

Die „Beule“ von Lazufre

Aufwölbung eines Vulkanfelds in Chile

Thomas R. Walter, Joel Ruch, Andrea Manconi, Manoochehr Shirzaei, Mahdi Motagh, Jan Anderssohn
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

How fast can volcanoes grow and what is the importance of volcano-tectonic interaction? Using three European satellites we generated an InSAR time series to investigate the spatio-temporal characteristics of volcano deformation in the Plate Boundary Observatory Chile. At the Lazufre volcanic complex, central Andes, two scales of uplift initiating during the observation time were observed: (1) a large-scale uplift showing an increase of the mean deformation rate and now affecting several eruptive centres, covering an area larger than 1800 km² and (2) a small-scale uplift located at the Lastarria volcano, which is the only volcano showing strong fumarolic activity in decades, with most of the clear deformation apparently not observed before 2000. Both the large and small uplift signals can be explained by magmatic and/or hydrothermal sources located at about 12-14 km and <1 km depth, respectively. Our research tests a possible relationship between these two volcanoes, tectonism and earthquakes.



Vulkane unter Spannung

Das magmatische und hydrothermale System aktiver Vulkane befindet sich oftmals in einem sogenannten „kritischen Zustand“, so dass Veränderungen des tektonischen Umfelds zu unerwarteten Eruptionsverläufen führen können. Statistische Analysen belegen, dass Vulkane nach tektonischen Erdbeben häufiger und mit größerer Magnitude ausbrechen (Eggert und Walter, 2009). Zudem ereigneten sich die explosivsten Eruptionen des 20. Jahrhunderts an Vulkanen, die vorher über Jahrzehnte keinerlei Eruptionstätigkeit zeigten. Inaktive Vulkane können innerhalb kurzer Zeit erwachen.

In unserer zunehmend vernetzten technischen Zivilisation wirken sich weit entfernte Vulkanausbrüche auch auf die europäischen Wirtschaftssysteme aus, wie beispielsweise bei der Eruption am Eyjafjallajökull in Island im Jahr 2010 deutlich wurde. Diese Vulkaneruption kündigte sich durch Aufwölbungen der Kruste an. Für Vulkanologen ist es daher ein wichtiges Anliegen, große und sich schnell entwickelnde Vulkansysteme mit Deformationsmessungen zu überwachen und die physikalischen Vorgänge besser zu verstehen.

Da Vulkane vermutlich durch äußere, oftmals auch in größerer Entfernung liegende, tektonische Vorgänge aktiviert werden können, untersucht das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ neue Wege der Messtechnik, sowie die Wechselwirkungen zwischen zeitlich bzw. räumlich benachbarten geologischen Phänomenen wie Erdbeben und Vulkantätigkeit. Die umfangreichen geodynamischen Untersuchungen des GFZ im Rahmen seines Plattenrandobservatoriums Chile sind dabei eine ideale Basis für diese Arbeiten (vgl. dazu den Beitrag von Victor et al. in diesem Heft).

Großräumige Deformationsmuster sind an Vulkanen über Satellitenradar nicht nur detektierbar, sondern, wie hier im Folgenden veranschaulicht, auch über einen längeren Zeitraum überwachbar. Mit diesen Daten können Änderungen von Deformationsraten abgeschätzt und Aussagen zu möglichen Ursachen gemacht werden. Die Deformationsraten geben indirekt auch Aufschluss über sich in der Tiefe ansammelnde Magmenmengen.

Aufwölbung am Lazufre

Das Vulkanfeld des Lazufre liegt in der chilenisch-argentinischen Grenzregion, etwa 250 km östlich des Subduktionsgrabens (Abb. 1). Es ist Teil des Altiplano-Puna-Plateaus, welches seit dem Eozän als Folge der Subduktion der Nazca-Platte unter die Südamerikanische Platte emporgehoben wird (Oncken et al., 2006). GFZ-Forschungen zeigen, dass das Vulkanfeld über 40 morphologisch



Abb. 1: Fotografien des Vulkans Lastarria, einem holozänen Stratovulkan in den Zentralanden aus den Jahren 1980, 2002 und 2008. Die aus Satellitendaten bestimmte aktive Bodenverformung dieser Region macht deutlich, dass Lastarria nur ein kleiner Teil einer sehr viel größeren, sich stark aufwölbenden Vulkanregion ist.

