

Mantels in Betracht gezogen werden, wie etwa zwischen der Gutenberg-Diskontinuität und der Mantelübergangszone.

Eine deutliche konvertierte Phase (mit D bezeichnet) tritt in der Plumezone (*Abbildung 5.24*) bei $83,4 \pm 0,7$ s auf. Zu ähnlicher Zeit ist zwar auch ein Maximum in der nordwestlichen Zone zu beobachten, hier allerdings mit wesentlich geringerer Amplitude, so dass diese Konvertierte auf den vom Plume beeinflussten Bereich beschränkt zu sein scheint.

Schließlich fällt eine recht spät auftretende Phase auf (gekennzeichnet mit E), welche eine etwas schwächere Amplitude aufweist, jedoch in allen drei Zonen und damit im gesamten Messgebiet nachweisbar ist. In der Plumezone (*Abbildung 5.24*) ist diese bei $123,5 \pm 0,4$ s zu erkennen, etwas später, bei $124,8 \pm 1$ s, im südöstlichen Bereich (*Abbildung 5.25*) des Messgebietes. Zwar tritt zu annähernd der selben Zeit auch in den Multiplen ein kohärentes Signal auf, jedoch kann diese Phase ebenfalls im nordwestlichen Bereich (*Abbildung 5.26*) beobachtet werden, wo sie mit $126,1 \pm 0,6$ s ungefähr die selbe Verzögerung aufweist, wie bereits bei P_{410S} und P_{660S} beobachtet. Somit ist die Annahme plausibel, dass Phase E eine direkte Konvertierte ist.

5.2 Diskussion und Interpretation

Nachdem die Beobachtungen umfassend dargestellt wurden, sollen in diesem Kapitel die Ergebnisse interpretiert und diskutiert werden. Die Untersuchung der verschiedenen Strukturen hat eine Reihe interessanter Resultate geliefert, die neue Erkenntnisse beinhalten und hier eingehender hinterfragt und ausgeführt werden sollen.

Die ozeanische Kruste hat wegen ihrer geringen Mächtigkeit in Hinblick auf den Plume-Vulkanismus keine Bedeutung. Die Anzahl und Verteilung der Stationen, wie auch die Datenmenge, hat allerdings erstmals ermöglicht, den Verlauf der Mohotiefe entlang der Inselkette zu untersuchen. Soweit durch bisherige Studien belegt, bestätigt die Untersuchung die bekannten Krustenmächtigkeiten unter Hawaii. Diese beläuft sich im jüngeren Teil auf ca. 12 km und vergrößert sich im älteren Teil auf etwa 15 km.

Die zunehmende Tiefe der Moho erklärt sich aus der Subsidenz: Das gefördert Material, welches die Inselkette aufbaut, stellt einen Massenüberschuss im Vergleich zur umliegenden ozeanischen Kruste dar und führt daher zum Einsinken in den darunter befindlichen Mantel. Die Identifizierung der Moho erwies sich als schwierig, da das Moho-Signal im jüngeren Teil der Inselkette von einer deutlich stärkeren innerkrustalen Konvertierten überlagert wird. Diese Krustenphase konnte zwischen dem Südteil Oahus bis unter Big Island beobachtet werden. Ihre Ankunftszeit verringert sich dabei kontinuierlich zu den jüngeren Gebieten hin.

