

Vulkanmonitoring mittels bistatischer TanDEM-X SAR-Interferometrie

Julia Kubanek

Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Canada
E-Mail: julia.kubanek@mcgill.ca

Zusammenfassung

Seit 2011 untersuchen wir am geodätischen Institut die Eignung der innovativen bistatischen Satellitenmission TanDEM-X für das Monitoring aktiver Vulkane. Die TanDEM-X-Mission besteht aus den zwei nahezu identischen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X, die im engen Helix-Formationsflug als großes, Single-Pass SAR-Interferometer mit regulierbarer senkrechter Basislinie agieren. Das Hauptziel der Satellitenmission bestand in der Generierung eines globalen digitalen Elevationsmodells mit einer bisher noch nicht erreichten Auflösung entsprechend der HRTI-3 (High-Resolution Terrain Information) Spezifizierung oder besser. Im Gegensatz zur SRTM-Mission handelt es sich bei der TanDEM-X-Mission erstmalig um wiederkehrende Überflüge mit einem Wiederholintervall von elf Tagen. Die Differenzbildung digitaler Geländemodelle aus wiederholten Überflügen über dasselbe Gebiet hat sich als sehr geeignet erwiesen, um topographische Änderungen aktiver Vulkane während Eruptionen zu messen. Insgesamt wurden Untersuchungen an sechs verschiedenen Vulkanen durchgeführt und es konnten topographische und volumetrische Änderungen durch verschiedene Arten vulkanischer Aktivität gemessen werden. Diese Informationen bilden – zusammen mit anderen vulkanologischen Parametern – eine wichtige Grundlage für weitere vulkanologische Analysen hinsichtlich des Eruptions- und Gefährdungspotentials aktiver Vulkane.

1 Einleitung

Die Kenntnis der Topographie der Erdoberfläche bildet in verschiedenen erdwissenschaftlichen Disziplinen wie der Glaziologie, Hydrologie, Geologie oder Vulkanologie die Grundlage für weiterführende Untersuchungen. So werden topographische Daten beispielsweise genutzt, um den Verlauf von Lavafüssen oder pyroklastischen Strömen vergangener und zukünftiger Eruptionen zu modellieren. Topographische Information in Form digitaler Elevationsmodelle (DEMs) haben demzufolge in der Gefahrenanalyse aktiver Vulkane eine besondere Relevanz (Kubanek u. a., 2015). Nichtsdestotrotz ist die Erhebung und Bereitstellung aktueller topographischer Information eine große Her-

ausforderung. Nicht selten liegen topographische Daten nur für sehr kleine Ausschnitte der Erdoberfläche vor oder die Daten sind bereits bei ihrer Veröffentlichung veraltet und somit für wissenschaftliche Zwecke unzureichend. Dies betrifft vor allem Landschaften, die einem extrem schnellen Wandel unterliegen können, wie beispielsweise durch vulkanische Aktivität. Die bistatische Satellitenmission TanDEM-X ermöglichte erstmalig die wiederholte Generierung digitaler Elevationsmodelle mittels Radarinterferometrie (InSAR, englisch: synthetic aperture radar (SAR) interferometry). Die einmalige Möglichkeit wiederkehrender Aufnahmen ermöglicht die Berechnung von Zeitreihen digitaler Elevationsmodelle. Durch Differenzbildung

Erschienen bei KIT Scientific Publishing
Schriftenreihe des Studiengangs
Geodäsie und Geoinformatik 2018,1

DOI Einzelbeitrag:
10.5445/KSP/1000080230

Festschrift zur Verabschiedung von
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernhard Heck
(Schw)Ehre, wem (Schw)Ehre gebührt

DOI Festschrift:
10.5445/KSP/1000080324



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung
- Weitergabe unter gleichen Bedin-
gungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0): [https://
creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en)

der zu verschiedenen Zeiten berechneten DEMs lassen sich topographische Änderungen aktiver Vulkane überwachen. Daneben können durch weiterführende Analysen wichtige vulkanologische Parameter, wie beispielsweise magmatische Aufstiegsraten, berechnet werden.