Fig. 1: Photographs of Lastarria volcano, a holocene stratovolcano in the Central Andes. The photographs were taken in 1980, in 2002 and in 2008. Active deformation at Lastarria is detected using satellite radar interferometry and suggest that Lastarria is a small part of a much larger volcanic system referred to as Lazufre.

identifizierbare vulkanische Zentren umschließt. Eines der prominentesten ist durch den Gipfel des Vulkans Lastarria geprägt, der mit 5700 m über die Umgebung emporragt (Abb. 1). Seine bislang bekannte Aktivität beschränkt sich auf Schwefelgasflüsse und Entgasung an Fumarolen. Historische magmatische Eruptionen sind nicht überliefert und das Vulkanfeld wurde bisher auch nicht als potentiell aktives Vulkansystem in den Fachkatalogen registriert. Dass sich die Aktivität innerhalb weniger Jahre jedoch stark verändern kann, zeigen die neuesten Untersuchungen am Vulkanfeld Lazufre im Rahmen des Plattenrandobservatoriums Chile. Mit der InSAR-Methode (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ist eine sich beginnende Aufwölbung am Lazufre-Vulkanfeld nachweisbar (Pritchard und Simons, 2002).

Nachdem zunächst keinerlei Aktivität gemessen wurde, konnten nur wenig später bereits deutliche Hebungsraten von etwa



Kontakt: Thomas R. Walter
(twalter@gfz-potsdam.de)

1 cm/Jahr registriert werden. Das Ausmaß dieser „Beule“ vergrößerte sich zunehmend, sie wuchs innerhalb weniger Jahre auf einen Durchmesser von über 50 km an (Ruch et al., 2008). Um die zeitliche Veränderlichkeit des Verformungsmusters genauer zu analysieren, hat das GFZ die Satellitenradardaten der vergangenen 15 Jahre im verfügbaren Katalog der Europäischen Raumfahrtbehörde analysiert und beginnt nun, diese Daten zu untersuchen.

Vermessung der Deformation seit 1995

Für die Verformungsmessungen des Lazufre-Vulkanfelds werden – in enger Kooperation mit der Europäischen Raumfahrtbehörde (ESA) – Daten mit den europäischen Radarsatellitenmissionen ERS1/2 und Envisat erhoben und mit dem Institut für Elektromagnetische Fernerkundung (IREA) prozessiert. Bei der Methodik werden von jeweils zwei Aufnahmen die Phasen-

differenzen berechnet, um eine mittlere Bewegung zwischen dem ersten und zweiten SAR-Bild in eindimensionaler Form, d. h. in der sogenannten Line-of-Sight, zu erhalten. Um mögliche Fehlerquellen zu minimieren, werden Datenpaare mit geringer zeitlicher Dekorrelation verwendet. Am GFZ werden überwiegend solche Interferogramme analysiert, bei denen die Basislänge während der Radaraufnahme, d. h. die jeweilige Satellitenposition, sehr gut bestimmt ist und eng beieinander liegt. Innerhalb des Beobachtungszeitraums lassen sich so mehr als 150 Interferogramme berechnen und in einer Zeitreihe kombinieren. Neu entwickelte Filter reduzieren dabei zeitlich variable Fehlerquellen wie z. B. Atmosphäreinflüsse. Das Produkt dieser Prozessierungen ist eine hochauflösende Deformationszeitreihe an weit mehr als 1 Mio. Datenpunkten mit einer jährlichen Standardabweichung von 0,1 bis 0,2 cm.

