

Abstract

Lascar, the most active volcano in northern Chile, lies near the center of the region studied during the Proyecto de Investigación Sismológica de la Cordillera Occidental 94 (PISCO '94). Its largest historical eruption occurred on 19 April 1993. During the spring of 1994, its activity consisted mainly of a plume of water vapor and SO₂. In April and May 1994, three short-period, three-component seismometers were placed on the flanks of the volcano, augmenting the broadband seismometer located on the NW flank of the volcano during the entire deployment. In addition to the usual seismic signals recorded at volcanoes, during this deployment Lascar produced several unusual tremor types: Rapid-fire tremor, tornillos and harmonic tremor.

Rapid-fire tremor (RF tremor) appears to be a sequence of very similar, but independent, impulsive events (RF events) with a large range of amplitudes. The similarity in the frequency content of many of the individual RF events indicates that they are all generated in a single relatively small volume near or under the active crater. Statistical analysis of a suite of these events indicates that both large and small RF events have similar source mechanisms.

Tornillos, nearly monochromatic events with slowly decaying codas are present at frequencies between 1 and 4 Hz, as at other volcanoes in South America. Additional tornillos were recorded with characteristic frequencies between 5 and 10 Hz. The mechanism which produces these unusual waveforms is still unknown.

Harmonic tremor is a continuous, cyclic signal lasting several hours. It is characterized by a spectrum with peaks at a fundamental frequency at about 0.63 Hz and up to 30 integer overtones. Power spectra and spectrograms of Lascar's harmonic tremor demonstrate that the frequencies recorded are the same at all stations, and therefore cannot be explained as path effects. They must be attributed to mechanisms at or near the source. On the other hand, the polarization of the wavefield cannot be simply explained as the propagation from a single source of any of the classical types of seismic waves. Harmonic tremor signal polarization and amplitudes are not correlated across the network, while frequency changes are consistent across stations and components. The fundamental frequency changes at the

same time at all stations, indicating that such changes must be caused at the source. These observations must be explained by volcano models.

Two particular observations of the spectral peaks of Lascar's harmonic tremor lead to the suggestion of new models for the source of this tremor. First, changes in the frequency of the fundamental, f_1 , are reflected exactly in the frequencies of the overtones, $f_n(t) = nf_1(t)$, while peak-broadening in the power spectra is the result of shifts in the frequency as a function of time. Secondly, many, up to 30, overtones were observed at Lascar. Harmonics are not only observed as higher order resonances of an oscillating system. They also occur in the spectrum of a source signal if it is repetitive but nonsinusoidal. Fluid dynamics offers at least three source models for harmonic tremor for systems which may exist in volcanos and which produce repetitive, nonsinusoidal waveforms: The release of gas through a very small outlet (the soda bottle model), regular, intermittent turbulence in a narrow conduit (the slug flow model), and the shedding of von Kármán vortices produced at obstacles (the vortex shedding model). These models represent different flow regimes, each with its own characteristic range of Reynolds numbers. For each model, the fundamental frequency of the tremor is related to the Reynolds number for the flow. Combining the Reynolds numbers for each model with typical kinematic viscosities for the possible fluids present in a volcano — magma, water, steam, air or some combination, at appropriate temperatures and pressures — provides limits on such physical parameters of the volcano as the dimensions of the flow conduit and the flow velocity of the fluid generating the tremor. If any single one of these three models is actually the process in the volcano which generates harmonic tremor, then the tremor must be caused by movements of water or gases in the hydrothermal system near the volcano's surface.

The interpretation of the polarization of the harmonic tremor wavefield is more difficult than in earthquake seismology, where the polarization is used to determine wavetype and the direction to the source. Volcanic tremor in general, and each peak of harmonic tremor in particular, consists of a narrowband wavefield propagating through the heterogeneous volcanic edifice. While its polarization may be due to a complicated source mechanism or an extended source, simple models for scattering, superposition and surface reflection can

qualitatively explain its complexity. For an impulsive source pulse, propagation through a three-dimensional acoustic model of random scatterers reproduces the well-known shape of volcanic shocks, with the density of the scatterers controlling the length and the relative amplitude of the coda. While the polarization of the initial arrivals depends only on the direction between the source and the receiver, the polarization of the coda is random and changes for each realization of the medium. Continuous narrowband signals, simulated by a sine wave, produce a transient following the first arrival, during which the scattering space is filled by waves. When the scattering space has been saturated, the polarization at the receiver remains constant, but apparently unrelated to the source-receiver direction. Small changes in the frequency or location of the source may cause large changes in the polarization. For a wavefield such as that generated by harmonic tremor, both the polarization and amplitude of the individual spectral lines depend strongly on their frequency. Similarly, superposition of continuous, narrowband P- and S-waves or the effects of reflection at the receiver produce an initial transient and then a constant wavefield polarization with little relationship to the source-receiver direction. The polarization of volcanic tremor's continuous, narrowband signals tells more about the medium than the source.