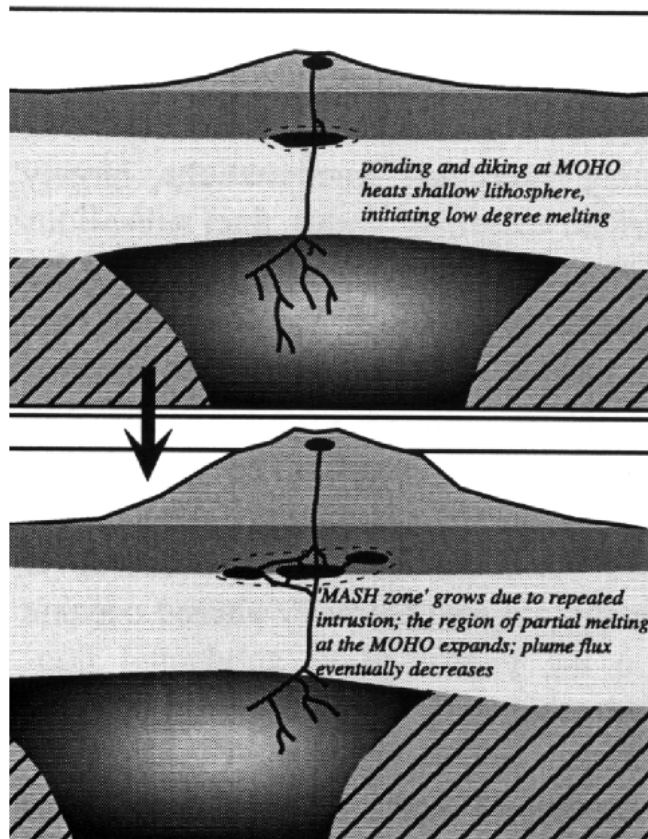


Abbildung 5.27: Vorgeschlagenes Modell der MASH-Zone innerhalb der Kruste. Wiederholte Intrusionen führen zu partieller Aufschmelzung des umgeben Gesteins. Die laterale Ausdehnung ist eine Folge der Plattenbewegung (aus: Wang et al. (2003)).

Gleichwohl die resultierende Tiefe im Südosten von Big Island mit der Magmakammer des Kilauea erklärt werden kann, scheint die Begründung dieser Phase allein durch Einflüsse solcher Kammern wegen der Ausdehnung wenig plausibel.

Einen Erklärungsansatz liefert eventuell ein von Wang *et al.* (2003) vorgeschlagenes Modell: Basierend auf der Beobachtung geringer Kristallisationstiefen des Olivin von 15 km bis 5 km bei gleichzeitigem Auftreten einer an ^{18}O abgereicherten Magmakomponente, wird die Entstehung von sogenannten MASH-Zonen (*Melting-Assimilation-Storage-Homogenization*) vermutet, welche durch wiederholte Intrusionen von Magma und dadurch bedingte partielle Aufschmelzung entstehen könnten.

In solchen Zonen, so die Annahme, würde das Magma mit der abgereicherten Komponente kontaminiert und vermischt werden. Die laterale Ausdehnung des magmatischen Systems wäre eine logische Konsequenz der Plattenbewegung. Eine Erklärung für das kontinuierliche Abflachen einer Akkumulation solcher Mischzonen bietet das Modell jedoch nicht. Es bleibt jedoch die Feststellung, dass die lineare Tiefenänderung entlang der Inselkette erfolgt und daher wahrscheinlich mit dem Vulkanismus zusammenhängt.

Die Untersuchung der Kruste brachte ein weiteres Ergebnis für die Moho unter der Station KIP auf Oahu. Dieses steht allerdings nicht mit dem Einwirken des Mantelplumes

in Verbindung. In einer Sektion von Einzelspuren wurden unterschiedliche Ankunftszeiten der Moho-Konvertierten registriert, was auf unterschiedliche Tiefenlagen hindeutet. Das azimutale Verhalten der Laufzeiten wies dabei auf eine Neigung hin. Die Untersuchung der T-Komponenten zeigte zudem einen Polaritätswechsel des entsprechenden Signals mit einer Periodizität von 360° . Aus den Beobachtungen folgt, dass die Moho unter Oahu mit einem Streichen von ca. 210° nach Südosten geneigt ist.