Die Resultate unserer Untersuchungen liefern neue Erkenntnisse über gekoppelte Vulkane und damit verbundene Prozesse

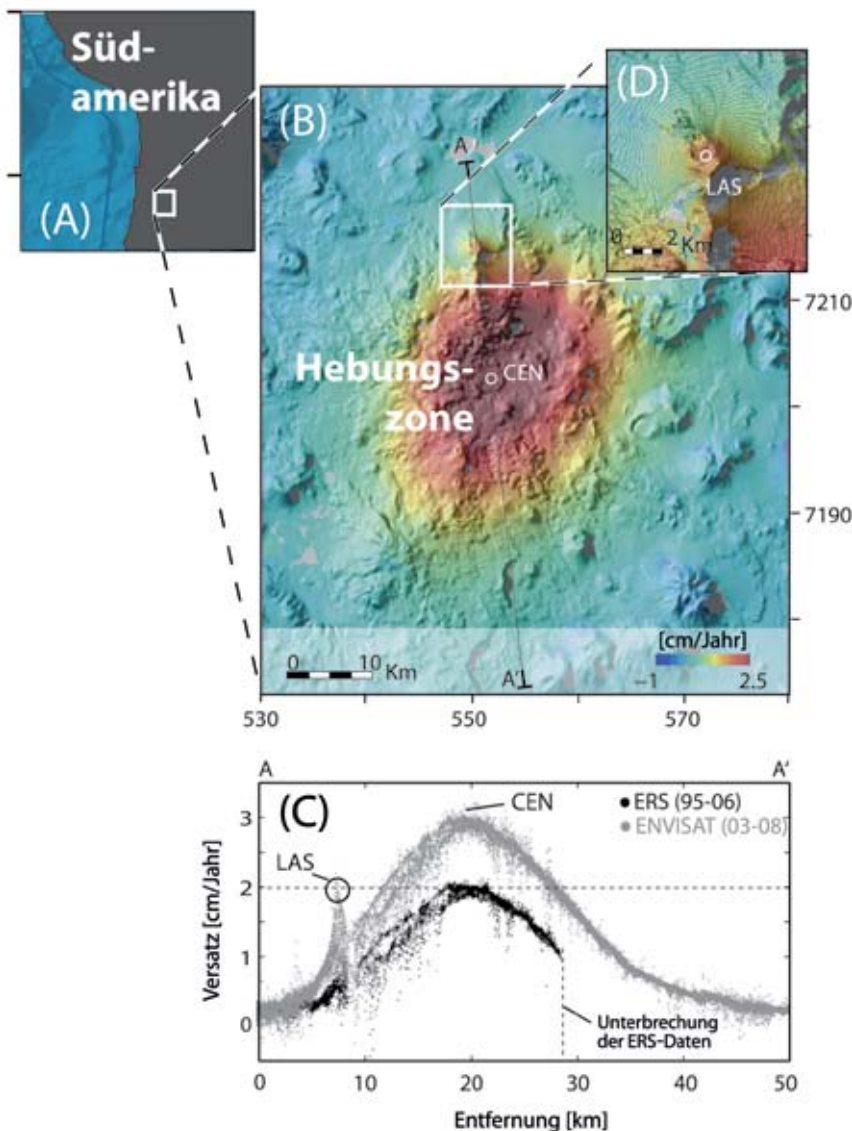


Abb. 2: A) Lage des Lazufre-Vulkanfelds in den südamerikanischen Zentralanden. B) Verformungskarte (mittlere Hebungsrate von ENVISAT; rot: Hebungszone). C) Profil von NNW nach SSE durch die Hebungszone für zwei unterschiedliche Datensätze (ERS von 1995 bis 2006, schwarze Punkte und Envisat von 2003 bis 2008, graue Punkte). D) Verformungsmuster des Vulkans Lastarria (LAS)

Fig. 2: Deformation at the Lazufre volcanic area in the Central Andes (A, B). Shaded relief maps with InSAR observation (mean velocity map for ENVISAT) shows uplift region in red. (C) NNW-SSE profiles across the deformation areas for the ERS dataset from 1995 to 2006 (black) and for the ENVISAT dataset (grey) from 2003 to 2008. (D) Details of Lastarria (LAS) volcano.

und Naturgefahren, wie beispielsweise Hangrutschungen. Die Deformation im Lazufre-Vulkanfeld ist beulenartig und erstreckt sich auf einen elliptischen Bereich von über 50 km Länge und 35 km Breite (Abb. 2). Das Maximum der Hebung im Zentrum der Ellipse nimmt zu den Flanken graduell ab. Lokal werden an einigen Stellen steilere Gradienten der Deformationsraten sichtbar, was nur zum Teil mit Vulkanaktivität erklärt werden kann.