Das vorliegende Paper gibt einen Überblick über die vielfältigen TanDEM-X Studien, die zwischen 2011 und heute am Geodätischen Institut (GIK) des Karlsruher Instituts für Technologie durchgeführt wurden. Mit dem Hintergrund der Entwicklung einer möglichst allgemeingültigen Methodik wurden Untersuchungsgebiete in verschiedenen geographischen Kontexten gewählt, die zudem durch verschiedene Arten vulkanologischer Aktivität geprägt sind. Die Verschiedenheit der Untersuchungsgebiete ermöglichte dabei die Untersuchung unterschiedlicher vulkanischer Phänomene, die sich von kleineren bis zu sehr großen, komplette Gipfelbereiche zersprengende Eruptionen, bis hin zu Lavaflüssen und Domintrusionen erstrecken. Die folgenden Paragraphen geben jeweils einen kurzen Überblick über den jeweiligen Vulkan inklusive vulkanischer Charakteristik und der mittels TanDEM-X erzielten Ergebnisse.

2 Untersuchungsgebiete und Daten

Seit der Aufzeichnung der ersten TanDEM-X Daten für wissenschaftliche Zwecke im Juni 2011 wurden am GIK Daten an sechs verschiedenen Vulkanen untersucht. Abbildung 2.1 zeigt die Lage der Vulkane im globalen Kontext. Tabelle 2.1 gibt weiter einen Überblick über die vorhandenen TanDEM-X Szenen der Vulkane, einschließlich des Zeitraums der untersuchten Aktivität.

Die Vulkane sind durch unterschiedliche Arten vulkanologischer Aktivität geprägt. Merapi in Indonesien, Volcán de Colima in Mexiko sowie der Shiveluch in Kamtschatka, Russland, sind dombildende Stratovulkane, deren Aktivität primär durch effusive Domwachstumsphasen gekennzeichnet ist. Diese vorwiegend ruhigen Phasen werden unterbrochen durch schnellere Wachstumsraten und von gravitationsbedingten oder durch Explosionen hervorgerufene Domzerstörungen. Damit einhergehen können auch komplette Domzerstörungen, gefolgt von pyroklastischen

Strömen und Surges (Gertisser u. a., 2011). Surges sind heiße Gas- und Aschewolken, die in Überschallgeschwindigkeit die Hänge hinabgehen und alles in Reichweite zerstören. Bei pyroklastischen Strömen handelt es sich um eine Mischung aus heißen Gasen, vulkanischer Asche sowie Gesteinsfragmenten des Lava-domes. Pyroklastische Ströme bewegen sich mit Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h fort und können sich über mehrere Kilometer erstrecken.

Der Tolbachik befindet sich, wie auch der Shiveluch, auf der russischen Halbinsel Kamtschatka. Am Tolbachik konnten, wie auch am Etna auf Sizilien in Italien, basaltische Lavaflüsse zusammen mit der Entstehung monogenetischer Vulkane, beobachtet werden. Am Puyehue-Cordón Caulle in Chile konnte zusätzlich zu den neu gebildeten Lavafeldern die Intrusion eines gewaltigen Laccolithen, einer durch Magmaaufstieg neu gebildeten Kuppel, studiert werden.

3 Methodik

Die bistatische Aufnahmegeometrie der TanDEM-X-Satellitenmission erforderte in der Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software (DORIS) eine Änderung bei der Berechnung der interferometrischen Phase. Da im bistatischen Modus nur einer der Satelliten das elektromagnetische Signal emittiert, während beide das rückgestreute Signal empfangen, geht im Gegensatz zum monostatischen Aufnahmemodus in erster Näherung nur die einfache Weglängendifferenz in die interferometrische Phase ein:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r. \quad (3.1)$$

Dabei ist $2\pi/\lambda$ die Wellenzahl, λ die Wellenlänge und $\Delta r = r_1 - r_2$ die Weglängendifferenz. Aufgrund verschiedener geometrischer und physikalischer Einflüsse auf Δr enthält die interferometrische Phase eine Reihe von Anteilen (Hooper u. a., 2004):

$$\begin{aligned} \phi = & \phi_{\text{ref}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{def}} \\ & + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{bs}} + \phi_{\text{noise}}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Dabei ist ϕ_{ref} die Referenzphase, ϕ_{topo} die topographische Phase, ϕ_{def} die Phasenänderung durch den Versatz eines Rückstreuers am Boden in Blickrichtung des Satelliten (line-of-sight, LOS), ϕ_{atm} ein Phasenanteil

Tabelle 2.1: Prozessierte TanDEM-X Aufnahmen und untersuchte vulkanische Aktivität.