Eine weitere denkbare Erklärung für das beobachtete periodische Verhalten liegt im Auftreten von Anisotropie in einem transversal-anisotropen Medium bei nicht-horizontaler Symmetrieachse (Saul, 2003). Die Untersuchung der Aufspaltung von Scherwellen im Mantel belegt das Auftreten von Anisotropie im Messgebiet. Die Orientierungen der schnellen Achse entsprechen dem Szenario des *parabolischen asthenosphärischen Fließmodells*, verursacht durch aufsteigendes Material, welches durch die Plattenbewegung einer Scherung unterworfen ist (Walker *et al.*, 2001; Vinnik *et al.*, 2003; Walker *et al.*, 2003).

Die Ausrichtung der schnellen Achse entspricht auf den Inseln demnach also der Richtung der Plattenbewegung, und stimmt gleichzeitig mit der aus den *Receiver Functions* ermittelten Neigungsrichtung der Moho überein. An der Station KIP gehen Walker *et al.* (2001) jedoch von einem Zweischicht-Modell aus, das für die Lithosphäre eine abweichende Orientierung aufweist. Ein Zusammenhang der beobachteten Moho-Anomalie mit Anisotropie-Effekten besteht somit wahrscheinlich nicht.

Die Lithosphären-Asthenosphären-Grenze bzw. Gutenberg-Diskontinuität ist in ozeanischen Gebieten meist deutlich ausgeprägt, so auch unter Hawaii. Die an dieser Grenzschicht entstehende negative Phase (P_{GS}) kann im gesamten Messgebiet klar identifiziert werden und liefert interessante Ergebnisse.

Im Verlauf der Inselkette weist die Gutenberg-Diskontinuität unterschiedliche Tiefen auf. Unter den südöstlichen Inseln Big Island und Maui bis hin zum südlichen Bereich von Oahu lässt die Ankunftszeit der P_{GS} auf eine Tiefe von rund 90 km schließen. Dies ist etwas tiefer als in den meisten früheren Publikationen angenommen. Im nordwestlichen Bereich, beginnend unter Oahu, nimmt die Ankunftszeit der P_{GS} recht schnell auf 7 - 7,5 s ab, so dass die Mächtigkeit der Lithosphäre hier auf etwa 60 - 65 km verringert ist.

Auf der Insel Midway registrierte Daten ergeben eine vergleichbare Tiefe. Somit kann festgestellt werden, dass die verringerte Tiefe der Lithosphären-Asthenosphären-Grenze über eine weite Strecke erhalten bleibt. Ps-Konversionen decken jedoch in dieser Tiefe lediglich das Gebiet unmittelbar unterhalb der Inseln ab. Erst die Kombination mit Ergebnissen aus einer Studie von Sp-konvertierten Wellen (Li *et al.*, 2004) erlaubt eine großflächige Betrachtung der Gutenberg-Diskontinuität.

Mit den *S-Receiver Functions* kann eine durchschnittliche Tiefe von 90 - 100 km im Messgebiet bestätigt werden. Dies entspricht der zu erwartenden Mächtigkeit einer 90 - 100 Mio Jahre alten Lithosphäre. Die festgestellte Abflachung der Gutenberg-Diskontinuität unter dem älteren Teil der Inselkette ist seitlich begrenzt. Offenbar handelt es sich um eine Aufwölbung der Lithosphären-Asthenosphären-Grenze, die allerdings nicht unmittelbar dort beginnt, wo der Plume auf die Grenzschicht trifft, sondern etwas nach Nordwesten verschoben ist. Deren laterale Ausdehnung ist geringer als die der Hawaiischwelle.

Der Verlauf der Diskontinuität ist in einem schematisierten Modell der Mantelstrukturen unter Hawaii in *Abbildung 5.28* dargestellt. Offenbar erfolgt die Aufwölbung nicht sofort mit dem Auftreffen des heißen Plumematerials, sondern nimmt, abgeleitet vom Alter Oahus, etwa 3 Mio. Jahre in Anspruch. Dieses Verhalten deutet auf eine dominierende Rolle der Temperatur bei der Regulierung der Lithosphärenmächtigkeit hin.