Zusammenfassung

Lascar, der aktivste Vulkan im Norden Chiles, ist ein mehr als 5000 m hoher Stratovulkan bei $23^{\circ} 22' S$, $67^{\circ} 44' W$. Sein größter, historisch bekannter Ausbruch fand am 19. April 1993 statt. Lascar liegt im Zentrum eines während des Proyecto de Investigación Sismológica de la Cordillera Occidental 94 (PISCO '94) aufgebauten seismischen Netzes. Im Rahmen dieser Messkampagne nahmen Mitarbeiter des Sonderforschungsbereichs (SFB) 267, '*Deformationsprozesse in den Anden*', die großräumige Seismizität der Zentralanden auf. Während dieses Messprogramms wurde im April und Mai 1994 für mehr als 30 Tage auch ein Seismometer-Netz um den Vulkan installiert. Es bestand aus einem Breitbandseismometer an der Nordwestflanke und drei kurzperiodischen Dreikomponenten-Stationen im Nordosten sowie an der Südseite. Während der Messungen war Lascars eruptive Aktivität weitgehend abgeklungen. Allerdings konnte das kontinuierliche Ausströmen großer Mengen von Wasserdampf und SO_2 beobachtet werden. Von den Instrumenten des Lascar-Netzes wurden außer den üblichen vulkanseismischen Signalen drei ungewöhnliche Tremortypen registriert: Rapid-Fire Tremor, Tornillos und harmonischer Tremor.

Rapid-Fire Tremor (RF-Tremor) besteht aus einer Abfolge von einander in der Wellenform ähnlichen, aber statistisch unabhängigen, impulsiven Ereignissen. Obwohl zwischen den einzelnen RF-Events starke Variationen in der Amplitude bestehen, zeigen ihre Spektren große Ähnlichkeiten. Das deutet darauf hin, dass die Quelle dieser Events in einem begrenzten Volumen in der Nähe des aktiven Krater liegt. Eine statistische Analyse einer großen Anzahl der RF-Events lässt außerdem darauf schließen, dass der Quellmechanismus für alle Ereignisse dieser Klasse sehr ähnlich sein muss.

Bei den Tornillos handelt es sich um Ereignisse mit langsam abklingender Amplitude und einem annähernd monochromatischen Spektrum. Es lassen sich zwei Gruppen unterscheiden mit charakteristischen Frequenzen zwischen 1 und 4 Hz, beziehungsweise zwischen 5 und 10 Hz. Der Quellmechanismus der Tornillos ist noch unbekannt.

In der vulkanologischen Literatur wird schon seit langem "harmonic tremor" an zahlreichen Vulkanen beschrieben. Darunter versteht man in der Regel sinusförmige Tremor-Signale mit einer oder wenigen dominierenden Frequenzen. Lascars harmonischer Tremor ist dagegen ein kontinuierliches, zyklisches Signal, dessen Spektrum aus schmalbandigen Spitzen mit einer Grundfrequenz von 0,63 Hz und bis zu 30 ganzzahligen Vielfachen davon besteht. Während der Messungen gab es einige Phasen harmonischen Tremors, die jeweils mehrere Stunden lang anhielten und an allen Stationen registriert wurden. Wie bei anderen Formen des vulkanischen Tremors gibt es auch beim harmonischen Tremor keine scharfen Einsätze. Vielmehr entsteigt dessen Signal nur langsam aus dem Hintergrundrauschen. Die Signalform des harmonischen Tremors lässt sich durch eine strenge Periodizität und schroffe Spitzen beschreiben. Ziel dieser Arbeit ist es, diesen Tremor an Hand von Signalform und Amplitude zu charakterisieren, ihn zu analysieren und Modelle für seinen Quellmechanismus zu entwickeln.