Vulkan	Aufnahme- geometrie	Prozessierte Szenen	Erste Szene	Letzte Szene	Untersuchte Vulkanische Aktivität
Merapi	Descending	3	2010-10-15	2011-11-04	2010-10-26 – 2010-11-08
Volcán de Colima	Descending	28	2011-06-08	2012-12-31	2011-06-26
Etna	Descending	100	2011-06-13	2017-03-03	Permanent aktiv
Puyehue-Cordón Caulle	Descending	6	2011-01-27	2012-03-25	2011-06-04 – 2012-03-15
Shiveluch	Ascending	25	2011-06-22	2014-09-11	Aktiv seit 1999-08-15
	Descending	20	2011-07-26	2014-09-12	
Tolbachik	Descending	18	2012-11-15	2014-02-09	2012-11-27 – 2013-08-27

durch atmosphärische Effekte, ϕ_{orbit} der Einfluss durch Orbitfehler, ϕ_{bs} die Rückstreueigenschaften am Boden und ϕ_{noise} ein Rauschanteil. Bei der bistatischen Aufnahme entfallen im Interferogramm die zeitabhängigen Phasenterme durch Atmosphäre, Bodenbewegungen und veränderte Rückstreuung. Da die Bestimmung der TanDEM-X-Satellitenorbits mit 4-5 cm bereits sehr genau ist (Wermuth u. a., 2009) und sich zusätzlich die relative Position der zwei Satelliten millimetergenau bestimmen lässt (Montenbruck u. a., 2011), kann der Einfluss von Orbitfehlern vernachlässigt werden. Die Gleichung der Phase vereinfacht sich daher zu

$$\phi = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{noise}}. \quad (3.3)$$

Die komplexwertigen Interferogramme werden mittels des in DORIS implementierten Goldsteinfilters gefiltert. Die Auflösung der Phasenmehrdutigkeiten erfolgt mit dem Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping (SNAPHU) (Chen und Zebker, 2001). Die abgewickelte Phase wird mithilfe des Algorithmus von Schwäbisch (1995) in Höhe konvertiert, wobei wiederum die bistatische

Aufnahmegeometrie berücksichtigt werden muss. Im Anschluss werden die generierten Höhen in DORIS geocodiert. Das Gridding erfolgt mit Hilfe des Nearneighbor-Algorithmus der Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel u. a., 2013).

Der doppelt-differentielle Datenprozessierungsansatz basiert auf der initialen Generierung eines Prä-Eruptions-DEMs, dessen Phase die Prozessierung der Syn- und Post-Eruptions-DEMs unterstützt (Abb. 3.1). Die Prozessierung aller verfügbaren bistatischen Datensätze ergibt die Topographie des Untersuchungsgebietes zu verschiedenen Zeitpunkten. Im Anschluss können über Differenzbildung der DEMs vulkanologische Parameter wie von Lava bedeckte Fläche, das Volumen der ausgestoßenen Lava sowie die magmatischen Förderraten berechnet werden.

4 Ergebnisse

Die abgeleiteten Ergebnisse sind genau wie die Charakteristiken der verschiedenen Vulkane sehr Vielfäl-



Abbildung 2.1: Weltkarte mit der Lage der untersuchten Vulkane.

Die Hauptergebnisse jedes Vulkans werden im Folgenden kurz wiedergegeben.

4.1 Volcán de Colima

Volcán de Colima befindet sich 30 km nördlich der Stadt Colima im gleichnamigen Staat im Westen Mexikos. Er gehört zu den aktivsten Vulkanen in Nordamerika. Die historische Aktivität war stark periodisch geprägt und bestand aus etwa 100-jährigen, durch domwachstum geprägten Zyklen, die durch kleinere und große Eruptionen bis hin zu kompletten Domzerstörungen unterbrochen wurden (Lavallée u. a., 2012; Luhr und Carmichael, 1980).