Da Mantelgestein in der Regel eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist, die Aufwölbung gleichzeitig jedoch in unverändertem Maße auch noch unter der Insel Midway beobachtet wurde, führt dies zu der Schlussfolgerung, dass ein Großteil des Plumematerials die Lithosphäre nicht durchdringt, sondern unter der Grenzschicht zurück gehalten wird. Diese Annahme geht konform mit der beobachteten Anisotropie im Messgebiet und dem zu Grunde liegenden *parabolischen asthenosphärischen Fließmodell* (Walker *et al.*, 2001; Vinnik *et al.*, 2003; Walker *et al.*, 2003).

Auf Grund der Plattenbewegung und des umgebenden viskosen Materials verteilt sich das aufgestiegene heiße Material entlang des *Plume-tracks*. Dies würde ein langzeitiges Einwirken der erhöhten Temperatur auf die Unterseite der Lithosphäre begründen und könnte gleichzeitig zur Erklärung der Hawaiischwelle bzw. deren Ursprung beitragen: Das relativ zur Umgebung heißere Material erzeugt eine Auftriebskraft und verursacht so ein *thermisches Uplift*.

Neben dem ausgedünnten Bereich der Lithosphäre im älteren Teil der Inselkette, kommt es auch unter Big Island zu einer leichten Verfrühung der P_G s. Dieser Bereich korreliert mit dem Auftreten einer weiteren negativen konvertieren Phase bei etwa 14 s, deren Auftreten wiederum auf eine Niedriggeschwindigkeitszone zurückgeführt wird. Als Ursache wird eine Zone partieller Schmelze in etwa 140 km Tiefe innerhalb der Asthenosphäre angenommen, welche mit dem Erreichen des trockenen Solidus des dehydrierenden Olivins im Plumematerial erklärt wird (Li *et al.*, 2000b).

Mit der verfügbaren Datenbasis, die speziell im Bereich von Big Island eine sehr gute Überdeckung erreicht, konnte die Lage dieser Zone genauer untersucht werden. Demnach erstreckt sie sich über fast 100 km unter dem südwestlichen bis zentralen Bereich von Big Island mit einer lateralen Ausdehnung von rund 40 km.

Bei der Untersuchung plumebedingter Anomalien waren die Diskontinuitäten der Mantelübergangszone von besonderem Interesse, die wegen ihrer Druck-Temperatur-Abhängigkeit direkte Rückschlüsse auf die Position eines Plumes zulassen. Die beiden stärksten Diskontinuitäten in 410 km und 660 km Tiefe wurden im Messgebiet klar nachgewiesen. Im Durchschnitt zeigen beide Konvertierte im Messgebiet eine Verzögerung von etwa 2 s relativ zum *IASP91*-Erdmodell.

Da die Phasenübergänge auf Temperaturänderungen üblicherweise mit gegenläufigen Tiefenänderungen reagieren, muss die Ursache der Verzögerung im darüber liegenden Mantel liegen. Eine Erklärung hierfür liegt folgerichtig in dem vorgeschlagenen Mechanismus zur Erklärung der aufgewölbten Gutenberg-Diskontinuität, da das unterhalb der Lithosphäre angelagerte heiße Plumematerial eine Reduzierung der S-Wellengeschwindigkeit bewirkt.

Zur genauen Lokalisierung des Hawaii-Plumes wurde mittels eines Summationsverfahrens eine kleinräumige Kartierung der Ankunftszeiten der P_{410s} und P_{660s} durchgeführt. Bedingt durch den hohen Rauschpegel brachte die Summation nicht die erforderliche Genauigkeit für eine exakte Bestimmung der Topographie beider Diskontinuitäten, erlaubte jedoch eine klare Unterteilung des Messgebietes in drei verschiedene Bereiche.