Ein erster Schritt bei der Analyse des harmonischen Tremors ist es, die für die Erzeugung des Tremorwellenfeldes nötige, im Quellgebiet aufzuwendende Kraft aus der Größe der Signalamplitude abzuschätzen. Dabei wird hier das komplizierte seismische Medium des Vulkangebäudes des Lascar durch einfache Annahmen simuliert, so dass sich bei der Abschätzung lediglich ein unterer Grenzwert der Quellstärke ergibt. Besteht das Wellenfeld des harmonischen Tremors aus P-Wellen, und werden diese Wellen durch eine Punktkraft erzeugt, muss sie mindestens 3×10^8 N betragen. Besteht das Tremorwellenfeld dagegen aus S-Wellen, ist die minimale Punktkraft in der Quellregion dagegen nur 1×10^8 N groß.

Ein zweiter Schritt bei der Analyse ist die Anwendung sogenannter "Phasogramme". Diese Methode erlaubt es zunächst, schmalbandige Signale, wie die der einzelnen spektralen Spitzen des harmonischen Tremors, qualitativ zu untersuchen. Dazu wird die Zeitreihe in einem schmalen Frequenzband um die Grundfrequenz gefiltert. Dabei zeigt sich, dass Frequenzänderungen gleichzeitig und in gleicher Amplitude auf allen Stationen des Netzes zu beobachten sind. Das deutet darauf hin, dass die Frequenzänderungen unabhängig vom

Wellenweg und vom Seismometerort sind, also von der Quelle des harmonischen Tremors herrühren müssen.

Eine quantitative Untersuchung der zeitlichen Änderungen in der Frequenz des Signals ist nach der Berechnung der momentanen Phase, ihrer Ableitung, der momentanen Frequenz, sowie der reduzierten momentanen Phase möglich. Im Gegensatz zu Analysen des zeitlichen Verhaltens der Frequenz mit anderen Methoden wie den Spektrogrammen finden diese Berechnungen im Zeit- und nicht im Frequenzbereich statt. Deshalb können Frequenzänderungen wesentlich detaillierter verfolgt werden.

Die Anwendung dieser Verfahren zeigt, dass die Änderungen der Frequenz des harmonischen Tremor auf allen Komponenten gleichzeitig zu beobachten sind. Im Analyseintervall schwankt die Grundfrequenz zwischen 0,617 Hz und 0,648 Hz. Änderungen der Frequenzen der Obertöne im gleichen Intervall stehen im ganzzahligen Verhältnis zur Änderung der Grundfrequenz. Wenn die Frequenz des Grundtons um 0,05 Hz steigt, steigen beispielsweise die Frequenzen der ersten und zweiten Obertöne um 0,10 Hz beziehungsweise 0,15 Hz.

Die Polarisationsanalyse ist in der Erdbebenseismologie eine wichtige Methode zur Untersuchung eines seismischen Wellenfeldes. Ist beispielsweise der Ort der Quelle bekannt, kann aus der Polarisation eines Wellenzuges der Wellentyp abgelesen werden. Ist dagegen der Wellentyp bekannt, kann man auf die Richtung zur Quelle schließen. Es liegt also nahe zu versuchen, ähnliche Schlüsse auch aus der Polarisation des harmonischen Tremors zu ziehen. Eine Untersuchung der Partikelbewegung für die ersten drei spektralen Spitzen an den vier Stationen des Lascar-Netzes lässt aber keine eindeutige Beziehung zwischen Wellentyp und Ausbreitungsrichtung erkennen. Das gilt einerseits für kurze Zeiträume von mehreren Sekunden. Obwohl sich in dieser Zeit die Orientierungen der Partikelbewegungen für die einzelnen Frequenzen an den verschiedenen Stationen nicht ändern, sind sie nicht - wie bei einem von einem Erdbeben ausgehenden Wellenfeld - mit der Ausbreitung eines einzelnen Wellentyps von einer Punktquelle in einem einfachen Medium zu erklären. Zusätzlich

ist bemerkenswert, dass die Verhältnisse der Amplituden der Bodenbewegungen für die verschiedenen Obertöne an den einzelnen Stationen des Netzes sehr unterschiedlich sind. Auch bei der Analyse längerer Zeitintervalle lässt sich die Polarisierung der Bodenbewegungen an den einzelnen Stationen nicht mit der Ausbreitung eines einzelnen Wellentyps von einer Punktquelle in einem einfachen Medium erklären. Das ergibt die Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der spektralen Intensität sowie die Auswertung zweidimensionaler Histogramme der Polarisierung, der so genannten Polarogramme.

