Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *120(2014), 159–166*

Rainer Kind

Strukturen in der Mantellithosphäre – die Entstehung der Kontinente

Plattentektonik

Die Idee einer harten Gesteinsschicht (der Lithosphäre) über einem weicheren Substratum (der Asthenosphäre) ist fundamental für die moderne Plattentektonik, obwohl diese Ansicht viel älter ist (Barrell 1914). Sie beruht auf Beobachtungen wie der Hebung Skandinaviens, die man damit erklärte, dass eine mächtige Eisschicht die elastische Lithosphäre in die plastische Asthenosphäre gedrückt hatte. Nach dem Abschmelzen der Gletscher am Ende der Eiszeit erhob sich die Lithosphäre auf Grund ihrer Elastizität wieder (siehe Abb.1). Die Lithosphäre gliedert sich in eine kontinentale und eine ozeanische Lithosphäre. Die ozeanische Lithosphäre ist höchstens 200 Millionen Jahre alt und circa 100km mächtig, während die Lithosphäre der Kerne der Kontinente mehr als vier Milliarden Jahre alt sein kann und circa 200km mächtig ist. Die Lithosphärenplatten sind nicht ortsfest sondern sie wandern über die Erdoberfläche. Diese Wanderungen wurden zuerst von Alfred Wegener (1880-1930) auf Grund geophysikalischer und geologischer Beobachtungen erkannt und als „Kontinentaldrift“ bezeichnet (Wegener 1912). Wegener wurde über ein halbes Jahrhundert von den meisten Geologen nicht akzeptiert bis Anfang der sechziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts seine Theorie als neue „plate tectonics“ eine Auferstehung erlebte. In Abb.2 sind die Bewegungen der Platten dargestellt, so wie sie sich zur Jetztzeit aus Satellitenbeobachtungen ergeben. Arthur Holmes (1890-1965) erkannte als erster Anfang des vorigen Jahrhunderts, dass Strömungen im Erdmantel für die Drift der Kontinente verantwortlich sein könnten (siehe Abb.3). Er kam damit den heutigen Vorstellungen schon ziemlich nahe.

Der Ursprung der Platten

Über den Ursprung der Platten wird angenommen, dass im Archaikum vor etwa 4 Milliarden Jahren, zu Zeiten einer heftigeren Mantelkonvektion, zunächst durch Abkühlung und Verarmung an schwereren Elementen an der Erdoberfläche eine dünne, quasi ozeanische Lithosphäre entstand, die relativ schnell immer wieder im Mantel versank (subduzierte). Wie konnte es kommen, dass gleichzeitig auch dickere und kältere Lithosphärenblöcke entstanden, die der Subduktion widerstehen konnten und seit Milliarden von Jahre existieren? Diese Frage ist heute immer noch eine der wichtigsten ungelösten Fragen der Geologie. Es gibt im wesentlichen zwei Hypothesen für die Entstehung der Kontinente (siehe Abb.4). Eine Hypothese besagt, dass sich heißes aus dem tiefen Mantel auf strömendes Material (Plumes) sich zu einer mächtigen Schicht aufbauen könnte und dass sich immer wieder neues Material von unten anlagert. Die Entstehung der Hawaii Inseln könnte eine Ähnlichkeit zu dieser Hypothese haben. Die zweite Hypothese besagt, dass sich ozeanische Platten übereinander schieben und dabei eine dickere Platte aus leichtern Anteilen bilden könnten. Ein Beitrag zur Frage welche Hypothese geeignet ist, könnte die Suche nach Strukturen in der kontinentalen Lithosphäre sein, die auf eine mögliche fossile Subduktion hindeuten. Solche Strukturen sind tatsächlich gefunden worden. Mit Hilfe sprengseismischer Messungen wurde unter Skandinavien und unter Kanada bis zu 100 km Tiefe geneigte seismische Zonen sich plötzlich ändernder seismischer Geschwindigkeiten (Diskontinuitäten) entdeckt, die als Reste fossile Subduktion interpretiert wurden.