Die Satellitendaten zeigen erstmals, dass die Deformation im Jahr 1997 begann und seither ungewöhnlich rasant anwächst. Das davon betroffene Gebiet hat 1000 km² im Jahr 2000 überschritten, erreichte 2005 etwa 1500 km² und erfasst derzeit eine Fläche weit über 2000 km². Zum Vergleich: dies entspricht etwa der Fläche des Saarlands. Die Deformationsraten zeigen eine Zunahme der Aufwölbungsgeschwindigkeit von anfänglich nahezu 0 cm auf mehr als 3 cm jährlich.

Profile quer über die erwähnte Beule weisen insbesondere auf eine Region im Nordnordwesten hin, in der deutliche Deformationsgradienten zu beobachten sind. Die langwellige Deformation des Lazufre-Vulkanfelds ist hier durch ein sehr steiles, kurzwelliges Deformationssignal gestört (Abb. 3 und 4). Dies ist an exakt jener Stelle zu lokalisieren, wo Fumarolentätigkeit den Vulkan Lastarria markiert.

Ursachen der Beule von Lazufre

Wie aber analysiert man solch einen gewaltigen Datensatz? Die Strategie dabei ist, lediglich diejenigen Datenpunkte in der Modellierung zu berücksichtigen, die ein Deformationsverhalten zeigen, das jenem im Zentrum der Beule von Lazufre ähnelt. Der lineare Korrelationskoeffizient nach Pearson erlaubt jene Messpunkte zu identifizieren, die zu 95 % einem Trend ähnlich unseres Referenzpunkts (CEN) folgen. Für den verbleibenden Datensatz lässt sich nun ein heuristisches Optimisierungsverfahren anwenden. Hierbei wird am Computer beispielsweise eine Magmaintrusion und die damit verbundene Oberflächenbewegung simuliert und mit den Satellitenradardaten abgeglichen. Dies lässt sich hundertfach wiederholen, um ein Konfidenzintervall zu erhalten und die Qualität der Quellparameter zu prüfen. Die Modelle erlauben somit einen indirekten Blick in die Tiefe, d. h. sie geben einen Hinweis auf die Ursache der Aufwölbung von Lazufre. Sowohl die Lage, als auch die exakte Geometrie und Volumenveränderung von magmatischen Körpern können so bestimmt werden. Bei Zeitreihen lassen sich zudem die Aufstiegsgeschwindigkeiten des Magmakörpers abschätzen – ein wichtiger Beitrag zur Frühwarnung.

Am Beispiel Lazufre können mit derartigen Modellrechnungen über 97 % der Deformationsdaten mit einem ausgedehnten, subhorizontalen und in Nordost-Richtung elongierten Öffnungsbruch (dem Lagergang) simuliert werden. Die dabei rekonstruierte Tiefe des Öffnungsbruchs liegt relativ tief, zwischen 12 und 14 km, und scheint während des gesamten

Beobachtungszeitraums nahezu konstant in der Lage zu sein. Dies bedeutet, dass der Magmakörper nicht zur Erdoberfläche aufsteigt – ein Grund zur Entwarnung?

