpu Störung

Die Schäden an Gebäuden und Brücken sind zur Hauptsache auf die Einwirkung der Untergrundschwingungen zurückzuführen. Es fällt auf, dass bei mehrstöckigen Häusern die Obergeschosse weitgehend verschont blieben, während infolge geringer Aussteifungen durch Garageneinfahrten und Geschäftslokale das unterste Stockwerk abgeschert wurde (Abb.9, 10).



Abb. 9: Schäden an einem mehrstöckigen Haus durch Abscheren des untersten Stockwerkes



Abb. 10: Totalschaden verursacht durch Untergrundschwingungen

Aus der Untersuchung der Gebäudeschäden ging hervor, dass die starken Zerstörungen durch Untergrundschwingungen zur Hauptsache im Hangenden der Chelongpu Störung auftraten.

Im Gegensatz zu Gebäuden blieben Tunnel durch die Schwingungen weitgehend unbeschädigt. Lediglich im Portalbereich wurden bis in eine Tiefe von etwa eineinhalb bis zwei Tunneldurchmesser durch Schwingungen verursachte Schäden an der Auskleidung festgestellt. Die stärksten Schäden bei Tunneln waren auf direkte Verstellungen des Untergrundes zurückzuführen. Bei einem Pipeline Tunnel fanden sich durch Scherbrüche stark deformierte Querschnitte. Die Scherbrüche wurden offensichtlich durch eine Einengung im Bereich der Überschiebungstirne verursacht.

5 Diskussion

Die beobachteten tektonischen Phänomene können durch die Mechanik einer vorlandvergenten Falten- und Überschiebungstektonik erklärt werden. In dem nach Westen in Richtung Vorland ausdünnenden Akkretionskeil bewirkt die Überschiebungstektonik die Ausbildung von steilen Rampen ("ramp and flat geometry") und in verschiedenen tektonischen Stockwerken auftretende Detachmentzonen (5, 8). Es ist offensichtlich, dass weiche Tonschieferhorizonte innerhalb der tertiären Schichtfolge die Ausbildung von seicht liegenden Überschiebungen begünstigten. Weiters wird angenommen, dass das Überschieben von jungen Dehnungszonen mit Abschiebungen und Grabenbildung eine der Voraussetzungen für das Zustandekommen der "ramp and flat" Geometrie ist.

Die charakteristischen, mit Dehnung verbundenen, mehrere hundert Meter breiten Hebungszonen im Bereich der Überschiebungstirne der Chelongpu Störung werden als Folge von Rampen Antiklinalen, Hangend Rampen und Rücküberschiebungen gedeutet.

Nachdem über weite Strecken nur Hebungen mit Dehnungsrissen, jedoch keine Ausbisse der Chelongpu Störung beobachtbar sind, wird als Hypothese zur Diskussion gestellt, dass in Tiefen von mehreren Kilometern Überschiebungen an einer "low-angle blind fault" erfolgen. Aus Erdölexplorationen aus dem Gebiet der nördlich der Chelongpu Störung auftretenden Sanyi Störung sind derartige basale "blind faults", die in den quartären Trogfüllungen enden, bekannt (5).

Zuletzt noch einige Bemerkungen über das Zusammenwirken zwischen quartärer Tektonik und Morphogenese. Der zum Taichung Becken abfallende Hang der "Western Foothills" zeigt eine ausgeprägte Terrassentreppe, bestehend aus pliozänen bis altpleistozänen Pedimenten und jüngeren talgebundenen Terrassensystemen. Tektonische Verstellungen dieser als Erosionsniveaus gedeuteten Terrassen sind in der Literatur beschrieben. Es fällt auf, dass die Terrassenkanten meist eine nach Westen, bzw. NW gerichtete Vorwölbung zeigen, wobei laterale Verstellungen der Terrassen an "tear faults", die durch Seitentäler nachgezeichnet werden, beobachtbar sind. Es lässt sich aus diesen Beobachtungen folgern, dass die morphologische Gestaltung der Hänge in der Westabdachung der "Western Foothills" zu einem großen Teil durch die quartäre Tektonik kontrolliert wird.

Literatur:

- 1 Lee, W.H.K., K.W. Kuo (1999): <http://caldera.wr.usgs.gov/chi-chi1.html>
- 2 Wang, C.Y.(1999): <http://caldera.wr.usgs.gov/chi-chi4.html>
- 3 Bonilla, M.G. (1975): A review of recently active faults in Taiwan, U.S. Geological Survey, Open-File Report 75-41, 58 pp.
- 4 Bonilla, M.G. (1999): A note on historic and Quaternary faults in western Taiwan, U.S. Geological Survey, Open-File Report, 99-447,5 pp.
- 5 Davis, D., J. Suppe, and F.A. Dahlen (1983): Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges.- Geophys.Res. 88(B2), pp. 1153-1172.
- 6 Ho, C.S.H.(1988): An introduction to the geology of Taiwan - explanatory text of the geologic map of Taiwan.- Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, Taiwan, R.O.C., 2nd edition, 192 pp.
- 7 Liou, J.G. and L.Y. Hsiao (1999): <http://caldera.wr.usgs.gov/chi-chi4.html>
- 8 Eldridge, E.M. and R.J. Twiss (1995): Tectonics.-Freeman, 415 pp.
- 9 Suppe, J. (1985): Principles of structural geology.- Prentice Hall, Inc., pp.537.
- 10 Bonilla, M.G. (1999): <http://wrgis.wr.usgs.gov/open-file/of99-447/>
- 11 Hwang, H.H.Y. and J.Yung-Wan Lien. (1999): Taiwan Chi-Chi Earthquake: Bird's eye view of Cher-Lung-Pu Fault.- Sino Geotechnology Inc., pp.151.

Autor:

o.Univ.Prof. Dr. Gunther RIEDMÜLLER
TU Graz, Institut für Technische Geologie
A-8010 Graz, Rechbauerstr. 12