Die Deutung der Polarisierung des Wellenfeldes des harmonischen Tremors ist also weitaus schwieriger als in der Erdbebenseismologie. Obwohl nicht ausgeschlossen werden kann, dass die komplizierte Polarisierung des Tremors von einer komplexen oder ausgedehnten Quelle stammt, können sehr einfache Modelle für Streuung, Wellenüberlagerung und Reflexionen an der Oberfläche die beobachteten Signale erklären. Dazu werden zunächst vulkanische Erdbeben durch eine impulsive Quelle simuliert, deren Wellenfeld sich durch ein dreidimensionalen Raum voller Streukörper ausbreitet. Berechnet wird hier nur der akustische Fall, also die Ausbreitung von P-Wellen. Dabei bestimmen die Anzahl und Dichte der Streukörper die Länge und relative Amplitude der Coda. Obwohl die Polarisierung des Ersteinsatzes nur von der Richtung zwischen Quelle und Empfänger abhängt, ist die Polarisierung der Coda zufällig.

Kontinuierliche, schmalbandige Signale, wie beispielsweise die einzelnen spektralen Spitzen des harmonischen Tremor, werden durch eine Sinuswelle simuliert. In den entsprechenden synthetischen Seismogrammen erscheint nach dem Ersteinsatz ein Einschwingvorgang. In dieser Zeit wird das Medium mit den Sinuswellen gesättigt. Danach bleibt zwar die Polarisierung der Bodenbewegung am Empfänger konstant. Die Polarisierungsrichtung steht aber in keinem Zusammenhang mehr mit der Richtung zur Quelle. Sie wird vielmehr durch die Position und Stärke der Streukörper im Medium bestimmt. Kleine Änderungen in der Frequenz oder der Position der Quelle können große Änderungen in der Polarisierung bewirken.

Das komplette Wellenfeld des harmonischen Tremors, das aus einer Überlagerung von vielen schmalbandigen Signalen besteht, wird durch eine Rechteckwelle simuliert. In diesem Fall hängen sowohl die Polarisation als auch die Signalamplitude der einzelnen spektralen Spitzen nicht nur von der Position und der Stärke der Streukörper ab. Die beiden Messgrößen werden auch stark von der Frequenz der Welle beeinflusst. Bei keinem der schmalbandigen Signale gibt es jedoch eine Verbindung zwischen der Orientierung der Partikelbewegung und der Richtung zur Quelle.

Ein ähnlicher Effekt lässt sich beobachten, wenn man die Ausbreitung von P- und S-Wellen in einem homogenen Medium betrachtet. Ist das Quellsignal impulsiv, kann man klar die Einsätze von P und S auf den radialen und transversalen Komponenten der Seismogramme unterscheiden. Bei der Sinuswelle wird die zunächst in Richtung der Quelle zeigende Polarisation nach dem Eintreffen der S-Wellen verschoben. Das Maß der Verschiebung hängt dabei von der Entfernung zur Quelle ab. Das aus P- und S-Wellen bestehende Wellenfeld einer Rechteckwelle simuliert schließlich die Polarisation des harmonischen Tremor hinreichend. Die Polarisationsrichtungen der einzelnen Oberwellen sind dabei gegenüber der ursprünglichen Richtung der P-Welle jeweils um ein anderes Maß rotiert, so wie es auch beim harmonischen Tremor beobachtet wird.

Da die komplizierte Polarisation des Wellenfeldes des harmonischen Tremors sich mit diesen einfachen Modellen des Mediums erklären lässt, können daraus also keine Informationen über die Quelle abgeleitet werden. Welche Eigenschaften des harmonischen Tremors kann man aber nun benutzen, um die Quelle zu modellieren? Die Frequenzen der Grundmode und der Obertöne bieten sich an, denn sie sind unabhängig von der Station und der Komponente. Sowohl die Grundfrequenz als auch die Obertöne ändern sich in allen Registrierungen gleichzeitig und gleichartig. Ihre Größen können deshalb nicht dem Wellenweg zugeschrieben werden. Die Beobachtungen deuten vielmehr darauf hin, dass die Frequenzänderungen in oder in unmittelbarer Umgebung der Quelle erzeugt werden, also durch physikalische Quellmodelle erklärt werden können. Obwohl die Frequenzen der

spektralen Spitzen und die jeweils empfangene Gesamtleistung des Wellenfeldes an den verschiedenen Stationen gut miteinander übereinstimmen, findet man dagegen in den an den verschiedenen Stationen aufgezeichneten Daten keine Korrelation bei den Tremoramplituden oder den Polarisierungen für die einzelnen spektralen Spitzen. Diese Signaleigenschaften können also nicht eindeutig der Quelle zugeschrieben werden.