Der erste Bereich hat einen Radius von 200 km und orientiert sich an früh auftretenden P_{660s} -Phasen südwestlich von Big Island, während der zweite Bereich eine Zone sehr früh auftretender P_{410s} -Phasen im jungen Teil der Inselkette umspannt. Der dritte Bereich umfasst schließlich das Gebiet von etwa der Mitte Big Islands nordwestwärts bis Kauai.

Der erste Bereich ist gekennzeichnet durch eine Abnahme der Differenzzeit der Mantelphasen, die eine Ausdünnung der Mantelübergangszone anzeigt. Diese wird vor allem durch die Aufwölbung der 660-km-Diskontinuität verursacht. Durch Variation des Zonenradius und Einteilung in ringförmige Teilgebiete konnte ein heißer Kernbereich mit etwa 120 km Radius abgeleitet werden. Hier beträgt die Differenz mit 20,3 s fast 4 s weniger als nach *IASP91* entsprechend einer Ausdünnung der MTZ um etwa 40 km. In Entfernungen von mehr als 200 km vom Mittelpunkt der Zone ist kein Einfluss des Plumes mehr nachweisbar.

In den beiden anderen Bereichen ist die Mächtigkeit der MTZ nur minimal beeinflusst, so dass eine Temperaturänderung in der Übergangszone hier keine Rolle spielt. Deutlich unterschiedlich sind aber die Ankunftszeiten in beiden Zonen. Im Südosten entsprechen diese annähernd dem *IASP91*-Modell, was darauf schließen lässt, dass hier keinerlei Beeinflussung durch den Mantelplume stattgefunden hat. Im Bereich nordwestlich davon hingegen sind beide Mantelphasen um ca. 3 s verzögert.

Die vorliegende Untersuchung bestätigt somit die von Li *et al.* (2000b) postulierte Position des Plumeschlauches in 660 km Tiefe ebenso wie die angegebene Ausdünnung der MTZ um