Eine Prüfung der Qualität des Deformationsmodells ist über die sogenannte Residuumanalyse möglich (Abb. 3). Hierbei wird an jedem Pixel das simulierte Deformationsmuster vom Echtdatensatz subtrahiert, um darzustellen wo und in welcher Güte das Modell die InSAR-Daten erklärt. Das Residuum der untersuchten Daten beträgt grundsätzlich weniger als 0,2 cm/Jahr, d. h. der Datensatz ist hinreichend erklärt. Eine markante Ausnahme bildet jedoch das lokale Deformationsfeld am Lastarria, dem entgasenden Vulkan im Nordwesten der großen Beule (siehe Abb. 1).

Das Residuum von Lastarria umfasst etwa 50 km² und erreicht Hebungsraten von über 1 cm/Jahr. An diesem lokalen Deformationsmuster lässt sich nun die oben beschriebene Inversion wiederholen, um eine mögliche zweite magmatische Quelle zu lokalisieren. Die Modelle schlagen hier eine nahezu kreisrunde Druckquelle vor. Ausnahmen gibt es jedoch auch hier, diesmal an Fumarolenfeldern, sowie in Hangrutschbereichen (siehe Abb. 3).

Die für Lastarria postulierte Druckquelle liegt in einer Tiefe von 0,6 bis 0,9 km unterhalb des Gipfels. Da die Höhe des Lastarria relativ zur Umgebung bereits 1 km übertrifft, liegt die Ursache der Aufwölbung innerhalb des Vulkangebäudes, nicht darunter. Der Radius dieser Quelle ist etwa 300 m und expandiert aktuell mit einer jährlichen Rate von 13 000 m³. Da die Volumenverdrängung in eine Kraft pro Fläche konvertierbar ist, schätzen wir die jährlichen Druckveränderungen auf bis zu 4 MPa. Dies würde bei fünfjährigem Druckanstieg zu einer etwa 20 MPa großen Druckansammlung akkumulieren, was nach derzeitigem Kenntnisstand die Zugfestigkeit des Umgebungsgesteins deutlich übersteigt. Eine offene Frage ist daher, weshalb das Vulkanfeld Lastarria bzw. der steile und aktiv entgasende Vulkan Lazufre nicht bereits ausbrachen.

Somit zeigen die Satellitendaten nicht nur eine großräumige Hebung, sondern auch kleinräumige Deformationen an. Die geologischen Prozesse scheinen dabei eine Kombination aus tiefen und flachen Magmakammern, Hangrutschungen und Entgasungszonen zu sein, die räumlich und zeitlich gekoppelt auftreten.

Kopplung mit dem tektonischen Umfeld

Verglichen mit anderen Vulkansystemen hat sich das Lazufre-Vulkanfeld außergewöhnlich schnell entwickelt. Nach nur 10-jähriger Aufwölbungskarriere zählte es heute zu den fünf größten Vulkansystemen weltweit (Ruch et al., 2008). Vergleichbar in der Dimension sind derzeit die Aufwölbungen an der Yellowstone-Caldera oder an Long Valley (beide USA).