In den meisten, bisher veröffentlichten Modellen vulkanischen Tremors wird die Quelle als Resonanz eines schwingungsfähigen Mediums behandelt. Das Medium ist dabei in einem begrenzten Volumen des Vulkans weitgehend stationär. Im Gegensatz dazu schlage ich nun Modelle für den harmonischen Tremor des Lascar vor, die auf der Strömungsmechanik eines fließenden Mediums beruhen. Die Modelle basieren auf zwei wichtigen Eigenschaften der spektralen Spitzen des harmonischen Tremors. Zum ersten gibt es eine genau ganzzahlige Gesetzmäßigkeit zwischen den Änderungen der Grundfrequenz und der Obertöne: $f_n(t) = n f_1(t)$. Zweitens enthalten die Spektren des harmonischen Tremor bis zu 30 Obertöne. Solche Obertöne werden nicht nur als Resonanzen höherer Ordnung in schwingungsfähigen Systemen beobachtet. Sie erscheinen auch in den Spektren von nichtsinusoidalen, jedoch zyklischen Signalen. In der Strömungsmechanik findet man mindestens drei Systeme, die solche zyklischen Signale erzeugen und die bei der Übertragung auf Vulkane realistische Größenordnungen liefern. Es sind:

- Die Bildung einer von-Kármán-Wirbelstraße an einem Hindernis (Vortex Shedding Model),
- intermittierende Turbulenz in einem schmalen Rohr oder Schlot (Slug Flow Model) und
- das langsame Ausströmen von Gas aus einem gesättigten System wie aus einer Sprudelflasche (Soda Bottle Model).

Diese drei Modelle repräsentieren unterschiedliche Flussbedingungen mit jeweils charakteristischen Reynoldszahlen. Für jedes Modell kann man die Frequenz des Tremors mit der Reynoldszahl der strömenden Substanz in Verbindung bringen.

Wirbelstraßen bilden sich häufig hinter einem Hindernis in einer Strömung. Sie entstehen, wenn sich dabei ab einer bestimmten Grenzggeschwindigkeit der Strömung regelmäßig Wirbel von dem Hindernis ablösen. Solche Wirbelstraßen sind beispielsweise die Quelle der Heultöne, die bei einem Sturm an einer Hausecke oder einer Überlandleitung entstehen. Die Frequenz des Heultons entspricht dabei der Ablösefrequenz der Wirbel. Bei einem strömenden Medium mit kinematischer Zähigkeit, κ , und der charakterischen Größe des Hindernisses, d , kann man die Ablösefrequenz, f_k , über die Reynoldszahl, $Re = vd/\kappa$, und die Strouhalzahl, $St = f_k d/v$, mit der Strömungsgeschwindigkeit, v , in Verbindung bringen. Bei der Anwendung dieses Modells auf den Vulkan Lascar nehme ich an, dass die Grundfrequenz des harmonischen Tremor der Ablösefrequenz der Wirbel entspricht. Das erlaubt Aussagen über das Strömungssystem im nicht ausbrechenden Vulkan. Magma scheidet beispielsweise als strömendes Medium aus. Um nämlich eine Tremorfrequenz von 0,63 Hz zu erzeugen, wären Fließgeschwindigkeiten von etwa 100 m/s und ein Hindernis mit einem Ausmaß von etwa 100 m notwendig. Diese Werte sind für einen "ruhenden" Vulkan zu groß. Die entsprechenden Werte für Dampf unter hohem Druck sind dagegen zu klein, um realistisch zu sein. Nur für Wasser, Dampf oder vulkanische Gase unter atmosphärischen Bedingungen ergibt das Modell realistische Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 1 m/s und Hindernisgrößen von etwa 0,1 m. Die sich aus dem Modell ergebende Kraft, die ein ablösender Wirbel auf einen Zylinder ausübt, ist zwar wesentlich kleiner als die Punktkraft, die aus den Seismogrammen für die Quelle errechnet wurde. In der Literatur sind aber viele Hinweise darauf zu finden, dass bei der Berechnung für den einfachen Fall eines Zylinder als Hindernis die Werte für andere Formen von Hindernissen oft um Größenordnungen unterschätzt werden.