Volcán de Colima's rezente Aktivität (bis 2011) bestand aus vier Domwachstumsphasen in 1998–1999, 2001–2003, 2004 und 2007–2011 (Savov u. a., 2008). Jede dieser Phasen war durch Explosionen nach der Wachstumsphase geprägt (Varley u. a., 2010). Abbildung 4.1 zeigt den Lavadom im November 2012.

Die letzte der genannten Wachstumsphasen war Gegenstand der Untersuchungen mittels TanDEM-X. Am 21. Juni 2011 signalisierte eine kleinere Explosion am westlichen Kraterrand das Ende des Magmenaufstiegs,

der sich bis dahin im wachsenden Vulkandom geäußert hatte (James und Varley, 2012).



Abbildung 4.1: Vulkandom des Volcán de Colima im November 2012.

Die durch die Explosion entstandenen Materialverluste im Gipfelbereich konnten mittels TanDEM-X mit $-0,189 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \pm 0,027 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bestimmt werden. Die maximale Höhenänderung betrug -20 m . Die Ergebnisse konnten durch eine photogrammetrische Studie von James und Varley (2012) belegt werden, in der die Autoren photogrammetrische DEMs des Vulkangipfels generierten, um Volumenkalkulationen durchzuführen.

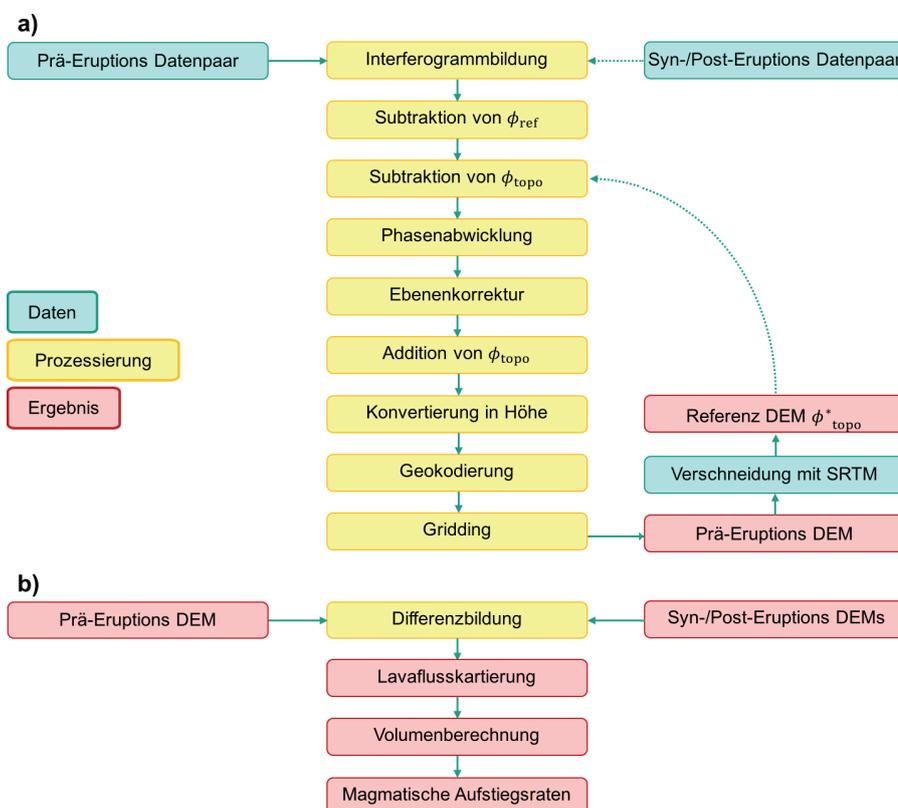


Abbildung 3.1: Schematischer Ablauf der Datenprozessierung.