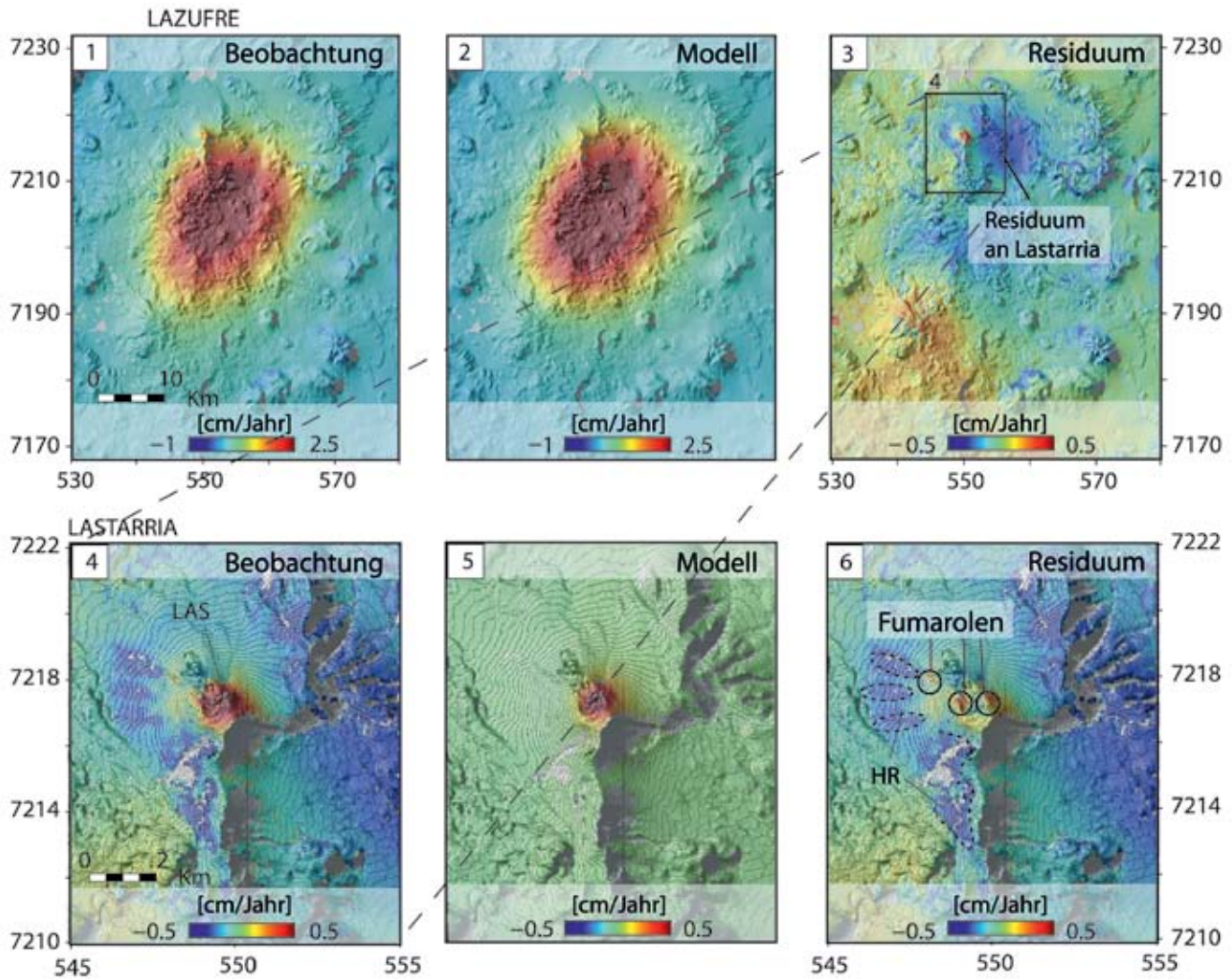


Abb. 3: Resultate der Inversionsrechnungen für das Lazufre-Vulkanfeld (2003 bis 2008). Oben: großes langwelliges Deformationssignal, 1: gemessene Beobachtung (InSAR), 2: Modellsimulation, 3: Residuum. Unten: kleinskaliges Deformationssignal, 4: Residuum am Lastarria, 5: lokale Simulation, 6: Residuum, hier die Differenz zwischen lokaler Simulation lokaler Beobachtung. Kreise und gestrichelte Linien markieren Hebungen an Fumarolen bzw. Absenkungen in Bereichen von Hangrutschungen (HR).

Fig. 3: Inversion results of the Lazufre deformation data for the period from 2003 to 2008. Large scale signal shown in upper row: (1) Observation data (InSAR), (2) synthetic models, and (3) residuals. Small scale signal shown in lower row: Observation data is the residual at Lastarria (4), (5) the synthetic model, and (6) residuals that highlight three fumarolic areas (black circles). Dashed lines indicate landslide typical flank movements (HR), which act on the western flank of the Lastarria volcano.

Das wohl größte und gefährlichste europäische Vulkanfeld, das sich derzeit aufwölbt, sind die Phlegräischen Felder nahe Neapel. Das gesamte Phlegräische Becken ist allerdings mit „nur“ 500 km² Fläche deutlich kleiner als das Lazufre-Vulkanfeld.