Periodische Kräfte gehen häufig auch von Strömungen mit intermittierender Turbulenz aus. Solche "Turbulenzpfropfen" können in einer sonst laminaren Strömung in langen Rohren oder Schloten bei einer kleinen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit entstehen. Das turbulente Gebiet bedingt einen Stau in der Strömung, hinter dem die Geschwindigkeit wieder langsamer wird und die Strömung deshalb in ihren laminaren Zustand zurückkehrt. Im Laufe eines Zyklus arbeitet sich der Turbulenzpfropfen bis zum Ende des Rohrs durch.

Da die Flüssigkeit anschließend wieder ungestört laminar strömen kann, erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit so lange, bis ein neuer Turbulenzpfropfen entsteht. Solche Erscheinungen treten auf, wenn die Länge des Rohrs mindestens das Fünzigfache seines Durchmessers ist. Mit der Bildung und dem Zerfall der Turbulenzen gehen Druckänderungen auf die Wandung des Rohres einher. Daher lässt sich in diesem Modell die Aufenthaltsdauer des Pfropfens im Rohr mit der Tremorperiode gleichsetzen. Nimmt man nun an, dass die Strömungsgeschwindigkeit konstant ist, kann man das Entstehen und das Zerfallen der Turbulenzen mit einer Rechteckwelle modellieren. Aus dem Vergleich ihres Spektrums mit dem Spektrum des harmonischen Tremors ergibt sich für die Strömung eine Reynoldszahl von 2675. Daraus und aus der Frequenz des harmonischen Tremors lässt sich nun eine Abschätzung über die Art des strömendes Mediums machen. Andesit müsste mit mehr als 100 m/s fließen um einen entsprechenden harmonischen Tremor zu erzeugen. Derart hohe Flussgeschwindigkeiten von Magma sind aber in einem "ruhenden" Vulkan nicht zu erwarten. Die Strömungsgeschwindigkeit für Dampf unter hohem Druck ist dagegen mit 0,1 mm/s zu klein, um entsprechende Signale zu erzeugen. Realistische Werte sagt das Modell dagegen für Wasser, Dampf und vulkanische Gase unter atmosphärischen Verhältnissen voraus. Eine Abschätzung der Kräfte, die durch intermittierende Turbulenz in einem Vulkan auf das umgebende Medium ausgeübt werden, ergibt sich aus der Betrachtung der Impulsänderung bei der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit. Für Wasser, Dampf und Luft sind die errechneten Kräfte allerdings um Größenordnungen geringer als man erwartet.

Das dritte Modell lässt sich mit einer Sprudelflasche vergleichen, die nur ein wenig geöffnet wird. Dabei treten oft periodische Druckschwankungen verbunden mit Blasenbildung auf. Nach dem ersten, durch das Öffnen verursachten Druckabfall bilden sich in der Flüssigkeit Blasen. Der damit verbundenen Druckanstieg gleicht zunächst den Druckabfall aus, lässt aber nach einer gewissen Zeit den Druck in der Flasche über den ursprünglichen Wert ansteigen, was die Blasenbildung unterbindet. Neue Blasen bilden sich erst wieder dann, wenn der Druck erneut gefallen ist. Das Druckverhalten dieses Systems kann durch eine nicht-lineare Gleichung beschrieben werden. Unter geeigneten Anfangsbedingungen treten

starke Druckschwankungen auf, die Ähnlichkeit mit den Seismogrammen des harmonischen Tremors haben. Dabei ist es wichtig, dass die Flüssigkeit nur wenig zäh ist. Nimmt man an, dass sich das Quellvolumen durch die Druckschwankungen ändert, kann man die Dimensionen dieser Änderung an Hand der Amplitude der Wegseismogramme abschätzen. Für den Vulkan Lascar ergibt sich dabei ein Grundvolumen von etwas mehr als 30000 m^3 .

Obwohl diesen drei Modellen für die Quelle des harmonischen Tremors völlig unterschiedliche Geometrien und physikalische Vorgänge zu Grunde liegen, zeigen sie doch mindestens eine überraschende Gemeinsamkeit. In ihnen wird der harmonische Tremor des Lascar jeweils durch die Strömungen von Wasser, Dampf oder vulkanischen Gasen in der Nähe der Oberfläche erzeugt. Das lässt den Schluss zu, dass die Quelle im hydrothermalen System des Vulkans zu suchen ist.