Eine Methode zur Abbildung von Strukturen in den kontinentalen Platten

Im letzten Jahrzehnt hat sich eine neue Methode zur Abbildung von Strukturen im oberen Erdmantel durchgesetzt: die S Receiver Function Methode (Kind et al. 2012). Diese Methode nutzt seismische Scherwellen (S Wellen) von weit entfernten Erdbeben, die an einer Diskontinuität unter einer Erdbebenstation zu Kompressionswellen (P Wellen) konvertiert werden. P Wellen laufen schneller als S Wellen, deshalb sind die im oberen Mantel konvertierten Wellen zeitlich vor der S Welle zu finden. Diese Daten werden auf geeignete Weise summiert und machen dann Strukturen im oberen Mantel sichtbar. Das Filterkriterium ist dabei der Einfallswinkel der konvertierten Wellen an

der seismischen Station. Die konvertierten Wellen sind sehr schwach, deshalb werden Daten vieler seismischer Stationen gebraucht.

Die Lithosphäre unter Nordamerika

Ein sehr großes seismisches Projekt ist das USArray Projekt in den Vereinigten Staaten (www.usarray.org). In diesem Projekt registrieren viele hundert Stationen kontinuierlich das seismische Wellenfeld über das gesamte Gebiet der USA (siehe Abb.5). Diese Daten stehen jedem Nutzer kostenlos zur Verfügung. In Abb.6 sind ca. vierzigtausend Erdbebenregistrierungen um den Einsatz der S Wellen dargestellt. Deutlich sind Signale vor den S Wellen zu erkennen, aus denen an Hand ihres Einfallswinkels diejenigen herausgefiltert werden, die von Diskontinuitäten im oberen Mantel verursacht wurden. In Abb.7 sind vier West-Ost Profile durch Nordamerika dargestellt. Verschiedene Strukturen sind mit unterschiedlichen Symbolen markiert. Die gestrichelten Linien wurden als Unterkante der flach liegenden Laramide Subduktionszone interpretiert, die vor 70-80 Millionen Jahren aktiv war. Sie reicht weit in die zentrale USA hinein, unter Regionen proterozoischer und archaischer Kruste. Diese Beobachtungen sind ein klarer Hinweis darauf, dass eine großräumige flache Subduktion einer jüngeren Platte unter eine ältere existieren kann. Die Struktur der Laramide Platte ist sehr kompliziert. In den Profilen a) und d) sehen wir einen klaren geneigten Verlauf der Platte nach Osten, während dazwischen, auf den Profilen b) und c) die Laramide Platte nach Westen geneigt ist (magenta Plus Zeichen). Das könnte durch Risse in der Platte und durch ein Absinken (Delamination) eines großen Teils der Platte verursacht sein. Komplizierte Strukturen von Subduktionszonen sind nicht ungewöhnlich. Es ist bekannt, dass z.B. der westliche Teil der Subduktion unter den Alpen nach Süden geneigt ist, während sich der östliche nach Norden neigt. In Abb.7 ist ein aus den Daten hervorgegangenes Cartoon der Mantellithosphäre des nordwestlichen und zentralen Nordamerika dargestellt. Die Struktur ist sehr kompliziert. Sie wird im wesentlichen beherrscht von der aus dem Westen flach einfallenden Subduktion der Laramide Platte. Im Osten sind die Strukturen noch nicht klar zu erkennen, da hier der vollständige Datensatz noch nicht ausgewertet ist. Auffallend ist, dass in Abb.7 der Yellowstone Vulkan sich direkt auf der Bruchstelle der Lithosphäre befindet. Das könnte ein Hinweis dafür sein, dass der Vulkanismus durch die Delamination hervorgerufen wurde und nicht durch einen Plume (siehe z.B. Fouch 2012).

Schlussfolgerung

Die bisher am höchsten auflösende Analyse der Lithosphäre unter Nordamerika zeigt deutliche Anzeichen für fossile Subduktion, was darauf hindeutet dass das Subduction Stacking Modell (siehe Abb.4) ein realistisches Modell für die Entstehung der Kontinente ist.

Wir haben ähnliche Untersuchungen wie in Nordamerika auch in Skandinavien durchgeführt und sind dabei ebenfalls auf geschichtete Strukturen in der Mantellithosphäre gestossen (Kind et al. 2013). Das könnte bedeuten, dass dieses Model auch für andere Krantone gilt.

Literatur

Aulbach, S. (2012). Craton nucleation and formation of thick lithospheric roots. Lithos, 149, 16–30

Barrell, J. (1914). The strength of the Earth's crust. Journal of Geology 22, 655–683.

Fouch, M.J. (2012). The Yellowstone hot spot: Plume or not? *Geology 40,5,* 479-480, DOI:10.1130/focus052012.1.