Was lässt sich weiterhin aus der Form der Aufwölbung ableiten? Auffallend am Lazufre-Deformationsmuster ist die elliptisch elongierte Form der Aufwölbung sowie des vermutlich darunter liegenden Öffnungsbruchs in Richtung Nordnordost. Über die detaillierte Kartierung vulkanischer Eruptionszentren, Spalten und anderer fernerkundlich erkennbarer Lineamente (Verwerfungen o. ä.) lässt sich in der Lazufre-Region das regionale Spannungsfeld abschätzen. Die morphometrischen Daten weisen auf einen ausgeprägten Trend der maximalen horizontalen Kompressionsspannung in Richtung Westnordwest hin. Diese Kompressionsachse liegt nahezu orthogonal zu der Längsachse

der Lazufre-Beule, was auf eine mögliche vultektonische Kopplung hindeutet. Dies lässt sich mit dem seismologisch abschätzbaren Spannungsfeld vergleichen, wobei im Fall des Lazufre die Platznahme von Magma bevorzugt senkrecht zur horizontalen Kompressionsachse geschieht. Die beobachteten Strukturen können auch darauf hinweisen, dass die gegenwärtige Aufwölbung entweder durch ältere Schwächezonen kontrolliert ist, oder aber, dass das ältere Spannungsfeld noch dem heutigen entspricht. In beiden Fällen deutet dies erneut auf die enge Wechselwirkung von Vulkanen bzw. Magmenansammlungen in der Tiefe mit der tektonischen Umgebung hin. Ein besseres Verständnis von Spannungsfeldern und älteren Schwächezonen ließe demnach eine Prognose zu erwartender Magmabewegungen zu.

Statistische Analysen zu Vulkanismus werden am GFZ unternommen und stützen sowohl in Südamerika und auch

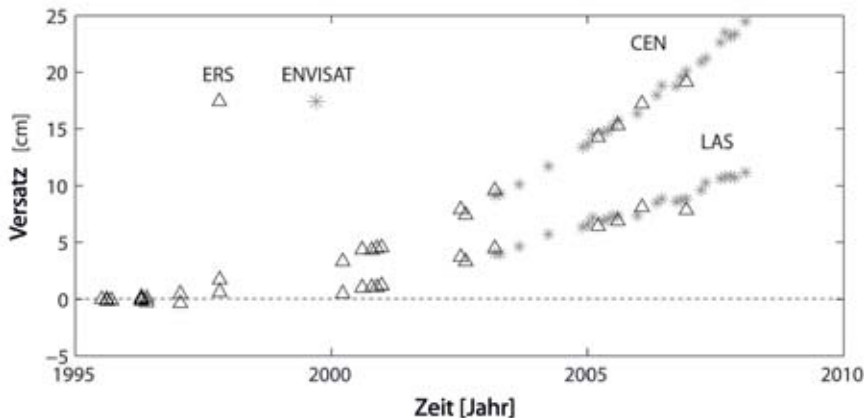


Abb. 4: Die Zeitreihen der Satellitendaten von ERS (schwarze Dreiecke) und ENVISAT (graue Sternsymbole) stimmen mit den maximalen Hebungen an den Beobachtungspunkten im Zentrum von Lazufre (CEN) und Lastarria (LAS) (siehe Abb. 2) überein.

Fig. 4: Time series plot for the ERS (black triangle) and ENVISAT (grey stars) datasets for two observations points that correspond to both maximum displacements at Lazufre (CEN) and Lastarria (LAS) (cf. fig. 2).

weltweit die Hypothese, dass Vulkane über große Subduktionserdbeben mit dem tektonischen Umfeld gekoppelt sind. Neue Vulkaneruptionen können demzufolge insbesondere im Nahfeld (bis 250 km) von Subduktionserdbeben erwartet werden. Die Entfernung des Lazufre-Systems von möglichen größeren Erdbeben an der Subduktionszone Chiles entspricht etwa dieser signifikanten Schwelle. Zukünftige Untersuchungen könnten daher die Hypothese weiter untermauern und vor allem zur Klärung der dabei wirkenden Prozesse beitragen.