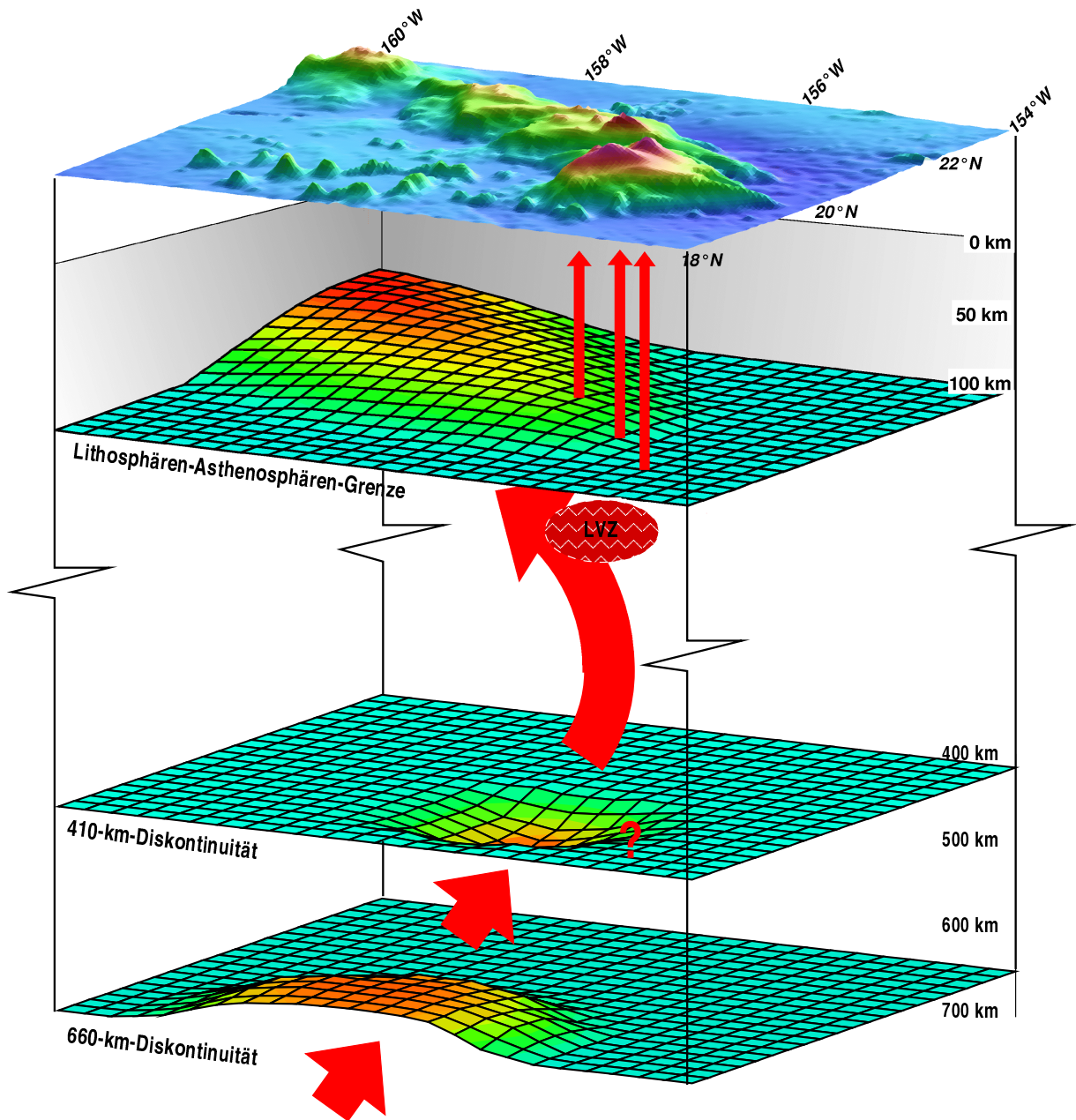


Abbildung 5.28: Schematisierte Darstellung des Plumeweges und der beobachteten Strukturen des oberen Mantels unter Hawaii. Die Darstellung der Topographie und der Tiefen ist nicht maßstabsgetreu. Die Abbildung zeigt die temperaturbedingten Einflüsse des Plumes (mit Pfeilen angedeutet) auf die Diskontinuitäten in 410 km und 660 km sowie auf die Lithosphären-Asthenosphären-Grenze. Da die Aufwölbung dieser Grenzschicht verzögert auftritt, ist zu vermuten, dass ein beträchtlicher Anteil des Plumematerials unterhalb der Lithosphäre zurückbleibt und wegen der Plattenbewegung verschmiert.

ca. 40 - 50 km. Dies entspricht einer Temperaturerhöhung um 300 - 400°C, wie sie in etwa auch von Zhong und Watts (2002) und Collins *et al.* (2002) angenommen wurde.

Die postulierte laterale Ausdehnung der ausgedünnten MTZ von rund 700 km entlang der Hawaiischwelle (Collins *et al.*, 2002; Shen *et al.*, 2003) kann hingegen ausgeschlossen werden, da insbesondere dieser gut überdeckte nordwestliche Bereich eine solche Ausdünnung nicht zeigt. Der resultierende geringe Radius des Plumeschlauches ist ein klares Anzeichen dafür, dass das aufsteigende Material die Übergangszone recht schnell durchdringt und die Quellregion des Hawaii-Plumes mit großer Wahrscheinlichkeit tiefer im unteren Mantel liegt.

Leider konnten aus der Kartierung der 410-km-Diskontinuität keine deutlichen Hinweise auf die Position des Plumes abgeleitet werden. Vage Andeutungen zeigen sich lediglich im Bereich zwischen Big Island und Maui. Möglicherweise weist die Diskontinuität wegen ihrer hohen *Clapeyron*-Steigung starke kleinräumige Topographie auf und ist deswegen in der Summation nicht nachweisbar.