Gregersen, S. and Voss, P. (2009). Stress change over short geological time: case of Scandinavia over 9000 years since the Ice Age, in: Paleoseismology: Historical and prehistorical records of earthquake ground effects for seismic hazard assessment, edited by: Reicherter, K., Michetti, A. M., and Silva Barroso, P. G., Geological Society of London, Special Publications, 316, 173–178,

Kind, R., Yuan, X. and Kumar, P. (2012). Seismic receiver functions and the lithosphere-asthenosphere boundary, Tectonophysics, 536–537, 25–43

Kind, R., F. Sodoudi, X. Yuan, H. Shomali, R. Roberts, D. Gee, T. Eken, M. Bianchi, F. Tilmann, N. Balling, B.H. Jacobsen, P. Kumar and H.W. Geissler (2013).Scandinavia: A former Tibet? Geochem. Geophys. Geosyst 14*,* 4479–4487, doi:10.1002/ggge.2025

Wegener, Alfred (1912). Die Herausbildung der Grossformen der Erdrinde (Kontinente und Ozeane), auf geophysikalischer Grundlage. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 63: 185–195, 253–256, 305–309.

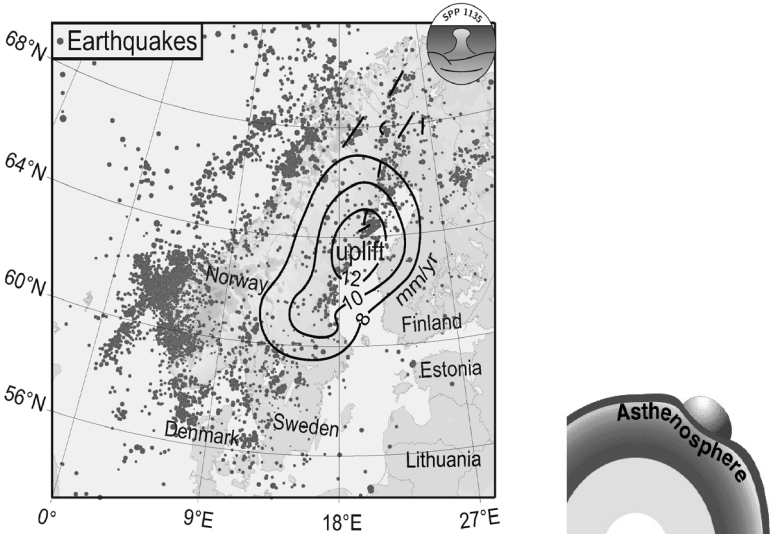

Abb. 1: Links: *Hebungsraten und Erdbeben in Skandinavien (Gregersen and Voss 2009).* Rechts: *Definition von Lithosphäre und Asthenosphäre (graue Schicht: Lithosphäre).*

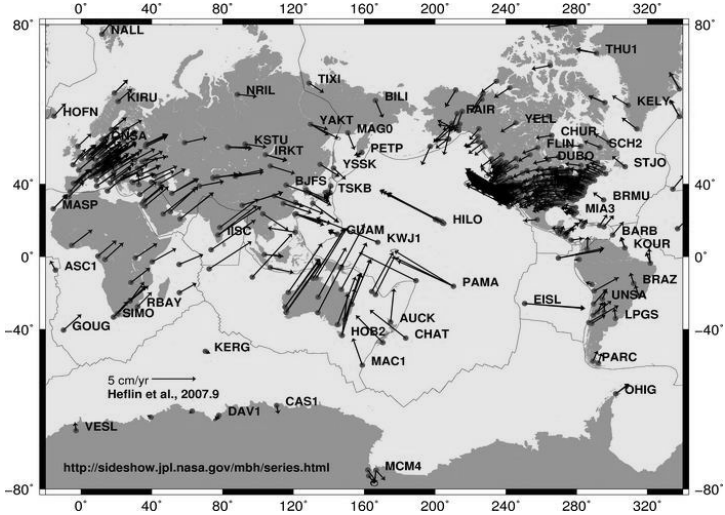

Abb. 2: Mit Hilfe von Satelliten (GPS) beobachtete Bewegungen der Lithosphärenplatten. Pfeile zeigen die Geschwindigkeit und Richtung der Plattenbewegungen an. Die Plattengrenzen sind durch dünne Linien markiert (Quelle: NASA).