4.2 Merapi

Merapi auf der Insel Java in Indonesien gehört zu den gefährlichsten Vulkanen weltweit (Pallister u. a., 2013). Die letzte verheerende Eruption ereignete sich am Merapi im Oktober und November 2010 (Surono u. a., 2012; Pallister u. a., 2013). Die erste große Explosion am 26. Oktober 2010 führte zu einer vollständigen Zerstörung des alten Lavadoms, der sich am Ende der vorigen großen Eruption in 2006 gebildet hatte (Charbonnier und Gertisser, 2008). Darauf folgte eine Phase stark erhöhten Domwachstums bis zu einem erneuten Domkollaps, der sich zwischen dem 4. und 5. November ereignete. Am Tag darauf bildete sich ein neuer Lavadom. Nur wenige Tage später verlangsamte sich das Domwachstum bereits und auch die gesamte vulkanische Aktivität kam zum Erliegen.

Die Topographie des Merapi wurde im Gipfelbereich durch die Eruptionen grundlegend verändert. Abbildung 4.2 zeigt die Topographie nach der Eruption. Die am Merapi gemessenen maximalen Höhenänderungen betragen mit etwa -200 m das zehnfache von den gemessenen Höhenänderung am Volcán de Colima. Der Volumenverlust im Gipfelbereich konnte mittels TanDEM-X mit $-18,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \pm 0,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bestimmt werden.



Abbildung 4.2: Die zerklüftete Topographie des Merapi in Indonesien im September 2014.

4.3 Shiveluch

Der Shiveluch ist einer der aktivsten Vulkane Kamtschatkas. Seit seiner letzten plinianischen Eruption 1964 ist seine Aktivität durch alternierendes Domwachstum, fumarolische Aktivität und explosive Eruptionen geprägt. Die letzte aktive Phase des Shiveluchs begann 1999 und setzt sich bis heute fort. Abbildung 4.3 zeigt den von der International Space Station (ISS) aus aufgenommenen Shiveluch.

Vom Shiveluch wurden zwischen 2011 und 2014 insgesamt 42 DEMs generiert (Heck u. a., 2016). Zur Untersuchung der topographischen Änderungen wurden vier verschiedene Zonen definiert: Zone (1) umfasst den wachsenden Dom, was zu einem Volumengewinn von $93,53 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \pm 0,31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ führte. Zone (2) umfasst den Domkollaps mit $-15,58 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \pm 0,12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ und Zone (3) die pyroklastischen Ströme im Südwesten des Lavadoms mit $58,66 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \pm 0,08 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Die Zone (4) beinhaltet mit $24,84 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \pm 0,03 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ die pyroklastischen Ströme südlich des Lavadoms. Am Shiveluch konnte erstmalig ein wachsender Lavadom mittels TanDEM-X beobachtet werden (Heck u. a., 2016).



Abbildung 4.3: Von der ISS aufgenommenes Foto vom Shiveluch im Juli 2007. Quelle: NASA/JSC by Wikimedia Commons.

4.4 Tolbachik

Der Tolbachik befindet sich auf der russischen Halbinsel Kamtschatka und wird von den zwei morphologisch verschiedenen, überlappenden Vulkanen Ostry und Plosky Tolbachik gebildet (Abb. 4.4). Rezente Eruptionen ereigneten sich entlang einer von Nordost nach Südwest verlaufenden Spalte mit großen Eruptionen in 1941 und 1975–76 sowie die mit TanDEM-X Daten untersuchte Eruption, in der zwischen 2012–2013 $530 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \pm 7,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ basaltische Lava eruptierten (Abb. 4.4). Am Tolbachik wurden zwischen 2012 und 2013 insgesamt 18 digitale Elevationsmodelle aus TanDEM-X Daten generiert (Kubanek u. a., 2015, 2017). Dadurch konnte der zeitliche Verlauf der eruptierten Lava studiert sowie magmatische Förderraten berechnet werden. Die mit TanDEM-X erzielten Ergebnisse sind in gutem Einklang mit einer Studie von Dvigalo u. a. (2014), in der photogrammetrische DEMs generiert wurden, um Einblicke in die Eruptionsdynamik der 2012–2013 Eruption zu erhalten.



Abbildung 4.4: Die Lavaflüsse am Tolbachik am 27.12.2012. Quelle: Jesse Allen and Robert Simmon by Wikimedia Commons.