Im Jahr 2008 startete das GFZ gemeinsam mit deutschen universitären Partnern und in Kooperation mit chilenischen Partnern detaillierte seismologische Messkampagnen am Lazufre. Mit den dabei gewonnenen Daten soll geprüft werden, inwiefern das magmatische System durch lokale Seismizität beeinflusst wird und wie sich während der Messkampagne stattgefunden Subduktionsbeben an lokalen Netzen und Wellenformen darstellen. Diese Arbeiten können gemeinsam mit den Beobachtungen im Rahmen des IPOC zu einem besseren Verständnis der Subduktionsdynamik und der daran beteiligten Prozesse beitragen.

Ausblick

Untersuchungen im Rahmen des Plattenrandobservatoriums Chile mit seinen zahlreichen aktiven und insbesondere potentiell explosiven Vulkanfeldern zeigen, dass vulkanisch scheinbar inaktive Gebiete innerhalb weniger Jahre außergewöhnlich große Aufwölbungen bilden können. Die Lazufre-Region entwickelte sich so in kurzer Zeit von einem vulkanologisch unauffälligen Gebiet zu einem der größten aktiven Vulkanfelder der Erde. Das sich in der Tiefe ansammelnde Magmenvolumen beträgt über 100 Mio. m³ (Ruch et al., 2008), d. h. es übersteigt schon jetzt die Dimension der Eruption des isländischen Eyjafjallajökull im April 2010 bei weitem – bislang aber ohne Eruption.

Vor allem große explosive Vulkansysteme, die charakteristisch für die Zentralanden sind, zeigen eine Kopplung zur tektoni-

schen Umgebung und lassen sich in Plattenrandobservatorien in besonderer Weise untersuchen. Das Fernziel der Untersuchungen am GFZ liegt daher nicht nur darin, Vulkane und Magmenbewegungen im Untergrund besser zu verstehen, sondern die globale Bedeutung dieser sich dynamisch verändernden Vulkansysteme und möglicher unerwarteter Eruptionen zu bewerten.

Literatur

- Anderssohn, J., Wetzel, H.-U., Walter, T. R., Motagh, M., Djamour, Y., Kaufmann, H. (2008): Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling. – *Geophysical Journal International*, 174, 1, 287–294, 10.1111/j.1365-246X.2008.03805.x
- Eggert, S., Walter, T. R. (2009): Volcanic activity before and after large tectonic earthquakes: Observations and statistical significance. – *Tectonophysics*, 471, 1-2, 14-26, 10.1016/j.tecto.2008.10.003
- Oncken, O., Hindle, D., Kley, J., Elger, K., Victor, P., Schemmann, K. (2006): Deformation of the Central Andean Upper Plate System – Facts, Fiction, and Constraints for Plateau Models – In: Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V., Strecker, M., Wigger, P. (Eds.), *The Andes – Active Subduction Orogeny*, (Frontiers in Earth Sciences), Springer, 3-27
- Pritchard, M. E., Simons, M. (2002): A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes. – *Nature*, 418, 6894, 167-171, 10.1038/nature00872
- Ruch, J., Walter, T. R. (2010): Relationship between the InSAR-measured uplift, the structural framework, and the present-day stress field at Lazufre volcanic area, central Andes. – *Tectonophysics*, 492, 1-4, 133-140, 10.1016/j.tecto.2010.06.003
- Ruch, J., Manconi, A., Zeni, G., Solaro, G., Pepe, A., Shirzaei, M., Walter, T. R., Lanari, R. (2009): Stress transfer in the Lazufre volcanic area, Central Andes. – *Geophysical Research Letters*, 36, L22303, 10.1029/2009GL041276
- Ruch, J., Anderssohn, J., Walter, T. R., Motagh, M. (2008): Caldera-scale inflation of the Lazufre volcanic area, South America: Evidence from InSAR. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174, 4, 337-344, 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.009