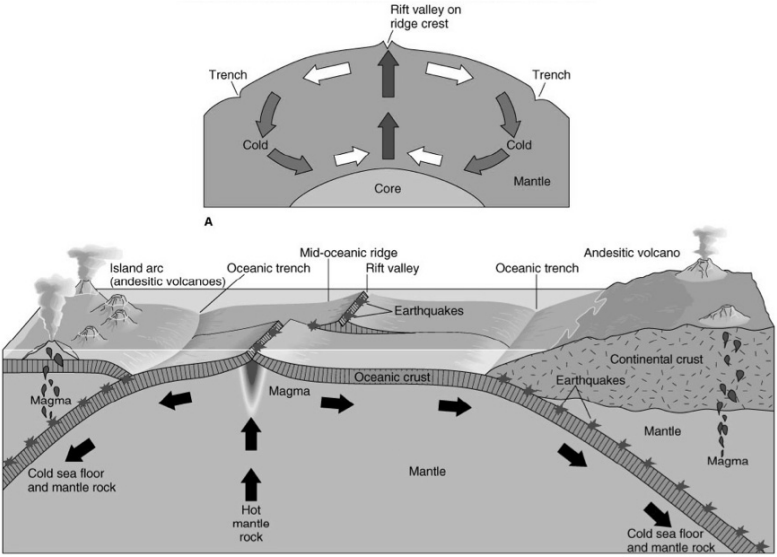

Abb. 3: Grundlage der Plattentektonik ist dieMantelkonvektion (oberes Bild). Auf Grund starker Temperaturunterschiede (und damit Dichteunterschiede) zwischen Erdkern und Erdmantel kommt es zu Aufwärtsbewegungen heißen Materials und zu Abwärtsbewegungen kalten Materials. Diese Strömungen im Erdmantel sind die Ursache für die Verschiebungen der Lithosphärenplatten (unteres Bild). Die ozeanischen Platten sind dünn, entstehen an den mittelozeanischen Rücke und versinken nach geologisch relativ kurzer Zeit bei der Kollision mit kontinentalen Platten oder anderen ozeanischen Platten wieder im Erdmantel. Die kontinentale Platten sind mächtiger und leichter und subduzieren deshalb kaum.

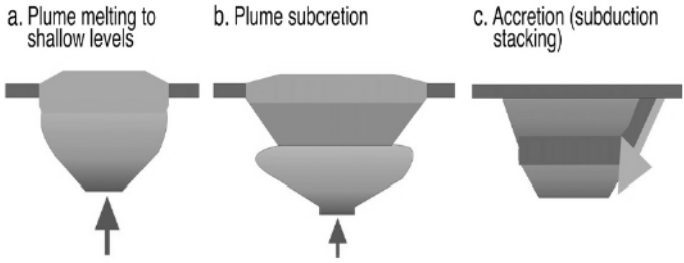

Abb. 4: Hypothese für die Entstehung der Kontinente (Aulbach 2012). Die beiden linken Abbildungen zeigen verschiedene Versionen der Entstehung durch Plumes. Das rechte Bild stellt die Stapelung (Stacking) ursprünglich ozeanischer Platten dar.

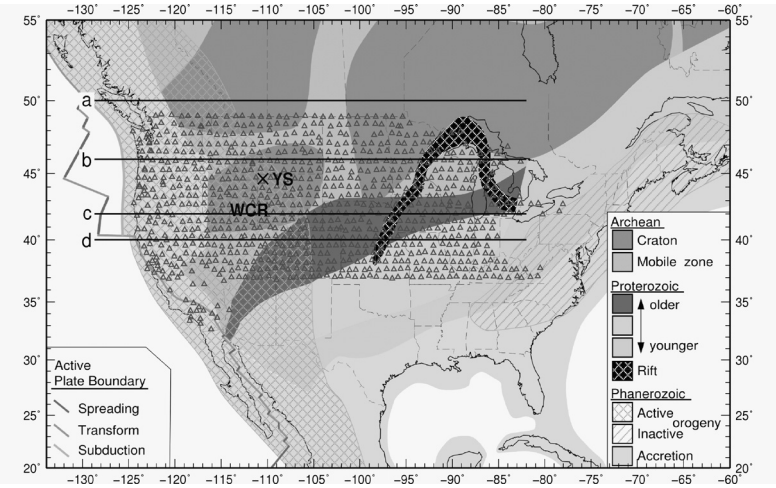

Fig. 5: Geologische Karte der Vereinigten Staaten mit den hier benutzten seismischen Stationen (rote Dreiecke). WCR=Wyoming Kraton, X=Yellowstone, die schwarzen Linien a-c bezeichnen die Lage der seismischen Profile in Abb. 7.