Es ist ebenfalls denkbar, dass die Ankunftszeit der P_{410s} außerhalb des zugelassenen Zeitfensters von 43 - 49 s lag, da die festgestellte Geschwindigkeitsanomalie unter der Lithosphäre bereits eine Verzögerung um bis zu 3 s verursachen könnte. Führt die temperaturbedingte Absenkung der Diskontinuität zu einer weiteren Verzögerung von mehr als 2 s, würde sie nicht mehr detektiert werden. Ausgehend von der hinreichend belegten Plumeposition in 660 km Tiefe ist jedoch eine Neigung des Plumeschlauches nach Nordwesten zu erwarten. In *Abbildung 5.28* sind die beschriebenen Ergebnisse zu einem schematisierten Modell zusammengefasst.

Die Beobachtungen der Manteldiskontinuitäten wurden mit der *Bootstrap*-Methode überprüft und bestätigt. Gleichzeitig konnte mit dieser Methode das Auftreten weiterer kohärenter Phasen untersucht werden. Dabei wurde eine multiple Phase beobachtet, die gemessen an ihrer Ankunftszeit von der Lehmann-Diskontinuität stammen könnte. Diese variiert in den drei Bereichen. Im unbeeinflussten südöstlichen Bereich tritt sie etwas verfrüht auf, im Plumebereich hingegen leicht verzögert. Im nordwestlichen Bereich ist sie zwar nicht eindeutig erkennbar, jedoch entsprechend mit der hier vorherrschenden Verzögerung von 3 s angedeutet.

Durch das Auftreten starker multipler Phasen konnte eine direkte Konvertierte der Lehmann im Messgebiet nicht nachgewiesen werden, so dass die eventuelle Multiple den einzigen Hinweis liefert. Die Variation der Ankunftszeiten würde zwar dem vorgeschlagenen Modell entsprechen, nach Rost und Weber (2001) sind jedoch kleinräumige Tiefenänderungen zu erwarten, so dass ein klares multiples Signal von der Lehmann eher unwahrscheinlich ist.

Ebenso umstritten ist die globale Nachweisbarkeit der 520-km-Diskontinuität. Im Bereich des Plumes konnte sie nicht beobachtet werden. Sehr schwach zeigt sich ein entsprechendes Signal im unbeeinflussten Bereich im Südosten. Der deutlichste Hinweis auf eine P_{520s} zeigt sich in einem ringförmigen Gebiet um den Plume herum (siehe *Abbildung 5.23*), allgemein ist sie im nordwestlichen Bereich jedoch nicht zweifelsfrei zu identifizieren.

Sie erscheint hier etwas früher als nach theoretischen Werten zu erwarten, was zur allgemeinen Verzögerung der Ankunftszeiten in dieser Zone im Widerspruch steht. Denkbar wäre ein Einfluss des Phasenüberganges des Diopsid, der bei erhöhten Temperaturen zu einer Aufspaltung der 520-km-Diskontinuität führen kann (Deuss und Woodhouse, 2001). Dies wäre allerdings eher in der Plumezone zu erwarten und ist hier als Erklärung fragwürdig.

Unklar bleibt in dieser Untersuchung auch der Einfluss des Granatanteils auf die 660-km-Diskontinuität bzw. auf das Auftreten einer zusätzlichen 720-km-Diskontinuität bei ansteigenden Temperaturen. Während der nordwestliche Bereich eine stärkere P_{660s} aufweist, die eine Verschmelzung beider Phasen suggeriert, zeigen sowohl die Plumezone als auch der unbeeinflusste südöstliche Bereich je zwei Maxima.