4.5 Etna

Der Etna an der Ostküste Siziliens in Italien gehört weltweit zu den aktivsten Vulkanen. Mit der nahezu kontinuierlichen Aktivität geht eine stetige Veränderung des Gipfelbereiches einher. Gerade der sich seit 2011 bildende neue Südostkrater (New Southeast Crater, NSEC) sowie die von ihm ausgehende vulkanische Aktivität konnten zwischen 2011 und 2017 mittels TanDEM-X untersucht werden (Raible und Kubanek, 2016). Abbildung 4.5 zeigt eine Eruption des NSEC am 27. Mai 2014. Die mit TanDEM-X am Etna erzielten Ergebnisse geben wichtige Einblicke in das vulkanische System.



Abbildung 4.5: Eruption an Etna's NSEC. Quelle: Angelo T. La Spina by Wikimedia Commons.

4.6 Puyehue-Cordón Caulle

Puyehue-Cordón Caulle ist ein aktiver Vulkankomplex in den Anden Chiles. Explosive bis effusive rhyodazitische Eruptionen haben in 1920–1921, 1960 und in 2011–2012 stattgefunden (Jay u. a., 2014). Die Eruption in 2011–2012 gilt als eine der wissenschaftlich am besten dokumentierten rhyodazitischen Eruptionen und ist daher für das Verständnis dieser gewaltigen explosiven, aber dennoch seltenen Eruptionen von ent-

scheidender Bedeutung. Mittels der aus TanDEM-X Daten erzeugten digitalen Elevationsmodelle konnte während der ersten zweieinhalb Monate eine Hebung im Bereich des aktiven Vulkanschlots von etwa 220 m gemessen werden. Zusätzlich konnten die in Abbildung 4.6 gezeigten Lavaflüsse kartiert werden.



Abbildung 4.6: Die Lavaflüsse am Puyehue-Cordón Caulle. Quelle: Digital Globe aus Google Earth.

5 Zusammenfassung

Das Paper gibt einen Überblick über die seit 2011 am GIK durchgeführten Forschungsansätze, TanDEM-X in der Vulkanforschung einzusetzen. Die Vielfältigkeit der untersuchten vulkanischen Aktivität zeigt, dass innovative Satellitenmissionen wie TanDEM-X einen großen Mehrwert für die Vulkanforschung haben.

6 Danksagung

Ein herzliches Dankeschön geht an das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Bereitstellung der verwendeten TanDEM-X Daten, sowie für die Förderung eines Großteils der Studien mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter Fördernummer 50 EE095, basierend auf einer Entscheidung des Deutschen Bundestages.

Der größte Dank geht schließlich an Professor Bernhard Heck für die Ermöglichung des TanDEM-X Projektes am Lehrstuhl für Physikalische- und Satellitengeodäsie des GIK. Danke, für die finanzielle und mentale Unterstützung bei der Durchführung der Arbeiten und für Ihr großes Vertrauen.