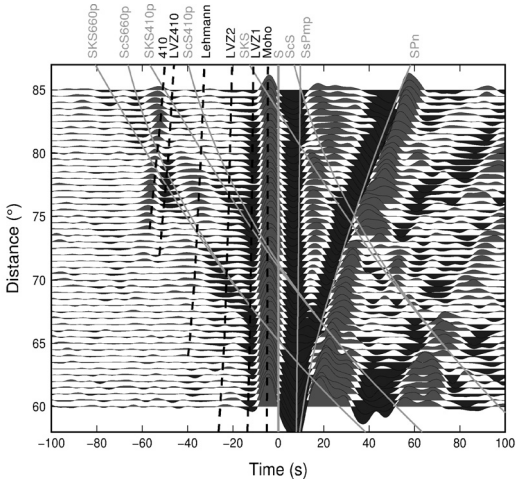

Abb. 6: Summierte seismische Signale von über vierzigtausend registrierten Seismogrammen (USArray Projekt). Die Daten sind nach Vorprozessierungen über jeweils ein halbes Grad Epizentralentfernung summiert. Die Ankunftszeit der S Welle ist bei 0 Sekunden. Eine Vielzahl von seismischen Signalen ist zu beobachten. Zu negativen Zeiten kommen die interessanten konvertierten Signale aus dem oberen Mantel an, zusammen mit anderen störenden Signalen, die heraus gefiltered werden müssen.

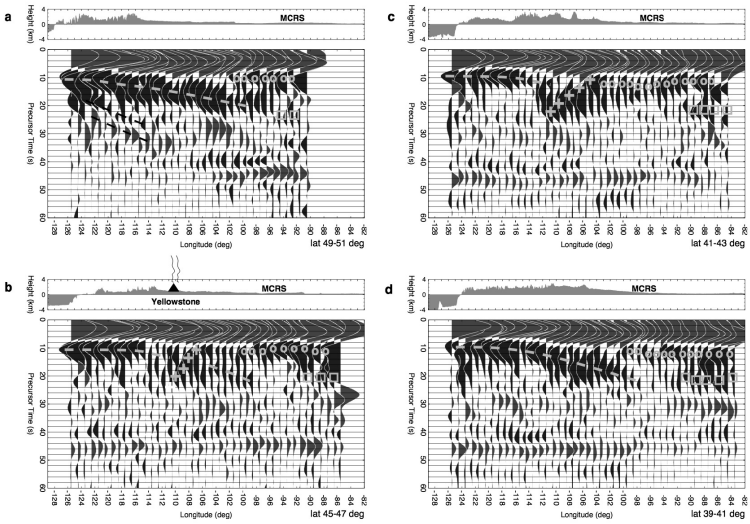

Abb. 7: Seismische West-Ost Profile durch Nordamerika (siehe Abb.5). Über den seismischen Profilen sind die topografischen Profile eingezeichnet, MCRS bezeichnet das Mid Continental Rift System. Die gestrichelten Linien markieren eine von der Westküste bis weit unter den kratonischen Teil der USA abtauchende Unterkante einer Subduktionszone. Es handelt sich wahrscheinlich um die Laramide Subduktion, die vor 70-80Millionen Jahren stattfand.

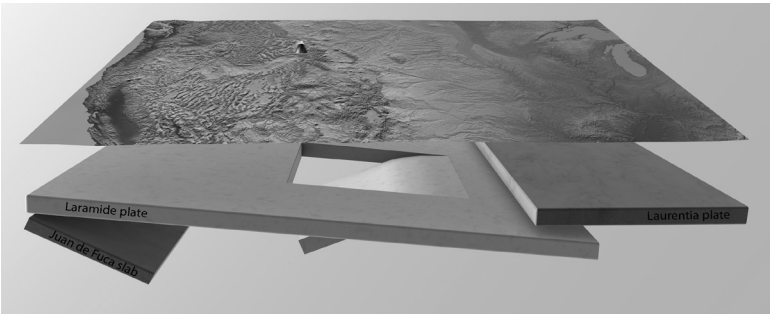

Abb. 8: Cartoon des aus den Receiver Function Daten folgenden Modells der Lithosphäre unter Nordamerika.