Nach der Theorie dürfte eine Aufspaltung in zwei separate Phasen im unbeeinflussten Bereich nicht auftreten. Zu beachten ist jedoch, dass insbesondere in diesem Bereich deutlich weniger Spuren summiert werden konnten, so dass das Ergebnis hier nicht die gewünschte Zuverlässigkeit besitzt. Ein Auftreten von Granatphasen kann somit weder ausgeschlossen noch klar bestätigt werden.

In früheren Studien wurden tiefere Diskontinuitäten postuliert, wie etwa in 920 km und in 1200 km Tiefe. Tatsächlich lässt sich durch die *Bootstrap*-Methode eine Vielzahl weiterer kohärenter, teils recht starker Phasen identifizieren, deren Ursprung jedoch meist unbekannt ist. Dabei treten sporadisch auch Phasen zu den theoretischen Zeiten der beiden genannten Diskontinuitäten auf. Auf Grund der vielen, zeitlich eher zufällig verteilten Phasen ist deren klare Zuordnung als P_{920s} oder P_{1200s} jedoch nicht schlüssig.

Auffällig sind aber drei deutlich ausgeprägte Phasen, die eventuell mit Konversionen tieferer, mineralogisch jedoch nicht nachgewiesener Grenzschichten zusammenhängen. Eine scheinbar mit einer Ausdünnung der MTZ verknüpfte Phase ist die P_{1050s} , die unter Hawaii und Island beobachtet wurde (Shen *et al.*, 2003) und entsprechend im Plumbereich zu erwarten ist. Diese Phase kann bei rund 100 s beobachtet werden und ist tatsächlich allein auf den Plumbereich beschränkt.

Daneben ist eine weitere Phase bei etwa 83,4 s zu beobachten, die ebenfalls in der Plumezone deutlich zu erkennen ist. Etwa 1 s früher tritt auch im nordwestlichen Bereich ein Signal auf, ist hier jedoch deutlich schwächer, so dass auch diese Phase vorwiegend auf den Plumbereich beschränkt ist. Denkbar ist ein Zusammenhang mit der endothermen 660-km-

Diskontinuität, welche das Durchdringen des Plumematerials behindert, so dass dieses unter der Übergangszone teilweise zurückgestaut werden kann (Marquart und Schmeling, 2000). Die Temperaturerhöhung könnte eine Reduzierung der S-Wellengeschwindigkeit bewirken, so dass eine positive Konvertierte an der Unterseite der Stauzone erzeugt würde. Nach *IASP91* entspricht die Ankunftszeit einer Tiefe von ca. 840 km, unter Beachtung der Laufzeitverzögerung im oberen Mantel könnte eine solche Stauzone demnach eine Mächtigkeit von 140 - 180 km aufweisen.

Schließlich tritt eine Phase bei ca. 124 s auf. Diese ist weniger deutlich ausgeprägt, dafür aber in allen Bereichen des Messgebietes erkennbar. Da diese konvertierte Phase zudem die im nordwestlichen Bereich typische Verzögerung von ca. 3 s aufweist, liegt die Vermutung nahe, dass es sich hier um eine tatsächliche regional auftretende Diskontinuität handelt.

Die Ursache der übrigen direkten und multiplen Phasen ist unklar. Vereinzelt Störsignale kommen angesichts der Anzahl aufsummierter Spuren als Erklärung jedoch nicht in Frage. Eine mögliche Ursache könnte das Auftreten anisotroper Schichten oder Grenzflächen sein (Jones und Phinney, 1998; Savage, 1998). Eine Untersuchung von Ekström und Dziewonski (1998) zeigt eine deutliche großräumige anisotrope Abnahme der SV-Geschwindigkeit in etwa 150 km Tiefe südwestlich von Hawaii.

Möglicherweise treten jedoch auch in größeren Tiefen Anisotropie-Effekte als Ursache der verschiedenen beobachteten Phasen auf. Für eine Bestätigung sind jedoch nähere Untersuchung des Anisotropie-Verhaltens des tieferen Mantels notwendig.