Literatur

- Charbonnier, S. J. und Gertisser, R. (2008): Field observations and surface characteristics of pristine block-and-ash flow deposits from the 2006 eruption of Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 177:971–982. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.07.008.
- Chen, C. W. und Zebker, H. A. (2001): Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in non-linear optimization. *Journal of the Optical Society of America A* 18(2):338–351. DOI: 10.1364/JOSAA.17.000401.
- Dvigalo, V. N., Svirid, I. Y. und Shevchenko, A. V. (2014): The first quantitative estimates of parameters for the Tolbachik fissure eruption of 2012–2013 from aerophotogrammetric observations. *Journal of Volcanology and Seismology* 8(5):3–11. DOI: 10.1134/S0742046314050029.
- Gertisser, R., Charbonnier, S. J., Troll, V. R., Keller, J., Preece, K., Chadwick, J. P., Barclay, J. und Herd, R. A. (2011): Merapi (Java, Indonesia): anatomy of a killer volcano. *Geology Today* 27(2):57–62. DOI: 10.1111/j.1365-2451.2011.00786.x.
- Heck, A., Kubanek, J., Westerhaus, M., Gottschämmer, E., Heck, B. und Wenzel, F. (2016): Lava emplacements at Shiveluch volcano (Kamchatka) from June 2011 to September 2014 observed by TanDEM-X SAR-Interferometry. In: General Assembly of the European Geosciences Union. Geophysical Research Abstracts. 17.-22. April 2016, Vienna, Austria, no. EGU2016-4401.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. und Kampes, B. (2004): A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters* 31:1–5. DOI: 10.1029/2004GL021737.
- James, M. R. und Varley, N. (2012): Identification of structural controls in an active lava dome with high resolution DEMs: Volcán de Colima, Mexico. *Geophysical Research Letters* 39:L22303. DOI: 10.1029/2012GL054245.
- Jay, J., Costa, F., Pritchard, M., Lara, L., Singer, B. und Herrin, J. (2014): Locating magma reservoirs using InSAR and petrology before and during the 2011–2012 Cordón Caulle silicic eruption. *Earth and Planetary Science Letters* 395:254–26. DOI: doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.046.
- Kubanek, J., Richardson, J. A., Charbonnier, S. J. und Connor, L. J. (2015): Lava flow mapping and volume calculations of the 2012–13 Tolbachik, Kamchatka fissure eruption using bistatic TanDEM-X InSAR. *Bulletin of Volcanology* 77(106):1–13. DOI: 10.1007/s00445-015-0989-9.
- Kubanek, J., Westerhaus, M. und Heck, B. (2017): TanDEM-X time series analysis reveals lava flow volume and effusion rates of the 2012–13 Tolbachik, Kamchatka fissure eruption. *Journal of Geophysical Research* 122(10):7754–7774. DOI: 10.1002/2017JB014309.
- Lavallée, Y., Varley, N. R., Alatorre-Ibargüenito, M. A., Hess, K.-U., Kueppers, U., Mueller, S., Richard, D., Scheu, B., Spieler, O. und Dingwell, D. B. (2012): Magmatic architecture of dome-building eruptions at Volcán de Colima, Mexico. *Bulletin of Volcanology* 74:249–260. DOI: 10.1007/s00445-011-0518-4.
- Luhr, J. F. und Carmichael, I. S. E. (1980): The Colima Volcanic Complex, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 71:343–372. DOI: 10.1007/BF00374707.
- Montenbruck, O., Wermuth, M. und Kahle, R. (2011): GPS based relative navigation for the TanDEM-X mission – First flight results. *Navigation* 58(4):293–304. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2011.tb02587.x.
- Pallister, J., Schneider, D. J., Griswold, J. P., Keeler, R. H., Burton, W. C., Noyles, C., Newhall, C. G. und Ratdomopurbo, A. (2013): Merapi 2010 eruption — Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar used in eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 261:144–152. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.07.012.
- Raible, B. und Kubanek, J. (2016): Application of bistatic interferometry to study lava flows at Etna volcano in Italy. Techn. Ber. KIT Scientific Reports, KIT Scientific Publishing (in preparation).
- Savov, I. P., Luhr, J. F. und Navarro-Ochoa, C. (2008): Petrology and geochemistry of lava and ash erupted from Volcán Colima, Mexico, during 1998–2005. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 174:241–256. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.02.007.
- Schwäbisch, M. (1995): Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle (in German). Techn. Ber. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Fernerkundungszentrum (DFD) Oberpfaffenhofen, Germany.
- Surono, Jousset, P., Pallister, J., Boichu, M., Buongiorno, M. F., Budisantoso, A., Costa, F., Andreastuti, S., Prata, F., Schneider, D., Clarisse, L., Humaida, H., Sumarti, S., Bignami, C., Griswold, J., Carn, S., Oppenheimer, C. und Lavigne, F. (2012): The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano – a '100-year' event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 241–242:121–135. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.06.018.
- Varley, N., Arambula-Mendoza, R., Reyes-Davila, G., Sanderson, R. und Stevenson, J. (2010): Generation of vulcanian activity and long-period seismicity at Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198:45–56. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2010.08.009.
- Wermuth, M., Hauschild, A., Montenbruck, O. und Jäggi, A. (2009): TerraSAR-X rapid and precise orbit determination. In: Proc. of 21st International Symposium on Space Flight Dynamics, 28. Sep. - 2. Oct. 2009, Toulouse, France,
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F. und Wobbe, F. (2013): Generic Mapping Tools: Improved version released. *EOS Transactions, American Geophysical Union* 94:409–410.